

# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE



GROUP ENERGY EFFICIENCY PUBLICATION

PUBLICATION GROUPEE SUR L'EFFICACITE ENERGÉTIQUE

**Adjustable speed electrical power drive systems (PDS) –  
Part 9-2: Ecodesign for motor systems – Energy efficiency determination and  
classification**

**Entraînements électriques de puissance (PDS) à vitesse variable –  
Partie 9-2: Écoconception des systèmes moteurs – Détermination et  
classification de l'efficacité énergétique**



**THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED**  
**Copyright © 2023 IEC, Geneva, Switzerland**

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Secretariat  
3, rue de Varembe  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)

#### **About the IEC**

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

#### **About IEC publications**

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigendum or an amendment might have been published.

#### **IEC publications search - [webstore.iec.ch/advsearchform](http://webstore.iec.ch/advsearchform)**

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee, ...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

#### **IEC Just Published - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)**

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and once a month by email.

#### **IEC Customer Service Centre - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)**

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: [sales@iec.ch](mailto:sales@iec.ch).

#### **IEC Products & Services Portal - [products.iec.ch](http://products.iec.ch)**

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

#### **Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)**

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 300 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 19 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

---

#### **A propos de l'IEC**

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

#### **A propos des publications IEC**

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

#### **Recherche de publications IEC -**

#### **[webstore.iec.ch/advsearchform](http://webstore.iec.ch/advsearchform)**

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études, ...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

#### **IEC Just Published - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)**

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

#### **Service Clients - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)**

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: [sales@iec.ch](mailto:sales@iec.ch).

#### **IEC Products & Services Portal - [products.iec.ch](http://products.iec.ch)**

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

#### **Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)**

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 300 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 19 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.



IEC 61800-9-2

Edition 2.0 2023-10

# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE



GROUP ENERGY EFFICIENCY PUBLICATION  
PUBLICATION GROUPEE SUR L'EFFICACITE ENERGÉTIQUE

**Adjustable speed electrical power drive systems (PDS) –  
Part 9-2: Ecodesign for motor systems – Energy efficiency determination and  
classification**

**Entraînements électriques de puissance (PDS) à vitesse variable –  
Partie 9-2: Écoconception des systèmes moteurs – Détermination et  
classification de l'efficacité énergétique**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

ICS 29.130.01; 29.160.30; 29.200

ISBN 978-2-8322-7576-4

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.  
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

## CONTENTS

FOREWORD.....	9
INTRODUCTION.....	11
1 Scope.....	12
2 Normative references .....	13
3 Terms, definitions and symbols.....	14
3.1 Terms and definitions.....	14
3.2 Symbols.....	18
4 PDS efficiency, reference CDM (RCDM) and reference motor (RM).....	26
4.1 General.....	26
4.2 Reference operating points of the PDS, RCDM, RM and associated losses.....	27
4.3 Combining PDS losses with the driven equipment – Workflow for the semi-analytical model (SAM) .....	29
4.4 IE Classes of line-fed motors .....	31
4.5 IE Classes of converter-fed motors .....	31
4.6 IE Classes of frequency converters (complete drive modules, CDM).....	31
4.7 IES Classes of a PDS .....	32
4.8 Consistency of IE and IES Classes .....	32
4.9 Determination of the IES class of a PDS by application of "reference" and "test" devices and guidance for the providers.....	33
5 Determination of CDM, motor and PDS loss by calculation .....	34
5.1 General.....	34
5.2 CDM losses .....	35
5.2.1 General procedure and definition of the CDM and the test load .....	35
5.2.2 Overall CDM losses .....	37
5.2.3 Loss determination of CDMs composed by combination of submodules .....	38
5.2.4 Validation of loss calculation method .....	40
5.3 Motor losses .....	40
5.3.1 General .....	40
5.3.2 Additional harmonic losses of three-phase asynchronous motors fed by a CDM .....	41
5.3.3 Motor loss data.....	41
5.4 Power drive system (PDS) losses .....	41
5.4.1 PDS losses.....	41
5.4.2 PDS losses at different switching frequencies.....	43
5.5 PDS losses for regenerative operation .....	44
5.6 Losses of motor starters .....	44
6 Limits of IE and IES Classes.....	44
6.1 General.....	44
6.2 CDM .....	45
6.3 Correction factors for CDMs with modified functionality.....	47
6.3.1 General .....	47
6.3.2 Correction factors .....	48
6.3.3 Reference losses and loss determination concept for CDMs and SDOMs with multiple AC outputs .....	49
6.4 Motor .....	51
6.5 PDS.....	51
7 Loss determination .....	52

7.1	General.....	52
7.2	Type testing of CDM or SDM for IE classification .....	53
7.3	Type testing of PDS for IES classification .....	54
7.4	Determination of losses by calculation .....	54
7.4.1	CDM or SDM losses by calculation .....	54
7.4.2	PDS losses by calculation.....	55
7.5	Determination of losses by measurement, Input-output method.....	55
7.5.1	Instrumentation.....	55
7.5.2	Test conditions .....	56
7.5.3	Input-output measurement of CDM losses .....	57
7.5.4	Input-output measurement of SDIM losses.....	59
7.5.5	Input-output measurement of SDOM losses .....	61
7.5.6	Input-output measurement of PDS losses .....	62
7.6	Calorimetric measurement of CDM losses.....	63
7.7	Flowcharts for test procedures .....	64
8	Requirements for the user's documentation .....	67
8.1	General.....	67
8.2	Information for selection .....	68
8.3	Information for determination of energy efficiency classification .....	68
8.4	Information on the determination of additional energy losses and part load conditions .....	68
8.4.1	General .....	68
8.4.2	Losses in part load conditions.....	68
8.4.3	Losses of accessories and options .....	69
8.4.4	Losses in stand-by mode .....	69
8.4.5	Regenerative mode .....	69
8.4.6	Characteristics and correction factors.....	69
Annex A (informative)	Losses of RCDM and example of IES class limit determination.....	70
A.1	Relative loss tables.....	70
A.2	Calculation of relative losses for IES classes .....	71
A.2.1	General .....	71
A.2.2	Determination of CDM relative losses .....	71
A.2.3	Determination of motor relative losses .....	72
A.2.4	Summation of PDS relative losses .....	72
Annex B (informative)	Description of the elements of an extended product using PDS with regard to their impact on losses.....	73
B.1	General.....	73
B.2	Losses in the mains cabling and feeding section.....	73
B.3	Input filter .....	75
B.3.1	High frequency EMI filter .....	75
B.3.2	Low frequency line harmonics filter.....	75
B.4	Input converter.....	76
B.4.1	General .....	76
B.4.2	Diode rectifier .....	76
B.4.3	Active infeed converter .....	76
B.4.4	Power factor of the input converter .....	78
B.4.5	Sub drive input module (SDIM) .....	79
B.5	DC link.....	79
B.6	Output inverter .....	80

B.6.1	General .....	80
B.6.2	Sub drive output model (SDOM) .....	81
B.7	Output filter and motor cables .....	81
B.7.1	General .....	81
B.7.2	Sine wave filters .....	82
B.7.3	$dV/dt$ filters and motor chokes.....	83
B.7.4	High frequency EMI motor filters.....	83
B.7.5	Motor cables.....	83
B.8	Motor .....	83
B.9	Mechanical load.....	83
B.10	Control and standby losses .....	84
B.11	Cooling losses .....	84
B.11.1	Primary cooling losses.....	84
B.11.2	Secondary cooling losses .....	84
Annex C (informative)	Mathematical model for CDM losses .....	85
C.1	General.....	85
C.2	Output inverter losses .....	85
C.2.1	General .....	85
C.2.2	Transistor on state losses.....	85
C.2.3	Freewheeling diode on state losses .....	86
C.2.4	Transistor switching losses.....	86
C.2.5	Freewheeling diode switching losses .....	87
C.2.6	Output inverter total losses.....	88
C.3	Input converter losses.....	88
C.3.1	Active infeed converter .....	88
C.3.2	Diode rectifier .....	88
C.4	Input choke losses .....	89
C.5	DC link losses.....	90
C.6	Current conductor losses .....	90
C.7	Control and standby losses .....	91
C.8	Cooling loss factor .....	91
C.9	Other CDM losses.....	91
Annex D (informative)	Converter topology.....	92
D.1	General.....	92
D.2	Voltage source output inverter topologies different from those mathematically described in Clause C.2.....	92
D.3	Voltage source input converter topologies different from those mathematically described in Clause C.3.....	92
D.4	CDM topologies different from voltage source type .....	93
Annex E (informative)	Interpolation of motor losses and motor current.....	94
E.1	General.....	94
E.2	Relative and reference values.....	94
E.3	Motor connections and operating ranges.....	95
E.4	Interpolation of motor losses .....	96
E.5	Interpolation of motor current.....	99
E.6	Determination of the interpolation coefficients.....	101
E.6.1	General .....	101
E.6.2	Analytical determination.....	101
E.6.3	Numerical determination .....	103

E.7	Achievable accuracies .....	104
E.8	Typical induction motor efficiency .....	104
Annex F (informative)	Application example for loss calculations of a CDM and a PDS .....	110
F.1	General.....	110
F.2	CDM loss determination .....	110
F.2.1	General .....	110
F.2.2	Loss determination by two-dimensional interpolation of losses of neighbouring loss points .....	111
F.2.3	Loss determination by the mathematical model described in Annex C.....	114
F.3	Loss determination of the motor .....	116
F.4	Loss determination of the PDS.....	117
F.5	Determination of part load factors for SDIMs.....	118
F.6	Application examples of reference losses and efficiency classes for modified functionality .....	119
F.6.1	General .....	119
F.6.2	Example 1 – IE classification of an SDIM.....	119
F.6.3	Example 2 – IE classification of an SDOM .....	119
F.6.4	Example 3 – IE classification of a CDM with regenerative capability and sinewave output filter.....	120
Annex G (informative)	Uncertainty of loss determination method.....	122
G.1	General.....	122
G.2	Calculation of uncertainty at randomly occurring errors .....	122
G.3	Comparison of uncertainties for different loss determination methods .....	122
Annex H (informative)	Calorimetric measurement for CDM losses .....	123
H.1	General.....	123
H.2	Calorimeter with two chambers with air as a cooling medium .....	123
H.3	Calorimeter with one chamber with air as a cooling medium .....	124
H.4	Calorimeter with liquid as a cooling medium.....	125
Annex I (informative)	PDS loss calculation above rated speed and torque .....	126
I.1	General.....	126
I.2	Operating points above rated torque .....	126
I.3	Operating points above rated speed.....	126
I.3.1	General .....	126
I.3.2	Dependency of motor losses on the CDM performance .....	126
I.3.3	Dependency of CDM on the motor performance .....	127
I.3.4	PDS loss calculation in the field weakening range up to 200 % of rated speed .....	127
Annex J (informative)	Explanation for correction factors for the reference losses in Table 8 .....	128
J.1	General.....	128
J.2	CDM .....	128
J.2.1	CDM without regenerative capability .....	128
J.2.2	CDM with regenerative capability .....	129
J.2.3	CDM with $DF_U \leq 10\%$ .....	130
J.2.4	CDM with a rated input voltage $\leq 250$ V (three phase) .....	130
J.2.5	CDM with single phase input.....	130
J.3	SDIM and SDOM .....	131
J.3.1	General .....	131
J.3.2	SDIM without regenerative capability .....	131

J.3.3	SDIM with regenerative capability .....	131
J.3.4	SDOM.....	132
J.4	CDM, SDIM and SDOM with external cooling .....	132
J.5	CDM and SDOM with multiple AC outputs .....	132
	Bibliography.....	133
	Figure 1 – Example of complete drive module (CDM) built by sub drive modules (SDM) .....	15
	Figure 2 – Illustration of the extended product with included motor system .....	16
	Figure 3 – Torque-speed-characteristic of servo PDS .....	17
	Figure 4 – Illustration of the operating points (shaft speed, torque) for the determination of relative losses of the power drive system (PDS) .....	28
	Figure 5 – Illustration of the operating points (shaft speed, torque) for the determination of relative losses of the reference motor (RM).....	28
	Figure 6 – Illustration of the operating points (relative motor stator frequency, relative torque current) for the determination of losses of the reference complete drive module (RCDM) .....	29
	Figure 7 – Illustration of the workflow to determine the energy efficiency index (EEI) of an extended product .....	30
	Figure 8 – Illustration how to combine different data sources to determine the energy efficiency index (EEI) of an extended product .....	31
	Figure 9 – Metrical relation .....	32
	Figure 10 – Guidance for CDM and motor providers for the usage of "test" and "reference" devices to determine the IE/IES classes .....	34
	Figure 11 – Illustration of a typical CDM and test load .....	35
	Figure 12 – Example of relative losses $p_{L,CDM}$ of the 9,95 kVA RCDM .....	38
	Figure 13 – Example of the relative power losses of PDS as function of speed and torque .....	43
	Figure 14 – Example representation of the relative power losses versus switching frequency of a 7,5 kW to 11 kW PDS .....	43
	Figure 15 – Example of a CDM with resistor for dissipating generated power.....	44
	Figure 16 – Illustration of IE Classes for a CDM.....	47
	Figure 17 – Topology of a CDM with multiple AC outputs .....	50
	Figure 18 – Losses of CDM or SDM are provided as the sum of the determined losses plus the uncertainty of the determination method .....	53
	Figure 19 – Input-output measurement setup for determination of CDM losses .....	58
	Figure 20 – Order of CDM measurements from [1] to [8] .....	58
	Figure 21 – Input-output measurement setup for determination of SDIM losses .....	60
	Figure 22 – Input-output measurement setup for determination of SDOM losses .....	61
	Figure 23 – Input-output measurement setup for PDS losses .....	62
	Figure 24 – Order of PDS measurements from [1] to [8] .....	63
	Figure 25 – Calorimetric measurement setup for determining CDM losses .....	64
	Figure 26 – Determination of IE classification for CDM and loss determination for part load operating points .....	65
	Figure 27 – Determination of IES classification for PDS and loss determination for part load operating points .....	66
	Figure B.1 – Overview of the extended product and energy flow .....	73
	Figure B.2 – Equivalent circuit of the mains and mains cabling .....	74

Figure B.3 – Illustration of a single-phase line harmonics filter .....	75
Figure B.4 – PDS with a diode rectifier input converter .....	76
Figure B.5 – PDS with a standard AIC input converter .....	77
Figure B.6 – PDS with a F3E-AIC input converter without line choke.....	77
Figure B.7 – Typical waveform of a diode rectifier line current .....	78
Figure B.8 – DC link circuit .....	79
Figure B.9 – DC link circuit with additional DC chokes .....	80
Figure B.10 – Output inverter of the PDS .....	81
Figure B.11 – Motor cable and optional output filter of the PDS .....	82
Figure B.12 – Typical waveform of inverter output voltage and motor voltage when using a sine wave output filter.....	82
Figure E.1 – Normalized torque and speed of ranges a and b for connection Y or D .....	95
Figure E.2 – Normalized torque and speed of ranges a and b for connection Y → D .....	96
Figure E.3 – Normalized torque and speed of range a for connection Y → YY .....	96
Figure E.4 – Normalized losses of an exemplary motor in connection Y or D .....	97
Figure E.5 – Normalized losses of an exemplary motor in connection Y → D .....	97
Figure E.6 – Normalized losses of an exemplary motor in connection Y → YY .....	98
Figure E.7 – Efficiency map of the exemplary motor in connection Y or D .....	98
Figure E.8 – Efficiency map of the exemplary motor in connection Y → D .....	99
Figure E.9 – Efficiency map of the exemplary motor in connection Y → YY .....	99
Figure E.10 – Line-current of the exemplary motor in connection Y or D .....	100
Figure E.11 – Line-current of the exemplary motor in connection Y → D .....	100
Figure E.12 – Line-current of the exemplary motor in connection Y → YY .....	101
Figure E.13 – Standardized operating points of IEC 60034-2-3 .....	102
Figure F.1 – Segments of operating points.....	110
Figure F.2 – Two-dimensional interpolation.....	111
Figure H.1 – One-step calorimetric measurement setup for comparative loss measurement (CDM and heating resistor are loaded simultaneously).....	123
Figure H.2 – Two-step calorimetric measurement setup for comparative loss measurement (CDM and heating resistor are not loaded simultaneously).....	124
Figure H.3 – Liquid cooled calorimetric measurement setup for CDM loss measurement.....	125
Table 1 – Minimum test load currents at different points of operation .....	36
Table 2 – Test load displacement factor between fundamental output current and fundamental output voltage at different points of operation .....	36
Table 3 – Example of relative losses of the 400 V/9,95 kVA reference CDM at the operating points described in Figure 6 .....	38
Table 4 – Active SDIM power ratio to be used for loss calculation at the CDM operating points.....	40
Table 5 – Reference parameter for Formula (13).....	42
Table 6 – Relative losses of the 400 V/7,5 kW PDS .....	42
Table 7 – Reference CDM losses for class IE1 definition .....	45
Table 8 – Correction factors for different CDM, SDIM and SDOM characteristics .....	49
Table 9 – Information requirements.....	67

Table A.1 – Relative losses (%) of reference CDMs (IE1) at different power ratings at the operating points described in Figure 6 .....	70
Table A.2 – Relative losses of the 9,95 kVA CDM according to Table A.1 .....	71
Table B.1 – Typical values of $\lambda$ for different input converter topologies .....	78
Table C.1 – Reference parameters for Formula (C.1).....	85
Table C.2 – Variables for Formula (C.1).....	86
Table C.3 – Reference parameters for Formula (C.2).....	86
Table C.4 – Reference parameters for Formula (C.3).....	87
Table C.5 – Reference parameters for Formula (C.4).....	87
Table C.6 – Reference parameters for Formula (C.6).....	89
Table C.7 – Variables for Formula (C.6).....	89
Table C.8 – Reference parameters for Formula (C.7).....	89
Table C.9 – Reference parameters for Formula (C.8).....	90
Table C.10 – Reference parameters for Formula (C.9).....	90
Table C.11 – Reference parameter for Formula (5).....	91
Table C.12 – Reference parameter for Formula (C.10).....	91
Table E.1 – Normative operating points of IEC 60034-2-3.....	101
Table E.2 – Interpolation coefficients of typical 4-pole IE2 induction machines .....	105
Table E.3 – Interpolation coefficients of typical 2-pole IE2 induction machines .....	106
Table E.4 – Interpolation coefficients of typical 4-pole IE3 induction machines .....	107
Table E.5 – Interpolation coefficients of typical 4-pole IE4 induction machines .....	108
Table E.6 – Interpolation coefficients of typical 4-pole IE5 induction machines .....	109
Table F.1 – Relative losses of a 400 V/9,95 kVA example CDM (IE1) at the predefined operating points .....	111
Table F.2 – Parameters of the example CDM.....	115
Table F.3 – Results of the CDM calculation according to the mathematical model.....	116
Table F.4 – Comparison of different loss evaluation methods.....	116
Table F.5 – Loss data of the 7,5 kW example motor.....	116
Table F.6 – Calculated part-load factors for SDIM part load operation points .....	118

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ADJUSTABLE SPEED ELECTRICAL POWER DRIVE SYSTEMS (PDS) –****Part 9-2: Ecodesign for motor systems –  
Energy efficiency determination and classification**

## FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) IEC draws attention to the possibility that the implementation of this document may involve the use of (a) patent(s). IEC takes no position concerning the evidence, validity or applicability of any claimed patent rights in respect thereof. As of the date of publication of this document, IEC had not received notice of (a) patent(s), which may be required to implement this document. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information, which may be obtained from the patent database available at <https://patents.iec.ch>. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 61800-9-2 has been prepared by subcommittee 22G: Adjustable speed electric drive systems (PDS), of IEC technical committee 22: Power electronic systems and equipment. It is an International Standard.

It has the status of a group energy efficiency publication in accordance with IEC Guide 118.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 2017. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) Additional IES Classes defined to IES5;
- b) Removed reference motor loss data and now point to IEC 60034-30-2;

- c) Expanded and modified factors in Clause 6 for CDMs;
- d) Annex C is now the Mathematical Model for CDM Losses;
- e) Moved the mathematical model for the CDM to Annex C;
- f) Added Sub Drive Input Module and Sub Drive Output Modules to Annex B;
- g) Annex D is now the Converter Topology (old Annex C);
- h) Annex E is now the Interpolation of Motor Losses (Old Annex D);
- i) Annex E expanded to include various motor connections and updated interpolation method;
- j) New Annex E for determination of Interpolation Coefficients;
- k) Annex F is the old Annex E;
- l) New Annex J Explanation of Correction Factors for the Reference Losses in Table 8.

The text of this International Standard is based on the following documents:

Draft	Report on voting
22G/475/FDIS	22G/478/RVD

Full information on the voting for its approval can be found in the report on voting indicated in the above table.

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at [www.iec.ch/members\\_experts/refdocs](http://www.iec.ch/members_experts/refdocs). The main document types developed by IEC are described in greater detail at [www.iec.ch/publications](http://www.iec.ch/publications).

A list of all parts in the IEC 61800 series, published under the general title *Adjustable speed electrical power drive systems (PDS)*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under [webstore.iec.ch](http://webstore.iec.ch) in the data related to the specific document. At this date, the document will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

**IMPORTANT – The "colour inside" logo on the cover page of this document indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.**

## INTRODUCTION

This part of IEC 61800 has been developed to allow evaluation of power losses of SDMs (sub drive modules), CDMs (complete drive modules) and PDSs (power drive systems).

The requirements for measuring energy efficiency of motors with non-sinusoidal supply are under the responsibility of IEC/TC 2 and will be published under the IEC 60034 series.

IEC SC 22G includes the standardization task force for dealing with this topic. It has close collaboration with several other technical committees (for example, IEC TC 2, IEC SC 121A, ISO/TC 115, ISO/TC 117, ISO/TC 118, CEN/TC 197) in order to provide a comprehensive standard for energy efficiency and ecodesign requirements.

IEC SC 22G maintains responsibility for all relevant aspects in the field of energy efficiency and ecodesign requirements for power electronics, switchgear, control gear and power drive systems and their industrial applications.

The IEC 61800 series does not deal with mechanical engineering components.

NOTE 1 Geared motors (motors with directly adapted gearboxes) are treated like power drive systems (converter plus motor). See IEC 60034-30-1 for classification of the losses of a geared motor. The efficiency classes of gearboxes as individual components are under consideration.

IEC 61800-9-2 is a subpart of the IEC 61800 series, which has the following structure:

- Part 1: General requirements – Rating specifications for low voltage adjustable speed DC power drive systems
- Part 2: General requirements – Rating specifications for adjustable speed AC power drive systems
- Part 3: EMC requirements and specific test methods
- Part 5: Safety requirements
- Part 6: Guide for determination of types of load duty and corresponding current ratings
- Part 7: Generic interface and use of profiles for power drive systems
- Part 8: Specification of voltage on the power interface
- Part 9: Ecodesign for motor systems

Some parts are further subdivided into several subparts, published either as International Standards or as Technical Specifications or Technical Reports and will be published with the part number followed by a dash and a second number identifying the subdivision (example: IEC 61800-9-2).

NOTE 2 It is understood that Formula (13) is for Direct-on-Line motors. Formula (13) will be modified in the next amendment to account for Variable Frequency Drive motors.

NOTE 3 A new figure will be developed to demonstrate the use of a star point for measuring the converter phase voltages to determine the  $\cos\phi_i$  for each phase in 7.5.3.1.

## ADJUSTABLE SPEED ELECTRICAL POWER DRIVE SYSTEMS (PDS) –

### Part 9-2: Ecodesign for motor systems – Energy efficiency determination and classification

#### 1 Scope

This part of IEC 61800 specifies energy efficiency indicators of power electronics (complete drive modules (CDM), input or output sub drive modules (SDM), power drive systems (PDS) and motor starters, all used for motor driven equipment.

This document is a group energy efficiency publication according to IEC Guide 119 and specifies the methodology for the determination of losses of the complete drive module (CDM), the sub drive module (SDM), the power drive system (PDS) and the motor system.

It defines IE and IES classes, their limit values and provides test procedures for the classification of the overall losses of the motor system.

Furthermore, this document proposes a methodology for the implementation of the best energy efficiency solution of drive systems. This depends on the architecture of the motor driven system, on the speed/torque profile and on the operating points over time of the driven load equipment. It provides a link for the energy efficiency evaluation and classification of the extended product.

The methodology of the extended product approach and the semi analytical models are defined in IEC 61800-9-1.

The structure of this document is as follows:

- the losses of standardized PDS, standardized reference CDM (RCDM) and the mathematical model for their calculation are given and classified;
- the reference motor (RM) and the reference CDM (RCDM) are defined. They are used for determining the efficiency class of a PDS if either the physical motor or physical CDM is unknown;
- the requirements for the determination of the losses of a physical PDS and a physical CDM including correction factors for other types of CDM, not defined as RCDM or SDM, are given and compared to the IES class limits and the RCDM;
- the requirements for type testing and user documentation are given;
- some exemplary losses of an overall system are illustrated in annexes;
- information about system and drive topologies are given in annexes.

Specific data for the RCDM and RM, limits for the PDS and IE/IES classes are given for low voltage (100 V up to and equal to 1 000 V), single axis AC/AC power drive systems with three-phase motors. Geared motors are treated as standard motors when motor and gearbox can be separated. A methodology is given in addition how this reference data can also be applied to other topologies like AC/DC or DC/AC converters.

All provided reference data is derived from PDS with induction motors. They can be used for various types of PDS with other types of motors as well, for example but not limited to, electronically commutated motors (ECM), permanent magnet motors (PM) or synchronous reluctance motors (SYN-RM), and line-start permanent magnet motors (LSPM).

PDS requirements in this document only apply to PDSs that are placed on the market as one single product, i.e. combination of motor and CDM that are not intended to be used separately.

CDM requirements only apply to a CDM where the included SDMs have not already been evaluated according to SDM requirements.

The following equipment is excluded from the scope:

- high voltage CDM, SDM and PDS with a rated voltage above 1,0 kV AC or 1,5 kV DC;
- low voltage CDM, SDM and PDS with a rated voltage below 100 V AC;
- high power PDS above a rated power of 1 000 kW;
- high power CDM and SDM above a rated apparent output power of 1 209 kVA;
- low power PDS below a rated power of 0,12 kW;
- low power CDM and SDM below a rated apparent output power of 0,278 kVA;
- PDS with geared motors where motor and gearbox cannot be separated, for example because of a common housing;
- servo PDS (consisting of frequency converter, motor and position feedback sensor);
- CDM, BDM and SDM that are exclusively designed to drive servo motors;
- PDS, CDM, BDM and SDM specifically designed for DC motor applications according to IEC 61800-1;
- PDS where several motors are connected in parallel to a single CDM with one three-phase output.
- SDM with DC input and DC output.

NOTE The IEC 61800-9 series does not cover energy efficiency classification of driven equipment but provides input for the assessment according to the extended product approach.

## 2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60034-1:2022, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

IEC 60034-2-1:2014, *Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*

IEC 60034-2-3:2020, *Rotating electrical machines – Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC induction motors*

IEC 60034-30-1:2014, *Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)*

IEC TS 60034-30-2:2016, *Rotating electrical machines – Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code)*

IEC TS 60034-31:2021, *Rotating electrical machines – Part 31: Selection of energy-efficient motors including variable speed applications – Application guidelines*

IEC 60038:2009, *IEC standard voltages*  
IEC 60038:2009/AMD1:2021

IEC 60050-161, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 161: Electromagnetic compatibility*, available at [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

IEC 60947-4-1:2018, *Low voltage switchgear and controlgear – Part 4-1: Contactors and motor-starters – Electromechanical contactors and motor-starters*

IEC 61000-3-12:2011, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-12: Limits – Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current > 16 A and ≤ 75 A per phase*

IEC Guide 118:2017, *Inclusion of energy efficiency aspects in electrotechnical publications*

### 3 Terms, definitions and symbols

#### 3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-161 and the following apply.

ISO and IEC maintain terminology databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <https://www.iso.org/obp>

##### 3.1.1

#### **active infeed converter**

##### **AIC**

self-commutated electronic power converter of any technology, topology, voltage and size which is connected between the AC power supply system (mains) and a stiff DC-side (current source or voltage source), which can convert electric power in both directions (from AC to DC and from DC to AC) and can control the reactive power or the power factor

Note 1 to entry: See IEC TS 62578.

Note 2 to entry: The IEV defines VSC and CSC as voltage stiff AC/DC converter (551-12-03) and current stiff AC/DC converter (551-12-04) respectively. Most of the AICs are bi-directional converters and have sources on the DC side. Therefore, they are known as "voltage source converters" and "current source converters".

##### 3.1.2

#### **alternative efficiency determination method**

##### **AEDM**

analytical model used by motor manufacturers for calculation of the losses that can be used to determine the energy efficiency index of an extended product

##### 3.1.3

#### **accessory**

additional part, component or equipment intended to expand capabilities of the BDM/CDM/PDS, but not required for the general function of the BDM/CDM/PDS

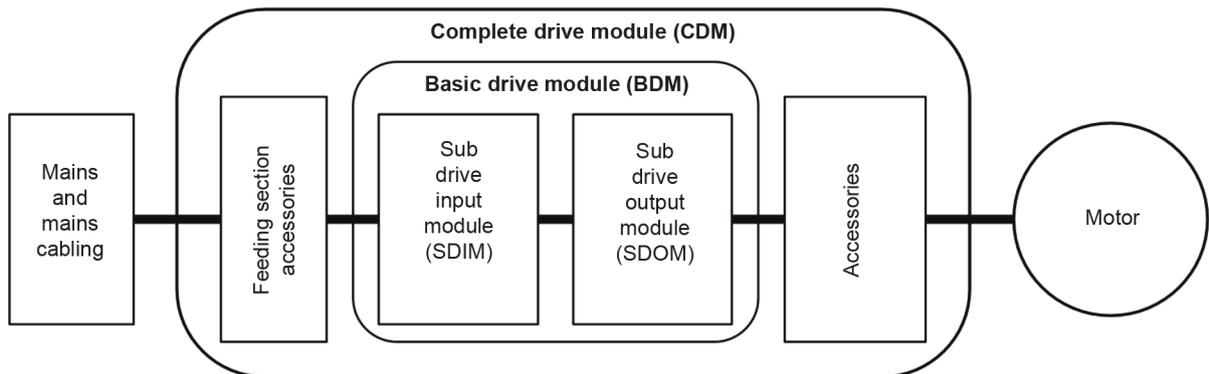
Note 1 to entry: Examples of accessories include, but are not limited to, line filters, input harmonic filters, EMI filters, fuses, chokes, motor output filters, communications, control or input/output interface kits, additional ventilation kits, mechanical bonding and cable support kits or additional measuring device and instruments.

### 3.1.4 complete drive module CDM

drive module consisting of, but not limited to, the BDM and extensions such as protection devices, transformers and accessories, but excluding the motor and the sensors which are mechanically coupled to the motor shaft

Note 1 to entry: A CDM is the AC/AC frequency converter which feeds the motor. Some countries use the term "drive" instead of CDM.

Note 2 to entry: An example of a CDM containing an SDIM and SDOM is shown in Figure 1. The SDIM and SDOM are parts of the BDM.



IEC

**Figure 1 – Example of complete drive module (CDM) built by sub drive modules (SDM)**

[SOURCE: IEC 61800-2:2021, 3.6, modified – In the definition, the word "auxiliaries" has been replaced with "accessories". The notes to entry and Figure 1 have been added, and the reference to Figure 3 has been deleted.]

### 3.1.5 crest factor

ratio of the peak absolute value to the RMS value of the waveform

### 3.1.6 driven equipment

equipment mechanically coupled to the motor but not limited to external transmissions, gears, fans, pumps, compressors, etc.

### 3.1.7 energy efficiency index EEI

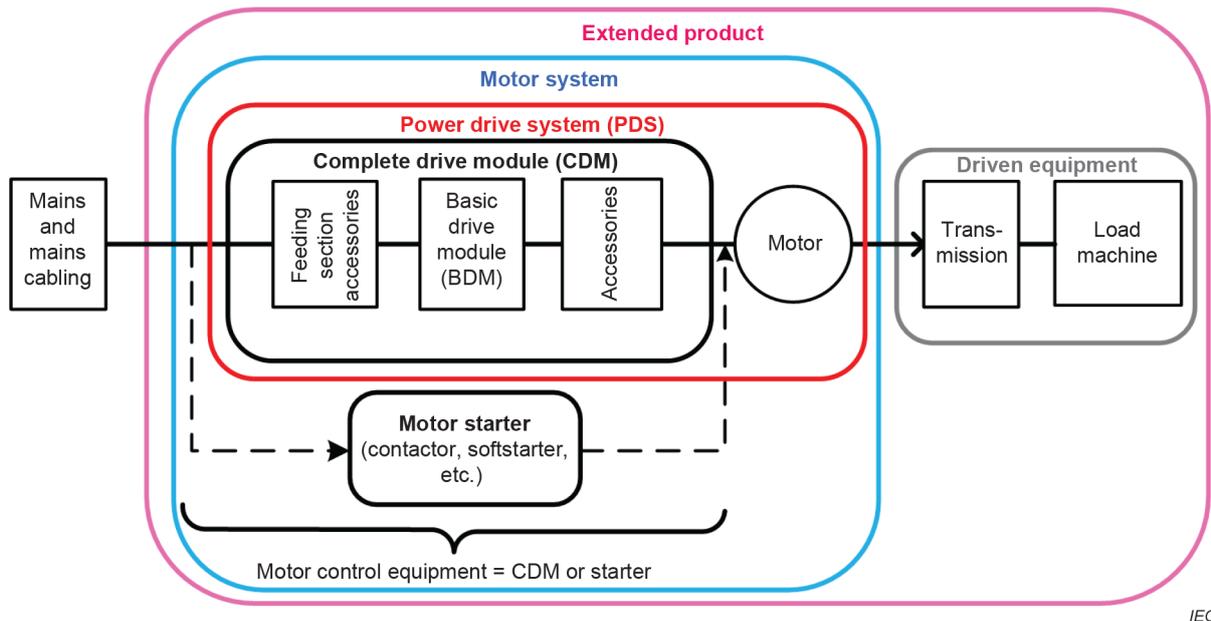
value describing the energy efficiency of an application (fan, pump compressor, etc.), resulting from the extended product approach (EPA)

Note 1 to entry: If the extended product is a pump system, the EEI is the ratio of the demanded energy (actual plus losses) to the theoretical energy required for the application.

### 3.1.8 extended product EP

driven equipment together with its connected motor system (e.g. a PDS)

Note 1 to entry: See Figure 2.



**Figure 2 – Illustration of the extended product with included motor system**

**3.1.9**

**IE Class**

efficiency classification of components of a motor system (3.1.11)

Note 1 to entry: IE is an abbreviation for "international efficiency".

**3.1.10**

**IES class**

efficiency classification of a motor system (e.g. PDS or a gear drive motor)

Note 1 to entry: IES is an abbreviation for "international efficiency of systems".

**3.1.11**

**motor control equipment**

CDM or motor starter

**3.1.12**

**motor system**

system consisting of one or more complete drive module(s) (CDM) and a motor or motors, and any sensors which are mechanically coupled to the motor shaft, but not including the driven equipment

**3.1.13**

**power drive system**

**PDS**

system consisting of one or more complete drive modules (CDMs) and a motor or motors

Note 1 to entry: Any sensors which are mechanically coupled to the motor shaft are also part of the PDS; however, the driven equipment is not included.

**3.1.14**

**pulse pattern**

pattern of the switched phase-to-phase voltage or phase current at the unfiltered output terminals of the converter, resulting from pulse frequency and modulation scheme

### 3.1.15 reference complete drive module RCDM

complete drive module defined by mathematical equations and/or power losses

Note 1 to entry: The RCDM is used as a basis for determining the IE Class of an individual CDM and SDM.

### 3.1.16 reference motor RM

motor that is to be used for IES classification and is to be selected from IEC TS 60034-30-2

### 3.1.17 servo PDS

closed-loop controlled electric drive system for precise and dynamical control of angular or linear position, velocity and acceleration for the driven servomechanism

Note 1 to entry: See Figure 3.

Note 2 to entry: The servo PDS consists of a frequency converter, a motor and a position feedback sensor.

Note 3 to entry: Such servo applications are characterised with non-periodically (duty type S9) or periodically variable load and speed within the permissible 4-quadrant operating range ( $\pm T_{MAX}$ ,  $\pm n_{MAX}$ ) and includes frequently applied operation in overload ( $T > T_N$ ) and/or field weakening range ( $n > n_N$ ) of the motor (see Figure 3).

Note 4 to entry: PDS are regarded as servo PDS when their motor typically meets one of the following criteria (see IEC TS 60034-30-2:2016):

- maximum speed criterion:  $n_{max} > a_0 \cdot e^{-a_1 \cdot T_N^{a_2}} + a_3$ ; with  $a_0 = 6\,000\ 1/\text{min}$ ;  $a_1 = 0,02\ 1/\text{kW}$ ;  $a_2 = -0,4$ ;  $a_3 = 3\,200\ 1/\text{min}$ ;
- angular acceleration capability criterion:  $c_{coeff} = \frac{T_{max}}{J} > b_0 \cdot e^{-b_1 \cdot T_N^{b_2}} + b_3$ ; with  $b_0 = 18\,000\ 1/\text{s}^2$ ;  $b_1 = 1,3\ 1/\text{kW}$ ;  $b_2 = -1$ ;  $b_3 = 5\,800\ 1/\text{s}^2$ .

Note 5 to entry: Typical applications for servo PDS are such as CNC (computerized numerical control) machinery, automated manufacturing or robotics.

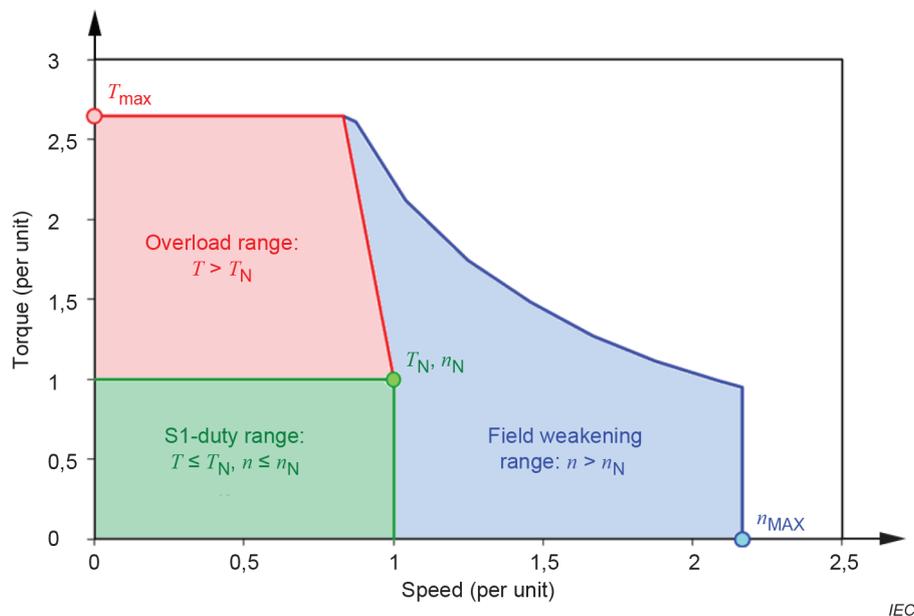


Figure 3 – Torque-speed-characteristic of servo PDS

**3.1.18****single axis**

single mechanical output shaft of an individual motor

Note 1 to entry: Applies to CDM supplying one motor or PDS that includes only one motor.

**3.1.19****sub drive module****SDM**

electrical drive module to convert AC input to DC output, DC input to DC output or DC input to AC output, intended to form part of a BDM

Note 1 to entry: SDM or SDIM with a DC input and DC output are out of scope of this document. See Clause 1.

**3.1.20****sub drive input module****SDIM**

SDM to convert AC input to DC output or DC input to DC output intended to feed at least one SDOM where the SDIM can also include an AC or DC choke, input filter combination or DC link capacitors

Note 1 to entry: SDM or SDIM with a DC input and DC output are out of scope in this document. See Clause 1.

**3.1.21****sub drive output module****SDOM**

SDM to convert DC input to three-phase AC output to control current, torque or speed of an electric motor where this SDOM can also include DC link capacitors or a three-phase output filter assembly

**3.1.22****test load**

electrical device that determines the output current  $I_{out}$  and the output fundamental displacement factor  $\cos \phi$  of EUT for testing or calculation purposes

Note 1 to entry: Test load may be a test motor or a different kind of load.

**3.1.23****test load current**

total apparent current in amperes into the test load to produce a certain torque (see Table 1)

**3.1.24****torque current**

part of the test load current in amperes (see 3.1.23) that produces a certain torque

Note 1 to entry: See Figure 6 and Table 1.

Note 2 to entry: For an asynchronous motor, the torque current is the rotor current.

**3.2 Symbols****3.2.1**

$c_{liquid}$

specific heat capacity of liquid

**3.2.2**

$DF_U$

voltage distortion factor as the ratio of the RMS voltage without fundamental component to the RMS voltage of the fundamental component

$$DF_U = \sqrt{\frac{U_{RMS}^2 - U_1^2}{U_1^2}}$$

**3.2.3** $E_D$ 

switching loss energy per volt and per ampere of a power diode

**3.2.4** $E_T$ 

switching loss energy per volt and per ampere of a power transistor

**3.2.5** $f_{sw}$ 

number of switching events of one semiconductor within one second

Note 1 to entry:  $f_{sw}$  determines, together with the selected pulse pattern and the converter topology, the lowest frequency of non-controllable harmonics or inter-harmonics at the IPC (in-plant point of coupling, see IEC 61800-3) or the motor.

Note 2 to entry: Turn on and turn off of the semiconductor is counted as a single switching event as it is in IEC 60034-2-3).

**3.2.6** $I_{\text{motor\_cable}}$ 

current in amperes in the motor cable of one power interface (see IEC 61800-2) of the PDS, used for calculating switching losses

Note 1 to entry:  $I_{\text{motor\_cable}}$  typically represents a capacitive current, which is normally for shielded motor cables.

**3.2.7** $I_{1,r} \text{ CDM}$ 

fundamental current in amperes of the rated CDM or PDS input current waveform

**3.2.8** $I_r$ 

rated CDM or PDS input current in amperes

**3.2.9** $I_{\text{out}}$ 

output current in amperes

**3.2.10** $I_{r,\text{out}}$ 

rated CDM output current in amperes

**3.2.11** $I_{rM}$ 

rated motor current in amperes

**3.2.12** $kI_{\text{DC\_link}}$ load independent DC link loss parameter  $\left( \frac{1}{\Omega \cdot A} \right)$

**3.2.13** $k_{1\text{choke}}$ 

choke impedance, relative to the rated CDM impedance

**3.2.14** $k_{2\text{DC\_link}}$ load dependent DC link loss parameter [ $\Omega \cdot \text{A}$ ]**3.2.15** $k_{2\text{choke}}$ 

relative voltage drop on the resistive part of the choke

**3.2.16** $k_{\text{cf}}$ 

correction factor for RCDM losses to consider topologies with different characteristic

**3.2.17** $k_{\text{fe}}$ 

segregation of eddy current and hysteresis losses in a motor

**3.2.18** $k_{\text{fw}}$ 

segregation of friction and windage losses in a motor

**3.2.19** $k_{\text{LL}}$ 

distribution of load losses

**3.2.20** $k_{\text{VD}}$ 

ratio of rated motor voltage to maximum CDM output voltage

**3.2.21** $P_{\text{L,cooling}}$ 

power losses in watts generated by the cooling equipment of a CDM (e.g. fan losses), in relation to the BDM (see IEC 61800-2) losses if the CDM needs to be separately cooled

**3.2.22** $m$ 

modulation index, relation of CDM output frequency to the nominal motor stator frequency

**3.2.23** $n_i$ speed [ $\text{min}^{-1}$ ] at operating point  $i$ **3.2.24** $n_r$ rated speed [ $\text{min}^{-1}$ ]**3.2.25** $P_i$ power consumption in kW at operating point  $i$

**3.2.26** $P_{in,CDM}$ 

input power in watts of the CDM obtained from the power loss measurement

**3.2.27** $P_{in,PDS}$ 

input power in watts of the PDS obtained from the power loss measurement

**3.2.28** $P_{L,Acc}$ 

power losses in watts of the drive accessories

**3.2.29** $P_{LHL}$ 

additional harmonic losses in watts of a motor caused by non-sinusoidal power supply

Note 1 to entry: See also IEC 60034-2-3.

**3.2.30** $P_{L,RM}$ 

relative losses of the reference motor

**3.2.31** $P_{L,RM}$ 

losses in watts of the reference motor

**3.2.32** $P_{LTsin}$ 

total losses in watts of a motor at sinusoidal power supply

Note 1 to entry: According to IEC 60034-2-1:2014, method 2-1-1B.

**3.2.33** $P_{LT,Mot}$ 

total losses in watts of a motor when supplied by a converter (non-sinusoidal power supply)

Note 1 to entry: According to IEC 60034-2-1:2014, method 2-1-1B.

**3.2.34** $P_{out,CDM}$ 

output power in watts of CDM obtained from the power loss measurement

**3.2.35** $P_{out,PDS}$ 

output power in watts of PDS obtained from the power loss measurement

**3.2.36** $P_r$ 

rated power in watts of equipment which is assigned by its manufacturer

**3.2.37** $P_{proc}$ 

power demand in watts of the mechanical or fluid-mechanical process

**3.2.38** $P_L$ 

electrical power losses in watts

Note 1 to entry: In  $P_{L,CDM}$ ,  $P_{L,Mot}$ ,  $P_{L,PDS}$  and  $P_{L,Acc}$ , the index CDM refers to the complete drive module; Mot refers to the motor, PDS to the power drive system and Acc to the accessory devices like cables, transformers or filters.

**3.2.39** $p_L$ 

relative power losses based on per unit losses related to the rated apparent power of the device

**3.2.40** $P_{L,CDM}$ 

power losses in watts of a CDM

**3.2.41** $P_{L,CDM, determined}$ 

power losses in watts of CDM from the power loss determination method

**3.2.42** $p_{L,CDM}$ 

relative power losses of the CDM, in relation to its rated apparent power

**3.2.43** $P_{L,choke}$ 

power losses in watts in the choke section of a CDM

**3.2.44** $P_{L,control}$ 

power losses in watts of the motor control system

**3.2.45** $P_{L,DC\_link}$ 

power losses in watts of the DC link section of the CDM

**3.2.46** $P_{L,inverter}$ 

power losses in watts in the inverter section of a CDM

**3.2.47** $P_{L,PDS, determined}$ 

power losses in watts of the PDS from the power loss determination method

**3.2.48** $P_{L,rectifier}$ 

power losses in watts in the rectifier section of a CDM

**3.2.49** $P_{L,resistor}$ 

measured power losses in watts of the resistor in comparative calorimetric measurement

**3.2.50** $P_{L,on,D}$ 

on state power losses in watts of a power diode

**3.2.51** $P_{L,on,D}$ , rectifier

on state power losses in watts of a rectifier diode

**3.2.52** $P_{L,on,T}$ 

on state losses in watts of a power transistor

**3.2.53** $P_{L,sw,D}$ 

switching power losses in watts of a power diode

**3.2.54** $P_{L,sw,T}$ 

switching power losses in watts of a power transistor

**3.2.55** $P_{r,M}$ 

rated output power in kilowatts of motor

Note 1 to entry: In the IEC 60034 series related to motors, this is named  $P_N$ .

**3.2.56** $P_{r,RM}$ 

rated power of the reference motor in kilowatts

**3.2.57** $P_{L, stby}$ 

standby losses in watts of a PDS

Note 1 to entry: Standby losses in watts are losses that are generated when the PDS is powered up, but not providing current to the load. They are typically two to three orders of magnitude lower than the losses during operation.

Note 2 to entry: The influence of standby losses on the overall losses strongly depends on the duty profile of the extended product. Besides this, they also depend on the requirements of the extended product in terms of wake-up time and communication.

**3.2.58** $p_N$ 

relative losses of a motor

**3.2.59** $Q$ 

flow rate of a pump unit in cubic meters per second

**3.2.60** $Q_{BEP}$ 

flow rate of the pump at the best efficiency point in cubic meters per second

**3.2.61** $Q_{cooler}$ 

volumetric flow rate of the cooler in the calorimeter

**3.2.62** $Q_{ISI}$ 

interpolation error (stability index)

**3.2.63** $r_{HL}$ 

ratio of additional harmonic losses when a motor is operated with a CDM compared to the losses at sinusoidal supply of a motor

**3.2.64** $S_{r, equ}$ 

rated apparent power in kilovolt amperes of a piece of equipment

**3.2.65** $S_{r, RCDM}$ 

rated apparent power in kilovolt amperes of the reference CDM

**3.2.66** $T$ 

torque in newton meters of a motor

**3.2.67** $t_w$ 

working time in hours of an equipment

**3.2.68** $T_i$ 

torque in newton meters at operating point  $i$

**3.2.69** $THD$ 

total harmonic distortion in percent of an alternating quantity as the ratio of the RMS value of the harmonic content to the RMS value of the fundamental component of the quantity

Note 1 to entry: The total harmonic ratio may be restricted to a certain harmonic order (recommended notation " $H$ ").

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left( \frac{Q_h}{Q_1} \right)^2}$$

**3.2.70** $U_{1,r,out}$ 

fundamental rated phase-to-phase CDM output voltage

Note 1 to entry: For the reference CDM, this value is assumed to be 400 volts unless stated otherwise.

**3.2.71** $U_{DC}$ 

DC link voltage of a CDM

**3.2.72** $U_{D,r}$ 

on state voltage of a power diode at rated CDM current

**3.2.73** $U_{D,r,rectifier}$ 

on state voltage of a rectifier diode at rated CDM current

**3.2.74** $U_{D,th}$ 

threshold voltage of a power diode

**3.2.75** $U_{D,th,rectifier}$ 

threshold voltage of a rectifier diode

**3.2.76** $U_{mL1}$ 

line to neutral voltage of the power supply system in phase L1

**3.2.77** $uk$ 

ratio of line impedance to system impedance

**3.2.78** $U_{T,r}$ 

on state voltage of a power transistor at rated CDM current

**3.2.79** $U_{T,th}$ 

threshold voltage of a power transistor

**3.2.80** $W_w$ 

electrical energy in kilowatt hours demand of extended product during working time

**3.2.81** $\lambda$ 

power factor as ratio between active power and apparent power

Note 1 to entry: Equipment input power factor is given by  $\lambda = P_{equ} / S_{r,equ}$ .

**3.2.82** $\Delta p_{L,CDM}$ 

uncertainty in percent of power loss determination method for CDM

**3.2.83** $\Delta P_{L,CDM}$ 

uncertainty in watts of power loss determination method for CDM

**3.2.84** $\Delta p_{L,PDS}$ 

uncertainty in percent of power loss determination method for PDS

**3.2.85** $\Delta P_{L,PDS}$ 

uncertainty in watts of power loss determination method for PDS

**3.2.86** $\theta_{CDM}$ 

temperature in degrees Celsius of CDM

**3.2.87** $\theta_{in}$ 

input temperature in degrees Celsius of cooling medium (air, liquid) in a calorimetric measurement

**3.2.88** $\theta_{inside}$ 

temperature in degrees Celsius of cooling air between two calorimetric measurement chambers

**3.2.89** $\theta_M$ 

temperature in degrees Celsius of motor

**3.2.90** $\theta_{out}$ 

output temperature in degrees Celsius of cooling medium (air, liquid) in a calorimetric measurement

**3.2.91** $\theta_{SDIM}$ 

temperature in degrees Celsius of sub drive input module (SDIM)

**3.2.92** $\theta_{SDOM}$ 

temperature in degrees Celsius of sub drive output module (SDOM)

**3.2.93** $\varphi$ 

phase angle in degrees between the fundamental CDM input voltage and the fundamental CDM input current

**3.2.94** $\Phi$ 

phase angle in degrees between the fundamental CDM output voltage and the fundamental CDM output current

**3.2.95** $\Phi_r$ 

phase angle in degrees between the fundamental CDM output voltage and the fundamental CDM output current at rated torque and speed

**3.2.96** $c_{WHf}$ 

loss separation coefficient for winding losses and high frequency losses

**3.2.97** $c_{BH}$ 

loss separation coefficient for friction and windage losses and hysteresis losses

## 4 PDS efficiency, reference CDM (RCDM) and reference motor (RM)

### 4.1 General

In order to determine the most efficient extended product for a given application, a direct comparison of several drive topologies and/or several control strategies is required. The extended product approach described in IEC 61800-9-1 allows for this.

To support this approach, the concept of IES classification of PDS is introduced.

The definition of the PDS efficiency is generic and independent of a specific product or provider.

It allows

- setting the limiting values for classifications,
- classification of the PDS,
- classification of the CDM,
- application of IEC TS 60034-30-2,
- application of IEC 60034-30-1,
- limiting the assessment to only a few appropriate measured or calculated operating points, and
- determination of the energy consumption of various driven applications.

Examples of relevant input values (operating points) for classification of different driven applications: some typical loads have square-law torque-speed characteristics (e.g. most pump units) while others require constant torque (e.g. hoisting equipment).

This document establishes relative losses or input powers at the operating points  $p_{L, PDS (50; 25)}$ ,  $p_{L, PDS (90; 50)}$  and  $p_{L, PDS (90; 100)}$  and additional points  $p_{L, PDS (0; 25)}$ ,  $p_{L, PDS (0; 50)}$  and  $p_{L, PDS (0; 100)}$  in order to determine the losses of the motor system.

If other load points are necessary, use the interpolation method found in Annex E.

#### **4.2 Reference operating points of the PDS, RCDM, RM and associated losses**

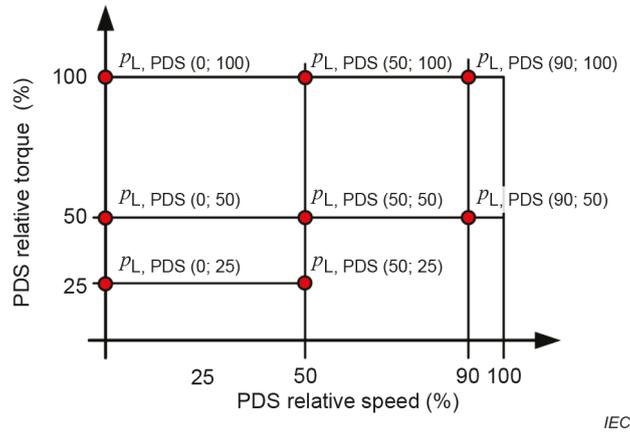
All driven equipment can be described by the power required by the machine/application. The power requirements are the product of torque and speed at any working point. At each operating point, there is an associated power loss in the motor system.

The collection of (speed, torque) operating points at which the motor system may potentially be operated is infinite. Theoretically, it is necessary to know the amount of power losses generated at each point. In practice, however, it is sufficient to know the power losses at a limited number of specific points (eight), which are specified for the PDS in Figure 4, for the RM in Figure 5 and for the RCDM in Figure 6.

For operating points with speeds greater than zero, the losses are usually given as a percentage of the mechanical output power. In other approaches, the rated efficiencies ( $\eta$ ) are defined as the ratio of rated mechanical output power to electrical input power (including the losses).

In this document, losses related to the nominal output power of the power drive system ( $p$  in %) are considered instead of efficiency. This is done to secure the generality of the extended product approach.

Driven equipment, for which a standstill torque is required, exists. For such equipment, the efficiency is not an appropriate value to be used in the extended product approach.



**Figure 4 – Illustration of the operating points (shaft speed, torque) for the determination of relative losses of the power drive system (PDS)**

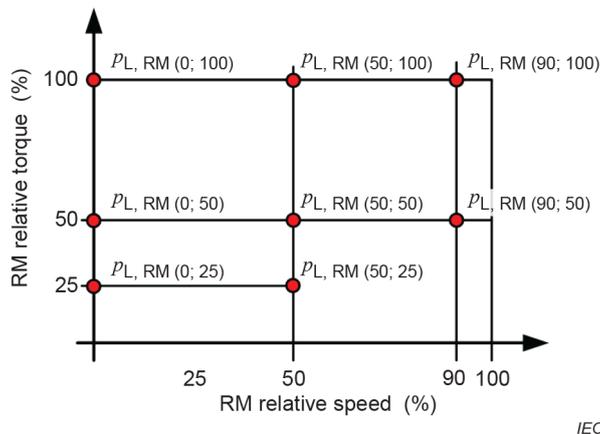
As defined, the absolute losses of the PDS shall be the sum of the CDM losses plus the motor losses. Therefore, those losses shall be calculated point by point at the operating points of Figure 5 and Figure 6 by Formula (1):

$$P_{L,PDS} = P_{L,M} + P_{L,CDM} \tag{1}$$

At rated speed and torque, a modified formula according to Formula (13) shall be used.

The relative losses of the PDS are calculated from the relative losses of the CDM and the motor shown in Formula (2):

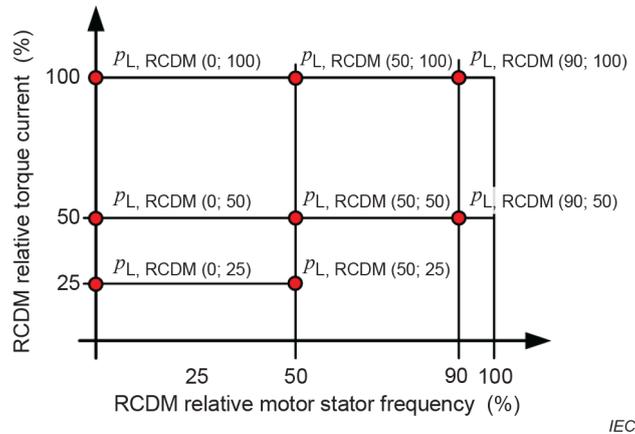
$$P_{L,PDS} = \frac{P_{L,M} \cdot P_{r,M} + P_{L,CDM} \cdot S_{r,CDM}}{P_{r,M}} \tag{2}$$



NOTE These operating points are calculated from the standardized operating points given in IEC 60034-2-3 using interpolation formulas given in IEC 60034-2-3 and in Annex E.

**Figure 5 – Illustration of the operating points (shaft speed, torque) for the determination of relative losses of the reference motor (RM)**

The operating points of the reference CDM (RCDM) cannot be given as a percentage of speed and torque of the corresponding rated values as the CDM provides only currents and voltages at its output. To allow a reproducible comparison and to avoid overmodulation, the fundamental AC output voltage shall be limited to 90 % of the AC input voltage.



**Figure 6 – Illustration of the operating points (relative motor stator frequency, relative torque current) for the determination of losses of the reference complete drive module (RCDM)**

NOTE 1 For asynchronous motors, the torque current is the rotor current. The relation between the overall motor current and the torque current is given in Table 1.

NOTE 2 For physical reasons, the illustrated operating points on the y-axis of Figure 6  $p_{L, RCDM}(0, n)$  are achieved only with a non-zero output voltage in order to let current flow through the resistance of the motor windings.

If required, the losses for intermediate operating points may be determined by one of the calculation methods presented in F.2.1:

- a) two-dimensional linear interpolation between neighbouring operating points;
- b) loss calculation of the CDM according to the mathematical model described in 5.2.

Motor losses are interpolated by an extended procedure according to Annex E (see also IEC 60034-2-3).

In every operating point, deviation due to motor slip is allowed. However, only in the operating points with zero speed, it is allowed to deviate up to 25 % of the nominal frequency.

For losses at additional operating points and at part load conditions and reduction of operating points, see 8.4 and Annex E.

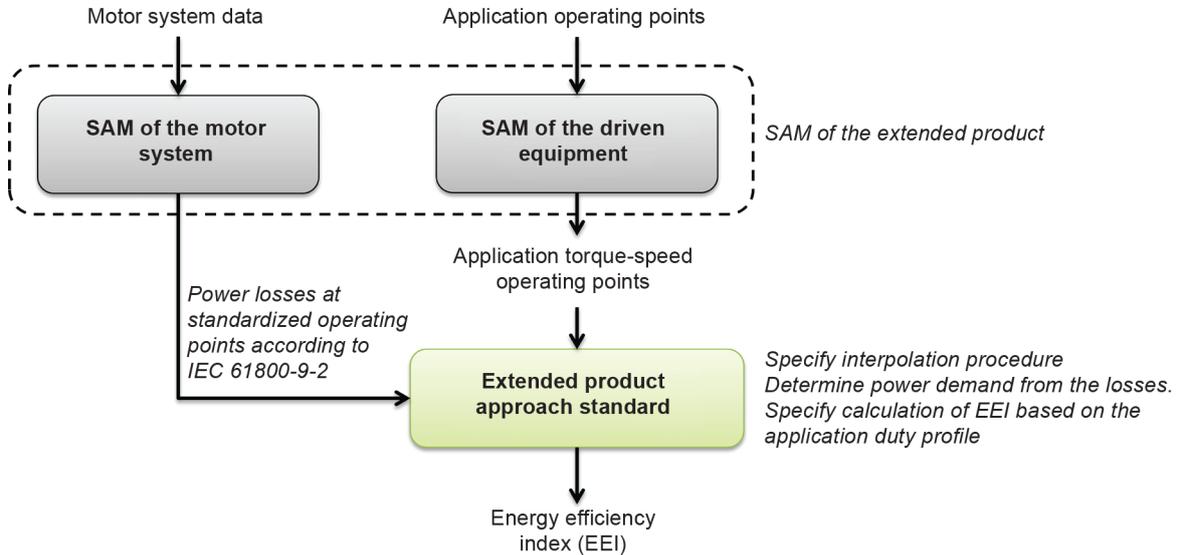
#### 4.3 Combining PDS losses with the driven equipment – Workflow for the semi-analytical model (SAM)

The model for the losses or the energy efficiency index of an extended product is called "semi analytical model" (SAM), which includes physical and mathematical parameters and calculation algorithms of the subparts of an EP.

The workflow for determining the efficiency classification of an extended product is shown in Figure 7.

If a SAM exists of the driven equipment (right side), then it permits linking to the SAM of the motor system (left side). Then the link between both semi analytical models shall be the load loss points of the PDS and their permissible tolerances. The needed operating points shall be provided by the semi analytical model of the driven equipment.

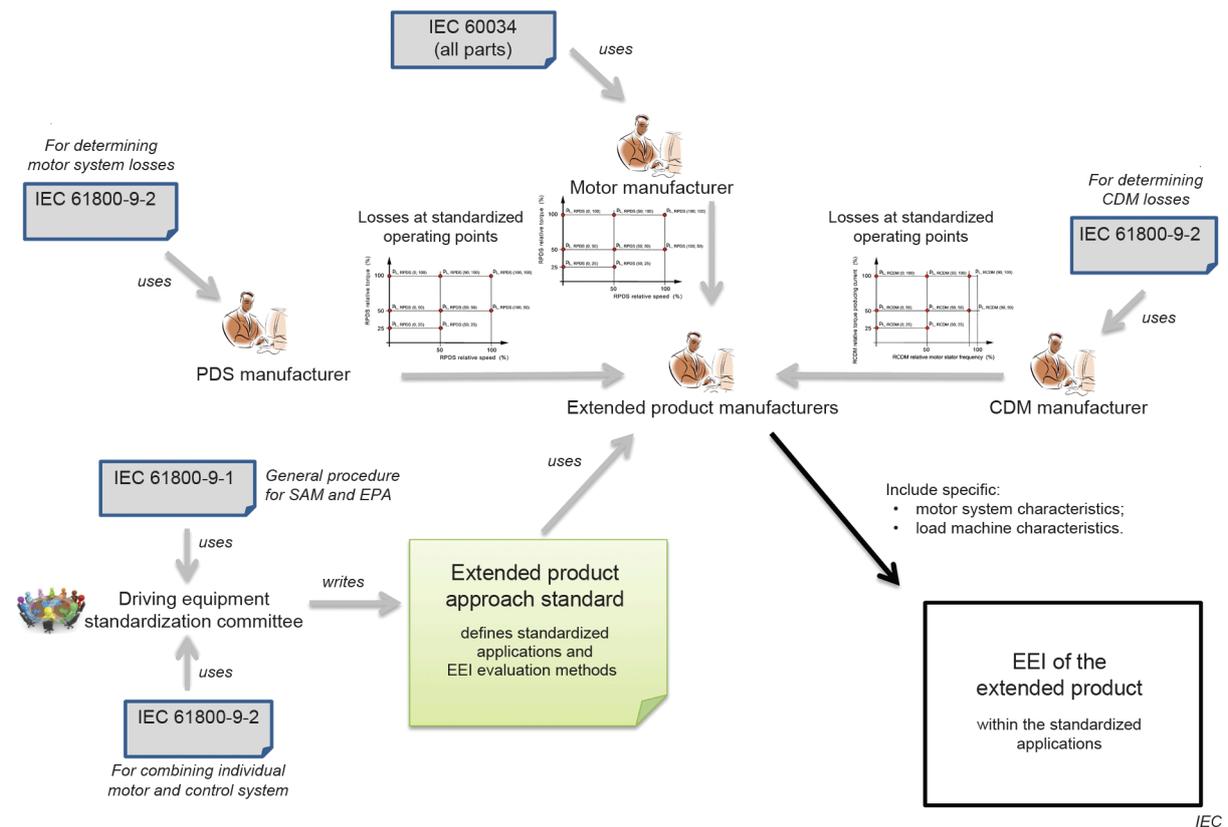
The PDS data containing the PDS losses according to Figure 2 (left hand side of Figure 7) are defined in this document, whereas it is the responsibility of the technical committees for the specific EP to standardize publicly available SAMs for their applications (right side of Figure 7). An extended product of pumps is given in IEC 61800-9-1. Figure 8 shows how the different data sources shall be combined.



IEC

**Figure 7 – Illustration of the workflow to determine the energy efficiency index (EEI) of an extended product**

This document specifies how to determine the power losses of the motor system. The extended product committee specifies the tolerances that apply to this process.



NOTE 1 Motor and CDM providers can provide data directly to the motor system provider.

NOTE 2 If the motor system is based on a starter, then only the motor losses are needed as input to the EPA.

**Figure 8 – Illustration how to combine different data sources to determine the energy efficiency index (EEI) of an extended product**

#### 4.4 IE Classes of line-fed motors

IEC 60034-30-1 defines the IE Classes for motors operated direct-on-line from IE1 up to IE4. The range above IE4 is currently not in use for line-fed motors.

#### 4.5 IE Classes of converter-fed motors

According to IEC 60034-2-3, the harmonic voltage contents of CDM increases motor losses for induction machines by approximately 15 % to 25 %.

Motors that fall under both IEC 60034-30-1 and IEC TS 60034-30-2, i.e. that are AC and rated for both direct-on-line (grid) operations and variable speed operation (dual rated motors), shall bear the IE efficiency class according to the procedure laid out in IEC 60034-30-1 only. Examples of such motors are most induction motors or line start permanent magnet motors. Losses for the defined 7 operating points can be extrapolated from Annex E. Losses for these points shall be provided by the motor provider by using IEC 60034-2-3. The alternative efficiency determination method (AEDM) determined may also be used in IEC 60034-2-3.

#### 4.6 IE Classes of frequency converters (complete drive modules, CDM)

The IE Class of a CDM, IE0 to IE2, is determined by comparing the losses of the CDM to the losses of the RCDM, according to Clause 6.

To declare the efficiency class of the CDM without considering the complete resulting PDS and to reflect the technological impact of the most significant parameter, the so-called "test load" shall be used as a defined unit.

The operating point for the IE Class determination is 90 % speed and 100 % torque and shall be taken according to Clause 6.

CDMs with modified functionality such as AIC according to IEC TS 62578 or CDMs having a mains current THC of 10 % or lower (according to IEC 61000-3-12) are classified using the correction factor concept according to 6.3.2.

**4.7 IES Classes of a PDS**

The classification of the PDS shall be declared in a range of IES0 up to IES5.

Relative losses of a PDS shall be determined by calculation or measurement. This is a requirement for integrated products and optional for others. The calculation shall be done by arithmetic summation of the absolute losses of the converter-fed motor plus the converter and the accessories or of an AEDM. See Clause 1 for details.

The operating point for the IES Class determination is 90 % speed and 100 % torque and shall be taken according to Clause 6.

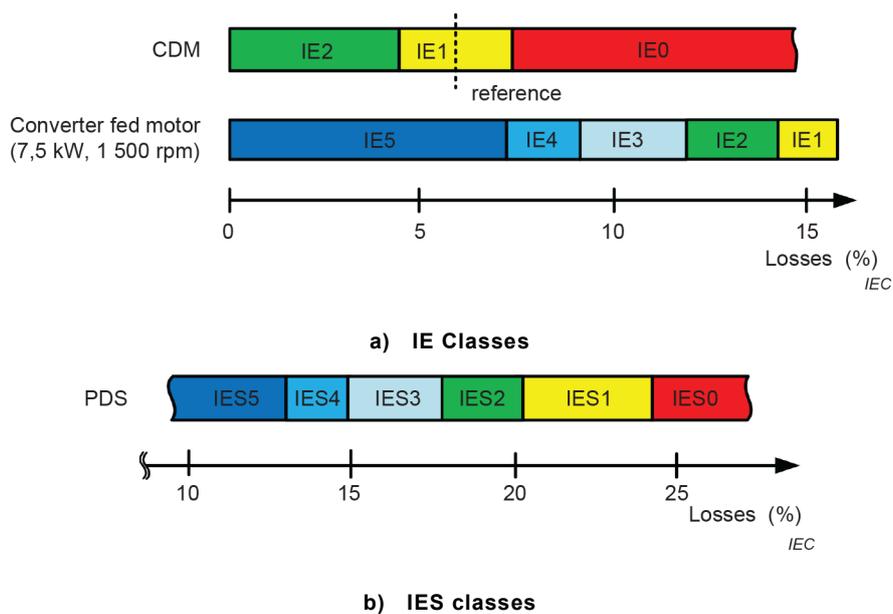
**4.8 Consistency of IE and IES Classes**

It is important to understand that the IE Classes of individual components such as converter fed AC motors, direct-on-line or CDMs cannot be added in order to determine the IES Class of a PDS.

The IES classification of PDSs can only be determined by the procedures laid out in 4.9 with a detailed knowledge of the losses of all components.

Individual IE Classes are required for the classification of components without prior knowledge of the extended product.

Generally, higher IE or IES Classes will demonstrate increased efficiency or decreased relative power losses. Figure 9 shows an example for IE and IES Classes for a 7,5 kW / 1 500 rpm motor and a 9,95 kVA CDM.



**Figure 9 – Metrical relation**

#### **4.9 Determination of the IES class of a PDS by application of "reference" and "test" devices and guidance for the providers**

Methods for the determination of losses and IE Classes of a motor are given in the IEC 60034-30 series – see also Figure 9. Providers may also define an IES class for a PDS that is using their motor. In that case, the relative losses of the selected motor when operated on a RCDM shall be determined.

A CDM provider shall declare the losses of its dedicated CDM and display an IE Class according to Figure 16. The provider may also declare an IES class for a PDS equipped with a CDM. In that case, the losses of the selected CDM shall be measured or calculated. When actual motor data is not available, the losses of the RM shall be used.

The CDM provider may provide information in the documentation which determination methods described in Clause 7 have been used. This includes the expected IES classes for different combinations of a CDM and selected specific motors using the methods of this document.

Any or all available control features of the CDM may be employed to minimize losses during the PDS evaluation and shall be reported as part of the record of evaluation.

A spreadsheet on the application of "test" and "reference" devices for the determination of IE and IES classes are shown in Figure 10. It also gives guidance to sole CDM or sole motor providers regarding the determination of the IES class of a resulting PDS in combination with "test" or "reference" devices.

For PDS providers, the upper left-hand intersection field of "Motor" and "CDM" is applicable.

The interpolation coefficients  $c_{Ln}$  calculated in formula (E.8) can then be used to calculate the losses at any arbitrary operating point using formula (E.4) or formula (E.5) as appropriate.

Combination of	CDM	Test CDM	Reference CDM (RCDM)	
<b>Motor</b>	Determine the IES class of the resulting PDS	Determine the IE class of the given motor (IEC TS 60034-2-3)	Determine the IES class of the resulting PDS	<b>Guidance for motor manufacturer</b>
<b>Test load</b>	Determine the IE class of the given CDM	Combination not used	Combination not used	
<b>Reference motor (RM)</b>	Determine the IES class of the resulting PDS	Combination not used	Calculation model of a reference PDS	
	<b>Guidance for CDM manufacturer</b>			

IEC

A reference motor is a motor that is to be used for IES classification and is to be selected from IEC TS 60034-30-2.

**Figure 10 – Guidance for CDM and motor providers for the usage of "test" and "reference" devices to determine the IE/IES classes**

This approach allows the determination of the IES efficiency class of a final PDS even when only one component (the motor or the CDM) is available.

## 5 Determination of CDM, motor and PDS loss by calculation

### 5.1 General

Mathematical models can be used for the determination of losses of the CDM, motor and PDS. They allow for the calculation of losses of a product without measurements.

Simple state of the art models for loss calculation are given in Annex C. These models consist of formulae, variables and parameters. The formulae and loss calculation procedures are generally accepted today and published in literature. The variables depend on the operating point of the evaluated CDM, motor or PDS. The parameters are physical values describing a physical product. In order to determine the losses of a product, these parameters need to be set according to specific design of the product.

Providers of CDMs may use their own analytical model to determine CDM losses with more details; however, providers are responsible for correct accuracy of the model.

If an extended product committee needs to define a typical CDM or PDS for their dedicated application(s), typical CDM or PDS parameters for those specific applications may be used. These deviations shall be provided in the extended product standard.

For the reference CDM (RCDM), the reference parameters are defined in 5.2 and Annex C.

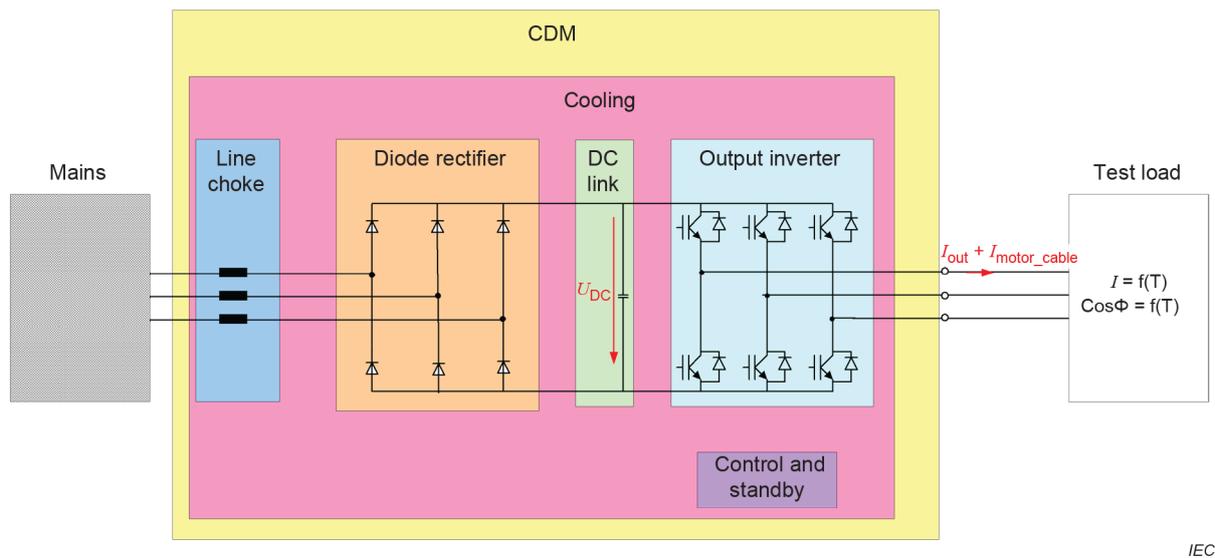
For reference motor (RM), 5.3.3 refers to the reference parameters.

The procedure of the loss determination is illustrated in Clause 7.

## 5.2 CDM losses

### 5.2.1 General procedure and definition of the CDM and the test load

A typical CDM and test load are illustrated in Figure 11.



**Figure 11 – Illustration of a typical CDM and test load**

The goal is to describe the CDM losses as a function of torque and speed of the PDS. However, the CDM losses depend on its relative fundamental output voltage, its relative fundamental output current and the phase angle between the fundamental CDM output voltage and fundamental CDM output current.

The relative output voltage is approximately the same as the relative output frequency. This is at least true in the operating field up to the nominal motor speed. In the range of field weakening, the relative CDM output voltage remains 1,00 for all motor speeds above the nominal motor speed (see also Annex I).

The first step is to convert the motor speed into a CDM output frequency. The motor torque shall also be converted to a CDM output current and a phase angle between the fundamental output current and output voltage of the CDM.

In a first order approximation, the relative output speed of the PDS can be regarded as being identical to the relative CDM output frequency.

For CDM or SDOM evaluation, the data shown in Table 1 and Table 2, obtained by measurements on physical motors, shall be used as test load data for all frequencies within scope.

**Table 1 – Minimum test load currents at different points of operation**

Torque current %	Test load current $\frac{I_{out}}{I_{r,out}}$ for the apparent power range $S_{r,equ}$ of				
	0,278 kVA (0,12 kW) to < 1,29 kVA (0,75 kW)	1,29 kVA (0,75 kW) to < 7,94 kVA (5,5 kW)	7,94 kVA (5,5 kW) to < 56,9 kVA (45 kW)	56,9 kVA (45 kW) to < 245 kVA (200 kW)	245 kVA (200 kW) to < 1 209 kVA (1 000 kW)
25	0,79	0,58	0,45	0,42	0,39
50	0,81	0,71	0,60	0,58	0,56
75	0,89	0,82	0,79	0,78	0,77
100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

**Table 2 – Test load displacement factor between fundamental output current and fundamental output voltage at different points of operation**

Torque current %	Test load displacement factor $\cos \phi$ for the apparent power range $S$ of				
	0,278 kVA (0,12 kW) to < 1,29 kVA (0,75 kW)	1,29 kVA (0,75 kW) to < 7,94 kVA (5,5 kW)	7,94 kVA (5,5k W) to < 56,9 kVA (45 kW)	56,9 kVA (45 kW) to < 245 kVA (200 kW)	245 kVA (200 kW) to < 1 209 kVA (1 000 kW)
25	0,34	0,38	0,49	0,54	0,57
50	0,51	0,60	0,71	0,75	0,78
75	0,64	0,72	0,80	0,83	0,85
100 <sup>a</sup>	0,73	0,79	0,85	0,86	0,87
All required displacement factors in Table 2 apply when loading a CDM or SDOM at 25 –75 % with an electronic load.					
<sup>a</sup> When loading a CDM or SDOM with a motor, only the 100 % requirement applies.					

NOTE When calculating CDM or SDOM losses, the requirement for the displacement factor is equal to when using an electronic load.

When loading a CDM or SDOM with a motor, the requirement to the displacement factor is only at 100 % load current. This shall be achieved within a tolerance of  $\pm 0,08$ . If unsuccessful, the load motor shall be changed.

Test load current in Table 1 and test load phase angle in Table 2 for different related torque values depend on the rated power. To limit the amount of required data, motors in a certain power range are classified within one class. The amount of uncertainty on the resulting power losses of the CDM introduced thereby is small enough to justify the simplification. The test load data in Table 1 and Table 2 can be used for any CDM relative output frequency. Data for torque currents different from the defined operating points in Table 1 and Table 2 shall be obtained by linear inter- and extrapolation from the defined values.

The mathematical model of a CDM or SDOM shall be calculated by using its rated output current. If a CDM is not specified with a rated output current, but only with a rated real power  $P_{r,M}$ , its rated CDM output current shall be calculated from the rated real power by Formula (3), using the phase angle from Table 2 and the IE2 efficiency  $\eta$  defined in IEC 60034-30-1:

$$I_{r,out} = \frac{P_{r,M}}{\sqrt{3} \cdot U_{1,r,out} \cdot \cos\Phi \cdot \eta_{nMotor}} \quad (3)$$

The rated apparent CDM output power shall be calculated as shown in Formula (4):

$$S_{r, \text{equ}} = \sqrt{3} \cdot U_{1r, \text{out}} \cdot I_{r, \text{out}} = \frac{P_{r, \text{M}}}{\cos \Phi \cdot \eta_{\text{Motor}}} \quad (4)$$

For loss calculation of a CDM, the following loss elements shall be considered:

- losses of output inverter stage;
- losses of input converter;
- input choke losses;
- DC link losses;
- current rail losses;
- control and standby losses;
- cooling loss factor.

All losses in other parts of the CDM can be neglected in the mathematical model, as they are significantly lower than the losses described above.

For calculating the losses of a CDM with the input variables from Table 1 and Table 2, the analytical Formulae (C.1) to (C.10) and (5) and (6) given below can be used. In order to calculate the losses of a physical CDM, the parameter values of the physical CDM shall be used. Only the included elements of the modules shall be considered for calculating the losses of an SDIM or an SDOM.

The results of the RCDM calculations are given in Table 7 for the IE Class determination and in Table A.1 for the eight operating points defined in Figure 6. The RCDM is based on 400 V supply voltage.

### 5.2.2 Overall CDM losses

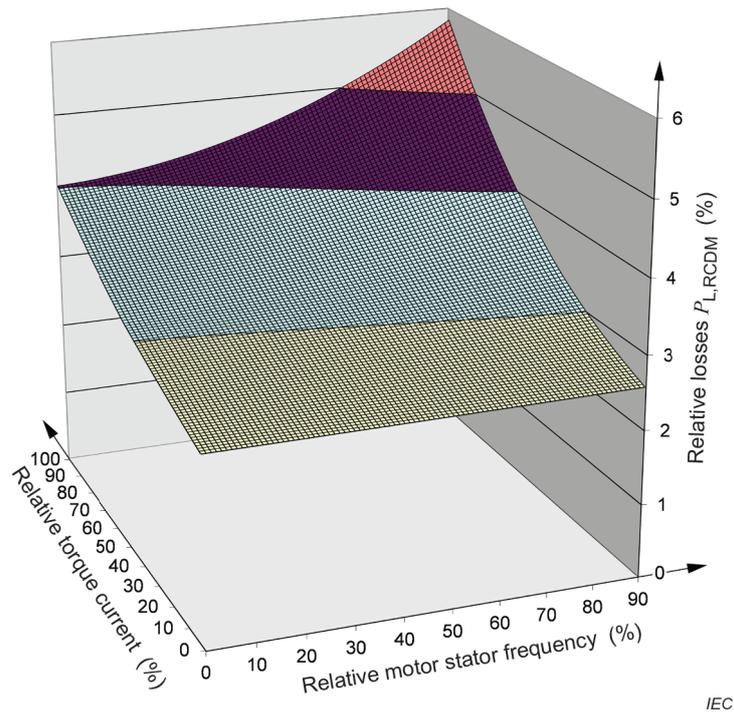
All the losses in the CDM shall be with reference to the rated apparent output power of the PDS, which is formed by the rated output phase voltage and rated output current of the CDM. As a final result of 5.2 and Annex C, the absolute CDM losses result in Formula (5):

$$P_{L, \text{CDM}} = P_{L, \text{inverter}} + P_{L, \text{rectifier}} + P_{L, \text{choke}} + P_{L, \text{rails}} + P_{L, \text{DC\_link}} + P_{L, \text{control}} + P_{L, \text{cooling}} \quad (5)$$

The relative losses of the CDM result in Formula (6):

$$p_{L, \text{CDM}} = \frac{P_{L, \text{CDM}} / \text{kW}}{S_{r, \text{equ}} / \text{kVA}} \quad (6)$$

The following Figure 12 shows the relationship between relative torque current, relative motor stator frequency and relative losses  $p_{L, \text{CDM}, \text{relative}}$  of the 9,95 kVA (see Table 7) reference CDM operated at 400 V.



**Figure 12 – Example of relative losses  $p_{L,CDM}$  of the 9,95 kVA RCDM**

The following Table 3 shows the relative losses of the 400 V/9,95 kVA reference CDM at the operating points defined in Figure 6.

**Table 3 – Example of relative losses of the 400 V/9,95 kVA reference CDM at the operating points described in Figure 6**

$S_{r, equ}$	$I_{rout}$	$P_{L,RCDM}$ (0;25)	$P_{L,RCDM}$ (0;50)	$P_{L,RCDM}$ (0;100)	$P_{L,RCDM}$ (50;25)	$P_{L,RCDM}$ (50;50)	$P_{L,RCDM}$ (50;100)	$P_{L,RCDM}$ (90;50)	$P_{L,RCDM}$ (90;100)
kVA	A	%	%	%	%	%	%	%	%
9,95	14,4	2,80	3,09	4,02	2,86	3,28	4,64	3,61	5,84

The value of 5,84 % of losses refers to the rated apparent output power of 9,95 kVA, resulting in absolute loss value of 581 W. The relative losses of CDMs with a different rated power are given for the operating point (90;100) in Table 7 and in Table A.1 for all operating points defined in Figure 6.

**5.2.3 Loss determination of CDMs composed by combination of submodules**

Losses of a CDM composed by a combination of SDIM and SDOM shall be determined by adding the losses of the sub modules, taking into account that they are representing the same operating point.

$$P_{L,CDM} = P_{L,SDIM} + P_{L,SDOM} \tag{7}$$

For the determination of SDOM losses, the CDM operation points are defined and shall be used. For these operating points, the corresponding losses of the SDIM shall be determined. Thereto, the CDM equivalent output current of the SDIM  $I_{CDMe,SDIM,out}$  needs to be calculated.

Assuming that the active power at the resulting CDM/SDOM output and the SDIM output are identical:

$$P_{\text{out,CDM}} = \sqrt{3} U_{1,r,\text{out}} I_{r,\text{out}} \cos\Phi_{(90,100)} = P_{\text{CDMe,SDIM}} = U_{dc} I_{\text{CDMe,SDIM,out}} \quad (8)$$

the CDM equivalent SDIM output current can be calculated by

$$I_{\text{CDMe,SDIM,out}} = \sqrt{3} \frac{U_{1,r,\text{out}}}{U_{\text{DC}}} I_{r,\text{out}} \cos\Phi_{(90,100)} \quad (9)$$

NOTE SDOM losses are quite small compared to the rated SDOM power and are therefore neglected for this calculation.

The DC link voltage of the SDIM is dependent on the converter technology. For a diode bridge rectifier, the ratio between DC link voltage and CDM output voltage is about 1,35, which is a minimum for this relationship without significant overmodulation.

To get part load information of SDIM operating points comparable to the operating points of the CDM, the active power at the SDIM in the part load operating points shall be used. Assuming that the active power at the resulting CDM output and the SDIM output are identical also at part load condition, the active SDIM power at part load operating point ( $f_{\text{op}}, i_{\text{op}}$ ) is given by

$$P_{\text{SDIM}}(f_{\text{op}}, i_{\text{op}}) = P_{\text{CDMe,SDIM}}(f_{\text{op}}) \frac{I_{\text{out}}(i_{\text{op}})}{I_{1,r,\text{out}}} \frac{\cos\Phi(f_{\text{op}}, i_{\text{op}})}{\cos\Phi_{(90,100)}} \quad (10)$$

where

$I_{\text{out}}/I_{1,r,\text{out}}$  is the test load current given in Table 1;

$\cos\Phi(f_{\text{op}}, i_{\text{op}})$  is the corresponding test load displacement factor given in Table 2.

The modulation index  $m$  is proportional to the inverter output voltage and therefore proportional to  $f_{\text{op}}$ .

These factors are dependent on the power rating of the CDM, and the appropriate factors of Table 1 and Table 2 apply. Thus, the loss calculation can be done at every operating point and for every nominal power rating.

For the CDM operating points defined in 4.2, the SDIM active power  $P_{\text{SDIM}}(f_{\text{op}}, i_{\text{op}})$  given in

Table 4, or calculated/measured values for any point, shall be used to determine SDIM losses by calculation or measurement. Linear interpolation between neighbouring operating points can be used for loss determination at operating points not defined in 7.5.4.

Detailed information on the calculation of the corresponding power ratio for the defined operating points can be found in Clause F.5.

**Table 4 – Active SDIM power ratio to be used for loss calculation at the CDM operating points**

CDM operating point  <i>(f; i)</i>	Active SDIM power  $\frac{P_{SDIM}}{P_{CDMe,SDIM}}$  %
(90; 100)	90
(50; 100)	50
(0; 100)	10
(90; 50)	50
(50; 50)	25
(0; 50)	5
(50; 25)	10
(0; 25)	5

#### 5.2.4 Validation of loss calculation method

The loss calculation method shall be validated by comparing the calculation results with loss measurements taken from the CDM and SDM using one of the measurement methods given in 7.5.

- Validation of single CDM/SDM size  
The qualification is made at the (90;100) operation point, the same point as used for determining the IE Class. The calculation/simulation shall be validated by comparing with a measurement result. The calculated loss value shall be within  $\begin{matrix} -10 \\ +30 \end{matrix}$  % of the measured value.
- Validation of a range of CDMs/SDMs  
When a range of CDMs/SDMs with similar design (e.g. same product family) is validated, there shall be at least one validation by means of measurement within one decade of the power or current rating. For example, if the rating is 1 kVA to 10 kVA, as a minimum one test validation is needed.

### 5.3 Motor losses

#### 5.3.1 General

Three-phase asynchronous motors are widely used in industrial applications. They are standard products and generally run direct on-line. Many are also capable of operation on variable voltage and frequency supplied by a CDM.

In order to determine losses, efficiencies and the efficiency class of a PDS, the user needs information on motor losses. Such information can be obtained either

- from the motor provider, or
- from efficiency of the reference motor as given in IEC 60034-30-1:2014, Annex A, and IEC TS 60034-2-3 (0 % to 100 % torque and speed), or
- from typical losses of standard machines as given in Annex E.

The interpolation procedure given in Annex E shall be applied to obtain losses and efficiency at any required operating point (load, torque), for example those of 4.2, from the losses provided by the provider at the seven reference points (see Table E.1).

### 5.3.2 Additional harmonic losses of three-phase asynchronous motors fed by a CDM

Often, losses of three-phase induction motors are only available for on-line operation at purely sinusoidal voltage. When such a motor is operated on a CDM, additional harmonic losses  $P_{LHL}$  are caused by the non-sinusoidal voltage supply.

Preferably, the motor should be re-tested on a CDM to determine these losses (see Annex E).

Alternatively, the additional harmonic losses can be determined by using a fixed ratio  $r_{HL}$  as an estimation.

$r_{HL}$  represents the ratio of additional harmonic losses of converter supply to losses of the motor supplied with sinusoidal input voltage at nominal power and nominal frequency (see IEC 60034-2-3).

The total losses are:

$$P_{LHL} = (1 + r_{HL}) \cdot P_{LTsin} \quad (11)$$

where

$P_{LTsin}$  are the total losses determined at sinusoidal power supply at any operating point;

$P_{LHL}$  are the total losses estimated for CDM power supply at that operating point.

Additional harmonic losses due to a converter supply shall be considered constant and independent of load and speed. They are dependent on the switching frequency.

Unless  $r_{HL}$  is known from measurements according to IEC TS 60034-30-2, the following estimations shall be used:

- $r_{HL} = 0,15$  (15 %) for motors with a rated output power up to 90 kW and 4 kHz switching frequency;
- $r_{HL} = 0,25$  (25 %) for motors with a rated output power above 90 kW and 2 kHz switching frequency

NOTE For switching frequencies higher than the given values, the given  $r_{HL}$  values are considered conservative approaches.

### 5.3.3 Motor loss data

Motor values shall be taken from IEC TS 60034-30-2.

IEC TS 60034-31 is applicable to all electrical machines covered by IEC 60034-1, IEC 60034-30-1 and IEC TS 60034-30-2.

## 5.4 Power drive system (PDS) losses

### 5.4.1 PDS losses

The resulting electrical power losses of the PDS at a specific speed ( $n$ ) and torque ( $T$ ) operation point will be the sum of the electrical power losses of the subcomponents of the PDS according to Formula (12):

$$P_{L,PDS(n;T)} = P_{L,CDM(f;I)} + P_{L,Acc(f;I)} + P_{L,Mot(n;T)} \quad (12)$$

where

$P_{L,CDM}$  are the losses of the CDM according to methods from 5.2 and Annex C;

$P_{L,Mot}$  are the losses of the motor according to methods from 5.3;

$P_{L,Acc}$  are the losses of the accessories according to Annex B.

The calculation of losses is generally performed according to Formula (12). However, PDS losses at 100 % speed and 100 % torque are determined according to Formula (13) by using the 90 % frequency and 100 % torque point of the RCDM and the 100 % speed and 100 % torque point of the motor.

The 90 % frequency of the CDM is used in order to avoid overmodulation, which would appear for 100 % frequency of the CDM. Overmodulation decreases the losses of the CDM but increases harmonic motor losses due to higher harmonic contents in the motor's voltages and currents.

The loss calculation of the PDS is using the assumption that the CDM losses at the operating point 100 % frequency and 90 % voltage are the same as for the operating point at 90 % frequency and 90 % voltage. It is further assumed that fundamental losses of the RM increase with a correction factor  $k_{VD} = 1,11$  (according to 10 % voltage drop) compared to Formula (12).

$$P_{L,PDS(100;100)} = P_{L,RCDM(90;100)} + k_{VD} \cdot P_{L,RM(100;100)} \tag{13}$$

The default parameter for Formula (13) is given in Table 5.

**Table 5 – Reference parameter for Formula (13)**

Abbreviation	Description	Value	Unit
$k_{VD}$	Correction factor of motor losses for the PDS	1,11	

It is in the responsibility of the PDS supplier to add all losses that are part of the PDS, for example motor, CDM, accessories (filter, cable, etc.), for the calculation of losses of an actual PDS.

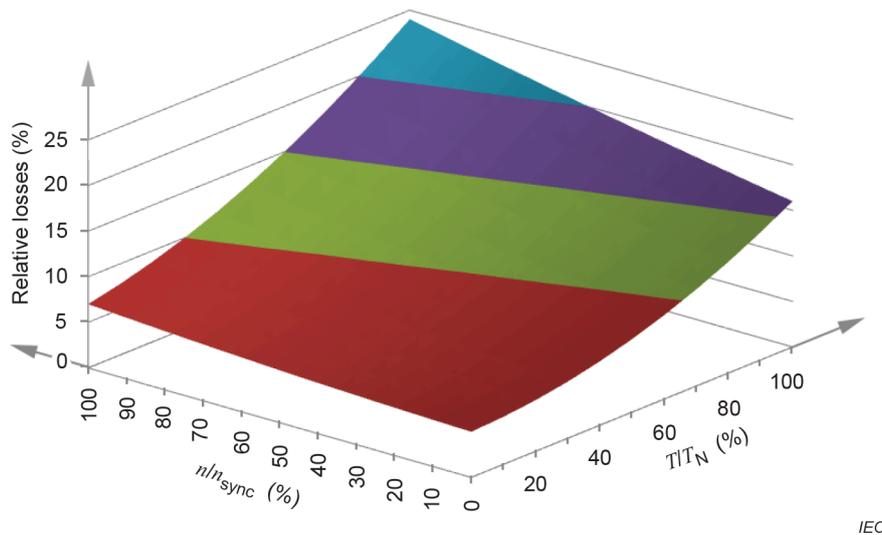
Table 6 shows the relative losses of a 400 V/7,5 kW PDS (RCDM and RM) at the operating points defined in Figure 6.

**Table 6 – Relative losses of the 400 V/7,5 kW PDS**

$P_{r, M}$	$P_{L, PDS, relative (0;25)}$	$P_{L, PDS, relative (0;50)}$	$P_{L, PDS, relative (0;100)}$	$P_{L, PDS, relative (50;25)}$	$P_{L, PDS, relative (50;50)}$	$P_{L, PDS, relative (50;100)}$	$P_{L, PDS, relative (90;50)}$	$P_{L, PDS, relative (90;100)}$
kW	%	%	%	%	%	%	%	%
7,5	6,14	7,83	15,10	7,74	9,69	17,90	12,02	21,86

NOTE This PDS example is based on a 7,5 kW 1 500 rpm IE2 motor and a 9,95 kVA IE2 CDM with no correction factors applied.

An example for the relative losses is shown in Figure 13. All relative values are related to the rated output power of the PDS.



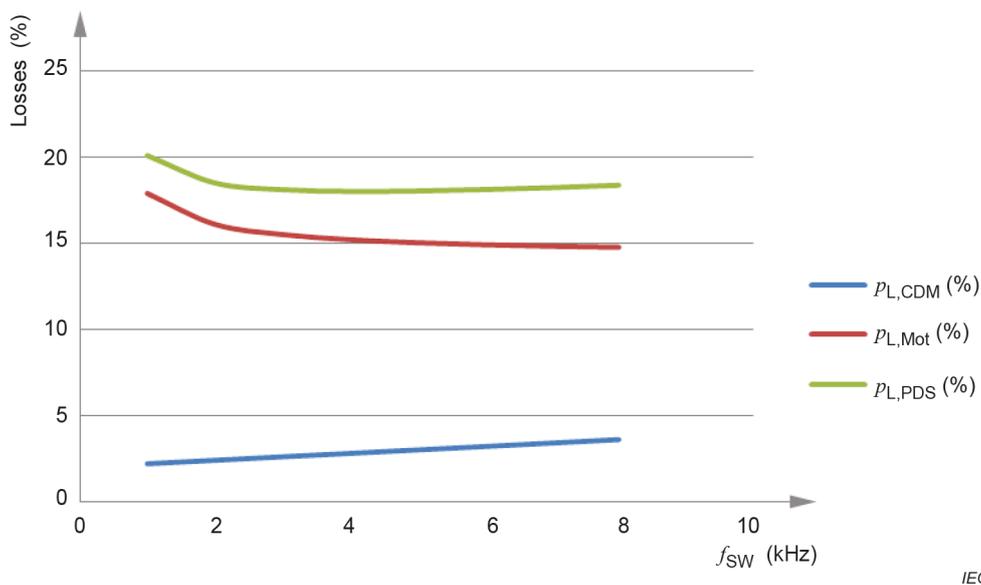
**Figure 13 – Example of the relative power losses of PDS as function of speed and torque**

**5.4.2 PDS losses at different switching frequencies**

PDS are often operated at various or different switching frequencies. An important parameter for the loss calculation of the CDM is the switching frequency. An increased switching frequency will increase the losses of the CDM but the additional harmonic losses of the motor will decrease.

The resulting power losses of a PDS for a dedicated switching frequency will be the sum of the electrical power losses of the subcomponents of the PDS – see Formula (14) and example in Figure 14 – when the operating point (speed, torque) is kept constant.

$$P_{L,PDS}(f_{sw}) = P_{L,CDM}(f_{sw}) + P_{L,Acc}(f_{sw}) + P_{L,Mot}(f_{sw}) \tag{14}$$



**Figure 14 – Example representation of the relative power losses versus switching frequency of a 7,5 kW to 11 kW PDS**

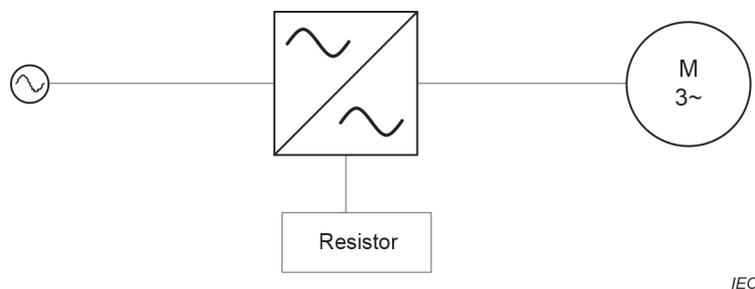
## 5.5 PDS losses for regenerative operation

Some PDSs have the capability of handling regenerative loads, i.e. loads that generate electrical power. Power can be generated from decelerating the inertia of a load or motor, or from torque produced by the load (for example wind milling of a fan caused by external air).

Some CDMs have the capability to feed the generated power into the mains by using an active infeed converter (AIC). The power fed into the mains is the generated electrical power of the generator/motor minus the losses of the CDM.

A CDM can also have the capability to dissipate the generated power into heat, which is distributed inside or outside of the CDM (for example by a resistor) – see Figure 15.

A CDM can also have the capability to store electrical energy in batteries, capacitors or similar technologies. This energy can later be reused when active motor power is needed. Such storage devices cause losses that shall be added as accessory losses when calculating the losses of the extended product.



IEC

**Figure 15 – Example of a CDM with resistor for dissipating generated power**

## 5.6 Losses of motor starters

For the purpose of loss calculations, the power losses of motor starters (including control losses) according to the product standard IEC 60947-4-1 shall be calculated as 0,1 % of the rated motor power.

Soft starters according to the product standard IEC 60947-4-2 are usually mechanically bypassed at longer duty cycle (S1 operation) and therefore calculated like motor starters.

The power losses of motor starters are sufficiently small so that the same IE Class is used for a motor as well as for a motor controlled by a starter.

## 6 Limits of IE and IES Classes

### 6.1 General

The losses or efficiency of the reference CDM and standardized motor are used as a basis for assessing compliance with an IE and IES class of an existing motor, SDM, CDM or PDS.

Reference CDM is associated with IE1. Existing devices with losses lower than the reference losses (i.e. better efficiency) are identified by levels higher than 1. The threshold and tolerance of each level are specified in 6.2 to 6.5.

Compliance with an IE and IES class can be shown by either measurements or by calculations, which are described in Clause 7. The various test points shown in Figure 4 can be used to determine the losses and energy efficiency of an overall system for a specific application.

In order to minimize the certification process, compliance with an IE Class shall be shown for the SDOM or CDM at rated current and 90 % rated motor stator frequency, respectively rated motor voltage, only. Compliance with an IE Class for an SDIM shall only be evaluated for 100 % rated power.

Compliance with an IES class shall be shown for the PDS 90 % rated motor speed and 100 % rated torque only.

Losses in regenerative operation is not taken into account when determining an IE or IES class for an SDIM, CDM or a PDS.

NOTE The rated output current of a CDM is typically its maximum continuous output current.

## 6.2 CDM

The reference CDM is described by the parameters given in Annex C and 5.2. Its losses are given in Table 7.

The power rating of a RCDM is defined according to its apparent output power, which is of most influence on CDM losses.

As CDMs are usually rated according to output current rather than apparent output power, examples of rated RCDM output currents are given in Table 7 for typical standard line voltages. The relation to standard motor power ratings defined in IEC 60034-30-1 can be found in Table A.1.

**Table 7 – Reference CDM losses for class IE1 definition**

Apparent output power $S_{r, \text{equ}}$	Relative losses $P_{L, \text{RCDM}}(90, 100)$	Absolute losses $P_{L, \text{RCDM}}(90, 100)$	Examples for CDM output current at typical line voltages			
			$U_{1, r, \text{out}} = 200 \text{ V}$	$U_{1, r, \text{out}} = 400 \text{ V}$	$U_{1, r, \text{out}} = 460 \text{ V}$	$U_{1, r, \text{out}} = 690 \text{ V}$
kVA	%	kW	$I_{r, \text{out}} = \frac{S_{r, \text{equ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1, r, \text{out}}}$			
			A			
0,278	35,85	0,100	0,803	0,401	0,349	0,233
0,381	27,30	0,104	1,10	0,550	0,478	0,319
0,500	21,80	0,109	1,44	0,722	0,627	0,418
0,697	16,84	0,117	2,01	1,01	0,875	0,583
0,977	13,21	0,129	2,82	1,41	1,23	0,818
1,29	11,02	0,142	3,73	1,86	1,62	1,08
1,71	9,51	0,163	4,94	2,47	2,15	1,43
2,29	8,21	0,188	6,62	3,31	2,88	1,92
3,30	7,20	0,237	9,54	4,77	4,15	2,76
4,44	6,72	0,299	12,8	6,41	5,58	3,72
5,85	6,39	0,374	16,9	8,44	7,34	4,89
7,94	6,01	0,477	22,9	11,5	9,96	6,64
9,95	5,84	0,581	28,7	14,4	12,5	8,32
14,4	5,43	0,781	41,6	20,8	18,1	12,1
19,5	5,18	1,01	56,2	28,1	24,4	16,3
23,9	5,05	1,21	68,9	34,4	30,0	20,0
28,3	4,97	1,41	81,6	40,8	35,5	23,6

Apparent output power $S_{r, \text{equ}}$	Relative losses $p_{L, \text{RCDM}}(90, 100)$	Absolute losses $P_{L, \text{RCDM}}(90, 100)$	Examples for CDM output current at typical line voltages			
kVA	%	kW	$I_{r, \text{out}} = \frac{S_{r, \text{equ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1, r, \text{out}}}$			
			$U_{1, r, \text{out}} =$ 200 V	$U_{1, r, \text{out}} =$ 400 V	$U_{1, r, \text{out}} =$ 460 V	$U_{1, r, \text{out}} =$ 690 V
			A			
38,2	4,87	1,86	110	55,2	48,0	32,0
47,0	4,79	2,25	136	67,8	58,9	39,3
56,9	4,75	2,70	164	82,1	71,4	47,6
68,4	4,74	3,24	197	98,7	85,8	57,2
92,8	4,69	4,35	268	134	116	77,6
111	4,66	5,17	321	160	139	93,0
135	4,11	5,55	391	195	170	113
162	4,10	6,65	468	234	203	136
196	4,09	8,02	566	283	246	164
245	4,07	10,0	706	353	307	205
302	4,10	12,4	872	436	379	253
381	4,09	15,6	1 099	550	478	319
429	4,09	17,5	1 239	619	539	359
483	4,09	19,8	1 396	698	607	405
604	4,08	24,7	1 745	872	758	506
677	4,08	27,6	1 954	977	850	566
761	4,08	31,1	2 198	1 099	956	637
858	4,08	35,0	2 477	1 239	1 077	718
967	4,08	39,4	2 791	1 396	1 214	809
1 088	4,08	44,3	3 140	1 570	1 365	910
1 209	4,08	49,3	3 489	1 745	1 517	1 011

NOTE 1 The change of the switching frequency from 4 kHz at 111 kVA to 2 kHz at 135 kVA causes a discontinuity in the relative RCDM loss values  $p_{L, \text{RCDM}}$  between those power ratings.

NOTE 2 For an SDIM, the active output power is equal to the apparent output power.

If the rated apparent output power of a CDM or SDM is between two values in Table 7, the relative loss value  $p_{L, \text{RCDM}}$  of the RCDM with the next higher power rating shall be used for the IE Class determination. The RCDM losses in Table 7 shall be used for all low voltage CDMs.

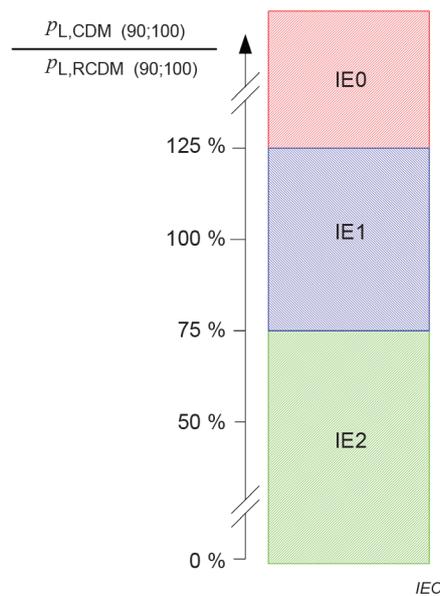
If a CDM is composed of any combination of SDIM and SDOM which are already IE classified, the CDM does not need to be classified.

A CDM shall be classified as IE1 if its relative losses are within ±25 % of the RCDM value.

A CDM shall be classified as IE0 if its relative losses are more than 125 % of the RCDM value.

A CDM shall be classified as IE2 if its relative losses are less than 75 % of the RCDM value.

These definitions are illustrated in Figure 16.



**Figure 16 – Illustration of IE Classes for a CDM**

NOTE 3 In this document, limit classes for CDMs are defined up to IE2 only. Classes IE 3 up to IE 9 are reserved to describe future technological improvements of CDMs.

### 6.3 Correction factors for CDMs with modified functionality

#### 6.3.1 General

CDM topologies other than the defined reference CDM show advantages or drawbacks over the reference CDM which may not be directly visible in the relative losses and corresponding IE classification of the CDM. A low-harmonic drive with sinusoidal input currents, for instance, considerably reduces losses in the grid by mitigation harmonic currents but shows higher losses in the CDM. The total system efficiency, also considering losses in the grid, can therefore be higher. Other drive elements such as sine motor filter improve EMI behaviour of a PDS considerably but show higher losses compared to a drive without any output filter.

In order to take these advantages into account, correction factors for RCDM losses are used.

The basic concept is to compare measured or calculated CDM or SDM losses with modified reference CDM losses  $p_{L,RCDM,m}$  where the benefit of this topology is expressed by correction factors  $k_{cf,i}$ .

The reference CDM losses defined in 6.2 and Table 7 consider the following drive elements:

- input converter losses of a three-phase diode bridge rectifier with a line choke of  $u_k = 2\%$  and  $THD_1$  of input currents of approximately 60 %;
- DC link losses;
- output inverter losses without any output filter;
- current conductor losses;
- cooling losses of an integrated fan;
- control and standby losses.

For topologies with other characteristics, modified reference losses  $p_{L,RCDM,m}$  are calculated by:

$$p_{L,RCDM,m(90;100)} = \frac{1}{n} \left( 1 + \sum_{i=1}^N k_{cf,i} \right) \cdot p_{L,RCDM(90;100)} \quad (15)$$

For SDIM, Formula (16) is applied:

$$p_{L,SDIM,m(90;100)} = \frac{1}{n} \left( 1 + \sum_{i=1}^N k_{cf,i} \right) \cdot p_{L,RCDM(90;100)} \quad (16)$$

For SDOM, Formula (17) is applied:

$$p_{L,SDOM,m(90;100)} = \frac{1}{n} \left( 1 + \sum_{i=1}^N k_{cf,i} \right) \cdot p_{L,RCDM(90;100)} \quad (17)$$

For a CDM built from SDIM and SDOM, Formula (18) is applied:

$$p_{L,RCDM(SDIM+SDOM),m(90\%;100\%)} = p_{L,SDIM,m(90\%;100\%)} + p_{L,\frac{SDOM,m(90\%;100\%)}{S_{r,SDOM,out}}} \quad (18)$$

For these calculations, the correction factors  $k_{cf,i}$  given in Table 8 for the different characteristics shall be used. The converter losses of the CDM or SDM shall then be compared to the modified reference losses  $p_{L,RCDM,m}$  for determination of IE Classes. Examples of the application of this concept can be found in Clause F.6.

The applied converter characteristic and corresponding correction factors  $k_{cf,i}$  shall be stated in user documentation.

### 6.3.2 Correction factors

Correction factors to be applied in Formula (18) are given in Table 8 for topologies with different characteristic. The given correction factors are only used for determination of IE Classes of an individual CDM or SDM or during IES determination for the CDM as part of a PDS. Information on combining a SDIM and SDOM to a CDM and corresponding loss calculation is given in 5.2.3.

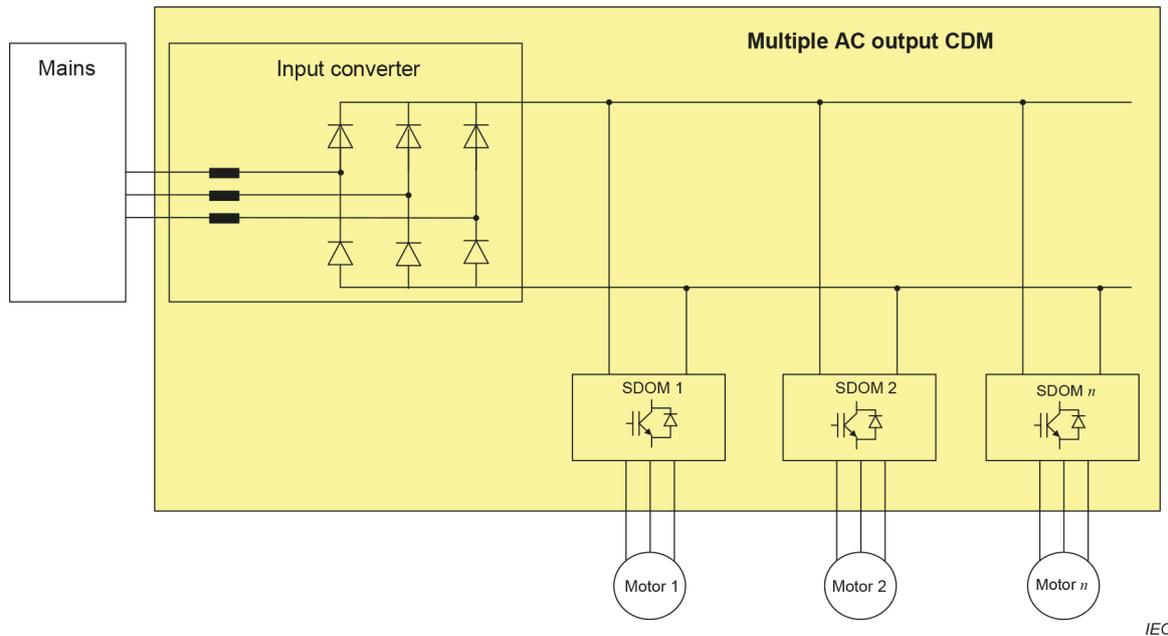
**Table 8 – Correction factors for different CDM, SDIM and SDOM characteristics**

Characteristic		Correction factor $k_{cf,i}$	
CDM without regenerative capability <sup>a</sup>	$THD_1 > 60\%$ (high harmonic) <sup>c</sup>	–0,1	1
	$10\% < THD_1 \leq 60\%$ (reference) <sup>c</sup>	0	2
	$THD_1 \leq 10\%$ (low harmonic) <sup>c</sup>	0,8	3
CDM with regenerative capability <sup>a,b</sup>	$THD_1 > 10\%$ <sup>c</sup>	0,4	4
	$THD_1 \leq 10\%$ (low harmonic) <sup>c</sup>	1,0	5
CDM with $DF_U \leq 10\%$ (e.g. sinewave output filter)		0,8	6
CDM with rated input voltage $\leq 250\text{ V}$ (three-phase)		0,5	7
CDM with single phase input	Rated input voltage $\leq 250\text{ V}$	0,6	8
	Rated input voltage $> 250\text{ V}$	0,2	9
CDM with external cooling <sup>d</sup>		–0,2	10
SDIM, SDOM with external cooling <sup>d</sup>		–0,1	11
SDIM without regenerative capability <sup>a</sup>	$THD_1 > 60\%$ (high harmonic) <sup>c</sup>	–0,65	12
	$10\% < THD_1 \leq 60\%$ <sup>c</sup>	–0,55	13
	$THD_1 \leq 10\%$ (low harmonic) <sup>c</sup>	0,35	14
SDIM with regenerative capability <sup>a,b</sup>	$10\% < THD_1$ <sup>c</sup>	–0,1	15
	$THD_1 \leq 10\%$ (low harmonic) <sup>c</sup>	0,5	16
SDOM	$DF_U > 10\%$	–0,2	17
	$DF_U \leq 10\%$ (e. g. inverter stage with sinewave filter)	0,35	18
<sup>a</sup> Regenerative means CDM or SDM able to operate at regenerative mode at rated power, i.e. to feed energy generated by the generator/motor into the grid. <sup>b</sup> For CDMs or SDMs with regenerative function, only the losses in motoring mode are considered. <sup>c</sup> $THD_1$ is the THD value of the input currents at the nominal operating point considering harmonics up to order $H = 40$ . <sup>d</sup> External cooling means that the equipment needs active cooling but power for the cooling system is not provided via the input terminals of the CDM, SDIM or SDOM. The cooling might be integrated in the CDM, SDIM or SDOM or supplied independently. <sup>e</sup> The numeration in the right column is for information only on which correction factors are applied. Also see 8.4.6.			

### 6.3.3 Reference losses and loss determination concept for CDMs and SDOMs with multiple AC outputs

6.3.3 only applies to CDMs and SDOMs with a single input and multiple AC outputs sold as a single product and not able to be separated and therefore be assessed separately. Those sold as single output modules shall already be classified.

A CDM or SDOM can have more than one AC output. Such a CDM is shown in Figure 17.



**Figure 17 – Topology of a CDM with multiple AC outputs**

In this type of CDM, one input converter supplies a number of output inverters, each of them driving a different motor. This topology is particularly energy efficient because the braking energy of one motor can be transferred to the other motors via the DC link connection instead of being wasted in a braking resistor.

The rated power or current of the input converter is typically lower than the sum of the rated power or current of all output inverters. For this reason, the multiple AC output CDM cannot be operated at rated power of all output inverters simultaneously. Instead, the losses shall be determined for each output inverter separately. As the standby losses of the inactive output inverters add to the losses of the active output inverter, the RCDM losses shall be corrected with a factor of 0,1 for the IE Class determination. The multiple AC output CDM shall be classified according to the IE Class obtained from the output inverter with the highest power rating

The loss determination and classification of the multiple AC output CDM or SDOM shall be performed as follows.

- a) Disable all pulses for the output inverters 2 to  $n$ .
- b) Operate output inverter 1 at the eight operating points defined in Figure 6. The rated output current is the rated output current of output inverter 1.
- c) Determine losses for output inverter 1. During test, the rated power of the infeed section shall not be exceeded.
- d) Repeat the steps 1 to 3 for all other output inverters.
- e) The multiple AC output CDM or SDOM shall be classified according to the IE Class obtained from the output inverter with the highest power rating; therefore, select output inverter with the highest power rating.
- f) Select the RCDM losses according to Table 7.
- g) Apply a correction factor of 0,1 for CDM or 0,05 for SDOM to the selected RCDM losses. See Formulae (15) to (17) for guidance on where to apply the correction factors.
- h) Determine the IE Class for this output inverter according to 6.1 and 6.2 by using the corrected RCDM losses.

## 6.4 Motor

IE Classes for motors operated on a CDM are defined in the IEC 60034-30 series.

For this document, values from IEC TS 60034-30-2 are called reference values for motor losses for PDS loss calculation.

## 6.5 PDS

The IES classes of PDS system are defined in relation to sum of reference motor losses according to IEC TS 60034-30-2 and corrected losses, according, of a matching IE2 CDM by motor rated power.

A PDS shall be classified as IES0 if its relative losses are higher than the relative losses of the sum of a chosen IE1 motor and an IE2 CDM.

A PDS shall be classified as IES1 if its relative losses are lower or equal than the relative losses of the sum of a chosen IE1 motor and an IE2 CDM.

A PDS shall be classified as IES2 if its relative losses are lower or equal than the relative losses of the sum of a chosen IE2 motor and an IE2 CDM.

A PDS shall be classified as IES3 if its relative losses are lower or equal than the relative losses of the sum of a chosen IE3 motor and an IE2 CDM.

A PDS shall be classified as IES4 if its relative losses are lower or equal than the relative losses of the sum of a chosen IE4 motor and an IE2 CDM.

A PDS shall be classified as IES5 if its relative losses are lower or equal than the relative losses of the sum of a chosen IE5 motor and an IE2 CDM.

Limits for IES classes are determined by Formula (19):

$$p_{L,IESx,rpm} = \frac{p_{L,RM,IEx,rpm(90;100)} \cdot P_{r,RM} + p_{L,IE2,RCDM,m(90;100)} \cdot S_{r,CDM}}{P_{r,RM}} \quad (19)$$

where

- $x$  is the given IES class, equals the chosen IE Class of the motor;
- $p_{L,IESx,rpm}$  is the relative limit of the given IES class;
- $p_{L,IE2,RCDM,m(90;100)}$  is the relative losses of the corrected IE2 CDM;
- $p_{L,RM,IEx,rpm(90;100)}$  is the relative losses of the motor according to IEC TS 60034-30-2 with given IE Class and speed range.

Losses for the reference motor are to be derived from IEC TS 60034-30-2 and IEC 60034-30-1.

If the rated power of the PDS motor is not given in IEC TS 60034-30-2, the next higher motor power rating shall be used.

Relative motor losses are defined as given in Formula (20):

$$p_{L, RM, IEx, rpm(90;100)} = \frac{(1 - \eta_{(90;100)}) \cdot P_{out, RM(90;100)}}{P_{r, RM}} \quad (20)$$

where

$x$	is the given IE class;
$p_{L, RM, IEx, rpm(90;100)}$	is the relative motor losses;
$\eta_{(90;100)}$	is the motor efficiency at the operating point (90;100);
$P_{out, RM(90;100)}$	is the mechanical power of the reference motor at the operating point (90;100);
$P_{r, RM}$	is the rated power of the reference motor.

The rated apparent power of the CDM, depending on the motor rated power, to be used for IES classification shall be according Table A.1.

CDM losses in Table A.1 are for IE1 and shall be adapted to IE2 by multiplying the IE1 values by 0,75.

NOTE It is not possible to give fixed limits in table form as the limits are depending on chosen IES class/speed range/power and additional functionality (correction of reference losses) of the used CDM.

## 7 Loss determination

### 7.1 General

The purpose of Clause 7 is to define type tests which shall be performed on the CDM or SDM to verify the IE classification and for the PDS to verify the IES classification. Loss determination methods for IE energy classes of CDM or SDM and IES classes of PDS are considered as type testing of CDM, SDM and PDS in this document. Furthermore, determination procedures for CDM, SDM and PDS losses in partial load conditions are defined.

If a CDM or SDM is specified by active power only, its output current shall be calculated according to Formula (3). Its rated apparent output power shall be calculated according to Formula (4).

Losses and IE/IES classes shall be calculated and measured at rated input voltage and frequency.

Unless otherwise specified in the user documentation, voltage levels according to IEC 60038:2021, Table 1, shall be used.

In case a CDM or SDM covers several voltage levels, the selected voltage level for IE classification and loss information shall be given in documentation according to Clause 8. Furthermore, the rated equipment voltage and, in case of the PDS, rated motor speed shall be stated in the documentation.

## 7.2 Type testing of CDM or SDM for IE classification

To define the IE energy efficiency class of a CDM or SDM, calculation or type tests shall be performed. IE energy efficiency classes are defined based on a single operation point according to 6.1. The losses in this point shall be determined by any one of the following options:

- calculated single component loss determination as described in 7.4.1;
- input-output measurement according to 7.5;
- calorimetric measurement method according to 7.6.

NOTE 1 Determination of CDM or SDOM output current and requirements to the displacement factor are defined in Table 1 and Table 2 whereas for testing with a motor only displacement factor requirements at 100 % speed apply.

NOTE 2 Testing laboratories will normally use determination methods based on measurements, i.e. calorimetric or input-output determination methods.

If a CDM or SDOM is dedicated to run a non-asynchronous motor, it shall be tested with an appropriate test load, and the deviations from the test conditions described in 7.5.2 shall be stated in the user's documentation and the test report.

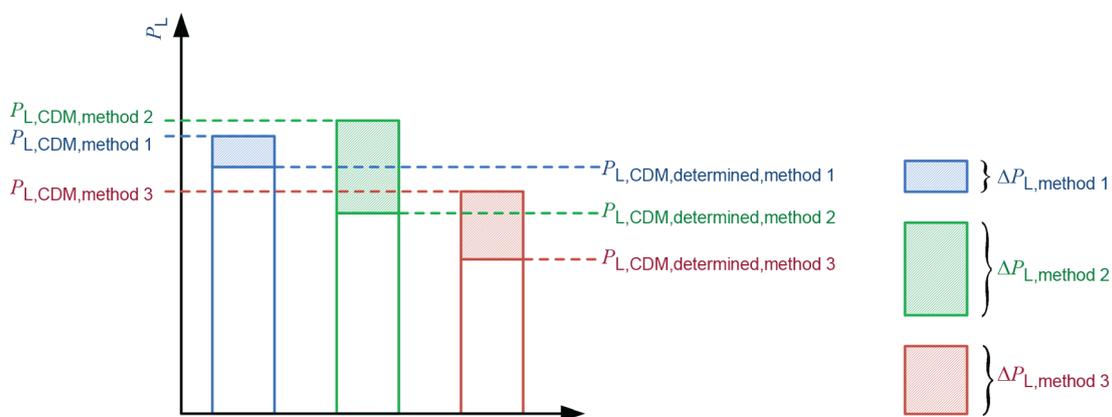
The losses required for IE energy efficiency classification shall be calculated from the determined losses  $P_{L,CDM,determined}$  and the measurement uncertainty according to Formula (21):

$$P_{L,CDM} = P_{L,CDM,determined} + \Delta P_{L,CDM} = P_{L,CDM,determined} (1 + \Delta p_{L,CDM}) \quad (21)$$

This corrected power loss value shall be used to define relative power losses of CDM or SDM.

The uncertainty of the used method shall be added to the determined loss value, as described in Figure 18, one of the 3 arbitrary methods shown.

The measurement uncertainty of the selected loss determination method shall be stated in the test report. The applied uncertainty shall be based on randomly occurring errors with normal distribution at 2 standard deviations (e.g. 95 % confidence level). Further information on uncertainties for different determination methods and a calculation procedure for loss uncertainty is given in Annex G.



IEC

**Figure 18 – Losses of CDM or SDM are provided as the sum of the determined losses plus the uncertainty of the determination method**

### 7.3 Type testing of PDS for IES classification

The IES energy efficiency class of a PDS shall be determined at a single operation point according to 6.1. Type tests to determine losses at this operating point may be performed using either of the following two options:

- loss calculation according to 7.4.2;
- input-output measurement according to 7.5.

The performing party or person seeking the data is free to choose any of the two options.

NOTE Testing laboratories will normally use the input-output determination method.

The calorimetric measurement method is excluded for PDS, as it is difficult to perform on electric motors.

The losses required for the IES energy efficiency classification shall be calculated from the determined losses  $P_{L,PDS,determined}$  and the measurement uncertainty according to Formula (22):

$$P_{L,PDS} = P_{L,PDS,determined} + \Delta P_{L,PDS} = P_{L,PDS,determined} \cdot (1 + \Delta p_{L,PDS}) \quad (22)$$

This corrected power loss value shall be used to define the relative power losses of a PDS.

The measurement uncertainty of the selected loss determination method shall be stated in the test report. The applied uncertainty shall be based on randomly occurring errors with normal distribution. Additional information on uncertainties for different determination methods and a calculation procedure for loss uncertainty is given in Annex G.

### 7.4 Determination of losses by calculation

#### 7.4.1 CDM or SDM losses by calculation

The model presented in 5.2 and Annex C may be used for the determination of losses of a CDM or SDM by calculation. The provider may use a different analytical calculation model or loss simulations; a different calculation model can be used. See 5.2.4.

CDM or SDM loss calculations shall be performed with respect to component provider's data with typical values of power semiconductors at the actual CDM or SDM operating temperature or at the maximum operating temperature specified in the datasheet.

Boundary conditions for calculations shall be similar to the requirements for loss determination by measurement as specified in 7.5.

The parameters affecting losses of CDM and SDM components shall be determined in the required operating points. When no data on losses has been provided, losses shall be determined by measurement.

NOTE For some CDM and SDM components, loss measurements are easy to perform. Combination of measured and calculated losses is one possible way to determine losses of CDM and SDM.

Finally, the different individual losses are calculated or measured separately and the total losses of the CDM ( $P_{L,CDM,determined}$ ) are determined as the sum of all individual losses. Only the included components shall be considered for loss calculation in case of an SDM. Providers are responsible to apply correct accuracies in Formula (21).

#### 7.4.2 PDS losses by calculation

Losses of PDSs can be determined by calculation according to Formulas (12) and (13). When calculating PDS losses with a RCDM, no tolerances shall be added to CDM losses. If PDS losses are calculated with the RM, tolerances according to IEC 60034-1 shall be added to the losses of the final PDS.

### 7.5 Determination of losses by measurement, Input-output method

#### 7.5.1 Instrumentation

##### 7.5.1.1 General

When testing CDM, SDM or PDS under load, slow fluctuations in the output power and other measured quantities are unavoidable. Therefore, for each operating point, several measurements over a period (at least several slip cycles, typically 1 min to 3 min) shall be simultaneously sampled and the arithmetic average of these values shall be used for the determination of losses.

Considering the harmonics involved in converters, the measuring equipment shall be selected according to the range of relevant frequencies with sufficient accuracy.

##### 7.5.1.2 Power analyser and transducers

The instrumentation used for measuring power and current at the CDM's input or output shall meet the requirements of IEC 60034-2-1.

The uncertainty specified by the instrument provider of the power meters shall be 0,2 % of  $S_{r, equ}$  or better for the total active power at 50 Hz/60 Hz. This is the total uncertainty of the power meter including potential probes and sensors.

The bandwidth of power meters and sensors shall be sufficiently wide to ensure an error of the total active power of less or equal to 0,3 % of  $S_{r, equ}$ .

NOTE 1 The apparent output power of a CDM at switching frequency is typically not more than 5 % of the total rated output power. The output power at higher frequencies reduces according to a square function. Therefore, a bandwidth from 0 Hz up to 10 times of switching frequency  $f_{sw}$  is sufficient to measure PWM converter output power.

The measurement range shall be chosen adequately in relation to the measured currents and voltages.

It is preferred to feed current and voltage directly into the power analyser. If an external current transducer is required, inductive transducers, wide bandwidth shunts or zero-flux transducers can be used.

NOTE 2 Inductive transducers are not applicable when DC components are present.

NOTE 3 Inductive transducers have higher uncertainties and/or amplitude limitations at lower frequencies than at nominal frequency.

All cables used to transmit measurement signals shall be carefully installed and shielded accordingly, if possible.

##### 7.5.1.3 Mechanical output of the load motor

The instrumentation for measuring torque and speed at the load motor's output shall meet the requirements of IEC 60034-2-1.

## 7.5.2 Test conditions

### 7.5.2.1 General

Test conditions and procedures are of high importance for the results and for the reproducibility and comparability of measurements by different providers and test laboratories. Anti-circumvention measures are also to be considered during the PDS setup for power loss measurements in order to avoid the CDM or SDM from recognising any particular test condition. The objective is to prevent the CDM or SDM to changing the PDS behaviour in a more favourable way compared to similar PDS conditions of normal use in the field. The following requirements are mandatory. All operating conditions shall be recorded and documented, see 8.4.

- No options or accessories shall be used during measurement which are not usable or useful for the PDS normal operation in the field.
- Starting point for converter setting should be "factory default". Some converters allow a software reset which is highly recommended before performing the test. This also applies to new converters "out of the box".

NOTE 1 Many converters require motor nameplate information for proper operation, in which case motor nameplate parameters such as motor current, motor voltage, motor output power and nominal speed will be entered.

NOTE 2 When the motor is controlled using U/f control law, a constant U/f ratio determines a constant magnetic flux density which allows the motor to be loaded with nominal torque at each speed point within the nominal range. The U/f ratio is probably not constant in a drive with factory settings for various possible reasons, such as:

- PDS/CDM/SDIM/SDOM with pre-programmed torque profiles for variable torque loads, which have lower voltage at lower speeds,
- PDS/CDM/SDIM/SDOM with control algorithms which optimize motor magnetization depending on actual motor torque, and
- PDS/CDM/SDIM/SDOM with advanced flux or torque control algorithms.

NOTE 3 Changes of the factory default setting can be required to fulfil the specifications of test-load current in Table 1.

- As load device to the CDM or SDM, an electronic load or an electric motor can be used. In case of a load motor, a 4 pole IE2 or IE3 motor is recommended. The choice of motor type shall be documented.
- The tests may be done at any temperature but shall always be documented. An ambient temperature of 20 °C to 25 °C is recommended. PDS tests shall be performed with a motor ambient temperature between 15 °C and 30 °C, otherwise an appropriate temperature correction shall be applied per IEC 60034-1 and IEC 60034-2-1 for motor losses.
- The CDM or SDM should be equipped and installed to fulfil the requirement of IEC 61800-5-1 with respect to electrical safety.
- Any changes in CDM or SDM settings shall be clearly documented.

### 7.5.2.2 Additional setting conditions

The following additional setting conditions shall apply for optimal power loss measurements at any operating points.

- CDM or SDM input voltage and frequency shall be within the specified range.
- The crest factor of the supply voltage shall be between 1,35 and 1,44.
- The short circuit ratio of the CDM or SDIM and the supply network according to IEC 61000-3-12:2011 shall be in the range of 50 to 200 for CDM or SDIM with a rated apparent output power of up to and including 111 kVA and 5 to 50 for CDM or SDIM with a rated output power above 111 kVA.
- CDM or SDOM output current shall at no point be lower than the values given in Table 1 as lower inverter output current leads to reduced losses.

- The load device for the CDM or SDOM shall be chosen to ensure that the THDi of the CDM or SDOM output current is lower or equal to 5 %. Higher distortion will lead to increased CDM losses.
- For CDMs or SDOMs the displacement factor of the load's fundamental current in relation to the fundamental voltage shall be according to Table 2 for the (90;100) operating point. For all other operating points, the displacement factor shall be recorded. When using an electronic load, the displacement factor shall be according to Table 2 in all operating points.
- Unless otherwise specified, CDMs or SDOMs having a rated apparent output power below 8 kVA should be measured with a minimum of 15 m shielded cable. If less than 15 m maximum cable length is specified, the highest admissible cable length should be used.

NOTE Requirements on minimum cable length do not apply for PDS where CDM and motor cannot be separated.

### 7.5.3 Input-output measurement of CDM losses

#### 7.5.3.1 Measurement setup – CDM

The input-output determination method of CDM losses is based on measurements of electric power at the input and the output of the CDM. The measurement setup is illustrated in Figure 19. The losses of the CDM shall be determined by using Formula (23):

$$P_{L,CDM,determined} = P_{in,CDM} - P_{out,CDM} \quad (23)$$

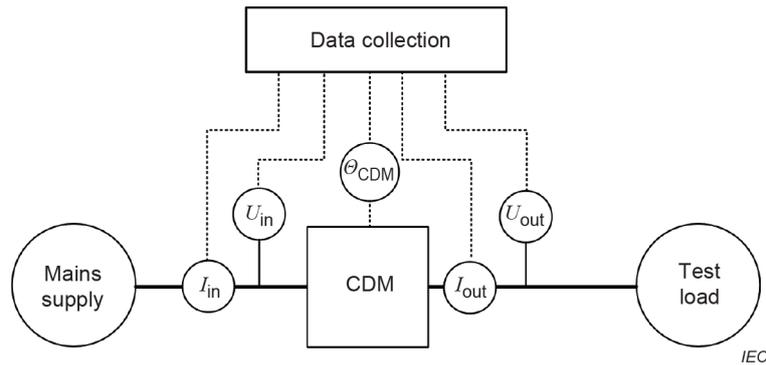
Input power  $P_{in,CDM}$  is determined based on measured input voltages  $U_{in}$  and input currents  $I_{in}$  by a power analyser. Accordingly, output power  $P_{out,CDM}$  is determined based on output voltages  $U_{out}$  and currents  $I_{out}$  measured by a power analyser.

Power analyser voltage and current signal shall be directly derived from the relevant CDM terminals. In case of three-phase system, connections to the above instrumentation shall be of the 3-wire type (as a neutral connection is generally not available either at CDM input or output terminals). Alternatively, a star point can be created and used for measuring the converter phase voltages to determine the cosphi for each phase.

A temperature measurement shall be established to determine the temperature stability of the CDM. This can be any of the standard temperature measurements such as thermo-couples, RTD resistor or similar. The measurement shall be performed according to one of the following methods:

- on the heat sink of the CDM;
- in the output airflow;
- display of the temperature measured by the CDM under test.

All temperature measurements shall be documented during test.



**Figure 19 – Input-output measurement setup for determination of CDM losses**

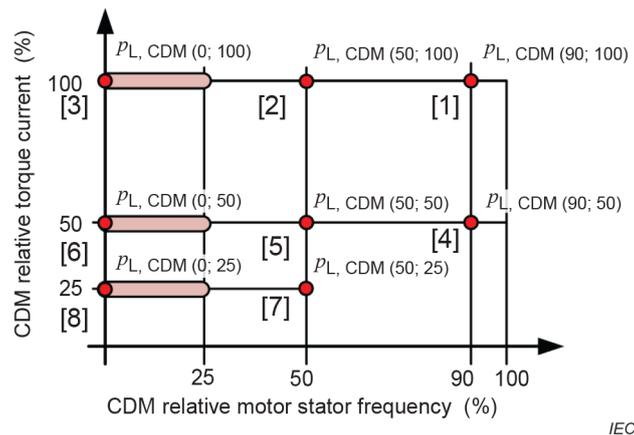
**7.5.3.2 Measurement procedure – CDM**

As a first step, the standby losses shall be measured. Thereto, the CDM shall be put in operation without run command, and the required input power to keep electronics, controls and a possible mechanical fan running in the CDM shall be measured.

CDMs with a mechanical cooling fan stop the fan after a specific amount of inactivity and, in such cases, it shall clearly be stated in the test report if the fan was running or not while measuring standby losses.

The following measurement procedure determines losses at the eight required operating points of a CDM. In every operating point, deviation due to motor slip is allowed. However, only in the operating points with zero speed, it is allowed to deviate up to 25 % of the nominal frequency (see Figure 20).

The procedure starts with an initial heat-run of the CDM at 90 % frequency and rated current as determined in Formula (3). The total test procedure includes operation at lower speeds and currents. The required order of the measurements is shown in Figure 20.



**Figure 20 – Order of CDM measurements from [1] to [8]**

Initially, the CDM is run at 90 % frequency and 100 % current [1] until thermal stability is achieved. Stability has been achieved when the rate of temperature rise is less than 1 K per 15 min.

Once thermal stability has been achieved, a minimum of voltage, current, power and power factor both at the input and output terminals of the converter shall be measured and recorded, while averaging fluctuations.

This operating point is used for IE classification of the CDM.

The following operating points shall be achieved and measured as quickly as possible. All data required at the first speed/torque point shall be recorded at each speed/torque point while averaging fluctuations.

The torque current shall stay at 100 % for the measurements at 50 % [2] and 0 % to 25 % [3] of rated frequency.

Following this, the torque current shall be reduced to 50 % for the next three measurements at 90 % [4], 50 % [5] and 0 % to 25 % [6] of rated frequency.

Finally, the torque current shall be reduced to 25 % for the measurements at 50 % [7] and 0 % to 25 % [8] of rated frequency.

In some cases, testing might be more convenient when testing all points at one frequency after each other. Consequently, it is allowed to change the order of the test points to [1], [4], [2], [5], [7], [3], [6], [8].

In order to overcome limitations of commercially available measuring equipment at low frequencies, it is acceptable to measure CDM losses at a speed between 0 % and 25 % instead of zero speed. These losses shall be used without further extrapolation as the losses at the speed/torque points [3], [6] and [8]. These test points shall be provided in the documentation supplied with the CDM.

#### 7.5.4 Input-output measurement of SDIM losses

##### 7.5.4.1 Measurement setup – SDIM

The input-output determination method of SDIM losses is based on measurements of electric power at the input and the DC-output of the SDIM. The measurement setup is given in Figure 21. A test load connected to the SDIM output terminals shall be used to test and the losses of the SDIM shall be determined by using Formula (24):

$$P_{L,SDIM,determined} = P_{in,SDIM} - P_{out,SDIM} \quad (24)$$

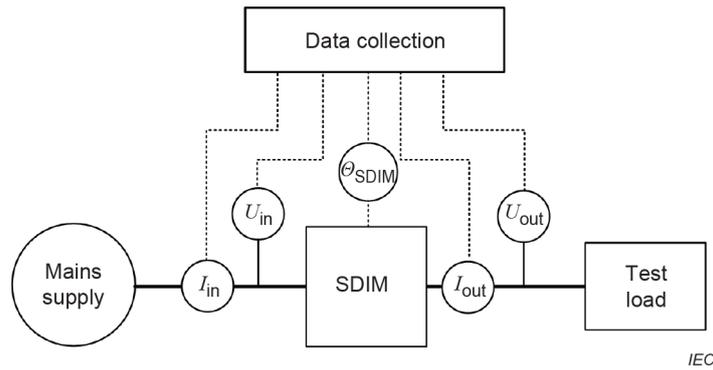
Input power  $P_{in,SDIM}$  is determined based on measured input voltages  $U_{in}$  and input currents  $I_{in}$  by a power analyser. Accordingly, output power  $P_{out,SDIM}$  is determined based on DC output voltage  $U_{out}$  and current  $I_{out}$  measured by a power analyser.

Power analyser voltage and current signals shall be directly derived from the relevant SDIM terminals. In case of three-phase system, connections to the above instrumentation shall be of the 3-wire type (as a neutral connection is generally not available at SDIM input terminals).

A temperature measurement shall be established to determine the temperature stability of the SDIM. This can be any of the standard temperature measurements such as thermo-couples, RTD resistor or similar. The measurement shall be performed according to one of the following methods:

- on the heat sink of the SDIM;
- in the output airflow;
- display of the temperature measured by the SDIM under test.

All temperature measurements shall be documented during test.



**Figure 21 – Input-output measurement setup for determination of SDIM losses**

**7.5.4.2 Measurement procedure – SDIM losses**

As SDIM losses are not directly linked to a specific torque/speed profile, the rated power of the SDIM input shall be used instead for testing. Measurements shall be done at rated input voltage of the SDIM and the following points shall be measured:

- 100 % rated power [1];
- 50 % rated power [2];
- 25 % rated power [3];
- 0 % rated power (no-load condition) [4].

NOTE For an SDIM, the rated power is the product of DC link voltage  $U_{DC}$  and  $I_{SDIM,out}$  and the apparent power is therefore equal to the active power.

When an SDIM is combined with an SDOM to a CDM, the remaining loss points of the SDIM shall be calculated using interpolation of the neighbouring operating points.

An SDIM with active infeed capability shall be used in a mode so that the input power factor  $\lambda$  is about 1 and DC link voltage shall be documented. For a diode rectifier, the input power factor cannot be controlled. A line choke of 2 % shall be used. If the SDIM based on a diode rectifier already contains a line or DC choke, no additional choke shall be used. The procedure starts with an initial heat-run of the SDM at 100 % rated power [1] until thermal stability is achieved. Stability has been achieved when the rate of temperature rise is less than 1 K per 15 min.

Once thermal stability has been achieved, a minimum of voltage, current, power and power factor at the input terminals of the SDIM as well as voltage, current and power at the output terminals of the SDIM shall be measured and recorded, while averaging fluctuations.

This operating point, 100 % of rated SDIM power, shall be used for IE classification of the SDIM.

The SDIM power shall than be reduced to 50 % [2], 25 % [3] and 0 % [4] and the operating points shall be achieved and measured as quickly as possible. All data required at the first operating point shall be recorded at each operating point while averaging fluctuations.

## 7.5.5 Input-output measurement of SDOM losses

### 7.5.5.1 Measurement setup – SDOM

The input-output determination method of SDOM losses is based on measurements of electric power at the DC input and the output of the SDOM. The measurement setup is given in Figure 22. The SDOM shall be powered by a DC power supply and the losses shall be determined by using Formula (25):

$$P_{L,SDOM,determined} = P_{in,SDOM} - P_{out,SDOM} \quad (25)$$

Input power  $P_{in,SDOM}$  is determined based on measured DC input voltage  $U_{in}$  and DC input current  $I_{in}$  by a power analyser. Accordingly, output power  $P_{out,SDOM}$  is determined based on output voltages  $U_{out}$  and currents  $I_{out}$  measured by a power analyser.

Power analyser voltage and current signals shall be directly derived from the relevant SDOM terminals. Instrumentation of output measurement shall be of the 3-wire type (as a neutral connection is generally not available at SDOM output terminals).

A temperature measurement shall be established to determine the temperature stability of the SDOM. This can be any of the standard temperature measurements such as thermo-couples, RTD resistor or similar. The measurement shall be performed according to one of the following methods:

- on the heat sink of the SDOM;
- in the output airflow;
- display of the temperature measured by the SDOM under test.

All temperature measurements shall be documented during test.

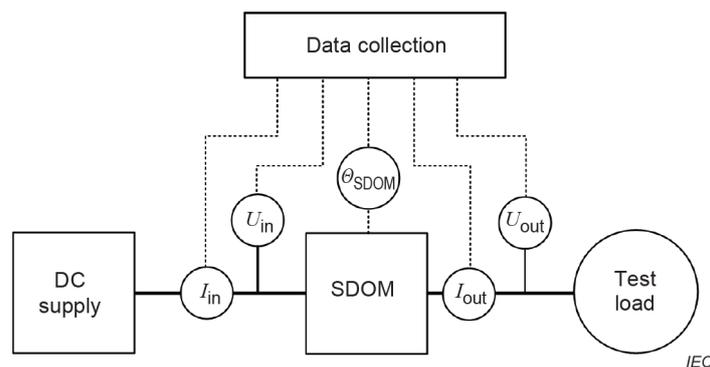


Figure 22 – Input-output measurement setup for determination of SDOM losses

### 7.5.5.2 Measurement procedure – SDOM losses

For loss determination of SDOMs, the measurement procedure and operating points for CDMs described in 7.5.3.2 shall be used.

## 7.5.6 Input-output measurement of PDS losses

### 7.5.6.1 Measurement setup – PDS

The input-output determination method of PDS losses is based on measurements of electric power at the input and mechanical power at the output of the PDS. The measurement setup is illustrated in Figure 23. The losses of the PDS shall be determined by using the Formula (26):

$$P_{L,PDS,determined} = P_{in,PDS} - P_{out,PDS} \quad (26)$$

Input power  $P_{in,PDS}$  is determined based on input voltages  $U_{in}$  and input currents  $I_{in}$  measured by a power analyser.

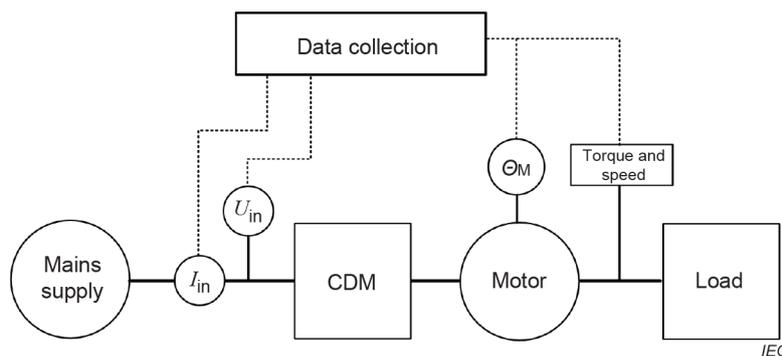
Output power  $P_{out,PDS}$  is determined based on measured torque and speed of the motor.

Power analyser voltage and current signals shall be derived directly from the relevant CDM terminals. In case of three-phase system, input connection to the above instrumentation shall be of the 3-wire type (as a neutral connection is generally not available at CDM input terminals).

A temperature measurement shall be established to determine the temperature stability of the motor. This can be any of the standard temperature measurements such as thermo-couples, RTD resistor or similar. The measurement shall be performed according to one of the following methods:

- directly at the motor stator housing surface while preserving shield from the cooling air of the motor;
- inside the stator housing itself, where a sensor can carefully be placed from the terminal box.

All temperature measurements shall be documented during test.

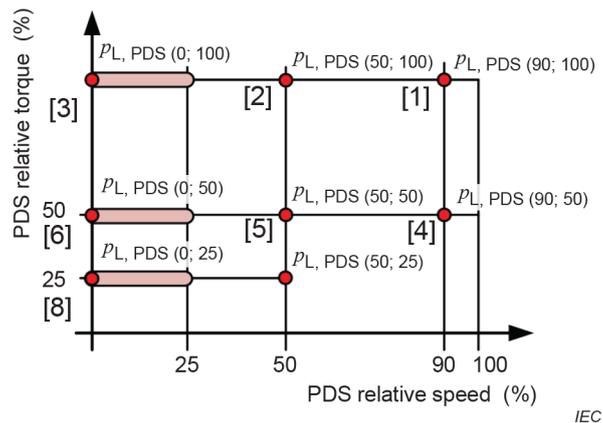


**Figure 23 – Input-output measurement setup for PDS losses**

### 7.5.6.2 Measurement procedure – PDS

The following measurement procedure determines losses at the eight required speed/torque points of a PDS. In every operating point, deviation due to motor slip is allowed. However, only in the operating points with zero speed, it is allowed to deviate up to 25 % of the nominal frequency (see Figure 24).

The procedure starts with an initial heat-run of the PDS, which is needed to achieve stable temperature at rated speed and torque. The total test procedure includes operation at lower speeds and torques. The required order of the measurements is shown in Figure 24.



**Figure 24 – Order of PDS measurements from [1] to [8]**

First, the PDS is run at full rated speed and torque [1] until the motor reaches thermal equilibrium (a rise of less than 1 K per 30 min).

NOTE Due to the smaller thermal time constants of a CDM, it can be assumed that the CDM has already reached thermal stability at this time.

Once thermal stability has been achieved, a minimum set of values consisting of voltage, current, power and power factor at the input and motor shaft torque, motor shaft speed, motor and ambient temperature shall be measured and recorded, while averaging fluctuations.

This operating point is used for IES classification of the PDS.

The following operating points shall be achieved and measured as quickly as possible. All data required at the first speed/torque point shall be recorded at each speed/torque point while averaging fluctuations.

The operating points at 50 % [2] and at 0 % to 25 % [3] of rated speed shall be measured with 100 % motor torque.

The motor torque shall then be reduced to 50 % of its rated value, and measurements shall be taken at 90 % [4], 50 % [5] and 0 % to 25 % [6] of rated speed.

Finally, motor torque shall be reduced to 25 % of its rated value for the measurement at 50 % [7] and 0 % to 25 % [8] of rated speed.

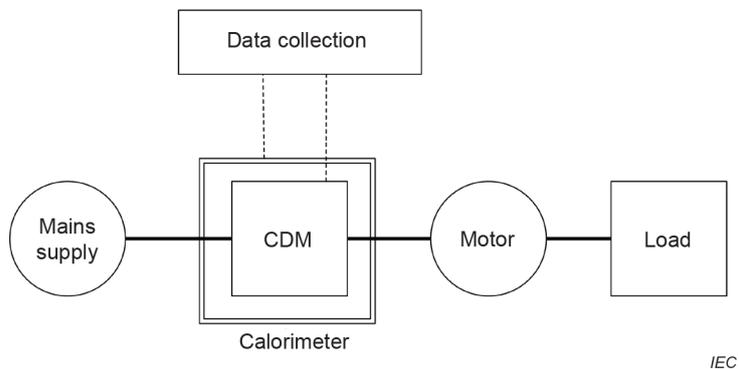
In some cases, testing might be more convenient when testing all points at one frequency after each other. Consequently, it is allowed to change the order of the test points to [1], [4], [2], [5], [7], [3], [6], [8].

As electric motors will exhibit an uneven current distribution and therefore uneven heating in their coils when the supply frequency is zero or very close to zero, PDS losses can also be given for a speed corresponding to up to 25 % instead of zero speed. These losses shall be used without further extrapolation as the losses at the speed/torque points [3], [6] and [8].

## 7.6 Calorimetric measurement of CDM losses

The calorimetric determination method of the power losses is based on the calorimetric measurement of the dissipated power losses. Measurements shall be done at thermal equilibrium and the component to be measured shall be thermally isolated to guarantee conduction of the dissipated power losses by the cooling medium (air or water).

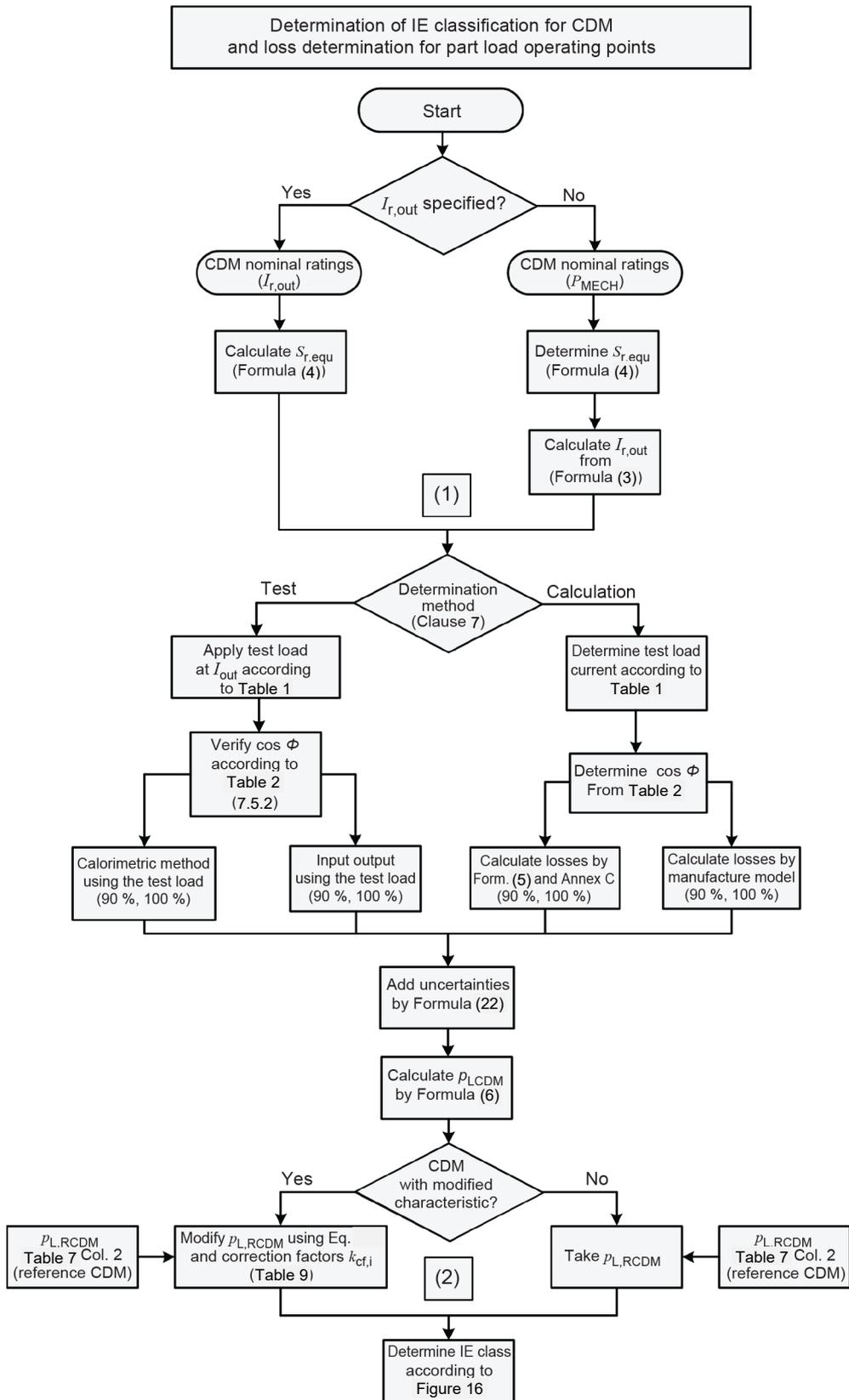
The measurement setup is presented in Figure 25. Testing conditions are described in 7.5.2. Detailed test methods and procedures are described in Annex H.



**Figure 25 – Calorimetric measurement setup for determining CDM losses**

### 7.7 Flowcharts for test procedures

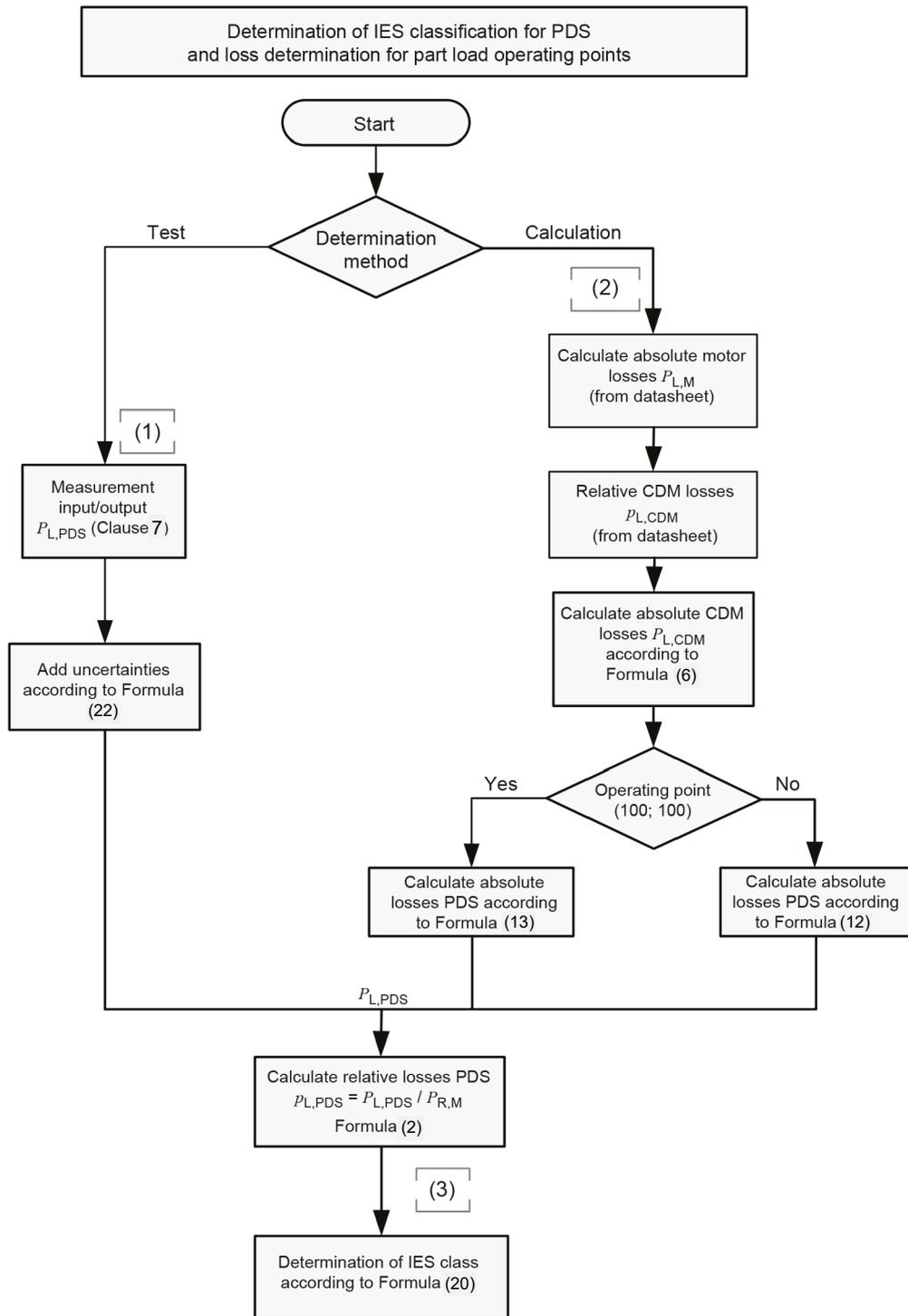
See Figure 26 and Figure 27.



IEC

Part-load operating point: For determination of part-load operation the flowchart from point (1) to (2) is repeated for each part load operating point adjusting the  $I_{OUT}$  and  $\cos \Phi$  according to Table 1 and Table 2 at each of the 8 part-load operating points (relative torque 25 %, 50 %, 90 % and relative speed 0 % to 25 %, 50 %, 90 % according to Figure 20).

**Figure 26 – Determination of IE classification for CDM and loss determination for part load operating points**



IEC

NOTE 1 The motor can be a physical motor or a reference motor.

NOTE 2 The CDM can be a physical CDM or a reference CDM.

NOTE 3 For determination of part load operation, the test sequence flowchart points (1) to (3) are repeated for each part load operating point adjusting the torque and speed according to Figure 4.

NOTE 4 For determination of part load operation, the calculation sequence flowchart points (2) to (3) are repeated for each part load operating point adjusting the torque and speed according to Figure 5 and Figure 6 for motor and CDM.

**Figure 27 – Determination of IES classification for PDS and loss determination for part load operating points**

## 8 Requirements for the user's documentation

### 8.1 General

The purpose of Clause 8 is to define the information necessary for determination of energy losses of CDM, SDIM/SDOM and PDS. The required information is given in Table 9, showing where the information shall be provided, followed by explanatory subclauses.

All requirements on user documentation for CDMs apply also for SDIMs and SDOMs.

All energy efficiency related equipment labels shall be provided in the documentation.

The requirements of Clause 8 shall apply to all CDM and the PDS, unless otherwise stated.

The information provided shall ensure an energy efficiency classification of the CDM and PDS and it shall also provide sufficient information to ensure an energy efficiency classification of the final application and/or system where the CDM or PDS is used as a component.

Whether the rated test load stator frequency is 50 Hz or 60 Hz shall be defined and this information shall be included in the documentation.

**Table 9 – Information requirements**

Information	Subclause reference	Location <sup>a, b</sup>			Technical subclause reference
		1	2	3	
<b>For selection</b>	8.2				
<b>For determination of energy efficiency classification</b>	8.3				
General	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.5, 7
Supply voltage	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.5, 7
Supply frequency	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.5, 7
Rated test load stator frequency in case of CDM/SDOM and rated motor speed (mechanical revolutions per minute) in case of PDS	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.5, 7
IE rating of CDM/SDIM/SDOM and IES rating of PDS	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.5, 7
CDM/SDOM maximum fundamental output voltage	8.3			X	5.2, Annex E
<b>For determination of additional energy losses and part load conditions</b>	8.4			X	
General	8.4.1			X	Annex B, 4.2, 7
Part load losses	8.4.2			X	4.2, 7
Losses of accessories and options	8.4.3			X	
Stand-by mode losses	8.4.4			X	7, B.10, C.7
Regenerative mode	8.4.5			X	B.4.3, 5.5
Characteristics and correction factors	8.4.6			X	6.5, 7
<sup>a</sup> Location: 1. On product (see 8.1); 2. On packaging; 3. In product documentation. <sup>b</sup> The product documentation requested by 8.4 may be supplied in electronic format. When multiple identical products are supplied to a single customer, a manual need not be supplied with each unit, if acceptable to the customer.					

## 8.2 Information for selection

Each part of a CDM or PDS that is supplied as a separate product shall be provided with information relating to its function and electrical characteristics as requested by the applicable product standards.

NOTE Typical examples of product standards are

- IEC 61800-2 for adjustable speed electrical power drive systems,
- IEC 60947-4-1 for contactors and motor-starters – Electromechanical contactors and motor-starters, and
- IEC 60947-4-2 for contactors and motor-starters – Semiconductor motor controllers starters and soft-starters.

## 8.3 Information for determination of energy efficiency classification

Information on the energy efficiency classification (IE/IES) of the CDM and PDS as determined in 4.6, 4.7, 6.2 and 6.5 shall be provided and shall be verified according to Clause 7.

A PDS IES rating shall be given in case where motor and CDM are physically combined to a single unit or when they are intended to be used in this combination only. In this case, individual IE ratings of the CDM and the motor are not required.

For a general purpose CDM which is not intended to be sold and operated together with a specific motor, only the CDM IE rating is required. However, an IES rating for a combination of a CDM and a motor may be specified.

The following additional information, used for the determination of the losses, shall be provided together with the IE/IES classification:

- RMS value of phase-to-phase supply voltage  $U_{mLL1}$ ;
- supply voltage frequency (e.g. 50 Hz, 60 Hz);
- switching frequency  $f_s$  of the CDM;
- typical DC-link voltage  $U_{DC}$  of the CDM;
- rated test load stator frequency in case of CDM or rated motor speed (mechanical revolutions per minute) in case of PDS;
- CDM maximum RMS phase-to-phase fundamental output voltage, in voltage or in percent of the input voltage.

## 8.4 Information on the determination of additional energy losses and part load conditions

### 8.4.1 General

For the determination of the energy efficiency classes and calculation of energy losses in final applications or system (see 4.9 and Figure 7), where the CDM and/or PDS are used as components as described in Annex B, the losses of the CDM or PDS are required. This also includes part load operation as well as applicable options needed for operation of this application.

### 8.4.2 Losses in part load conditions

The losses of the CDM according to the part load operation points as defined in 4.2 shall be stated and verified according to Clause 7. In this document, the information on losses is only mandatory for CDMs converting AC input power to AC output power.

The the losses of the PDS according to the part load operation points as defined in 4.2 shall be stated and verified according to Clause 7.

The number of part load operation points can be reduced when the final application only requires a limited number of operating points according to the extended product approach. If only limited part load operation points to support specific applications are provided, this shall be stated in the manual.

#### **8.4.3 Losses of accessories and options**

8.4.3 applies for losses of optional EMI filters, line chokes, transformers, external fans, output chokes, output filters or other power consuming options, which are intended to be used together with the PDS or CDM for the operation in the final application, with energy losses exceeding

- 0,1 % of the rated CDM power, and
- 5 W in total.

In other cases, the energy losses of accessories and options can be neglected.

The losses shall be stated in the documentation at the operating point of rated power with a tolerance of  $\pm 25$  %, unless they are included in the CDM or PDS losses.

The same applies to motion controllers or application options, which are specifically intended for use together with the drive.

#### **8.4.4 Losses in stand-by mode**

The power losses in stand-by mode of the CDM and PDS with a tolerance of  $\pm 25$  % shall be stated.

#### **8.4.5 Regenerative mode**

It shall be stated in the user's documentation whether a CDM or PDS is able to regenerate energy from the load to the mains or not.

NOTE The provider can provide information for the system integrator in order to determine the losses of the CDM or PDS in regenerative mode based on the regenerative topology supported by the CDM or PDS.

#### **8.4.6 Characteristics and correction factors**

In case of a CDM or PDS with modified functionality or SDIM, the SDOM provider shall state in the documentation the characteristic of the module and the applied correction factors for calculation of the modified reference losses.

For this purpose the line numbers in Table 8 can be used.

## Annex A (informative)

### Losses of RCDM and example of IES class limit determination

#### A.1 Relative loss tables

Table A.1 provides relative loss percentages for reference CDMs.

**Table A.1 – Relative losses (%) of reference CDMs (IE1) at different power ratings at the operating points described in Figure 6**

$P_{rM}$  kW infor- mative	$S_{r, equ}$  kVA	$p_{L,RCDM, relative (0;25)}$	$p_{L,RCDM, relative (0;50)}$	$p_{L,RCDM, relative (0;100)}$	$p_{L,RCDM, relative (50;25)}$	$p_{L,RCDM, relative (50;50)}$	$p_{L,RCDM, relative (50;100)}$	$p_{L,RCDM, relative (90;50)}$	$p_{L,RCDM, relative (90;100)}$
0,12	0,278	33,79	33,84	34,30	33,89	34,04	34,84	34,39	35,85
0,18	0,381	25,24	25,28	25,75	25,34	25,48	26,28	25,83	27,30
0,25	0,5	19,74	19,78	20,25	19,84	19,99	20,78	20,34	21,80
0,37	0,697	14,77	14,82	15,29	14,87	15,02	15,82	15,37	16,84
0,55	0,977	11,14	11,19	11,66	11,24	11,39	12,19	11,74	13,21
0,75	1,29	8,96	9,00	9,47	9,06	9,20	10,00	9,55	11,02
1,1	1,71	6,86	7,13	7,82	6,93	7,33	8,40	7,68	9,51
1,5	2,29	5,56	5,83	6,52	5,63	6,03	7,10	6,38	8,21
2,2	3,3	4,54	4,82	5,51	4,61	5,02	6,09	5,37	7,20
3	4,44	4,07	4,35	5,04	4,14	4,55	5,62	4,90	6,72
4	5,85	3,74	4,02	4,71	3,82	4,22	5,29	4,57	6,39
5,5	7,94	3,35	3,63	4,32	3,42	3,83	4,90	4,18	6,01
7,5	9,95	2,80	3,09	4,02	2,86	3,28	4,64	3,61	5,84
11	14,4	2,39	2,68	3,61	2,46	2,87	4,23	3,20	5,43
15	19,5	2,15	2,44	3,37	2,22	2,63	3,99	2,96	5,18
18,5	23,9	2,02	2,32	3,24	2,09	2,51	3,86	2,83	5,05
22	28,3	1,94	2,23	3,16	2,01	2,43	3,78	2,75	4,97
30	38,2	1,83	2,12	3,05	1,90	2,31	3,67	2,64	4,87
37	47	1,76	2,05	2,98	1,83	2,24	3,60	2,57	4,79
45	56,9	1,71	2,01	2,93	1,78	2,20	3,55	2,52	4,75
55	68,4	1,62	1,93	2,90	1,70	2,13	3,53	2,47	4,74
75	92,8	1,58	1,88	2,85	1,65	2,08	3,48	2,42	4,69
90	111	1,55	1,86	2,82	1,62	2,05	3,45	2,39	4,66
110	135	1,24	1,48	2,27	1,32	1,68	2,91	2,02	4,11
132	162	1,23	1,47	2,26	1,30	1,67	2,89	2,01	4,10
160	196	1,22	1,46	2,25	1,29	1,66	2,88	2,00	4,09
200	245	1,21	1,45	2,24	1,28	1,65	2,87	1,98	4,07
250	302	1,17	1,42	2,24	1,24	1,61	2,88	1,95	4,10
315	381	1,16	1,41	2,23	1,23	1,61	2,87	1,94	4,09
355	429	1,16	1,41	2,23	1,23	1,60	2,87	1,94	4,09

$P_{rM}$ kW informative	$S_{r,requ}$ kVA	$P_{L,RCDM}$ , relative (0;25)	$P_{L,RCDM}$ , relative (0;50)	$P_{L,RCDM}$ , relative (0;100)	$P_{L,RCDM}$ , relative (50;25)	$P_{L,RCDM}$ , relative (50;50)	$P_{L,RCDM}$ , relative (50;100)	$P_{L,RCDM}$ , relative (90;50)	$P_{L,RCDM}$ , relative (90;100)
400	483	1,16	1,41	2,23	1,23	1,60	2,87	1,94	4,09
500	604	1,15	1,40	2,22	1,22	1,60	2,86	1,94	4,08
560	677	1,15	1,40	2,22	1,22	1,60	2,86	1,93	4,08
630	761	1,15	1,40	2,22	1,22	1,60	2,86	1,93	4,08
710	858	1,15	1,40	2,22	1,22	1,59	2,86	1,93	4,08
800	967	1,15	1,40	2,22	1,22	1,59	2,86	1,93	4,08
900	1 088	1,15	1,39	2,21	1,21	1,59	2,85	1,93	4,08
1 000	1 209	1,14	1,39	2,21	1,21	1,59	2,85	1,93	4,08

NOTE 1 Table A.1 is applicable for the evaluation of 50 Hz and 60 Hz CDMs.

NOTE 2  $P_{rM}$  kW values are given as information only to reference the typical motor rated power with typical apparent power of the CDM.

## A.2 Calculation of relative losses for IES classes

### A.2.1 General

In the example shown in Clause A.2, the IES class relative losses are determined for a 7,5 kW PDS 1 500 rpm for IES3.

### A.2.2 Determination of CDM relative losses

For this example, the used CDM does not give any functionality which would qualify for any correction factor.

Take the reference relative losses from Table A.2.

**Table A.2 – Relative losses of the 9,95 kVA CDM according to Table A.1**

$P_{rM}$ kW	$S_{r,requ}$ kVA	$P_{L,CDM}$ (0;25)	$P_{L,CDM}$ (0;50)	$P_{L,CDM}$ (0;100)	$P_{L,CDM}$ (50;25)	$P_{L,CDM}$ (50;50)	$P_{L,CDM}$ (50;100)	$P_{L,CDM}$ , (90;50)	$P_{L,CDM}$ (90;100)
7,5	9,95	2,80	3,09	4,02	2,86	3,28	4,64	3,61	5,84

As those values are for IE1, the value for (90;100) needs to be adapted for IE2.

$$P_{L,CDM,IE2(90;100)} = P_{L,IE1(90;100)} \cdot 0,75$$

$$P_{L,CDM,IE2(90;100)} = 5,84\% \cdot 0,75 \quad (A.1)$$

$$P_{L,CDM,IE2(90;100)} = 4,38\%$$

### A.2.3 Determination of motor relative losses

Relative losses for the motor are to be taken from IEC TS 60034-30-2.

$$p_{L,M,IE3,1\ 500(90;100)} = 10.88 \% \quad (\text{A.2})$$

### A.2.4 Summation of PDS relative losses

Summation of relative losses is done according Formula (2).

$$p_{L,PDS} = \frac{p_{L,M} \cdot P_{r,M} + p_{L,CDM} \cdot S_{r,CDM}}{P_{r,M}}$$

$$p_{L,PDS} = \frac{11,97 \% \cdot 7\ 500\ \text{W} + 4,38 \% \cdot 9\ 950\ \text{VA}}{7\ 500\ \text{W}} \quad (\text{A.3})$$

$$p_{L,PDS} = 17,78 \%$$

A PDS for 7,5 kW 1 500 rpm can be IES3 classified if its relative losses are equal or below 17,78 %.

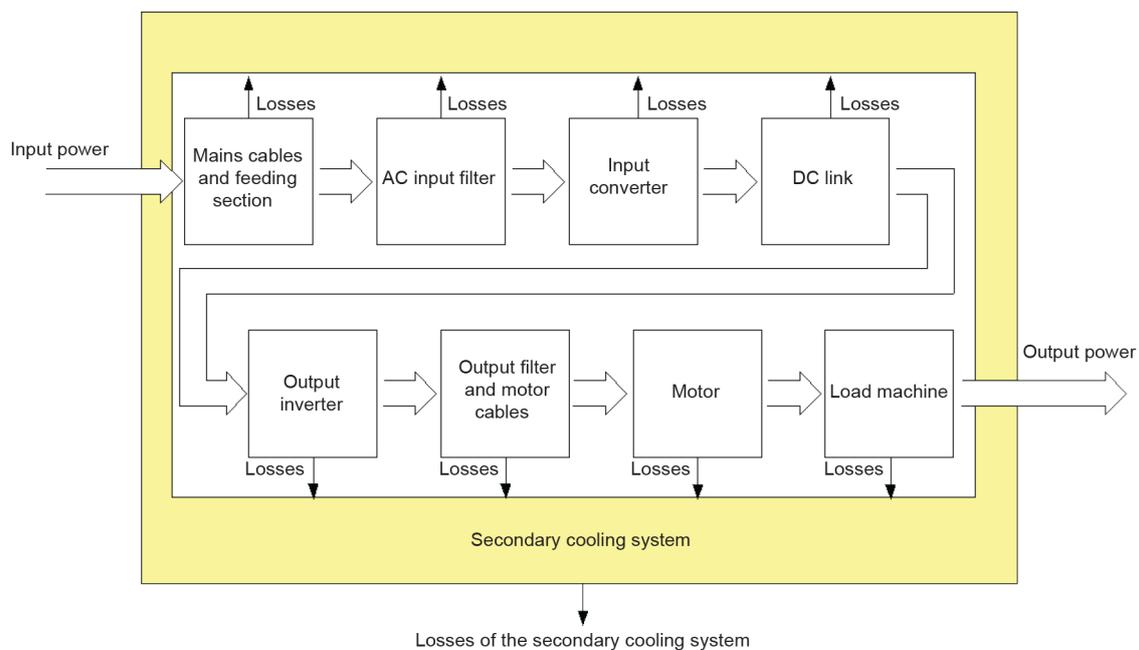
## Annex B (informative)

### Description of the elements of an extended product using PDS with regard to their impact on losses

#### B.1 General

A PDS is used to supply power from the mains to the motor in applications that require varying the speed of a motor. The PDS can control the speed and/or the torque as required by the application and its control.

In Figure B.1, the complete system transferring energy from the mains to the load is illustrated. Mains cabling and the load machine are not a part of the PDS, though their losses might be important to evaluate an energy efficient extended product. In order to determine the overall energy efficiency, the complete system needs to be evaluated. In particular, optimizing the energy efficiency of single subsystems is not a favourable solution, as these local optimizations might reduce the overall energy efficiency. In Annex B, the major dependencies are described.

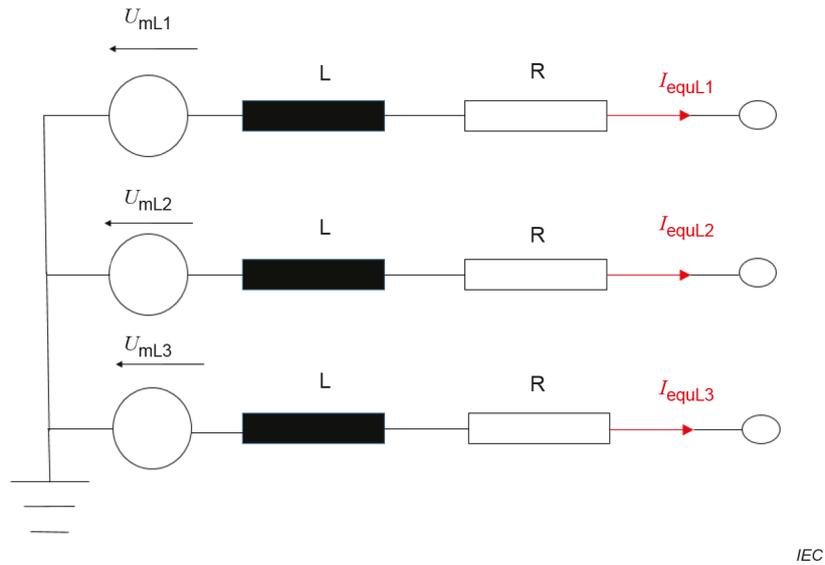


IEC

Figure B.1 – Overview of the extended product and energy flow

#### B.2 Losses in the mains cabling and feeding section

The basic equivalent circuit for a three-phase mains supply at the point of common coupling is shown in Figure B.2.



**Figure B.2 – Equivalent circuit of the mains and mains cabling**

In Figure B.2, a three-phase power supply system with star point grounding is illustrated. As far as energy losses are concerned, the behaviour of other types of mains configurations such as delta grounding or single-phase supply is identical. In a first approximation, the mains can be regarded as an ideal 50 Hz or 60 Hz power source. This power source has a series impedance, which is dominated by an inductive and an ohmic component. The ohmic component consists of the resistive part of mains cables, switches and fuses.

Energy losses are created in the ohmic part of the equivalent circuit. These losses increase with the square of the amount of current flowing in the mains. Assuming that all currents are identical in amplitude and shifted by 120°, the mains losses are:

$$P_{L,mains} = 3 \cdot R \cdot I_{equL1}^2 \tag{B.1}$$

Assuming a PDS connected to the mains in Figure B.2, the mains losses depend on the input current of the PDS. As a minimum, the PDS consumes the active power required by the load and the losses generated by the PDS itself. However, the PDS might require additional apparent power due to reactive power and harmonic currents. The ratio between active power and apparent power (power factor) is defined:

$$\lambda = \frac{P_{equ}}{S_{equ}} = \frac{3 \cdot U_{mL1} \cdot I_{1,equL1} \cdot \cos\phi_{equ}}{3 \cdot U_{mL1} \cdot I_{equL1}} = \frac{I_{1,equL1} \cdot \cos\phi_{equ}}{I_{equL1}} \tag{B.2}$$

where

- $I_{equL1}$  is the total RMS current of phase L1;
- $I_{1,equL1}$  is the fundamental component of current  $I_{equL1}$ ;
- $\cos\phi_{equ}$  is the phase displacement between the fundamental component of the mains voltage and the current  $I_{1,equL1}$ .

A PDS with  $\lambda$  close to 1 will lead to minimum losses in the mains. The value of  $\lambda$  is determined mainly by the input filter and the input converter of the PDS.

## B.3 Input filter

### B.3.1 High frequency EMI filter

High frequency EMI filters are used to limit high frequency emissions of the PDS according to IEC 61800-3 in order not to disturb radio services. Maximum permitted emissions of a PDS depend on the environment in which the PDS is used.

In general, the design of high frequency EMI filters is influenced by applicable compliance parameters. Consideration is typically given to compliance with

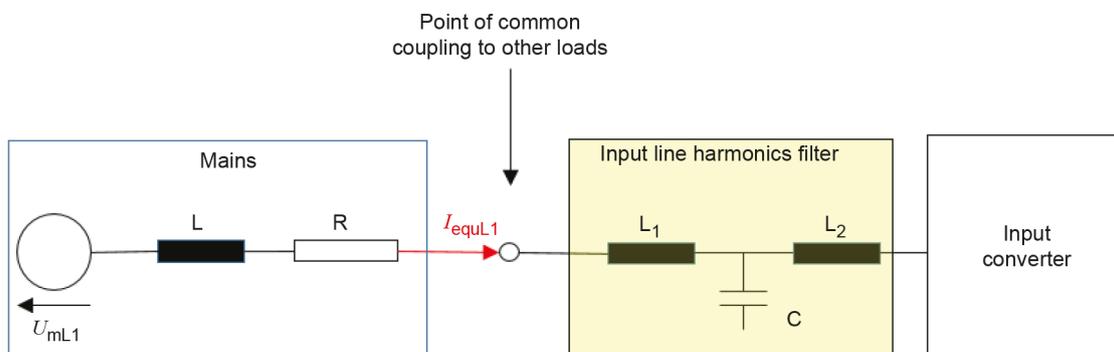
- low leakage current according to IEC 61800-5-1 (e.g. compliance with residual current devices or compliance with the 3,5/10 mA limit with respect to the requirement for the dimension of the protective earth connection),
- support of shielded motor cable length, and
- requirement in different environments according to IEC 61800-3.

This will require different designs of the EMI filter, including the EMI coil and therefore have a significant influence on the losses in the EMI coil.

The losses in RFI-filter may have a perceivable impact on the losses of a PDS, especially at low rated power.

### B.3.2 Low frequency line harmonics filter

Low frequency line harmonics filters are used in some cases to reduce the voltage distortion of the mains voltage and therefore to ensure compatibility to other loads connected to the mains. See Figure B.3.



IEC

**Figure B.3 – Illustration of a single-phase line harmonics filter**

An input line harmonic filter usually contains at least one series choke  $L_2$ . More sophisticated filter topologies contain additional components such as a parallel capacitor or an additional line side choke  $L_1$ .

As described in Clause B.2, reducing harmonics leads to lower losses in the mains. On the other hand, inductive components in the filter increase the reactive power of the PDS, increasing mains losses. Additional losses are created in the filter components themselves. These positive and negative effects increase with larger filters.

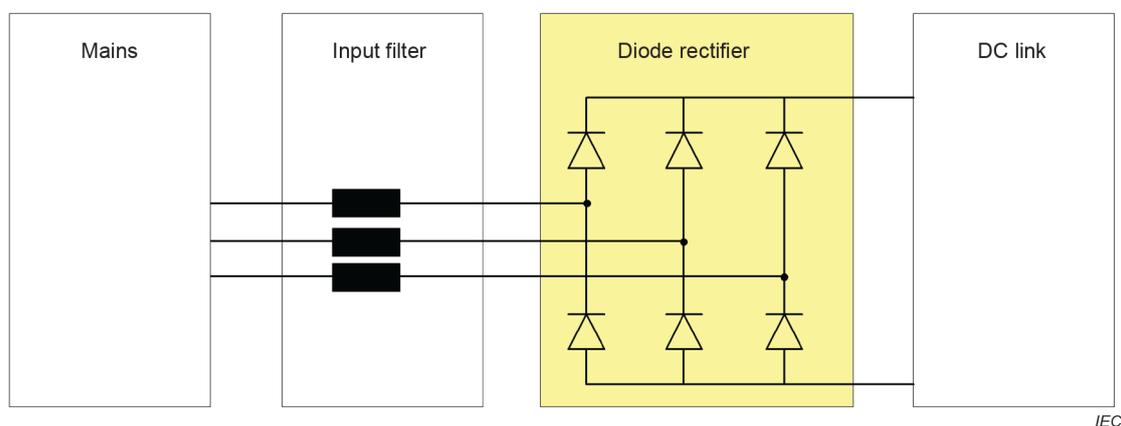
## B.4 Input converter

### B.4.1 General

The input converter transfers energy from the three-phase AC mains to the DC link. For the input converter, mainly two topologies can be found in PDS today: the diode rectifier and the active infeed converter.

### B.4.2 Diode rectifier

Diode rectifiers are the most cost effective solution for input converters. At positive energy flow from the mains to the load, this topology has low losses, as the forward voltage drop of the diodes is relatively low and their switching frequency is the fundamental frequency of the power supply system only. See Figure B.4.



**Figure B.4 – PDS with a diode rectifier input converter**

On the other hand, diode rectifiers create relatively large harmonics in the mains current. These harmonic currents create losses in the mains. As described in B.3.2, these harmonic currents can be reduced by line chokes, DC link coils or line harmonic filters, which themselves create losses.

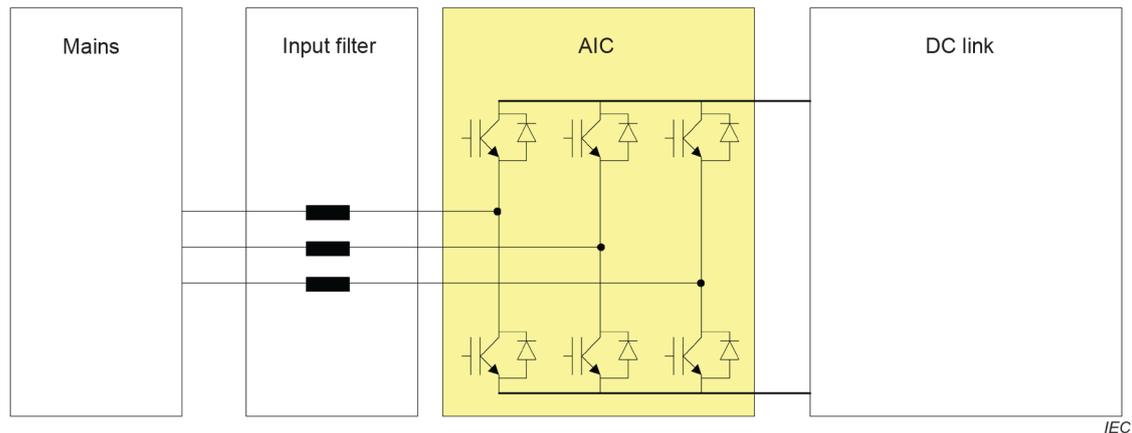
At negative energy flow, diode rectifiers are not able to regenerate energy from the load to the mains. The energy generated in the load, for example during braking, will be dissipated in resistors. For applications with a significant regeneration, this reduces the overall energy efficiency performance of the system significantly, see 5.5. If the DC links of several CDMs are connected together, the regenerative energy can be distributed via a common DC link to supply other CDMs/PDSs.

As a special variant of diode rectifiers, some or all diodes can be replaced by thyristors. As these thyristors are mainly used for the precharge of the DC link capacitor, the behaviour of this type of converter is nearly identical to the diode rectifier during normal operating conditions. As the forward voltage drop of thyristors is slightly higher than the forward voltage drop of diodes, losses are slightly increased.

### B.4.3 Active infeed converter

#### B.4.3.1 Active infeed converter with high switching frequency

The behaviour of active infeed converters (AIC) is described in detail in IEC TS 62578. In contrast to the diode rectifier, this type of inverter is able to regenerate energy from the load to the mains. In regenerative applications, this feature can lead to a significant improvement of energy efficiency. Besides regeneration, this technology offers further advantages like the possibility of mains harmonics compensation, reactive power compensation and stabilized DC link voltage. See Figure B.5.



**Figure B.5 – PDS with a standard AIC input converter**

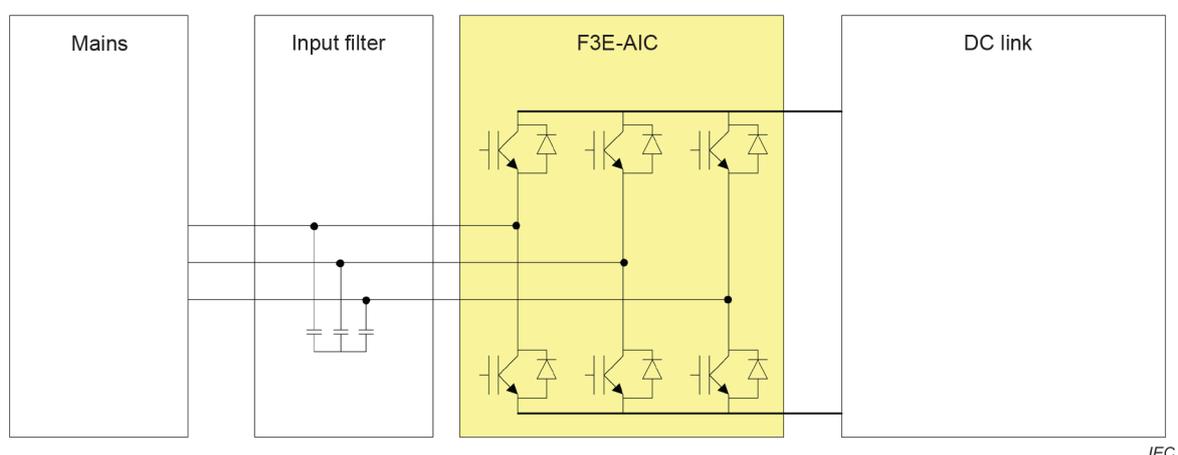
Standard active infeed converters operate with an IGBT bridge at their line infeed. The semiconductor switches operate at high switching frequency, enabling the converter to consume nearly sinusoidal current from the mains, with a controllable phase angle between line voltage and line current. Reactive power and harmonic currents are reduced to a minimum, which results in minimized losses in the mains as a consequence.

However, the semiconductors create additional switching losses due to their high switching frequency and the topology also requires the use of a choke or higher order filter, which also create losses. Furthermore, the DC link voltage in AIC converters with high switching frequency is higher than the DC link voltage in passive infeed converters, leading to increased DC link and standby losses.

Single phase power factor correction (PFC) circuits show a very similar behaviour to standard active infeed converters. They are as well able to produce a nearly sinusoidal input current with an optimum phase angle, while requiring a line choke and creating additional switching losses. Main difference is their missing capability to regenerate energy to the mains.

#### **B.4.3.2 Active infeed converter with fundamental switching frequency**

In a special type of three-phase active infeed converters, the line side IGBTs are operated with the switching frequency of the mains only. Due to this operating mode, the fundamental frequency front end AIC (F3E-AIC) reduces its losses to the value of the diode rectifier, while maintaining the feature to feed back energy from the load to the mains. Furthermore, the topology does not generate an increased DC link voltage. Like a diode rectifier described in B.4.2, this topology can be operated with or without line choke. See Figure B.6.

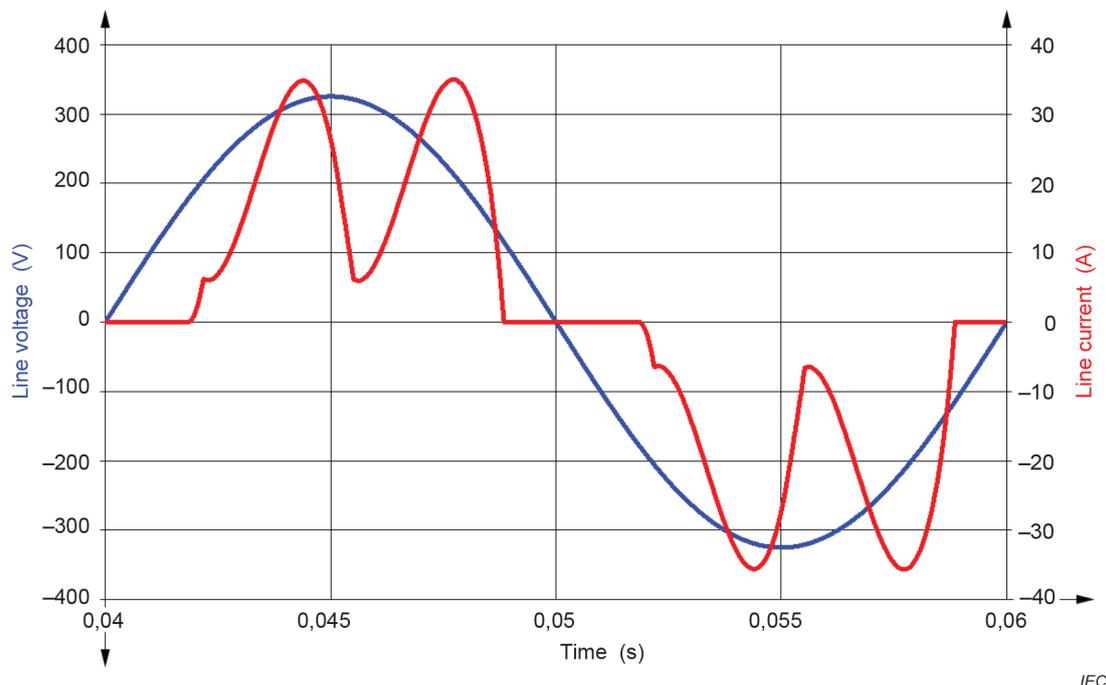


**Figure B.6 – PDS with a F3E-AIC input converter without line choke**

Due to these features, high levels of energy efficiency are possible with this type of PDS, however, by the expense of considerably high harmonic distortions compared to an AIC.

#### B.4.4 Power factor of the input converter

The input power factor  $\lambda$  is defined as the ratio of the active input power to the apparent input power of the CDM. At sinusoidal input voltage, it depends on the current waveshape. See Figure B.7.



**Figure B.7 – Typical waveform of a diode rectifier line current**

If the CDM is equipped with a large DC link capacitor, decreasing the size of the input chokes will lead to a more peaky waveform of the input current. Consequently, the value of  $\lambda$  will decrease.

If the DC link capacitor is reduced to a very small value, the current tends to a block shape waveform.

More information on input converter topologies is given in IEC TS 62578. For the different topologies, the typical values of  $\lambda$  given in Table B.1 apply.

**Table B.1 – Typical values of  $\lambda$  for different input converter topologies**

Input converter topology	Value of $\lambda$
Diode bridge rectifier with large DC link capacitor and 0,5 % input choke	0,6
Diode bridge rectifier with large DC link capacitor and 4 % input choke	0,7
Diode bridge rectifier with small DC link capacitor according to IEC TS 62578	0,9
Active infeed converter with high switching frequency	1,0

#### B.4.5 Sub drive input module (SDIM)

An input converter is the main element of an SDIM. The SDIM can be composed of one of the topologies listed in Clause B.4. Input filter, line chokes and DC link may also be part of the SDIM and an SDIM may include its own cooling elements, auxiliary power supply and show its own control and standby losses.

### B.5 DC link

The DC link of voltage source PDS consists of a DC link capacitor. This capacitor usually contains a large number of electrolytic capacitors. For a 400 V three-phase AC power supply system, the voltage in the DC link is usually higher than the voltage capability of a single commercially available electrolytic capacitor. For this reason, capacitors need to be connected in series in the DC link. See Figure B.8.

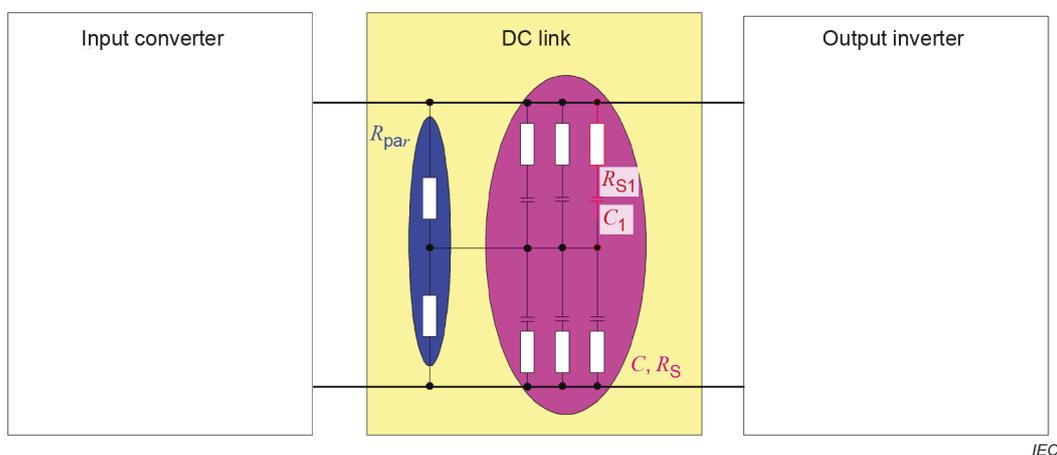


Figure B.8 – DC link circuit

In order to ensure proper voltage sharing of the electrolytic capacitors, resistors are required in parallel to the capacitors. The resulting equivalent resistor  $R$  generates one part of the energy losses in the DC link. In the mathematical model, those are taken into account in the first term of Formula (C.8). As each DC link capacitor requires a certain amount of parallel resistance for symmetrising, this part of the DC link losses is proportional to the rated CDM output current. Furthermore, it is proportional to the square of the actual DC link voltage. The parameter  $k1_{DC\_link}$  can be calculated by

$$k1_{DC\_link} = \frac{1}{R_{par} \cdot I_{r,out}} \quad (B.3)$$

The second part of the losses in the DC link is generated by the (equivalent) series resistance  $R_{s1}$  inside the capacitors. The losses appear mainly with six times the fundamental frequency of the mains and are proportional to the square of the input current of the rectifier. The parameter  $k2_{DC\_link}$  can be calculated with the following steps.

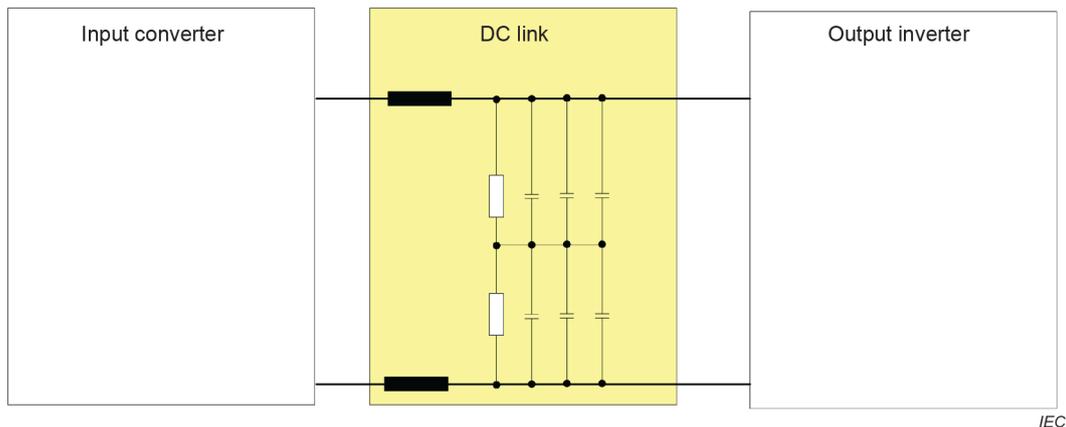
- a) The losses of a capacitor are usually specified in the datasheet with the loss factor  $\tan\delta$  at line frequency  $\omega/2\pi$  (50 Hz or 60 Hz). The equivalent series resistor  $R_{s1}$  of one capacitor can be calculated by

$$R_{s1} = \frac{\tan \delta}{\omega \cdot C_1} \tag{B.4}$$

- b) The overall resulting resistor  $R_s$  of the complete DC link capacitor array  $C$  can be calculated according the series and parallel connection of individual capacitors  $C_1$ .
- c) The parameter  $k^2_{DC\_link}$  can be calculated by

$$k^2_{DC\_link} = R_s \cdot I_{r,out} \tag{B.5}$$

DC chokes may be used in the DC link. If these chokes are used, they usually replace AC line harmonics chokes in the input filter. As far as energy efficiency of the system and investment costs are concerned, DC chokes and AC chokes are in the same order of magnitude. See Figure B.9.



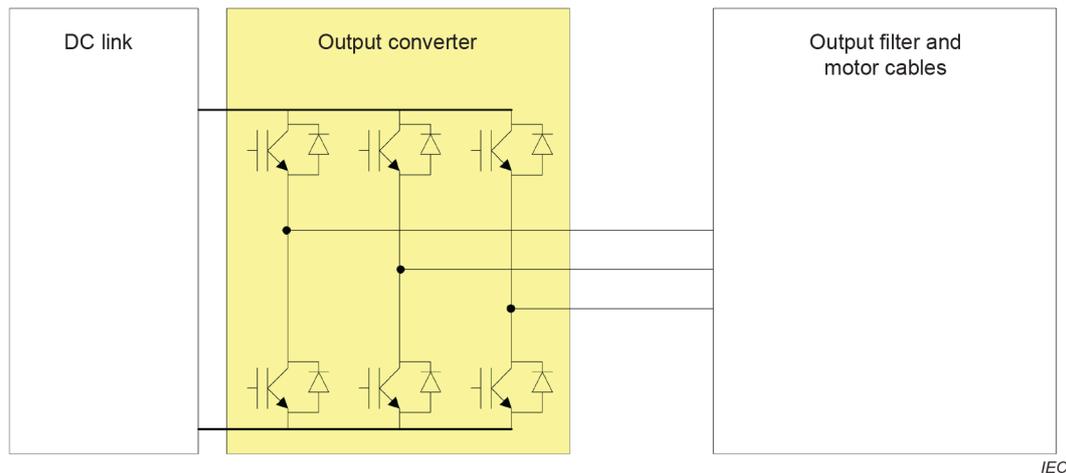
**Figure B.9 – DC link circuit with additional DC chokes**

In some BDM types, the amount of capacitance in the DC link is rather small. In this case, it is possible to use capacitors with a higher voltage withstand capability, parallel resistors are not required in that case, improving the overall energy efficiency of the system.

## B.6 Output inverter

### B.6.1 General

Output inverters in voltage source PDS usually consist of a three-phase inverter bridge. By switching the semiconductors with a high frequency according to a pulse width modulated (PWM) control scheme, the speed of the motor at the output can be controlled to the desired value. See Figure B.10.



**Figure B.10 – Output inverter of the PDS**

Losses in the output inverter are generated by the on-state losses and the switching losses of the semiconductors. Both types of losses are reduced by continuous technological improvements in semiconductor development, either by improving the device structure or by using new semiconductor materials.

From the user's point of view, losses in the output inverter can be influenced by the switching frequency. Reduced switching frequency leads to lower losses in the output inverter. A lower switching frequency, however, increases losses in the motor and in optional output filter circuits. For an optimized energy efficient solution, the combination of all those subsystems needs to be investigated, see Figure 14.

### B.6.2 Sub drive output model (SDOM)

The output inverter is the main element of an SDOM and may include DC link, output filter as well as its own cooling elements and auxiliary power supply. Control and standby losses may be considered for the SDOM.

## B.7 Output filter and motor cables

### B.7.1 General

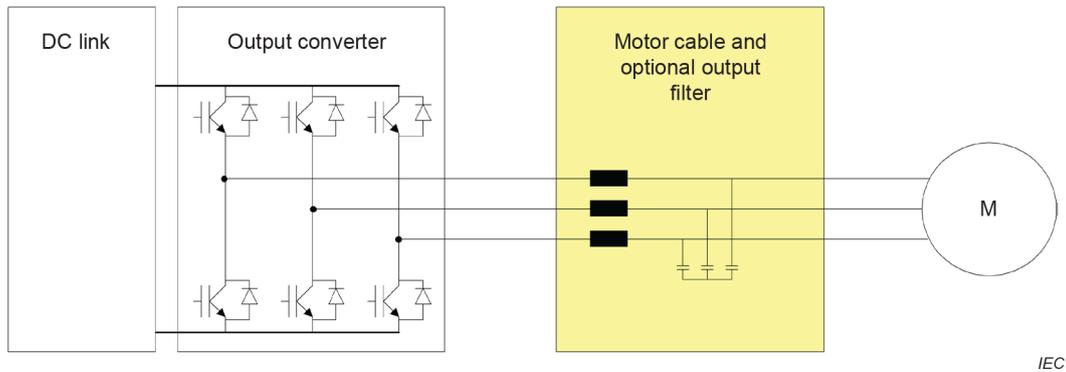
The output inverter usually operates its semiconductor switches with high switching speed to minimize switching losses. If no output filters are used (see Figure B.11 for optional location), overvoltage spikes due to reflexion of the voltage waveform can be observed at the motor terminals, stressing the motor insulation with twice the DC link voltage. This phenomenon can be observed if the length of the motor cable is longer than the critical length, which can be calculated as follows:

$$l_{\text{crit}} \geq \frac{v \cdot t_r}{2} \quad (\text{B.6})$$

For a typical rise time of  $t_r = 200$  ns and a typical speed of the voltage wave of  $v = 150$  m/ $\mu$ s, the critical length of the motor cable is  $l_{\text{crit}} = 15$  m.

These voltage spikes lead to an increased stress of the motor insulation. However, their effect on losses is negligible.

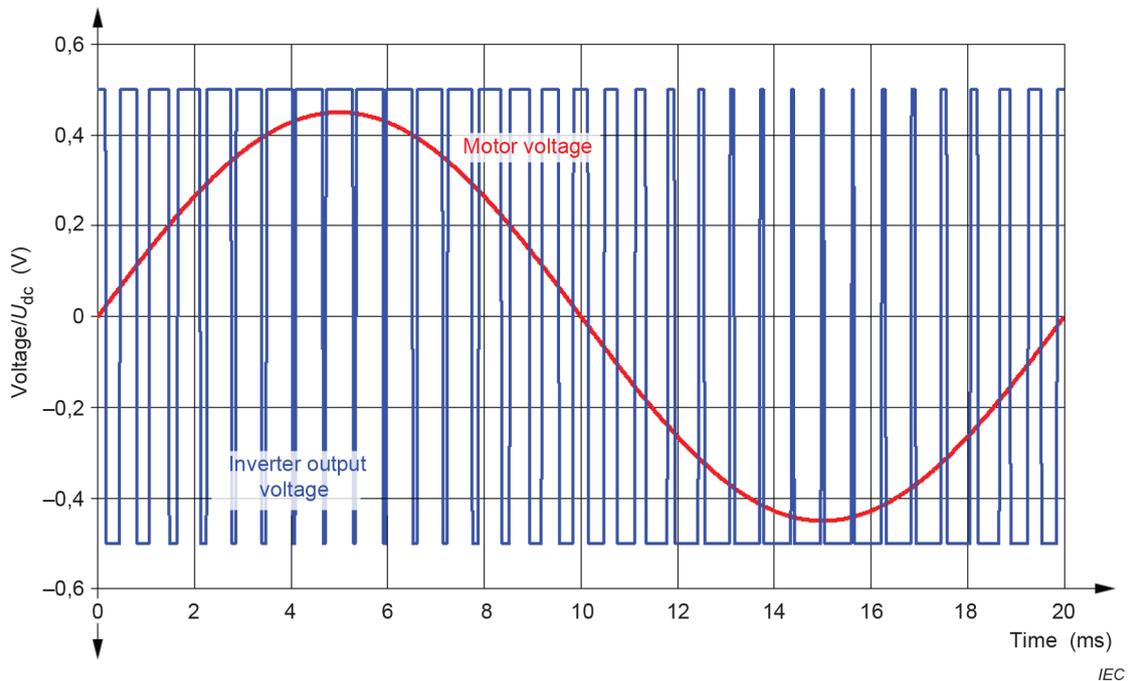
In some cases, output filters are used, mainly to reduce the stress on the insulation of the motor and to increase the motor cable length. Different kinds of output filters are known, their effect on efficiency will be described.



**Figure B.11 – Motor cable and optional output filter of the PDS**

**B.7.2 Sine wave filters**

Sine wave filters are designed to filter out the switching frequency of the inverter. They usually include at least one inductor and one capacitor, forming a second order filter for the output voltage of the inverter. The resonance frequency of a sine wave filter is chosen to be lower than the switching frequency of the inverter. Figure B.12 shows a typical output voltage wave form with respect to the midpoint of the DC link. It also shows the motor voltage at the output of the sine wave filter.



**Figure B.12 – Typical waveform of inverter output voltage and motor voltage when using a sine wave output filter**

When operating at an inverter without sine wave filter, the motor will show additional losses due to high frequency ripple currents. These additional losses are described in IEC TS 60034-25. With a sine wave filter, these additional losses can be largely reduced.

However, the sine wave filter itself will show some losses, mainly due to the copper and iron losses in the filter inductor. These losses are known to be less than 0,5 % of the rated inverter power for high power sizes and may be up to 8 % of the rated inverter power for low power sizes at rated motor speed. At lower motor speed, these losses are even lower.

However, this type of filter produces a small volt-drop at power frequency and there may be a reduction in the available control bandwidth, particularly if the PWM frequency is low. Therefore, it is sometimes not possible to use this type of filter.

### **B.7.3 $dV/dt$ filters and motor chokes**

$dV/dt$  filters are used to increase the rise time of the motor voltage in order to reduce the stress on the motor insulation. They show basically the same topology as sine wave filters. In contrast to those, their resonance frequency is chosen far higher than the switching frequency, resulting in considerably smaller components. However, the motor voltage remains similar to the waveform of the inverter output voltage shown in Figure B.12. Losses in the motor are not affected by the  $dV/dt$  filter.

Losses in the  $dV/dt$  filter itself are proportional to the switching frequency of the inverter. The losses in the  $dV/dt$  filter might be up to 1 % of the rated PDS power. At a switching frequency of 500 Hz, the losses in the  $dV/dt$  filter are typically less than 0,25 % of the rated PDS power. Exact losses are to be determined at the applied switching frequency.

For PDS with higher switching frequency, motor chokes may be used instead of  $dV/dt$  filters to reduce the stress on the motor insulation. Losses generated by these chokes are comparable to losses of a sine wave filter. However, the reduction of the stress on the insulation is not as effective as with filter solutions. Motor losses are not affected either.

### **B.7.4 High frequency EMI motor filters**

High frequency EMI motor filters, similar but not identical to those described in B.3.1, may be used at the inverter output terminals as well. Their influence is similar to the line side EMI filters.

### **B.7.5 Motor cables**

Motor cables connect the CDM with the motor. The resistive behaviour of the motor cables causes losses that should be considered for long motor cables. As the length of the motor cables are different for each installation, these losses cannot be given as an attribute of a PDS, but need to be assessed in every individual installation. As a rule of thumb, motor cable losses can be neglected as long as their length is below 25 m. As most of the losses are due to the fundamental motor current, the influence of the high frequency current can be neglected. If single wire cables with individual shielding are used instead of three wire cables, current will cause additional losses in the cable shields.

## **B.8 Motor**

A method to evaluate losses generated in the motor, when operated either with a sinusoidal waveform or with a pulsed waveform from an inverter, is described in IEC 60034-2-1 and IEC 60034-2-3. Auxiliary fans and brakes are a part of the motor system.

## **B.9 Mechanical load**

Losses in the load strongly depend on the kind of application the PDS is used for, for example in variable torque vs constant torque applications. The loss saving potential by running the load in an energetically optimized way is far greater than the losses of the PDS and should therefore be the major issue when designing an application to minimize losses.

## B.10 Control and standby losses

Control losses usually do not depend significantly on the rated CDM power. For this type of losses, it is more important to evaluate the automation system as a whole and the control functions of the PDS, such as bus communication and driving additional equipment like for example relays, position sensors or motor brakes. For very low power PDS (< 500 W), this portion of the losses might be in the same order of magnitude as the power losses, whereas it is getting less and less important for higher rated PDS power.

Besides the losses in the control part of the CDM itself, there are also losses created in the switch mode power supplies of the CDM, supplying for example a fan as a major consumer, in case of forced air cooling. These losses are mainly independent of the CDM and are therefore regarded like control losses as well.

The control and standby losses  $P_{L,control}$  are generated when the PDS is powered up, but the motor is not energized. They are typically one to three orders of magnitude lower than the losses during operation. Their influence on the overall losses strongly depends on the duty profile of the extended product. Besides this, they also depend on the requirements of the application in terms of wake-up time and communication.

## B.11 Cooling losses

### B.11.1 Primary cooling losses

The primary cooling of the components illustrated in Figure 11 is mainly done by the primary cooling (fan or liquid cooling) integrated in the BDM/CDM/PDS. The cooling might be temperature dependant (ON/OFF or PWM controlled) or might be an uncontrolled cooling system.

### B.11.2 Secondary cooling losses

Besides the fact that all components shown in Figure B.1 create losses, these losses need to be cooled by a secondary cooling system in many applications. It is depending on the application itself which losses need to be cooled by a secondary cooling system.

A typical secondary cooling system is an air conditioning system, keeping the temperature of targeted room below a certain value. All losses generated in this room need to be actively cooled by the secondary system, including for example losses of a control system. As a minimum, the secondary cooling system covers the losses of the CDM itself. In this case, the power consumption of a typical secondary cooling system is in the range of 20 % of the CDM losses.

However, in some applications, the motor and the load machine require cooling as well. These losses need to be taken into account by the overall system designer and are not in the scope of this document.

## Annex C (informative)

### Mathematical model for CDM losses

#### C.1 General

In contrast to Annex B, which describes the PDS sub-frames from the mains to the load, Annex C starts with those parts of the PDS creating highest losses, followed by the other parts contributing to the overall PDS losses with a minor impact.

#### C.2 Output inverter losses

##### C.2.1 General

The major part of the CDM losses is created by the output inverter section of the CDM. Its losses are described by the following analytical formulae, which are well established in literature. These formulae assume that the CDM output current is sinusoidal and the PWM pulses are randomly distributed over the sinusoidal current fundamental waveform. The random distribution is achieved as soon as the PWM frequency is at least 20 times the fundamental frequency of the motor current and the standard space vector modulation algorithm is used. Reduced losses due to overmodulation of the CDM are not taken into account. The reference CDM is consequently calculated according to these assumptions. For the loss calculation of a physical CDM, the parameter values on power semiconductors need to be determined either at actual temperature when operating the CDM or at maximum operating temperature specified in the datasheet.

For a physical CDM, the parameter values on power semiconductors and other devices may be referred to typical values. Additionally, the model presented in 5.2 and Annex C may be used for the determination of losses of a CDM by calculation. A different calculation model or loss simulations is permitted. Correct accuracies in Formula (22) shall be applied.

##### C.2.2 Transistor on state losses

Transistor on state losses are calculated according to Formula (C.1):

$$P_{L,on,T} = \sqrt{2} \cdot I_{out} U_{T,th} \cdot \left( \left( \frac{1}{2\pi} \right) + \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos\Phi}{8} \right) + \frac{U_{T,r} - U_{T,th}}{I_{r,out}} \cdot 2 \cdot I_{out}^2 \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos\Phi}{3\pi} \right) \quad (C.1)$$

The RCDM parameters in Formula (C.1) are given in Table C.1.

**Table C.1 – Reference parameters for Formula (C.1)**

Symbol	Description	RCDM parameter value	Unit
$U_{T,th}$	Threshold voltage of the power transistor (IGBT)	1,0	V
$U_{T,r}$	On state voltage of the power transistor (IGBT) at rated CDM output current	2,3	V
$I_{r,out}$	Rated CDM output current, RMS value		A

The variables in Formula (C.1) are given in Table C.2.

**Table C.2 – Variables for Formula (C.1)**

Symbol	Description	Unit
$I_{out}$	CDM output current, RMS value according to Table 1	A
$\phi$	Phase angle between fundamental CDM output voltage and fundamental CDM output current according to Table 2	rad
$m$	Modulation index, identical to the relative CDM output frequency up to the rated output frequency	

### C.2.3 Freewheeling diode on state losses

Diode on state losses are calculated according to Formula (C.2):

$$P_{L,on,D} = \sqrt{2} \cdot I_{out} U_{D,th} \cdot \left( \left( \frac{1}{2\pi} \right) - \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos \phi}{8} \right) + \frac{U_{D,r} - U_{D,th}}{I_{r,out}} \cdot 2 \cdot I_{out}^2 \cdot \left( \frac{1}{8} - \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos \phi}{3\pi} \right) \quad (C.2)$$

The RCDM parameters in Formula (C.2) are given in Table C.3.

**Table C.3 – Reference parameters for Formula (C.2)**

Symbol	Description	RCDM parameter value	Unit
$U_{D,th}$	Threshold voltage of the power diode	1,1	V
$U_{D,r}$	On state voltage of the power diode at rated CDM output current	2,4	V

The variables in Formula (C.2) are identical to the variables in Formula (C.1).

### C.2.4 Transistor switching losses

It is standard practice in power IGBT datasheets to describe the transistor switching energy as a function of the inverter output current. Usually, this value is obtained by recording the IGBT collector to emitter voltage and the IGBT collector current during switching, multiplying those graphs to obtain the instantaneous power losses and integrating those losses over one switching event to finally get the switching loss energy. In a first order approximation, the resulting curve shows the energy increasing in a linear way with the collector current and the DC link voltage of the inverter. The ratio between the switching energy and the product of DC link voltage and IGBT collector current is often described in literature as a factor  $E_T$ . This factor contains the sum of the loss energy at switching on and switching off of a power transistor.

At low current, the current which is relevant for determining the switching losses is higher than the inverter output current, because the motor cables lead to an additional output current. In order to consider this effect, a correction term  $I_{motor\_cable}$  is introduced. This current is added to the inverter output current for the calculation of the switching losses. For the reference converter, a simple model for the cable current is given in Table C.4 below.

Assuming the inverter is producing a sinusoidal output current with a fundamental frequency that is substantially (at least factor 15) lower than the switching frequency, the transistor switching losses are calculated according to Formula (C.3):

$$R_{L,sw,T} = \frac{E_T}{\pi} \cdot U_{DC} \cdot \sqrt{2} \cdot (I_{out} + I_{motor\_cable}) \cdot f_{sw} \quad (C.3)$$

The RCDM parameters in Formula (C.3) are given in Table C.4.

**Table C.4 – Reference parameters for Formula (C.3)**

Symbol	Description	RCDM parameter value	Unit
$E_T$	Switching loss energy of the power transistor (IGBT) per volt and per ampere	$7,5 \times 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$
$U_{DC}$	CDM DC link voltage	540	V
$I_{motor\_cable}$	Motor cable current, relevant for increased switching losses	$I_{motor\_cable} = 4$ for $I_{r,out} \leq 4$ A $I_{motor\_cable} = i_{r,out}$ for $4$ A $< I_{r,out} < 10$ A $I_{motor\_cable} = 10$ for $I_{r,out} \geq 10$ A	A
$f_{sw}$	CDM switching frequency	4 000 for a CDM up to 90 kW 2 000 for a CDM above 90 kW	Hz

The variable in Formula (C.3) is again the inverter output current  $I_{out}$ . The switching losses do not depend on the motor speed.

If the inverter output frequency was identical to 0 Hz for all operating time of the CDM, Formula (C.3) would not be correct anymore. However, it can be assumed that for nearly all applications at least a small output frequency different from 0 Hz, for example 0,05 Hz, will be found, so Formula (C.3) is used for all applications.

### C.2.5 Freewheeling diode switching losses

The diode switching losses are calculated in the same way:

$$R_{L,sw,D} = \frac{E_D}{\pi} \cdot U_{DC} \cdot \sqrt{2} \cdot (I_{out} + I_{motor\_cable}) \cdot f_{sw} \quad (C.4)$$

The RCDM parameters in Formula (C.4) are given in Table C.5.

**Table C.5 – Reference parameters for Formula (C.4)**

Symbol	Description	RCDM parameter value	Unit
$E_D$	Switching loss energy of the power diode per volt and per ampere	$2,5 \times 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$

### C.2.6 Output inverter total losses

The losses calculated in the Formulae (C.1) to (C.4) define the losses created in an individual power semiconductor. The sum of the output inverter losses is calculated for a three-phase CDM with six transistors and diodes as follows:

$$R_{L,inverter} = 6 \cdot (R_{L,on,T} + R_{L,on,D} + R_{L,sw,T} + R_{L,sw,D}) \quad (C.5)$$

## C.3 Input converter losses

### C.3.1 Active infeed converter

If the input converter section consists of an active infeed converter, its losses are calculated in an identical way as the output inverter section.

The AC side fundamental frequency of the active infeed converter is identical to the mains frequency. This limits the possible values for the modulation index  $m$  close to 1. The displacement factor,  $\cos\phi$ , between fundamental input current and fundamental input voltage is close to 1 in case of motoric operation of the CDM or to  $-1$  in case of regenerative operation. Due to this displacement factor, the CDM input current is lower than the CDM output current for active infeed converters (AICs), it corresponds to  $I_{out}m\cos\phi$ .

The reference CDM is assumed not to contain an active infeed converter, but a diode rectifier.

### C.3.2 Diode rectifier

The fundamental of the CDM input current is proportional to the active CDM output power and is calculated by the product of the inverter output current, output phase angle and modulation index. The RMS value of the CDM input current is furthermore proportional to a factor  $1/\lambda$ . The factor  $\lambda$ , being defined in Formula (B.2) as ratio of the active input power to the apparent input power of the CDM, is proportional to the displacement factor between CDM input current and decreasing with the harmonic content of the input current waveform. Standard values of  $\lambda$  for different rectifier topologies are given in B.4.2.

Finally, the rectifier losses are calculated according to Formula (C.6):

$$R_{L,rectifier} = 6 \cdot \left( \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m \cdot \cos\phi \cdot I_{out} \cdot U_{D,th,rectifier} + \frac{U_{D,r,rectifier} - U_{D,th,rectifier}}{\cos\phi_r \cdot I_{r,out}} \cdot \frac{\left( \frac{m \cdot \cos\phi \cdot I_{out}}{\lambda} \right)^2}{2} \right) \quad (C.6)$$

The RCDM parameters in Formula (C.6) are given in Table C.6.

**Table C.6 – Reference parameters for Formula (C.6)**

Symbol	Description	RCDM parameter value	Unit
$U_{D,th,rectifier}$	Threshold voltage of the rectifier power diode	0,9	V
$U_{D,r,rectifier}$	On state voltage of the rectifier power diode at rated CDM input current	2,2	V
$\lambda$	Power factor of the CDM input current and voltage	0,7	

The variables in Formula (C.6) are given in Table C.7.

**Table C.7 – Variables for Formula (C.6)**

Symbol	Description	Unit
$\phi_r$	Phase angle between fundamental CDM output voltage and fundamental CDM output current at rated torque according to Table 2	rad

#### C.4 Input choke losses

Input chokes are sometimes used to reduce harmonics. The inductance of the choke decreases with higher input power of the converter. Typically, the impedance of the input choke is chosen to be a certain part  $k1_{choke}$  of the rated inverter impedance  $U_{mL1}/I_{equ}$ . Assuming the voltage drop at the resistive part of the input choke to be a certain part  $k2_{choke}$  of the overall voltage drop on the input choke, the losses in the input choke are calculated to

$$P_{L,choke} = k1_{choke} \cdot k2_{choke} \cdot 3 \cdot \frac{\left( \frac{m \cdot \cos\Phi \cdot I_{out}}{\lambda} \right)^2}{\cos\Phi_r \cdot I_{r,out}} \cdot U_{mL1} \quad (C.7)$$

The RCDM parameters for the reference converter in Formula (C.7) are given in Table C.8.

**Table C.8 – Reference parameters for Formula (C.7)**

Symbol	Description	RCDM parameter value	Unit
$k1_{choke}$	Choke impedance, relative to the rated CDM impedance	0,02	
$k2_{choke}$	Relative voltage drop on the resistive part of the choke	0,25	
$U_{mL1}$	Phase to ground voltage of the supply network	230	V

The losses of DC chokes can be calculated in the same way as the losses for AC chokes.

The losses of low frequency line harmonic filters are calculated in the same way, because the major part of these losses is generated in the choke and losses in the filter capacitors can be neglected.

### C.5 DC link losses

As explained in Clause B.5, the DC link losses are mainly generated by resistors which are required to ensure a proper voltage sharing between the DC link capacitors and by the equivalent series resistor inside each capacitor. In a first order approximation, the amount of DC link capacitance is proportional to the rated inverter power. Consequently, the load independent losses in the resistors in parallel to the capacitors are proportional to the rated inverter output current as well. Furthermore, they are proportional to the square of the DC link voltage. The losses in the equivalent series resistor of the capacitor depend on the square of the AC part of the rectifier output current. Losses caused by high frequency inverter current are small enough to be neglected. The DC link losses are finally calculated by Formula (C.8):

$$P_{L,dc\_link} = k1_{DC\_link} \cdot I_{r,out} \cdot U_{DC}^2 + k2_{DC\_link} \cdot \frac{\left( \frac{\sqrt{3}}{1,35} \cdot \frac{m \cdot \cos\Phi \cdot I_{out}}{1 + 50 \cdot k1_{choke}} \right)^2}{I_{r,out}} \quad (C.8)$$

The RCDM parameters for the reference converter in Formula (C.8) are given in Table C.9.

**Table C.9 – Reference parameters for Formula (C.8)**

Symbol	Description	RCDM parameter value	Unit
$k1_{DC\_link}$	Load independent DC link loss parameter	$8 \times 10^{-7}$	$\frac{1}{\Omega \cdot A}$
$k2_{DC\_link}$	Load dependent DC link loss parameter	2	$\Omega \cdot A$

The determination of the parameters  $k1_{DC\_link}$  and  $k2_{DC\_link}$  for a CDM is explained in Clause B.5.

### C.6 Current conductor losses

Ohmic losses are generated for example in current conductors of the CDM. In the mathematical model, these losses depend on the amplitude of the CDM output current and the ohmic resistance of current conductors. This ohmic resistance reduces in a linear way with increased rated CDM output current, because higher power CDMs use current conductors with a larger diameter. Consequently, the voltage drop at the ohmic conductor elements remains independent of the rated CDM current.

$$P_{L,rails} = \frac{U_{rails}}{I_{r,out}} I_{out}^2 \quad (C.9)$$

The RCDM parameter for the reference converter in Formula (C.9) is given in Table C.10.

**Table C.10 – Reference parameters for Formula (C.9)**

Symbol	Description	RCDM parameter value	Unit
$U_{rails}$	Voltage drop at ohmic conductor elements at rated CDM current	0,7	V

## C.7 Control and standby losses

In Clause B.10, the load independent losses are explained. In order to get comparable results, these losses are evaluated without external components such as position sensors, communication electronics and motor brakes connected. For the reference converter, they are assumed to be the value in Table C.11.

**Table C.11 – Reference parameter for Formula (5)**

Abbreviation	Description	RCDM parameter value	Unit
$P_{L,control}$	Standby and control losses	50	W

## C.8 Cooling loss factor

State-of-the-art CDMs use a cooling system to transport the losses to the ambient. In many cases, a fan is for example used, which is a part of the CDM. This cooling component causes additional losses. In the mathematical model, these losses are calculated proportional to all other losses created in the CDM at its operating point of maximum losses.

$$R_{L,cooling} = k_{L,cooling} \cdot (R_{L,inverter(90;100)} + R_{L,rectifier(90;100)} + R_{L,rails(90;100)} + R_{L,DC\_link(90;100)} + R_{L,choke(90;100)} + R_{L,control}) \quad (C.10)$$

For the RCDM, the cooling loss parameter is set to 20 % (see Table C.12).

**Table C.12 – Reference parameter for Formula (C.10)**

Symbol	Description	RCDM parameter value	Unit
$k_{L,cooling}$	Cooling loss parameter	0,2	

## C.9 Other CDM losses

All losses in other parts of the CDM are neglected in the mathematical model, as they are significantly lower than the losses described above.

## **Annex D** (informative)

### **Converter topology**

#### **D.1 General**

In the vast majority of applications, CDM topologies described in Annex B can be found. This is especially true for operation of the CDM at a line voltage up to 1 000 V AC. In this case, the mathematical models described in Annex C describe the losses of a CDM or a PDS with sufficient accuracy.

However, in some cases, different converter topologies can be found. Their impact on losses is described in a qualitative manner in this informative Annex D.

#### **D.2 Voltage source output inverter topologies different from those mathematically described in Clause C.2**

The mathematical model in Clause C.2 describes the losses of a 2-level voltage source inverter. In some applications, higher level topologies are used, mainly in medium voltage CDMs. The simplest solution in this case is a three-level inverter, but also multilevel topologies are used in rare cases.

Depending on the switching frequency and the voltage rating, multilevel topologies offer the possibility to reduce the losses of a CDM. Furthermore, they offer the possibility to reduce the losses in the motor, because the harmonics in the motor current are lower for the same switching frequency of the semiconductor devices. Consequently, calculating the inverter losses with the mathematical model given in Clause C.2 will result in higher losses than in a practical application and will therefore deliver results on the safe side, as far as the evaluation of the IE Class is concerned.

As the mathematical calculation of inverter losses is significantly more complex than for a 2-level topology, it is not included in this document.

#### **D.3 Voltage source input converter topologies different from those mathematically described in Clause C.3**

If the input converter is a multilevel active infeed converter, the same considerations as in Clause D.2 apply.

For passive input converters, Figure B.4 shows a six-pulse infeed converter and Figure B.7 shows a typical waveform for this topology. In some applications, which are designed for very low harmonic input currents, 12-pulse, 18-pulse or 24-pulse infeed converters are used. In this case, the input converter current stays very similar to the waveform shown in Figure B.7, consequently, the mathematical model described in Clause C.3 can be used for all passive infeed topologies.

Other infeed converter topologies, for example non-regenerative PFC topologies, are rarely to be found and will be described in a future edition of IEC 61800-9-2.

#### D.4 CDM topologies different from voltage source type

CDM topologies different from voltage source type, like current source inverters or direct converters, can be found in a small number of applications, mainly in the high-power range above 1 MW and in the high voltage range above 1 000 V AC. The calculation of losses for these topologies is quite different from the mathematical model given in Annex C. A mathematical model for these topologies will be given in a future edition of IEC 61800-9-2, if this is assumed to be required. In this document, a qualitative statement will be given only.

Current source CDMs usually show higher losses compared to a voltage source CDM due to the following reasons.

- Current source inverters require power semiconductor devices with reverse blocking capability. These power semiconductors usually show a higher forward voltage drop compared to asymmetrically blocking power semiconductors. Consequently, their conduction losses are usually higher.
- In the DC link, the parallel capacitor shown in Figure B.8 is replaced by a series inductor. The losses in this series DC link inductor are usually higher than the losses of a parallel DC link capacitor.

Besides higher losses in the CDM, however, current source CDMs produce a voltage waveform at their output terminals which is much closer to a sinusoidal waveform than the voltage output waveform of a voltage source CDM. Consequently, the harmonic losses in the motor are expected to be lower. In the overall PDS, the losses are expected to be similar.

Direct converters offer the possibility to directly connect each input phase to each output phase of the CDM. For this type of CDM, two topologies are known.

- a) Matrix converters use power semiconductor devices similar to voltage source output inverters, operating at similar switching frequency. Losses in this type of CDM are reported to be similar to voltage source CDMs, though their mathematical model is quite different. Matrix converters can only be found very rarely in applications due to several reasons; there are no indications that this situation will change in the near future.
- b) Thyristor cyclo converters are used for very high-power ratings in the range above 10 MW, mainly in applications with a low output frequency of the CDM. The thyristors are operated with a very low switching frequency which is similar to the line frequency, and the thyristors show a comparatively low forward voltage drop. Consequently, the losses of this type of CDMs are comparatively low. On the other hand, the losses in the motor and the mains are higher than for standard voltage source CDMs, as the voltage waveform shows high harmonics.

## Annex E (informative)

### Interpolation of motor losses and motor current

#### E.1 General

For the determination of losses in any operating condition, losses either measured or calculated in a limited number of operating points may be used as the basis for an interpolation formula. In Annex E, interpolation procedures are given to calculate the losses in any operating point between standstill ( $n = 0$ ) and twice the rated speed ( $n = 2$ ) and between no-load ( $T = 0$ ) and twice the rated torque ( $T = 2$ ).

In Annex E, the fundamental supply frequency  $f$  and the torque  $T$  are used as relative values (within the range 0...1) in reference to their rated values. The relative rated output power  $p_N$  is therefore given as  $p_N = f \times T = 1$ .

The procedures apply both to synchronous and asynchronous (induction) machines.

NOTE The procedures presented in this informative Annex E are an extension of the procedures already included in IEC 60034-2-3:2020. Both standards are fully compatible. However, in this document, the admissible torque- and speed-ranges are significantly enhanced and field weakening operation is added. It is envisaged to update IEC 60034-2-3 in the future, at which point this Annex E will be revoked.

#### E.2 Relative and reference values

In Annex E, speed  $n$ , torque (load)  $T$  and power  $P$  are used as relative values related to the reference speed  $n_{\text{ref}}$ , reference torque  $T_{\text{ref}}$  and reference power  $P_{\text{ref}}$ .

The reference speed  $n_{\text{ref}}$  is the rated speed  $n_N$  in revolutions per minute.

The reference power  $P_{\text{ref}}$  is the rated power  $P_N$  at rated speed  $n_N$ .

The reference torque  $T_{\text{ref}}$  is calculated from reference speed and power by Formula (E.1).

$$T_{\text{ref}} = \frac{P_{\text{ref}}}{2\pi \frac{n_{\text{ref}}}{60}} \quad (\text{E.1})$$

In case of synchronous machines, the relative supply frequency  $f$  is equal to the relative speed  $n$ .

In case of induction machines, the relative supply frequency  $f$  for any given speed can be determined from a measurement of the fundamental frequency at the motor terminals when the shaft is rotating at the desired speed  $n$ .

The rated current  $I_N$  is the current in the normal motor connection according to the rating plate, that is either Y or D-connection.

A voltage coefficient  $c_{\text{volt}}$  (see Formula (E.2)) is defined to take voltage drops in the frequency converter and deviations between the rated motor voltage and the input voltage to the frequency converter into account.

$$c_{\text{volt}} = \frac{U_i}{U_N} \cdot 0,95 \quad (\text{E.2})$$

where

$U_i$  is the actual input voltage at the inverter;

$U_N$  is the rated motor voltage.

### E.3 Motor connections and operating ranges

The inter- and extrapolation procedures in Annex E are applicable to three different motor connections. The motor connection is characterized by a connection coefficient  $c_{\text{con}}$ .

Each of these can be operated in two speed ranges:

- range a: base speed (constant flux) range;
- range b: field-weakening (reduced flux) range.

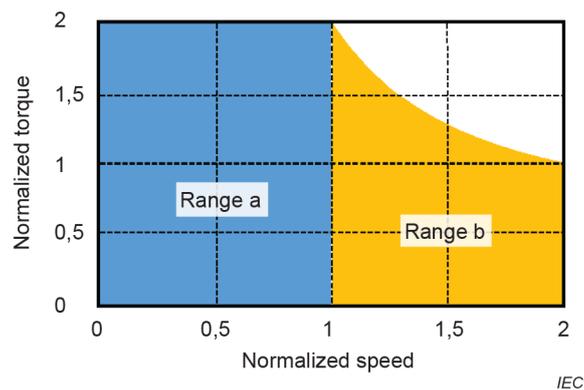
The relative speed  $n_{\text{FW}}$ , at which the field weakening range is starting, is given by formula (E.3):

$$n_{\text{FW}} = c_{\text{volt}} \cdot c_{\text{con}} \quad (\text{E.3})$$

#### a) Connection Y or D

Motors connected for operation at grid frequency and grid voltage. This operation is applicable to motors in star-connection (Y) or in delta-connection (D).

The connection coefficient of this connection mode is set to:  $c_{\text{con}} = 1$ . See Figure E.1.



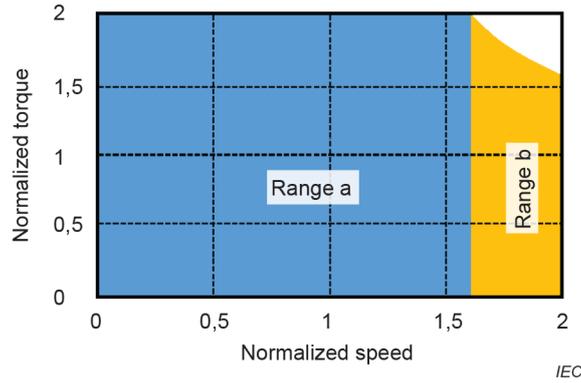
**Figure E.1 – Normalized torque and speed of ranges a and b for connection Y or D**

#### b) Connection Y → D

Motors connected for operation at 1,73-times grid frequency and grid voltage. This operation is applicable to motors that were originally designed for star-connection (Y) but are permanently connected in delta-connection (D).

The connection coefficient of this connection mode is set to  $c_{\text{con}} = 1,73$ . See Figure E.2.

NOTE The factor 1,73 is used as an approximation for the square root of 3.

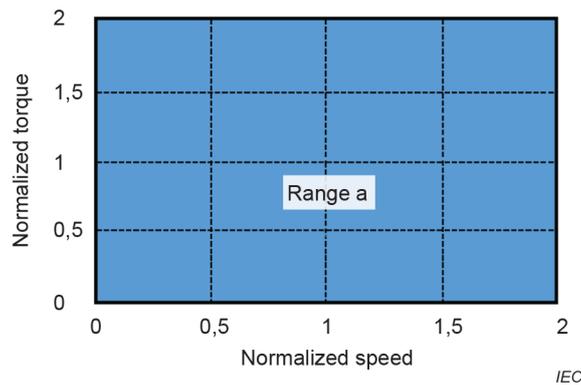


**Figure E.2 – Normalized torque and speed of ranges a and b for connection Y → D**

c) Connection Y → YY

Motors connected for operation at 2-times grid frequency and grid voltage. This operation is applicable to motors that were originally designed for star-connection (Y) but are permanently connected in double star-connection (YY).

The connection coefficient of this connection mode is set to  $c_{con} = 2$ . See Figure E.3.



**Figure E.3 – Normalized torque and speed of range a for connection Y → YY**

**E.4 Interpolation of motor losses**

The interpolation formulas are based on seven coefficients (losses)  $c_{L1}, c_{L2}, \dots, c_{L7}$ , which shall be provided for the motor. If these coefficients have not been provided in the datasheet of the motor, they can be calculated from the losses at seven operating points of the motor, as described in Clause E.6.

When interpolation in the field-weaking range is intended, two additional coefficients  $c_{WHf}$  and  $c_{BH}$  are required.

The losses at any operating point can then be obtained by applying the following interpolation formulas.

a) Range a ( $n = 0 \dots n_{FW}, T = 0 \dots 2$ )

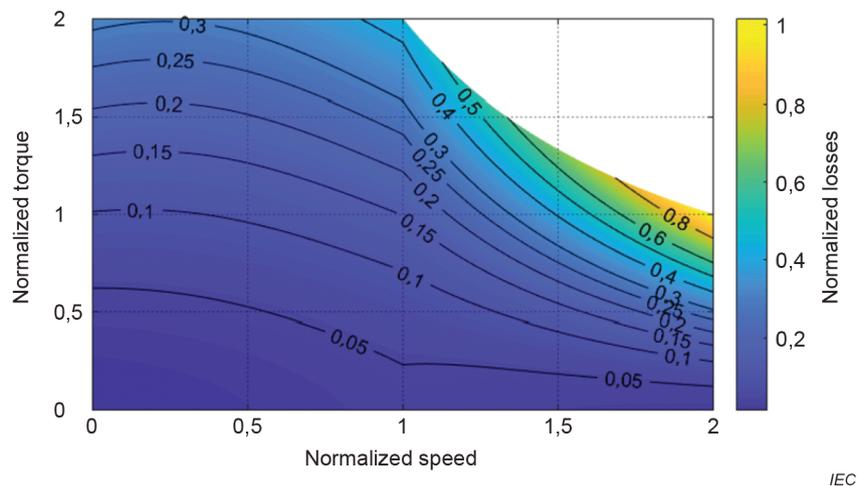
$$P_L(n, T) = c_{L1} + c_{L2} \cdot n + c_{L3} \cdot n^2 + c_{L4} \cdot n \cdot T^2 + c_{L5} \cdot n^2 \cdot T^2 + c_{L6} \cdot T + c_{L7} \cdot T^2 \tag{E.4}$$

b) Range b ( $n = n_{FW} \dots 2$ ,  $T = 0 \dots 2 \cdot n_{FW}/n$ )

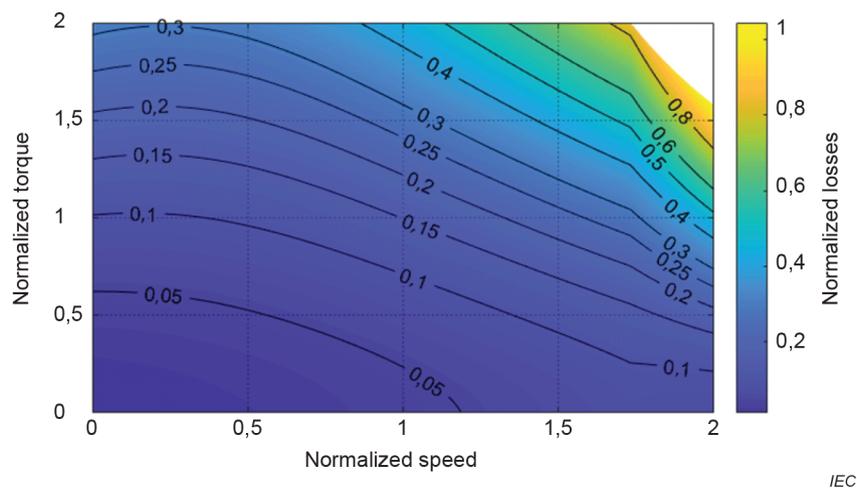
$$\begin{aligned}
 P_L(n, T) = & c_{L1} \cdot \left( c_{WHf} \cdot \frac{1}{(n - (n_{FW} - 1))^2} - c_{WHf} \cdot T^2 + T^2 \cdot (n - (n_{FW} - 1))^2 \right. \\
 & \left. + (1 - c_{WHf}) \right) + c_{L2} \cdot \left( c_{BH} \cdot n + (1 - c_{BH}) \cdot \frac{n_{FW}}{(n - (n_{FW} - 1))} \right) + n_{FW}^2 \quad (E.5) \\
 & \cdot c_{L3} + c_{L4} \cdot (n - (n_{FW} - 1))^2 \cdot n \cdot T^2 + c_{L5} \cdot (n - (n_{FW} - 1))^2 \cdot n^2 \cdot T^2 \\
 & + c_{L6} \cdot T \cdot (n - (n_{FW} - 1)) + c_{L7} \cdot T^2 \cdot (n - (n_{FW} - 1))^2
 \end{aligned}$$

NOTE Range b usually does not apply to the Y->YY connection. However, when there is a significant voltage drop in the frequency converter, a small field weakening operation can also occur in Y->YY connection.

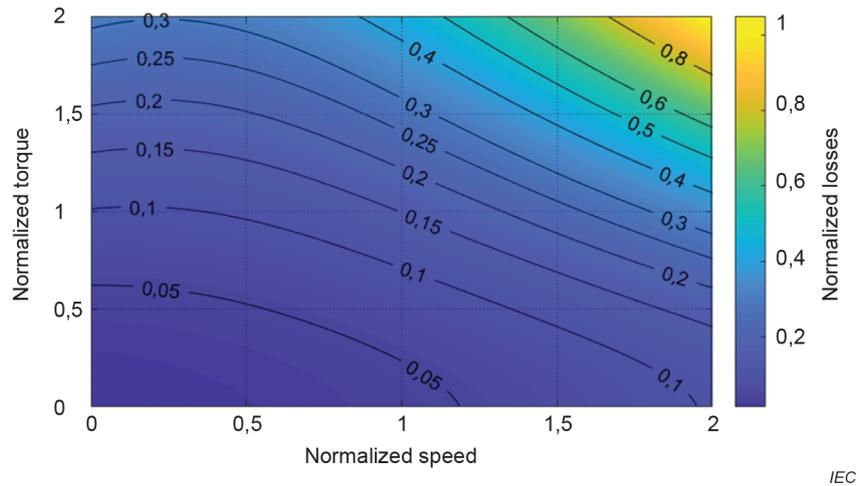
Figure E.4, Figure E.5 and Figure E.6 show the relative losses for an exemplary motor in all three connection modes.



**Figure E.4 – Normalized losses of an exemplary motor in connection Y or D**

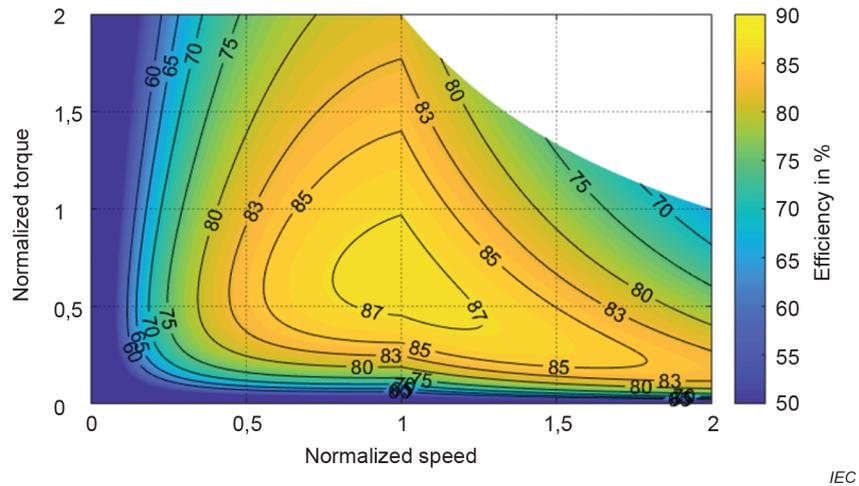


**Figure E.5 – Normalized losses of an exemplary motor in connection Y → D**



**Figure E.6 – Normalized losses of an exemplary motor in connection Y → YY**

This document uses interpolation and calculation of losses at different operating conditions for the overall assessment of system performance. Just for reference purposes, Figure E.7 to Figure E.9 show the efficiency maps of the exemplary motor, which can be derived from the Figure E.4 to Figure E.6.



**Figure E.7 – Efficiency map of the exemplary motor in connection Y or D**

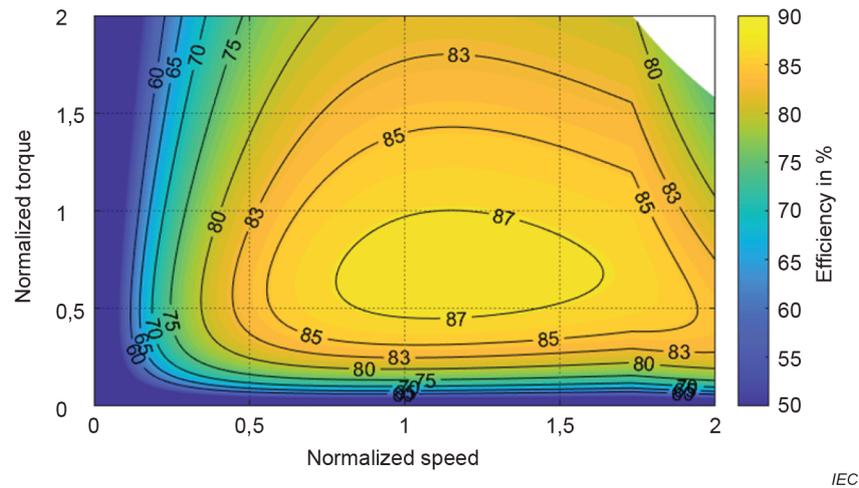


Figure E.8 – Efficiency map of the exemplary motor in connection Y → D

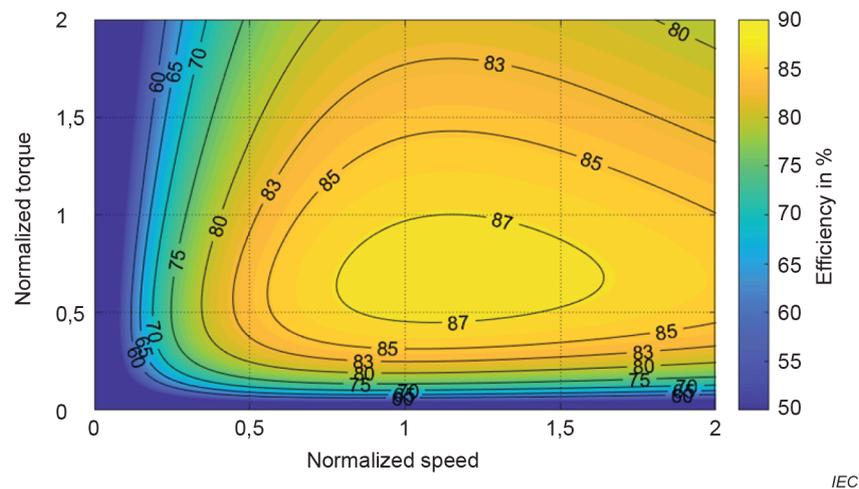


Figure E.9 – Efficiency map of the exemplary motor in connection Y → YY

## E.5 Interpolation of motor current

The electric current drawn by the motor is required as an input parameter to determine the losses in the frequency converter (CDM).

The line-current at any operating  $I(n, T)$  point can be obtained by applying the interpolation Formula (E.6) and Formula (E.7).

NOTE The formulas require the knowledge of the no-load current  $I_0$ , which is usually listed in the data sheets of the motor or can be obtained from the provider.

a) Range a ( $n = 0 \dots n_{FW}$ ,  $T = 0 \dots 2$ )

$$I(n, T) = I_N \cdot c_{\text{con}} \sqrt{\left[ \left( \frac{I_0}{I_N} \right)^2 + \left( 1 - \left( \frac{I_0}{I_N} \right)^2 \right) \cdot T^2 \right]} \quad (\text{E.6})$$

b) Range b ( $n = n_{FW} \dots 2, T = 0 \dots 2 \cdot n_{FW} / n$ )

$$I(n, T) = I_N \cdot c_{con} \cdot \sqrt{\left[ \frac{\left(\frac{I_0}{I_N}\right)^2}{(n - (n_{FW} - 1))^2} + \left(1 - \frac{\left(\frac{I_0}{I_N}\right)^2}{(n - (n_{FW} - 1))^2}\right) \cdot (T \cdot (n - (n_{FW} - 1)))^2 \right]} \quad (E.7)$$

Figure E.10, Figure E.11 and Figure E.12 show the relative line-current for an exemplary motor where the magnetizing current is 0,5 times the rated current.

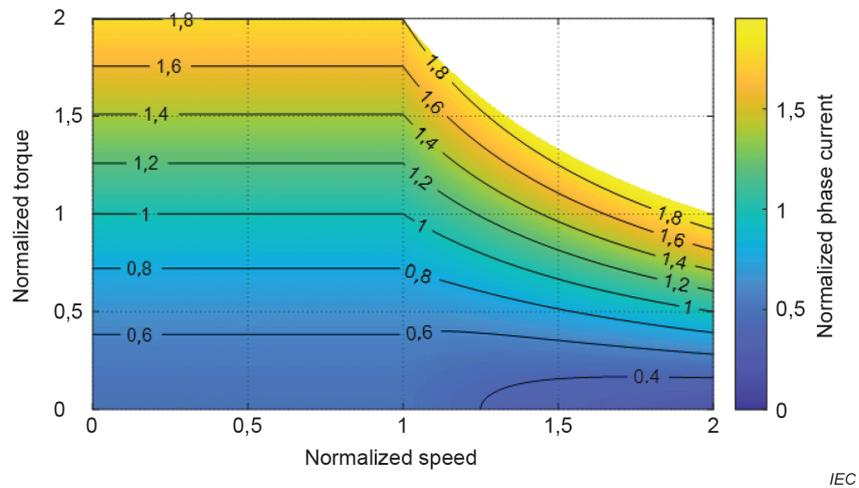


Figure E.10 – Line-current of the exemplary motor in connection Y or D

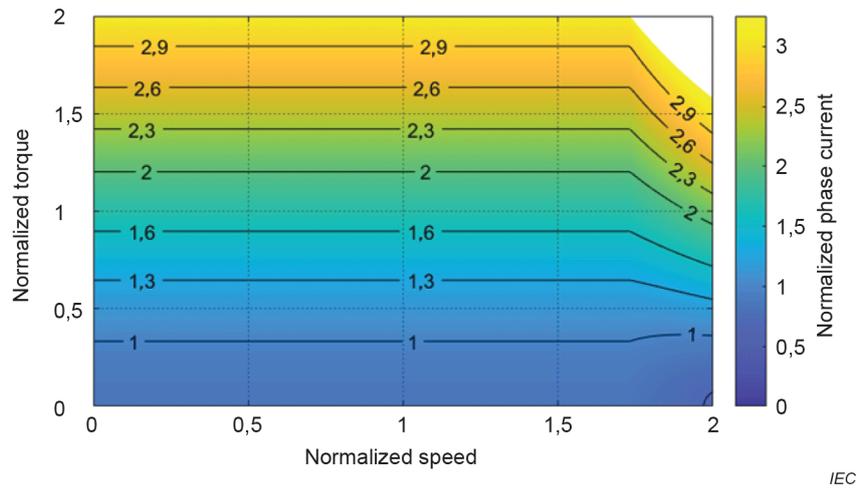


Figure E.11 – Line-current of the exemplary motor in connection Y → D

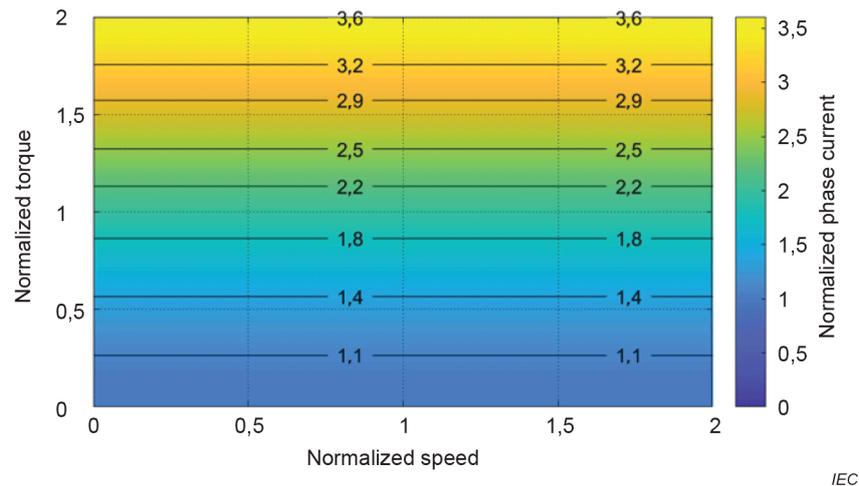


Figure E.12 – Line-current of the exemplary motor in connection Y → YY

## E.6 Determination of the interpolation coefficients

### E.6.1 General

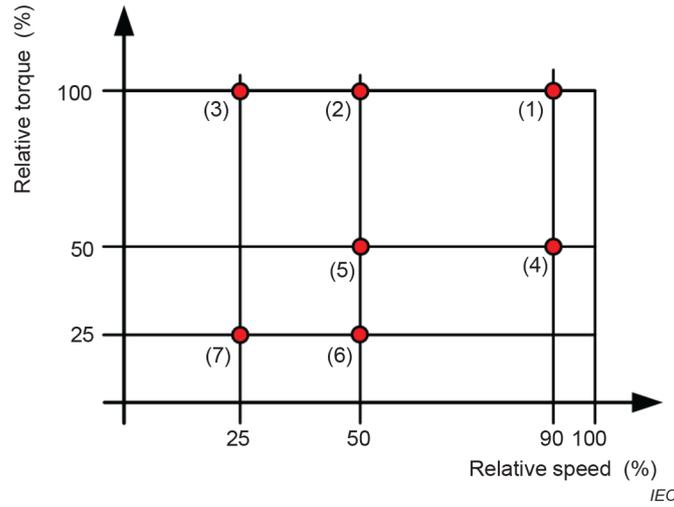
In order to determine the interpolation coefficients used in Formulae (E.4) and (E.5), the relative motor losses in a number of operating points shall be determined either by measurement or by calculation.

### E.6.2 Analytical determination

The easiest approach is to determine the losses in seven operating points that are all located in the base speed range. The interpolation coefficients can then be determined from the losses in these points by a set of analytical formulas. This approach usually results in good interpolation accuracy within the base speed range. The normative operating points are given in Table E.1 and Figure E.13.

Table E.1 – Normative operating points of IEC 60034-2-3

	$f$	$T$	$P$
$P_1$	0,9	1	0,9
$P_2$	0,5	1	0,5
$P_3$	0,25	1	0,25
$P_4$	0,9	0,5	0,45
$P_5$	0,5	0,5	0,25
$P_6$	0,5	0,25	0,125
$P_7$	0,25	0,25	0,062 5



**Figure E.13 – Standardized operating points of IEC 60034-2-3**

$P_{L1}$  to  $P_{L7}$  are the measured losses in the operating points  $P_1$  to  $P_7$  relative to the reference power  $P_{ref}$ .

For induction motors, at all operating points up to rated speed ( $n = 1$ ), the relative motor voltage should not be lower than the relative motor frequency. For synchronous motors designed for operation with lower flux/voltage (e.g., for efficiency reasons), the determination of the losses at the 7 operating points is allowed with reduced flux also. In this case, the flux reduction should be noted in the motor documentation.

When determining the losses by measurements, the first operating point (90 % speed and 100 % torque) for this test series is conducted after thermal equilibrium (rate of change 1 K or less per half hour) has been reached. The temperature at the other 6 operating points should be as close as possible to the temperature of the first operating point.

The following formulas can be used for the analytical determination of the interpolation coefficients  $c_{Ln}$  from the losses  $P_{Ln}$  in the seven operating points:

$$\begin{aligned}
 c_{L1} &= -\frac{25}{156} \cdot P_{L1} + \frac{529}{780} \cdot P_{L2} - \frac{12}{65} \cdot P_{L3} + \frac{25}{39} \cdot P_{L4} - \frac{103}{39} \cdot P_{L5} - \frac{56}{195} \cdot P_{L6} + \frac{192}{65} \cdot P_{L7} \\
 c_{L2} &= \frac{25}{26} \cdot P_{L1} - \frac{599}{390} \cdot P_{L2} + \frac{112}{195} \cdot P_{L3} - \frac{50}{13} \cdot P_{L4} + \frac{50}{13} \cdot P_{L5} + \frac{1792}{195} \cdot P_{L6} - \frac{1792}{195} \cdot P_{L7} \\
 c_{L3} &= -\frac{50}{39} \cdot P_{L1} + \frac{22}{13} \cdot P_{L2} - \frac{16}{39} \cdot P_{L3} + \frac{200}{39} \cdot P_{L4} - \frac{200}{39} \cdot P_{L5} - \frac{256}{39} \cdot P_{L6} + \frac{256}{39} \cdot P_{L7} \\
 c_{L4} &= -\frac{50}{13} \cdot P_{L1} + \frac{2542}{195} \cdot P_{L2} - \frac{1792}{195} \cdot P_{L3} + \frac{50}{13} \cdot P_{L4} - \frac{50}{13} \cdot P_{L5} - \frac{1792}{195} \cdot P_{L6} + \frac{1792}{195} \cdot P_{L7} \\
 c_{L5} &= \frac{200}{39} \cdot P_{L1} - \frac{152}{13} \cdot P_{L2} + \frac{256}{39} \cdot P_{L3} - \frac{200}{39} \cdot P_{L4} + \frac{200}{39} \cdot P_{L5} + \frac{256}{39} \cdot P_{L6} - \frac{256}{39} \cdot P_{L7} \\
 c_{L6} &= -2 \cdot P_{L2} + 10 \cdot P_{L5} - 8 \cdot P_{L6} \\
 c_{L7} &= \frac{25}{39} \cdot P_{L1} - \frac{181}{195} \cdot P_{L2} + \frac{192}{65} \cdot P_{L3} - \frac{25}{39} \cdot P_{L4} - \frac{287}{39} \cdot P_{L5} + \frac{1616}{195} \cdot P_{L6} - \frac{192}{65} \cdot P_{L7}
 \end{aligned} \tag{E.8}$$

The interpolation coefficients  $c_{L_n}$  calculated in Formula (E.8) can then be used to calculate the losses at any arbitrary operating point using Formula (E.4) or Formula (E.5) as appropriate.

For the interpolation formulas in the field-weakening ranges b, two more coefficients  $c_{WHf}$  and  $c_{BH}$  are required.

The coefficient  $c_{WHf}$  describes the loss separation of the winding losses due to the magnetizing current ( $c_{WHf}$ ) and the high frequency losses ( $1 - c_{WHf}$ ). If a detailed loss separation is not known, the value of 1 should be chosen for  $c_{WHf}$  as the high frequency losses can normally be neglected in comparison to the  $I^2R$ -losses of the magnetizing current.

The coefficient  $c_{BH}$  describes the loss separation of the bearing losses ( $c_{BH}$ ) and the hysteresis losses ( $1 - c_{BH}$ ). If a detailed loss separation is not known, an equal loss separation should be chosen ( $c_{BH} = 0,5$ ).

### E.6.3 Numerical determination

To achieve good interpolation accuracy, particularly in the field-weakening range, it is recommended to determine motor losses in a larger number of operating points, for example 16 or 20 points. Preferably, some of these operating points should be in the field weakening region as well as in the overload region ( $T > 1$ ).

The losses in the selected operating points can either be obtained from measurements or by calculation tools. In case of measurements, ensure to check all results and exclude outliers from the calculation of the interpolation coefficients.

The interpolation error  $Q_{ISI}$  (interpolation stability index) can be determined by the average standard deviation of the original (determined) losses  $P_L^{\text{determined}}$  and the interpolated losses  $P_L^{\text{interpolated}}$ .

The interpolation stability index for a total of  $n = 1 \dots N$  operating points is given by Formula (E.9).

$$Q_{ISI} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_n \left( \frac{P_{L,n}^{\text{determined}} - P_{L,n}^{\text{interpolated}}}{P_{L,n}^{\text{determined}}} \right)^2} \quad (\text{E.9})$$

The 7 + 2 interpolation coefficients ( $c_{L1}, c_{L2}, \dots, c_{L7}, c_{WHf}, c_{BH}$ ) can then be determined by performing a numerical optimization for the minimal interpolation error  $Q_{ISI}$ . A suitable algorithm is the Newton-Raphson method, which is already included in many commercially available numerical software packages.

NOTE In Microsoft EXCEL, use Extras > Solver.

## E.7 Achievable accuracies

The analytical determination of the interpolation coefficients according to E.6.2 based on the 7 operating points according to Table E.1 will typically give good results in the base speed (range a) up to rated torque  $T \leq 1$ . Even then, loss extrapolation may be inaccurate for  $n < 0,25$  or  $T < 0,25$ . In these cases, the loss values determined at 25 % speed or torque may be used for all smaller values. Experience has shown that a typical accuracy in the interpolation of the total losses better than  $\pm 10\%$  can be expected. Some operating points, however, may have a reduced accuracy up to  $\pm 20\%$  of the total losses.

When torques above rated torque, that is  $T > 1$  (range a) and  $T > n_{FW} / n$  (range b), and/or operating points in the field weakening range (range b) are required, the interpolation coefficients should be determined based on the procedure in 6.2. Ensure to include operating points in the determination of the coefficients that span the whole range of the intended application. In this case, also the interpolation in the base speed (range a) will be improved. Experience has shown that a typical accuracy in the interpolation of the total losses better than  $\pm 5\%$  can be expected. Some operating points, however, may have a reduced accuracy up to  $\pm 10\%$  of the total losses.

## E.8 Typical induction motor efficiency

Table E.2 and Table E.3 give coefficients for the interpolation formula according to E.6.2 for typical 2 and 4-pole induction machines of efficiency class IE2.

In Table E.4, Table E.5 and Table E.6 coefficients for the interpolation formula according to E.6.2 for typical 4-pole induction motors when driven by a CDM of motor efficiency class IE3, IE4 and IE5 are given.

These values were derived from measurements on actual machines.

**Table E.2 – Interpolation coefficients of typical 4-pole IE2 induction machines**

Rated power kW	Coeff. $c_{L1}$	Coeff. $c_{L2}$	Coeff. $c_{L3}$	Coeff. $c_{L4}$	Coeff. $c_{L5}$	Coeff. $c_{L6}$	Coeff. $c_{L7}$
0,12	0,324 316	0,116 588	0,076 506	0,002 987	0,003 914	–0,292 825	0,551 857
0,18	0,250 225	0,094 236	0,061 948	0,002 082	0,002 949	–0,119 516	0,316 624
0,25	0,195 658	0,083 798	0,060 563	0,005 959	0,006 785	–0,100 213	0,249 350
0,37	0,137 100	0,062 496	0,042 114	0,004 064	0,004 561	–0,042 812	0,204 367
0,55	0,111 483	0,047 330	0,031 814	0,000 010	0,000 416	–0,026 457	0,161 360
0,75	0,085 781	0,041 660	0,026 726	0,001 532	0,001 856	–0,020 927	0,152 402
1,1	0,069 172	0,038 244	0,027 240	0,000 872	0,001 317	–0,016 191	0,140 765
1,5	0,059 580	0,034 760	0,022 242	0,001 155	0,001 639	–0,018 775	0,138 279
2,2	0,036 978	0,031 347	0,021 183	0,009 877	0,008 447	0,016 190	0,091 365
3	0,038 845	0,026 351	0,015 957	0,004 417	0,004 606	–0,008 363	0,110 668
4	0,034 853	0,027 515	0,019 177	0,004 163	0,004 691	–0,012 966	0,098 248
5,5	0,029 206	0,024 540	0,018 285	0,007 272	0,007 664	–0,009 436	0,084 946
7,5	0,023 744	0,022 127	0,015 244	0,006 753	0,007 196	–0,016 095	0,091 724
11	0,019 974	0,020 315	0,014 864	0,005 763	0,005 965	–0,009 032	0,072 826
15	0,016 536	0,018 496	0,013 898	0,006 173	0,006 388	–0,007 766	0,064 775
18,5	0,014 915	0,017 047	0,012 419	0,005 559	0,005 729	–0,005 309	0,063 114
22	0,014 521	0,016 611	0,012 614	0,002 568	0,002 826	–0,005 610	0,060 415
30	0,010 356	0,013 976	0,008 611	0,006 561	0,009 284	0,000 337	0,048 029
37	0,022 059	0,003 052	0,014 537	0,009 029	–0,002 562	–0,008 081	0,053 231
45	0,010 470	0,013 126	0,011 908	0,004 668	0,004 768	–0,002 944	0,045 438
55	0,007 953	0,013 335	0,012 556	0,004 899	0,005 128	0,001 053	0,033 639
75	0,008 147	0,012 746	0,012 559	0,006 868	0,007 747	–0,006 249	0,030 899
90	0,007 422	0,012 923	0,011 440	0,006 342	0,006 353	–0,002 174	0,027 528
110	0,009 988	0,015 774	0,012 799	0,006 196	0,006 242	–0,002 418	0,023 835
132	0,009 150	0,012 524	0,008 713	0,007 001	0,007 230	–0,004 418	0,029 462
160	0,008 685	0,013 137	0,008 347	0,007 411	0,007 595	–0,003 358	0,025 062
200	0,008 253	0,012 361	0,009 287	0,006 432	0,006 646	–0,003310	0,024 648
250	0,007 973	0,011 493	0,008 782	0,005 903	0,006 134	–0,002 659	0,022 575
315	0,007 726	0,010 630	0,008 266	0,005 373	0,005 622	–0,002 170	0,020 633
355	0,007 304	0,010 197	0,008 104	0,005 290	0,005 473	–0,001 981	0,019 849
400	0,006 549	0,009 745	0,007 804	0,005 259	0,005 507	–0,000 335	0,018 033
500	0,006 472	0,009 322	0,007 784	0,005 142	0,005 156	–0,001 640	0,018 292
560	0,006 368	0,009 195	0,008 457	0,005 010	0,004 850	–0,001 882	0,016 170
630	0,005 987	0,008 960	0,009 242	0,005 104	0,005 158	–0,000 826	0,012 893
710	0,006 027	0,008 993	0,009 864	0,005 123	0,005 155	–0,000 825	0,012 505
800	0,006 070	0,009 023	0,010 484	0,005 128	0,005 150	–0,000 833	0,012 126
900	0,005 714	0,008 565	0,009 440	0,005 122	0,005 144	–0,000 887	0,011 977
1 000	0,005 341	0,008 110	0,008 397	0,005 107	0,005 132	–0,000 872	0,011 765

**Table E.3 – Interpolation coefficients of typical 2-pole IE2 induction machines**

Rated power kW	Coeff. $c_{L1}$	Coeff. $c_{L2}$	Coeff. $c_{L3}$	Coeff. $c_{L4}$	Coeff. $c_{L5}$	Coeff. $c_{L6}$	Coeff. $c_{L7}$
0,12	0,309 215	0,111 623	0,110 781	−0,001 322	0,002 960	−0,383 548	0,721 923
0,18	0,273 998	0,083 806	0,115 291	0,002 587	0,004 709	−0,348 918	0,561 115
0,25	0,167 541	0,073 171	0,088 958	0,003 867	0,007 011	−0,189 190	0,440 915
0,37	0,110 359	0,055 126	0,073 582	0,009 097	0,011 939	−0,121 045	0,311 147
0,55	0,078 950	0,048 581	0,063 063	0,010 411	0,013 178	−0,090 696	0,259 010
0,75	0,070 365	0,034 987	0,032 732	0,008 746	0,013 292	−0,049 085	0,238 701
1,1	0,056 385	0,031 303	0,030 860	0,005 793	0,007 114	−0,035 794	0,180 159
1,5	0,060 191	0,030 829	0,040 748	0,000 904	0,001 593	−0,022 733	0,136 693
2,2	0,059 162	0,031 190	0,033 312	0,001 914	0,002 587	−0,028 384	0,137 223
3	0,043 406	0,026 104	0,028 245	0,005 760	0,006 097	−0,011 705	0,111 514
4	0,031 784	0,023 241	0,027 211	0,012 913	0,013 211	−0,012 423	0,095 823
5,5	0,028 954	0,021 007	0,030 026	0,002 759	0,003 151	−0,010 740	0,088 128
7,5 <sup>a</sup>	0,024 405	0,015 308	0,019 826	0,008 659	0,008 659	−0,015 092	0,085 584
11	0,016 563	0,013 228	0,014 879	0,006 138	0,006 295	−0,007 512	0,067 897
15	0,016 368	0,013 568	0,025 610	0,005 575	0,005 848	−0,004 907	0,059 672
18,5	0,014 745	0,011 859	0,024 222	0,005 110	0,005 264	−0,005 436	0,052 023
22	0,011 104	0,011 228	0,019 121	0,006 070	0,006 207	−0,004 175	0,047 999
30	0,010 892	0,010 729	0,023 913	0,006 792	0,006 959	−0,001 668	0,040 827
37	0,009 844	0,009 115	0,020 941	0,006 641	0,006 957	−0,006 646	0,044 980
45	0,007 975	0,011 238	0,019 297	0,004 000	0,004 373	−0,002 912	0,031 165
55	0,008 080	0,009 476	0,021 905	0,004 978	0,004 839	−0,000 467	0,030 347
75	0,008 174	0,009 524	0,026 133	0,002 245	0,002 546	−0,001 471	0,025 651
90	0,010 468	0,012 436	0,020 174	0,004 593	0,004 592	−0,000 849	0,024 230
110	0,008 463	0,010 116	0,019 400	0,004 050	0,004 079	−0,001 251	0,019 566
132	0,007 975	0,008 928	0,017 852	0,004 602	0,004 641	−0,001 160	0,019 363
160	0,007 489	0,007 738	0,016 304	0,005 148	0,005 203	−0,001 081	0,019 173
200	0,007 513	0,008 009	0,013 136	0,005 785	0,006 285	−0,003 641	0,020 405
250	0,007 336	0,007 431	0,015 691	0,005 161	0,005 183	−0,001 111	0,016 732
315	0,006 501	0,006 990	0,012 831	0,005 141	0,005 161	−0,001 165	0,016 420
355	0,006 197	0,006 633	0,012 262	0,005 128	0,005 149	−0,001 157	0,015 445
400	0,005 887	0,006 273	0,011 683	0,005 127	0,005 153	−0,001 124	0,014 452
500	0,005 571	0,005 915	0,011 114	0,005 114	0,005 140	−0,001 054	0,013 422
560	0,005 426	0,005 839	0,011 092	0,005 071	0,005 185	−0,001 009	0,012 458
630	0,005 222	0,005 734	0,011 155	0,005 072	0,005 145	−0,000 678	0,011 237
710	0,005 226	0,005 655	0,012 328	0,005 095	0,005 142	−0,000 577	0,009 848
800	0,005 216	0,005 593	0,013 485	0,005 074	0,005 162	−0,000 435	0,008 439
900	0,005 054	0,005 307	0,012 116	0,005 090	0,005 136	−0,000 653	0,009 444
1 000	0,004 875	0,005 040	0,010 724	0,005 098	0,005 121	−0,000 814	0,010 403

<sup>a</sup> The coefficients of the 7,5 kW machine have been corrected due to an error in IEC 61800-9-2:2017.

**Table E.4 – Interpolation coefficients of typical 4-pole IE3 induction machines**

Rated power kW	Coeff. $c_{L1}$	Coeff. $c_{L2}$	Coeff. $c_{L3}$	Coeff. $c_{L4}$	Coeff. $c_{L5}$	Coeff. $c_{L6}$	Coeff. $c_{L7}$
0,12	0,254 566	0,091 513	0,060 052	0,002 345	0,003 073	–0,229 847	0,433 170
0,18	0,197 492	0,074 376	0,048 893	0,001 644	0,002 327	–0,094 329	0,249 898
0,25	0,153 404	0,065 701	0,047 483	0,004 672	0,005 320	–0,078 571	0,195 501
0,37	0,107 215	0,048 873	0,032 934	0,003 178	0,003 567	–0,033 480	0,159 819
0,55	0,089 190	0,037 865	0,025 452	0,000 008	0,000 333	–0,021 167	0,129 094
0,75	0,071 000	0,034 481	0,022 121	0,001 268	0,001 536	–0,017 321	0,126 142
1,1	0,057 233	0,031 643	0,022 538	0,000 721	0,001 090	–0,013 396	0,116 468
1,5	0,049 428	0,028 837	0,018 452	0,000 958	0,001 359	–0,015 575	0,114 716
2,2	0,030 458	0,025 820	0,017 448	0,008 135	0,006 957	0,013 335	0,075 256
3	0,032 125	0,021 792	0,013 197	0,003 653	0,003 809	–0,006 916	0,091 522
4	0,028 982	0,022 880	0,015 947	0,003 462	0,003 901	–0,010 782	0,081 698
5,5	0,024 170	0,020 309	0,015 133	0,006 019	0,006 343	–0,007 810	0,070 301
7,5	0,019 793	0,018 445	0,012 707	0,005 629	0,005 998	–0,013 416	0,076 459
11	0,016 546	0,016 828	0,012 313	0,004 774	0,004 941	–0,007 482	0,060 327
15	0,013 671	0,015 292	0,011 490	0,005 103	0,005 281	–0,006 420	0,053 552
18,5	0,012 352	0,014 118	0,010 285	0,004 604	0,004 744	–0,004 397	0,052 271
22	0,011 918	0,013 634	0,010 353	0,002 108	0,002 320	–0,004 605	0,049 588
30	0,008 488	0,011 455	0,007 058	0,005 377	0,007 609	0,000 277	0,039 366
37	0,018 197	0,002 518	0,011 992	0,007 449	–0,002 114	–0,006 667	0,043 912
45	0,008 698	0,010 905	0,009 893	0,003 878	0,003 961	–0,002 446	0,037 748
55	0,006 530	0,010 949	0,010 310	0,004 023	0,004 210	0,000 864	0,027 621
75	0,006 718	0,010 510	0,010 356	0,005 663	0,006 388	–0,005 153	0,025 479
90	0,006 078	0,010 583	0,009 368	0,005 193	0,005 203	–0,001 781	0,022 542
110	0,008 274	0,013 068	0,010 604	0,005 134	0,005 172	–0,002 004	0,019 747
132	0,007 525	0,010 299	0,007 165	0,005 758	0,005 946	–0,003 634	0,024 229
160	0,007 085	0,010 717	0,006 809	0,006 046	0,006 196	–0,002 740	0,020 445
200	0,006 674	0,009 996	0,007 510	0,005 201	0,005 374	–0,002 676	0,019 932
250	0,006 448	0,009 294	0,007 101	0,004 774	0,004 960	–0,002 151	0,018 256
315	0,006 248	0,008 596	0,006 685	0,004 345	0,004 547	–0,001 755	0,016 686
355	0,005 907	0,008 246	0,006 553	0,004 278	0,004 426	–0,001 602	0,016 051
400	0,005 296	0,007 880	0,006 311	0,004 253	0,004 454	–0,000 271	0,014 583
500	0,005 234	0,007 538	0,006 295	0,004 158	0,004 169	–0,001 326	0,014 792
560	0,005 150	0,007 435	0,006 839	0,004 051	0,003 922	–0,001 522	0,013 076
630	0,004 841	0,007 245	0,007 474	0,004 127	0,004 171	–0,000 668	0,010 426
710	0,004 874	0,007 272	0,007 977	0,004 143	0,004 169	–0,000 667	0,010 112
800	0,004 909	0,007 297	0,008 478	0,004 147	0,004 165	–0,000 674	0,009 806
900	0,004 621	0,006 926	0,007 634	0,004 142	0,004 160	–0,000 717	0,009 686
1 000	0,004 319	0,006 559	0,006 790	0,004 130	0,004 150	–0,000 705	0,009 514

**Table E.5 – Interpolation coefficients of typical 4-pole IE4 induction machines**

Rated power kW	Coeff. $c_{L1}$	Coeff. $c_{L2}$	Coeff. $c_{L3}$	Coeff. $c_{L4}$	Coeff. $c_{L5}$	Coeff. $c_{L6}$	Coeff. $c_{L7}$
0,12	0,202 761	0,072 890	0,047 831	0,001 868	0,002 447	–0,183 073	0,345 019
0,18	0,155 332	0,058 498	0,038 455	0,001 293	0,001 830	–0,074 192	0,196 550
0,25	0,120 707	0,051 698	0,037 363	0,003 677	0,004 186	–0,061 824	0,153 831
0,37	0,085 084	0,038 785	0,026 136	0,002 522	0,002 831	–0,026 569	0,126 831
0,55	0,072 027	0,030 578	0,020 554	0,000 006	0,000 269	–0,017 093	0,104 251
0,75	0,055 851	0,027 124	0,017 401	0,000 997	0,001 208	–0,013 625	0,099 227
1,1	0,044 436	0,024 568	0,017 499	0,000 560	0,000 846	–0,010 401	0,090 427
1,5	0,038 372	0,022 387	0,014 325	0,000 744	0,001 055	–0,012 092	0,089 058
2,2	0,023 293	0,019 747	0,013 344	0,006 222	0,005 321	0,010 199	0,057 554
3	0,024 324	0,016 501	0,009 992	0,002 766	0,002 884	–0,005 237	0,069 298
4	0,022 005	0,017 372	0,012 108	0,002 629	0,002 962	–0,008 186	0,062 031
5,5	0,018 354	0,015 422	0,011 491	0,004 570	0,004 817	–0,005 930	0,053 384
7,5	0,014 894	0,013 880	0,009 562	0,004 236	0,004 514	–0,010 096	0,057 537
11	0,012 628	0,012 843	0,009 397	0,003 643	0,003 771	–0,005 710	0,046 042
15	0,010 354	0,011 581	0,008 702	0,003 865	0,004 000	–0,004 862	0,040 557
18,5	0,009 517	0,010 877	0,007 925	0,003 547	0,003 655	–0,003 388	0,040 273
22	0,009 216	0,010 542	0,008 005	0,001 630	0,001 794	–0,003 561	0,038 343
30	0,006 671	0,009 003	0,005 547	0,004 226	0,005 980	0,000 217	0,030 940
37	0,014 123	0,001 954	0,009 307	0,005 781	–0,001 640	–0,005 174	0,034 082
45	0,006 812	0,008 540	0,007 747	0,003 037	0,003 102	–0,001 915	0,029 562
55	0,005 140	0,008 619	0,008 115	0,003 166	0,003 314	0,000 680	0,021 742
75	0,005 318	0,008 321	0,008 198	0,004 483	0,005 057	–0,004 079	0,020 170
90	0,004 892	0,008 518	0,007 540	0,004 180	0,004 187	–0,001 433	0,018 144
110	0,006 593	0,010 413	0,008 450	0,004 091	0,004 121	–0,001 597	0,015 735
132	0,006 106	0,008 357	0,005 814	0,004 672	0,004 824	–0,002 948	0,019 659
160	0,005 688	0,008 604	0,005 467	0,004 854	0,004 974	–0,002 200	0,016 414
200	0,005 466	0,008 187	0,006 151	0,004 260	0,004 402	–0,002 192	0,016 325
250	0,005 281	0,007 612	0,005 816	0,003 910	0,004 062	–0,001 761	0,014 952
315	0,005 117	0,007 041	0,005 475	0,003 559	0,003 724	–0,001 437	0,013 666
355	0,004 838	0,006 754	0,005 367	0,003 504	0,003 625	–0,001 312	0,013 147
400	0,004 337	0,006 454	0,005 169	0,003 483	0,003 648	–0,000 222	0,011 944
500	0,004 287	0,006 174	0,005 156	0,003 406	0,003 415	–0,001 086	0,012 115
560	0,004 218	0,006 090	0,005 601	0,003 318	0,003 212	–0,001 246	0,010 710
630	0,003 965	0,005 934	0,006 121	0,003 380	0,003 416	–0,000 547	0,008 539
710	0,003 992	0,005 956	0,006 533	0,003 393	0,003 414	–0,000 547	0,008 282
800	0,004 020	0,005 976	0,006 944	0,003 396	0,003 411	–0,000 552	0,008 031
900	0,003 784	0,005 673	0,006 252	0,003 393	0,003 407	–0,000 587	0,007 933
1 000	0,003 538	0,005 372	0,005 562	0,003 383	0,003 399	–0,000 578	0,007 792

**Table E.6 – Interpolation coefficients of typical 4-pole IE5 induction machines**

Rated power kW	Coeff. $c_{L1}$	Coeff. $c_{L2}$	Coeff. $c_{L3}$	Coeff. $c_{L4}$	Coeff. $c_{L5}$	Coeff. $c_{L6}$	Coeff. $c_{L7}$
0,12	0,162 098	0,058 272	0,038 239	0,001 493	0,001 956	–0,146 358	0,275 826
0,18	0,124 127	0,046 747	0,030 730	0,001 033	0,001 463	–0,059 287	0,157 065
0,25	0,096 581	0,041 365	0,029 895	0,002 942	0,003 349	–0,049 467	0,123 085
0,37	0,067 996	0,030 995	0,020 887	0,002 016	0,002 262	–0,021 233	0,101 357
0,55	0,057 579	0,024 445	0,016 431	0,000 005	0,000 215	–0,013 664	0,083 339
0,75	0,044 780	0,021 748	0,013 952	0,000 800	0,000 969	–0,010 925	0,079 559
1,1	0,035 515	0,019 636	0,013 986	0,000 448	0,000 676	–0,008 313	0,072 272
1,5	0,030 458	0,017 770	0,011 370	0,000 591	0,000 838	–0,009 598	0,070 690
2,2	0,018 682	0,015 837	0,010 702	0,004 990	0,004 267	0,008 179	0,046 159
3	0,019 647	0,013 328	0,008 071	0,002 234	0,002 329	–0,004 230	0,055 974
4	0,017 476	0,013 796	0,009 616	0,002 088	0,002 352	–0,006 501	0,049 263
5,5	0,014 715	0,012 364	0,009 213	0,003 664	0,003 862	–0,004 754	0,042 799
7,5	0,011 897	0,011 087	0,007 638	0,003 383	0,003 605	–0,008 064	0,045 957
11	0,010 038	0,010 209	0,007 470	0,002 896	0,002 998	–0,004 539	0,036 599
15	0,008 212	0,009 185	0,006 902	0,003 065	0,003 172	–0,003 857	0,032 168
18,5	0,007 623	0,008 713	0,006 348	0,002 841	0,002 928	–0,002 714	0,032 259
22	0,007 461	0,008 535	0,006 481	0,001 319	0,001 452	–0,002 883	0,031 043
30	0,005 307	0,007 163	0,004 413	0,003 362	0,004 758	0,000 173	0,024 614
37	0,011 368	0,001 573	0,007 491	0,004 653	–0,001 320	–0,004 165	0,027 432
45	0,005 428	0,006 805	0,006 173	0,002 420	0,002 472	–0,001 526	0,023 556
55	0,004 149	0,006 957	0,006 551	0,002 556	0,002 675	0,000 549	0,017 550
75	0,004 356	0,006 815	0,006 715	0,003 672	0,004 142	–0,003 341	0,016 520
90	0,003 857	0,006 715	0,005 944	0,003 295	0,003 301	–0,001 130	0,014 303
110	0,005 307	0,008 382	0,006 802	0,003 293	0,003 317	–0,001 285	0,012 666
132	0,004 883	0,006 683	0,004 649	0,003 736	0,003 858	–0,002 358	0,015 722
160	0,004 656	0,007 042	0,004 474	0,003 973	0,004 071	–0,001 800	0,013 434
200	0,004 276	0,006 404	0,004 811	0,003 332	0,003 443	–0,001 715	0,012 770
250	0,004 131	0,005 954	0,004 550	0,003 058	0,003 178	–0,001 378	0,011 696
315	0,004 003	0,005 507	0,004 283	0,002 784	0,002 913	–0,001 124	0,010 690
355	0,003 784	0,005 283	0,004 198	0,002 741	0,002 835	–0,001 026	0,010 283
400	0,003 393	0,005 049	0,004 043	0,002 724	0,002 853	–0,000 174	0,009 343
500	0,003 353	0,004 829	0,004 033	0,002 664	0,002 671	–0,000 850	0,009 477
560	0,003 299	0,004 764	0,004 381	0,002 595	0,002 513	–0,000 975	0,008 377
630	0,003 102	0,004 642	0,004 788	0,002 644	0,002 672	–0,000 428	0,006 680
710	0,003 122	0,004 659	0,005 110	0,002 654	0,002 671	–0,000 428	0,006 478
800	0,003 145	0,004 675	0,005 432	0,002 657	0,002 668	–0,000 432	0,006 282
900	0,002 960	0,004 437	0,004 891	0,002 654	0,002 665	–0,000 460	0,006 205
1000	0,002 767	0,004 202	0,004 350	0,002 646	0,002 659	–0,000 452	0,006 095

Loss and efficiency data of other motor types, pole numbers and motor classes can be found in IEC TS 60034-31.

## Annex F (informative)

### Application example for loss calculations of a CDM and a PDS

#### F.1 General

In Annex F, an example is given how to calculate the losses of a physical CDM and a physical PDS at a defined operation point. The operating point of the PDS is chosen to be at 80 % rated torque and 75 % rated speed of a 7,5 kW example PDS.

For this purpose, the losses of the CDM are calculated first. In the next step, the motor losses are determined. In the third step, the PDS losses are calculated.

In Clause F.6, application examples for the loss determination and IE classification of an SDIM, SDOM and a CDM with enhanced functionality are shown.

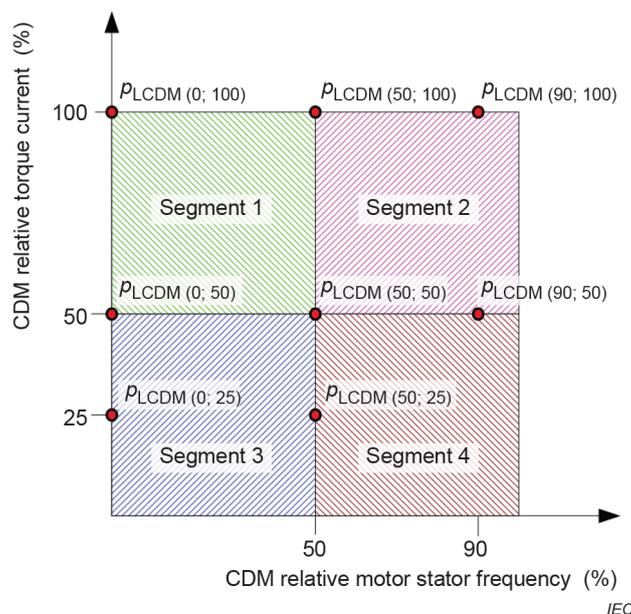
#### F.2 CDM loss determination

##### F.2.1 General

In order to determine the relative losses of a CDM at an arbitrary operating point, one of the following calculation models can be used:

- a) two-dimensional linear inter- or extrapolation from neighbouring loss points;
- b) loss calculation according to the mathematical model described in 5.2 and Annex C.

For the two-dimensional linear interpolation method (method a)), it is necessary to divide the operating area shown in Figure 6 into four segments, as shown in Figure F.1.



**Figure F.1 – Segments of operating points**

Segment 1 covers the operating points up to 50 % relative motor stator frequency  $f$  and above 50 % relative torque current  $i_q$ .

Segment 2 covers the operating points above 50 % relative motor stator frequency  $f$  and above 50 % relative torque current  $i_q$ .

Segment 3 covers the operating points up to 50 % relative motor stator frequency  $f$  and up to 50 % relative torque current  $i_q$ .

Segment 4 covers the operating points above 50 % relative motor stator frequency  $f$  and up to 50 % relative torque current  $i_q$ .

In the following subclauses, it is demonstrated how to determine the losses at the operating point of 75 % relative motor stator frequency and 80 % relative torque current. The example CDM (IE2) which is used in the example PDS has a rated apparent power of 9,95 kVA. The losses in the predefined operating points are assumed to be as given in Table F.1.

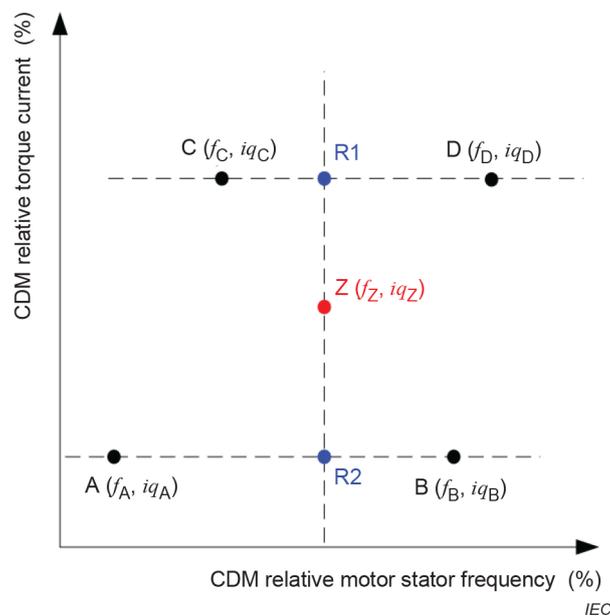
**Table F.1 – Relative losses of a 400 V/9,95 kVA example CDM (IE1) at the predefined operating points**

$P_{rM}$ kW	$S_{r, equ}$ kVA	$P_{L, CDM}$ (0;25)	$P_{L, CDM}$ (0;50)	$P_{L, CDM}$ (0;100)	$P_{L, CDM}$ (50;25)	$P_{L, CDM}$ (50;50)	$P_{L, CDM}$ (50;100)	$P_{L, CDM}$ (90;50)	$P_{L, CDM}$ (90;100)
7,5	9,95	2,80	3,09	4,02	2,86	3,28	4,64	3,61	5,84

## F.2.2 Loss determination by two-dimensional interpolation of losses of neighbouring loss points

### F.2.2.1 General two-dimensional interpolation model

Interpolation between four defined points A, B, C and D at an operating point Z is calculated in three steps. See Figure F.2.



**Figure F.2 – Two-dimensional interpolation**

In the first step, a linear interpolation between points C and D is calculated for the point R1. The horizontal component  $f$  of R1 is chosen equivalent to the horizontal component  $f_Z$  of the required operating point Z. If the vertical component of the points C and D is identical ( $iq_C = iq_D$ ), the losses at the point R1 are a function of the horizontal component  $f_Z$  only and can be calculated by:

$$p_{L,R1}(f_Z) = p_{L,C} + \frac{p_{L,D} - p_{L,C}}{f_D - f_C} \cdot (f_Z - f_C) \quad (F.1)$$

In the second step, the losses are interpolated in the same way for the point R2:

$$p_{L,R2}(f_Z) = p_{L,A} + \frac{p_{L,B} - p_{L,A}}{f_B - f_A} \cdot (f_Z - f_A) \quad (F.2)$$

In the third step, the losses in the operating point Z are finally calculated by interpolation between R1 and R2. As R1 and R2 have the same horizontal component  $f_Z$  by definition, this interpolation is a function of the vertical component  $iq_Z$  only:

$$p_{L,Z}(iq_Z) = p_{L,R2} + \frac{p_{L,R1} - p_{L,R2}}{iq_{R1} - iq_{R2}} \cdot (iq_Z - iq_{R2}) \quad (F.3)$$

Inserting Formulae (F.1) and (F.2) into (F.3) give a final calculation of the losses at the operating point Z in one step:

$$\begin{aligned} p_{L,Z}(f_Z, iq_Z) = & \\ & p_{L,A} + \frac{p_{L,B} - p_{L,A}}{f_B - f_A} \cdot (f_Z - f_A) + \\ & \frac{\left( p_{L,C} + \frac{p_{L,D} - p_{L,C}}{f_D - f_C} \cdot (f_Z - f_C) \right) - \left( p_{L,A} + \frac{p_{L,B} - p_{L,A}}{f_B - f_A} \cdot (f_Z - f_A) \right)}{iq_C - iq_A} \cdot (iq_Z - iq_A) \end{aligned} \quad (F.4)$$

Taking into account the predefined loss points in Figure 6, the calculation for the segments in Figure F.1 results for segment 1 in:

$$\begin{aligned}
 p_{L,Z}(f_Z, iq_Z) = & \\
 & p_{L,CDM(0,50)} + \frac{p_{L,CDM(50,50)} - p_{L,CDM(0,50)}}{50} \cdot f_Z + \\
 & \left( \frac{\left( p_{L,CDM(0,100)} + \frac{p_{L,CDM(50,100)} - p_{L,CDM(0,100)}}{50} \cdot f_Z \right)}{50} - \right. \\
 & \left. \frac{\left( p_{L,CDM(0,50)} + \frac{p_{L,CDM(50,50)} - p_{L,CDM(0,50)}}{50} \cdot f_Z \right)}{50} \right) \cdot (iq_Z - 50)
 \end{aligned} \tag{F.5}$$

For segment 2, the calculation results in:

$$\begin{aligned}
 p_{L,Z}(f_Z, iq_Z) = & \\
 & p_{L,CDM(50,50)} + \frac{p_{L,CDM(90,50)} - p_{L,CDM(50,50)}}{40} \cdot (f_Z - 50) + \\
 & \left( \frac{\left( p_{L,CDM(50,100)} + \frac{p_{L,CDM(90,100)} - p_{L,CDM(50,100)}}{40} \cdot (f_Z - 50) \right)}{50} - \right. \\
 & \left. \frac{\left( p_{L,CDM(50,50)} + \frac{p_{L,CDM(90,50)} - p_{L,CDM(50,50)}}{40} \cdot (f_Z - 50) \right)}{50} \right) \cdot (iq_Z - 50)
 \end{aligned} \tag{F.6}$$

For segment 3, the calculation results in:

$$\begin{aligned}
 p_{L,Z}(f_Z, iq_Z) = & \\
 & p_{L,CDM(0,25)} + \frac{p_{L,CDM(50,25)} - p_{L,CDM(0,25)}}{50} \cdot f_Z + \\
 & \left( \frac{\left( p_{L,CDM(0,50)} + \frac{p_{L,CDM(50,50)} - p_{L,CDM(0,50)}}{50} \cdot f_Z \right)}{25} - \right. \\
 & \left. \frac{p_{L,CDM(0,25)} + \frac{p_{L,CDM(50,25)} - p_{L,CDM(0,25)}}{50} \cdot f_Z}{25} \right) \cdot (iq_Z - 25)
 \end{aligned} \tag{F.7}$$

For segment 4, the calculation results in:

$$\begin{aligned}
 p_{L,Z}(f_Z, iq_Z) = & \\
 & p_{L,CDM(0,25)} + \frac{p_{L,CDM(50,25)} - p_{L,CDM(0,25)}}{50} \cdot f_Z + \\
 & \left( \frac{\left( p_{L,CDM(50,50)} + \frac{p_{L,CDM(90,50)} - p_{L,CDM(50,50)}}{40} \cdot (f_Z - 50) \right)}{25} - \frac{\left( p_{L,CDM(0,25)} + \frac{p_{L,CDM(50,25)} - p_{L,CDM(0,25)}}{50} \cdot f_Z \right)}{25} \right) \cdot (iq_Z - 25)
 \end{aligned} \tag{F.8}$$

### F.2.2.2 Numerical calculation for the requested operating point

The requested operating point at 75 % relative motor stator frequency and 80 % torque current is in segment 2. Consequently, Formula (F.6) applies. The resulting losses for this operating point are:

$$\begin{aligned}
 p_{L,Z}(75,80) &= 3,09 + \frac{3,45 - 3,09}{40} \cdot (75 - 50) + \\
 & \left( \frac{\left( 4,58 + \frac{5,91 - 4,58}{40} \cdot (75 - 50) \right)}{50} - \frac{\left( 3,09 + \frac{3,45 - 3,09}{40} \cdot (75 - 50) \right)}{50} \right) \cdot (80 - 50) \\
 &= 4,57
 \end{aligned} \tag{F.9}$$

The relative losses at 75 % relative motor stator frequency and 80 % relative torque are 4,57 %.

### F.2.3 Loss determination by the mathematical model described in Annex C

This way to determine the losses gives the best accuracy. However, it requires all technical parameters for Formulae (C.1) to (C.10) and (6). As this data is usually not available in the documentation of a CDM, this calculation method is mainly applicable for CDM providers.

In this calculation example, the parameter values of the evaluated CDM are as given in Table F.2.

**Table F.2 – Parameters of the example CDM**

Symbol	Description	Example CDM parameter values	Unit
$U_{T,th}$	Threshold voltage of the power transistor (IGBT)	1,0	V
$U_{T,r}$	On state voltage of the power transistor (IGBT) at rated CDM output current	2,6	V
$U_{D,th}$	Threshold voltage of the power diode	1,1	V
$U_{D,r}$	On state voltage of the power diode at rated CDM output current	2,7	V
$U_{D,th,rectifier}$	Threshold voltage of the rectifier power diode	0,9	V
$U_{D,r,rectifier}$	On state voltage of the rectifier power diode at rated CDM input current	2,0	V
$E_T$	Switching loss energy of the power transistor (IGBT) per volt and per ampere	$6,5 \times 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$
$E_D$	Switching loss energy of the power diode per volt and per ampere	$3,5 \times 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$
$U_{DC}$	Inverter DC link voltage	540	V
$f_{sw}$	Inverter switching frequency	4 000	Hz
$I_{cable}$	Motor cable current, relevant for increased switching losses	10	A
$k1_{choke}$	Choke impedance, relative to the nominal inverter impedance	0,03	
$k2_{choke}$	Relative voltage drop on the resistive part of the choke	0,25	
$\lambda$	Input power factor	0,7	
$k1_{DC\_link}$	Load independent DC link losses per rated ampere and volt square	$7 \times 10^{-7}$	$\frac{1}{\Omega \cdot A}$
$k2_{DC\_link}$	Load dependent DC link losses per ampere	1,7	$\Omega \cdot A$
$U_{rails}$	Voltage drop at ohmic conductor elements at rated CDM current	0,7	V
$k_{L,cooling}$	Factor for cooling losses	0,15	
$P_{L,control}$	Standby and control losses	45	W

The rated phase-to-phase input voltage of the example CDM is 400 V, its rated output current is 14,4 A. Linear interpolation in Table 1 at 80 % torque current calculates to a CDM output current of 83,2 % of the rated output current, resulting in 11,65 A. Linear interpolation at the same torque current in Table 2 gives a power factor of 0,81 at the inverter output.

With this data, the mathematical model described in 5.2 and Annex C can be calculated and gives the results in Table F.3.

**Table F.3 – Results of the CDM calculation according to the mathematical model**

Term	Formula	Losses	Unit
On state losses of one inverter transistor	(C.1)	10,8	W
On state losses of one inverter diode	(C.2)	2,72	W
Switching losses of one inverter transistor	(C.3)	13,9	W
Switching losses of one inverter diode	(C.4)	7,48	W
Output inverter total losses	(C.5)	209	W
Rectifier losses	(C.6)	46,8	W
Input choke losses	(C.7)	45,9	W
DC link losses	(C.8)	4,59	W
Current rail losses	(C.9)	6,98	W
Cooling losses	(C.10)	76,7	W
Overall absolute CDM losses	(5)	435	W
Overall relative CDM losses	(6)	4,37	%

As a conclusion, the relative losses of the example CDM will be determined with the two different evaluation methods to the values given in Table F.4.

**Table F.4 – Comparison of different loss evaluation methods**

Evaluation method	relative losses
Two-dimensional interpolation at neighbouring points	4,57 %
Mathematical model	4,37 %

### F.3 Loss determination of the motor

For the example PDS, the losses of an 7,5 kW example motor as specified by the motor provider are given in Table F.5.

**Table F.5 – Loss data of the 7,5 kW example motor**

$P_{rM}$	$P_{L, RM, \text{relative (25;25)}}$	$P_{L, RM, \text{relative (25;100)}}$	$P_{L, RM, \text{relative (50;25)}}$	$P_{L, RM, \text{relative (50;50)}}$	$P_{L, RM, \text{relative (50;100)}}$	$P_{L, RM, \text{relative (90;50)}}$	$P_{L, RM, \text{relative (90;100)}}$
kW	$P_{L7}$	$P_{L3}$	$P_{L6}$	$P_{L5}$	$P_{L2}$	$P_{L4}$	$P_{L1}$
7,5	3,73	5,1	4,66	4,98	6,94	6,31	9,6

In the first step, the interpolation coefficients  $c_{L1}$  to  $c_{L7}$  are calculated by Formulae (F.10) to (F.16), which are based on IEC 60034-2-3.

$$c_{L1} = -\frac{25}{156} \cdot 9,6 \% + \frac{529}{780} \cdot 6,94 \% - \frac{12}{65} \cdot 5,1 \% + \frac{25}{39} \cdot 6,31 \% - \frac{103}{39} \cdot 4,98 \% - \frac{56}{195} \cdot 4,66 \% + \frac{192}{65} \cdot 3,73 \% = -1,467 \% \quad (\text{F.10})$$

$$c_{L2} = \frac{25}{26} \cdot 9,6 \% - \frac{599}{390} \cdot 6,94 \% + \frac{112}{195} \cdot 5,1 \% - \frac{50}{13} \cdot 6,31 \% + \frac{50}{13} \cdot 4,98 \% + \frac{1792}{195} \cdot 4,66 \% - \frac{1792}{195} \cdot 3,73 \% = 14,63 \% \quad (\text{F.11})$$

$$c_{L3} = -\frac{50}{39} \cdot 9,6 \% + \frac{22}{13} \cdot 6,94 \% - \frac{16}{39} \cdot 5,1 \% + \frac{200}{39} \cdot 6,31 \% - \frac{200}{39} \cdot 4,98 \% - \frac{256}{39} \cdot 4,66 \% + \frac{256}{39} \cdot 3,73 \% = -14,92 \% \quad (\text{F.12})$$

$$c_{L4} = -\frac{50}{13} \cdot 9,6 \% + \frac{2542}{195} \cdot 6,94 \% - \frac{1792}{195} \cdot 5,1 \% + \frac{500}{13} \cdot 6,31 \% - \frac{50}{13} \cdot 4,98 \% - \frac{1792}{195} \cdot 4,66 \% + \frac{1792}{195} \cdot 3,73 \% = -5,419 \% \quad (\text{F.13})$$

$$c_{L5} = \frac{200}{39} \cdot 9,6 \% - \frac{152}{13} \cdot 6,94 \% + \frac{256}{39} \cdot 5,1 \% - \frac{200}{39} \cdot 6,31 \% + \frac{200}{39} \cdot 4,98 \% + \frac{256}{39} \cdot 4,66 \% - \frac{256}{39} \cdot 3,73 \% = 13,09 \% \quad (\text{F.14})$$

$$c_{L6} = -2 \cdot 6,94 \% + 10 \cdot 4,98 \% - 8 \cdot 4,66 \% = 11,94 \% \quad (\text{F.15})$$

$$c_{L7} = \frac{25}{39} \cdot 9,6 \% - \frac{181}{95} \cdot 6,94 \% + \frac{192}{65} \cdot 5,1 \% - \frac{25}{39} \cdot 6,31 \% - \frac{287}{39} \cdot 4,98 \% + \frac{1616}{195} \cdot 4,66 \% - \frac{192}{65} \cdot 3,73 \% = 7,682 \% \quad (\text{F.16})$$

In the second step, the motor losses in the operating point at 75 % speed and 80 % torque are calculated according to IEC 60034-2-3 according to Formula (E.4) as given in Formula (F.17)

$$p_{L,M}(75,80) = -1,467 \% + 14,63 \% \cdot 0,75 - 14,92 \% \cdot 0,75^2 - 5,419 \% \cdot 0,75 \cdot 0,8^2 + 13,09 \% \cdot 0,75^2 \cdot 0,8^2 + 11,94 \% \cdot 0,8 + 7,682 \% \cdot 0,8^2 = 7,86 \% \quad (\text{F.17})$$

#### F.4 Loss determination of the PDS

For the loss determination of the PDS, the absolute losses of the CDM and the motor are calculated:

$$P_{L,CDM}(75 \%, 80 \%) = p_{L,CDM}(75;80) \cdot S_{r,equ} = 0,0437 \cdot 9,95 \text{ kVA} = 435 \text{ W} \quad (\text{F.18})$$

$$P_{L,Mot}(75 \%, 80 \%) = p_{L,M}(75;80) \cdot P_{r,M} = 0,0786 \cdot 7,5 \text{ kW} = 590 \text{ W} \quad (\text{F.19})$$

The evaluated operating point is not at rated speed and torque of the PDS. Consequently, the factor  $k_{VD}$  does not apply. For the loss determination of the PDS, the losses of the PDS are calculated according to Formula (12):

$$P_{L,PDS}(75\%,80\%) = 435\text{ W} + 590\text{ W} = 1025\text{ W} \tag{F.20}$$

$$p_{L,PDS}(75\%,80\%) = \frac{1025\text{ W}}{7500\text{ W}} = 13,67\% \tag{F.21}$$

NOTE 1 The rated current of the motor is equal to CDM rated output current.

NOTE 2 Cosphi deviations between actual motor and test load for CDM are neglected.

### F.5 Determination of part load factors for SDIMs

In Table 4, part load factors  $P_{SDIM}/P_{CDMe,SDIM}$  are defined. In the following, the derivation of these factors is discussed exemplarily for the power range 1,29 kVA ... 7,94 kVA (0,75 kW ... 5,5 kW). There to, the test load factors given in Table 1 and corresponding test load displacement factors given in Table 2 are required.

Using Formula (10), the exact part load factors for the operating points  $(f_{op}, i_{op})$  can be calculated by

$$\frac{P_{SDIM}(f_{op},i_{op})}{P_{CDMe,SDIM}} = m(f_{op}) \frac{I_{out}(i_{op})}{I_{1,r,out}} \frac{\cos\Phi(f_{op},i_{op})}{\cos\Phi(90,100)} \tag{F.22}$$

The results are given in Table F.6, where for the operating points with zero speed, a modulation index of  $m(f_{op} = 0) = 0,1$  is used. This can be repeated for the remaining power ranges which finally results in the consolidated part-load factors defined in Table F.6.

**Table F.6 – Calculated part-load factors for SDIM part load operation points**

CDM operating point $(f_{op}; i_{op})$	$M(f_{op})$	$\frac{I_{out}(i_{op})}{I_{r,out}}$	$\cos\phi(f_{op},i_{op})$	Active SDIM power $\frac{P_{SDIM}}{P_{CDMe,SDIM}}$ %
(90; 100)	0,9	1	0,79	90 %
(50; 100)	0,5	1	0,79	50 %
(0; 100)	0,1	1	0,79	10 %
(90; 50)	0,9	0,71	0,6	48,5 %
(50; 50)	0,5	0,71	0,6	27 %
(0; 50)	0,1	0,71	0,6	5,4 %
(50; 25)	0,5	0,58	0,38	13,9 %
(0; 25)	0,1	0,58	0,38	2,8 %

## F.6 Application examples of reference losses and efficiency classes for modified functionality

### F.6.1 General

In the following examples, the application of correction factors for CDMs with modified function are provided.

### F.6.2 Example 1 – IE classification of an SDIM

The loss calculation and IE classification of an SDIM with the following characteristic is shown:

- SDIM, regenerative,  $I_{\text{SDIM,out}} = 70 \text{ A}$ ,  $U_{\text{nom}} = 400 \text{ V}$  ( $U_{\text{DC}} = 540 \text{ V}$ );
- $\text{THD}_1 < 10 \%$ ;
- Input filter included.

#### a) Selection of correct reference CDM

In a first step, the correct reference CDM needs to be determined. Thereto, the apparent power of the SDIM is calculated

$$S_{r,\text{SDIM}} = U_{\text{DC}} I_{\text{SDIM,out}} = 540 \text{ V} \cdot 70 \text{ A} = 37,8 \text{ kVA} \quad (\text{F.23})$$

where

$U_{\text{DC}}$  is the DC link voltage of the SDIM;

$I_{\text{SDIM,out}}$  is the the SDIM output current.

The reference CDM is selected according to Table 6 to 38,2 kVA.

#### b) Select correction factor

According to Table 8, the correction factor for a low-harmonic SDIM with regenerative capability is  $k_{\text{cf}} = 0,5$ .

Using Table 7, the losses of the reference CDM in the operation point (90;100) can be read to  $p_{\text{L,RCDM,(90;100)}} = 4,87 \%$ .

By application of formula (15), the reference losses for this SDIM can be calculated by

$$p_{\text{L,RSDIM(90\%;100\%)}} = (k_{\text{cf}} + 1) \cdot p_{\text{L,RCDM(90\%;100\%)}} = (0,5 + 1) \cdot 4,87 \% = 7,31 \% \quad (\text{F.24})$$

#### c) Determine IE Class

The IE Class of this SDIM can be determined by comparing the losses of this SDIM with the calculated reference losses  $p_{\text{L,RSDIM(90;100)}}$ .

### F.6.3 Example 2 – IE classification of an SDOM

In this example, the IE classification of an SDOM with the following characteristic is discussed:

- SDOM,  $I_{\text{nom}} = 45 \text{ A}$ ,  $U_{\text{nom}} = 400 \text{ V}$ ;
- No output filter.

## a) Selection of correct reference CDM

In a first step, the correct reference CDM needs to be determined. Thereto, the apparent power of the SDOM is calculated:

$$S_{r,SDOM} = \sqrt{3}U_{r,out}I_{r,out} = \sqrt{3} 400 \text{ V } 45 \text{ A} = 31,2 \text{ kVA} \quad (\text{F.25})$$

The reference CDM is selected according to Table 7 to 38,2 kVA.

## b) Select correction factor

According to Table 8, the correction factor for an inverter stage without output filter is  $k_{cf,I} = -0,25$ .

Using Table 7, the relative losses of the reference CDM in the operation point (90;100) can be read to  $p_{L,RCDM,(90;100)} = 4,87 \%$ .

By application of Formula (15), the reference losses for the SDOM can be calculated by

$$p_{L,RSDOM(90\%;100\%)} = (k_{cf} + 1) \cdot p_{L,RCDM(90\%;100\%)} = (-0,25 + 1) \cdot 4,87 \% = 3,65 \% \quad (\text{F.26})$$

## c) Determine IE Class

The IE Class of the SDOM can be determined by comparing the SDOM losses with the calculated reference losses  $p_{L,RSDOM(90;100)}$ .

#### F.6.4 Example 3 – IE classification of a CDM with regenerative capability and sinewave output filter

In this example the IE classification of a CDM with the Regenerative capability and sinewave output filter is shown:

- CDM,  $I_{nom} = 55 \text{ A}$ ,  $U_{nom} = 400 \text{ V}$ ;
- regenerative capability ( $THD_1 > 10 \%$ );
- sinewave output filter.

## a) Selection of correct reference CDM

In a first step, the correct reference CDM needs to be determined. Thereto, the apparent power of the CDM is calculated

$$S_{r,CDM} = \sqrt{3}U_{r,out}I_{r,out} = \sqrt{3} 400 \text{ V } 55 \text{ A} = 38,1 \text{ kVA} \quad (\text{F.27})$$

The reference CDM is selected according to Table 7 to 38,2 kVA.

## b) Select correction factor

According to Table 8, the correction factor for regenerative capability with a  $THD_1 > 10 \%$  is  $k_{cf1} = 0,4$  and the correction factor for a sinewave output filter is  $k_{cf2} = 0,8$ .

Using Table 7, the losses of the reference CDM in the operation point (90;100) can be read to  $p_{L,RCDM,(90;100)} = 4,87 \%$ .

By application of Formula (15), the reference losses for the SDOM can be calculated by

$$\begin{aligned} p_{L,RCDM,m(90\%;100\%)} &= (k_{cf1} + k_{cf2} + 1) \cdot p_{L,RCDM(90\%;100\%)} \\ &= (0,4 + 0,8 + 1) \cdot 4,87\% = 10,71\% \end{aligned} \tag{F.28}$$

c) Determine IE Class

The IE Class of the CDM can be determined by comparing the CDM losses with the modified reference losses  $p_{L,RCDM,m(90;100)}$ .

## Annex G (informative)

### Uncertainty of loss determination method

#### G.1 General

The uncertainty of loss determination method can be specified with a fault tolerance power losses  $\Delta P_L$ . The intention is to denote the power loss as  $P_L = P_{L,\text{determined}} + \Delta P_L$ . To calculate the uncertainty, knowledge of all tolerances of the utilized determination method is mandatory. Tolerances can be specified in percent in dependence on the measured value or absolute. During calculation of losses, several factors influence the result. Thus, error propagation needs to be considered.

#### G.2 Calculation of uncertainty at randomly occurring errors

For uncertainty calculation under a randomly occurring error assumption, the standard deviation is demanded. Here, function  $y$  represents power loss of CDM or PDS and function  $y$  is depending on factors  $x_i$ . For the standard deviation  $s_y$  under randomly occurring errors and independent factors  $x_i$  with standard deviations  $s_i$ , it is:

$$s_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} s_i \right)^2} \quad (\text{G.1})$$

Here, it is considered that both positive and negative deviations can occur. Thus, for the relative standard deviation, it is

$$\Delta p_L = \frac{\Delta R_L}{R_L} = \frac{s_y}{y} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} s_i \right)^2}}{y} \quad (\text{G.2})$$

#### G.3 Comparison of uncertainties for different loss determination methods

With lower losses, the uncertainty of the input output loss determination method increases, because a small number (losses) is calculated by subtraction of two much larger numbers (input and output power). In this case, measurement equipment is to be selected very carefully.

For relative losses below, for example, 3 %, calculations can achieve the same or even better accuracy than input output measurements.

Calorimetric measurements allow a high accuracy even at low losses. However, the effort for this loss determination method is highest.

## Annex H (informative)

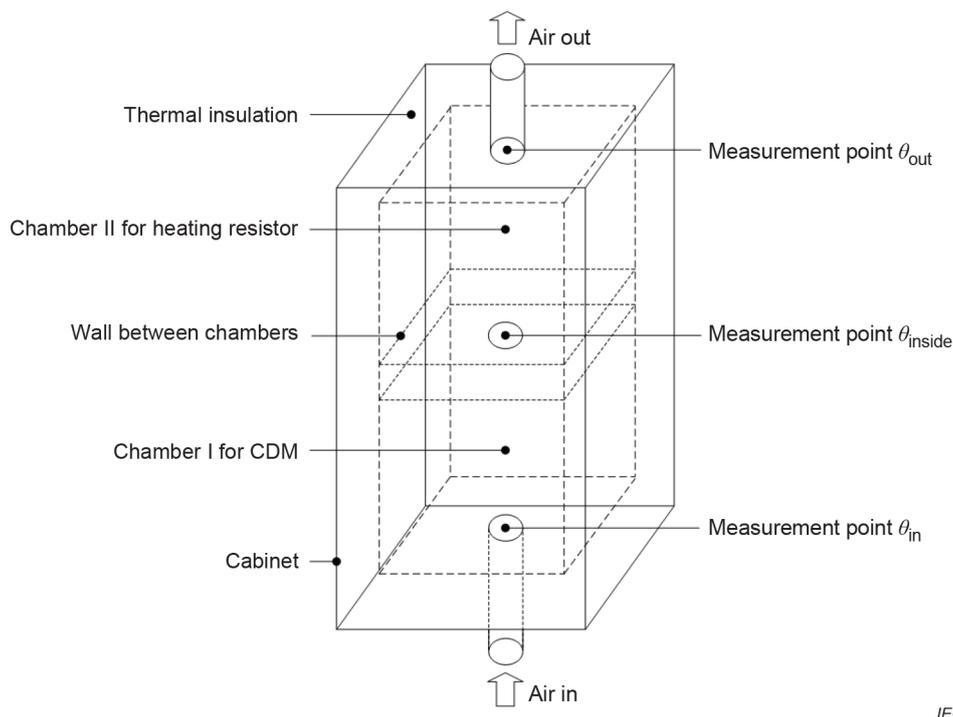
### Calorimetric measurement for CDM losses

#### H.1 General

The calorimetric determination method of the power losses is based on the calorimetric measurement of the dissipated power losses. Measurements shall be done at thermal equilibrium and the component to be measured needs to be thermally isolated to guarantee conduction of the dissipated power losses by the cooling medium (air or water). In Clauses H.2 to H.4, three different types of methods are explained.

#### H.2 Calorimeter with two chambers with air as a cooling medium

With the first method, the loss measurement can be carried out in one-phase measurement procedure. Overview of calorimetric test setup is described in Figure H.1. Setup consists of thermally insulated cabinet with two chambers: chamber one is for CDM to be measured and chamber two for the heating resistor. This method requires CDM to be measured and the heating resistor for the calibration to be in the same airflow, and the flow resistance in all test sections shall be equal. Under these conditions, and due to the simultaneity of the measurements, the physical conditions are equal.



IEC

**Figure H.1 – One-step calorimetric measurement setup for comparative loss measurement (CDM and heating resistor are loaded simultaneously)**

From the temperature at the inlet and outlet of the cooling medium to be measured, and between CDM and heating resistor for calibration of its absorbing power loss, the power dissipation can be determined. Power dissipation of measured CDM can be determined by measuring three temperatures and the power of the heating resistor. Heating resistor is supplied by power source with power measurements. All measurements shall be done when thermal equilibrium has been achieved.

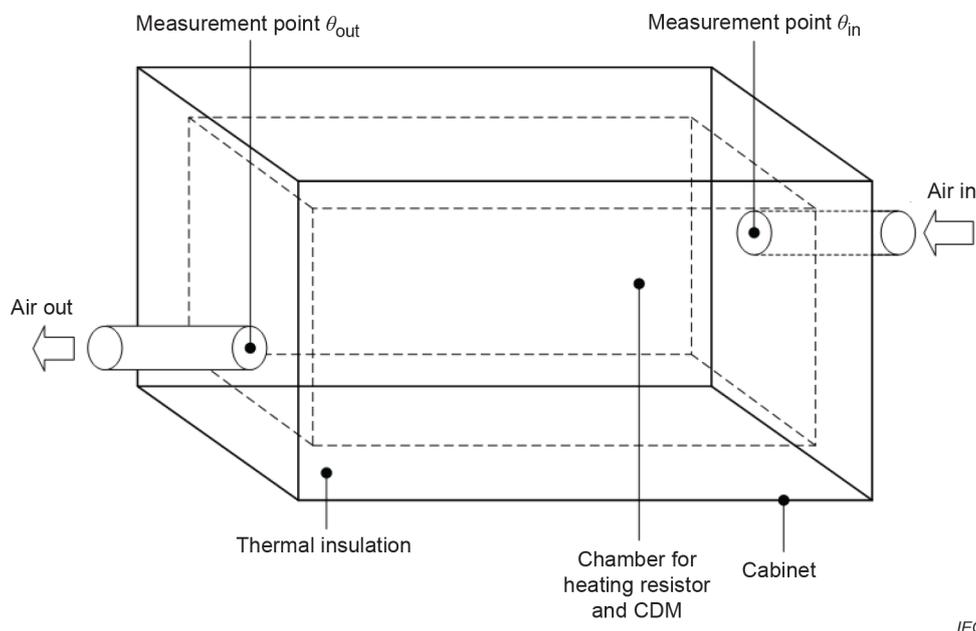
$$R_{L,CDM,determined} = R_{L,resistor} \frac{\theta_{inside} - \theta_{in}}{\theta_{out} - \theta_{inside}} \tag{H.1}$$

A variance in air speed, air pressure and air temperature as well as ambient temperature might have an effect on accuracy of the results. It is obvious that the mains voltage is not a constant during measurements. Due to that, some variations will happen in CDM losses. This effect is one of the error sources in this method as well as in other measurements where system is supplied from the uncontrolled mains.

### H.3 Calorimeter with one chamber with air as a cooling medium

An alternative calorimetric measurement setup is described in Figure H.2. This setup consists of a thermally insulated cabinet with only one chamber. Both CDM to be measured and the heating resistor for the calibration are located in the same chamber. CDM and resistor are in the same air flow. Two-step setup means that in first step the CDM to be measured is loaded, and the speed of airflow and temperatures are recorded in thermal equilibrium. In second step, the recorded speed of airflow is applied and the heating resistor is loaded so that exactly the same thermal equilibrium as in first step can be achieved. Power dissipation of CDM can be determined from the measured power of heating resistor. Power loss Formula (H.1) assumes that speed of air flow and temperatures in inlet and outlet are exactly the same in both measuring steps.

$$R_{L,CDM,determined} = R_{L,resistor} \tag{H.2}$$



**Figure H.2 – Two-step calorimetric measurement setup for comparative loss measurement (CDM and heating resistor are not loaded simultaneously)**

A variance in air speed, air pressure and air temperature as well as ambient temperature might have an effect on accuracy of the results. It is obvious that the mains voltage is not a constant during measurements. Due to that, some variations will happen in CDM losses. This effect is one of the error sources in this method as well as in other measurements where system is supplied from the uncontrolled mains.

#### H.4 Calorimeter with liquid as a cooling medium

A calorimetric measurement setup with liquid as a cooling medium is described in Figure H.3. This setup consists of a thermally insulated cabinet with one chamber. Inside the chamber, there is a cooler which is used to transfer heat power generated by CDM. In the measurement, the CDM to be measured is loaded, and the volumetric flow rate of liquid and temperatures are recorded in thermal equilibrium. Power dissipation of CDM can be determined according to Formula (H.3):

$$P_{L,CDM,determined} = Q_{cooler} \cdot \rho_{liquid} \cdot c_{liquid} \cdot (\theta_{out} - \theta_{in}) \quad (H.3)$$

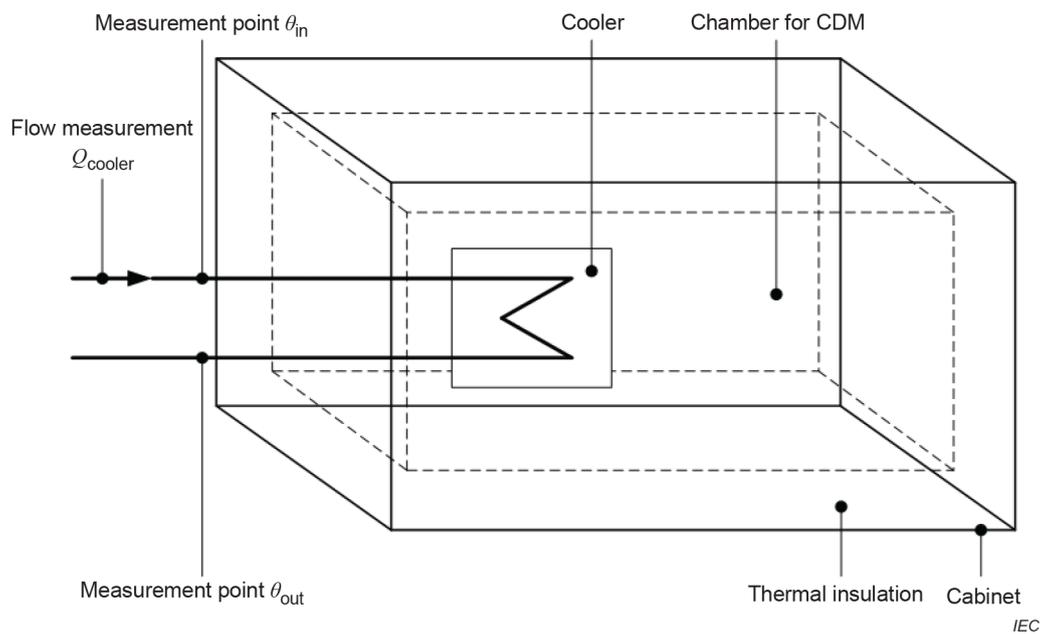


Figure H.3 – Liquid cooled calorimetric measurement setup for CDM loss measurement

## **Annex I** (informative)

### **PDS loss calculation above rated speed and torque**

#### **I.1 General**

A motor can be operated above rated speed and/or torque. This raises the question whether it is possible to calculate the PDS losses in these operating points from the loss data of CDM and motor in the operating points according to Figure 5 and Figure 6.

#### **I.2 Operating points above rated torque**

Operating points above rated torque of the CDM or PDS will require a motor current above its rated value. Consequently, it will only be possible to operate the PDS and CDM in these operating points for a short time period. For the overall losses, this short period will have a minor impact.

In servo applications, there are sections with a fixed duty cycle with a small time fraction in overload condition, followed by a large time fraction with reduced torque. However, servo applications are out of the scope of this document, because they are a special application and their energy consumption needs to be calculated in a different way, for example by taking into account the inertia of the load machine.

Measurements of losses during overload condition are very critical, as they may destroy the equipment under test (EUT). They could only be done in short time. Calorimetric loss determination, however, is not possible when operating the EUT for a short time. Even direct measurements require some amount of measurement time (up to 1 min according to IEC 60034-2-3). Therefore, measurement of several or single overload points could be impossible without exceeding thermal limitations of PDS. Calculations could be made, but their value is limited if no validation by a measurement is possible. In addition, physical effects like increased temperature of semiconductors and copper elements increase the calculation uncertainty.

As a summary, loss determination for torque values above rated torque is not recommended.

#### **I.3 Operating points above rated speed**

##### **I.3.1 General**

Annex E describes three ways of motor connection with two operating ranges for each type of motor connection. As long as the operating range is in range a of Annex E (constant flux), the CDM losses can be calculated according to Clause F.2. The rated motor stator frequency is the maximum frequency in range a. The PDS losses can be calculated according to Clause F.4.

For the range b of Annex E (field weakening range), the following applies.

##### **I.3.2 Dependency of motor losses on the CDM performance**

In the field weakening range, the CDM will provide a fundamental voltage to the motor which is as high as possible. High sophisticated algorithms are implemented in the control software of the CDM to increase the fundamental output voltage even for a few volts. Any reduction in fundamental output voltage will need to be compensated by increased motor current, leading to significantly higher motor losses. In addition, the harmonic content of the motor current will depend on control algorithms in the CDM in the operating point of maximum output voltage.

The amount of fundamental output voltage of the CDM will not only depend on the control algorithms of the motor inverter part of the CDM, but also on the amount of the DC link voltage. The amount of the DC link voltage is a feature of the line rectifier of the CDM, which may be a part of the same unit that also includes the motor inverter, but line rectifier and motor inverter could also be implemented as separate units.

### I.3.3 Dependency of CDM on the motor performance

In operating points in the field weakening range, the amount of current required by a motor strongly depends on its design. In this operating range, it is not generally possible to define a test motor as done in 5.1 for the base speed range. The expected difference in current between different motors increase with speed and can exceed the accuracy targets for loss determination.

### I.3.4 PDS loss calculation in the field weakening range up to 200 % of rated speed

For a limited speed range up to 200 % of rated, the effects described in I.3.2 are small enough to be neglected. In this case, the motor losses can be calculated according to range b of Annex E for the range b.

In the field weakening range, the CDM losses do not depend on the speed of the motor, because the CDM output voltage is at its maximum voltage and the output phase angle between fundamental CDM output voltage and current is constant in a first order approximation. The only variable is the CDM output current  $I_{\text{out}}(n_{\text{op}}, T_{\text{op}})$ , which can be calculated according to Formulae (E.6) and (E.7) depending on the type of the motor connection. The CDM losses are identical to the losses at 90 % rated output frequency and that CDM output current.

This allows calculating the PDS losses  $p_{\text{L,PDS}}(n_{\text{op}}, T_{\text{op}})$  in the field weakening range up to 200 % of rated speed at the operating point  $(n_{\text{op}}, T_{\text{op}})$  using the following steps.

- a) Calculate the relative torque current  $i_{\text{op}}$  at the speed torque operating point  $(n_{\text{op}}, T_{\text{op}})$ :

$$i_{\text{op}} = \frac{I_{\text{out}}(n_{\text{op}}, T_{\text{op}})}{I_{\text{r,M}}} \quad (1.1)$$

- b) Determine the CDM losses according to Clause F.2 at 90 % motor stator frequency and the CDM output current according to step 1) given in Formula (1.1) using Formula (1.2):

$$P_{\text{L,CDM}}(n_{\text{op}}, T_{\text{op}}) = P_{\text{L,CDM}}(90, i_{\text{op}}) \cdot S_{\text{r,CDM}} \quad (1.2)$$

- c) Calculate the motor losses  $P_{\text{L,M}}(n_{\text{op}}, T_{\text{op}})$  in the operating point  $(n_{\text{op}}, T_{\text{op}})$  according to Annex E.

- d) Calculate the relative PDS losses  $p_{\text{L,PDS}}(n_{\text{op}}, T_{\text{op}})$  using Formula (1.3).

$$p_{\text{L,PDS}}(n_{\text{op}}, T_{\text{op}}) = \frac{P_{\text{L,CDM}}(n_{\text{op}}, i_{\text{op}}) + k_{\text{VD}} \cdot P_{\text{L,M}}(n_{\text{op}}, T_{\text{op}})}{P_{\text{r,M}}} \quad (1.3)$$

## Annex J (informative)

### Explanation for correction factors for the reference losses in Table 8

#### J.1 General

It is the purpose of Annex J to explain how the correction factors in Table 8 have been derived from a product specific standpoint.

Furthermore, it also gives the reasoning why certain topologies, apart from their products specifics, are to be granted such correction factors by their impact on the overall system level efficiency.

Annex J does not have any impact on the evaluation of products. If certain functions are achieved in a different way, the correction factors from Table 8 remain unchanged.

#### J.2 CDM

##### J.2.1 CDM without regenerative capability

###### J.2.1.1 CDM with $THD_1 > 60\%$

The reference CDM in 6.2 and Annex C is based on an input stage with diode rectifier and line choke that reduces  $THD_1$  to  $< 60\%$  (see Figure 11). If no line choke is used,  $THD_1$  is  $> 60\%$ , but CDM losses are lower. In the example CDM in Table F.3, the input choke losses are about 10 % of the overall CDM losses.

This leads to a correction factor for the reference losses of  $-0,1$ .

This reference CDM is primarily used in machinery applications, where the overall compliance to relevant harmonic standards is handled with a central solution for the whole machine. Thus they would not be allowed to be connected directly to the public grid and do normally not impose additional losses upstream to the machine. The correction factors represent the technical justified correction.

###### J.2.1.2 CDM with $10\% < THD_1 \leq 60\%$

This is the reference CDM in 6.2 and Annex C. Consequently, there is no correction of the reference losses, and the correction factor is 0.

###### J.2.1.3 CDM with $THD_1 \leq 10\%$

To reach this low value of  $THD_1$ , an active input stage (see Figure B.5) and/or a large passive line harmonics input filter (see Figure B.3) is necessary. The losses of the non-regenerative active input stage are evaluated as follows.

- The losses of the semiconductors are similar to the losses of the output converter of the CDM, which are about 50 % of the CDM losses (see Table F.3).
- The losses of the line filter for the active input stage creates about 30 % of the RCDM losses, as this filter needs at least a choke comparable to the line choke of the RCDM (10 % of RCDM losses according to Table F.3) and also causes 20 % of additional losses due to the capacitive filter current.

Summing up, this leads to about 80 % of additional losses and a correction factor of 0,8.

The correction factor also recognizes the fact that CDMs with an improved harmonic performance probably have higher individual losses compared to the reference CDM as outlined above to achieve a better harmonics performance. The improved harmonic performance lowers the losses in the overall system, by reducing losses in transformers, generators, directly connected motors and cables connected to the same system.

For the sake of applicability of IEC 61800-9-2, there has been no differentiation made for different levels of  $THD_1$  below 10 %. Still, it is worth mentioning that CDMs operating at 3 % to 5 %  $THD_1$  will cause lower system losses compared to a CDM operating with 6 % to 10 %  $THD_1$ .

## **J.2.2 CDM with regenerative capability**

### **J.2.2.1 CDM with regenerative capability and $THD_1 > 10$ %**

In regenerative mode, the input stage uses power transistors instead of diodes, which adds on-state losses and a low amount of switching losses due to a switching frequency close to the fundamental frequency. These semiconductor losses are about 30 % of the RCDM losses instead of the 10 % rectifier losses (see Table F.3) for the RCDM.

Besides, a larger filter choke than for the RCDM is required, which causes about 20 % higher losses than the choke of the RCDM additional losses.

This leads to an overall correction factor of 0,4.

The correction factor recognizes also that, by being able to regenerate, the total energy budget of, for example, crane or winding applications, will be reduced significantly.

### **J.2.2.2 CDM with regenerative capability and $THD_1 \leq 10$ %**

This topology is very close to the topology described in J.2.1.3. Compared to that topology, the losses are slightly higher because all semiconductors have to be rated for the rated current in regenerative direction. The input filter needs to be larger as well, because in regenerative direction, the input filter requires additional damping elements to avoid oscillations with the mains.

This leads to an overall correction factor of about 1,0.

The correction factor recognizes two facts.

First, as outlined above, the CDMs with an improved harmonic performance probably have higher individual losses compared to the RCDM as outlined above to achieve the better harmonics performance. However, the improved harmonic performance lowers the losses in the overall system, by reducing losses in transformers, generators, and directly connected motors and cables connected to the same system.

For the sake of applicability of this document, there has been no differentiation been made for different levels of THD below 10 %. Still, it is worth mentioning that CDM operating at 3 % to 5 %  $THD_1$  will operate with lower system losses compared to a CDM operating with 6 % to 10 %  $THD_1$ .

The correction factor secondly recognizes also that, by being able to regenerate, the total energy budget of, for example, crane or winding applications, will be reduced significantly.

### **J.2.3 CDM with $DF_U \leq 10\%$**

This functionality requires a topology with a sinewave filter at the CDM output (see Figure B.11). In order to achieve an acceptable filter size, such CDMs operate at a significantly higher switching frequency, which increases the output inverter losses of 50 % in Table F.3.

In addition, as described in J.2.1.3, the filter itself creates losses and additional filter currents, which lead to additional 30 % of losses.

As a result, a CDM with a sinusoidal output voltage requires a correction factor of 0,8.

The correction factors recognizes that this topology will reduce the output cable and motor losses by a significant amount. It also allows the use of unscreened cables and reduces the leakage current in the motor cables.

### **J.2.4 CDM with a rated input voltage $\leq 250\text{ V}$ (three phase)**

CDMs with a lower rated input voltage require higher current to achieve the same apparent output power. Higher current increases the on-state losses of all semiconductors, the losses in current rails and the losses in passive components, in particular in chokes.

To accommodate these higher losses, a correction factor of 0,5 is introduced.

This correction factor recognizes that CDM are installed in existing networks with their typically defined network voltage which will cause increased losses due to increased currents.

### **J.2.5 CDM with single phase input**

#### **J.2.5.1 Rated input voltage $> 250\text{V}$**

For single phase CDMs, input currents per phase are higher compared to three phase. Therefore, currents on power semiconductors at the rectifier section are higher and thus also conductive losses are higher. In addition, the ripple current in the DC link capacitor is higher, which also causes higher losses.

This leads to a correction factor of 0,2.

This correction factor recognizes that CDM are installed in existing networks with their typically defined network topologies and voltage which will cause increased losses due to increased currents.

#### **J.2.5.2 Rated input voltage $\leq 250\text{ V}$**

This is a similar situation than for a three phase CDM with input voltage  $\leq 250\text{V}$ . The combination of single phase and voltage below 250 V does lead to slightly higher losses than with three phases below 250 V.

This leads to a correction factor of 0,6.

This correction factor recognizes that CDM are installed in existing networks with their typically defined network topologies and voltage which will cause increased losses due to increased currents.

### J.3 SDIM and SDOM

#### J.3.1 General

If the function of a CDM is composed of two separate components – an SDIM and an SDOM –, then sum of the losses of the SDIM and the SDOM is higher compared to the single component CDM's losses. There is a baseline of losses per component (e. g. control losses and cooling losses), which appear twice in case of a combination of two components. In addition, the DC link is available in both submodules and causes consequently higher losses compared to a CDM.

As a consequence, the addition of correction factors of an SDIM with special functionality and a SDOM is always slightly higher than the correction factors of an CDM with a similar functionality.

#### J.3.2 SDIM without regenerative capability

##### J.3.2.1 $10 \% < THD_1 \leq 60 \%$

This topology is based on a diode rectifier with line choke, as it is included in the reference CDM of 6.2 and Annex C (see Figure B.4). For a CDM, the losses of the input stage are considered to be about one third of the total losses of the CDM (see Table F.3). However, if a CDM is combined by an SDIM and SDOM, losses are slightly higher because of the baseline losses described above.

This leads to a correction factor of  $-0,55$ .

##### J.3.2.2 $THD_1 > 60 \%$ (high harmonic)

Compared to the topology of SDIM with  $10 \% < THD_1 > 60 \%$  in J.3.2.1, no line choke is considered for high harmonic SDIM. This is similar to CDM with high harmonic compared to reference CDM.

This leads to a correction factor of  $-0,65$ .

##### J.3.2.3 $THD_1 \leq 10 \%$ (low harmonic)

To reach this low value of  $THD_1$ , additional input function and filtering is necessary. This topology is comparable to J.2.1.3, with the output inverter missing.

This leads to a correction factor of  $0,35$ .

#### J.3.3 SDIM with regenerative capability

##### J.3.3.1 $THD_1 > 10 \%$

This topology is similar to the topology described in J.2.2.1, with the output inverter missing. The schematic of this topology is shown in Figure B.5, with the transistors switching at a low frequency close to the fundamental frequency.

This leads to a correction factor of  $-0,1$ .

##### J.3.3.2 $THD_1 \leq 10 \%$

This topology is similar to the topology described in J.2.2.2, with the output inverter missing. Its basic structure is shown in Figure B.5, with the transistors switching at a high frequency of several kHz.

This leads to a correction factor of 0,5.

### **J.3.4 SDOM**

#### **J.3.4.1 $DF_U > 10\%$**

A general purpose SDOM without special functionality shows the topology of the RCDM in 6.2 and Annex C (see Figure 11) with the input choke and input rectifier missing. The basic topology is shown in Figure B.10. According to Table F.3, these parts of the CDM cause 20 % of the RCDM losses.

Consequently, the correction factor for a general purpose SDOM is set to –0,2.

#### **J.3.4.2 $DF_U \leq 10\%$**

The basic topology of this SDOM is shown in Figure B.11. It is similar to the topology described in J.2.3, with the input choke and input rectifier missing.

The correction factor for this SDOM is set to 0,35.

### **J.4 CDM, SDIM and SDOM with external cooling**

In the RCDM of 6.2 and Annex C, cooling losses are set to 20 %. So, if a CDM is without cooling, the losses for cooling are not included.

This leads to a correction factor of –0,2 for CDM.

For SDIM and SDOM, the correction factor is set to –0,1.

### **J.5 CDM and SDOM with multiple AC outputs**

In a CDM or SDOM with multiple outputs as described in 6.3.3, the cooling system or the control electronics are designed to manage the whole system. It is not likely that all of these functions are active if only a few of the outputs are used. Therefore, some additional losses shall be included.

This leads to a correction factor of 0,1 for CDM and 0,05 for SDOM.

## Bibliography

IEC 60034 (all parts), *Rotating electrical machines*

IEC TS 60034-25, *Rotating electrical machines – Part 25: AC electrical machines used in power drive systems – Application guide*

IEC 60034-30, *Rotating electrical machines – Efficiency classes*

IEC 60146-1-1, *Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-1: Specification of basic requirements*

IEC 60947-4-2, *Low-voltage switchgear and controlgear – Part 4-2: Contactors and motor-starters – Semiconductor motor controllers, starters and soft-starters*

IEC 61800-1, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 1: General requirements – Rating specifications for low voltage adjustable speed DC power drive systems*

IEC 61800-2, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 2: General requirements – Rating specifications for adjustable speed AC power drive systems*

IEC 61800-3, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 3: EMC requirements and specific test methods for PDS and machine tools*

IEC 61800-5-1, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 5-1: Safety requirements – Electrical, thermal and energy*

IEC TS 61800-8:2010, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 8: Specification of voltage on the power interface*

IEC 61800-9-1, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 9-1: Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications – General requirements for setting energy efficiency standards for power driven equipment using the extended product approach (EPA) and semi analytic model (SAM)*

IEC TS 62578:2015, *Power electronics systems and equipment – Operation conditions and characteristics of active infeed converter (AIC) applications including design recommendations for their emission values below 150 kHz*

IEEE 112, *Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*

CSA 838-13, *Energy efficiency test methods for three-phase variable frequency drive systems*

---

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS .....	142
INTRODUCTION.....	145
1 Domaine d'application .....	146
2 Références normatives .....	147
3 Termes, définitions et symboles .....	148
3.1 Termes et définitions .....	148
3.2 Symboles .....	153
4 Rendement du PDS, du CDM de référence (RCDM) et du moteur de référence (RM)...	162
4.1 Généralités .....	162
4.2 Points de fonctionnement de référence du PDS/RCDM/RM et pertes associées .....	163
4.3 Combinaison des pertes du PDS avec l'équipement entraîné – Flux de travaux pour le modèle semi-analytique (SAM) .....	165
4.4 Classes IE des moteurs alimentés par le réseau .....	167
4.5 Classes IE des moteurs alimentés par des convertisseurs .....	167
4.6 Classes IE des convertisseurs de fréquences (modules d'entraînement complets, CDM) .....	168
4.7 Classes IES d'un PDS .....	168
4.8 Cohérence des classes IE et IES .....	168
4.9 Détermination de la classe IES d'un PDS à l'aide de dispositifs "de référence" et "d'essai" et recommandations à l'attention des fournisseurs.....	169
5 Détermination par calcul des pertes du CDM, du moteur et du PDS.....	170
5.1 Généralités .....	170
5.2 Pertes du CDM .....	171
5.2.1 Procédure générale et définition du CDM et de la charge d'essai .....	171
5.2.2 Pertes globales du CDM .....	173
5.2.3 Détermination des pertes des CDM formés par combinaison de sous-modules.....	175
5.2.4 Validation de la méthode de calcul des pertes .....	176
5.3 Pertes du moteur .....	177
5.3.1 Généralités .....	177
5.3.2 Pertes supplémentaires dues aux harmoniques des moteurs asynchrones triphasés alimentés par un CDM .....	177
5.3.3 Données relatives aux pertes du moteur .....	178
5.4 Pertes d'entraînement électrique de puissance (PDS).....	178
5.4.1 Pertes du PDS.....	178
5.4.2 Pertes du PDS à différentes fréquences de commutation.....	179
5.5 Pertes du PDS pour le fonctionnement en récupération .....	180
5.6 Pertes des démarreurs de moteurs .....	181
6 Limites des classes IE et IES.....	181
6.1 Généralités .....	181
6.2 CDM .....	182
6.3 Facteurs de correction pour les CDM à fonctionnalité modifiée .....	184
6.3.1 Généralités .....	184
6.3.2 Facteurs de correction .....	185
6.3.3 Concept de détermination des pertes et des pertes de référence pour les CDM et les SDOM avec plusieurs sorties à courant alternatif .....	186
6.4 Moteur .....	188

6.5	PDS .....	188
7	Détermination des pertes .....	189
7.1	Généralités .....	189
7.2	Essais de type du CDM ou du SDM pour la classification IE .....	190
7.3	Essais de type du PDS pour la classification IES .....	191
7.4	Détermination des pertes par calcul .....	192
7.4.1	Pertes calculées du CDM ou SDM .....	192
7.4.2	Calcul des pertes des PDS .....	192
7.5	Détermination des pertes par mesurage à l'entrée-sortie .....	192
7.5.1	Instrumentation .....	192
7.5.2	Conditions d'essai .....	193
7.5.3	Mesurage des pertes à l'entrée-sortie du CDM .....	195
7.5.4	Mesurage des pertes à l'entrée-sortie du SDIM .....	197
7.5.5	Mesurage des pertes à l'entrée-sortie du SDOM .....	198
7.5.6	Mesurage des pertes à l'entrée-sortie du PDS .....	199
7.6	Mesurage calorimétrique des pertes du CDM .....	202
7.7	Organigrammes des procédures d'essai .....	202
8	Exigences relatives à la documentation de l'utilisateur .....	205
8.1	Généralités .....	205
8.2	Informations destinées à la sélection .....	206
8.3	Informations destinées à la détermination de la classification de l'efficacité énergétique .....	206
8.4	Informations destinées à la détermination des pertes d'énergie supplémentaires et des conditions de charge partielle .....	206
8.4.1	Généralités .....	206
8.4.2	Pertes en conditions de charge partielle .....	207
8.4.3	Pertes des accessoires et options .....	207
8.4.4	Pertes en mode veille .....	207
8.4.5	Mode de récupération .....	207
8.4.6	Caractéristiques et facteurs de correction .....	207
Annexe A (informative) Pertes du RCDM et exemple de détermination des limites de classe IES .....		208
A.1	Tableaux des pertes relatives .....	208
A.2	Calcul des pertes relatives pour les classes IES .....	209
A.2.1	Généralités .....	209
A.2.2	Détermination des pertes relatives du CDM .....	209
A.2.3	Détermination des pertes relatives du moteur .....	210
A.2.4	Somme des pertes relatives du PDS .....	210
Annexe B (informative) Description des éléments d'un produit étendu utilisant un PDS par rapport à leur impact sur les pertes .....		211
B.1	Généralités .....	211
B.2	Pertes dans le câblage de réseau et la section d'alimentation .....	211
B.3	Filtre d'entrée .....	213
B.3.1	Filtre EMI à haute fréquence .....	213
B.3.2	Filtres antiharmoniques à basse fréquence .....	213
B.4	Convertisseur d'entrée .....	214
B.4.1	Généralités .....	214
B.4.2	Redresseur à diodes .....	214
B.4.3	Convertisseur à alimentation active .....	215

B.4.4	Facteur de puissance du convertisseur d'entrée .....	216
B.4.5	Sous-module d'entrée d'entraînement (SDIM).....	217
B.5	Liaison à courant continu .....	218
B.6	Onduleur de sortie .....	219
B.6.1	Généralités .....	219
B.6.2	Sous-module de sortie d'entraînement (SDOM) .....	220
B.7	Filtre de sortie et câbles de moteur .....	220
B.7.1	Généralités .....	220
B.7.2	Filtres sinusoïdaux .....	221
B.7.3	Filtres $dI/dt$ et bobines d'arrêt de moteur .....	222
B.7.4	Filtres de moteur EMI à haute fréquence .....	222
B.7.5	Câbles de moteur .....	222
B.8	Moteur .....	223
B.9	Charge mécanique .....	223
B.10	Pertes de commande et pertes en veille.....	223
B.11	Pertes de refroidissement .....	223
B.11.1	Pertes de refroidissement principal .....	223
B.11.2	Pertes de refroidissement secondaire .....	224
Annexe C (informative)	Modèle mathématique pour les pertes du CDM .....	225
C.1	Généralités .....	225
C.2	Pertes de l'onduleur de sortie .....	225
C.2.1	Généralités .....	225
C.2.2	Pertes des transistors à l'état passant .....	225
C.2.3	Pertes des diodes de roue libre à l'état passant.....	226
C.2.4	Pertes de commutation des transistors .....	227
C.2.5	Pertes de commutation des diodes de roue libre .....	228
C.2.6	Pertes totales de l'onduleur de sortie.....	228
C.3	Pertes du convertisseur d'entrée.....	228
C.3.1	Convertisseur à alimentation active .....	228
C.3.2	Redresseur à diodes.....	229
C.4	Pertes des bobines d'arrêt d'entrée.....	229
C.5	Pertes de la liaison à courant continu .....	230
C.6	Pertes des conducteurs de courant .....	231
C.7	Pertes de commande et pertes en veille.....	231
C.8	Facteur de pertes de refroidissement.....	232
C.9	Autres pertes du CDM.....	232
Annexe D (informative)	Topologie des convertisseurs .....	233
D.1	Généralités .....	233
D.2	Topologies d'onduleurs de sortie de source de tension différentes de celles décrites mathématiquement en C.2.....	233
D.3	Topologies de convertisseurs d'entrée de source de tension différentes de celles décrites mathématiquement en C.3.....	233
D.4	Topologies de CDM autres que le type source de tension .....	234
Annexe E (informative)	Interpolation des pertes de moteur et du courant de moteur .....	235
E.1	Généralités .....	235
E.2	Valeurs relatives et valeurs de référence .....	235
E.3	Connexions de moteur et plages de fonctionnement .....	236
E.4	Interpolation des pertes de moteur.....	237
E.5	Interpolation du courant du moteur.....	241

E.6	Détermination des coefficients d'interpolation .....	242
E.6.1	Généralités .....	242
E.6.2	Détermination analytique .....	242
E.6.3	Détermination numérique .....	244
E.7	Précisions pouvant être obtenues .....	245
E.8	Rendement type des moteurs à induction .....	245
Annexe F (informative) Exemple d'application pour le calcul des pertes d'un CDM et d'un PDS .....		251
F.1	Généralités .....	251
F.2	Détermination des pertes du CDM .....	251
F.2.1	Généralités .....	251
F.2.2	Détermination des pertes par interpolation bidimensionnelle des pertes aux points de perte voisins .....	252
F.2.3	Détermination des pertes à l'aide du modèle mathématique décrit à l'Annexe C .....	255
F.3	Détermination des pertes du moteur .....	257
F.4	Détermination des pertes du PDS .....	258
F.5	Détermination des facteurs de charge partielle pour les SDIM .....	259
F.6	Exemples d'application des pertes de référence et des classes de rendement pour la fonctionnalité modifiée .....	260
F.6.1	Généralités .....	260
F.6.2	Exemple 1 – Classification IE d'un SDIM .....	260
F.6.3	Exemple 2 – Classification IE d'un SDOM .....	261
F.6.4	Exemple 3 – Classification IE d'un CDM avec capacité de récupération et filtre de sortie sinusoïdal .....	262
Annexe G (informative) Incertitude de la méthode de détermination des pertes .....		263
G.1	Généralités .....	263
G.2	Calcul de l'incertitude sur les erreurs aléatoires .....	263
G.3	Comparaison des incertitudes pour différentes méthodes de détermination des pertes .....	263
Annexe H (informative) Mesurage calorimétrique pour les pertes du CDM .....		264
H.1	Généralités .....	264
H.2	Calorimètre à deux chambres utilisant l'air comme milieu de refroidissement .....	264
H.3	Calorimètre à une chambre utilisant l'air comme milieu de refroidissement .....	265
H.4	Calorimètre utilisant un liquide comme milieu de refroidissement .....	266
Annexe I (informative) Calcul des pertes du PDS au-delà de la vitesse et du couple assignés .....		268
I.1	Généralités .....	268
I.2	Points de fonctionnement au-dessus du couple assigné .....	268
I.3	Points de fonctionnement au-dessus de la vitesse assignée .....	268
I.3.1	Généralités .....	268
I.3.2	Dépendance des pertes du moteur aux performances du CDM .....	269
I.3.3	Dépendance du CDM aux performances du moteur .....	269
I.3.4	Calcul des pertes du PDS dans la plage de fonctionnement en régime défluxé jusqu'à 200 % de la vitesse assignée .....	269
Annexe J (informative) Explication des facteurs de correction pour les pertes de référence du Tableau 8 .....		271
J.1	Généralités .....	271
J.2	CDM .....	271
J.2.1	CDM sans capacité de récupération .....	271

J.2.2	CDM avec capacité de récupération .....	272
J.2.3	CDM avec $DF_U \leq 10\%$ .....	273
J.2.4	CDM avec une tension d'entrée assignée $\leq 250$ V (triphasee) .....	273
J.2.5	CDM avec entrée monophasée .....	273
J.3	SDIM et SDOM .....	274
J.3.1	Généralités .....	274
J.3.2	SDIM sans capacité de récupération.....	274
J.3.3	SDIM avec capacité de récupération.....	275
J.3.4	SDOM.....	275
J.4	CDM, SDIM et SDOM avec refroidissement externe.....	275
J.5	CDM et SDOM avec plusieurs sorties à courant alternatif .....	275
	Bibliographie.....	276

Figure 1	– Exemple de module d'entraînement complet (CDM) à base de sous-modules d'entraînement (SDM).....	149
Figure 2	– Représentation du produit étendu intégrant un système moteur .....	150
Figure 3	– Caractéristique couple-vitesse d'un PDS asservi.....	152
Figure 4	– Représentation des points de fonctionnement (vitesse de l'arbre, couple) pour la détermination des pertes relatives de l'entraînement électrique de puissance (PDS) .....	163
Figure 5	– Représentation des points de fonctionnement (vitesse de l'arbre, couple) pour la détermination des pertes relatives de l'entraînement électrique de puissance (PDS) .....	164
Figure 6	– Représentation des points de fonctionnement (fréquence relative du stator du moteur, courant produisant le couple relatif) pour la détermination des pertes du module d'entraînement complet de référence (RCDM) .....	164
Figure 7	– Responsabilités et flux de travaux pour déterminer l'indicateur d'efficacité énergétique (EEI) d'un produit étendu.....	166
Figure 8	– Combinaison de différentes sources de données pour déterminer l'indicateur d'efficacité énergétique (EEI) d'un produit étendu .....	167
Figure 9	– Relation métrique.....	169
Figure 10	– Recommandations destinées aux fournisseurs de CDM et de moteurs concernant l'utilisation des dispositifs "d'essai" et "de référence" pour déterminer les classes IE/IES .....	170
Figure 11	– Représentation d'un CDM et d'une charge d'essai types .....	171
Figure 12	– Exemple de pertes relatives $p_{L,CDM}$ du RCDM de 9,95 kVA.....	174
Figure 13	– Exemple de pertes de puissance relatives d'un PDS en fonction de la vitesse et du couple .....	179
Figure 14	– Exemple de représentation des pertes de puissance relatives en fonction de la fréquence de commutation d'un PDS de 7,5 kW à 11 kW .....	180
Figure 15	– Exemple de CDM comportant une résistance pour dissiper la puissance produite .....	181
Figure 16	– Représentation des classes IE pour un CDM.....	184
Figure 17	– Topologie d'un CDM avec plusieurs sorties à courant alternatif.....	187
Figure 18	– Pertes du CDM ou du SDM correspondant à la somme des pertes déterminées et de l'incertitude de la méthode de détermination .....	191
Figure 19	– Montage de mesure à l'entrée-sortie pour la détermination des pertes du CDM .....	195
Figure 20	– Ordre des mesurages du CDM de [1] à [8] .....	196

Figure 21 – Montage de mesure à l'entrée-sortie pour la détermination des pertes du SDIM .....	197
Figure 22 – Montage de mesure à l'entrée-sortie pour la détermination des pertes du SDOM .....	199
Figure 23 – Montage de mesure à l'entrée-sortie pour la détermination des pertes du PDS .....	200
Figure 24 – Ordre des mesurages du PDS de [1] à [8] .....	201
Figure 25 – Montage de mesure calorimétrique pour la détermination des pertes du CDM .....	202
Figure 26 – Détermination de la classification IE pour le CDM et détermination des pertes aux points de fonctionnement à charge partielle .....	203
Figure 27 – Détermination de la classification IES pour le PDS et détermination des pertes aux points de fonctionnement à charge partielle .....	204
Figure B.1 – Vue d'ensemble du produit étendu et du flux énergétique .....	211
Figure B.2 – Circuit équivalent du réseau et du câblage de réseau .....	212
Figure B.3 – Représentation d'un filtre antiharmoniques monophasé .....	213
Figure B.4 – PDS dont le convertisseur d'entrée est un redresseur à diodes .....	214
Figure B.5 – PDS dont le convertisseur d'entrée est un AIC normal .....	215
Figure B.6 – PDS à convertisseur d'entrée F3E-AIC sans bobine d'arrêt de ligne .....	216
Figure B.7 – Forme d'onde type d'un courant de ligne de redresseur à diodes .....	217
Figure B.8 – Circuit de liaison à courant continu .....	218
Figure B.9 – Circuit de liaison à courant continu comportant des bobines d'arrêt à courant continu supplémentaires .....	219
Figure B.10 – Onduleur de sortie du PDS .....	220
Figure B.11 – Câble de moteur et filtre de sortie facultatif du PDS .....	221
Figure B.12 – Forme d'onde type de la tension de sortie de l'onduleur et de la tension du moteur lors de l'utilisation d'un filtre de sortie sinusoïdal .....	221
Figure E.1 – Couple et vitesse normalisés des plages a et b pour la connexion en Y ou en D .....	236
Figure E.2 – Couple et vitesse normalisés des plages a et b pour la connexion en Y → D .....	237
Figure E.3 – Couple et vitesse normalisés de la plage a pour la connexion Y → YY .....	237
Figure E.4 – Pertes normalisées d'un exemple de moteur à connexion en Y ou en D .....	238
Figure E.5 – Pertes normalisées d'un exemple de moteur à connexion Y → D .....	239
Figure E.6 – Pertes normalisées d'un exemple de moteur à connexion Y → YY .....	239
Figure E.7 – Carte de rendement de l'exemple de moteur à connexion en Y ou en D .....	240
Figure E.8 – Carte de rendement de l'exemple de moteur à connexion Y → D .....	240
Figure E.9 – Carte de rendement de l'exemple de moteur à connexion Y → YY .....	240
Figure E.10 – Courant de ligne de l'exemple de moteur à connexion en Y ou en D .....	241
Figure E.11 – Courant de ligne de l'exemple de moteur à connexion Y → D .....	242
Figure E.12 – Courant de ligne de l'exemple de moteur à connexion Y → YY .....	242
Figure E.13 – Points de fonctionnement normalisés de l'IEC 60034-2-3 .....	243
Figure F.1 – Segments des points de fonctionnement .....	251
Figure F.2 – Interpolation bidimensionnelle .....	252
Figure H.1 – Installation de mesure calorimétrique en une étape pour le mesurage comparatif des pertes (CDM et résistance chauffante chargés simultanément) .....	264

Figure H.2 – Installation de mesure calorimétrique en deux étapes pour le mesurage comparatif des pertes (CDM et résistance chauffante non chargés simultanément).....	266
Figure H.3 – Installation de mesure calorimétrique refroidie par liquide pour le mesurage des pertes du CDM.....	267
Tableau 1 – Courants de charge d’essai minimaux à différents points de fonctionnement .....	172
Tableau 2 – Facteur de déphasage de la charge d’essai entre le courant de sortie fondamental et la tension de sortie fondamentale à différents points de fonctionnement .....	172
Tableau 3 – Exemple de pertes relatives du CDM de référence de 400 V/9,95 kVA aux points de fonctionnement décrits à la Figure 6 .....	174
Tableau 4 – Rapport de puissance active du SDIM à utiliser pour le calcul des pertes aux points de fonctionnement du CDM.....	176
Tableau 5 – Paramètre de référence de la Formule (13) .....	179
Tableau 6 – Pertes relatives du PDS de 400 V/7,5 kW.....	179
Tableau 7 – Pertes du CDM de référence pour la définition de la classe IE1 .....	182
Tableau 8 – Facteurs de correction pour différentes caractéristiques de CDM, SDIM et SDOM.....	186
Tableau 9 – Exigences relatives aux informations .....	205
Tableau A.1 – Pertes relatives (%) des CDM de référence (IE1) à différentes puissances assignées aux points de fonctionnement décrits à la Figure 6.....	208
Tableau A.2 – Pertes relatives du CDM de 9,95 kVA selon le Tableau A.1 .....	209
Tableau B.1 – Valeurs types de $\lambda$ pour différentes topologies de convertisseurs d’entrée .....	217
Tableau C.1 – Paramètres de référence de la Formule (C.1).....	226
Tableau C.2 – Variables de la Formule (C.1) .....	226
Tableau C.3 – Paramètres de référence de la Formule (C.2).....	226
Tableau C.4 – Paramètres de référence de la Formule (C.3).....	227
Tableau C.5 – Paramètres de référence de la Formule (C.4).....	228
Tableau C.6 – Paramètres de référence de la Formule (C.6).....	229
Tableau C.7 – Variables de la Formule (C.6) .....	229
Tableau C.8 – Paramètres de référence de la Formule (C.7).....	230
Tableau C.9 – Paramètres de référence de la Formule (C.8).....	231
Tableau C.10 – Paramètres de référence de la Formule (C.9).....	231
Tableau C.11 – Paramètre de référence de la Formule (5).....	231
Tableau C.12 – Paramètre de référence de la Formule (C.10) .....	232
Tableau E.1 – Points de fonctionnement normatifs de l’IEC 60034-2-3.....	243
Tableau E.2 – Coefficients d’interpolation des machines à induction types tétrapolaires, de classe de rendement IE2 .....	246
Tableau E.3 – Coefficients d’interpolation des machines à induction types bipolaires, de classe de rendement IE2.....	247
Tableau E.4 – Coefficients d’interpolation des machines à induction types tétrapolaires, de classe de rendement IE3 .....	248
Tableau E.5 – Coefficients d’interpolation des machines à induction types tétrapolaires, de classe de rendement IE4 .....	249
Tableau E.6 – Coefficients d’interpolation des machines à induction types tétrapolaires, de classe de rendement IE5 .....	250

Tableau F.1 – Pertes relatives d'un exemple de CDM (IE1) de 400 V/9,95 kVA aux points de fonctionnement prédéfinis .....	252
Tableau F.2 – Paramètres de l'exemple de CDM .....	256
Tableau F.3 – Résultats du calcul pour le CDM d'après le modèle mathématique .....	257
Tableau F.4 – Comparaison des différentes méthodes d'évaluation des pertes .....	257
Tableau F.5 – Données relatives aux pertes de l'exemple de moteur de 7,5 kW .....	257
Tableau F.6 – Facteurs de charge partielle calculés pour les points de fonctionnement à charge partielle du SDIM.....	260

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### ENTRAÎNEMENTS ÉLECTRIQUES DE PUISSANCE (PDS) À VITESSE VARIABLE –

#### Partie 9-2: Écoconception des systèmes moteurs – Détermination et classification de l'efficacité énergétique

##### AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. À cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'IEC attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de propriété revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'IEC n'avait pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être exigés pour sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets.

L'IEC 61800-9-2 a été établie par le sous-comité 22G: Systèmes d'entraînement électrique de puissance à vitesse variable (PDS), du comité d'études 22 de l'IEC: Systèmes et équipements électroniques de puissance. Il s'agit d'une Norme internationale.

Elle a le statut d'une publication groupée sur l'efficacité énergétique conformément au Guide 118 de l'IEC.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2017. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) définition des classes IES supplémentaires, jusqu'à la classe IES5;
- b) suppression des données relatives aux pertes du moteur de référence et référence désormais à la norme IEC 60034-30-2;
- c) facteurs étendus et modifiés dans l'Article 6 pour les CDM;
- d) l'Annexe C couvre désormais le modèle mathématique des pertes du CDM;
- e) déplacement du modèle mathématique du CDM à l'Annexe C;
- f) ajout du sous-module d'entrée d'entraînement et des sous-modules de sortie d'entraînement à l'Annexe B;
- g) l'Annexe D couvre désormais la topologie du convertisseur (qui correspond à l'ancienne Annexe C);
- h) l'Annexe E couvre désormais l'interpolation des pertes de moteur (qui correspond à l'ancienne Annexe D);
- i) l'Annexe E a été étendue pour inclure diverses connexions de moteur et une méthode d'interpolation mise à jour;
- j) nouvelle Annexe E pour la détermination des coefficients d'interpolation;
- k) l'annexe F correspond à l'ancienne Annexe E;
- l) nouvelle Annexe J, Explication des facteurs de correction pour les pertes de référence dans le Tableau 8.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

Projet	Rapport de vote
22G/475/FDIS	22G/478/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à son approbation.

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous [www.iec.ch/members\\_experts/refdocs](http://www.iec.ch/members_experts/refdocs). Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous [www.iec.ch/publications](http://www.iec.ch/publications).

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61800, publiées sous le titre général *Entraînements électriques de puissance à vitesse variable (PDS)*, se trouve sur le site Web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site Web de l'IEC sous [webstore.iec.ch](http://webstore.iec.ch) dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

**IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de ce document indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.**

## INTRODUCTION

La présente partie de l'IEC 61800 a été élaborée pour pouvoir évaluer les pertes de puissance des SDM (sous-modules d'entraînement), des CDM (modules d'entraînement complets) et des PDS (entraînements électriques de puissance).

Les exigences relatives au mesurage de l'efficacité énergétique des moteurs à alimentation non sinusoïdale relèvent de la responsabilité de l'IEC/TC 2 et seront publiées dans la série IEC 60034.

L'IEC SC 22G comprend le groupe d'étude de normalisation en charge de ce sujet. Il a établi une étroite collaboration avec plusieurs autres comités d'études (IEC TC 2, IEC SC 121A, ISO/TC 115, ISO/TC 117, ISO/TC 118 et CEN/TC 197, par exemple) afin de produire une norme détaillée sur les exigences en matière d'efficacité énergétique et d'écoconception.

Le SC 22G de l'IEC demeure responsable de tous les aspects pertinents du domaine de l'efficacité énergétique et des exigences en matière d'écoconception pour l'électronique de puissance, l'appareillage de connexion, l'appareillage de commande et les entraînements électriques de puissance, ainsi que leurs applications industrielles.

La série IEC 61800 ne traite pas des composants mécaniques.

NOTE 1 Les moteurs avec réducteur (moteurs sur lesquels des boîtes à engrenage sont directement adaptées) sont traités comme des entraînements électriques de puissance (convertisseur plus moteur). Voir l'IEC 60034-30-1 pour la classification des pertes d'un moteur avec réducteur. Les classes de rendement des boîtes à engrenage en tant que composants individuels sont à l'étude.

L'IEC 61800-9-2 est une sous-partie de la série IEC 61800, dont la structure est la suivante:

- Partie 1: Exigences générales – Spécifications de dimensionnement pour systèmes d'entraînement de puissance à vitesse variable en courant continu et basse tension;
- Partie 2: Exigences générales – Spécifications de dimensionnement pour entraînements électriques de puissance à vitesse variable en courant alternatif;
- Partie 3: Exigences de CEM et méthodes d'essais spécifiques;
- Partie 5: Exigences de sécurité;
- Partie 6: Guide de détermination du type de régime de charge et de dimensionnement en courant correspondant;
- Partie 7: Interface générique et utilisation de profils pour les entraînements électriques de puissance;
- Partie 8: Specification of voltage on the power interface (disponible en anglais seulement);
- Partie 9: Écoconception des systèmes moteurs.

Certaines parties sont subdivisées en plusieurs sous-parties, publiées en tant que Normes internationales, Spécifications techniques ou Rapports techniques, avec leur numéro de partie suivi d'un tiret et d'un second chiffre afin d'identifier la subdivision (IEC 61800-9-2, par exemple).

NOTE 2 Il est entendu que la Formule (13) est destinée aux moteurs fonctionnant directement sur le réseau. La Formule (13) sera modifiée dans le prochain amendement pour tenir compte des moteurs d'entraînement à fréquence variable.

NOTE 3 Une nouvelle figure sera élaborée pour démontrer l'utilisation d'un point neutre pour mesurer les tensions de phase du convertisseur afin de déterminer le  $\cos\phi$  pour chaque phase au paragraphe 7.5.3.1.

## ENTRAÎNEMENTS ÉLECTRIQUES DE PUISSANCE (PDS) À VITESSE VARIABLE –

### Partie 9-2: Écoconception des systèmes moteurs – Détermination et classification de l'efficacité énergétique

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61800 spécifie les indicateurs d'efficacité énergétique pour l'électronique de puissance (modules d'entraînement complets (CDM), sous-modules d'entrée ou de sortie d'entraînement (SDM), les entraînements électriques de puissance (PDS) et les démarreurs de moteurs), utilisés avec les équipements entraînés par moteur.

Le présent document est une publication groupée sur l'efficacité énergétique conformément au Guide 119 de l'IEC et spécifie la méthodologie qui permet de déterminer les pertes du module d'entraînement complet (CDM), du sous-module d'entraînement (SDM), de l'entraînement électrique de puissance (PDS) et du système moteur.

Il définit les classes IE et IES et établit leurs valeurs limites ainsi que les procédures d'essai pour la classification des pertes globales du système moteur.

De plus, le présent document propose une méthodologie pour la mise en œuvre de la solution d'entraînement électrique la plus économe en énergie, qui dépend de l'architecture du système entraîné par moteur, du profil vitesse/couple et des points de fonctionnement dans le temps de l'équipement entraîné. Il établit une base pour l'évaluation et la classification de l'efficacité énergétique du produit étendu.

La méthodologie de l'approche produit étendu et les modèles semi-analytiques sont définis dans l'IEC 61800-9-1.

La structure du présent document est la suivante:

- définition et classification des pertes d'un PDS normalisé et d'un CDM de référence (RCDM) normalisé, ainsi que du modèle de calcul mathématique;
- définition du moteur de référence (RM) et du CDM de référence (RCDM), utilisés pour déterminer la classe de rendement d'un PDS si le moteur physique ou le CDM physique n'est pas connu;
- spécification des exigences relatives à la détermination des pertes d'un PDS physiques et d'un CDM physique, y compris les facteurs de correction pour d'autres types de CDM, non définis en tant que RCDM ou SDM, et comparaison avec les limites de classe IES et le RCDM;
- spécification des exigences pour les essais de type et la documentation de l'utilisateur;
- fourniture de plusieurs exemples de pertes dans un système global, sous forme d'annexes;
- fourniture d'informations relatives aux topologies de systèmes et d'entraînements, sous forme d'annexes.

Les données spécifiques aux RCDM et aux RM ainsi que les limites des PDS et les classes IE/IES sont indiquées pour les entraînements électriques de puissance alternatif/alternatif à axe unique et basse tension (de 100 V à 1 000 V inclus) avec des moteurs triphasés. Les moteurs avec réducteur sont traités comme des moteurs normaux lorsque le moteur et la boîte à engrenage peuvent être séparés. Une méthodologie est décrite ainsi que la façon dont ces données de référence peuvent également être appliquées à d'autres topologies telles que des convertisseurs alternatif/continu ou continu/alternatif.

Toutes les données de référence fournies sont dérivées de PDS équipés de moteurs à induction. Elles peuvent être utilisées pour divers types de PDS avec d'autres types de moteurs ainsi que, par exemple mais sans s'y limiter, des moteurs à collecteur électronique (ECM, Electronically Commutated Motor), des moteurs à aimants permanents (PM, Permanent Magnet motor) ou des moteurs à réluctance synchrone (SYN-RM, SYNchronous Reluctance Motor), et des moteurs à aimants permanents à démarrage en ligne (LSPM, Line-Start Permanent Magnet motor).

Les exigences du présent document relatives aux PDS s'appliquent uniquement aux PDS qui sont commercialisés sous la forme d'un seul produit, c'est-à-dire une combinaison d'un moteur et d'un CDM qui ne sont pas destinés à être utilisés séparément.

Les exigences relatives aux CDM s'appliquent uniquement aux CDM dont les SDM n'ont pas encore été évalués conformément aux exigences des SDM.

Les équipements suivants sont exclus du domaine d'application:

- CDM, SDM et PDS à haute tension, avec une tension assignée supérieure à 1,0 kV en courant alternatif ou à 1,5 kV en courant continu;
- CDM, SDM et PDS à basse tension, avec une tension assignée inférieure à 100 V en courant alternatif;
- PDS de puissance élevée, supérieure à une puissance assignée de 1 000 kW;
- CDM et SDM de puissance élevée, supérieure à une puissance de sortie apparente assignée de 1 209 kVA;
- PDS de faible puissance, inférieure à une puissance assignée de 0,12 kW;
- CDM et SDM de faible puissance, inférieure à une puissance de sortie apparente assignée de 0,278 kVA;
- PDS à moteur avec réducteur où le moteur et la boîte à engrenage ne peuvent pas être séparés en raison, par exemple, d'un carter commun;
- PDS asservi (composé d'un convertisseur de fréquence, d'un moteur et d'un capteur de retour de position);
- CDM, module d'entraînement principal (BDM, Basic Drive Module) et SDM exclusivement conçus pour entraîner des moteurs asservis;
- PDS, CDM, BDM et SDM spécifiquement conçus pour des applications de moteur à courant continu selon l'IEC 61800-1;
- PDS où plusieurs moteurs sont branchés en parallèle à un seul CDM avec une seule sortie triphasée;
- SDM avec entrée à courant continu et sortie à courant continu.

NOTE La série IEC 61800-9 ne traite pas de la classification de l'efficacité énergétique de l'équipement entraîné, mais elles fournissent des éléments d'entrée pour l'évaluation selon l'approche produit étendu.

## 2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60034-1:2022, *Machines électriques tournantes – Partie 1: Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement*

IEC 60034-2-1:2014, *Machines électriques tournantes – Partie 2-1: Méthodes normalisées pour la détermination des pertes et du rendement à partir d'essais (à l'exclusion des machines pour véhicules de traction)*

IEC 60034-2-3:2020, *Machines électriques tournantes – Partie 2-3: Méthodes d'essai spécifiques pour la détermination des pertes et du rendement des moteurs à courant alternatif alimentés par convertisseur*

IEC 60034-30-1:2014, *Machines électriques tournantes – Partie 30-1: Classes de rendement pour les moteurs à courant alternatif alimentés par le réseau (code IE)*

IEC TS 60034-30-2:2016, *Rotating electrical machines – Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code)* (disponible en anglais seulement)

IEC TS 60034-31:2021, *Rotating electrical machines – Part 31: Selection of energy-efficient motors including variable speed applications – Application guidelines* (disponible en anglais seulement)

IEC 60038:2009, *Tensions normales de la CEI*  
IEC 60038:2009/AMD1:2021

IEC 60050-161, *Vocabulaire Électrotechnique International (IEV) – Chapitre 161: Compatibilité électromagnétique*, disponible à l'adresse [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

IEC 60947-4-1:2018, *Appareillage à basse tension – Partie 4-1: Contacteurs et démarreurs de moteurs – Contacteurs et démarreurs électromécaniques*

IEC 61000-3-12:2011, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 3-12: Limites – Limites pour les courants harmoniques produits par les appareils connectés aux réseaux publics basse tension ayant un courant appelé  $> 16\text{ A}$  et  $\leq 75\text{ A}$  par phase*

IEC Guide 118:2017, *Inclusion of energy efficiency aspects in electrotechnical publications* (disponible en anglais seulement)

### 3 Termes, définitions et symboles

#### 3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et les définitions de l'IEC 60050-161 ainsi que les suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>

##### 3.1.1

##### **convertisseur à alimentation active AIC**

convertisseur de puissance électronique autocommuté de toutes technologies, topologies, tensions et dimensions, raccordé entre le système d'alimentation en courant alternatif (réseau) et une source côté courant continu (source de courant ou de tension), pouvant convertir la puissance électrique dans les deux sens (du courant alternatif en courant continu et inversement) et commander la puissance réactive ou le facteur de puissance

Note 1 à l'article: Voir l'IEC TS 62578.

Note 2 à l'article: Dans l'IEV, VSC et CSC sont respectivement définis en tant que convertisseur alternatif/continu imposant la tension (551-12-03) et convertisseur alternatif/continu imposant le courant (551-12-04). La plupart des AIC sont des convertisseurs bidirectionnels dont les sources se trouvent côté courant continu. Par conséquent, ils sont appelés convertisseurs de source de tension et convertisseurs de source de courant.

Note 3 à l'article: L'abréviation "AIC" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Active Infeed Converter".

### 3.1.2

#### autre méthode de détermination du rendement

##### AEDM

modèle analytique utilisé par les fabricants de moteurs pour calculer les pertes qui peuvent être utilisées pour déterminer l'indicateur d'efficacité énergétique d'un produit étendu

Note 1 à l'article: L'abréviation "AEDM" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Alternate Efficiency Determination Method".

### 3.1.3

#### accessoires

partie, composant ou équipement supplémentaire destiné à étendre les capacités du BDM/CDM/PDS, mais non exigé pour le fonctionnement général du BDM/CDM/PDS

Note 1 à l'article: Les exemples d'accessoires comprennent, mais sans s'y limiter, les filtres de ligne, les filtres antiharmoniques d'entrée, les filtres EMI, les fusibles, les bobines d'arrêt, les filtres de sortie de moteur, les kits d'interface de communication, de commande ou d'entrée/sortie, les kits de ventilation supplémentaires, les kits d'assemblage mécanique et de support de câbles ou des dispositifs et des instruments de mesure supplémentaires.

### 3.1.4

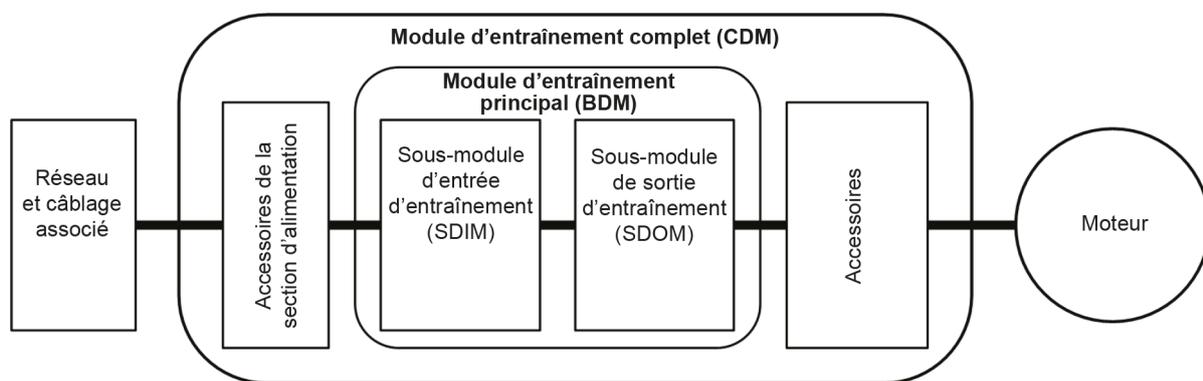
#### module d'entraînement complet

##### CDM

module d'entraînement comprenant, entre autres, le BDM et des composants associés, tels que des dispositifs de protection, des transformateurs et des accessoires, à l'exclusion toutefois du moteur et des capteurs mécaniquement couplés à l'arbre du moteur

Note 1 à l'article: Le terme CDM désigne le convertisseur de fréquence alternatif/alternatif qui alimente le moteur. Certains pays utilisent le terme "entraînement" à la place de CDM.

Note 2 à l'article: La Figure 1 représente un exemple de CDM contenant un SDIM et un SDOM. Le SDIM et le SDOM font partie du BDM.



IEC

**Figure 1 – Exemple de module d'entraînement complet (CDM) à base de sous-modules d'entraînement (SDM)**

Note 3 à l'article: L'abréviation "CDM" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Complete Drive Module".

[SOURCE: IEC 61800-2:2021, 3.6, modifié – Dans la définition, l'expression "dispositifs auxiliaires" a été remplacée par le mot "accessoires". Les notes à l'article et la Figure 1 ont été ajoutées, la référence à la Figure 3 a été supprimée.]

### 3.1.5

#### facteur de crête

rapport de la valeur de crête absolue sur la valeur efficace de la forme d'onde

**3.1.6  
équipement entraîné**

équipement mécaniquement couplé au moteur mais non limité aux transmissions externes, engrenages, ventilateurs, pompes, compresseurs, etc.

**3.1.7  
indicateur d'efficacité énergétique  
EEI**

valeur qui représente l'efficacité énergétique d'une application (ventilateur, compresseur de pompe, etc.) résultant de l'approche produit étendu (EPA)

Note 1 à l'article: Si le produit étendu est un système de pompe, l'EEI est le rapport de l'énergie demandée (énergie réelle plus pertes) sur l'énergie théorique exigée pour l'application.

Note 2 à l'article: L'abréviation "EEI" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Energy Efficiency Indicator".

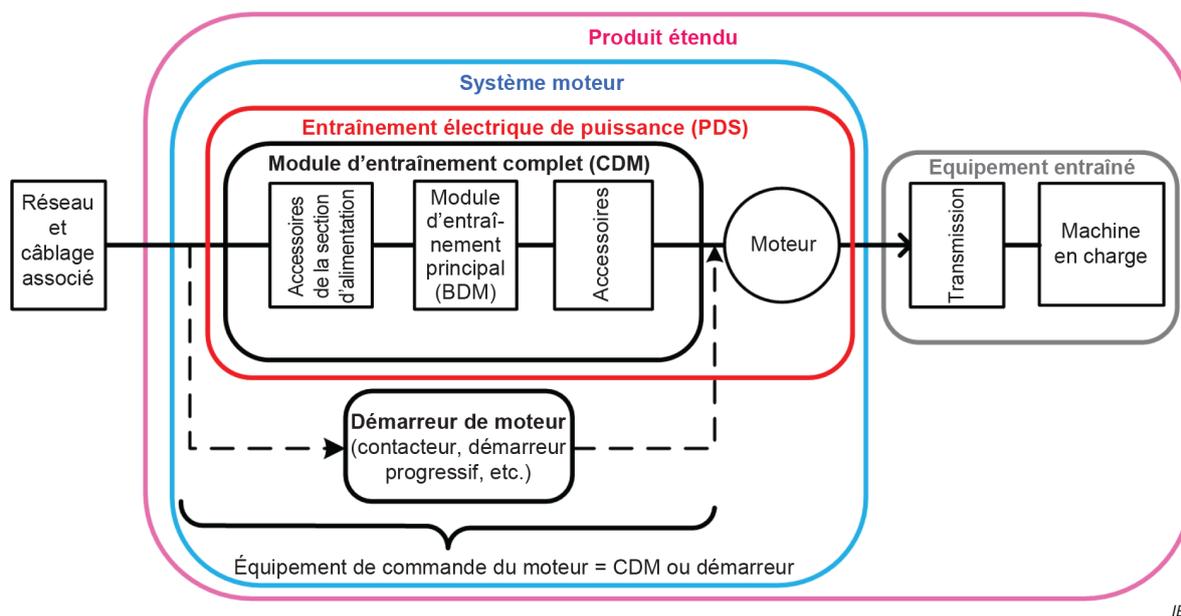
Note 3 à l'article: L'abréviation "EPA" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Extended Product Approach".

**3.1.8  
produit étendu  
EP**

équipement entraîné avec le système moteur auquel il est couplé (un PDS, par exemple)

Note 1 à l'article: Voir Figure 2.

Note 2 à l'article: L'abréviation "EP" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Extended Product".



**Figure 2 – Représentation du produit étendu intégrant un système moteur**

**3.1.9  
classe IE**

classification des composants d'un système moteur (3.1.11) en fonction du rendement

Note 1 à l'article: L'abréviation "IE" est dérivée du terme anglais développé correspondant "International Efficiency".

**3.1.10****classe IES**

classification d'un système moteur (PDS ou moteur d'entraînement avec réducteur, par exemple) en fonction du rendement

Note 1 à l'article: L'abréviation "IES" est dérivée du terme anglais développé correspondant "International Efficiency of Systems".

**3.1.11****équipement de commande du moteur**

CDM ou démarreur de moteur

**3.1.12****système moteur**

système composé d'un ou de plusieurs modules d'entraînement complets (CDM) et d'un ou de plusieurs moteurs, ainsi que de tout capteur couplé mécaniquement à l'arbre du moteur, à l'exclusion de l'équipement entraîné

**3.1.13****entraînement électrique de puissance****PDS**

système composé d'un ou plusieurs modules d'entraînement complets (CDM) et d'un ou plusieurs moteurs

Note 1 à l'article: Tous les capteurs couplés mécaniquement à l'arbre du moteur font également partie du PDS, mais pas l'équipement entraîné.

Note 2 à l'article: 'abréviation "PDS" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Power Drive System".

**3.1.14****modèle d'impulsions**

modèle de la tension entre phases ou du courant de phase commuté(e), aux bornes de sortie non filtrée du convertisseur, résultant des schémas de fréquence et de modulation d'impulsion

**3.1.15****module d'entraînement complet de référence****RCDM**

module d'entraînement complet défini par des équations mathématiques et/ou des pertes de puissance

Note 1 à l'article: Le RCDM sert de base pour déterminer la classe IE d'un CDM individuel et d'un SDM.

Note 2 à l'article: L'abréviation "RCDM" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Reference Complete Drive Module".

**3.1.16****moteur de référence****RM**

moteur à utiliser pour la classification IES et à choisir dans l'IEC TS 60034-30-2

Note 1 à l'article: L'abréviation "RM" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Reference Motor".

### 3.1.17

#### PDS asservi

entraînement électrique asservi permettant une commande précise et dynamique de la position, de la vitesse et de l'accélération angulaire ou linéaire du servomécanisme entraîné

Note 1 à l'article: Voir Figure 3.

Note 2 à l'article: Le PDS asservi est composé d'un convertisseur de fréquence, d'un moteur et d'un capteur de retour de position.

Note 3 à l'article: De telles applications asservies sont caractérisées par une charge et une vitesse qui peuvent varier de façon non périodique (type de service S9) ou périodique dans la plage de fonctionnement admissible à 4 quadrants ( $\pm T_{MAX}$ ,  $\pm n_{MAX}$ ), ainsi que par un fonctionnement fréquent en surcharge ( $T > T_N$ ) et/ou une plage de fonctionnement en régime défluxé ( $n > n_N$ ) du moteur (voir Figure 3).

Note 4 à l'article: Les PDS sont considérés comme des PDS asservis lorsque leur moteur satisfait généralement à l'un des critères suivants (voir IEC TS 60034-30-2:2016):

- critère de vitesse maximale:  $n_{max} > a_0 \cdot e^{-a_1 \cdot R_N + a_2} + a_3$ ; avec  $a_0 = 6\,000$  1/min;  $a_1 = 0,02$  1/kW;  $a_2 = -0,4$ ;  $a_3 = 3\,200$  1/min;
- critère de capacité d'accélération angulaire:  $c_{coeff} = \frac{T_{max}}{J} > b_0 \cdot e^{-b_1 \cdot R_N + b_2} + b_3$ ; avec  $b_0 = 18\,000$  1/s<sup>2</sup>;  $b_1 = 1,3$  1/kW;  $b_2 = -1$ ;  $b_3 = 5\,800$  1/s<sup>2</sup>.

Note 5 à l'article: Des applications types des PDS asservis sont par exemple les machines à CNC (commande numérique informatisée), la fabrication automatisée ou la robotique.

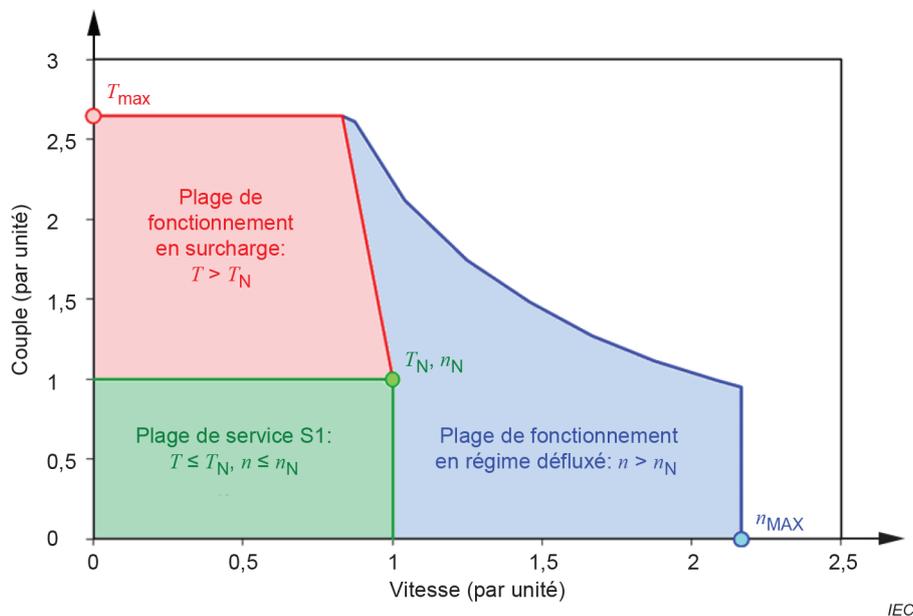


Figure 3 – Caractéristique couple-vitesse d'un PDS asservi

### 3.1.18

#### axe unique

arbre de sortie mécanique unique d'un moteur individuel

Note 1 à l'article: S'applique aux CDM qui alimentent un moteur ou aux PDS qui ne comprennent qu'un seul moteur.

### 3.1.19

#### sous-module d'entraînement

##### SDM

module d'entraînement électrique permettant de convertir une entrée à courant alternatif en sortie à courant continu, une entrée à courant continu en sortie à courant continu ou une entrée à courant continu en sortie à courant alternatif, destiné à former une partie d'un BDM

Note 1 à l'article: Les SDM ou SDIM ayant une entrée à courant continu et une sortie à courant continu n'entrent pas dans le domaine d'application du présent document. Voir l'Article 1.

Note 2 à l'article: L'abréviation "SDM" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Sub Drive Module".

### 3.1.20

#### sous-module d'entrée d'entraînement

##### SDIM

SDM permettant de convertir une entrée à courant alternatif en sortie à courant continu ou une entrée à courant continu en sortie à courant continu destinée à alimenter au moins un SDOM où le SDIM peut également comprendre une bobine d'arrêt à courant alternatif ou continu, une combinaison de filtres d'entrée ou des condensateurs de liaison à courant continu

Note 1 à l'article: Les SDM ou SDIM ayant une entrée à courant continu et une sortie à courant continu n'entrent pas dans le domaine d'application du présent document. Voir l'Article 1.

Note 2 à l'article: L'abréviation "SDIM" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Sub Drive Input Module".

### 3.1.21

#### sous-module de sortie d'entraînement

##### SDOM

SDM permettant de convertir une entrée à courant continu en sortie à courant alternatif triphasé pour commander le courant, le couple ou la vitesse d'un moteur électrique où ce SDOM peut également comprendre des condensateurs de liaison à courant continu ou un ensemble de filtres de sortie triphasés

Note 1 à l'article: L'abréviation "SDOM" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Sub Drive Output Module".

### 3.1.22

#### charge d'essai

dispositif électrique qui détermine le courant de sortie  $I_{out}$  et le facteur de déphasage fondamental de sortie  $\cos \Phi$  d'un équipement en essai (EUT, Equipment Under Test) à des fins d'essai ou de calcul

Note 1 à l'article: La charge d'essai peut être un moteur d'essai ou un type de charge différent.

### 3.1.23

#### courant de charge d'essai

courant apparent total, en ampères, appliqué à la charge d'essai afin de générer un certain couple (voir Tableau 1)

### 3.1.24

#### courant produisant le couple

partie du courant de charge d'essai (voir 3.1.23) qui produit un certain couple

Note 1 à l'article: Voir Figure 6 et Tableau 1.

Note 2 à l'article: Pour un moteur asynchrone, le courant produisant le couple est le courant du rotor.

## 3.2 Symboles

### 3.2.1

$c_{liquid}$

capacité thermique massique du liquide

**3.2.2** $DF_U$ 

facteur de distorsion de la tension égal au rapport de la tension efficace sans composante fondamentale sur la tension efficace de la composante fondamentale

$$DF_U = \sqrt{\frac{U_{RMS}^2 - U_1^2}{U_1^2}}$$

**3.2.3** $E_D$ 

énergie des pertes de commutation, par volt et par ampère, d'une diode de puissance

**3.2.4** $E_T$ 

énergie des pertes de commutation, par volt et par ampère, d'un transistor de puissance

**3.2.5** $f_{sw}$ 

nombre de commutations d'un semiconducteur en une seconde

Note 1 à l'article:  $f_{sw}$  détermine, avec le modèle d'impulsions sélectionné et la topologie du convertisseur, la fréquence minimale des harmoniques non contrôlables ou interharmoniques au point de couplage interne (PCI, voir l'IEC 61800-3) ou sur le moteur.

Note 2 à l'article: La mise à l'état passant et la mise à l'état bloqué du semiconducteur sont comptabilisées comme une seule commutation comme dans l'IEC 60034-2-3.

**3.2.6** $I_{\text{motor\_cable}}$ 

courant, en ampères, circulant dans le câble de moteur d'une interface de puissance (voir l'IEC 61800-2) du PDS, utilisé pour calculer les pertes de commutation

Note 1 à l'article:  $I_{\text{motor\_cable}}$  représente généralement un courant capacitif, qui est normalement destiné aux câbles blindés du moteur.

**3.2.7** $I_{1,r\ CDM}$ 

composante fondamentale, en ampères, de la forme d'onde du courant d'entrée assigné du CDM ou du PDS

**3.2.8** $I_r$ 

courant d'entrée assigné du CDM ou du PDS, en ampères

**3.2.9** $I_{\text{out}}$ 

courant de sortie, en ampères

**3.2.10** $I_{r,\text{out}}$ 

courant de sortie assigné du CDM, en ampères

**3.2.11** $I_{rM}$ 

courant assigné du moteur, en ampères

**3.2.12** $kI_{DC\_link}$ 

paramètre de perte de liaison à courant continu indépendant de la charge  $\left(\frac{1}{\Omega \cdot A}\right)$

**3.2.13** $k1_{choke}$ 

impédance de la bobine d'arrêt, par rapport à l'impédance assignée du CDM

**3.2.14** $k2_{DC\_link}$ 

paramètre de perte de liaison à courant continu dépendant de la charge [ $\Omega \cdot A$ ]

**3.2.15** $k2_{choke}$ 

chute de tension relative sur la partie résistive de la bobine d'arrêt

**3.2.16** $k_{cf}$ 

facteur de correction des pertes du RCDM pour tenir compte des topologies présentant différentes caractéristiques

**3.2.17** $k_{fe}$ 

séparation des pertes par courants de Foucault et par hystérésis dans un moteur

**3.2.18** $k_{fw}$ 

séparation des pertes par frottement et par ventilation dans un moteur

**3.2.19** $k_{LL}$ 

répartition des pertes de charge

**3.2.20** $k_{VD}$ 

rapport de la tension assignée du moteur sur la tension de sortie maximale du CDM

**3.2.21** $P_{L,cooling}$ 

pertes de puissance, en watts, dues à l'équipement de refroidissement d'un CDM (pertes du ventilateur, par exemple) par rapport aux pertes du BDM (voir l'IEC 61800-2) s'il est nécessaire de refroidir séparément le CDM

**3.2.22** $m$ 

indice de modulation égal au rapport de la fréquence de sortie du CDM sur la fréquence nominale du stator du moteur

**3.2.23** $n_i$ 

vitesse [ $\text{min}^{-1}$ ] au point de fonctionnement  $i$

**3.2.24** $n_r$ vitesse assignée [ $\text{min}^{-1}$ ]**3.2.25** $P_i$ consommation de puissance, en kW, au point de fonctionnement  $i$ **3.2.26** $P_{\text{in,CDM}}$ 

puissance d'entrée, en watts, du CDM obtenue en mesurant les pertes de puissance

**3.2.27** $P_{\text{in,PDS}}$ 

puissance d'entrée, en watts, du PDS obtenue en mesurant les pertes de puissance

**3.2.28** $P_{L,\text{acc}}$ 

pertes de puissance, en watts, des accessoires d'entraînement

**3.2.29** $P_{\text{LHL}}$ 

pertes supplémentaires, en watts, dues aux harmoniques d'un moteur causées par une alimentation non sinusoïdale

Note 1 à l'article: Voir également l'IEC 60034-2-3.

**3.2.30** $P_{L,\text{RM}}$ 

pertes relatives du moteur de référence

**3.2.31** $P_{L,\text{RM}}$ 

pertes, en watts, du moteur de référence

**3.2.32** $P_{\text{LTsin}}$ 

pertes totales, en watts, d'un moteur lorsque l'alimentation est de type sinusoïdal

Note 1 à l'article: Selon l'IEC 60034-2-1:2014, méthode 2-1-1B.

**3.2.33** $P_{\text{LT,mot}}$ 

pertes totales, en watts, d'un moteur lorsque l'alimentation est assurée par un convertisseur (alimentation non sinusoïdale)

Note 1 à l'article: Selon l'IEC 60034-2-1:2014, méthode 2-1-1B.

**3.2.34** $P_{\text{out,CDM}}$ 

puissance de sortie, en watts, du CDM obtenue en mesurant les pertes de puissance

**3.2.35** $P_{\text{out,PDS}}$ 

puissance de sortie, en watts, du PDS obtenue en mesurant les pertes de puissance

**3.2.36** $P_r$ 

puissance assignée, en watts, de l'équipement spécifiée par son fabricant

**3.2.37** $P_{proc}$ 

puissance appelée, en watts, par le processus mécanique ou fluïdo-mécanique

**3.2.38** $P_L$ 

pertes de puissance électrique, en watts.

Note 1 à l'article: Dans  $P_{L,CDM}$ ,  $P_{L,Mot}$ ,  $P_{L,PDS}$  et  $P_{L,Acc}$ , l'indice "CDM" désigne le module d'entraînement complet, "PDS" l'entraînement électrique de puissance et "Acc" les appareils accessoires (câbles, transformateurs ou filtres).

**3.2.39** $p_L$ 

pertes de puissance relatives exprimées en pertes unitaires par rapport à la puissance apparente assignée de l'appareil

**3.2.40** $P_{L,CDM}$ 

pertes de puissance, en watts, d'un CDM

**3.2.41** $P_{L,CDM, determined}$ 

pertes de puissance, en watts, d'un CDM calculées à partir de la méthode de détermination des pertes de puissance

**3.2.42** $p_{L,CDM}$ 

pertes de puissance relatives du CDM, par rapport à sa puissance apparente assignée

**3.2.43** $P_{L,choke}$ 

pertes de puissance, en watts, dans la section bobine d'arrêt d'un CDM

**3.2.44** $P_{L,control}$ 

pertes de puissance, en watts, du système de commande du moteur

**3.2.45** $P_{L,DC\_link}$ 

pertes de puissance, en watts, dans la section liaison à courant continu du CDM

**3.2.46** $P_{L,inverter}$ 

pertes de puissance, en watts, dans la section onduleur d'un CDM

**3.2.47** $P_{L,PDS, determined}$ 

pertes de puissance, en watts, d'un PDS calculées à partir de la méthode de détermination des pertes de puissance

**3.2.48** $P_{L,rectifier}$ 

pertes de puissance, en watts, dans la section redresseur d'un CDM

**3.2.49** $P_{L,resistor}$ 

pertes de puissance mesurées, en watts, de la résistance selon un mesurage calorimétrique comparatif

**3.2.50** $P_{L,on,D}$ 

pertes de puissance à l'état passant, en watts, d'une diode de puissance

**3.2.51** $P_{L,on,D, rectifier}$ 

pertes de puissance à l'état passant, en watts, d'une diode de redressement

**3.2.52** $P_{L,on,T}$ 

pertes de puissance à l'état passant, en watts, d'un transistor de puissance

**3.2.53** $P_{L,sw,D}$ 

pertes de puissance de commutation, en watts, d'une diode de puissance

**3.2.54** $P_{L,sw,T}$ 

pertes de puissance de commutation, en watts, d'un transistor de puissance

**3.2.55** $P_{r,M}$ 

puissance de sortie assignée, en watts, du moteur

Note 1 à l'article: Dans la série IEC 60034 sur les moteurs, elle est appelée  $P_N$ .**3.2.56** $P_{r,RM}$ 

puissance assignée du moteur de référence, en kilowatts

**3.2.57** $P_{L, stby}$ 

pertes en veille, en watts, d'un PDS

Note 1 à l'article: Des pertes en veille, en watts, sont produites lorsque le PDS est sous tension, mais ne fournit pas de courant à la charge. Elles sont généralement inférieures de deux ou trois ordres de grandeur aux pertes en cours de fonctionnement.

Note 2 à l'article: L'effet des pertes en veille sur les pertes globales dépend essentiellement du profil de régime du produit étendu. De plus, elles dépendent également des exigences du produit étendu en matière de temps de réveil et de communication.

**3.2.58** $p_N$ 

pertes relatives d'un moteur

**3.2.59** $Q$ 

débit d'un groupe motopompe en mètres cubes par seconde

**3.2.60** $Q_{\text{BEP}}$ 

débit de la pompe au point de rendement maximal en mètres cubes par seconde

**3.2.61** $Q_{\text{cooler}}$ 

débit volumique du refroidisseur du calorimètre

**3.2.62** $Q_{\text{ISI}}$ 

erreur d'interpolation (indice de stabilité)

**3.2.63** $r_{\text{HL}}$ 

rapport des pertes supplémentaires dues aux harmoniques lorsqu'un moteur fonctionne avec un CDM sur les pertes à l'alimentation sinusoïdale d'un moteur

**3.2.64** $S_{r,\text{equ}}$ 

puissance apparente assignée, en kilovolts ampères, d'un équipement

**3.2.65** $S_{r,\text{RCDM}}$ 

puissance apparente assignée, en kilovolts ampères, du CDM de référence

**3.2.66** $T$ 

couple, en newtons mètres, d'un moteur

**3.2.67** $t_w$ 

durée de fonctionnement, en heures, d'un équipement

**3.2.68** $T_i$ couple, en newtons mètres, au point de fonctionnement  $i$ **3.2.69** $THD$ 

taux de distorsion harmonique, en pourcentage, d'une grandeur alternative, égale au rapport de la valeur efficace du résidu harmonique sur la valeur efficace de la composante fondamentale de la grandeur

Note 1 à l'article: Le taux de distorsion harmonique peut être restreint à un rang harmonique spécifique (notation recommandée "H").

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left( \frac{Q_h}{Q_1} \right)^2}$$

**3.2.70** $U_{1,r,out}$ 

tension de sortie fondamentale assignée entre phases d'un CDM

Note 1 à l'article: Pour le CDM de référence, sauf indication contraire, cette valeur est présumée égale à 400 V.

**3.2.71** $U_{DC}$ 

tension de la liaison à courant continu d'un CDM

**3.2.72** $U_{D,r}$ 

tension à l'état passant d'une diode de puissance au courant assigné du CDM

**3.2.73** $U_{D,r,rectifier}$ 

tension à l'état passant d'une diode de redressement au courant assigné du CDM

**3.2.74** $U_{D,th}$ 

tension de seuil d'une diode de puissance

**3.2.75** $U_{D,th,rectifier}$ 

tension de seuil d'une diode de redressement

**3.2.76** $U_{mL1}$ 

tension phase-neutre du système d'alimentation en phase L1

**3.2.77** $uk$ 

rapport de l'impédance de ligne sur l'impédance du système

**3.2.78** $U_{T,r}$ 

tension à l'état passant d'un transistor de puissance au courant assigné du CDM

**3.2.79** $U_{T,th}$ 

tension de seuil d'un transistor de puissance

**3.2.80** $W_w$ 

demande en énergie électrique, en kilowatts heures, du produit étendu pendant la durée de fonctionnement

**3.2.81** $\lambda$ 

facteur de puissance égal au rapport de la puissance active sur la puissance apparente

Note 1 à l'article: Le facteur de puissance d'entrée d'un équipement est calculé d'après  $\lambda = P_{equ} / S_{r,equ}$ .

**3.2.82** $\Delta p_{L,CDM}$ 

incertitude, en pourcentage, de la méthode de détermination des pertes de puissance pour le CDM

**3.2.83** $\Delta P_{L,CDM}$ 

incertitude, en watts, de la méthode de détermination des pertes de puissance pour le CDM

**3.2.84** $\Delta p_{L,PDS}$ 

incertitude, en pourcentage, de la méthode de détermination des pertes de puissance pour le PDS

**3.2.85** $\Delta P_{L,PDS}$ 

incertitude, en watts, de la méthode de détermination des pertes de puissance pour le PDS

**3.2.86** $\theta_{CDM}$ 

température, en degrés Celsius, du CDM

**3.2.87** $\theta_{in}$ 

température d'entrée, en degrés Celsius, du milieu de refroidissement (air, liquide) pour un mesurage calorimétrique

**3.2.88** $\theta_{inside}$ 

température, en degrés Celsius, de l'air de refroidissement entre deux chambres de mesure calorimétrique

**3.2.89** $\theta_M$ 

température, en degrés Celsius, du moteur

**3.2.90** $\theta_{out}$ 

température de sortie, en degrés Celsius, du milieu de refroidissement (air, liquide) pour un mesurage calorimétrique

**3.2.91** $\theta_{SDIM}$ 

température, en degrés Celsius, du sous-module d'entrée d'entraînement (SDIM)

**3.2.92** $\theta_{SDOM}$ 

température, en degrés Celsius, du sous-module de sortie d'entraînement (SDOM)

**3.2.93** $\varphi$ 

angle de phase, en degrés, entre la tension d'entrée fondamentale du CDM et le courant d'entrée fondamental du CDM

**3.2.94** $\phi$ 

angle de phase, en degrés, entre la tension de sortie fondamentale du CDM et le courant de sortie fondamental du CDM

**3.2.95** $\phi_r$ 

angle de phase, en degrés, entre la tension de sortie fondamentale du CDM et le courant de sortie fondamental du CDM au couple et à la vitesse assignés

**3.2.96** $c_{WHf}$ 

coefficient de séparation de perte pour les pertes enroulement et les pertes haute fréquence

**3.2.97** $c_{BH}$ 

coefficient de séparation de perte pour les pertes enroulement et par friction et les pertes par hystérésis

## 4 Rendement du PDS, du CDM de référence (RCDM) et du moteur de référence (RM)

### 4.1 Généralités

Pour déterminer le produit étendu le plus économe en énergie pour une application donnée, une comparaison directe de plusieurs topologies d'entraînements et/ou de plusieurs stratégies de commande est exigée. L'approche produit étendu décrite dans l'IEC 61800-9-1 rend cette comparaison possible.

Pour étayer cette approche, le concept de classification IES du PDS est introduit.

La définition du rendement du PDS est générique et indépendante d'un produit ou fournisseur spécifique.

Elle permet:

- de déterminer les valeurs limites pour les classifications;
- d'établir la classification du PDS;
- d'établir la classification du CDM;
- d'appliquer l'IEC TS 60034-30-2;
- d'appliquer l'IEC 60034-30-1;
- de limiter l'évaluation à quelques points de fonctionnement mesurés ou calculés appropriés; et
- de déterminer la consommation énergétique de plusieurs applications entraînées.

Exemples de valeurs d'entrée appropriées (points de fonctionnement) pour la classification de différentes applications entraînées: certaines charges types présentent des caractéristiques couple/vitesse quadratiques (par exemple la plupart des groupes motopompes), tandis que d'autres exigent un couple constant (par exemple le matériel de levage).

Le présent document établit les pertes relatives ou les puissances d'entrée aux points de fonctionnement  $p_{L, PDS} (50; 25)$ ,  $p_{L, PDS} (90; 50)$  et  $p_{L, PDS} (90; 100)$  et aux points supplémentaires  $p_{L, PDS} (0; 25)$ ,  $p_{L, PDS} (0; 50)$  et  $p_{L, PDS} (0; 100)$  afin de déterminer les pertes du système moteur.

Si d'autres points de charge sont nécessaires, utiliser la méthode d'interpolation décrite à l'Annexe E.

#### 4.2 Points de fonctionnement de référence du PDS/RCDM/RM et pertes associées

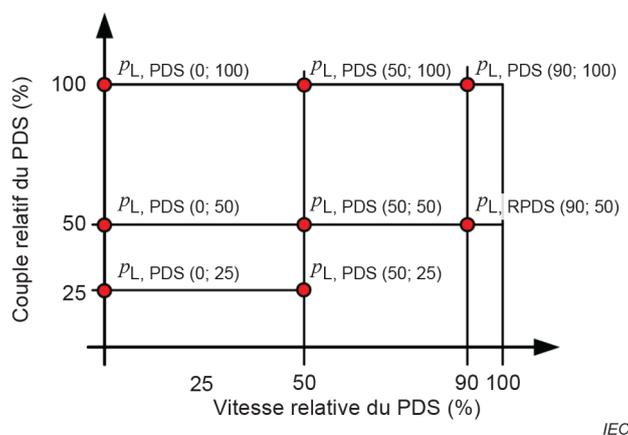
Tous les équipements entraînés peuvent être décrits par la puissance exigée par la machine/application. Les exigences de puissance sont le produit du couple et de la vitesse à un point de fonctionnement quelconque. À chaque point de fonctionnement est associée une perte de puissance dans le système moteur.

L'ensemble des points de fonctionnement (vitesse, couple) auxquels le système moteur peut potentiellement fonctionner est infini. En théorie, il est nécessaire de connaître la quantité des pertes de puissance générées à chaque point. Dans la pratique, il suffit cependant de connaître les pertes de puissance en un nombre limité de points spécifiques (huit) spécifiés pour le PDS sur la Figure 4, le RM sur la Figure 5 et le RCDM sur la Figure 6.

Pour les points de fonctionnement dont les vitesses sont supérieures à zéro, les pertes sont habituellement données sous forme de pourcentage de la puissance de sortie mécanique. Dans d'autres approches, les rendements assignés ( $\eta$ ) sont définis comme le rapport de la puissance de sortie mécanique assignée sur la puissance d'entrée électrique (pertes comprises).

Dans le présent document, les pertes associées à la puissance de sortie nominale de l'entraînement électrique de puissance ( $p$  en %) sont prises en compte à la place du rendement, afin d'assurer la généralité de l'approche produit étendu.

Il existe des équipements entraînés qui exigent un couple à l'arrêt. Pour ces équipements, l'utilisation d'une valeur de rendement dans l'approche produit étendu n'est pas appropriée.



**Figure 4 – Représentation des points de fonctionnement (vitesse de l'arbre, couple) pour la détermination des pertes relatives de l'entraînement électrique de puissance (PDS)**

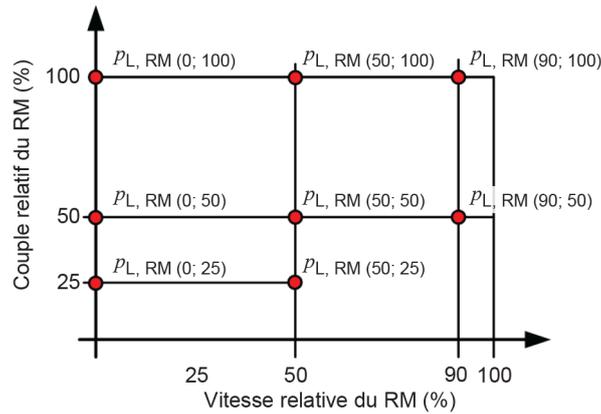
Comme défini, les pertes absolues du PDS doivent correspondre à la somme des pertes du CDM et des pertes du moteur. Ces pertes doivent donc être calculées point par point aux points de fonctionnement représentés à la Figure 5 et à la Figure 6 d'après la Formule (1):

$$R_{L,PDS} = R_{L,M} + R_{L,CDM} \quad (1)$$

À la vitesse et au couple assignés, une formule modifiée selon la Formule (13) doit être utilisée.

Les pertes relatives du PDS sont calculées à partir des pertes relatives du CDM et du moteur représentées dans la Formule (2):

$$p_{L,PDS} = \frac{p_{L,M} \cdot P_{r,M} + p_{L,CDM} \cdot S_{r,CDM}}{P_{r,M}} \quad (2)$$

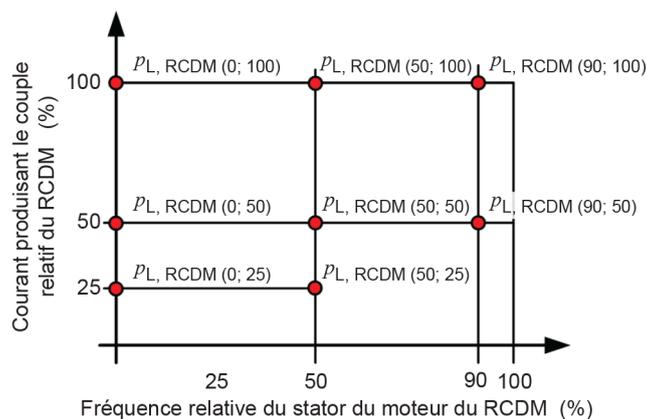


IEC

NOTE Ces points de fonctionnement sont calculés à partir des points de fonctionnement normalisés dans l'IEC 60034-2-3, en utilisant les formules d'interpolation de l'IEC 60034-2-3 et de l'Annexe E.

**Figure 5 – Représentation des points de fonctionnement (vitesse de l'arbre, couple) pour la détermination des pertes relatives de l'entraînement électrique de puissance (PDS)**

Les points de fonctionnement du CDM de référence (RCDM) ne peuvent pas être donnés en pourcentage de la vitesse et du couple des valeurs assignées correspondantes, car le CDM ne délivre en sortie que des courants et des tensions. La tension de sortie fondamentale en courant alternatif doit être limitée à 90 % de la tension d'entrée en courant alternatif afin de permettre une comparaison reproductible et d'éviter toute surmodulation.



IEC

**Figure 6 – Représentation des points de fonctionnement (fréquence relative du stator du moteur, courant produisant le couple relatif) pour la détermination des pertes du module d'entraînement complet de référence (RCDM)**

NOTE 1 Pour des moteurs asynchrones, le courant produisant le couple est le courant du rotor. La relation entre le courant global du moteur et le courant produisant le couple est indiquée dans le Tableau 1.

NOTE 2 Pour des raisons physiques, les points de fonctionnement représentés sur l'axe y de la Figure 6  $P_{L, RCDM(0, n)}$  sont obtenus uniquement avec une tension de sortie non nulle pour que le courant puisse traverser la résistance des enroulements du moteur.

Lorsque cela est exigé, les pertes aux points de fonctionnement intermédiaires peuvent être déterminées par l'une des méthodes de calcul présentées en F.2.1:

- a) interpolation linéaire bidimensionnelle entre des points de fonctionnement voisins;
- b) calcul des pertes du CDM selon le modèle mathématique décrit en 5.2.

Les pertes du moteur sont interpolées par une procédure étendue conformément à l'Annexe E (voir aussi l'IEC 60034-2-3).

À chaque point de fonctionnement, un écart dû au glissement du moteur est admis. Cependant, un écart pouvant aller jusqu'à 25 % de la fréquence nominale est admis uniquement aux points de fonctionnement dont la vitesse est nulle.

Pour les pertes à des points de fonctionnement supplémentaires, en conditions de charge partielle et avec une réduction des points de fonctionnement, voir 8.4 et l'Annexe E.

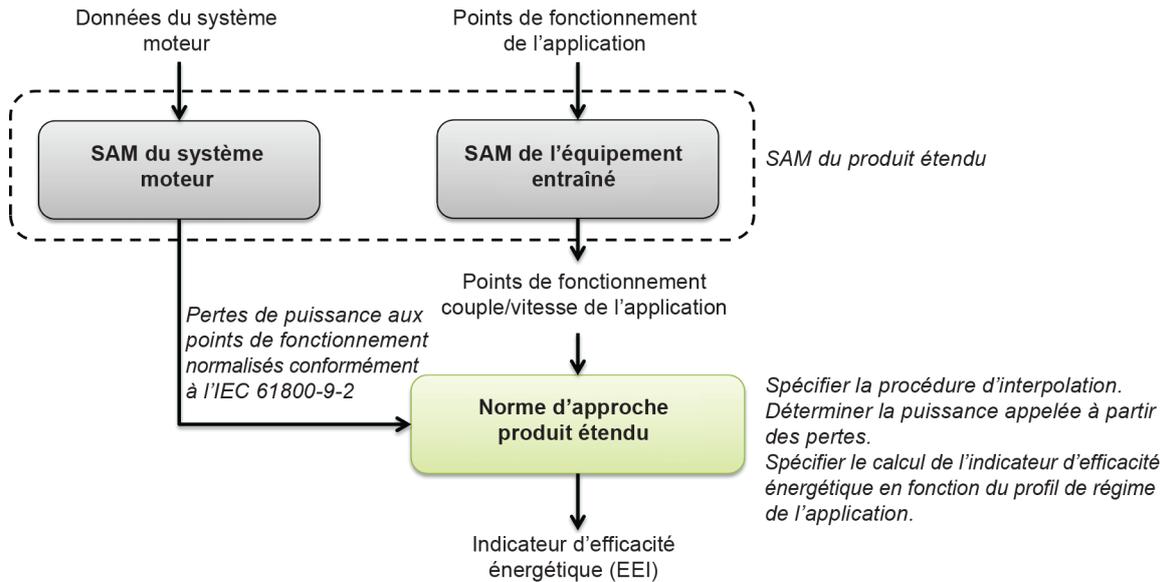
#### **4.3 Combinaison des pertes du PDS avec l'équipement entraîné – Flux de travaux pour le modèle semi-analytique (SAM)**

Le modèle utilisé pour les pertes ou l'indicateur d'efficacité énergétique d'un produit étendu est appelé "modèle semi-analytique" (SAM) et inclut les paramètres physiques et mathématiques ainsi que les algorithmes de calcul des sous-parties d'un produit étendu.

La Figure 7 représente le flux de travaux pour la détermination de la classification d'un produit étendu en fonction de son efficacité énergétique.

S'il existe un SAM de l'équipement entraîné (côté droit), il permet alors d'établir un lien avec le SAM du système moteur (côté gauche). Le lien entre les deux modèles semi-analytiques doit alors être les points de perte de charge du PDS et leurs tolérances admissibles. Les points de fonctionnement nécessaires doivent être fournis par le modèle semi-analytique de l'équipement entraîné.

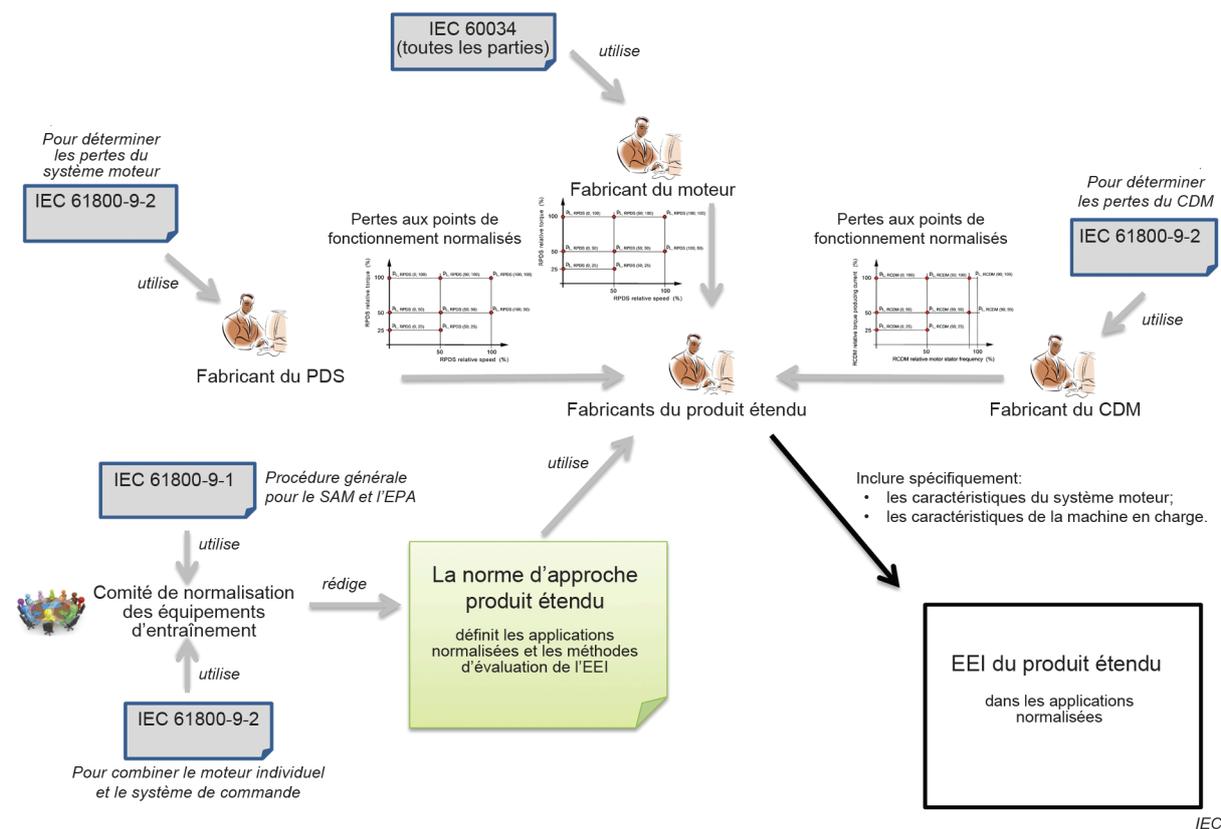
Les données du PDS contenant les pertes du PDS conformément à la Figure 2 (côté gauche de la Figure 7) sont définies dans le présent document, alors qu'il incombe aux comités d'études du produit étendu spécifique de normaliser les SAM accessibles au public pour leurs applications (côté droit de la Figure 7). Un produit étendu des pompes est donné dans l'IEC 61800-9-1. La Figure 8 indique la façon dont les différentes sources de données doivent être combinées.



IEC

**Figure 7 – Responsabilités et flux de travaux pour déterminer l'indicateur d'efficacité énergétique (EEI) d'un produit étendu**

Le présent document spécifie un processus permettant de déterminer les pertes de puissance du système moteur. Le comité en charge du produit étendu spécifie les tolérances qui s'appliquent à ce processus.



NOTE 1 Les fournisseurs du moteur et du CDM peuvent fournir directement les données au fournisseur du système moteur.

NOTE 2 Si le système moteur repose sur un démarreur, seules les pertes du moteur sont alors nécessaires en tant qu'éléments d'entrée de l'EPA.

**Figure 8 – Combinaison de différentes sources de données pour déterminer l'indicateur d'efficacité énergétique (EEI) d'un produit étendu**

**4.4 Classes IE des moteurs alimentés par le réseau**

L'IEC 60034-30-1 définit les classes IE pour les moteurs fonctionnant directement sur le réseau (IE1 à IE4). La plage au-delà d'IE4 n'est actuellement pas utilisée pour les moteurs alimentés par le réseau.

**4.5 Classes IE des moteurs alimentés par des convertisseurs**

Selon l'IEC 60034-2-3, la teneur en tensions harmoniques d'un CDM accroît d'environ 15 % à 25 % les pertes du moteur pour les machines à induction.

Les moteurs qui relèvent à la fois des normes IEC 60034-30-1 et IEC TS 60034-30-2, c'est-à-dire qui sont à courant alternatif et dimensionnés pour fonctionner à la fois directement sur le réseau et à vitesse variable (moteurs à deux caractéristiques assignés), doivent porter la classe de rendement IE conformément à la procédure décrite dans l'IEC 60034-30-1 uniquement. La plupart des moteurs à induction ou des moteurs à aimant permanent à démarrage en ligne constituent des exemples de tels moteurs. Les pertes pour les 7 points de fonctionnement définis peuvent être extrapolées à partir de l'Annexe E. Les pertes pour ces points doivent être fournies par le fournisseur du moteur en utilisant l'IEC 60034-2-3. L'autre méthode de détermination du rendement (AEDM) déterminée peut également être utilisée dans l'IEC 60034-2-3.

#### **4.6 Classes IE des convertisseurs de fréquences (modules d'entraînement complets, CDM)**

La classe IE d'un CDM, IE0 à IE2, est déterminée en comparant les pertes du CDM aux pertes du RCDM, conformément à l'Article 6.

Pour déclarer la classe de rendement du CDM sans considérer le PDS complet qui en résulte et pour rendre compte de l'impact technologique du paramètre le plus significatif, l'unité définie qui doit être utilisée est appelée la "charge d'essai".

Le point de fonctionnement pour la détermination de la classe IE est 90 % de vitesse et 100 % de couple et il doit être déterminé conformément à l'Article 6.

Les CDM à fonctionnalité modifiée, tels que les AIC conformément à l'IEC TS 62578, ou les CDM ayant un THC du courant de réseau inférieur ou égal à 10 % (selon l'IEC 61000-3-12), sont classés en utilisant le concept du facteur de correction conformément au paragraphe 6.3.2.

#### **4.7 Classes IES d'un PDS**

La classification du PDS doit être déclarée sur une plage allant d'IES0 à IES5 inclus.

Les pertes relatives d'un PDS doivent être déterminées par calcul ou par mesurage. Il s'agit d'une exigence pour les produits intégrés et d'une option pour les autres. Le calcul doit être la somme arithmétique des pertes absolues du moteur alimenté par convertisseur plus celles du convertisseur et des accessoires ou d'une AEDM. Voir l'Article 1 pour plus de détails.

Le point de fonctionnement pour la détermination de la classe IES est 90 % de vitesse et 100 % de couple et il doit être déterminé conformément à l'Article 6.

#### **4.8 Cohérence des classes IE et IES**

Il est important de comprendre que les classes IE de composants individuels tels que les moteurs à courant alternatif alimentés par des convertisseurs, les moteurs fonctionnant directement sur le réseau, ou les CDM ne peuvent être cumulées pour obtenir la classe IES d'un PDS.

La classification IES des PDS ne peut être déterminée que par les procédures spécifiées en 4.9, les pertes de tous les composants étant connues de façon détaillée.

Des classes IE individuelles sont exigées pour la classification des composants sans connaissance préalable du produit étendu.

En général, des classes IE ou IES plus élevées démontrent un rendement accru ou des pertes de puissance relatives réduites. La Figure 9 donne un exemple de classes IE et IES pour un moteur de 7,5 kW / 1 500 tr/min et un CDM de 9,95 kVA.

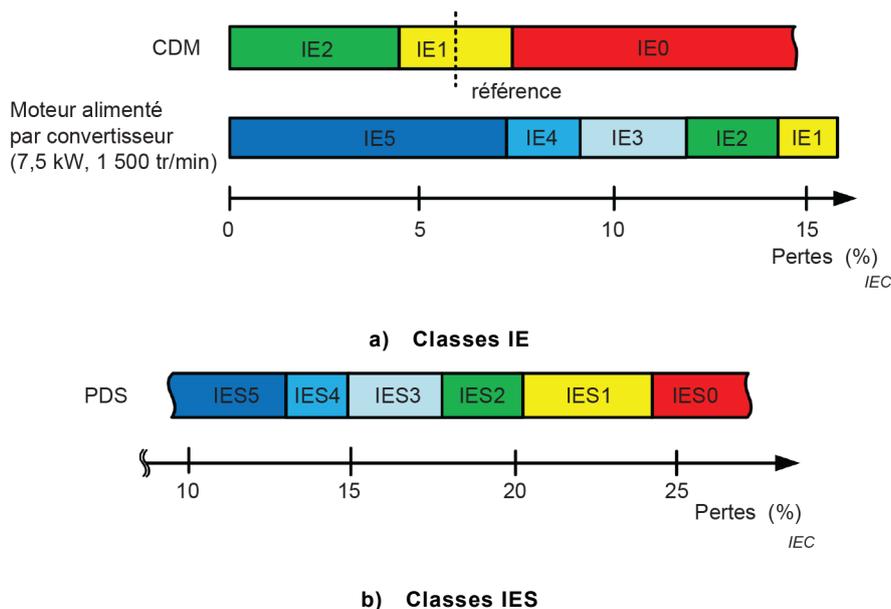


Figure 9 – Relation métrique

#### 4.9 Détermination de la classe IES d'un PDS à l'aide de dispositifs "de référence" et "d'essai" et recommandations à l'attention des fournisseurs

Les méthodes de détermination des pertes et des classes IE d'un moteur sont spécifiées dans la série IEC 60034-30 – voir aussi la Figure 9. Les fournisseurs peuvent également définir une classe IES pour un PDS qui utilise leur moteur. Dans ce cas, les pertes relatives du moteur choisi lorsqu'il fonctionne sur un RCDM doivent être déterminées.

Le fournisseur d'un CDM doit déclarer les pertes de son CDM spécialisé et afficher une classe IE selon la Figure 16. Il peut également déclarer une classe IES pour un PDS équipé d'un CDM. Dans ce cas, les pertes du CDM choisi doivent être mesurées ou calculées. En l'absence de données réelles relatives au moteur, les pertes du RM doivent être utilisées.

Le fournisseur du CDM peut fournir, dans la documentation, des informations indiquant les méthodes de détermination décrites à l'Article 7 qui ont été utilisées. Ces informations comprennent les classes IES attendues pour les différentes combinaisons d'un CDM et de moteurs spécifiques sélectionnés à l'aide des méthodes du présent document.

L'une des fonctions de commande disponibles du CDM ou la totalité de ces fonctions peuvent être utilisées afin de réduire le plus possible les pertes lors de l'évaluation du PDS. Elles doivent également être consignées dans le dossier d'évaluation.

La Figure 10 représente une feuille de calcul pour l'application de dispositifs "d'essai" et "de référence" afin de déterminer les classes IE et IES. Elle fournit également des recommandations destinées aux seuls fournisseurs de CDM ou de moteurs concernant la détermination de la classe IES d'un PDS résultant combiné aux dispositifs "d'essai" ou "de référence".

Le champ en haut à gauche à l'intersection de la ligne "Moteur" et de la colonne "CDM" s'applique aux fournisseurs de PDS.

Les coefficients d'interpolation  $c_{Ln}$  calculés avec la Formule (E.8) peuvent ensuite être utilisés pour calculer les pertes à un point de fonctionnement arbitraire à l'aide de la Formule (E.4) ou de la Formule (E.5), suivant le cas.

Combinaison de	CDM	CDM d'essai	CDM de référence (RCDM)	
<b>Moteur</b>	Déterminer la classe IES du PDS résultant	Déterminer la classe IE du moteur donné (IEC TS 60034 2-3)	Déterminer la classe IES du PDS résultant	<b>Recommandations pour le fabricant du moteur</b>
<b>Charge d'essai</b>	Déterminer la classe IE du CDM donné	Combinaison non utilisée	Combinaison non utilisée	
<b>Moteur de référence (RM)</b>	Déterminer la classe IES du PDS résultant	Combinaison non utilisée	Modèle de calcul d'un PDS de référence	
	<b>Recommandations pour le fabricant du CDM</b>			

IEC

Un moteur de référence est un moteur à utiliser pour la classification IES et est à choisir dans l'IEC TS 60034-30-2.

**Figure 10 – Recommandations destinées aux fournisseurs de CDM et de moteurs concernant l'utilisation des dispositifs "d'essai" et "de référence" pour déterminer les classes IE/IES**

Cette approche permet de déterminer la classe de rendement IES d'un PDS final, même lorsqu'un seul composant (le moteur ou le CDM) est disponible.

## 5 Détermination par calcul des pertes du CDM, du moteur et du PDS

### 5.1 Généralités

Des modèles mathématiques peuvent être utilisés pour déterminer les pertes du CDM, du moteur et du PDS. Ils permettent de calculer les pertes d'un produit sans effectuer de mesurages.

Des modèles simples d'état de l'art en matière de calcul des pertes sont fournis à l'Annexe C. Ces modèles sont composés de formules, de variables et de paramètres. Les formules et les procédures de calcul de pertes sont généralement acceptées aujourd'hui et publiées dans les ouvrages de référence. Les variables dépendent du point de fonctionnement du CDM, du moteur ou du PDS évalué. Les paramètres sont des valeurs physiques qui décrivent un produit physique. Afin de déterminer les pertes d'un produit, il est nécessaire de définir ces paramètres selon la conception spécifique du produit.

Les fournisseurs de CDM peuvent utiliser leur propre modèle analytique pour déterminer les pertes du CDM de façon plus détaillée; les fournisseurs sont toutefois responsables de l'exactitude correcte du modèle.

S'il est nécessaire qu'un comité en charge du produit étendu définisse un CDM ou un PDS type pour leur(s) application(s) réservée(s), les paramètres du CDM ou PDS type pour ces applications spécifiques peuvent être utilisés. Ces écarts doivent être prévus dans la norme de produit étendu.

Pour le CDM de référence (RCDM), les paramètres de référence sont définis en 5.2 et à l'Annexe C.

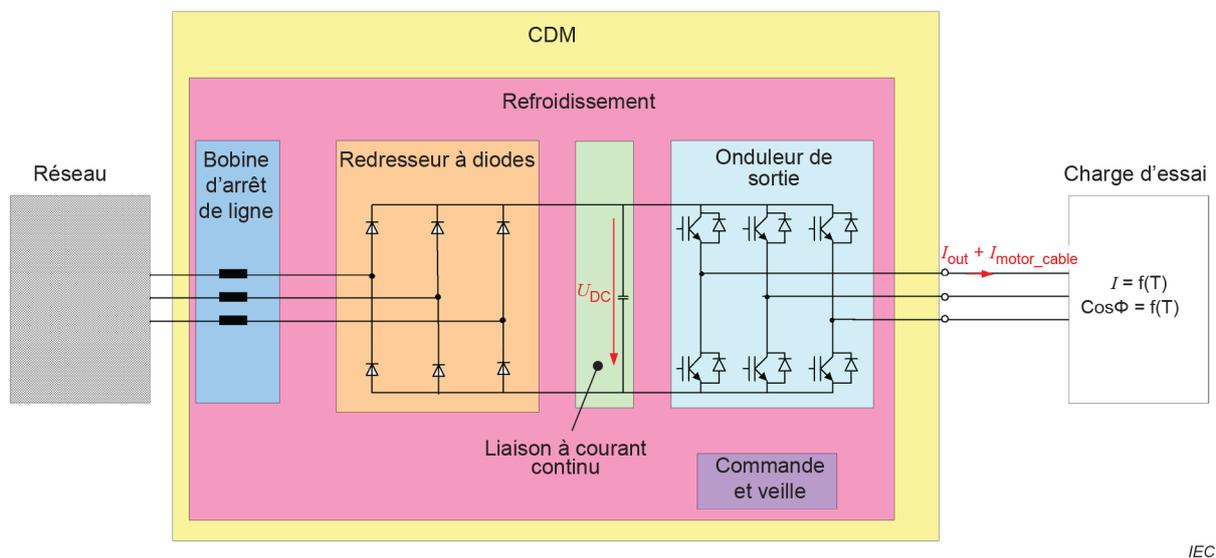
Pour le moteur de référence (RM), les paramètres de référence sont mentionnés en 5.3.3.

La procédure de détermination des pertes est présentée à l'Article 7.

## 5.2 Pertes du CDM

### 5.2.1 Procédure générale et définition du CDM et de la charge d'essai

Un CDM et une charge d'essai types sont représentés à la Figure 11.



IEC

**Figure 11 – Représentation d'un CDM et d'une charge d'essai types**

L'objectif est de décrire les pertes du CDM en fonction du couple et de la vitesse du PDS. Cependant, les pertes du CDM dépendent de sa tension de sortie fondamentale relative, de son courant de sortie fondamental relatif, ainsi que de l'angle de phase entre la tension de sortie fondamentale du CDM et le courant de sortie fondamental du CDM.

La tension de sortie relative est approximativement égale à la fréquence de sortie relative. Cette égalité est au moins vraie dans la plage de fonctionnement jusqu'à la vitesse nominale du moteur. Dans la plage de fonctionnement en régime défluxé, la tension de sortie relative du CDM reste égale à 1,00 pour toutes les vitesses de moteur supérieures à la vitesse nominale du moteur (voir aussi l'Annexe I).

La première étape consiste à convertir la vitesse du moteur en fréquence de sortie du CDM. Le couple du moteur doit également être converti en courant de sortie du CDM et en angle de phase entre le courant de sortie fondamental et la tension de sortie du CDM.

Dans une première approximation, la vitesse de sortie relative du PDS peut être considérée comme identique à la fréquence de sortie relative du CDM.

Pour l'évaluation du CDM ou du SDOM, les données représentées dans le Tableau 1 et le Tableau 2, obtenues par des mesurages effectués sur des moteurs physiques doivent servir de données pour la charge d'essai pour toutes les fréquences relevant du domaine d'application:

**Tableau 1 – Courants de charge d'essai minimaux à différents points de fonctionnement**

Courant produisant le couple %	Courant de charge d'essai $\frac{I_{out}}{I_{r,out}}$ pour la plage de puissances apparentes $S_{r,eq}$ de				
	0,278 kVA (0,12 kW) à < 1,29 kVA (0,75 kW)	1,29 kVA (0,75 kW) à < 7,94 kVA (5,5 kW)	7,94 kVA (5,5 kW) à < 56,9 kVA (45 kW)	56,9 kVA (45 kW) à < 245 kVA (200 kW)	245 kVA (200 kW) à < 1 209 kVA (1 000 kW)
25	0,79	0,58	0,45	0,42	0,39
50	0,81	0,71	0,60	0,58	0,56
75	0,89	0,82	0,79	0,78	0,77
100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

**Tableau 2 – Facteur de déphasage de la charge d'essai entre le courant de sortie fondamental et la tension de sortie fondamentale à différents points de fonctionnement**

Courant produisant le couple %	Facteur de déphasage de la charge d'essai $\cos \phi$ pour la plage de puissances apparentes $S$ de				
	0 278 kVA (0,12 kW) à < 1,29 kVA (0,75 kW)	1,29 kVA (0,75 kW) à < 7,94 kVA (5,5 kW)	7,94 kVA (5,5k W) à < 56,9 kVA (45 kW)	56,9 kVA (45 kW) à < 245 kVA (200 kW)	245 kVA (200 kW) à < 1 209 kVA (1 000 kW)
25	0,34	0,38	0,49	0,54	0,57
50	0,51	0,60	0,71	0,75	0,78
75	0,64	0,72	0,80	0,83	0,85
100 <sup>a</sup>	0,73	0,79	0,85	0,86	0,87

Tous les facteurs de déphasage exigés dans le Tableau 2 s'appliquent lors du chargement d'un CDM ou d'un SDOM à 25 –75 % avec une charge électronique.

<sup>a</sup> Lors du chargement d'un CDM ou d'un SDOM avec un moteur, seule l'exigence de 100 % s'applique.

NOTE Lors du calcul des pertes du CDM ou du SDOM, l'exigence relative au facteur de déphasage est identique à celle de l'utilisation d'une charge électronique.

Lors du chargement d'un CDM ou d'un SDOM avec un moteur, l'exigence relative au facteur de déphasage ne prévaut qu'à 100 % du courant de charge. Cette exigence doit être satisfaite avec une tolérance de ±0,08. Si cette exigence n'est pas satisfaite, le moteur de charge doit être changé.

Le courant de la charge d'essai du Tableau 1 et l'angle de phase de la charge d'essai du Tableau 2 pour différentes valeurs de couple associées dépendent de la puissance assignée. Pour limiter la quantité de données exigées, les moteurs situés dans une certaine plage de puissances ont été regroupés dans une seule classe. L'incertitude sur les pertes de puissance résultant de l'introduction du CDM est suffisamment faible pour justifier la simplification. Les données du Tableau 1 et du Tableau 2 relatives à la charge d'essai peuvent être utilisées quelle que soit la fréquence de sortie relative du CDM. Pour les courants produisant le couple qui diffèrent des points de fonctionnement définis dans le Tableau 1 et le Tableau 2, les données doivent être obtenues par interpolation et extrapolation linéaires à partir des valeurs définies.

Le modèle mathématique d'un CDM ou d'un SDOM doit être calculé en utilisant son courant de sortie assigné. Si un CDM n'est pas spécifié avec un courant de sortie assigné, mais seulement avec une puissance réelle assignée  $P_{r,M}$ , son courant de sortie assigné du CDM doit être calculé à partir de la puissance réelle assignée à l'aide de la Formule (3), qui utilise l'angle de phase du Tableau 2 et le rendement IE2  $\eta$  défini dans l'IEC 60034-30-1:

$$I_{r,out} = \frac{P_{r,M}}{\sqrt{3} \cdot U_{1,r,out} \cdot \cos\Phi \cdot \eta_{nMotor}} \quad (3)$$

La puissance de sortie apparente assignée du CDM doit être calculée comme représenté dans la Formule (4):

$$S_{r,equ} = \sqrt{3} \cdot U_{1,r,out} \cdot I_{r,out} = \frac{P_{r,M}}{\cos\Phi \cdot \eta_{nMotor}} \quad (4)$$

Pour le calcul des pertes d'un CDM, les éléments de pertes suivants doivent être pris en compte:

- pertes de l'étage onduleur de sortie;
- pertes du convertisseur d'entrée;
- pertes des bobines d'arrêt d'entrée;
- pertes de la liaison à courant continu;
- pertes du rail d'alimentation en courant;
- pertes de commande et pertes en veille;
- facteur de perte de refroidissement.

Toutes les pertes dans les autres parties du CDM peuvent être négligées dans le modèle mathématique car elles sont nettement plus faibles que les pertes décrites ci-dessus.

Pour calculer les pertes d'un CDM avec les variables d'entrée du Tableau 1 et du Tableau 2, les Formules analytiques (C.1) à (C.10) et (5) et (6) ci-dessous peuvent être utilisées. Pour calculer les pertes d'un CDM physique, les valeurs des paramètres du CDM physique doivent être utilisées. Seuls les éléments inclus des modules doivent être pris en compte pour calculer les pertes d'un SDIM ou d'un SDOM.

Le Tableau 7 donne les résultats des calculs du RCDM pour la détermination de la classe IE et le Tableau A.1 donne les résultats pour les huit points de fonctionnement définis à la Figure 6. Le RCDM est basé sur une tension d'alimentation de 400 V.

### 5.2.2 Pertes globales du CDM

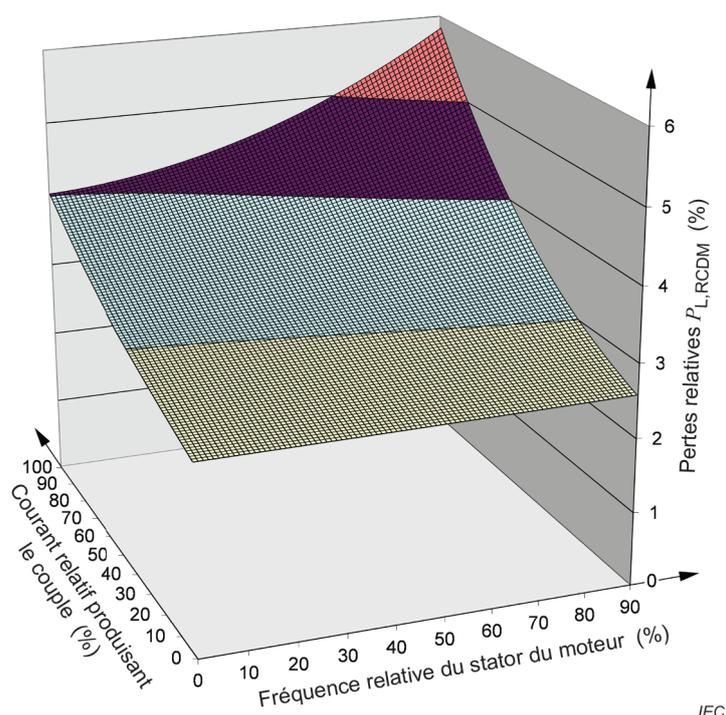
Toutes les pertes dans le CDM doivent être calculées par rapport à la puissance de sortie apparente assignée du PDS, formée par la tension de phase de sortie assignée et le courant de sortie assigné du CDM. Les pertes absolues du CDM finalement obtenues en 5.2 et à l'Annexe C sont calculées dans la Formule (5):

$$P_{L,CDM} = P_{L,inverter} + P_{L,rectifier} + P_{L,choke} + P_{L,rails} + P_{L,DC\_link} + P_{L,control} + P_{L,cooling} \quad (5)$$

Les pertes relatives du CDM sont calculées dans la Formule (6):

$$p_{L,CDM} = \frac{P_{L,CDM}/kW}{S_{r,equ}/kVA} \tag{6}$$

La Figure 12 ci-dessous représente la relation entre le courant relatif produisant le couple, la fréquence relative du stator du moteur et les pertes relatives  $p_{L,CDM,relative}$  du CDM de référence de 9,95 kVA (voir Tableau 7) fonctionnant à 400 V:



**Figure 12 – Exemple de pertes relatives  $p_{L,CDM}$  du RCDM de 9,95 kVA**

Le Tableau 3 ci-dessous indique les pertes relatives du CDM de référence de 400 V/9,95 kVA aux points de fonctionnement définis à la Figure 6:

**Tableau 3 – Exemple de pertes relatives du CDM de référence de 400 V/9,95 kVA aux points de fonctionnement décrits à la Figure 6**

$S_{r,equ}$	$I_{rout}$	$p_{L,RCDM}$ (0;25)	$p_{L,RCDM}$ (0;50)	$p_{L,RCDM}$ (0;100)	$p_{L,RCDM}$ (50;25)	$p_{L,RCDM}$ (50;50)	$p_{L,RCDM}$ (50;100)	$p_{L,RCDM}$ (90;50)	$p_{L,RCDM}$ (90;100)
kVA	A	%	%	%	%	%	%	%	%
9,95	14,4	2,80	3,09	4,02	2,86	3,28	4,64	3,61	5,84

La valeur de 5,84 % de pertes se rapporte à la puissance de sortie apparente assignée de 9,95 kVA, ce qui donne une valeur de pertes absolues de 581 W. Les pertes relatives des CDM avec une puissance assignée différente sont données pour le point de fonctionnement (90;100) dans le Tableau 7 et dans le Tableau A.1 pour tous les points de fonctionnement définis à la Figure 6.

### 5.2.3 Détermination des pertes des CDM formés par combinaison de sous-modules

Les pertes d'un CDM formé par une combinaison de SDIM et de SDOM doivent être déterminées en additionnant les pertes des sous-modules, en considérant qu'elles représentent le même point de fonctionnement.

$$P_{L,CDM} = P_{L,SDIM} + P_{L,SDOM} \quad (7)$$

Pour déterminer les pertes du SDOM, les points de fonctionnement du CDM sont définis et doivent être utilisés. Pour ces points de fonctionnement, les pertes correspondantes du SDIM doivent être déterminées. Il est alors nécessaire de calculer le courant de sortie équivalent du CDM du SDIM  $I_{CDMe,SDIM,out}$ .

En présumant que la puissance active à la sortie résultante du CDM/SDOM et la sortie SDIM sont identiques:

$$P_{out,CDM} = \sqrt{3} U_{1,r,out} I_{r,out} \cos\Phi_{(90,100)} = P_{CDMe,SDIM} = U_{dc} I_{CDMe,SDIM,out} \quad (8)$$

le courant de sortie du SDIM équivalent au CDM peut être calculé d'après:

$$I_{CDMe,SDIM,out} = \sqrt{3} \frac{U_{1,r,out}}{U_{DC}} I_{r,out} \cos\Phi_{(90,100)} \quad (9)$$

NOTE Les pertes du SDOM sont relativement faibles par rapport à la puissance assignée du SDOM et sont donc négligées pour ce calcul.

La tension de la liaison à courant continu du SDIM dépend de la technologie du convertisseur. Pour un redresseur à pont de diodes, le rapport entre la tension de la liaison à courant continu et de la tension de sortie du CDM est d'environ 1,35, ce qui est un minimum pour cette relation sans surmodulation significative.

Pour obtenir des informations sur la charge partielle des points de fonctionnement du SDIM comparables aux points de fonctionnement du CDM, la puissance active au niveau du SDIM aux points de fonctionnement à charge partielle doit être utilisée. En présumant que la puissance active de la sortie résultante du CDM et de la sortie du SDIM sont également identiques en condition de charge partielle, la puissance active du SDIM au point de fonctionnement à charge partielle ( $f_{op}, i_{op}$ ) est donnée par:

$$P_{SDIM}(f_{op}, i_{op}) = P_{CDMe,SDIM}(f_{op}) \frac{I_{out}(i_{op}) \cos\Phi(f_{op}, i_{op})}{I_{1,r,out} \cos\Phi_{(90,100)}} \quad (10)$$

où

$I_{out}/I_{1,r,out}$  est le courant de charge d'essai donné dans le Tableau 1;

$\cos\Phi(f_{op}, i_{op})$  est le facteur de déphasage correspondant de la charge d'essai donné dans le Tableau 2.

L'indice de modulation  $m$  est proportionnel à la tension de sortie de l'onduleur, et donc proportionnel à  $f_{op}$ .

Ces facteurs dépendent de la valeur assignée de puissance du CDM et les facteurs appropriés du Tableau 1 et du Tableau 2 s'appliquent. Ainsi, le calcul des pertes peut être effectué à chaque point de fonctionnement et pour chaque valeur assignée de puissance nominale.

Pour les points de fonctionnement du CDM définis au paragraphe 4.2, la puissance active du SDIM  $P_{SDIM(f_{op}, i_{op})}$  indiquée dans le Tableau 4, ou les valeurs calculées/mesurées pour n'importe quel point, doivent être utilisées pour déterminer les pertes du SDIM par calcul ou par mesurage. Une interpolation linéaire entre points de fonctionnement voisins peut être utilisée pour déterminer les pertes aux points de fonctionnement non définis en 7.5.4.

L'Article F.5 fournit des informations détaillées sur le calcul du rapport de puissance correspondant pour les points de fonctionnement définis.

**Tableau 4 – Rapport de puissance active du SDIM à utiliser pour le calcul des pertes aux points de fonctionnement du CDM**

Point de fonctionnement du CDM  $(f; i)$	Puissance active du SDIM  $\frac{P_{SDIM}}{P_{CDMe,SDIM}}$  %
(90; 100)	90
(50; 100)	50
(0; 100)	10
(90; 50)	50
(50; 50)	25
(0; 50)	5
(50; 25)	10
(0; 25)	5

#### 5.2.4 Validation de la méthode de calcul des pertes

La méthode de calcul des pertes doit être validée en comparant les résultats du calcul aux mesurages de pertes réalisés sur le CDM et le SDM en utilisant l'une des méthodes de mesure décrites en 7.5.

- Validation d'une seule taille de CDM/SDM

La qualification est effectuée au point de fonctionnement (90;100), le même point que celui utilisé pour déterminer la classe IE. Le calcul ou la simulation doit être validé par comparaison avec un résultat de mesure. La valeur de pertes calculée doit être à  ${}_{+30}^{-10}$  % de la valeur mesurée.

- Validation d'une gamme de CDM/SDM

Lorsqu'une gamme de CDM/SDM de conception similaire (par exemple une même famille de produits) est validée, au moins une validation doit être effectuée par un mesurage sur une décade de la valeur assignée de puissance ou de courant. Par exemple, si la valeur assignée est de 1 kVA à 10 kVA, une validation d'essai est au minimum nécessaire.

### 5.3 Pertes du moteur

#### 5.3.1 Généralités

L'utilisation des moteurs asynchrones triphasés est très répandue dans les applications industrielles. Ces produits sont des produits normaux et fonctionnent généralement directement sur le réseau. De nombreux moteurs sont également capables de fonctionner aux tension et fréquence variables délivrées par un CDM.

Afin de déterminer les pertes, les rendements et la classe de rendement d'un PDS, des informations relatives aux pertes du moteur sont nécessaires à l'utilisateur. Ces informations peuvent être obtenues:

- auprès du fournisseur du moteur; ou
- à partir du rendement du moteur de référence tel qu'indiqué à l'Annexe A de l'IEC 60034-30-1:2014 et dans l'IEC 60034-2-3 (0 % à 100 % de couple et de vitesse); ou
- à partir des pertes types des machines normales indiquées à l'Annexe E.

La procédure d'interpolation indiquée à l'Annexe E doit être appliquée pour obtenir les pertes et le rendement à tout point de fonctionnement exigé (charge, couple), par exemple celles du 4.2, à partir des pertes spécifiées par le fournisseur aux sept points de référence (voir Tableau E.1).

#### 5.3.2 Pertes supplémentaires dues aux harmoniques des moteurs asynchrones triphasés alimentés par un CDM

Souvent, les pertes des moteurs à induction triphasés n'apparaissent que lors d'un fonctionnement sur le réseau sous une tension strictement sinusoïdale. Lorsque ce type de moteur fonctionne sur un CDM, les pertes supplémentaires dues aux harmoniques  $P_{LHL}$  sont générées par l'alimentation en tension non sinusoïdale.

Il convient de préférence de soumettre le moteur à un nouvel essai sur un CDM afin de déterminer ces pertes (voir Annexe E).

En variante, les pertes supplémentaires dues aux harmoniques peuvent être déterminées en utilisant un rapport  $r_{HL}$  fixe comme valeur d'estimation.

$r_{HL}$  représente le rapport des pertes supplémentaires dues aux harmoniques de l'alimentation par le convertisseur, sur les pertes du moteur alimenté avec une tension d'entrée sinusoïdale aux puissance et fréquence nominales (voir l'IEC 60034-2-3).

Les pertes totales sont calculées comme suit:

$$R_{LHL} = (1 + r_{HL}) \cdot R_{LTsin} \quad (11)$$

où

$P_{LTsin}$  correspond aux pertes totales déterminées à une alimentation sinusoïdale à tout point de fonctionnement;

$P_{LHL}$  correspond aux pertes totales estimées pour une alimentation par CDM à ce point de fonctionnement.

Les pertes supplémentaires dues aux harmoniques générées par une alimentation par le convertisseur doivent être considérées comme étant constantes et indépendantes de la charge et de la vitesse. Ces pertes dépendent de la fréquence de commutation.

À moins que les mesurages conformes à l'IEC TS 60034-30-2 ne permettent de déterminer  $r_{HL}$ , les estimations suivantes doivent être utilisées:

- $r_{HL} = 0,15$  (15 %) pour les moteurs avec une puissance de sortie assignée jusqu'à 90 kW et une fréquence de commutation de 4 kHz;
- $r_{HL} = 0,25$  (25 %) pour les moteurs avec une puissance de sortie assignée supérieure à 90 kW et une fréquence de commutation de 2 kHz.

NOTE Pour les fréquences de commutation dépassant les valeurs données, les valeurs  $r_{HL}$  données sont considérées comme des approches conservatrices.

### 5.3.3 Données relatives aux pertes du moteur

Les valeurs du moteur doivent être extraites de l'IEC TS 60034-30-2.

L'IEC TS 60034-31 s'applique à toutes les machines électriques couvertes par l'IEC 60034-1, l'IEC 60034-30-1 et l'IEC TS 60034-30-2.

## 5.4 Pertes d'entraînement électrique de puissance (PDS)

### 5.4.1 Pertes du PDS

Les pertes de puissance électrique résultantes du PDS à un point de fonctionnement vitesse ( $n$ )/couple ( $T$ ) spécifique correspondent à la somme des pertes de puissance électrique des sous-composants du PDS selon la Formule (12):

$$P_{L,PDS(n;T)} = P_{L,CDM(f;I)} + P_{L,Acc(f;I)} + P_{L,Mot(n;T)} \quad (12)$$

où

$P_{L,CDM}$  représente les pertes du CDM selon les méthodes de 5.2 et de l'Annexe C;

$P_{L,Mot}$  représente les pertes du moteur selon les méthodes de 5.3;

$P_{L,Acc}$  représente les pertes des accessoires selon Annexe B.

Les pertes sont généralement calculées d'après la Formule (12). En revanche, les pertes du PDS à 100 % de vitesse et 100 % de couple sont déterminées d'après la Formule (13) en utilisant le point 90 % de fréquence/100 % de couple du RCDM, ainsi que le point 100 % de vitesse/100 % de couple du moteur.

La valeur de 90 % de fréquence du CDM est utilisée pour éviter la surmodulation qui apparaîtrait pour 100 % de fréquence du CDM. La surmodulation réduit les pertes du CDM mais augmente les pertes dues aux harmoniques du moteur en raison d'un contenu harmonique plus élevé dans les tensions et courants du moteur.

Le calcul des pertes du PDS prend pour hypothèse que les pertes du CDM au point de fonctionnement 100 % de fréquence/90 % de tension sont les mêmes que pour le point de fonctionnement 90 % de fréquence/90 % de tension. Il est également présumé que les pertes dues à la fréquence fondamentale du RM augmentent par rapport à la Formule (12) d'un facteur de correction  $k_{VD} = 1,11$  (pour une chute de tension de 10 %).

$$P_{L,PDS(100;100)} = P_{L,RCDM(90;100)} + k_{VD} \cdot P_{L,RM(100;100)} \quad (13)$$

Le paramètre par défaut de la Formule (13) est indiqué dans le Tableau 5.

**Tableau 5 – Paramètre de référence de la Formule (13)**

Abréviation	Description	Valeur	Unité
$k_{VD}$	Facteur de correction des pertes du moteur pour le PDS	1,11	

Pour le calcul des pertes d'un PDS réel, il incombe au fournisseur du PDS d'ajouter toutes les pertes relevant du PDS, par exemple moteur, CDM, accessoires (filtre, câble, etc.).

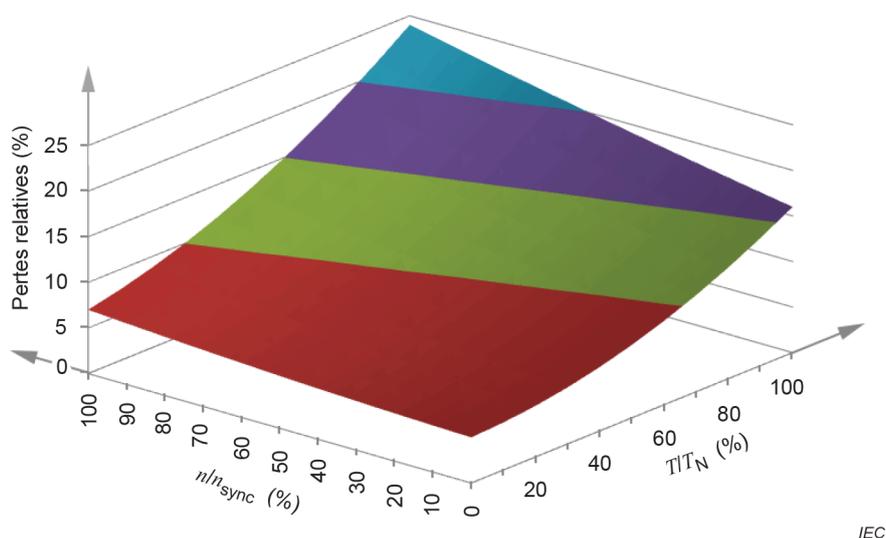
Le Tableau 6 présente les pertes relatives d'un PDS de 400 V/7,5 kW (RCDM et RM) aux points de fonctionnement définis à la Figure 6.

**Tableau 6 – Pertes relatives du PDS de 400 V/7,5 kW**

$P_{r, M}$	$p_{L, PDS, \text{relative}}(0;25)$	$p_{L, PDS, \text{relative}}(0;50)$	$p_{L, PDS, \text{relative}}(0;100)$	$p_{L, PDS, \text{relative}}(50;25)$	$p_{L, PDS, \text{relative}}(50;50)$	$p_{L, PDS, \text{relative}}(50;100)$	$p_{L, PDS, \text{relative}}(90;50)$	$p_{L, PDS, \text{relative}}(90;100)$
kW	%	%	%	%	%	%	%	%
7,5	6,14	7,83	15,10	7,74	9,69	17,90	12,02	21,86

NOTE Cet exemple de PDS est basé sur un moteur IE2 de 7,5 kW/1 500 tr/min et un CDM IE2 de 9,95 kVA sans facteur de correction appliqué.

La Figure 13 donne un exemple de pertes relatives. Toutes les valeurs relatives se rapportent à la puissance de sortie assignée du PDS.

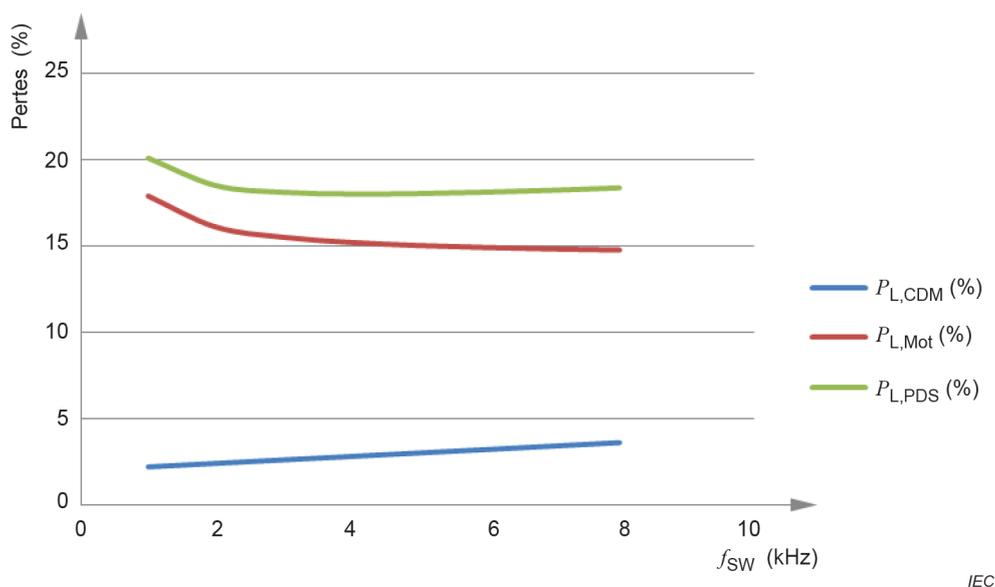
**Figure 13 – Exemple de pertes de puissance relatives d'un PDS en fonction de la vitesse et du couple**

#### 5.4.2 Pertes du PDS à différentes fréquences de commutation

Les PDS fonctionnent souvent à des fréquences de commutation diverses ou différentes. La fréquence de commutation est un paramètre important pour calculer les pertes du CDM. Lorsque la fréquence de commutation augmente, les pertes du CDM augmentent également, mais les pertes supplémentaires dues aux harmoniques du moteur diminuent.

Les pertes de puissance résultantes d'un PDS pour une fréquence de commutation spécifique représentent la somme des pertes de puissance électrique des sous-composants du PDS (voir Formule (14) et exemple de la Figure 14) lorsque le point de fonctionnement (vitesse, couple) reste constant.

$$P_{L,PDS}(f_{sw}) = P_{L,CDM}(f_{sw}) + P_{L,Acc}(f_{sw}) + P_{L,Mot}(f_{sw}) \quad (14)$$



**Figure 14 – Exemple de représentation des pertes de puissance relatives en fonction de la fréquence de commutation d'un PDS de 7,5 kW à 11 kW**

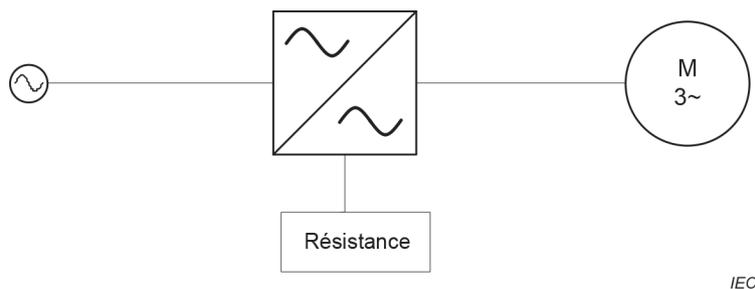
### 5.5 Pertes du PDS pour le fonctionnement en récupération

Certains PDS sont capables de traiter des charges de récupération, c'est-à-dire des charges qui produisent de la puissance électrique. La puissance peut être produite en décélérant l'inertie d'une charge ou d'un moteur, ou à partir du couple que produit la charge (par exemple le souffle de vent d'un ventilateur dû à l'air extérieur).

Certains PDS sont capables de transmettre la puissance produite au réseau en utilisant un convertisseur à alimentation active (AIC). La puissance transmise au réseau est la puissance électrique produite du générateur/moteur, moins les pertes du CDM.

Un CDM peut également dissiper la puissance produite en chaleur, qui est répartie à l'intérieur ou à l'extérieur du CDM (par exemple par une résistance) (voir Figure 15).

Un CDM peut également être en mesure de stocker de l'énergie électrique dans des batteries, des condensateurs ou des technologies similaires. Cette énergie peut être réutilisée ultérieurement lorsque la puissance active du moteur est nécessaire. Ces dispositifs de stockage provoquent des pertes qui doivent être ajoutées en tant que pertes dues aux accessoires lors du calcul des pertes du produit étendu.



**Figure 15 – Exemple de CDM comportant une résistance pour dissiper la puissance produite**

## 5.6 Pertes des démarreurs de moteurs

Dans le cadre des calculs de pertes, les pertes de puissance des démarreurs de moteurs (y compris les pertes de commande) conformément à la norme de produit IEC 60947-4-1, doivent être calculées comme étant égales à 0,1 % de la puissance assignée du moteur.

Les démarreurs progressifs conformes à la norme de produit IEC 60947-4-2 sont généralement mécaniquement en dérivation avec un cycle de service plus long (service type S1), et le calcul s'effectue donc comme pour les démarreurs de moteurs.

Les pertes de puissance des démarreurs de moteurs sont suffisamment faibles pour que la même classe IE soit utilisée pour un moteur, ainsi que pour un moteur commandé par un démarreur.

## 6 Limites des classes IE et IES

### 6.1 Généralités

Les pertes ou le rendement du CDM de référence et du moteur normalisé servent de base pour évaluer la conformité à une classe IE ou IES d'un moteur, d'un SDM, d'un CDM ou d'un PDS existant.

Le CDM de référence est associé à la classe IE1. Les appareils existants dont les pertes sont inférieures aux pertes de référence (c'est-à-dire que le rendement est meilleur) sont identifiés par des niveaux supérieurs à 1. Le seuil et la tolérance de chaque niveau sont spécifiés de 6.2 à 6.5.

La conformité à une classe IE ou IES peut être démontrée par des mesurages ou des calculs décrits à l'Article 7. Les différents points d'essai représentés à la Figure 4 peuvent être utilisés pour déterminer les pertes et l'efficacité énergétique d'un système global pour une application spécifique.

Pour réduire le plus possible le processus de certification, la conformité à une classe IE doit être uniquement démontrée pour le SDOM ou le CDM au courant assigné et à 90 % de la fréquence assignée du stator du moteur, respectivement la tension assignée du moteur. La conformité à une classe IE pour un SDIM ne doit être évaluée que pour 100 % de puissance assignée.

La conformité à une classe IES doit être uniquement démontrée pour le PDS à 90 % de la vitesse assignée du moteur et 100 % du couple assigné.

Les pertes en mode de récupération ne sont pas prises en compte pour déterminer une classe IE ou IES pour un SDIM, un CDM ou un PDS.

NOTE Le courant de sortie assigné d'un CDM correspond habituellement à son courant de sortie maximal en continu.

## 6.2 CDM

Le CDM de référence est décrit par les paramètres donnés à l'Annexe C et au paragraphe 5.2. Ses pertes sont indiquées dans le Tableau 7.

La valeur assignée de puissance d'un RCDM est définie selon sa puissance de sortie apparente, qui influe fortement sur les pertes du CDM.

Comme la puissance assignée des CDM est généralement déterminée en fonction du courant de sortie plutôt que de la puissance de sortie apparente, le Tableau 7 donne des exemples de courants de sortie assignés du RCDM pour les tensions d'alimentation normales types. La relation avec les valeurs assignées normales de puissance du moteur définies dans l'IEC 60034-30-1 peut être consultée dans le Tableau A.1.

**Tableau 7 – Pertes du CDM de référence pour la définition de la classe IE1**

Puissance de sortie apparente $S_{r, \text{equ}}$	Pertes relatives $P_{L, \text{RCDM}}(90, 100)$	Pertes absolues $P_{L, \text{RCDM}}(90, 100)$	Exemples de courant de sortie du CDM à des tensions d'alimentation types			
			$U_{1, r, \text{out}} = 200 \text{ V}$	$U_{1, r, \text{out}} = 400 \text{ V}$	$U_{1, r, \text{out}} = 460 \text{ V}$	$U_{1, r, \text{out}} = 690 \text{ V}$
kVA	%	kW	$I_{r, \text{out}} = \frac{S_{r, \text{equ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1, r, \text{out}}}$			
			A			
0 278	35,85	0 100	0 803	0 401	0 349	0 233
0 381	27,30	0 104	1,10	0 550	0 478	0 319
0 500	21,80	0 109	1,44	0 722	0 627	0 418
0 697	16,84	0 117	2,01	1,01	0 875	0 583
0 977	13,21	0 129	2,82	1,41	1,23	0 818
1,29	11,02	0 142	3,73	1,86	1,62	1,08
1,71	9,51	0 163	4,94	2,47	2,15	1,43
2,29	8,21	0 188	6,62	3,31	2,88	1,92
3,30	7,20	0 237	9,54	4,77	4,15	2,76
4,44	6,72	0 299	12,8	6,41	5,58	3,72
5,85	6,39	0 374	16,9	8,44	7,34	4,89
7,94	6,01	0 477	22,9	11,5	9,96	6,64
9,95	5,84	0 581	28,7	14,4	12,5	8,32
14,4	5,43	0 781	41,6	20,8	18,1	12,1
19,5	5,18	1,01	56,2	28,1	24,4	16,3
23,9	5,05	1,21	68,9	34,4	30,0	20,0
28,3	4,97	1,41	81,6	40,8	35,5	23,6
38,2	4,87	1,86	110	55,2	48,0	32,0
47,0	4,79	2,25	136	67,8	58,9	39,3
56,9	4,75	2,70	164	82,1	71,4	47,6
68,4	4,74	3,24	197	98,7	85,8	57,2
92,8	4,69	4,35	268	134	116	77,6
111	4,66	5,17	321	160	139	93,0
135	4,11	5,55	391	195	170	113
162	4,10	6,65	468	234	203	136
196	4,09	8,02	566	283	246	164

Puissance de sortie apparente $S_{r, \text{equ}}$	Pertes relatives $p_{L, \text{RCDM}}(90,100)$	Pertes absolues $P_{L, \text{RCDM}}(90,100)$	Exemples de courant de sortie du CDM à des tensions d'alimentation types			
			$U_{1, r, \text{out}} = 200 \text{ V}$	$U_{1, r, \text{out}} = 400 \text{ V}$	$U_{1, r, \text{out}} = 460 \text{ V}$	$U_{1, r, \text{out}} = 690 \text{ V}$
kVA	%	kW	$I_{r, \text{out}} = \frac{S_{r, \text{equ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1, r, \text{out}}}$			
			A			
245	4,07	10,0	706	353	307	205
302	4,10	12,4	872	436	379	253
381	4,09	15,6	1 099	550	478	319
429	4,09	17,5	1 239	619	539	359
483	4,09	19,8	1 396	698	607	405
604	4,08	24,7	1 745	872	758	506
677	4,08	27,6	1 954	977	850	566
761	4,08	31,1	2 198	1 099	956	637
858	4,08	35,0	2 477	1 239	1 077	718
967	4,08	39,4	2 791	1 396	1 214	809
1 088	4,08	44,3	3 140	1 570	1 365	910
1 209	4,08	49,3	3 489	1 745	1 517	1 011

NOTE 1 Le passage de la fréquence de commutation de 4 kHz à 111 kVA à 2 kHz à 135 kVA provoque une discontinuité dans les valeurs de perte relative du RCDM  $p_{L, \text{RCDM}}$  entre ces valeurs assignées de puissance.

NOTE 2 Pour un SDIM, la puissance de sortie active est égale à la puissance de sortie apparente.

Si la puissance de sortie apparente assignée d'un CDM ou d'un SDM est comprise entre deux valeurs du Tableau 7, la valeur de perte relative  $p_{L, \text{RCDM}}$  du RCDM avec la valeur assignée de puissance la plus élevée suivante doit être utilisée pour déterminer la classe IE. Les pertes du RCDM indiquées dans le Tableau 7 doivent être utilisées pour tous les CDM à basse tension.

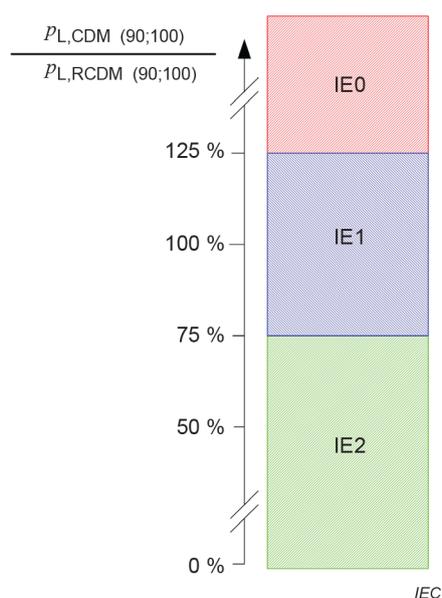
Si un CDM est composé d'une combinaison de SDIM et de SDOM qui sont déjà classés IE, aucune classification du CDM n'est nécessaire.

Un CDM doit être classé IE1 si ses pertes relatives se situent à  $\pm 25\%$  de la valeur du RCDM.

Un CDM doit être classé IE0 si ses pertes relatives sont supérieures à 125 % à la valeur du RCDM.

Un CDM doit être classé IE2 si ses pertes relatives sont inférieures à 75 % de la valeur du RCDM.

Ces définitions sont représentées à la Figure 16.



**Figure 16 – Représentation des classes IE pour un CDM**

NOTE 3 Dans le présent document, des classes limites sont définies pour les CDM jusqu'à IE2 uniquement. Les classes IE3 à IE9 sont réservées à la description de futures améliorations technologiques apportées aux CDM.

### 6.3 Facteurs de correction pour les CDM à fonctionnalité modifiée

#### 6.3.1 Généralités

Les topologies des CDM autres que le CDM de référence défini présentent des avantages ou des inconvénients par rapport au CDM de référence qui peuvent ne pas être directement visibles dans les pertes relatives et la classification IE correspondante du CDM. Par exemple, un entraînement à faible harmonique avec des courants d'entrée sinusoïdaux réduit considérablement les pertes dans le réseau en réduisant les courants harmoniques, mais il engendre des pertes plus élevées dans le CDM. Le rendement total du système, en tenant également compte des pertes dans le réseau, peut donc être plus élevé. D'autres éléments d'entraînement, tels que les filtres de moteur sinusoïdaux, améliorent considérablement le comportement EMI d'un PDS, mais présentent des pertes plus élevées par rapport à un entraînement sans filtre de sortie.

Afin de tenir compte de ces avantages, des facteurs de correction sont utilisés pour les pertes du RCDM.

Le principe de base est de comparer les pertes mesurées ou calculées du CDM ou SDM avec les pertes modifiées du CDM de référence  $p_{L,RCDM,m}$  lorsque l'avantage de cette topologie est exprimé par des facteurs de correction  $k_{cf,j}$ .

Les pertes du CDM de référence définies en 6.2 et dans le Tableau 7 tiennent compte des éléments d'entraînement suivants:

- les pertes du convertisseur d'entrée d'un redresseur à pont de diodes triphasé avec une bobine d'arrêt de ligne de  $u_k = 2 \%$  et un taux de distorsion harmonique totale en courant  $THD_1$  des courants d'entrée d'environ 60 %;
- les pertes de la liaison à courant continu;
- les pertes de l'onduleur de sortie sans filtre de sortie;
- les pertes des conducteurs de courant;
- les pertes de refroidissement d'un ventilateur intégré;

- les pertes de commande et en veille.

Pour les topologies présentant d'autres caractéristiques, les pertes de référence modifiées  $p_{L,RCDM,m}$  sont calculées par:

$$p_{L,RCDM,m(90;100)} = \frac{1}{n} \left( 1 + \sum_{i=1}^N k_{cf,i} \right) \cdot p_{L,RCDM(90;100)} \quad (15)$$

Pour un SDIM, la Formule (16) est appliquée:

$$p_{L,SDIM,m(90;100)} = \frac{1}{n} \left( 1 + \sum_{i=1}^N k_{cf,i} \right) \cdot p_{L,RCDM(90;100)} \quad (16)$$

Pour un SDOM, la Formule (17) est appliquée:

$$p_{L,SDOM,m(90;100)} = \frac{1}{n} \left( 1 + \sum_{i=1}^N k_{cf,i} \right) \cdot p_{L,RCDM(90;100)} \quad (17)$$

Pour un CDM construit à partir du SDIM et du SDOM, la Formule (18) est appliquée:

$$p_{L,RCDM(SDIM+SDOM),m(90\%;100\%)} = p_{L,SDIM,m(90\%;100\%)} + p_{L,\frac{SDOM,m(90\%;100\%)}{S_{r,SDOM,out}}} \quad (18)$$

Pour ces calculs, les facteurs de correction  $k_{cf,i}$  indiqués dans le Tableau 8 pour les différentes caractéristiques doivent être utilisés. Les pertes du convertisseur du CDM ou du SDM doivent ensuite être comparées aux pertes de référence modifiées  $p_{L,RCDM,m}$  pour déterminer les classes IE. Des exemples d'application de ce concept peuvent être consultés à l'Article F.6.

La caractéristique de convertisseur appliquée et les facteurs de correction  $k_{cf,i}$  correspondants doivent être indiqués dans la documentation de l'utilisateur.

### 6.3.2 Facteurs de correction

Les facteurs de correction à appliquer dans la Formule (18) sont indiqués dans le Tableau 8 pour les topologies présentant des caractéristiques différentes. Les facteurs de correction indiqués sont uniquement utilisés pour déterminer les classes IE d'un CDM ou d'un SDM individuel ou pendant la détermination de l'IES pour le CDM faisant partie intégrante d'un PDS. Les informations relatives à la combinaison d'un SDIM et d'un SDOM avec un CDM et au calcul de pertes correspondant sont données en 5.2.3.

**Tableau 8 – Facteurs de correction pour différentes caractéristiques de CDM, SDIM et SDOM**

Caractéristique		Facteur de correction $k_{cf,i}$	
CDM sans capacité de récupération <sup>a</sup>	$THD_1 > 60$ % (harmonique élevée) <sup>c</sup>	-0,1	1
	$10$ % < $THD_1 \leq 60$ % (référence) <sup>c</sup>	0	2
	$THD_1 \leq 10$ % (harmonique faible) <sup>c</sup>	0,8	3
CDM avec capacité de récupération <sup>a,b</sup>	$THD_1 > 10$ % <sup>c</sup>	0,4	4
	$THD_1 \leq 10$ % (harmonique faible) <sup>c</sup>	1,0	5
CDM avec $DF_U \leq 10$ % (filtre de sortie sinusoïdal, par exemple)		0,8	6
CDM avec tension d'entrée assignée $\leq 250$ V (triphasee)		0,5	7
CDM avec entrée monophasée	Tension d'entrée assignée $\leq 250$ V	0,6	8
	Tension d'entrée assignée $> 250$ V	0,2	9
CDM avec refroidissement externe <sup>d</sup>		-0,2	10
SDIM, SDOM avec refroidissement externe <sup>d</sup>		-0,1	11
SDIM sans capacité de récupération <sup>a</sup>	$THD_1 > 60$ % (harmonique élevée) <sup>c</sup>	-0,65	12
	$10$ % < $THD_1 \leq 60$ % <sup>c</sup>	-0,55	13
	$THD_1 \leq 10$ % (harmonique faible) <sup>c</sup>	0,35	14
SDIM avec capacité de récupération <sup>a,b</sup>	$10$ % < $THD_1$ <sup>c</sup>	-0,1	15
	$THD_1 \leq 10$ % (harmonique faible) <sup>c</sup>	0,5	16
SDOM	$DF_U > 10$ %	-0,2	17
	$DF_U \leq 10$ % (par exemple étage onduleur avec filtre sinusoïdal)	0,35	18

<sup>a</sup> "capacité de récupération" signifie que le CDM ou le SDM est capable de fonctionner en mode de récupération à la puissance assignée, c'est-à-dire d'alimenter le réseau avec l'énergie produite par le générateur/moteur.

<sup>b</sup> Pour les CDM ou SDM à fonction de récupération, seules les pertes en fonctionnement moteur sont prises en compte.

<sup>c</sup>  $THD_1$  est la valeur THD des courants d'entrée au point de fonctionnement nominal en tenant compte des harmoniques jusqu'au rang  $H = 40$ .

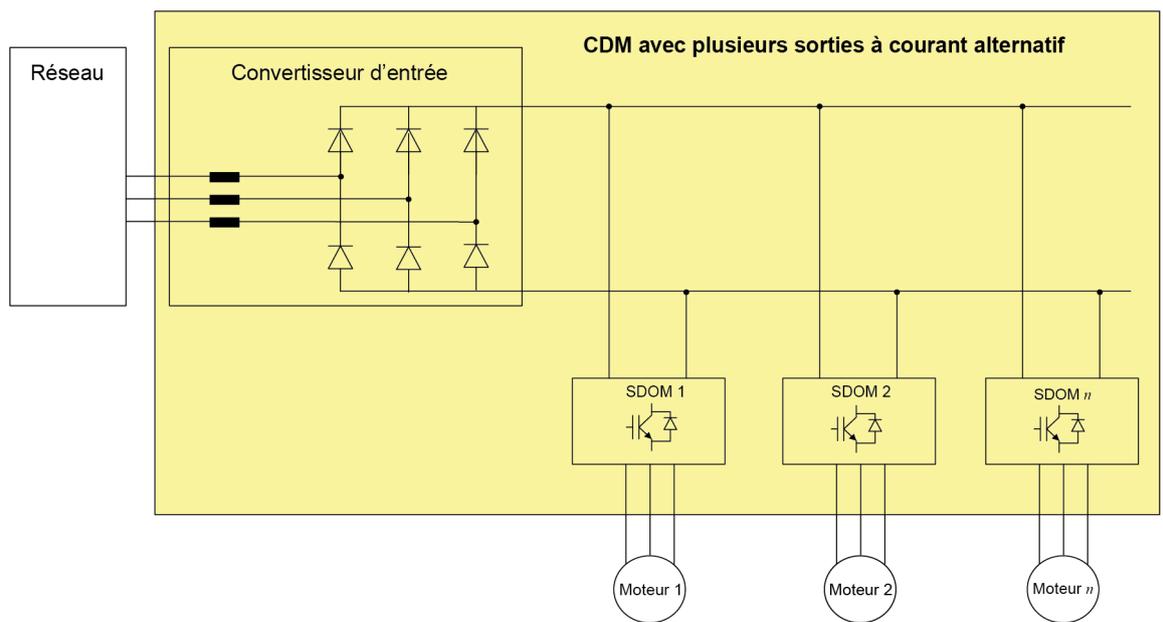
<sup>d</sup> "refroidissement externe" signifie qu'un refroidissement actif de l'équipement est nécessaire, mais que la puissance du système de refroidissement n'est pas fournie par l'intermédiaire des bornes d'entrée du CDM, du SDIM ou du SDOM. Le refroidissement peut être intégré au CDM, SDIM ou SDOM ou être assuré de façon indépendante.

<sup>e</sup> La numérotation dans la colonne de droite n'est donnée qu'à titre d'information sur les facteurs de correction appliqués. Voir également 8.4.6.

### 6.3.3 Concept de détermination des pertes et des pertes de référence pour les CDM et les SDOM avec plusieurs sorties à courant alternatif

Le paragraphe 6.3.3 s'applique uniquement aux CDM et aux SDOM avec une seule entrée et plusieurs sorties à courant alternatif, vendus sous la forme d'un seul produit et ne pouvant pas être séparés et donc évalués de façon distincte. Les modules vendus sous forme de modules avec une seule sortie doivent déjà être classés.

Un CDM ou un SDOM peut avoir plusieurs sorties à courant alternatif. Un CDM de ce type est représenté à la Figure 17.



**Figure 17 – Topologie d'un CDM avec plusieurs sorties à courant alternatif**

Dans ce type de CDM, un seul convertisseur d'entrée alimente plusieurs onduleurs de sortie, chacun d'eux entraînant un moteur différent. Cette topologie est particulièrement économe en énergie car l'énergie de freinage d'un moteur peut être transférée aux autres moteurs par l'intermédiaire de la connexion de liaison à courant continu, au lieu d'être perdue dans une résistance de freinage.

La puissance assignée ou le courant assigné du convertisseur d'entrée est généralement inférieur à la somme de la puissance assignée ou du courant assigné de tous les onduleurs de sortie. C'est la raison pour laquelle le CDM avec plusieurs sorties à courant alternatif ne peut pas fonctionner simultanément à la puissance assignée de tous les onduleurs de sortie. Au lieu de cela, les pertes doivent être déterminées séparément pour chaque onduleur de sortie. Comme les pertes en veille des onduleurs de sortie inactifs s'additionnent aux pertes des onduleurs de sortie actifs, les pertes du RCDM doivent être corrigées avec un facteur de 0,1 pour déterminer la classe IE. Un CDM avec plusieurs sorties à courant alternatif doit être classé en fonction de la classe IE obtenue à partir de l'onduleur de sortie avec la puissance assignée la plus élevée.

La détermination et la classification des pertes d'un CDM ou SDOM avec plusieurs sorties à courant alternatif doivent être effectuées comme suit.

- Désactiver toutes les impulsions pour les onduleurs de sortie 2 à  $n$ .
- Faire fonctionner l'onduleur de sortie 1 aux huit points de fonctionnement définis sur la Figure 6. Le courant de sortie assigné est le courant de sortie assigné de l'onduleur de sortie 1.
- Déterminer les pertes pour l'onduleur de sortie 1. Pendant l'essai, la puissance assignée de la section d'alimentation ne doit pas être dépassée.
- Répéter les étapes 1 à 3 pour tous les autres onduleurs de sortie.
- Le CDM ou le SDOM avec plusieurs sorties à courant alternatif doit être classé en fonction de la classe IE obtenue à partir de l'onduleur de sortie avec la puissance assignée la plus élevée; par conséquent, choisir l'onduleur de sortie avec la puissance assignée la plus élevée.
- Sélectionner les pertes du RCDM d'après le Tableau 7.

- g) Appliquer un facteur de correction de 0,1 pour un CDM ou de 0,05 pour un SDOM, aux pertes choisies du RCDM. Voir les Formules (15) à (17) pour des recommandations sur l'application des facteurs de correction.
- h) Déterminer la classe IE pour cet onduleur de sortie conformément aux paragraphes 6.1 et 6.2 en utilisant les pertes corrigées du RCDM.

#### 6.4 Moteur

Les classes IE pour les moteurs qui fonctionnent sur un CDM sont définies dans la série IEC 60034-30.

Pour les besoins du présent document, les valeurs de l'IEC TS 60034-30-2 sont appelées valeurs de référence des pertes de moteur pour le calcul des pertes du PDS.

#### 6.5 PDS

Les classes IES du système PDS sont définies en fonction de la somme des pertes de moteur de référence conformément à l'IEC TS 60034-30-2 et des pertes corrigées, en conséquence, d'un CDM IE2 correspondant par la puissance assignée du moteur.

Un PDS doit être classé IES0 si ses pertes relatives sont supérieures aux pertes relatives de la somme d'un moteur IE1 choisi et d'un CDM IE2.

Un PDS doit être classé IES1 si ses pertes relatives sont inférieures ou égales aux pertes relatives de la somme d'un moteur IE1 choisi et d'un CDM IE2.

Un PDS doit être classé IES2 si ses pertes relatives sont inférieures ou égales aux pertes relatives de la somme d'un moteur IE2 choisi et d'un CDM IE2.

Un PDS doit être classé IES3 si ses pertes relatives sont inférieures ou égales aux pertes relatives de la somme d'un moteur IE3 choisi et d'un CDM IE2.

Un PDS doit être classé IES4 si ses pertes relatives sont inférieures ou égales aux pertes relatives de la somme d'un moteur IE4 choisi et d'un CDM IE2.

Un PDS doit être classé IES5 si ses pertes relatives sont inférieures ou égales aux pertes relatives de la somme d'un moteur IE5 choisi et d'un CDM IE2.

Les limites des classes IES sont déterminées par la Formule (19):

$$p_{L,IESx,rpm} = \frac{p_{L,RM,IEx,rpm(90;100)} \cdot P_{r,RM} + p_{L,IE2,RCDM,m(90;100)} \cdot S_{r,CDM}}{P_{r,RM}} \quad (19)$$

où

- $x$  correspond à la classe IES donnée, égale à la classe IE choisie du moteur;
- $p_{L,IESx,rpm}$  correspond à la limite relative de la classe IES donnée;
- $p_{L,IE2,RCDM,m(90;100)}$  correspond aux pertes relatives du CDM IE2 corrigé;
- $p_{L,RM,IEx,rpm(90;100)}$  correspond aux pertes relatives du moteur selon l'IEC TS 60034-30-2 avec la classe IE et la plage de vitesses indiquées.

Les pertes du moteur de référence sont à déduire de l'IEC TS 60034-30-2 et de l'IEC 60034-30-1.

Si la puissance assignée du moteur du PDS n'est pas indiquée dans l'IEC TS 60034-30-2, la valeur assignée de puissance la plus élevée suivante du moteur doit être utilisée.

Les pertes relatives du moteur sont définies d'après la Formule (20):

$$p_{L, RM, IEx, rpm(90;100)} = \frac{(1 - \eta_{(90;100)}) \cdot P_{out, RM(90;100)}}{P_{r, RM}} \quad (20)$$

où

$x$	correspond à la classe IE donnée;
$p_{L, RM, IEx, rpm(90;100)}$	correspond aux pertes relatives du moteur;
$\eta_{(90;100)}$	correspond au rendement de moteur au point de fonctionnement (90;100);
$P_{out, RM(90;100)}$	correspond à la puissance mécanique du moteur de référence au point de fonctionnement (90;100);
$P_{r, RM}$	correspond à la puissance assignée du moteur de référence.

La puissance apparente assignée du CDM, selon la puissance assignée du moteur, à utiliser pour la classification IES doit être conforme au Tableau A.1.

Les pertes du CDM dans le Tableau A.1 correspondent à IE1 et doivent être adaptées à IE2 en multipliant les valeurs IE1 par 0,75.

NOTE Il n'est pas possible de fournir des limites fixes sous forme de tableau car les limites dépendent de la classe IES / plage de vitesses / puissance choisies et de la fonctionnalité supplémentaire (correction des pertes de référence) du CDM utilisé.

## 7 Détermination des pertes

### 7.1 Généralités

L'Article 7 a pour objectif de définir les essais de type qui doivent être réalisés sur le CDM ou le SDM pour vérifier la classification IE, ainsi que sur le PDS pour vérifier la classification IES. Dans le présent document, les méthodes de détermination des pertes pour les classes d'énergie IE du CDM ou SDM et les classes IES du PDS sont considérées comme des essais de type du CDM, du SDM et du PDS. De plus, des procédures sont définies pour déterminer les pertes du CDM, du SDM et du PDS en conditions de charge partielle.

Si la spécification d'un CDM ou SDM ne comporte que la puissance active, son courant de sortie doit être calculé d'après la Formule (3). Sa puissance de sortie apparente assignée doit être calculée selon la Formule (4).

Les pertes et les classes IE/IES doivent être calculées et mesurées aux tension et fréquence d'entrée assignées.

Sauf spécification contraire dans la documentation de l'utilisateur, les niveaux de tension utilisés doivent être ceux du Tableau 1 de l'IEC 60038:2021.

Si un CDM ou un SDM couvre plusieurs niveaux de tension, le niveau de tension choisi pour la classification IE et les informations relatives aux pertes doivent être indiqués dans la documentation conformément à l'Article 8. De plus, la tension assignée de l'équipement et, dans le cas du PDS, la vitesse assignée du moteur doivent être indiquées dans la documentation.

## 7.2 Essais de type du CDM ou du SDM pour la classification IE

Pour définir la classe d'efficacité énergétique IE d'un CDM ou d'un SDM, des essais de type doivent être réalisés. Les classes d'efficacité énergétique IE sont définies à partir d'un seul point de fonctionnement conformément au 6.1. Les pertes en ce point doivent être déterminées par l'une des options suivantes:

- détermination des pertes calculées des composants individuels selon 7.4.1;
- mesurage à l'entrée-sortie selon 7.5;
- méthode de mesure calorimétrique selon 7.6.

NOTE 1 La détermination du courant de sortie du CDM ou du SDM et les exigences relatives au facteur de déphasage sont définies dans le Tableau 1 et le Tableau 2, alors que pour les essais avec un seul moteur, les exigences relatives au facteur de déphasage à 100 % de vitesse s'appliquent.

NOTE 2 Les laboratoires d'essai utilisent normalement des méthodes de détermination basées sur les mesurages, c'est-à-dire une méthode de détermination calorimétrique ou une méthode de détermination à l'entrée-sortie.

S'il est prévu qu'un CDM ou SDM utilise un moteur non asynchrone, il doit soumis à un essai avec une charge d'essai appropriée, et les écarts par rapport aux conditions d'essai décrites en 7.5.2 doivent être indiqués dans la documentation de l'utilisateur et le rapport d'essai.

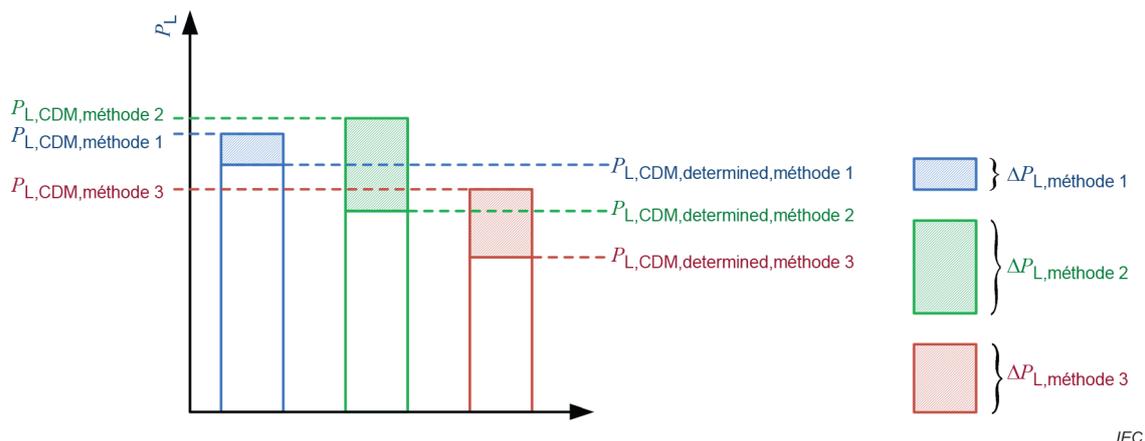
Les pertes exigées pour la classification de l'efficacité énergétique IE doivent être calculées à partir des pertes déterminées  $P_{L,CDM,determined}$  et de l'incertitude de mesure d'après la Formule (21):

$$R_{L,CDM} = R_{L,CDM,determined} + \Delta R_{L,CDM} = R_{L,CDM,determined} (1 + \Delta p_{L,CDM}) \quad (21)$$

Cette valeur corrigée des pertes de puissance doit être utilisée pour définir les pertes de puissance relatives du CDM ou SDM.

L'incertitude de la méthode utilisée doit être ajoutée à la valeur de perte déterminée, comme le décrit la Figure 18, pour l'une des 3 méthodes arbitraires représentées.

L'incertitude de mesure de la méthode de détermination des pertes choisie doit être indiquée dans le rapport d'essai. L'incertitude appliquée doit être fondée sur des erreurs qui se produisent aléatoirement avec une distribution normale à deux écarts-types (niveau de confiance de 95 %, par exemple). L'Annexe G fournit des informations supplémentaires sur les incertitudes des différentes méthodes de détermination ainsi qu'une méthode de calcul de l'incertitude des pertes.



IEC

**Figure 18 – Pertes du CDM ou du SDM correspondant à la somme des pertes déterminées et de l'incertitude de la méthode de détermination**

### 7.3 Essais de type du PDS pour la classification IES

La classe d'efficacité énergétique IES d'un PDS doit être déterminée en un seul point de fonctionnement conformément à 6.1. Les essais de type pour déterminer les pertes à ce point de fonctionnement peuvent être effectués en utilisant l'une des deux options suivantes:

- calcul des pertes selon 7.4.2;
- mesurage à l'entrée-sortie selon 7.5.

La partie ou personne exécutante qui recherche les données est libre de choisir l'une de ces deux options.

NOTE Les laboratoires d'essai utilisent normalement la méthode de détermination à l'entrée-sortie.

Pour les PDS, la méthode de mesure calorimétrique est exclue car elle est difficile à mettre en œuvre sur des moteurs électriques.

Les pertes exigées pour la classification de l'efficacité énergétique IES doivent être calculées à partir des pertes déterminées  $P_{L,PDS,determined}$  et de l'incertitude de mesure d'après la Formule (22) suivante:

$$P_{L,PDS} = P_{L,PDS,determined} + \Delta P_{L,PDS} = P_{L,PDS,determined} \cdot (1 + \Delta p_{L,PDS}) \quad (22)$$

Cette valeur corrigée des pertes de puissance doit être utilisée pour définir les pertes de puissance relatives d'un PDS.

L'incertitude de mesure de la méthode de détermination des pertes choisie doit être indiquée dans le rapport d'essai. L'incertitude appliquée doit être fondée sur les erreurs qui se produisent aléatoirement avec une distribution normale. L'Annexe G fournit des informations supplémentaires sur les incertitudes des différentes méthodes de détermination ainsi qu'une méthode de calcul de l'incertitude des pertes.

## 7.4 Détermination des pertes par calcul

### 7.4.1 Pertes calculées du CDM ou SDM

Le modèle présenté en 5.2 et à l'Annexe C peut être utilisé pour déterminer les pertes d'un CDM ou SDM par calcul. Le fournisseur peut utiliser un autre modèle de calcul analytique ou des simulations de perte; un modèle de calcul différent peut être utilisé. Voir 5.2.4.

Les calculs de pertes du CDM ou SDM doivent être effectués par rapport aux données du fournisseur des composants, aux valeurs types des semiconducteurs de puissance à la température de fonctionnement réelle du CDM ou SDM ou à la température de fonctionnement maximale spécifiée dans la fiche technique.

Les conditions limites pour les calculs doivent être similaires aux exigences relatives à la détermination des pertes par mesurage, tel que spécifié en 7.5.

Les paramètres ayant un impact sur les pertes des composants du CDM et du SDM doivent être déterminés aux points de fonctionnement exigés. Lorsqu'aucune donnée sur les pertes n'a été fournie, les pertes doivent être déterminées par mesurage.

NOTE Pour certains composants du CDM et du SDM, les mesurages des pertes sont faciles à effectuer. L'une des méthodes possibles pour déterminer les pertes du CDM et du SDM consiste à combiner les pertes mesurées et les pertes calculées.

En définitive, les différentes pertes individuelles sont calculées ou mesurées séparément, et les pertes totales du CDM ( $P_{L,CDM,determined}$ ) sont déterminées par la somme de toutes les pertes individuelles. Seuls les composants inclus doivent être pris en compte pour le calcul des pertes dans le cas d'un SDM. Les fournisseurs sont tenus d'appliquer les exactitudes correctes dans la Formule (21).

### 7.4.2 Calcul des pertes des PDS

Les pertes des PDS peuvent être déterminées par calcul d'après les Formules (12) et (13). Lors du calcul des pertes des PDS avec un RCDM, aucune tolérance ne doit être ajoutée aux pertes du CDM. Si les pertes des PDS sont calculées avec le RM, les tolérances conformes à l'IEC 60034-1 doivent être ajoutées aux pertes du PDS final.

## 7.5 Détermination des pertes par mesurage à l'entrée-sortie

### 7.5.1 Instrumentation

#### 7.5.1.1 Généralités

De légères fluctuations de la puissance de sortie et d'autres grandeurs mesurées sont inévitables lorsque des essais sont effectués sur le CDM ou le PDS en charge. Par conséquent, pour chaque point de fonctionnement, plusieurs mesurages doivent être échantillonnés simultanément sur une certaine durée (au moins plusieurs cycles de glissement, généralement de 1 min à 3 min), et la moyenne arithmétique de ces valeurs doit être utilisée pour déterminer les pertes.

Étant donné les harmoniques rencontrés dans les convertisseurs, le matériel de mesure doit être choisi en fonction de la plage des fréquences correspondantes, avec une précision suffisante.

#### 7.5.1.2 Analyseur de puissance et transducteurs

L'instrumentation utilisée pour mesurer la puissance et le courant à l'entrée ou à la sortie du CDM doit satisfaire aux exigences de l'IEC 60034-2-1.

L'incertitude spécifiée par le fournisseur des wattmètres doit être de 0,2 % de  $S_{r,eq}$  ou mieux pour la puissance active totale à 50 Hz/60 Hz. Cette incertitude correspond à l'incertitude totale du wattmètre, y compris les sondes et capteurs éventuels.

La bande passante des wattmètres et des capteurs doit être suffisamment large pour assurer une erreur de la puissance active totale inférieure ou égale à 0,3 % de  $S_{r,eq}$ .

NOTE 1 La puissance de sortie apparente d'un CDM à la fréquence de commutation ne dépasse généralement pas 5 % de la puissance de sortie assignée totale. La puissance de sortie à des fréquences plus élevées diminue selon une fonction d'élévation au carré. Par conséquent, une bande passante comprise entre 0 Hz et 10 fois la fréquence de commutation  $f_{sw}$  est suffisante pour mesurer la puissance de sortie du convertisseur MLI.

L'étendue de mesure doit être choisie correctement par rapport aux courants et tensions mesurés.

Il est préférable d'alimenter directement l'analyseur de puissance en courant et tension. Si un transducteur externe de courant est exigé, des transducteurs inductifs, des shunts ou des transducteurs sans flux à large bande passante peuvent être utilisés.

NOTE 2 Lorsque des composants à courant continu sont présents, les transducteurs inductifs ne s'appliquent pas.

NOTE 3 Les transducteurs inductifs présentent des incertitudes et/ou des limitations d'amplitude plus grandes à des fréquences inférieures plutôt qu'à la fréquence nominale.

Tous les câbles utilisés pour transmettre des signaux de mesure doivent être installés avec précaution et être blindés, si possible.

### 7.5.1.3 Sortie mécanique du moteur de charge

L'instrumentation destinée à mesurer le couple et la vitesse à la sortie du moteur de charge doit satisfaire aux exigences de l'IEC 60034-2-1.

## 7.5.2 Conditions d'essai

### 7.5.2.1 Généralités

Les conditions et procédures d'essai sont très importantes pour les résultats et pour la reproductibilité et la comparabilité des mesurages entre différents fournisseurs et laboratoires d'essai. Des mesures anticourtage sont également à envisager pendant la configuration du PDS pour les mesurages de pertes de puissance, afin d'éviter que le CDM ou le SDM ne reconnaisse une condition d'essai particulière. L'objectif est d'empêcher le CDM ou le SDM de modifier le comportement du PDS de façon plus favorable comparée à des conditions similaires d'utilisation normale du PDS sur le terrain. Les exigences suivantes sont obligatoires. Toutes les conditions de fonctionnement doivent être enregistrées et documentées (voir 8.4).

- Pendant les mesurages, seuls les accessoires ou options utilisables ou utiles pour le fonctionnement normal du PDS sur le terrain doivent être utilisés.
- Il convient que le point de départ du réglage du convertisseur soit le réglage "d'usine par défaut". Certains convertisseurs permettent une réinitialisation du logiciel qui est fortement recommandée avant d'effectuer l'essai. Cette recommandation s'applique également aux convertisseurs neufs "sortis de l'emballage".

NOTE 1 Pour fonctionner correctement, de nombreux convertisseurs exigent des informations figurant sur la plaque signalétique du moteur, auquel cas les paramètres de la plaque signalétique du moteur tels que le courant du moteur, la tension du moteur, la puissance de sortie du moteur et la vitesse nominale seront entrés.

NOTE 2 Lorsque le moteur est commandé en utilisant la loi de commande U/f, un rapport U/f constant détermine une induction magnétique constante qui permet de solliciter le moteur avec un couple nominal à chaque point de vitesse dans la plage nominale. Dans un entraînement avec des réglages d'usine, le rapport U/f n'est probablement pas constant pour différentes raisons possibles, telles que:

- PDS/CDM/SDIM/SDOM avec profils de couple préprogrammés pour des charges de couple variables, dont la tension est moins élevée aux vitesses inférieures;

- PDS/CDM/SDIM/SDOM avec algorithmes de commande qui optimisent l'aimantation du moteur en fonction du couple réel du moteur et;
- PDS/CDM/SDIM/SDOM avec algorithmes de commande de flux ou de couple avancés.

NOTE 3 Des modifications du réglage d'usine par défaut peuvent être exigées pour satisfaire aux spécifications du courant de charge d'essai du Tableau 1.

- Une charge électronique ou un moteur électrique peut être utilisé en tant qu'appareil de charge du CDM ou du SDM. Dans le cas d'un moteur de charge, un moteur IE2 ou IE3 à 4 pôles est recommandé. Le choix du type de moteur doit être documenté.
- Les essais peuvent être réalisés à toute température, mais doivent toujours être documentés. Une température ambiante de 20 °C à 25 °C est recommandée. Les essais du PDS doivent être réalisés avec une température ambiante du moteur comprise entre 15 °C et 30 °C; sinon une correction de température appropriée doit être appliquée conformément à l'IEC 60034-1 et à l'IEC 60034-2-1 pour les pertes de moteur.
- Il convient d'équiper et d'installer le CDM ou le SDM de manière à satisfaire à l'exigence de sécurité électrique de l'IEC 61800-5-1.
- Toute modification des réglages du CDM ou du SDM doit être clairement documentée.

### 7.5.2.2 Conditions de réglage supplémentaires

Les conditions de réglage supplémentaires suivantes doivent s'appliquer pour les mesurages optimaux de pertes de puissance à n'importe quel point de fonctionnement.

- La tension et la fréquence d'entrée du CDM ou du SDM doivent se situer dans la plage spécifiée.
- Le facteur de crête de la tension d'alimentation doit être compris entre 1,35 et 1,44.
- Le rapport de court-circuit du CDM ou du SDIM et du réseau d'alimentation conformément à l'IEC 61000-3-12:2011 doit se situer dans la plage comprise entre 50 et 200 pour un CDM ou un SDIM avec une puissance de sortie apparente assignée jusqu'à 111 kVA inclus, et entre 5 et 50 pour un CDM ou un SDIM avec une puissance de sortie assignée supérieure à 111 kVA.
- Le courant de sortie du CDM ou du SDOM ne doit, en aucun point, être inférieur aux valeurs données dans le Tableau 1 dans la mesure où un courant de sortie de l'onduleur moins élevé entraîne des pertes réduites.
- L'appareil de charge pour le CDM ou le SDOM doit être choisi de façon à s'assurer que le THDi du courant de sortie du CDM ou du SDOM est inférieur ou égal à 5 %. Une distorsion plus importante entraîne des pertes plus importantes du CDM.
- Pour les CDM ou SDOM, le facteur de déphasage du courant fondamental de la charge par rapport à la tension fondamentale doit être conforme au Tableau 2 pour le point de fonctionnement (90;100). Pour tous les autres points de fonctionnement, le facteur de déphasage doit être consigné. Lors de l'utilisation d'une charge électronique, le facteur de déphasage doit être conforme au Tableau 2 à tous les points de fonctionnement.
- Sauf spécification contraire, il convient de mesurer les CDM ou SDOM dont la puissance de sortie apparente assignée est inférieure à 8 kVA, avec un câble blindé de 15 m au minimum. Si une longueur de câble maximale inférieure à 15 m est spécifiée, il convient d'utiliser la plus grande longueur de câble admissible.

NOTE Les exigences relatives à la longueur de câble minimale ne s'appliquent pas aux PDS dans lesquels le CDM et le moteur ne peuvent pas être séparés.

### 7.5.3 Mesurage des pertes à l'entrée-sortie du CDM

#### 7.5.3.1 Montage de mesure - CDM

La méthode de détermination des pertes à l'entrée-sortie du CDM repose sur les mesurages de la puissance électrique à l'entrée et à la sortie du CDM. Le montage de mesure est représenté à la Figure 19. Les pertes du CDM doivent être déterminées à l'aide de la Formule (23):

$$P_{L,CDM,determined} = P_{in,CDM} - P_{out,CDM} \quad (23)$$

La puissance d'entrée  $P_{in,CDM}$  est déterminée sur la base des tensions d'entrée  $U_{in}$  et des courants d'entrée  $I_{in}$  mesurés par un analyseur de puissance. Par conséquent, la puissance de sortie  $P_{out,CDM}$  est déterminée sur la base des tensions de sortie  $U_{out}$  et des courants de sortie  $I_{out}$  mesurés par un analyseur de puissance.

Les signaux de tension et de courant de l'analyseur de puissance doivent directement provenir des bornes correspondantes du CDM. Dans le cas d'un système triphasé, les connexions à l'instrumentation ci-dessus doivent être du type à 3 fils (car les bornes d'entrée ou de sortie du CDM ne permettent généralement pas une connexion du neutre). En variante, un point neutre peut être créé et utilisé pour mesurer les tensions de phase du convertisseur afin de déterminer le cosphi pour chaque phase.

Un mesurage de température doit être effectué pour déterminer la stabilité en température du CDM. Ce mesurage peut être l'un des mesurages de température normaux tels que des thermocouples, une sonde à résistance (RTD, Resistance Temperature Detector) ou similaire. Le mesurage doit être réalisé par l'une des méthodes suivantes:

- sur le radiateur du CDM;
- dans le débit d'air de sortie;
- affichage de la température mesurée par le CDM soumis à essai.

Tous les mesurages de température doivent être documentés pendant l'essai.

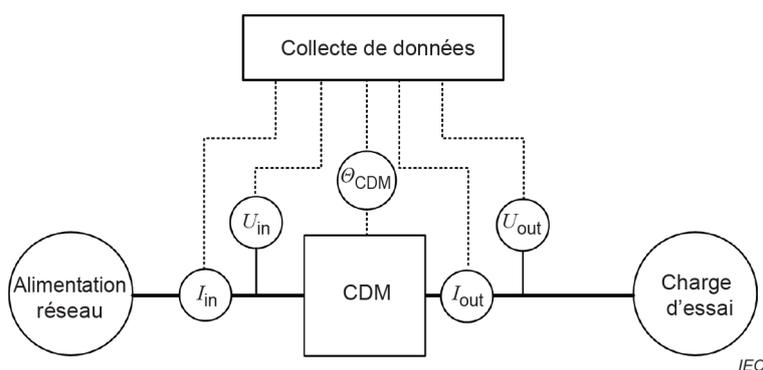


Figure 19 – Montage de mesure à l'entrée-sortie pour la détermination des pertes du CDM

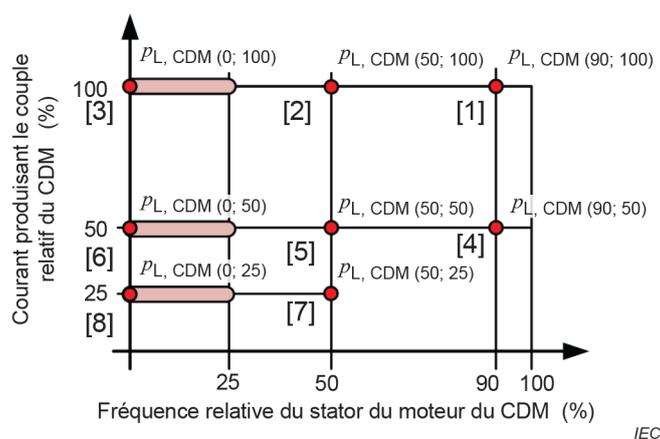
#### 7.5.3.2 Procédure de mesure - CDM

Les pertes en veille doivent être mesurées en premier lieu. À cet effet, le CDM doit être mis en marche sans commande de fonctionnement et la puissance d'entrée exigée pour assurer le fonctionnement de l'électronique, des commandes et d'un éventuel ventilateur mécanique dans le CDM doit être mesurée.

Les CDM équipés d'un ventilateur mécanique de refroidissement arrêtent le ventilateur après une durée d'inactivité spécifique et, dans ces cas, le rapport d'essai doit clairement indiquer si le ventilateur était ou non en marche pendant le mesurage des pertes en veille.

La procédure de mesure suivante détermine les pertes aux huit points de fonctionnement exigés d'un CDM. À chaque point de fonctionnement, un écart dû au glissement du moteur est admis. Cependant, un écart pouvant aller jusqu'à 25 % de la fréquence nominale est admis uniquement aux points de fonctionnement dont la vitesse est nulle (voir Figure 20).

La procédure commence par un fonctionnement à chaud initial du CDM à 90 % de fréquence et à un courant assigné tel que déterminé dans la Formule (3). La procédure d'essai complète comprend le fonctionnement à des vitesses et des courants plus faibles. L'ordre exigé des mesurages est indiqué sur la Figure 20.



**Figure 20 – Ordre des mesurages du CDM de [1] à [8]**

Dans un premier temps, le CDM fonctionne à 90 % de la fréquence et 100 % du courant [1] jusqu'à ce que la stabilité thermique soit obtenue. La stabilité est atteinte lorsque la vitesse d'échauffement est inférieure à 1 K par 15 min.

Une fois la stabilité thermique atteinte, un minimum de tension, de courant, de puissance et de facteur de puissance aux bornes d'entrée et de sortie du convertisseur doit être mesuré et enregistré, une moyenne des fluctuations étant calculée.

Ce point de fonctionnement est utilisé pour la classification IE du CDM.

Les points de fonctionnement suivants doivent être obtenus et mesurés aussi rapidement que possible. Toutes les données exigées au premier point vitesse/couple doivent être enregistrées à chaque point vitesse/couple tout en calculant la moyenne des fluctuations.

Le courant produisant le couple doit rester à 100 % pour les mesurages à 50 % [2] et 0 % à 25 % [3] de la fréquence assignée.

Le courant produisant le couple doit ensuite être réduit à 50 % pour les trois mesurages suivants à 90 % [4], 50 % [5] et 0 % à 25 % [6] de la fréquence assignée.

Enfin, le courant produisant le couple doit être réduit à 25 % pour les mesurages à 50 % [7] et 0 % à 25 % [8] de la fréquence assignée.

Dans certains cas, il peut s'avérer plus pratique de soumettre successivement à essai tous les points à une seule fréquence. Par conséquent, il est admis de changer l'ordre des points d'essai comme suit: [1] – [4] – [2] – [5] – [7] – [3] – [6] – [8].

Pour pallier les limitations du matériel de mesure à basses fréquences du commerce, il est acceptable de mesurer les pertes du CDM à une vitesse comprise entre 0 % et 25 % au lieu d'une vitesse nulle. Ces pertes doivent être utilisées sans extrapolation supplémentaire en tant que pertes aux points vitesse/couple [3], [6] et [8]. Ces points d'essai doivent être indiqués dans la documentation fournie avec le CDM.

#### 7.5.4 Mesurage des pertes à l'entrée-sortie du SDIM

##### 7.5.4.1 Montage de mesure - SDIM

La méthode de détermination des pertes à l'entrée-sortie du SDIM repose sur les mesurages de la puissance électrique à l'entrée et à la sortie à courant continu du SDIM. Le montage de mesure est représenté à la Figure 21. Une charge d'essai raccordée aux bornes de sortie du SDIM doit être utilisée pour réaliser l'essai et les pertes du SDIM doivent être déterminées à l'aide de la Formule (24):

$$P_{L,SDIM,determined} = P_{in,SDIM} - P_{out,SDIM} \quad (24)$$

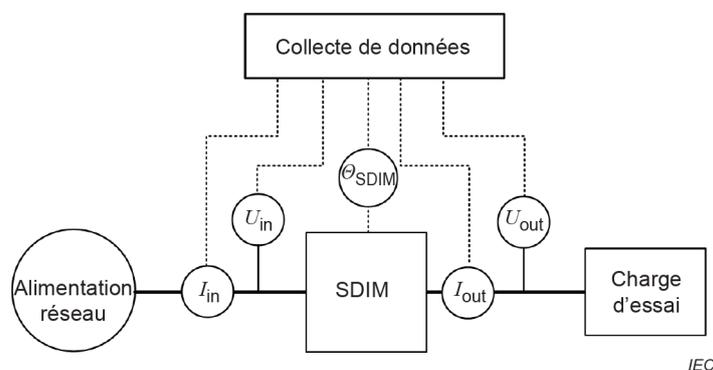
La puissance d'entrée  $P_{in,SDIM}$  est déterminée sur la base des tensions d'entrée  $U_{in}$  et des courants d'entrée  $I_{in}$  mesurés par un analyseur de puissance. Par conséquent, la puissance de sortie  $P_{out,SDIM}$  est déterminée sur la base de la tension de sortie  $U_{out}$  et du courant de sortie  $I_{out}$  à tension continu mesurés par un analyseur de puissance.

Les signaux de tension et de courant de l'analyseur de puissance doivent directement provenir des bornes correspondantes du SDIM. Dans le cas d'un système triphasé, les connexions à l'instrumentation ci-dessus doivent être du type à 3 fils (car les bornes d'entrée du SDIM ne permettent généralement pas une connexion du neutre).

Un mesurage de température doit être effectué pour déterminer la stabilité en température du SDIM. Ce mesurage peut être l'un des mesurages de température normaux tels que des thermocouples, une sonde à résistance (RTD) ou similaire. Le mesurage doit être réalisé par l'une des méthodes suivantes:

- sur le radiateur du SDIM;
- dans le débit d'air de sortie;
- affichage de la température mesurée par le SDIM soumis à essai.

Tous les mesurages de température doivent être documentés pendant l'essai.



**Figure 21 – Montage de mesure à l'entrée-sortie pour la détermination des pertes du SDIM**

### 7.5.4.2 Procédure de mesure - Pertes du SDIM

Comme les pertes du SDIM ne sont pas directement liées à un profil couple/vitesse spécifique, la puissance assignée de l'entrée du SDIM doit être utilisée à la place pour les essais. Les mesurages doivent être effectués à la tension d'entrée assignée du SDIM et les points suivants doivent être mesurés:

- 100 % de la puissance assignée [1];
- 50 % de la puissance assignée [2];
- 25 % de la puissance assignée [3];
- 0 % de la puissance assignée (condition à vide) [4].

NOTE Pour un SDIM, la puissance assignée est le produit de la tension de la liaison à courant continu  $U_{DC}$  et d' $I_{SDIM,out}$ , et la puissance apparente est donc égale à la puissance active.

Lorsqu'un SDIM est combiné avec un CDM par l'intermédiaire d'un SDOM, les points de pertes restants du SDIM doivent être calculés par interpolation des points de fonctionnement voisins.

Un SDIM ayant une capacité d'alimentation active doit être utilisé dans un mode permettant d'obtenir un facteur de puissance d'entrée  $\lambda$  d'environ 1, et la tension de la liaison à courant continu doit être documentée. Pour un redresseur à diodes, le facteur de puissance d'entrée ne peut pas être contrôlé. Une bobine d'arrêt de ligne de 2 % doit être utilisée. Si le SDIM basé sur un redresseur à diodes contient déjà une bobine d'arrêt de ligne ou à courant continu, aucune bobine d'arrêt supplémentaire ne doit être utilisée. La procédure débute par un fonctionnement à chaud initial du SDM à 100 % de la puissance assignée [1] jusqu'à ce que la stabilité thermique soit obtenue. La stabilité est atteinte lorsque la vitesse d'échauffement est inférieure à 1 K par 15 min.

Une fois la stabilité thermique atteinte, un minimum de tension, de courant, de puissance et de facteur de puissance aux bornes d'entrée du SDIM ainsi que la tension, le courant et la puissance aux bornes de sortie du SDM doivent être mesurés et enregistrés, une moyenne des fluctuations étant calculée.

Ce point de fonctionnement, 100 % de la puissance assignée du SDIM, doit être utilisé pour la classification IE du SDIM.

La puissance du SDIM doit être réduite à 50 % [2], 25 % [3] et 0 % [4] et les points de fonctionnement doivent être obtenus et mesurés aussi rapidement que possible. Toutes les données exigées au premier point de fonctionnement doivent être enregistrées à chaque point de fonctionnement tout en calculant la moyenne des fluctuations.

## 7.5.5 Mesurage des pertes à l'entrée-sortie du SDOM

### 7.5.5.1 Montage de mesure - SDOM

La méthode de détermination des pertes à l'entrée-sortie du SDOM repose sur les mesurages de la puissance électrique à l'entrée à courant continu et à la sortie du SDOM. Le montage de mesure est représenté à la Figure 22. Le SDOM doit être alimenté par une alimentation à courant continu et les pertes doivent être déterminées en utilisant la Formule (25):

$$P_{L,SDOM,determined} = P_{in,SDOM} - P_{out,SDOM} \quad (25)$$

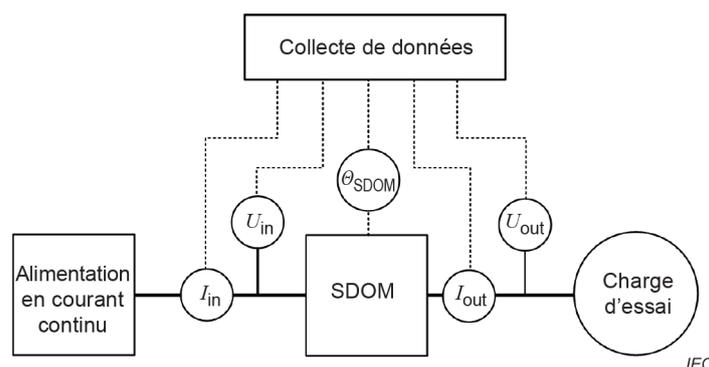
La puissance d'entrée  $P_{in,SDOM}$  est déterminée sur la base des tensions d'entrée à courant continu  $U_{in}$  et des courants d'entrée à courant continu  $I_{in}$  mesurés par un analyseur de puissance. Par conséquent, la puissance de sortie  $P_{out,SDOM}$  est déterminée sur la base des tensions de sortie  $U_{out}$  et des courants de sortie  $I_{out}$  mesurés par un analyseur de puissance.

Les signaux de tension et de courant de l'analyseur de puissance doivent directement provenir des bornes correspondantes du SDOM. L'instrumentation utilisée pour le mesurage en sortie doit être du type à 3 fils (car les bornes de sortie du SDOM ne permettent généralement pas une connexion du neutre).

Un mesurage de température doit être effectué pour déterminer la stabilité en température du SDOM. Ce mesurage peut être l'un des mesurages de température normaux tels que des thermocouples, une sonde à résistance (RTD) ou similaire. Le mesurage doit être réalisé par l'une des méthodes suivantes:

- sur le radiateur du SDOM;
- dans le débit d'air de sortie;
- affichage de la température mesurée par le SDOM soumis à essai.

Tous les mesurages de température doivent être documentés pendant l'essai.



**Figure 22 – Montage de mesure à l'entrée-sortie pour la détermination des pertes du SDOM**

#### 7.5.5.2 Procédure de mesure - Pertes du SDOM

Pour déterminer les pertes des SDOM, la procédure de mesure et les points de fonctionnement pour les CDM décrits en 7.5.3.2 doivent être utilisés.

### 7.5.6 Mesurage des pertes à l'entrée-sortie du PDS

#### 7.5.6.1 Montage de mesure - PDS

La méthode de détermination des pertes à l'entrée-sortie du PDS repose sur les mesurages de la puissance électrique à l'entrée et de la puissance mécanique à la sortie du PDS. Le montage de mesure est représenté à la Figure 23. Les pertes du PDS doivent être déterminées à l'aide de la Formule (26):

$$R_{L,PDS,determined} = R_{in,PDS} - P_{out,PDS} \quad (26)$$

La puissance d'entrée  $P_{in,PDS}$  est déterminée sur la base des tensions d'entrée  $U_{in}$  et des courants d'entrée  $I_{in}$  mesurés par un analyseur de puissance.

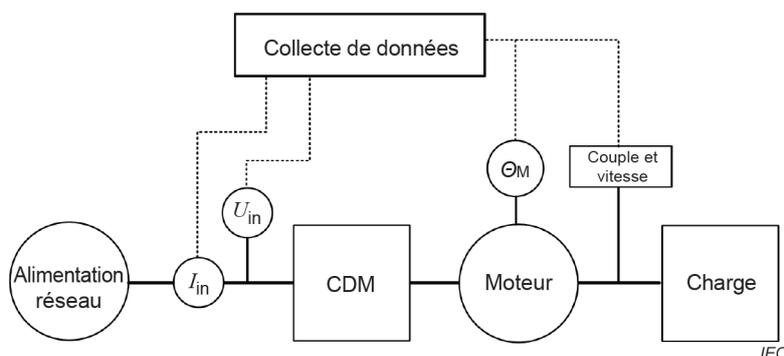
La puissance de sortie  $P_{out,PDS}$  est déterminée sur la base du couple et de la vitesse mesurés du moteur.

Les signaux de tension et de courant de l'analyseur de puissance doivent directement provenir des bornes correspondantes du CDM. Dans le cas d'un système triphasé, la connexion d'entrée à l'instrumentation ci-dessus doit être du type à 3 fils (car les bornes d'entrée du CDM ne permettent généralement pas une connexion du neutre).

Un mesurage de température doit être effectué pour déterminer la stabilité en température du moteur. Ce mesurage peut être l'un des mesurages de température normaux tels que des thermocouples, une sonde à résistance (RTD) ou similaire. Le mesurage doit être réalisé par l'une des méthodes suivantes:

- directement sur la surface du boîtier du stator du moteur tout en préservant le blindage de l'air de refroidissement du moteur;
- à l'intérieur du logement du stator lui-même, où un capteur peut être soigneusement mis en place à partir de la boîte à bornes.

Tous les mesurages de température doivent être documentés pendant l'essai.

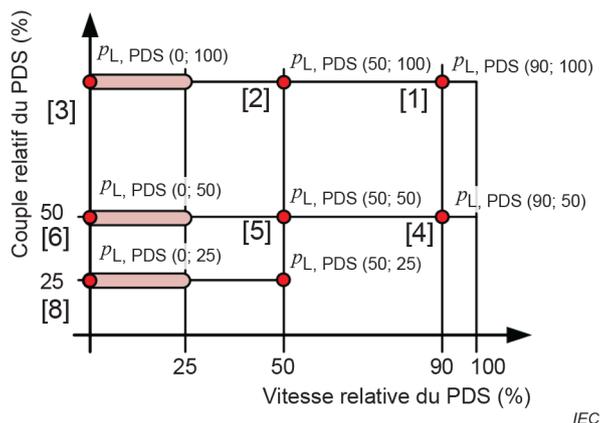


**Figure 23 – Montage de mesure à l'entrée-sortie pour la détermination des pertes du PDS**

#### 7.5.6.2 Procédure de mesure - PDS

La procédure de mesure suivante détermine les pertes aux huit points vitesse/couple exigés d'un PDS. À chaque point de fonctionnement, un écart dû au glissement du moteur est admis. Cependant, un écart pouvant aller jusqu'à 25 % de la fréquence nominale est admis uniquement aux points de fonctionnement dont la vitesse est nulle (voir Figure 24).

La procédure débute avec un fonctionnement à chaud initial du PDS qui est nécessaire pour obtenir une température stable à la vitesse et au couple assignés. La procédure d'essai complète comprend le fonctionnement à des vitesses et des couples plus faibles. L'ordre exigé des mesurages est indiqué sur la Figure 24.



**Figure 24 – Ordre des mesurages du PDS de [1] à [8]**

Tout d'abord, le PDS fonctionne à la vitesse et au couple assignés maximaux [1] jusqu'à ce que le moteur atteigne l'équilibre thermique (un échauffement inférieur à 1 K par 30 min).

NOTE Étant donné les constantes de temps thermique plus faibles d'un CDM, il peut être présumé que le CDM a déjà atteint la stabilité thermique à cet instant.

Une fois la stabilité thermique atteinte, un ensemble de valeurs minimal comprenant la tension, le courant, la puissance et le facteur de puissance à l'entrée et de couple de l'arbre du moteur, la vitesse de l'arbre du moteur et la température ambiante du moteur doit être mesuré et enregistré, une moyenne des fluctuations étant calculée.

Ce point de fonctionnement est utilisé pour la classification IES du PDS.

Les points de fonctionnement suivants doivent être obtenus et mesurés aussi rapidement que possible. Toutes les données exigées au premier point vitesse/couple doivent être enregistrées à chaque point vitesse/couple tout en calculant la moyenne des fluctuations.

Les points de fonctionnement à 50 % [2] et de 0 % à 25 % [3] de la vitesse assignée doivent être mesurés avec 100 % du couple du moteur.

Le couple du moteur doit ensuite être réduit à 50 % de sa valeur assignée, et les mesurages doivent être effectués à 90 % [4], 50 % [5] et de 0 % à 25 % [6] de la vitesse assignée.

Enfin, le couple du moteur doit être réduit à 25 % de sa valeur assignée pour les mesurages à 50 % [7] et de 0 % à 25 % [8] de la vitesse assignée.

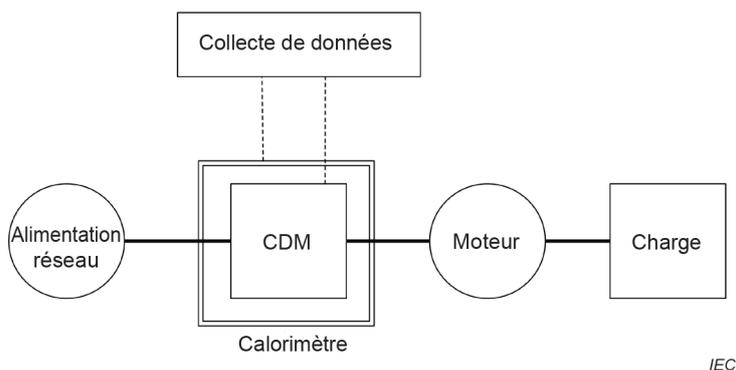
Dans certains cas, il peut s'avérer plus pratique de soumettre successivement à essai tous les points à une seule fréquence. Par conséquent, il est admis de changer l'ordre des points d'essai comme suit: [1] – [4] – [2] – [5] – [7] – [3] – [6] – [8].

Étant donné que les moteurs électriques présentent une répartition inégale du courant et donc un échauffement inégal de leurs bobines lorsque la fréquence d'alimentation est nulle ou très proche d'une valeur nulle, les pertes du PDS peuvent également être indiquées pour une vitesse correspondant à jusqu'à 25 % au lieu d'une vitesse nulle. Ces pertes doivent être utilisées sans extrapolation supplémentaire en tant que pertes aux points vitesse/couple [3], [6] et [8].

## 7.6 Mesurage calorimétrique des pertes du CDM

La méthode de détermination calorimétrique des pertes de puissance repose sur le mesurage calorimétrique des pertes de puissance dissipée. Les mesurages doivent être effectués à l'équilibre thermique et le composant à mesurer doit être isolé thermiquement pour s'assurer de la conduction des pertes de puissance dissipée par le milieu de refroidissement (air ou eau).

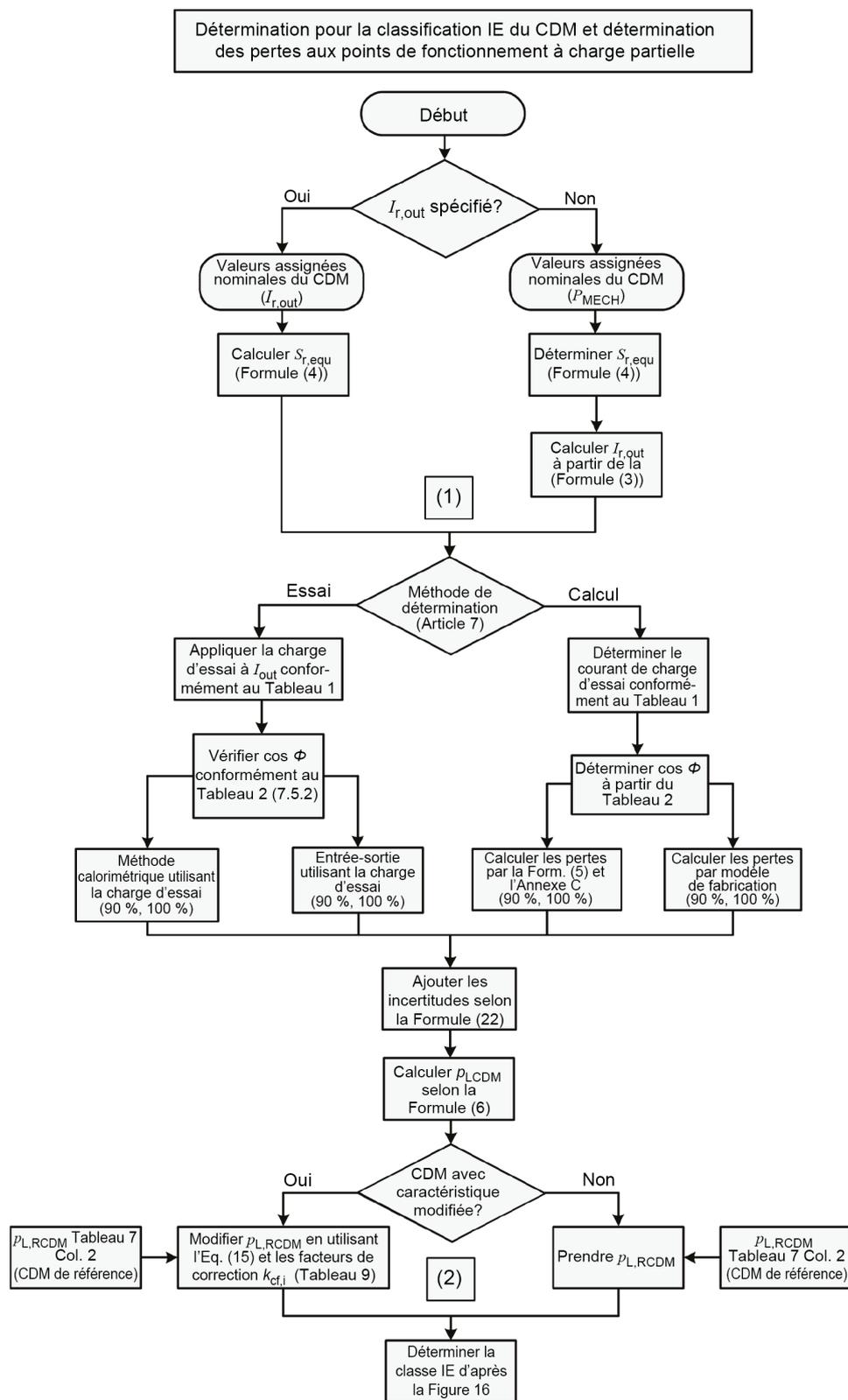
Le montage de mesure est représenté à la Figure 25. Les conditions d'essai sont décrites en 7.5.2. Des procédures et des méthodes d'essai détaillées sont décrites à l'Annexe H.



**Figure 25 – Montage de mesure calorimétrique pour la détermination des pertes du CDM**

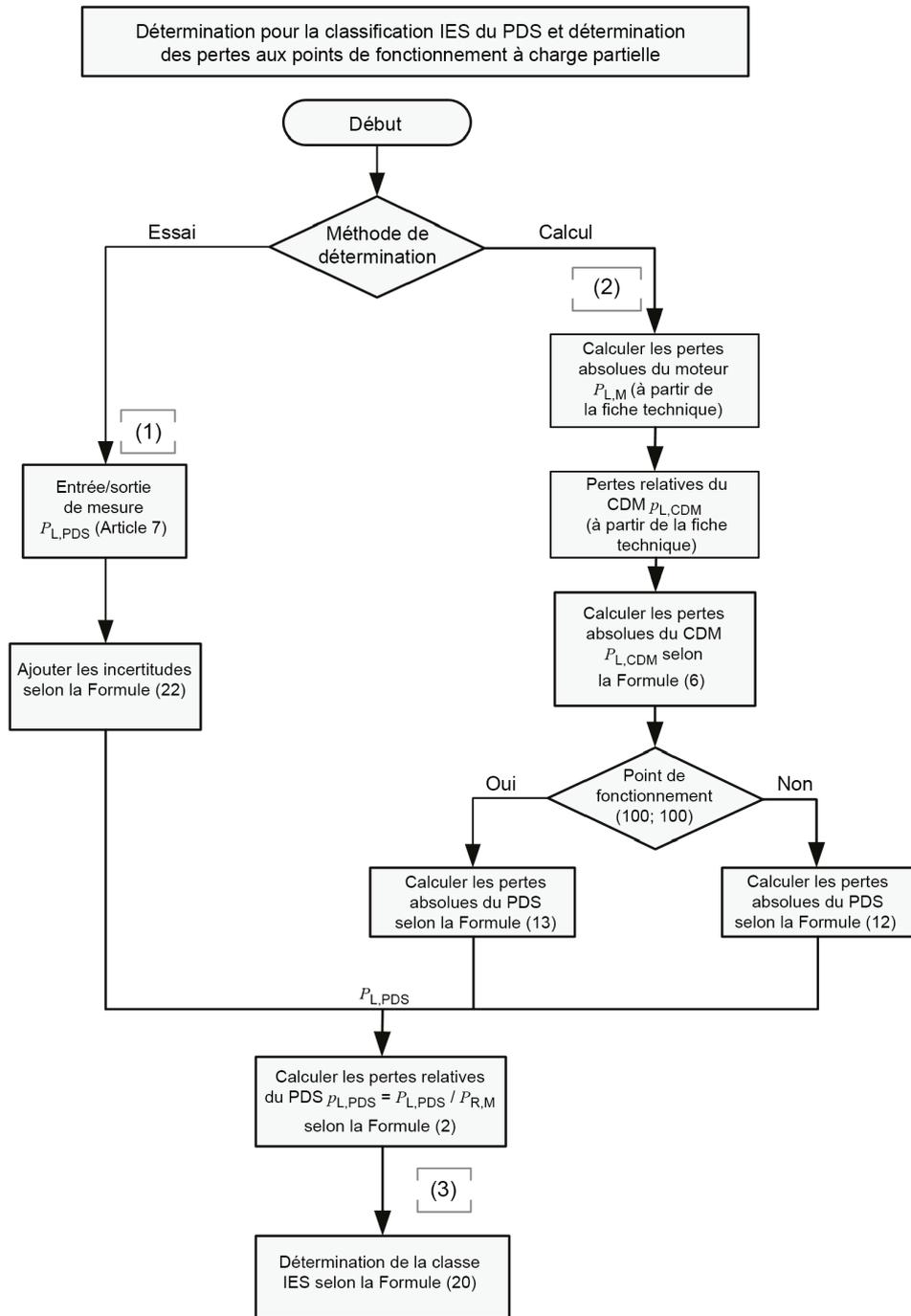
## 7.7 Organigrammes des procédures d'essai

Voir Figure 26 et Figure 27.



Point de fonctionnement à charge partielle: pour la détermination du fonctionnement à charge partielle, l'organigramme des points 1 à 2 est répété pour chaque point de fonctionnement à charge partielle en réglant  $I_{OUT}$  et  $\cos \Phi$  selon Tableau 1 et Tableau 2 à chacun des huit points de fonctionnement à charge partielle (25 %, 50 %, 90 % de couple relatif et 0 %25 %, 50 %, 90 % de vitesse relative selon la Figure 20).

**Figure 26 – Détermination de la classification IE pour le CDM et détermination des pertes aux points de fonctionnement à charge partielle**



IEC

NOTE 1 Le moteur peut être un moteur physique ou un moteur de référence.

NOTE 2 Le CDM peut être un CDM physique ou un CDM de référence.

NOTE 3 Pour la détermination du fonctionnement à charge partielle, les points (1) à (3) de l'organigramme de la séquence d'essai sont répétés pour chaque point de fonctionnement à charge partielle en réglant le couple et la vitesse conformément à la Figure 4.

NOTE 4 Pour la détermination du fonctionnement à charge partielle, les points (2) à (3) de l'organigramme de la séquence de calcul sont répétés pour chaque point de fonctionnement à charge partielle en réglant le couple et la vitesse conformément à la Figure 5 et à la Figure 6 pour le moteur et le CDM.

**Figure 27 – Détermination de la classification IES pour le PDS et détermination des pertes aux points de fonctionnement à charge partielle**

## 8 Exigences relatives à la documentation de l'utilisateur

### 8.1 Généralités

L'Article 8 a pour objectif de définir les informations nécessaires pour déterminer les pertes d'énergie du CDM, du SDIM/SDOM et du PDS. Le Tableau 9 présente les informations exigées, en indiquant l'emplacement où les informations doivent être fournies, suivi de paragraphes explicatifs.

Toutes les exigences relatives à la documentation de l'utilisateur des CDM s'appliquent également aux SDIM et aux SDOM.

La documentation doit mentionner toutes les étiquettes d'équipement relatives à l'efficacité énergétique.

Sauf indication contraire, les exigences de l'Article 8 doivent s'appliquer à tous les CDM et au PDS.

Les informations fournies doivent permettre d'établir une classification de l'efficacité énergétique du CDM et du PDS; elles doivent par ailleurs être fournies en quantité suffisante pour permettre une classification de l'efficacité énergétique de l'application finale et/ou du système dans lequel le CDM ou le PDS sert de composant.

Le fait que la fréquence assignée du stator de charge d'essai soit de 50 Hz ou 60 Hz doit être défini et cette information doit être incluse dans la documentation.

**Tableau 9 – Exigences relatives aux informations**

Informations	Paragraphe	Emplacement a, b			Paragraphe technique
		1	2	3	
	référence				référence
<b>Pour la sélection</b>	8.2				
<b>Pour la détermination de la classification de l'efficacité énergétique</b>	8.3				
Généralités	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.5, 7
Tension d'alimentation	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.5, 7
Fréquence d'alimentation	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.5, 7
Fréquence assignée du stator de charge d'essai en cas de CDM/SDOM et vitesse assignée du moteur (tours mécaniques par minute) en cas de PDS	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.5, 7
Assignment d'une classe IE au CDM/SDIM/SDOM et d'une classe IEC au PDS	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.5, 7
Tension de sortie fondamentale maximale du CDM/SDOM	8.3			X	5.2, Annexe E
<b>Pour la détermination des pertes d'énergie supplémentaires et des conditions de charge partielle</b>	8.4			X	
Généralités	8.4.1			X	Annexe B, 4.2, 7
Pertes de charge partielle	8.4.2			X	4.2, 7
Pertes des accessoires et options	8.4.3			X	
Pertes en mode veille	8.4.4			X	7, B.10, C.7
Mode de récupération	8.4.5			X	B.4.3, 5.5
Caractéristiques et facteurs de correction	8.4.6			X	6.5, 7

- <sup>a</sup> Emplacement: 1. sur le produit (voir 8.1); 2. sur l'emballage; 3. dans la documentation sur le produit.
- <sup>b</sup> La documentation sur le produit demandée en 8.4 peut être fournie au format électronique. Lorsque plusieurs produits identiques sont fournis à un seul client, il n'est pas nécessaire de fournir un manuel pour chaque unité, si le client l'accepte.

## 8.2 Informations destinées à la sélection

Chaque partie d'un CDM ou d'un PDS fourni sous forme de produit distinct doit être accompagnée d'informations relatives à son fonctionnement et à ses caractéristiques électriques, comme le demandent les normes de produits applicables.

NOTE Exemples types de normes de produits:

- IEC 61800-2 pour les systèmes d'entraînement électrique à vitesse variable;
- IEC 60947-4-1 pour les contacteurs et les démarreurs de moteurs – Contacteurs et démarreurs électromécaniques;
- IEC 60947-4-2 pour les contacteurs et les démarreurs de moteurs – Gradateurs et démarreurs à semiconducteurs de moteurs.

## 8.3 Informations destinées à la détermination de la classification de l'efficacité énergétique

Les informations sur la classification de l'efficacité énergétique (IE/IES) du CDM et du PDS déterminée en 4.6, 4.7, 6.2 et 6.5 doivent être fournies et vérifiées conformément à l'Article 7.

Une classe IES doit être assignée au PDS en cas de combinaison physique du moteur et du CDM en une seule unité ou lorsqu'il est prévu de les utiliser uniquement dans cette combinaison. Dans ce cas, il n'est pas exigé d'assigner une classe IE individuelle au CDM et au moteur.

Pour un CDM à usage général qu'il n'est pas prévu de vendre ou de faire fonctionner sur un moteur spécifique, seule l'assignation d'une classe IE au CDM est exigée. L'assignation d'une classe IES pour la combinaison d'un CDM et d'un moteur peut toutefois être spécifiée.

Les informations supplémentaires suivantes, utilisées pour la détermination des pertes, doivent être fournies avec la classification IE/IES:

- valeur efficace de la tension d'alimentation entre phases  $U_{mLL1}$ ;
- fréquence de la tension d'alimentation (par exemple 50 Hz, 60 Hz);
- fréquence de commutation  $f_s$  du CDM;
- tension type de la liaison à courant continu  $U_{DC}$  du CDM;
- fréquence assignée du stator de charge d'essai en cas de CDM ou vitesse assignée du moteur (tours mécaniques par minute) en cas de PDS;
- tension de sortie fondamentale efficace maximale entre phases du CDM., en tension ou en pourcentage de la tension d'entrée.

## 8.4 Informations destinées à la détermination des pertes d'énergie supplémentaires et des conditions de charge partielle

### 8.4.1 Généralités

Les pertes du CDM ou du PDS sont exigées pour déterminer les classes d'efficacité énergétique et pour calculer les pertes d'énergie dans les applications finales ou le système (voir 4.9 et Figure 7), lorsque le CDM et/ou le PDS servent de composants comme décrit à l'Annexe B. Ceci inclut également le fonctionnement à charge partielle ainsi que des options applicables nécessaires au fonctionnement de cette application.

#### **8.4.2 Pertes en conditions de charge partielle**

Les pertes du CDM selon les points de fonctionnement à charge partielle définis en 4.2 doivent être indiquées et vérifiées conformément à l'Article 7. Dans le présent document, les informations sur les pertes ne sont obligatoires que pour les CDM qui transforment une puissance d'entrée en courant alternatif, en puissance de sortie en courant alternatif.

Les pertes du PDS selon les points de fonctionnement à charge partielle définis en 4.2 doivent être indiquées et vérifiées conformément à l'Article 7.

Le nombre de points de fonctionnement à charge partielle peut être réduit lorsque l'application finale n'exige qu'un nombre limité de points de fonctionnement selon l'approche produit étendu. Si seuls des points de fonctionnement à charge partielle limités pour prendre en charge des applications spécifiques sont fournis, cela doit être indiqué dans le manuel.

#### **8.4.3 Pertes des accessoires et options**

Le paragraphe 8.4.3 s'applique aux pertes des filtres EMI facultatifs, des bobines d'arrêt de ligne, des transformateurs, des ventilateurs externes, des bobines d'arrêt de sortie, des filtres de sortie ou d'autres options consommatrices de puissance, qu'il est prévu d'utiliser avec le PDS ou le CDM pour le fonctionnement dans l'application finale, les pertes d'énergie dépassant:

- 0,1 % de la puissance assignée du CDM; et
- 5 W au total.

Dans d'autres cas, les pertes d'énergie des accessoires et des options peuvent être négligées.

Les pertes doivent être indiquées dans la documentation au point de fonctionnement de la puissance assignée avec une tolérance de  $\pm 25$  %, sauf si elles sont comprises dans les pertes du CDM ou du PDS.

Cela s'applique également aux dispositifs de commande de mouvement ou aux options d'application qui sont spécifiquement destinés à être utilisés avec l'entraînement.

#### **8.4.4 Pertes en mode veille**

Les pertes de puissance lorsque le CDM et le PDS sont en mode veille avec une tolérance de  $\pm 25$  % doivent être indiquées.

#### **8.4.5 Mode de récupération**

La documentation de l'utilisateur doit indiquer si un CDM ou un PDS est capable ou non de restituer l'énergie de la charge au réseau.

NOTE Le fournisseur peut fournir des informations à l'intégrateur du système afin de déterminer les pertes du CDM ou du PDS en mode de récupération à partir de la topologie de récupération supportée par le CDM ou le PDS.

#### **8.4.6 Caractéristiques et facteurs de correction**

Dans le cas d'un CDM ou d'un PDS à fonctionnalité modifiée ou d'un SDIM, le fournisseur du DSOM doit indiquer, dans la documentation, la caractéristique du module et les facteurs de correction appliqués pour le calcul des pertes de référence modifiées.

À cette fin, le nombre de lignes dans le Tableau 8 peut être utilisé.

## Annexe A (informative)

### Pertes du RCDM et exemple de détermination des limites de classe IES

#### A.1 Tableaux des pertes relatives

Le Tableau A.1 fournit des pourcentages de pertes relatives pour les CDM de référence.

**Tableau A.1 – Pertes relatives (%) des CDM de référence (IE1) à différentes puissances assignées aux points de fonctionnement décrits à la Figure 6**

$P_{rM}$  kW (informative)	$S_{r,requ}$  kVA	$p_{L,RCDM, relative (0;25)}$	$p_{L,RCDM, relative (0;50)}$	$p_{L,RCDM, relative (0;100)}$	$p_{L,RCDM, relative (50;25)}$	$p_{L,RCDM, relative (50;50)}$	$p_{L,RCDM, relative (50;100)}$	$p_{L,RCDM, relative (90;50)}$	$p_{L,RCDM, relative (90;100)}$
0,12	0 278	33,79	33,84	34,30	33,89	34,04	34,84	34,39	35,85
0,18	0 381	25,24	25,28	25,75	25,34	25,48	26,28	25,83	27,30
0,25	0,5	19,74	19,78	20,25	19,84	19,99	20,78	20,34	21,80
0,37	0 697	14,77	14,82	15,29	14,87	15,02	15,82	15,37	16,84
0,55	0 977	11,14	11,19	11,66	11,24	11,39	12,19	11,74	13,21
0,75	1,29	8,96	9,00	9,47	9,06	9,20	10,00	9,55	11,02
1,1	1,71	6,86	7,13	7,82	6,93	7,33	8,40	7,68	9,51
1,5	2,29	5,56	5,83	6,52	5,63	6,03	7,10	6,38	8,21
2,2	3,3	4,54	4,82	5,51	4,61	5,02	6,09	5,37	7,20
3	4,44	4,07	4,35	5,04	4,14	4,55	5,62	4,90	6,72
4	5,85	3,74	4,02	4,71	3,82	4,22	5,29	4,57	6,39
5,5	7,94	3,35	3,63	4,32	3,42	3,83	4,90	4,18	6,01
7,5	9,95	2,80	3,09	4,02	2,86	3,28	4,64	3,61	5,84
11	14,4	2,39	2,68	3,61	2,46	2,87	4,23	3,20	5,43
15	19,5	2,15	2,44	3,37	2,22	2,63	3,99	2,96	5,18
18,5	23,9	2,02	2,32	3,24	2,09	2,51	3,86	2,83	5,05
22	28,3	1,94	2,23	3,16	2,01	2,43	3,78	2,75	4,97
30	38,2	1,83	2,12	3,05	1,90	2,31	3,67	2,64	4,87
37	47	1,76	2,05	2,98	1,83	2,24	3,60	2,57	4,79
45	56,9	1,71	2,01	2,93	1,78	2,20	3,55	2,52	4,75
55	68,4	1,62	1,93	2,90	1,70	2,13	3,53	2,47	4,74
75	92,8	1,58	1,88	2,85	1,65	2,08	3,48	2,42	4,69
90	111	1,55	1,86	2,82	1,62	2,05	3,45	2,39	4,66
110	135	1,24	1,48	2,27	1,32	1,68	2,91	2,02	4,11
132	162	1,23	1,47	2,26	1,30	1,67	2,89	2,01	4,10
160	196	1,22	1,46	2,25	1,29	1,66	2,88	2,00	4,09
200	245	1,21	1,45	2,24	1,28	1,65	2,87	1,98	4,07
250	302	1,17	1,42	2,24	1,24	1,61	2,88	1,95	4,10
315	381	1,16	1,41	2,23	1,23	1,61	2,87	1,94	4,09
355	429	1,16	1,41	2,23	1,23	1,60	2,87	1,94	4,09

$P_{rM}$ kW (informative)	$S_{r,requ}$ kVA	$P_{L,RCDM,relative}$ (0;25)	$P_{L,RCDM,relative}$ (0;50)	$P_{L,RCDM,relative}$ (0;100)	$P_{L,RCDM,relative}$ (50;25)	$P_{L,RCDM,relative}$ (50;50)	$P_{L,RCDM,relative}$ (50;100)	$P_{L,RCDM,relative}$ (90;50)	$P_{L,RCDM,relative}$ (90;100)
400	483	1,16	1,41	2,23	1,23	1,60	2,87	1,94	4,09
500	604	1,15	1,40	2,22	1,22	1,60	2,86	1,94	4,08
560	677	1,15	1,40	2,22	1,22	1,60	2,86	1,93	4,08
630	761	1,15	1,40	2,22	1,22	1,60	2,86	1,93	4,08
710	858	1,15	1,40	2,22	1,22	1,59	2,86	1,93	4,08
800	967	1,15	1,40	2,22	1,22	1,59	2,86	1,93	4,08
900	1 088	1,15	1,39	2,21	1,21	1,59	2,85	1,93	4,08
1 000	1 209	1,14	1,39	2,21	1,21	1,59	2,85	1,93	4,08

NOTE 1 Le Tableau A.1 s'applique pour l'évaluation des CDM à 50 Hz et 60 Hz.

NOTE 2 Les valeurs en kW de  $P_{rM}$  sont données à titre d'information uniquement pour faire référence à la puissance assignée type du moteur avec une puissance apparente type du CDM.

## A.2 Calcul des pertes relatives pour les classes IES

### A.2.1 Généralités

Dans l'exemple représenté à l'Article A.2, les pertes relatives des classes IES sont déterminées pour un PDS de 7,5 kW/1 500 tr/min pour IES3.

### A.2.2 Détermination des pertes relatives du CDM

Pour cet exemple, le CDM utilisé ne fournit aucune fonctionnalité qui se qualifierait pour un facteur de correction.

Prendre les pertes relatives de référence du Tableau A.2.

**Tableau A.2 – Pertes relatives du CDM de 9,95 kVA selon le Tableau A.1**

$P_{rM}$ kW	$S_{r,requ}$ kVA	$P_{L,CDM}$ (0;25)	$P_{L,CDM}$ (0;50)	$P_{L,CDM}$ (0;100)	$P_{L,CDM}$ (50;25)	$P_{L,CDM}$ (50;50)	$P_{L,CDM}$ (50;100)	$P_{L,CDM}$ (90;50)	$P_{L,CDM}$ (90;100)
7,5	9,95	2,80	3,09	4,02	2,86	3,28	4,64	3,61	5,84

Comme ces valeurs concernent IE1, il est nécessaire d'adapter à IE2 la valeur pour (90;100).

$$P_{L,CDM,IE2(90;100)} = P_{L,IE1(90;100)} \cdot 0,75$$

$$P_{L,CDM,IE2(90;100)} = 5,84\% \cdot 0,75 \quad (A.1)$$

$$P_{L,CDM,IE2(90;100)} = 4,38 \%$$

### A.2.3 Détermination des pertes relatives du moteur

Les pertes relatives du moteur sont à reprendre de l'IEC TS 60034-30-2.

$$p_{L,M,IE3,1\,500(90;100)} = 10,88 \text{ \%} \quad (\text{A.2})$$

### A.2.4 Somme des pertes relatives du PDS

La somme des pertes relatives est effectuée conformément à la Formule (2).

$$p_{L,PDS} = \frac{p_{L,M} \cdot P_{r,M} + p_{L,CDM} \cdot S_{r,CDM}}{P_{r,M}}$$

$$p_{L,PDS} = \frac{11,97 \text{ \%} \cdot 7\,500 \text{ W} + 4,38 \text{ \%} \cdot 9\,950 \text{ VA}}{7\,500 \text{ W}} \quad (\text{A.3})$$

$$p_{L,PDS} = 17,78 \text{ \%}$$

Un PDS de 7,5 kW/1 500 tr/min peut être classé IES3 si ses pertes relatives sont inférieures ou égales à 17,78 %.

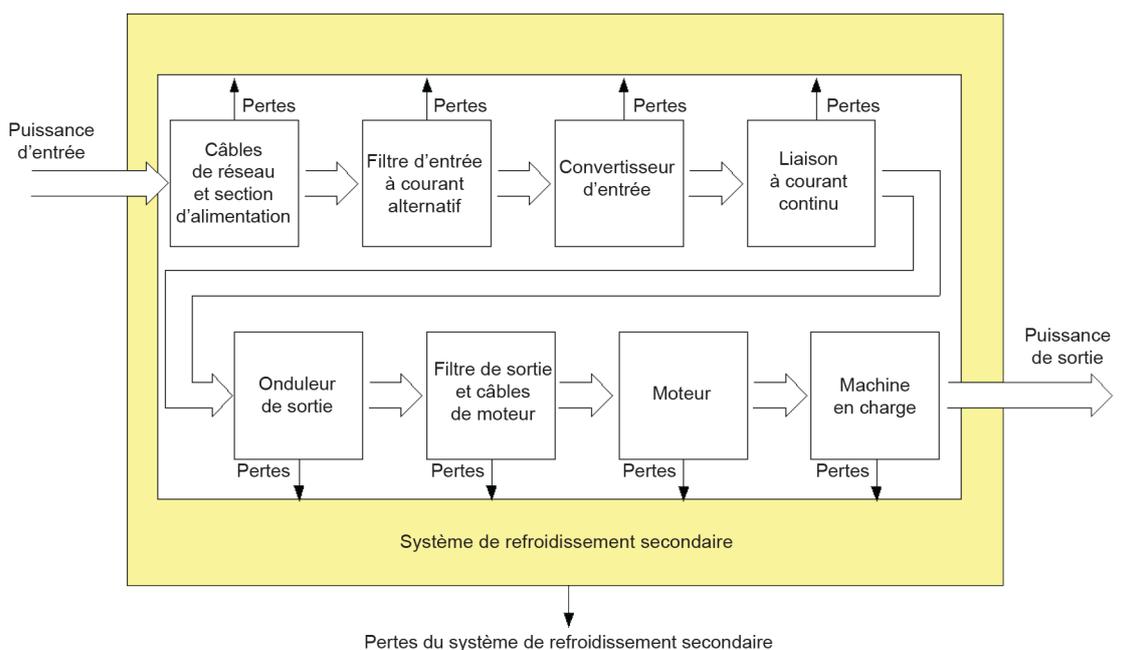
## Annexe B (informative)

### Description des éléments d'un produit étendu utilisant un PDS par rapport à leur impact sur les pertes

#### B.1 Généralités

Un PDS est utilisé pour alimenter le moteur à partir du réseau dans des applications exigeant des variations de la vitesse d'un moteur. Le PDS peut réguler la vitesse et/ou le couple comme l'application et sa commande l'exigent.

La Figure B.1 représente le système complet qui transfère l'énergie du réseau à la charge. Le câblage du réseau et la machine en charge ne font pas partie du PDS, bien que leurs pertes puissent être importantes pour évaluer un produit étendu économe en énergie. Pour déterminer l'efficacité énergétique globale, il est nécessaire d'évaluer le système complet. En particulier, la solution qui consiste à optimiser l'efficacité énergétique de sous-systèmes individuels n'est pas une solution favorable car ces optimisations locales peuvent réduire l'efficacité énergétique globale. L'Annexe B décrit les principales dépendances.

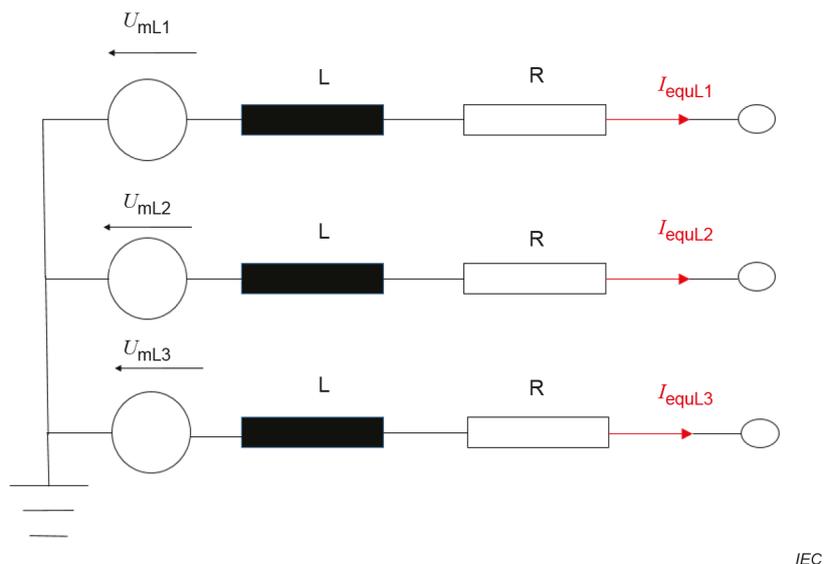


IEC

Figure B.1 – Vue d'ensemble du produit étendu et du flux énergétique

#### B.2 Pertes dans le câblage de réseau et la section d'alimentation

La Figure B.2 représente le circuit équivalent de base pour une alimentation réseau triphasée au point de couplage commun:



**Figure B.2 – Circuit équivalent du réseau et du câblage de réseau**

La Figure B.2 représente un système d'alimentation triphasé comportant une mise à la terre à point neutre. Pour ce qui concerne les pertes d'énergie, les autres types de configurations de réseau, comme une mise à la terre en triangle ou une alimentation monophasée, présentent un comportement identique. Dans une première approximation, le réseau peut être considéré comme une source de puissance idéale 50 Hz ou 60 Hz. Cette source de puissance a une impédance série dominée par une composante inductive et une composante ohmique. La composante ohmique est la partie résistive des câbles de réseau, des interrupteurs et des fusibles.

Des pertes d'énergie se produisent dans la partie ohmique du circuit équivalent. Ces pertes augmentent avec le carré de la quantité de courant qui circule dans le réseau. En partant du principe que tous les courants ont une amplitude identique et qu'ils sont décalés de 120°, les pertes du réseau sont de:

$$R_{L,mains} = 3 \cdot R \cdot I_{equL1}^2 \tag{B.1}$$

En présumant qu'un PDS est raccordé au réseau représenté à la Figure B.2, les pertes de réseau dépendent du courant d'entrée du PDS. Le PDS consomme au minimum la puissance active exigée par la charge et les pertes produites par le PDS lui-même. Le PDS peut toutefois exiger une puissance apparente supplémentaire, en raison de la puissance réactive et des courants harmoniques. Le rapport de la puissance active sur la puissance apparente (facteur de puissance) est défini par:

$$\lambda = \frac{P_{equ}}{S_{equ}} = \frac{3 \cdot U_{mL1} \cdot I_{1,equL1} \cdot \cos\phi_{equ}}{3 \cdot U_{mL1} \cdot I_{equL1}} = \frac{I_{1,equL1} \cdot \cos\phi_{equ}}{I_{equL1}} \tag{B.2}$$

où

$I_{equL1}$  est le courant efficace de la phase L1;

$I_{1,equL1}$  est la composante fondamentale du courant  $I_{equL1}$ ;

$\cos\varphi_{\text{equ}}$  est le déphasage entre la composante fondamentale de la tension et le courant du réseau  $I_{1,\text{equ}L1}$ .

Un PDS dont  $\lambda$  est proche de 1 engendre des pertes minimales dans le réseau. La valeur de  $\lambda$  est principalement déterminée par le filtre d'entrée et le convertisseur d'entrée du PDS.

### B.3 Filtre d'entrée

#### B.3.1 Filtre EMI à haute fréquence

Les filtres EMI à haute fréquence servent à limiter les émissions à haute fréquence du PDS conformément à l'IEC 61800-3 afin de ne pas perturber les services radio. Les émissions maximales admises d'un PDS dépendent de l'environnement d'utilisation du PDS.

Généralement, la conception des filtres EMI à haute fréquence est influencée par les paramètres de conformité applicables. Il est généralement tenu compte de la conformité:

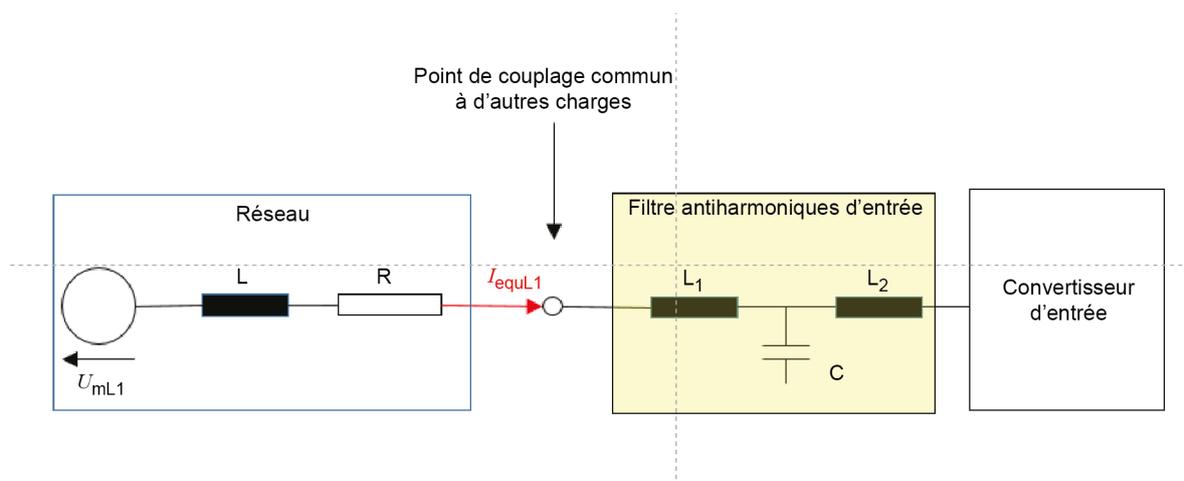
- au faible courant de fuite conformément à l'IEC 61800-5-1 (par exemple conformité aux dispositifs à courant différentiel résiduel ou respect de la limite 3,5 mA/10 mA par rapport à l'exigence de dimension de la connexion de terre de protection);
- à la prise en charge de la longueur de câble blindé du moteur; et
- à l'exigence dans des environnements différents conformément à l'IEC 61800-3.

Cela exige des conceptions différentes du filtre EMI, y compris la bobine EMI, ce qui a également un impact significatif sur les pertes de la bobine EMI.

Les pertes du filtre RFI peuvent avoir un effet perceptible sur les pertes d'un PDS, notamment à faible puissance assignée.

#### B.3.2 Filtres antiharmoniques à basse fréquence

Les filtres antiharmoniques à basse fréquence servent dans certains cas à réduire la distorsion de la tension de réseau et, par conséquent, à assurer la compatibilité avec d'autres charges raccordées au réseau. Voir Figure B.3.



IEC

**Figure B.3 – Représentation d'un filtre antiharmoniques monophasé**

Un filtre antiharmoniques d'entrée comporte généralement au moins une bobine d'arrêt en série  $L_2$ . Les topologies de filtres plus élaborées comportent des composants supplémentaires tels qu'un condensateur en parallèle ou une bobine d'arrêt supplémentaire côté réseau  $L_1$ .

Comme décrit à l'Article B.2, la réduction des harmoniques engendre des pertes moins importantes dans le réseau. D'autre part, les composants inductifs dans le filtre augmentent la puissance réactive du PDS, ce qui accroît les pertes du réseau. Des pertes supplémentaires surviennent dans les propres composants du filtre. Ces effets positifs et négatifs augmentent avec la taille des filtres.

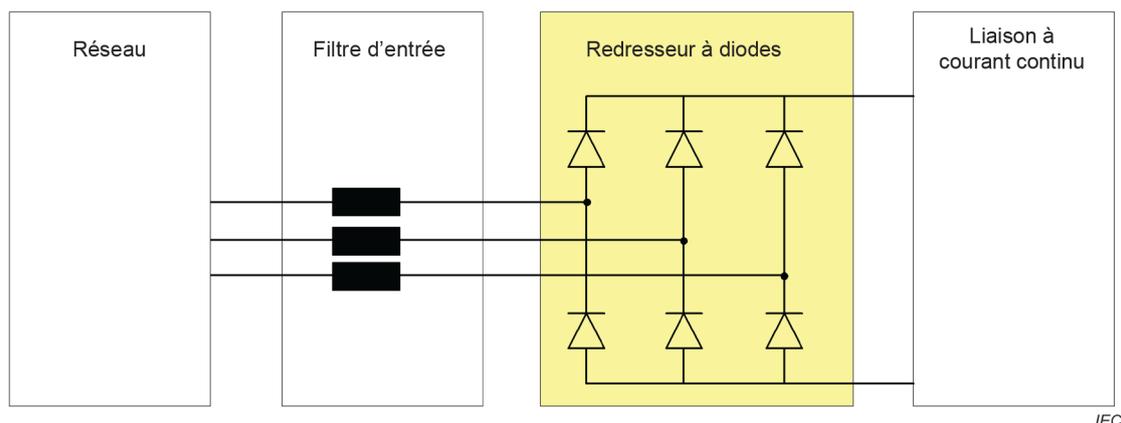
## B.4 Convertisseur d'entrée

### B.4.1 Généralités

Le convertisseur d'entrée transfère l'énergie du réseau à courant alternatif triphasé à la liaison à courant continu. Dans les PDS, il existe aujourd'hui principalement deux topologies de convertisseur d'entrée: le redresseur à diodes et le convertisseur à alimentation active.

### B.4.2 Redresseur à diodes

Les redresseurs à diodes représentent la solution la plus économique pour les convertisseurs d'entrée. Lorsqu'un flux énergétique positif circule du réseau à la charge, cette topologie engendre de faibles pertes car la chute de tension directe des diodes est relativement faible et leur fréquence de commutation constitue la fréquence fondamentale du seul système d'alimentation en énergie. Voir Figure B.4.



**Figure B.4 – PDS dont le convertisseur d'entrée est un redresseur à diodes**

Par ailleurs, les redresseurs à diodes produisent des harmoniques relativement importantes dans le courant de réseau. Ces courants harmoniques provoquent des pertes dans le réseau. Comme décrit en B.3.2, ces courants harmoniques peuvent être réduits par des bobines d'arrêt de ligne, des bobines de liaison à courant continu ou des filtres antiharmoniques qui engendrent eux-mêmes des pertes.

Lorsque le flux énergétique est négatif, les redresseurs à diodes ne sont pas capables de restituer l'énergie de la charge au réseau. L'énergie produite dans la charge, par exemple pendant un freinage, est dissipée dans des résistances. Dans les applications où la récupération est significative, cela réduit considérablement la performance en matière d'efficacité énergétique globale du système (voir 5.5). Si les liaisons à courant continu de plusieurs CDM sont connectées entre elles, l'énergie de récupération peut être distribuée par l'intermédiaire d'une liaison à courant continu commune pour alimenter d'autres CDM/PDS.

Dans une variante particulière des redresseurs à diodes, une partie ou la totalité des diodes peuvent être remplacées par des thyristors. Comme ces thyristors sont principalement utilisés pour précharger le condensateur de liaison à courant continu, ce type de convertisseur se comporte de façon pratiquement identique au redresseur à diodes en conditions de fonctionnement normales. Comme la chute de tension directe des thyristors est légèrement plus importante que la chute de tension directe des diodes, les pertes sont également légèrement plus élevées.

### B.4.3 Convertisseur à alimentation active

#### B.4.3.1 Convertisseur à alimentation active à fréquence de commutation élevée

L'IEC TS 62578 décrit en détail le comportement des convertisseurs à alimentation active (AIC). À la différence du redresseur à diodes, ce type d'onduleur est capable de restituer l'énergie de la charge au réseau. Dans les applications de récupération, cette caractéristique peut entraîner une amélioration significative de l'efficacité énergétique. Outre la récupération, cette technologie présente d'autres avantages tels que la compensation possible des harmoniques du réseau, la compensation de la puissance réactive et la tension stabilisée de la liaison à courant continu. Voir Figure B.5.

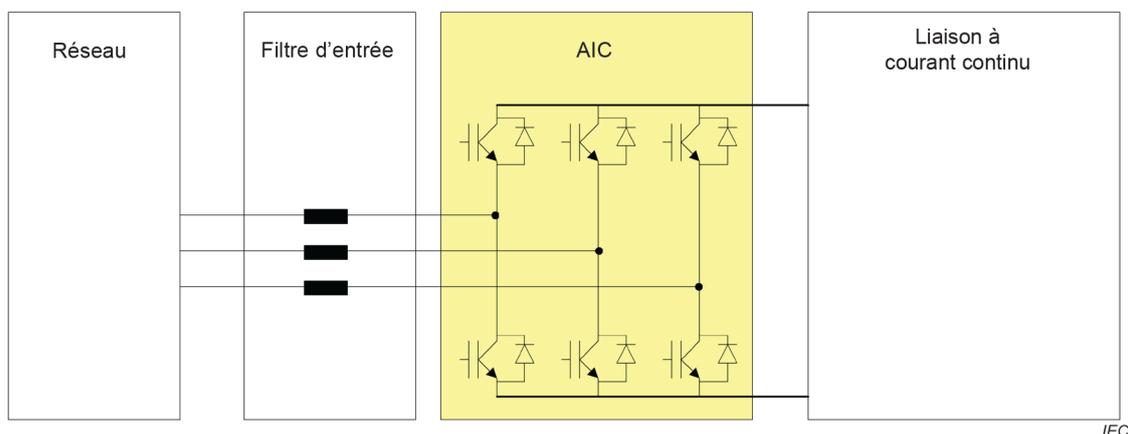


Figure B.5 – PDS dont le convertisseur d'entrée est un AIC normal

Les convertisseurs à alimentation active normaux utilisent un pont à transistor bipolaire à grille isolée (IGBT, Insulated Gate Bipolar Transistor) sur leur alimentation de ligne. Les interrupteurs à semiconducteurs fonctionnent à une fréquence de commutation élevée, ce qui permet au convertisseur de consommer un courant de réseau pratiquement sinusoïdal, avec un angle de phase pouvant être commandé entre la tension et le courant de ligne. La puissance réactive et les courants harmoniques sont réduits au minimum, ce qui limite les pertes dans le réseau.

Les semiconducteurs engendrent toutefois des pertes de commutation supplémentaires en raison de leur fréquence de commutation élevée, et la topologie exige également d'utiliser une bobine d'arrêt ou un filtre d'ordre supérieur, ce qui provoque aussi des pertes. De plus, la tension de la liaison à courant continu dans les convertisseurs AIC à fréquence de commutation élevée est plus importante que la tension de la liaison à courant continu dans les convertisseurs à alimentation passive, ce qui augmente les pertes de la liaison à courant continu et en veille.

Les circuits monophasés d'amélioration du facteur de puissance (PFC) ont un comportement hautement comparable à celui des convertisseurs à alimentation active normaux. Ils sont également capables de produire un courant d'entrée pratiquement sinusoïdal dont l'angle de phase est optimal, tout en exigeant une bobine d'arrêt de ligne et en produisant des pertes de commutation supplémentaires. La principale différence réside dans leur incapacité à restituer de l'énergie au réseau.

### B.4.3.2 Convertisseurs à alimentation active à fréquence de commutation fondamentale

Dans un type particulier de convertisseurs à alimentation active triphasés, les IGBT côté réseau fonctionnent seulement à la fréquence de commutation du réseau. Dans ce mode de fonctionnement, l'AIC frontal à la fréquence fondamentale (F3E-AIC) réduit ses pertes à la valeur du redresseur à diodes, tout en maintenant la possibilité de renvoyer l'énergie de la charge au réseau. De plus, la topologie ne produit pas de tension de la liaison à courant continu plus importante. Comme le redresseur à diodes décrit en B.4.2, cette topologie peut fonctionner avec ou sans bobine d'arrêt de ligne. Voir Figure B.6.

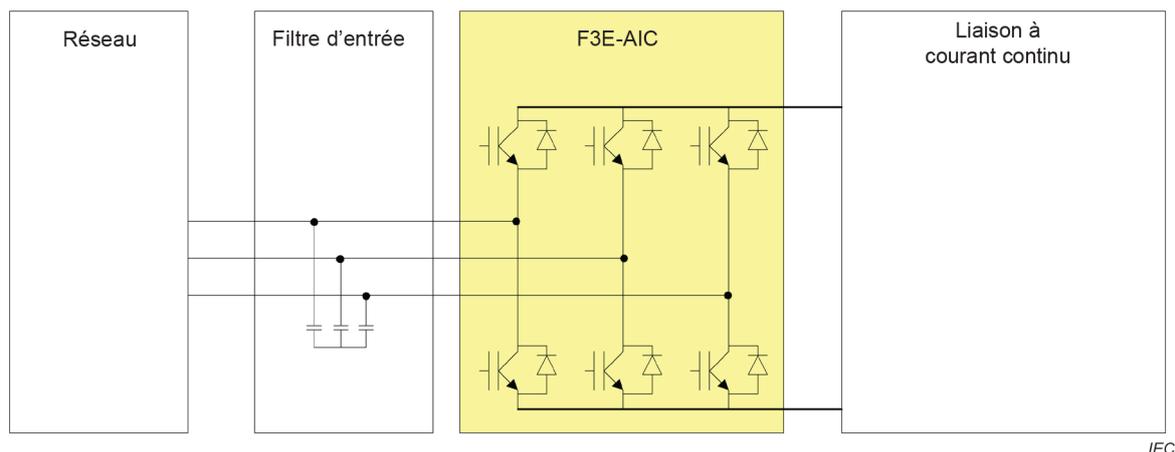
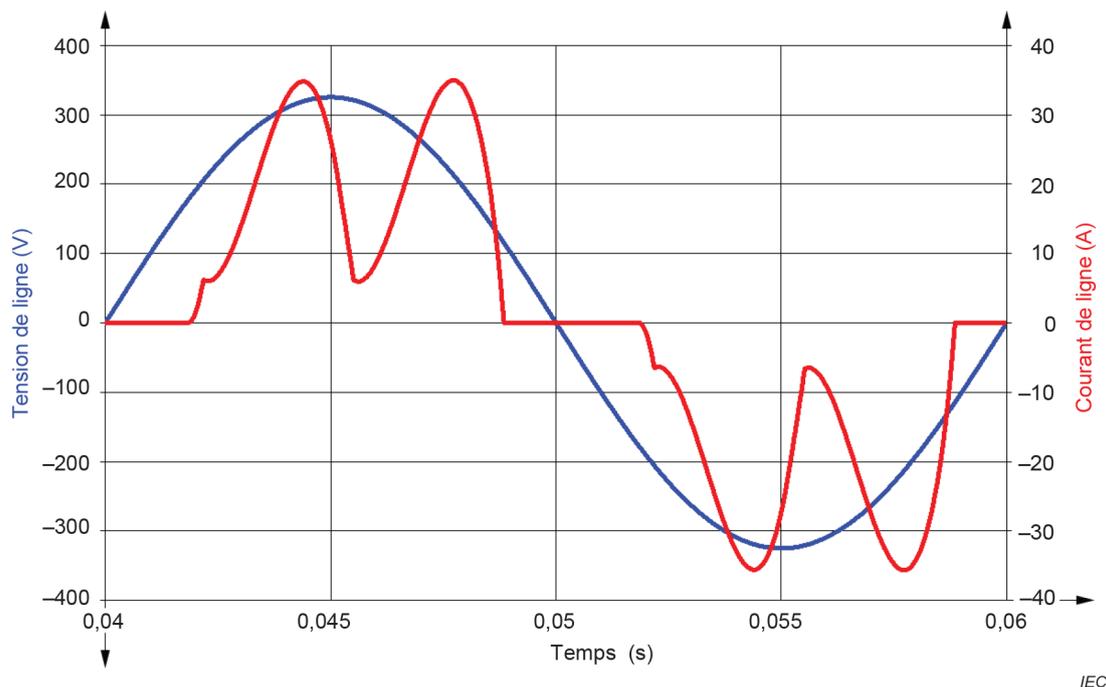


Figure B.6 – PDS à convertisseur d'entrée F3E-AIC sans bobine d'arrêt de ligne

Étant donné ces caractéristiques, il est possible d'obtenir des niveaux élevés d'efficacité énergétique avec ce type de PDS, mais en augmentant considérablement les distorsions harmoniques par rapport à un AIC.

### B.4.4 Facteur de puissance du convertisseur d'entrée

Le facteur de puissance d'entrée  $\lambda$  est défini comme le rapport de la puissance d'entrée active sur la puissance d'entrée apparente du CDM. À la tension d'entrée sinusoïdale, il dépend de la forme d'onde du courant. Voir Figure B.7.



**Figure B.7 – Forme d'onde type d'un courant de ligne de redresseur à diodes**

Si le CDM est équipé d'un condensateur de liaison à courant continu de grande taille, la diminution de la taille des bobines d'arrêt d'entrée conduit à une forme d'onde du courant d'entrée comportant un plus grand nombre de pics. Par conséquent, la valeur de  $\lambda$  diminue.

Si le condensateur de liaison à courant continu est réduit à une valeur très faible, le courant tend vers une forme d'onde en forme de bloc.

L'IEC TS 62578 fournit de plus amples informations sur les topologies de convertisseurs d'entrée. Pour les différentes topologies existantes, les valeurs types de  $\lambda$  du Tableau B.1 s'appliquent:

**Tableau B.1 – Valeurs types de  $\lambda$  pour différentes topologies de convertisseurs d'entrée**

Topologie du convertisseur d'entrée	Valeur de $\lambda$
Redresseur à pont de diodes avec condensateur de liaison à courant continu de grande taille et bobine d'entrée à 0,5 %	0,6
Redresseur à pont de diodes avec condensateur de liaison à courant continu de grande taille et bobine d'entrée à 4 %	0,7
Redresseur à pont à diodes avec condensateur de liaison à courant continu de petite taille conformément à l'IEC TS 62578	0,9
Convertisseur à alimentation active à fréquence de commutation élevée	1,0

#### B.4.5 Sous-module d'entrée d'entraînement (SDIM)

Un convertisseur d'entrée constitue l'élément principal d'un SDIM. Le SDIM peut présenter l'une des topologies énumérées à l'Article B.4. Le filtre d'entrée, les bobines d'arrêt de ligne et la liaison à courant continu peuvent également faire partie du SDIM et un SDIM peut avoir ses propres éléments de refroidissement et son alimentation auxiliaire, et présenter ses propres pertes de commande et en veille.

### B.5 Liaison à courant continu

La liaison à courant continu des PDS de source de tension est un condensateur de liaison à courant continu. Ce condensateur contient habituellement un grand nombre de condensateurs électrolytiques. Pour un système d'alimentation à courant alternatif triphasé de 400 V, la tension dans la liaison à courant continu est généralement supérieure à la capacité de tension d'un seul condensateur électrolytique du commerce. Il est donc nécessaire de monter les condensateurs en série dans la liaison à courant continu. Voir Figure B.8.

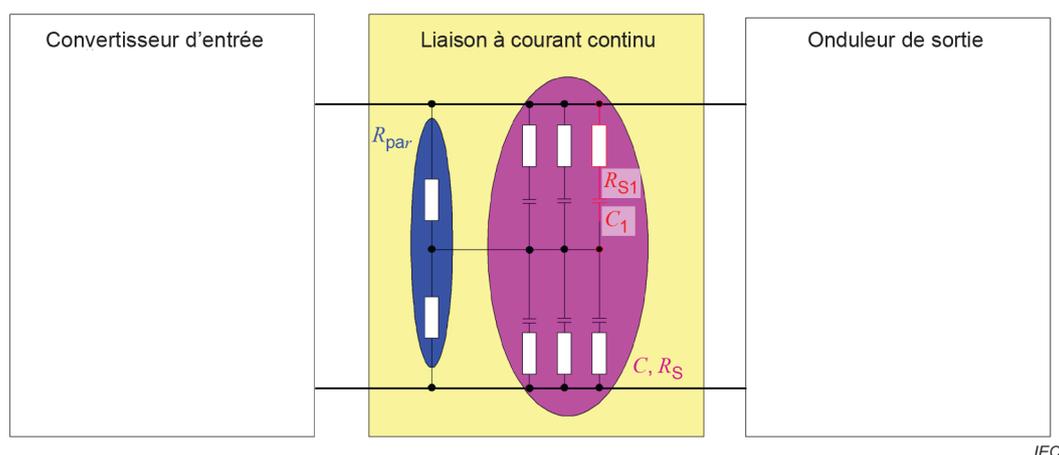


Figure B.8 – Circuit de liaison à courant continu

Pour s'assurer que les condensateurs électrolytiques partagent correctement la tension, il est exigé de monter les résistances en parallèle par rapport aux condensateurs. La résistance équivalente  $R$  qui en résulte génère une partie des pertes d'énergie dans la liaison à courant continu. Dans le modèle mathématique, ces éléments sont pris en compte dans le premier terme de la Formule (C.8). Comme chaque condensateur de liaison à courant continu exige une certaine quantité de résistance parallèle pour la symétrie, cette partie des pertes de la liaison à courant continu est proportionnelle au courant de sortie assigné du CDM. Elle est en outre proportionnelle au carré de la tension de la liaison à courant continu réelle. Le paramètre  $k1_{DC\_link}$  peut être calculé par:

$$k1_{DC\_link} = \frac{1}{R_{par} \cdot I_{r,out}} \tag{B.3}$$

La seconde partie des pertes dans la liaison à courant continu est due à la résistance série (équivalente)  $R_{S1}$  à l'intérieur des condensateurs. Les pertes apparaissent principalement à six fois la fréquence fondamentale du réseau et sont proportionnelles au carré du courant d'entrée du redresseur. Le paramètre  $k2_{DC\_link}$  peut être calculé selon les étapes suivantes.

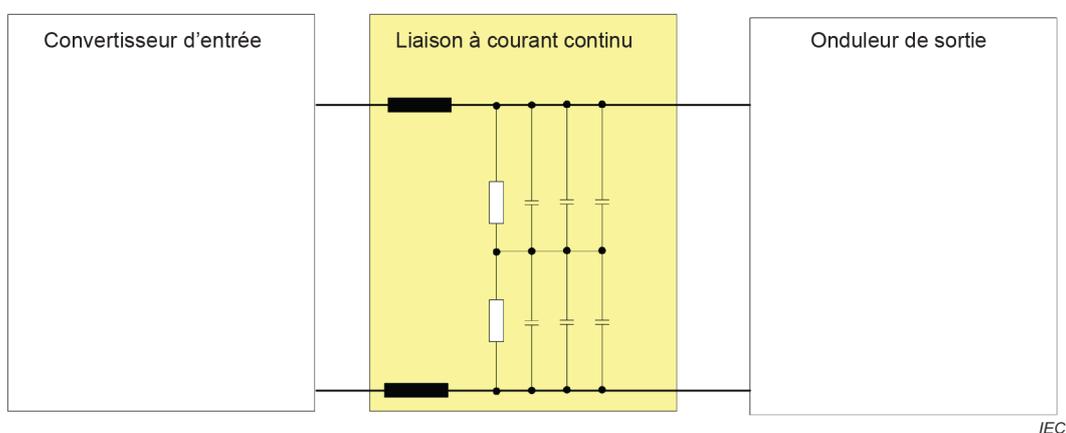
- a) Les pertes d'un condensateur sont généralement spécifiées dans la fiche technique avec le facteur de perte  $\tan\delta$  à la fréquence de ligne  $\omega/2\pi$  (50 Hz ou 60 Hz). La résistance série équivalente  $R_{S1}$  d'un condensateur peut être calculée par:

$$R_{S1} = \frac{\tan\delta}{\omega \cdot C_1} \tag{B.4}$$

- b) La résistance globale résultante  $R_s$  du réseau complet de condensateurs de liaison à courant continu  $C$  peut être calculée en fonction de la connexion série et parallèle des condensateurs individuels  $C_1$ .
- c) Le paramètre  $k2_{DC\_link}$  peut être calculé par:

$$k2_{DC\_link} = R_s \cdot I_{r,out} \quad (\text{B.5})$$

Des bobines d'arrêt à courant continu peuvent être utilisées dans la liaison à courant continu. Si ces bobines sont utilisées, elles remplacent habituellement les bobines d'arrêt antiharmoniques à courant alternatif dans le filtre d'entrée. L'efficacité énergétique du système et les coûts d'investissement des bobines d'arrêt à courant continu et des bobines d'arrêt à courant alternatif sont du même ordre de grandeur. Voir Figure B.9.



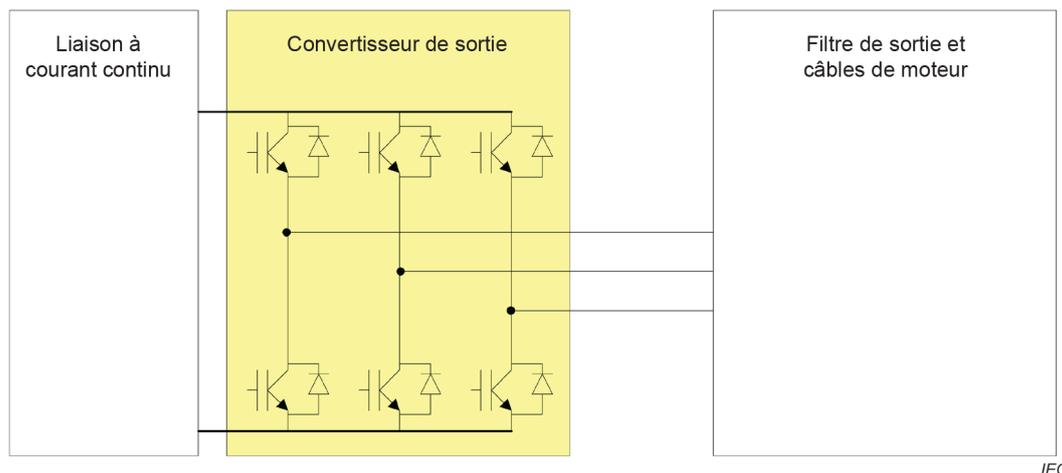
**Figure B.9 – Circuit de liaison à courant continu comportant des bobines d'arrêt à courant continu supplémentaires**

Dans certains types de BDM, la quantité de capacité dans la liaison à courant continu est plutôt faible. Dans ce cas, il est possible d'utiliser des condensateurs qui résistent à une tension plus élevée; il n'est donc pas exigé d'utiliser des résistances en parallèle, ce qui améliore l'efficacité énergétique globale du système.

## B.6 Onduleur de sortie

### B.6.1 Généralités

Les onduleurs de sortie dans les PDS de source de tension comprennent généralement un pont d'onduleur triphasé. La vitesse du moteur à la sortie peut être réglée à la valeur souhaitée en commutant les semiconducteurs à haute fréquence en fonction d'un schéma de commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI). Voir Figure B.10.



**Figure B.10 – Onduleur de sortie du PDS**

Les pertes dans l'onduleur de sortie sont produites par les pertes à l'état passant et les pertes de commutation des semiconducteurs. Les deux types de pertes sont réduits grâce aux constantes améliorations technologiques apportées lors du développement des semiconducteurs, soit en améliorant la structure du dispositif, soit en utilisant de nouveaux matériaux semiconducteurs.

Du point de vue de l'utilisateur, la fréquence de commutation peut influencer sur les pertes dans l'onduleur de sortie. La réduction de la fréquence de commutation engendre des pertes moins importantes dans l'onduleur de sortie. En revanche, une réduction de la fréquence de commutation augmente les pertes dans le moteur et dans les circuits des filtres de sortie facultatifs. Pour obtenir une solution optimisée en matière d'économie d'énergie, il est nécessaire d'étudier la combinaison de tous ces sous-systèmes (voir Figure 14).

### B.6.2 Sous-module de sortie d'entraînement (SDOM)

L'onduleur de sortie est l'élément principal d'un SDOM et peut inclure une liaison à courant continu, un filtre de sortie ainsi que ses propres éléments de refroidissement et une alimentation auxiliaire. Les pertes de commande et en veille peuvent être prises en compte pour le SDOM.

## B.7 Filtre de sortie et câbles de moteur

### B.7.1 Généralités

L'onduleur de sortie commande habituellement ses interrupteurs à semiconducteurs à une vitesse de commutation élevée afin de réduire le plus possible les pertes de commutation. Si aucun filtre de sortie n'est utilisé (voir Figure B.11 pour un emplacement optionnel), des pics de surtension dus à la réflexion de l'onde de tension peuvent être observés aux bornes du moteur, ce qui sollicite l'isolation du moteur au double de la tension de la liaison à courant continu. Ce phénomène peut être observé si la longueur du câble de moteur est supérieure à la longueur critique qui peut être calculée comme suit:

$$l_{\text{crit}} \geq \frac{v \cdot t_r}{2} \quad (\text{B.6})$$

Pour un temps de montée type  $t_r = 200$  ns et une vitesse d'onde de tension type  $v = 150$  m/ $\mu$ s, la longueur critique pour le câble de moteur est  $l_{\text{crit}} = 15$  m.

Ces pics de tension soumettent l'isolation du moteur à une sollicitation plus importante. Leur effet sur les pertes est cependant négligeable.

Dans certains cas, des filtres de sortie sont utilisés, principalement pour diminuer la sollicitation de l'isolation du moteur et pour augmenter la longueur du câble de moteur. Différentes sortes de filtres de sortie sont connues dont l'effet sur le rendement va être décrit.

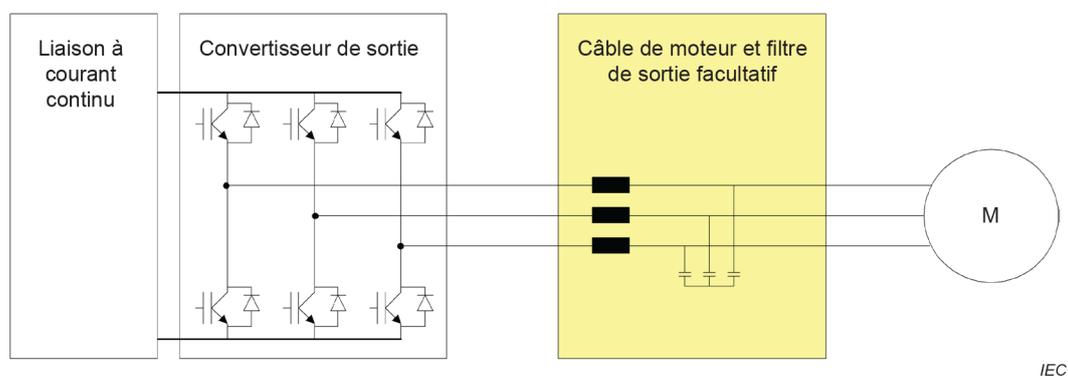


Figure B.11 – Câble de moteur et filtre de sortie facultatif du PDS

### B.7.2 Filtres sinusoïdaux

Les filtres sinusoïdaux sont destinés à filtrer la fréquence de commutation de l'onduleur. Ils comprennent en général au moins un inducteur et un condensateur qui forment un filtre de deuxième ordre pour la tension de sortie de l'onduleur. La fréquence de résonance d'un filtre sinusoïdal est choisie de sorte qu'elle soit inférieure à la fréquence de commutation de l'onduleur. La Figure B.12 représente une forme d'onde de tension de sortie type par rapport au point milieu de la liaison à courant continu. Elle montre également la tension du moteur à la sortie du filtre sinusoïdal.

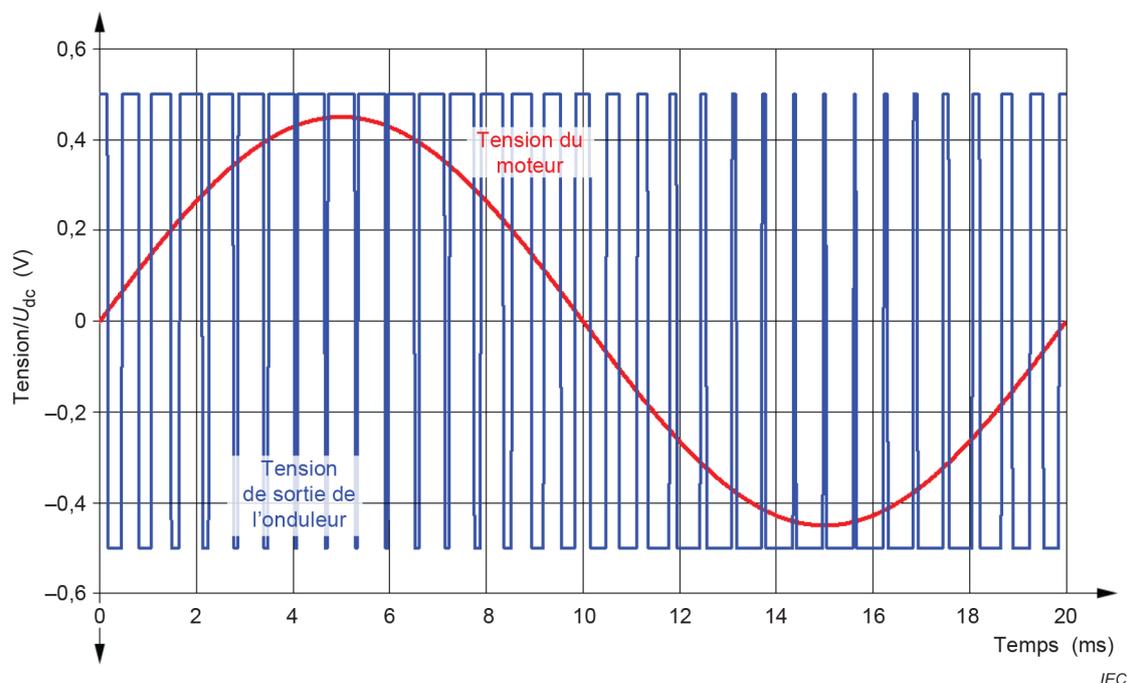


Figure B.12 – Forme d'onde type de la tension de sortie de l'onduleur et de la tension du moteur lors de l'utilisation d'un filtre de sortie sinusoïdal

En fonctionnement sur un onduleur sans filtre sinusoïdal, le moteur présente des pertes supplémentaires dues à des courants d'ondulation à haute fréquence. Ces pertes supplémentaires sont décrites dans l'IEC TS 60034-25. Elles peuvent être considérablement réduites au moyen d'un filtre sinusoïdal.

Cependant, le filtre sinusoïdal en lui-même engendre des pertes principalement dues aux pertes dans le cuivre et le fer dans l'inducteur du filtre. Ces pertes sont notoirement inférieures à 0,5 % de la puissance assignée de l'onduleur pour des puissances élevées et peuvent atteindre 8 % de la puissance assignée de l'onduleur pour de faibles puissances à la vitesse assignée du moteur. Ces pertes sont encore moins élevées lorsque la vitesse du moteur est réduite.

Ce type de filtre produit toutefois une faible chute de tension à la fréquence industrielle et il peut y avoir une réduction de la bande passante de commande disponible, en particulier si la fréquence MLI est basse. Il est donc parfois impossible d'utiliser ce type de filtre.

### **B.7.3 Filtres $dV/dt$ et bobines d'arrêt de moteur**

Les filtres  $dV/dt$  sont utilisés pour augmenter le temps de montée de la tension du moteur afin de moins solliciter l'isolation du moteur. Ils ont fondamentalement la même topologie que les filtres sinusoïdaux. Contrairement à ces derniers, leur fréquence de résonance est choisie bien supérieure à la fréquence de commutation, ce qui entraîne une réduction considérable de la taille des composants. En revanche, la tension du moteur reste comparable à la forme d'onde de la tension de sortie de l'onduleur représentée à la Figure B.12. Le filtre  $dV/dt$  n'a pas d'effet sur les pertes dans le moteur.

Les pertes dans le filtre  $dV/dt$  lui-même sont proportionnelles à la fréquence de commutation de l'onduleur. Les pertes dans le filtre  $dV/dt$  peuvent atteindre 1 % de la puissance assignée du PDS. À une fréquence de commutation de 500 Hz, les pertes dans le filtre  $dV/dt$  sont généralement inférieures à 0,25 % de la puissance assignée du PDS. Les pertes exactes sont à déterminer à la fréquence de commutation appliquée.

Pour des PDS dont la fréquence de commutation est plus élevée, des bobines d'arrêt de moteur peuvent être utilisées à la place des filtres  $dV/dt$  pour que l'isolation du moteur soit soumise à une sollicitation moins importante. Les pertes produites par ces bobines d'arrêt sont comparables aux pertes d'un filtre sinusoïdal. Cependant, la sollicitation de l'isolation du moteur n'est pas réduite dans une aussi grande ampleur qu'avec des solutions à filtre. Il n'y a pas non plus d'effet sur les pertes du moteur.

### **B.7.4 Filtres de moteur EMI à haute fréquence**

Des filtres de moteur EMI à haute fréquence, analogues mais non identiques à ceux décrits en B.3.1, peuvent également être utilisés aux bornes de sortie de l'onduleur. Leur effet est comparable aux filtres EMI côté réseau.

### **B.7.5 Câbles de moteur**

Les câbles de moteur raccordent le CDM au moteur. Le comportement résistif des câbles de moteur engendre des pertes qu'il convient de prendre en compte pour les câbles de moteur de grande longueur. Comme la longueur des câbles de moteur est différente pour chaque installation, ces pertes ne peuvent pas être fournies comme un attribut d'un PDS, mais nécessitent d'être évaluées dans chaque installation individuelle. En règle générale, les pertes relatives aux câbles du moteur peuvent être négligées tant que leur longueur est inférieure à 25 m. La plupart des pertes étant dues au courant fondamental du moteur, l'influence du courant haute fréquence peut être négligée. Si des câbles à un fil équipés d'un blindage individuel sont utilisés à la place de câbles à trois fils, le courant engendre des pertes supplémentaires dans les blindages de câbles.

## B.8 Moteur

L'IEC 60034-2-1 et l'IEC 60034-2-3 décrivent une méthode pour évaluer les pertes produites dans le moteur lorsqu'il fonctionne avec une forme d'onde sinusoïdale ou avec une forme d'onde d'impulsion à partir d'un onduleur. Les ventilateurs et les freins auxiliaires font partie du système moteur.

## B.9 Charge mécanique

Les pertes dans la charge dépendent fortement du type d'application qui utilise le PDS, par exemple dans des applications couple variable/couple constant. Lorsque la charge fonctionne de manière optimale d'un point de vue énergétique, les économies potentielles concernant les pertes sont nettement plus importantes que les pertes du PDS et il convient donc qu'elles constituent la préoccupation majeure lorsqu'il s'agit de concevoir une application dont les pertes sont minimales.

## B.10 Pertes de commande et pertes en veille

Habituellement, les pertes de commande ne sont pas significativement dépendantes de la puissance assignée du CDM. Pour ce type de pertes, il est plus important d'évaluer le système d'automatisation dans son ensemble et les fonctions de commande du PDS telles que la communication par bus et des équipements d'entraînement supplémentaires (relais, capteurs de position ou freins de moteur, par exemple). Pour des PDS à très faible puissance (< 500 W), cette partie des pertes peut être du même ordre de grandeur que les pertes de puissance, tandis qu'elle diminue à mesure que la puissance assignée du PDS augmente.

Outre les pertes dans la partie de commande du CDM lui-même, des pertes sont également générées dans l'alimentation en mode de commutation du CDM, par exemple pour alimenter un ventilateur qui représente un consommateur important, en cas de refroidissement forcé à l'air. Ces pertes dépendent peu du CDM et sont donc également considérées comme des pertes de commande.

Les pertes de commande et en veille  $P_{L,control}$  apparaissent lorsque le PDS est alimenté, mais que le moteur n'est pas sous tension. Elles sont généralement inférieures d'un à trois ordres de grandeur aux pertes en cours de fonctionnement. Leur effet sur les pertes globales dépend essentiellement du profil de régime du produit étendu. En outre, elles dépendent également des exigences de l'application en matière de temps de réveil et de communication.

## B.11 Pertes de refroidissement

### B.11.1 Pertes de refroidissement principal

Le refroidissement principal des composants représenté à la Figure 11 est surtout obtenu par le refroidisseur principal (ventilateur ou liquide de refroidissement) intégré au BDM/CDM/PDS. Le refroidissement peut être dépendant de la température (ON/OFF ou à commande MLI) ou peut être un système de refroidissement non commandé.

### **B.11.2 Pertes de refroidissement secondaire**

Outre le fait que tous les composants représentés à la Figure B.1 produisent des pertes, il est nécessaire que ces pertes soient refroidies par un système de refroidissement secondaire dans de nombreuses applications. Les pertes qui nécessitent un refroidissement par un système de refroidissement secondaire dépendent de l'application elle-même.

Un système de climatisation est un système de refroidissement secondaire type qui maintient la température d'un espace donné au-dessous d'une certaine valeur. Il est nécessaire que toutes les pertes qui se produisent dans cet espace soient soumises à un refroidissement actif par le système secondaire, y compris, par exemple, les pertes d'un système de commande. Le système de refroidissement secondaire compense au minimum les pertes du CDM lui-même. Dans ce cas, la consommation de puissance d'un système de refroidissement secondaire type représente environ 20 % des pertes du CDM.

Cependant, le moteur et la machine en charge exigent également un refroidissement dans certaines applications. Il est nécessaire que le concepteur du système global tienne compte de ces pertes qui ne relèvent pas du domaine d'application du présent document.

## Annexe C (informative)

### Modèle mathématique pour les pertes du CDM

#### C.1 Généralités

À la différence de l'Annexe B qui décrit les sous-ensembles du PDS depuis le réseau jusqu'à la charge, Annexe C commence par les parties du PDS qui engendrent les pertes les plus importantes, puis se poursuit par les autres parties qui contribuent, dans une moindre mesure, aux pertes totales du PDS.

#### C.2 Pertes de l'onduleur de sortie

##### C.2.1 Généralités

La majeure partie des pertes du CDM sont dues à la section onduleur de sortie du CDM. Ses pertes sont décrites par les formules analytiques suivantes, bien connues dans les ouvrages de référence. Dans ces formules, le courant de sortie du CDM est par hypothèse sinusoïdal et les impulsions MLI sont distribuées aléatoirement sur la forme d'onde sinusoïdale fondamentale du courant. La distribution aléatoire est obtenue dès que la fréquence MLI représente au moins 20 fois la fréquence fondamentale du courant du moteur et que l'algorithme normal de modulation de vecteur spatial est utilisé. Les pertes réduites dues à la surmodulation du CDM ne sont pas prises en compte. Le calcul du CDM de référence s'effectue par conséquent d'après ces hypothèses. Pour le calcul des pertes d'un CDM physique, il est nécessaire de déterminer les valeurs des paramètres des semiconducteurs de puissance, soit à la température réelle lors du fonctionnement du CDM, soit à la température de fonctionnement maximale spécifiée dans la fiche technique.

Pour un CDM physique, les valeurs de paramètres des semiconducteurs de puissance et d'autres dispositifs peuvent être désignées comme des valeurs types. De plus, le modèle présenté en 5.2 et en Annexe C peut être utilisé pour déterminer les pertes d'un CDM par calcul. Un autre modèle de calcul ou des simulations de perte sont autorisés. Les exactitudes correctes définies selon la Formule (22) doivent être appliquées.

##### C.2.2 Pertes des transistors à l'état passant

Les pertes des transistors à l'état passant sont calculées d'après la Formule (C.1):

$$P_{L,on,T} = \sqrt{2} \cdot I_{out} U_{T,th} \cdot \left( \left( \frac{1}{2\pi} \right) + \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos\Phi}{8} \right) + \frac{U_{T,r} - U_{T,th}}{I_{r,out}} \cdot 2 \cdot I_{out}^2 \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos\Phi}{3\pi} \right) \quad (C.1)$$

Les paramètres du RCDM de la Formule (C.1) sont donnés dans le Tableau C.1.

**Tableau C.1 – Paramètres de référence de la Formule (C.1)**

Symbole	Description	Valeur de paramètre du RCDM	Unité
$U_{T,th}$	Tension de seuil du transistor de puissance (IGBT)	1,0	V
$U_{T,r}$	Tension à l'état passant du transistor de puissance (IGBT) au courant de sortie assigné du CDM	2,3	V
$I_{r,out}$	Courant de sortie assigné du CDM (valeur efficace)		A

Les variables de la Formule (C.1) sont données dans le Tableau C.2.

**Tableau C.2 – Variables de la Formule (C.1)**

Symbole	Description	Unité
$I_{out}$	Courant de sortie du CDM (valeur efficace) selon le Tableau 1	A
$\phi$	Angle de phase entre la tension de sortie fondamentale du CDM et le courant de sortie fondamental du CDM selon le Tableau 2	rad
$m$	Indice de modulation, identique à la fréquence de sortie relative du CDM jusqu'à la fréquence de sortie assignée	

### C.2.3 Pertes des diodes de roue libre à l'état passant

Les pertes des diodes à l'état passant sont calculées d'après la Formule (C.2):

$$P_{L,on,D} = \sqrt{2} \cdot I_{out} U_{D,th} \cdot \left( \left( \frac{1}{2\pi} \right) - \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos \phi}{8} \right) + \frac{U_{D,r} - U_{D,th}}{I_{r,out}} \cdot 2 \cdot I_{out}^2 \cdot \left( \frac{1}{8} - \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos \phi}{3\pi} \right) \quad (C.2)$$

Les paramètres du RCDM de la Formule (C.2) sont donnés dans le Tableau C.3:

**Tableau C.3 – Paramètres de référence de la Formule (C.2)**

Symbole	Description	Valeur de paramètre du RCDM	Unité
$U_{D,th}$	Tension de seuil de la diode de puissance	1,1	V
$U_{D,r}$	Tension à l'état passant de la diode de puissance au courant de sortie assigné du CDM	2,4	V

Les variables de la Formule (C.2) sont identiques à celles de la Formule (C.1).

### C.2.4 Pertes de commutation des transistors

Dans les fiches techniques des IGBT de puissance, une pratique courante consiste à décrire l'énergie de commutation du transistor en fonction du courant de sortie de l'onduleur. Cette valeur est généralement obtenue en enregistrant la tension collecteur-émetteur de l'IGBT et le courant au collecteur de l'IGBT pendant la commutation, en multipliant ces graphiques pour obtenir les pertes de puissance instantanées et en intégrant ces pertes pendant un événement de commutation pour obtenir finalement l'énergie des pertes de commutation. Dans une première approximation, la courbe résultante indique que l'énergie augmente linéairement avec le courant au collecteur et la tension de la liaison à courant continu de l'onduleur. Les ouvrages de référence appellent souvent facteur  $E_T$  le rapport de l'énergie de commutation sur le produit de la tension de la liaison à courant continu et du courant au collecteur de l'IGBT. Ce facteur comprend la somme de l'énergie des pertes d'activation et de désactivation d'un transistor de puissance.

En cas de faible courant, le courant à utiliser pour déterminer les pertes de commutation est supérieur au courant de sortie de l'onduleur car les câbles du moteur engendrent un courant de sortie supplémentaire. Pour tenir compte de ce phénomène, un terme correctif  $I_{\text{motor\_cable}}$  est utilisé. Ce courant est ajouté au courant de sortie de l'onduleur pour calculer les pertes de commutation. Pour le convertisseur de référence, le Tableau C.4 ci-dessous fournit un modèle simple pour le courant du câble.

En partant du principe que l'onduleur produit un courant de sortie sinusoïdal dont la fréquence fondamentale est nettement inférieure à la fréquence de commutation (au moins d'un facteur 15), les pertes de commutation du transistor sont calculées d'après la Formule (C.3):

$$P_{L,sw,T} = \frac{E_T}{\pi} \cdot U_{DC} \cdot \sqrt{2} \cdot (I_{out} + I_{\text{motor\_cable}}) \cdot f_{sw} \quad (\text{C.3})$$

Les paramètres du RCDM de la Formule (C.3) sont donnés dans le Tableau C.4:

**Tableau C.4 – Paramètres de référence de la Formule (C.3)**

Symbole	Description	Valeur de paramètre du RCDM	Unité
$E_T$	Énergie des pertes de commutation du transistor de puissance (IGBT) par volt et par ampère	$7,5 \times 10^{-7}$	$\frac{\text{J}}{\text{V} \cdot \text{A}}$
$U_{DC}$	Tension de la liaison à courant continu du CDM	540	V
$I_{\text{motor\_cable}}$	Courant du câble du moteur à utiliser lorsque les pertes de commutation sont plus importantes	$I_{\text{motor\_cable}} = 4$ pour $I_{r,out} \leq 4$ A $I_{\text{motor\_cable}} = i_{r,out}$ pour $4 \text{ A} < I_{r,out} < 10$ A $I_{\text{motor\_cable}} = 10$ pour $I_{r,out} \geq 10$ A	A
$f_{sw}$	Fréquence de commutation du CDM	4 000 pour un CDM jusqu'à 90 kW 2 000 pour un CDM au-dessus de 90 kW	Hz

La variable de la Formule (C.3) est de nouveau le courant de sortie de l'onduleur  $I_{out}$ . Les pertes de commutation ne dépendent pas de la vitesse du moteur.

Si la fréquence de sortie de l'onduleur était égale à 0 Hz pendant toutes les durées de fonctionnement du CDM, la Formule (C.3) ne serait plus exacte. Néanmoins, par hypothèse, au moins une faible fréquence de sortie différente de 0 Hz (par exemple 0,05 Hz) est déterminée pour la quasi-totalité des applications, de sorte que la Formule (C.3) est utilisée pour toutes les applications.

### C.2.5 Pertes de commutation des diodes de roue libre

Les pertes de commutation des diodes sont calculées de la même manière:

$$R_{L,sw,D} = \frac{E_D}{\pi} \cdot U_{DC} \cdot \sqrt{2} \cdot (I_{out} + I_{motor\_cable}) \cdot f_{sw} \quad (C.4)$$

Les paramètres du RCDM de la Formule (C.4) sont donnés dans le Tableau C.5:

**Tableau C.5 – Paramètres de référence de la Formule (C.4)**

Symbole	Description	Valeur de paramètre du RCDM	Unité
$E_D$	Énergie des pertes de commutation de la diode de puissance par volt et par ampère	$2,5 \times 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$

### C.2.6 Pertes totales de l'onduleur de sortie

Les pertes calculées aux Formules (C.1) à (C.4) définissent les pertes produites dans un semiconducteur de puissance individuel. La somme des pertes de l'onduleur de sortie pour un CDM triphasé comportant six transistors et diodes est calculée comme suit:

$$R_{L,inverter} = 6 \cdot (R_{L,on,T} + R_{L,on,D} + R_{L,sw,T} + R_{L,sw,D}) \quad (C.5)$$

## C.3 Pertes du convertisseur d'entrée

### C.3.1 Convertisseur à alimentation active

Si la section du convertisseur d'entrée est un convertisseur à alimentation active, ses pertes sont calculées de la même manière que pour la section de l'onduleur de sortie.

La fréquence fondamentale côté courant alternatif du convertisseur à alimentation active est identique à la fréquence du réseau. Les valeurs possibles pour l'indice de modulation  $m$  sont donc limitées à celles proches de 1. Le facteur de déphasage,  $\cos\varphi$ , entre le courant d'entrée fondamental et la tension d'entrée fondamentale est proche de 1 en cas de fonctionnement moteur du CDM ou de  $-1$  en cas de fonctionnement en récupération. En raison de ce facteur de déphasage, le courant d'entrée du CDM est inférieur au courant de sortie du CDM pour les convertisseurs à alimentation active (AIC) et il correspond à  $I_{out}m\cos\Phi$ .

Par hypothèse, le CDM de référence ne comporte pas de convertisseur à alimentation active, mais un redresseur à diodes.

### C.3.2 Redresseur à diodes

La composante fondamentale du courant d'entrée du CDM est proportionnelle à la puissance de sortie active du CDM et est calculée par le produit du courant de sortie de l'onduleur, de l'angle de phase de sortie et de l'indice de modulation. La valeur efficace du courant d'entrée du CDM est en outre proportionnelle à un facteur  $1/\lambda$ . Le facteur  $\lambda$ , tel que défini dans la Formule (B.2) comme le rapport de la puissance d'entrée active sur la puissance d'entrée apparente du CDM, est proportionnel au facteur de déphasage entre le courant d'entrée du CDM et diminue avec le contenu harmonique de la forme d'onde du courant d'entrée. Les valeurs normalisées de  $\lambda$  pour différentes topologies de redresseurs sont données en B.4.2.

Finalement, les pertes du redresseur sont calculées d'après la Formule (C.6):

$$P_{L,\text{rectifier}} = 6 \cdot \left( \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m \cdot \cos \Phi \cdot I_{\text{out}} \cdot U_{D,\text{th,rectifier}} + \frac{U_{D,r,\text{rectifier}} - U_{D,\text{th,rectifier}}}{\cos \Phi_r \cdot I_{r,\text{out}}} \cdot \frac{\left( \frac{m \cdot \cos \Phi \cdot I_{\text{out}}}{\lambda} \right)^2}{2} \right) \quad (\text{C.6})$$

Les paramètres du RCDM de la Formule (C.6) sont donnés dans le Tableau C.6:

**Tableau C.6 – Paramètres de référence de la Formule (C.6)**

Symbole	Description	Valeur de paramètre du RCDM	Unité
$U_{D,\text{th,rectifier}}$	Tension de seuil de la diode de puissance du redresseur	0,9	V
$U_{D,r,\text{rectifier}}$	Tension à l'état passant de la diode de puissance du redresseur au courant d'entrée assigné du CDM	2,2	V
$\lambda$	Facteur de puissance de la tension et du courant d'entrée du CDM	0,7	

Les variables de la Formule (C.6) sont données dans le Tableau C.7.

**Tableau C.7 – Variables de la Formule (C.6)**

Symbole	Description	Unité
$\Phi_r$	Angle de phase entre la tension de sortie fondamentale du CDM et le courant de sortie fondamental du CDM au couple assigné selon le Tableau 2	rad

### C.4 Pertes des bobines d'arrêt d'entrée

Les bobines d'arrêt d'entrée sont parfois utilisées pour réduire les harmoniques. L'inductance de la bobine d'arrêt décroît à mesure qu'augmente la puissance d'entrée du convertisseur. L'impédance de la bobine d'arrêt d'entrée est généralement choisie pour représenter une certaine partie  $k1_{\text{bobine}}$  de l'impédance assignée de l'onduleur  $U_{mL1}/I_{\text{éq}}$ . En partant du principe que la chute de tension dans la partie résistive de la bobine d'arrêt d'entrée représente une certaine partie  $k2_{\text{bobine}}$  de la chute de tension totale sur la bobine d'arrêt d'entrée, les pertes dans la bobine d'arrêt d'entrée sont calculées de la manière suivante:

$$P_{L,choke} = k1_{choke} \cdot k2_{choke} \cdot 3 \cdot \frac{\left( \frac{m \cdot \cos\Phi \cdot I_{out}}{\lambda} \right)^2}{\cos\Phi_r \cdot I_{r,out}} \cdot U_{mL1} \quad (C.7)$$

Les paramètres du RCDM pour le convertisseur de référence dans la Formule (C.7) sont donnés dans le Tableau C.8:

**Tableau C.8 – Paramètres de référence de la Formule (C.7)**

Symbole	Description	Valeur de paramètre du RCDM	Unité
$k1_{choke}$	Impédance de la bobine d'arrêt, par rapport à l'impédance assignée du CDM	0,02	
$k2_{choke}$	Chute de tension relative sur la partie résistive de la bobine d'arrêt	0,25	
$U_{mL1}$	Tension de phase à terre du réseau d'alimentation	230	V

Les pertes des bobines d'arrêt à courant continu peuvent être calculées de la même manière que les pertes pour les bobines d'arrêt à courant alternatif.

Les pertes des filtres antiharmoniques à basse fréquence sont calculées de la même manière car la majorité de ces pertes se produisent dans la bobine d'arrêt et que les pertes dans les condensateurs du filtre peuvent être négligées.

### C.5 Pertes de la liaison à courant continu

Comme expliqué à l'Article B.5, les pertes de la liaison à courant continu sont principalement dues aux résistances exigées pour assurer le partage adéquat de la tension entre les condensateurs de liaison à courant continu et les résistances en série équivalentes à l'intérieur de chaque condensateur. Dans une première approximation, la grandeur de la capacité de la liaison à courant continu est proportionnelle à la puissance assignée de l'onduleur. Par conséquent, les pertes indépendantes de la charge dans les résistances en parallèle par rapport aux condensateurs sont proportionnelles au courant de sortie assigné de l'onduleur. Elles sont en outre proportionnelles au carré de la tension de la liaison à courant continu. Les pertes dans la résistance en série équivalente du condensateur dépendent du carré de la partie courant alternatif du courant de sortie du redresseur. Les pertes causées par un courant d'onduleur à haute fréquence sont suffisamment faibles pour être négligées. Les pertes de la liaison à courant continu sont finalement calculées avec la Formule (C.8):

$$P_{L,dc\_link} = k1_{DC\_link} \cdot I_{r,out} \cdot U_{DC}^2 + k2_{DC\_link} \cdot \frac{\left( \frac{\sqrt{3}}{1,35} \cdot \frac{m \cdot \cos\Phi \cdot I_{out}}{1 + 50 \cdot k1_{choke}} \right)^2}{I_{r,out}} \quad (C.8)$$

Les paramètres du RCDM pour le convertisseur de référence dans la Formule (C.8) sont donnés dans le Tableau C.9:

**Tableau C.9 – Paramètres de référence de la Formule (C.8)**

Symbole	Description	Valeur de paramètre du RCDM	Unité
$k1_{DC\_link}$	Paramètre des pertes de la liaison à courant continu indépendantes de la charge	$8 \times 10^{-7}$	$\frac{1}{\Omega \cdot A}$
$k2_{DC\_link}$	Paramètre des pertes de la liaison à courant continu dépendantes de la charge	2	$\Omega \cdot A$

La détermination des paramètres  $k1_{DC\_link}$  et  $k2_{DC\_link}$  pour un CDM est expliquée à l'Article B.5.

### C.6 Pertes des conducteurs de courant

Des pertes ohmiques sont par exemple générées dans les conducteurs de courant du CDM. Dans le modèle mathématique, ces pertes dépendent de l'amplitude du courant de sortie du CDM et de la résistance ohmique des conducteurs de courant. Cette résistance ohmique diminue de façon linéaire à mesure qu'augmente le courant de sortie assigné du CDM car les CDM à puissance plus élevée utilisent des conducteurs de courant de plus grand diamètre. Par conséquent, la chute de tension au niveau des éléments de conducteur ohmique reste indépendante du courant assigné du CDM.

$$P_{L,rails} = \frac{U_{rails}}{I_{r,out}} I_{out}^2 \quad (C.9)$$

Les paramètres du RCDM pour le convertisseur de référence dans la Formule (C.9) sont donnés dans le Tableau C.10.

**Tableau C.10 – Paramètres de référence de la Formule (C.9)**

Symbole	Description	Valeur de paramètre du RCDM	Unité
$U_{rails}$	Chute de tension des éléments de conducteur ohmique au courant assigné du CDM	0,7	V

### C.7 Pertes de commande et pertes en veille

Les pertes indépendantes de la charge sont expliquées à l'Article B.10. Pour obtenir des résultats comparables, ces pertes sont évaluées sans raccorder de composants externes, tels que des capteurs de position, de l'électronique de communication et des freins de moteur. Pour le convertisseur de référence, la valeur de ces résultats est par hypothèse celle donnée dans le Tableau C.11.

**Tableau C.11 – Paramètre de référence de la Formule (5)**

Abréviation	Description	Valeur de paramètre du RCDM	Unité
$P_{L,control}$	Pertes de commande et pertes en veille	50	W

### C.8 Facteur de pertes de refroidissement

Les CDM de pointe utilisent un système de refroidissement pour transporter les pertes à température ambiante. Dans de nombreux cas, un ventilateur qui fait partie du CDM est par exemple utilisé. Ce composant de refroidissement engendre des pertes supplémentaires. Dans le modèle mathématique, ces pertes sont calculées proportionnellement à toutes les autres pertes produites dans le CDM à son point de fonctionnement aux pertes maximales.

$$P_{L,cooling} = k_{L,cooling} \cdot (P_{L,inverter(90;100)} + P_{L,rectifier(90;100)} + P_{L,rails(90;100)} + P_{L,DC\_link(90;100)} + P_{L,choke(90;100)} + P_{L,control}) \quad (C.10)$$

Pour le RCDM, le paramètre de pertes de refroidissement est fixé à 20 % (voir Tableau C.12):

**Tableau C.12 – Paramètre de référence de la Formule (C.10)**

Symbole	Description	Valeur de paramètre du RCDM	Unité
$k_{L,cooling}$	Paramètre de pertes de refroidissement	0,2	

### C.9 Autres pertes du CDM

Toutes les pertes dans les autres parties du CDM sont négligées dans le modèle mathématique car elles sont nettement plus faibles que les pertes décrites ci-dessus.

## **Annexe D** (informative)

### **Topologie des convertisseurs**

#### **D.1 Généralités**

Dans la plupart des applications, l'utilisateur peut trouver les topologies de CDM décrites à l'Annexe B, notamment pour le fonctionnement du CDM à une tension de ligne jusqu'à 1 000 V en courant alternatif. Dans ce cas, les modèles mathématiques présentés en Annexe C décrivent les pertes d'un CDM ou d'un PDS avec une exactitude suffisante.

Cependant, dans certains cas, d'autres topologies de convertisseurs peuvent exister. La présente Annexe D informative décrit de façon qualitative leur effet sur les pertes.

#### **D.2 Topologies d'onduleurs de sortie de source de tension différentes de celles décrites mathématiquement en C.2**

Le modèle mathématique présenté à l'Article C.2 décrit les pertes d'un onduleur de source de tension à deux niveaux. Certaines applications utilisent des topologies de plus haut niveau, principalement dans des CDM à moyenne tension. La solution la plus simple est, dans ce cas, un onduleur à trois niveaux, des topologies multiniveaux étant toutefois utilisées dans de rares cas.

Selon la fréquence de commutation et la tension assignée, les topologies multiniveaux permettent de réduire les pertes d'un CDM. De plus, elles permettent de réduire les pertes dans le moteur car les harmoniques dans le courant du moteur sont inférieures pour la même fréquence de commutation des dispositifs à semiconducteurs. Par conséquent, le calcul des pertes de l'onduleur à l'aide du modèle mathématique donné en C.2 entraîne des pertes plus importantes que dans une application pratique et génère donc des résultats prudents, en ce qui concerne l'évaluation de la classe IE.

Comme le calcul mathématique des pertes de l'onduleur est nettement plus complexe que pour une topologie à 2 niveaux, il ne fait pas partie du présent document.

#### **D.3 Topologies de convertisseurs d'entrée de source de tension différentes de celles décrites mathématiquement en C.3**

Les mêmes considérations qu'à l'Article D.2 s'appliquent si le convertisseur d'entrée est un convertisseur à alimentation active multiniveau.

Pour les convertisseurs d'entrée passifs, la Figure B.4 représente un convertisseur d'alimentation à six impulsions et la Figure B.7 représente une forme d'onde type pour cette topologie. Certaines applications conçues pour des courants d'entrée harmoniques très faibles utilisent des convertisseurs d'alimentation à 12, à 18 ou à 24 impulsions. Dans ce cas, le courant du convertisseur d'entrée reste très comparable à la forme d'onde que représente la Figure B.7 et le modèle mathématique décrit en C.3 peut donc être utilisé pour toutes les topologies à alimentation passive.

Il est rare de rencontrer d'autres topologies de convertisseurs d'alimentation, par exemple des topologies PFC sans récupération; ces topologies seront décrites dans une édition ultérieure de l'IEC 61800-9-2.

#### D.4 Topologies de CDM autres que le type source de tension

Un nombre restreint d'applications utilise des topologies de CDM autres que le type source de tension, comme les onduleurs de source de courant ou les convertisseurs directs, principalement dans la plage des puissances élevées supérieures à 1 MW et dans la plage des tensions élevées supérieures à 1 000 V en courant alternatif. Pour ces topologies, le calcul des pertes est très différent du modèle mathématique donné à l'Annexe C. Une édition ultérieure de l'IEC 61800-9-2 comportera un modèle mathématique pour ces topologies si cela est défini comme une exigence. Le présent document se limite à un énoncé qualitatif.

Les CDM à source de courant présentent en général des pertes plus importantes qu'un CDM à source de tension pour les raisons suivantes.

- Les onduleurs de source de courant exigent des dispositifs à semiconducteurs de puissance à fonctionnalité de blocage inverse. Ces semiconducteurs de puissance présentent généralement une chute de tension directe plus importante que les semiconducteurs de puissance à blocage asymétrique. Leurs pertes de conduction sont donc habituellement plus importantes.
- Dans la liaison à courant continu, le condensateur en parallèle représenté à la Figure B.8 est remplacé par une inductance en série. Les pertes de cette inductance de liaison à courant continu en série sont généralement plus élevées que les pertes d'un condensateur de liaison à courant continu en parallèle.

Outre les pertes plus importantes dans le CDM, les CDM à source de courant produisent en revanche, au niveau de leurs bornes de sortie, une forme d'onde de tension qui est nettement plus proche de la forme d'onde sinusoïdale que la forme d'onde de la sortie de tension d'un CDM à source de tension. Par conséquent, les pertes dues aux harmoniques dans le moteur sont censées être moins importantes. Dans le PDS global, les pertes sont supposées être analogues.

Les convertisseurs directs permettent de raccorder directement chaque phase d'entrée à chaque phase de sortie du CDM. Il existe deux topologies pour ce type de CDM.

- a) Les convertisseurs à matrice utilisent des dispositifs à semiconducteurs de puissance analogues à des onduleurs de sortie de source de tension et dont le fonctionnement s'effectue à une fréquence de commutation comparable. Les pertes dans ce type de CDM sont connues pour être comparables à celles des CDM de source de tension, bien que leur modèle mathématique soit assez différent. Les applications n'utilisent que très rarement des convertisseurs à matrice pour plusieurs raisons et il ne semble pas que la situation change dans un avenir proche.
- b) Les cycloconvertisseurs à thyristors sont utilisés pour des puissances assignées très élevées dans la plage supérieure à 10 MW, principalement dans des applications où le CDM a une basse fréquence de sortie. Les thyristors fonctionnent à une fréquence de commutation très basse, comparable à la fréquence de ligne, et présentent une chute de tension directe comparativement faible. Par conséquent, les pertes de ce type de CDM sont relativement faibles. D'autre part, les pertes dans le moteur et le réseau sont plus élevées que pour des CDM de source de tension normaux car la forme d'onde de tension présente des harmoniques élevés.

## Annexe E (informative)

### Interpolation des pertes de moteur et du courant de moteur

#### E.1 Généralités

Pour déterminer les pertes dans une condition de fonctionnement quelconque, les pertes mesurées ou calculées en un nombre limité de points de fonctionnement peuvent servir de base pour une formule d'interpolation. L'Annexe E décrit des procédures d'interpolation permettant de calculer les pertes en tout point de fonctionnement entre l'arrêt ( $n = 0$ ) et deux fois la vitesse assignée ( $n = 2$ ) et entre le fonctionnement à vide ( $T = 0$ ) et deux fois le couple assigné ( $T = 2$ ).

Dans l'Annexe E, la fréquence d'alimentation fondamentale  $f$  et le couple  $T$  sont utilisés comme valeurs relatives (dans la plage 0 ... 1) en référence à leurs valeurs assignées. La puissance de sortie relative assignée  $p_N$  est donc donnée par  $p_N = f \times T = 1$ .

Les procédures s'appliquent aux machines (à induction) synchrones et asynchrones.

NOTE Les procédures présentées dans la présente Annexe E informative sont une extension des procédures déjà incluses dans l'IEC 60034-2-3:2020. Les deux normes sont totalement compatibles. Cependant, dans le présent document, les plages de couples et de vitesses admissibles sont sensiblement améliorées et le fonctionnement en régime défluxé est ajouté. Une future mise à jour de l'IEC 60034-2-3 est envisagée, auquel cas la présente Annexe E sera supprimée.

#### E.2 Valeurs relatives et valeurs de référence

Dans l'Annexe E, la vitesse  $n$ , le couple (la charge)  $T$  et la puissance  $P$  servent de valeurs relatives rapportées à la vitesse de référence  $n_{\text{ref}}$ , au couple de référence  $T_{\text{ref}}$  et à la puissance de référence  $P_{\text{ref}}$ .

La vitesse de référence  $n_{\text{ref}}$  est la vitesse assignée  $n_N$  en tours par minute.

La puissance de référence  $P_{\text{ref}}$  est la puissance assignée  $P_N$  à la vitesse assignée  $n_N$ .

Le couple de référence  $T_{\text{ref}}$  est calculé à partir de la vitesse de référence et de la puissance de référence par la Formule (E.1).

$$T_{\text{ref}} = \frac{P_{\text{ref}}}{2\pi \frac{n_{\text{ref}}}{60}} \quad (\text{E.1})$$

Dans le cas des machines synchrones, la fréquence d'alimentation relative  $f$  est égale à la vitesse relative  $n$ .

Dans le cas des machines à induction, la fréquence d'alimentation relative  $f$  pour toute vitesse donnée peut être déterminée à partir d'un mesurage de la fréquence fondamentale aux bornes du moteur lorsque l'arbre tourne à la vitesse  $n$  souhaitée.

Le courant assigné  $I_N$  est le courant dans la connexion normale du moteur indiquée sur la plaque signalétique, c'est-à-dire une connexion en Y ou en D.

Un coefficient de tension  $c_{\text{volt}}$  (voir Formule (E.2)) est défini pour tenir compte des chutes de tension dans le convertisseur de fréquence et des écarts entre la tension assignée du moteur et la tension d'entrée du convertisseur de fréquence.

$$c_{\text{volt}} = \frac{U_i}{U_N} \cdot 0,95 \tag{E.2}$$

où

$U_i$  est la tension d'entrée réelle au niveau de l'onduleur

$U_N$  est la tension assignée du moteur.

### E.3 Connexions de moteur et plages de fonctionnement

Les procédures d'interpolation et d'extrapolation de la Annexe E s'appliquent à trois différentes connexions de moteur. La connexion du moteur est caractérisée par un coefficient de connexion  $c_{\text{con}}$ .

Chaque connexion peut fonctionner dans deux plages de vitesses:

- plage a: plage de vitesses de base (flux constant);
- plage b: plage en régime défluxé (flux réduit).

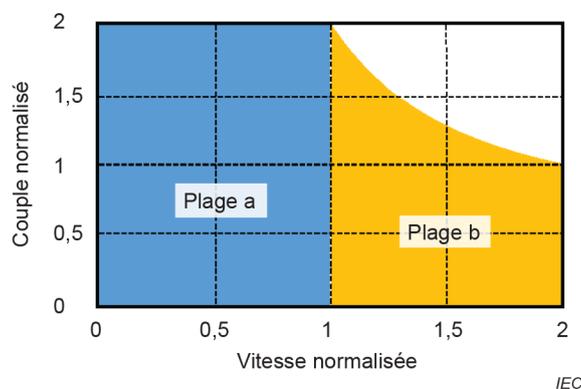
La vitesse relative  $n_{\text{FW}}$ , à laquelle commence la plage en régime défluxé, est donnée par la Formule (E.3):

$$n_{\text{FW}} = c_{\text{volt}} \cdot c_{\text{con}} \tag{E.3}$$

#### a) Connexion en Y ou en D

Moteurs connectés pour fonctionner à la fréquence et à la tension du réseau. Ce fonctionnement s'applique aux moteurs à connexion en étoile (Y) ou en triangle (D).

Le coefficient de connexion de ce mode de connexion est fixé à:  $c_{\text{con}} = 1$  Voir Figure E.1.



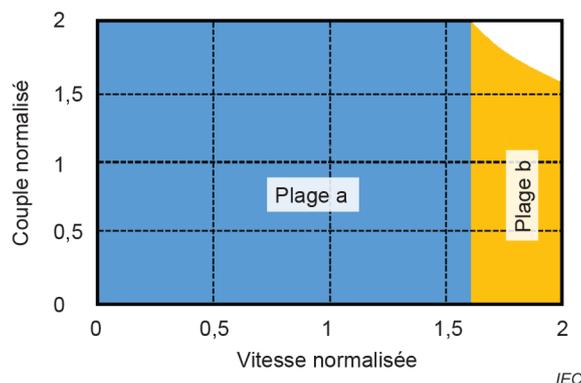
**Figure E.1 – Couple et vitesse normalisés des plages a et b pour la connexion en Y ou en D**

## b) Connexion Y → D

Moteurs connectés pour fonctionner à 1,73 fois la fréquence et la tension du réseau. Ce fonctionnement s'applique aux moteurs conçus à l'origine pour la connexion en étoile (Y) mais qui sont connectés en permanence en triangle (D).

Le coefficient de connexion de ce mode de connexion est fixé à  $c_{\text{con}} = 1,73$ . Voir Figure E.2.

NOTE Le facteur 1,73 est utilisé comme approximation de la racine carrée de 3.

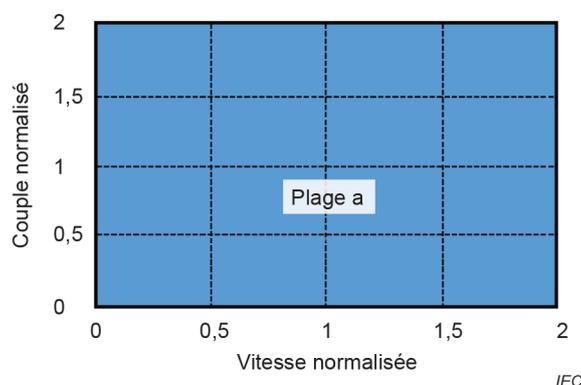


**Figure E.2 – Couple et vitesse normalisés des plages a et b pour la connexion en Y → D**

## c) Connexion Y → YY

Moteurs connectés pour fonctionner à 2 fois la fréquence et la tension du réseau. Ce fonctionnement s'applique aux moteurs conçus à l'origine pour la connexion en étoile (Y) mais qui sont connectés en permanence en double étoile (YY).

Le coefficient de connexion de ce mode de connexion est fixé à  $c_{\text{con}} = 2$ . Voir Figure E.3.



**Figure E.3 – Couple et vitesse normalisés de la plage a pour la connexion Y → YY**

## E.4 Interpolation des pertes de moteur

Les formules d'interpolation reposent sur sept coefficients  $c_{L1}$ ,  $c_{L2}$ , ...,  $c_{L7}$ , qui doivent être fournis pour le moteur. Si ces coefficients n'ont pas été fournis dans la fiche technique du moteur, ils peuvent être calculés à partir des pertes aux sept points de fonctionnement du moteur, comme décrit à l'Article E.6.

Lorsque l'interpolation dans la plage de fonctionnement en régime défluxé est prévue, deux coefficients supplémentaires  $c_{\text{WHf}}$  et  $c_{\text{BH}}$  sont exigés.

Les pertes en tout point de fonctionnement peuvent ensuite être obtenues à l'aide des formules d'interpolation suivantes.

a) Plage a ( $n = 0 \dots n_{FW}$ ,  $T = 0 \dots 2$ ):

$$P_L(n, T) = c_{L1} + c_{L2} \cdot n + c_{L3} \cdot n^2 + c_{L4} \cdot n \cdot T^2 + c_{L5} \cdot n^2 \cdot T^2 + c_{L6} \cdot T + c_{L7} \cdot T^2 \quad (E.4)$$

b) Plage b ( $n = n_{FW} \dots 2$ ,  $T = 0 \dots 2 \cdot n_{FW}/n$ )

$$P_L(n, T) = c_{L1} \cdot \left( c_{WHf} \cdot \frac{1}{(n - (n_{FW} - 1))^2} - c_{WHf} \cdot T^2 + T^2 \cdot (n - (n_{FW} - 1))^2 + (1 - c_{WHf}) \right) + c_{L2} \cdot \left( c_{BH} \cdot n + (1 - c_{BH}) \cdot \frac{n_{FW}}{(n - (n_{FW} - 1))} \right) + n_{FW}^2 \quad (E.5)$$

$$\cdot c_{L3} + c_{L4} \cdot (n - (n_{FW} - 1))^2 \cdot n \cdot T^2 + c_{L5} \cdot (n - (n_{FW} - 1))^2 \cdot n^2 \cdot T^2 + c_{L6} \cdot T \cdot (n - (n_{FW} - 1)) + c_{L7} \cdot T^2 \cdot (n - (n_{FW} - 1))^2$$

NOTE En général, la plage b ne s'applique pas à la connexion Y->YY. Cependant, en cas de chute de tension significative dans le convertisseur de fréquence, un fonctionnement en régime défluxé léger peut également se produire dans la connexion Y->YY.

La Figure E.4, la Figure E.5 et la Figure E.6 représentent les pertes relatives d'un exemple de moteur dans les trois modes de connexion.

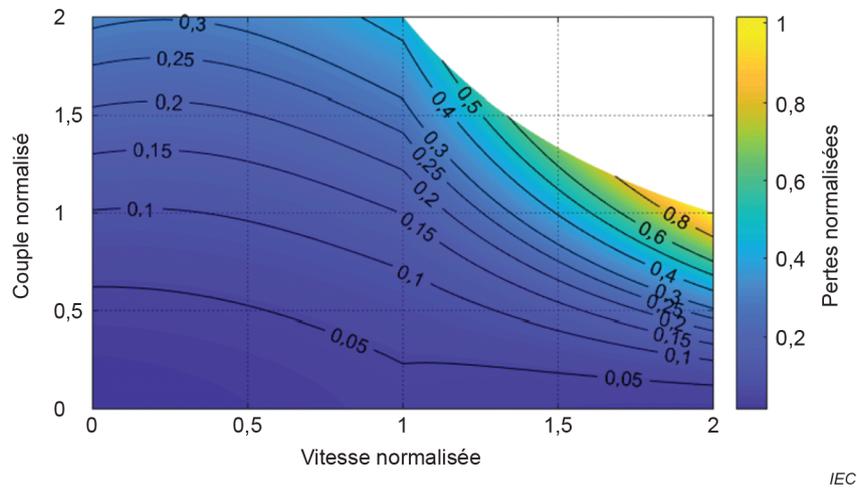
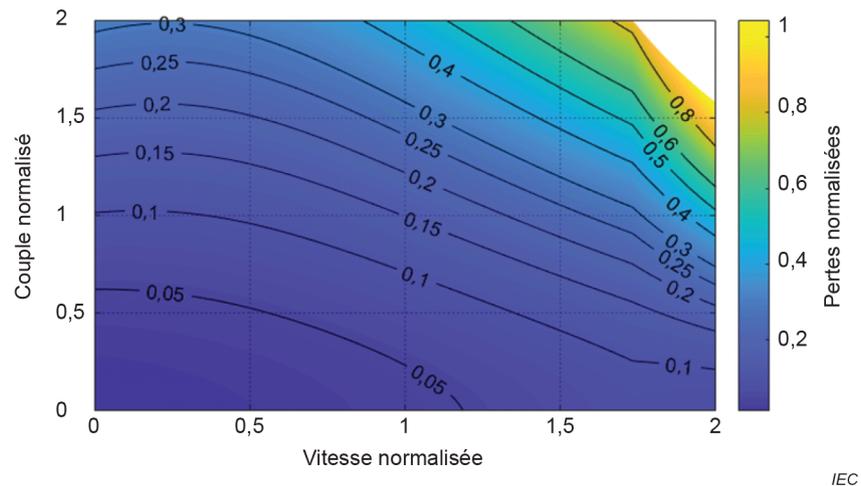
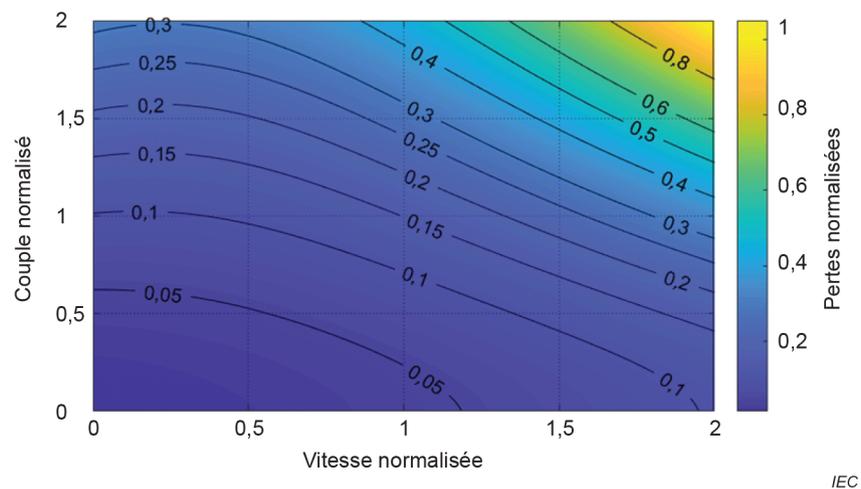


Figure E.4 – Pertes normalisées d'un exemple de moteur à connexion en Y ou en D



**Figure E.5 – Pertes normalisées d'un exemple de moteur à connexion Y → D**



**Figure E.6 – Pertes normalisées d'un exemple de moteur à connexion Y → YY**

Le présent document utilise l'interpolation et le calcul des pertes à différentes conditions de fonctionnement pour l'évaluation globale des performances du système. À titre de référence, les figures de la Figure E.7 à la Figure E.9 représentent des cartes de rendement de l'exemple de moteur, qui peuvent être déduites des figures Figure E.4 à Figure E.6.

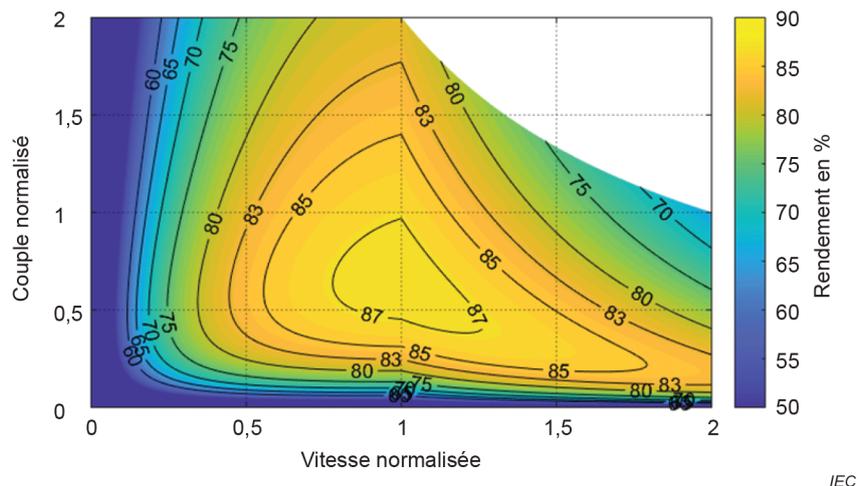


Figure E.7 – Carte de rendement de l'exemple de moteur à connexion en Y ou en D

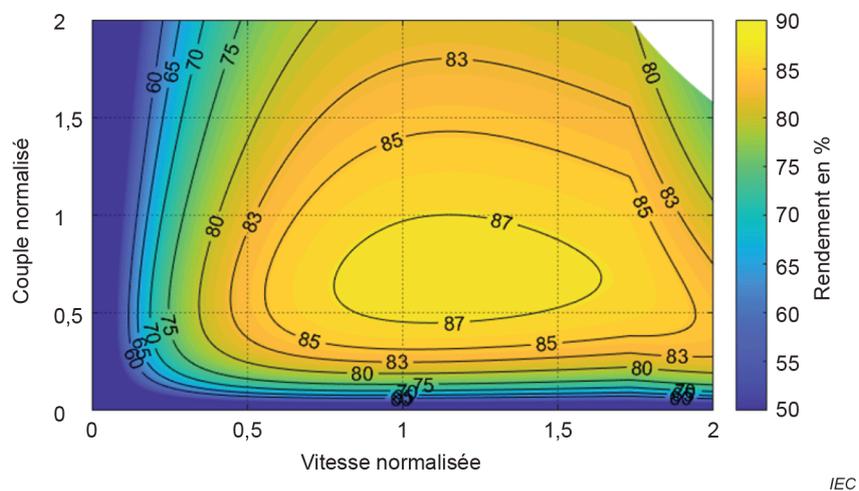


Figure E.8 – Carte de rendement de l'exemple de moteur à connexion Y → D

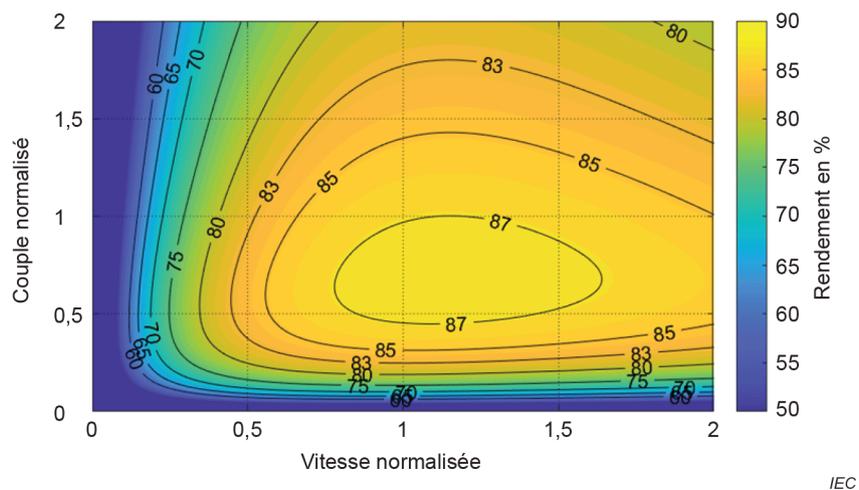


Figure E.9 – Carte de rendement de l'exemple de moteur à connexion Y → YY

## E.5 Interpolation du courant du moteur

Le courant électrique prélevé par le moteur est exigé comme paramètre d'entrée pour déterminer les pertes dans le convertisseur de fréquence (CDM).

Le courant de ligne en tout point de fonctionnement  $I(n, T)$  peut être obtenu à l'aide de la Formule d'interpolation (E.6) et de la Formule (E.7).

NOTE Les formules exigent de connaître le courant à vide  $I_0$ , qui est généralement indiqué dans les fiches techniques du moteur ou qui peut être obtenu auprès du fournisseur.

a) Plage a ( $n = 0 \dots n_{FW}$ ,  $T = 0 \dots 2$ ):

$$I(n, T) = I_N \cdot c_{\text{con}} \sqrt{\left[ \left( \frac{I_0}{I_N} \right)^2 + \left( 1 - \left( \frac{I_0}{I_N} \right)^2 \right) \cdot T^2 \right]} \quad (\text{E.6})$$

b) Plage b ( $n = n_{FW} \dots 2$ ,  $T = 0 \dots 2 \cdot n_{FW} / n$ )

$$I(n, T) = I_N \cdot c_{\text{con}} \cdot \sqrt{\left[ \frac{\left( \frac{I_0}{I_N} \right)^2}{(n - (n_{FW} - 1))^2} + \left( 1 - \frac{\left( \frac{I_0}{I_N} \right)^2}{(n - (n_{FW} - 1))^2} \right) \cdot (T \cdot (n - (n_{FW} - 1)))^2 \right]} \quad (\text{E.7})$$

La Figure E.10, la Figure E.11 et la Figure E.12 représentent le courant de ligne relatif pour un exemple de moteur où le courant magnétisant est égal à 0,5 fois le courant assigné.

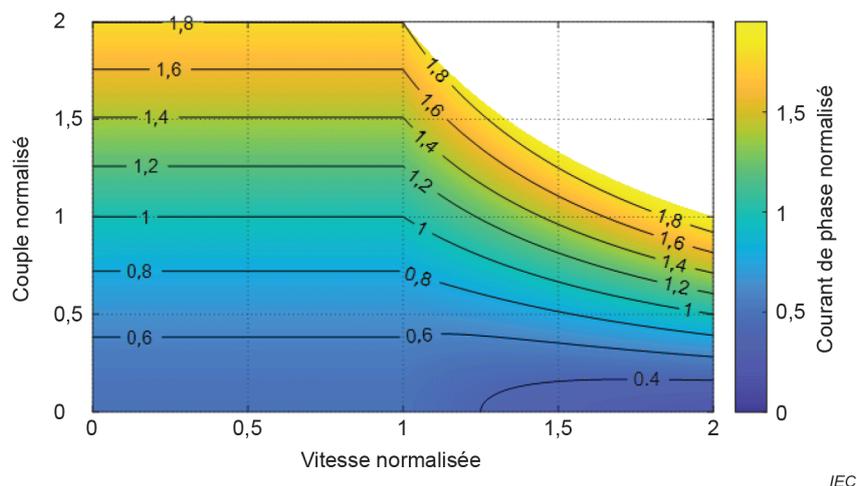
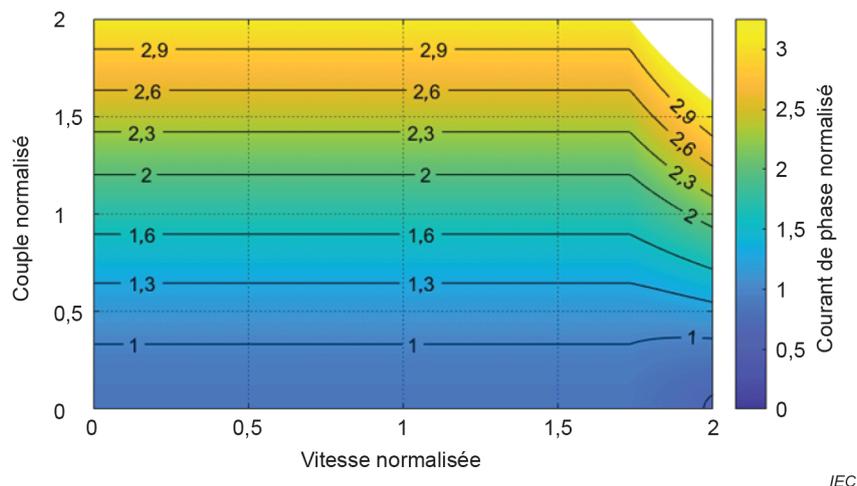
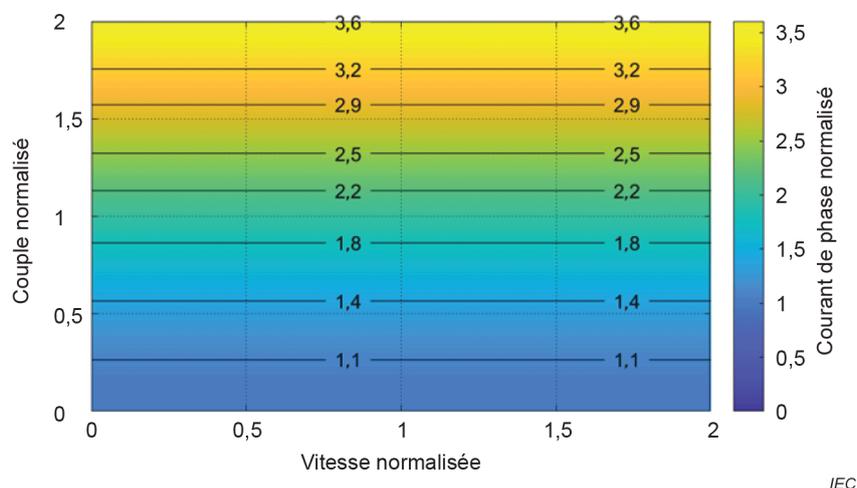


Figure E.10 – Courant de ligne de l'exemple de moteur à connexion en Y ou en D



**Figure E.11 – Courant de ligne de l'exemple de moteur à connexion Y → D**



**Figure E.12 – Courant de ligne de l'exemple de moteur à connexion Y → YY**

## E.6 Détermination des coefficients d'interpolation

### E.6.1 Généralités

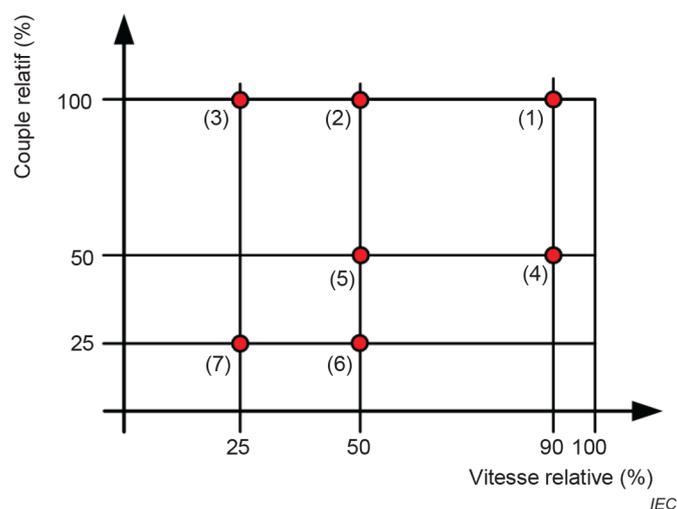
Pour déterminer les coefficients d'interpolation utilisés dans les Formules (E.4) et (E.5), les pertes relatives du moteur à un certain nombre de points de fonctionnement doivent être déterminées par mesurage ou par calcul.

### E.6.2 Détermination analytique

L'approche la plus simple consiste à déterminer les pertes en sept points de fonctionnement qui sont tous situés dans la plage de vitesses de base. Les coefficients d'interpolation peuvent ensuite être déterminés à partir des pertes en ces points, en appliquant un ensemble de formules analytiques. Cette approche donne généralement une bonne précision d'interpolation sur la plage de vitesses de base. Les points de fonctionnement normatifs sont indiqués dans le Tableau E.1 et la Figure E.13.

**Tableau E.1 – Points de fonctionnement normatifs de l'IEC 60034-2-3**

	$f$	$T$	$P$
$P_1$	0,9	1	0,9
$P_2$	0,5	1	0,5
$P_3$	0,25	1	0,25
$P_4$	0,9	0,5	0,45
$P_5$	0,5	0,5	0,25
$P_6$	0,5	0,25	0 125
$P_7$	0,25	0,25	0,062 5

**Figure E.13 – Points de fonctionnement normalisés de l'IEC 60034-2-3**

$P_{L1}$  à  $P_{L7}$  correspond aux pertes mesurées aux points de fonctionnement  $P_1$  à  $P_7$  par rapport à la puissance de référence  $P_{ref}$ .

Pour les moteurs à induction, à tous les points de fonctionnement jusqu'à la vitesse assignée ( $n = 1$ ), il convient que la tension relative du moteur ne soit pas inférieure à la fréquence relative du moteur. Pour les moteurs synchrones conçus pour fonctionner avec un flux/une tension plus faible (par exemple pour des raisons de rendement), la détermination des pertes aux 7 points de fonctionnement est également autorisée avec un flux réduit. Dans ce cas, il convient de noter la réduction du flux dans la documentation du moteur.

Lors de la détermination des pertes par des mesurages, le premier point de fonctionnement (90 % de vitesse et 100 % de couple) pour cette série d'essais est réalisé une fois l'équilibre thermique atteint (vitesse de variation de 1 K ou moins par demi-heure). Il convient que la température aux 6 autres points de fonctionnement soit aussi proche que possible de la température du premier point de fonctionnement.

Les formules suivantes peuvent être utilisées pour la détermination analytique des coefficients d'interpolation  $c_{L_n}$  à partir des pertes  $P_{L_n}$  aux sept points de fonctionnement:

$$\begin{aligned}
 c_{L1} &= -\frac{25}{156} \cdot P_{L1} + \frac{529}{780} \cdot P_{L2} - \frac{12}{65} \cdot P_{L3} + \frac{25}{39} \cdot P_{L4} - \frac{103}{39} \cdot P_{L5} - \frac{56}{195} \cdot P_{L6} + \frac{192}{65} \cdot P_{L7} \\
 c_{L2} &= \frac{25}{26} \cdot P_{L1} - \frac{599}{390} \cdot P_{L2} + \frac{112}{195} \cdot P_{L3} - \frac{50}{13} \cdot P_{L4} + \frac{50}{13} \cdot P_{L5} + \frac{1792}{195} \cdot P_{L6} - \frac{1792}{195} \cdot P_{L7} \\
 c_{L3} &= -\frac{50}{39} \cdot P_{L1} + \frac{22}{13} \cdot P_{L2} - \frac{16}{39} \cdot P_{L3} + \frac{200}{39} \cdot P_{L4} - \frac{200}{39} \cdot P_{L5} - \frac{256}{39} \cdot P_{L6} + \frac{256}{39} \cdot P_{L7} \\
 c_{L4} &= -\frac{50}{13} \cdot P_{L1} + \frac{2542}{195} \cdot P_{L2} - \frac{1792}{195} \cdot P_{L3} + \frac{50}{13} \cdot P_{L4} - \frac{50}{13} \cdot P_{L5} - \frac{1792}{195} \cdot P_{L6} + \frac{1792}{195} \cdot P_{L7} \\
 c_{L5} &= \frac{200}{39} \cdot P_{L1} - \frac{152}{13} \cdot P_{L2} + \frac{256}{39} \cdot P_{L3} - \frac{200}{39} \cdot P_{L4} + \frac{200}{39} \cdot P_{L5} + \frac{256}{39} \cdot P_{L6} - \frac{256}{39} \cdot P_{L7} \\
 c_{L6} &= -2 \cdot P_{L2} + 10 \cdot P_{L5} - 8 \cdot P_{L6} \\
 c_{L7} &= \frac{25}{39} \cdot P_{L1} - \frac{181}{195} \cdot P_{L2} + \frac{192}{65} \cdot P_{L3} - \frac{25}{39} \cdot P_{L4} - \frac{287}{39} \cdot P_{L5} + \frac{1616}{195} \cdot P_{L6} - \frac{192}{65} \cdot P_{L7}
 \end{aligned} \tag{E.8}$$

Les coefficients d'interpolation  $c_{L_n}$  calculés dans la Formule (E.8) peuvent ensuite être utilisés pour calculer les pertes à un point de fonctionnement arbitraire à l'aide de la Formule (E.4) ou de la Formule (E.5) le cas échéant.

Pour les formules d'interpolation dans les plages de fonctionnement en régime défluxé b, deux coefficients supplémentaires  $c_{WHf}$  et  $c_{BH}$  sont exigés.

Le coefficient  $c_{WHf}$  décrit la séparation des pertes enroulement dues au courant magnétisant ( $c_{WHf}$ ) et des pertes à haute fréquence ( $1 - c_{WHf}$ ). Si la séparation détaillée des pertes n'est pas connue, il convient de choisir la valeur 1 pour  $c_{WHf}$  car les pertes à haute fréquence peuvent normalement être négligées par rapport aux pertes  $I^2R$  du courant magnétisant.

Le coefficient  $c_{BH}$  décrit la séparation des pertes dans les paliers ( $c_{BH}$ ) et les pertes d'hystérésis ( $1 - c_{BH}$ ). Si la séparation détaillée des pertes n'est pas connue, il convient de choisir une séparation de pertes égale ( $c_{BH} = 0,5$ ).

### E.6.3 Détermination numérique

Pour obtenir une bonne précision d'interpolation, en particulier dans la plage de fonctionnement en régime défluxé, il est recommandé de déterminer les pertes de moteur sur un plus grand nombre de points de fonctionnement (16 ou 20 points, par exemple). De préférence, il convient que certains de ces points de fonctionnement se situent dans la région en régime défluxé ainsi que dans la région de surcharge ( $T > 1$ ).

Les pertes aux points de fonctionnement sélectionnés peuvent être obtenues à partir de mesurages ou par des outils de calcul. En cas de mesurages, assurer de contrôler tous les résultats et à exclure les valeurs aberrantes du calcul des coefficients d'interpolation.

L'erreur d'interpolation  $Q_{|S|}$  (indice de stabilité d'interpolation) peut être déterminée par l'écart-type moyen des pertes initiales (déterminées)  $P_L^{\text{determined}}$  et des pertes interpolées  $P_L^{\text{interpolated}}$ .

L'indice de stabilité d'interpolation pour un total de  $n = 1 \dots N$  points de fonctionnement est donné par la Formule (E.9).

$$Q_{SI} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_n \left( \frac{P_{L,n}^{\text{determined}} - P_{L,n}^{\text{interpolated}}}{P_{L,n}^{\text{determined}}} \right)^2} \quad (\text{E.9})$$

Les 7 + 2 coefficients d'interpolation ( $c_{L1}, c_{L2}, \dots, c_{L7}, c_{WHf}, c_{BH}$ ) peuvent ensuite être déterminés en réalisant une optimisation numérique pour l'erreur d'interpolation minimale  $Q_{SI}$ . Un algorithme approprié est la méthode de Newton-Raphson, qui est déjà incluse dans de nombreux logiciels numériques du commerce.

NOTE Dans Microsoft Excel, utiliser le complément Solveur.

## E.7 Précisions pouvant être obtenues

La détermination analytique des coefficients d'interpolation conformément au E.6.2 sur la base des 7 points de fonctionnement selon le Tableau E.1 donne généralement de bons résultats de la vitesse de base (plage a) jusqu'au couple assigné  $T \leq 1$ . Là encore, l'extrapolation des pertes peut être imprécise pour  $n < 0,25$  ou  $T < 0,25$ . Dans ces cas, les valeurs de pertes déterminées à 25 % de vitesse ou de couple peuvent être utilisées pour toutes les valeurs inférieures. L'expérience a montré qu'une précision type de l'interpolation des pertes totales supérieure à  $\pm 10$  % peut être attendue. Certains points de fonctionnement peuvent toutefois engendrer une précision réduite jusqu'à  $\pm 20$  % des pertes totales.

Lorsque des couples supérieurs au couple assigné, c'est-à-dire  $T > 1$  (plage a) et  $T > n_{FW} / n$  (plage b), et/ou des points de fonctionnement dans la plage de fonctionnement en régime défluxé (plage b) sont exigés, il convient de déterminer les coefficients d'interpolation sur la base de la procédure du 6.2. Lors de la détermination des coefficients, il doit être veillé à inclure les points de fonctionnement qui couvrent toute la plage de l'application prévue. Dans ce cas, l'interpolation de la vitesse de base (plage a) sera également améliorée. L'expérience a montré qu'une précision type de l'interpolation des pertes totales supérieure à  $\pm 5$  % peut être attendue. Certains points de fonctionnement peuvent toutefois engendrer une précision réduite jusqu'à  $\pm 10$  % des pertes totales.

## E.8 Rendement type des moteurs à induction

Le Tableau E.2 et le Tableau E.3 donnent les coefficients pour les formules d'interpolation en E.6.2 pour des machines à induction types bipolaires et tétrapolaires, de classe de rendement IE2.

Le Tableau E.4, le Tableau E.5 et le Tableau E.6 donnent les coefficients des formules d'interpolation en E.6.2 pour les moteurs à induction types tétrapolaires lorsqu'ils sont entraînés par un CDM de classes de rendement de moteur IE3, IE4 et IE5.

Ces valeurs ont été obtenues à partir de mesurages effectués sur des machines réelles.

**Tableau E.2 – Coefficients d’interpolation des machines à induction types tétrapolaires, de classe de rendement IE2**

Puis- sance assignée kW	Coeff. $c_{L1}$	Coeff. $c_{L2}$	Coeff. $c_{L3}$	Coeff. $c_{L4}$	Coeff. $c_{L5}$	Coeff. $c_{L6}$	Coeff. $c_{L7}$
0,12	0,324 316	0,116 588	0,076 506	0,002 987	0,003 914	-0,292 825	0,551 857
0,18	0,250 225	0,094 236	0,061 948	0,002 082	0,002 949	-0,119 516	0,316 624
0,25	0,195 658	0,083 798	0,060 563	0,005 959	0,006 785	-0,100 213	0,249 350
0,37	0,137 100	0,062 496	0,042 114	0,004 064	0,004 561	-0,042 812	0,204 367
0,55	0,111 483	0,047 330	0,031 814	0,000 010	0,000 416	-0,026 457	0,161 360
0,75	0,085 781	0,041 660	0,026 726	0,001 532	0,001 856	-0,020 927	0,152 402
1,1	0,069 172	0,038 244	0,027 240	0,000 872	0,001 317	-0,016 191	0,140 765
1,5	0,059 580	0,034 760	0,022 242	0,001 155	0,001 639	-0,018 775	0,138 279
2,2	0,036 978	0,031 347	0,021 183	0,009 877	0,008 447	0,016 190	0,091 365
3	0,038 845	0,026 351	0,015 957	0,004 417	0,004 606	-0,008 363	0,110 668
4	0,034 853	0,027 515	0,019 177	0,004 163	0,004 691	-0,012 966	0,098 248
5,5	0,029 206	0,024 540	0,018 285	0,007 272	0,007 664	-0,009 436	0,084 946
7,5	0,023 744	0,022 127	0,015 244	0,006 753	0,007 196	-0,016 095	0,091 724
11	0,019 974	0,020 315	0,014 864	0,005 763	0,005 965	-0,009 032	0,072 826
15	0,016 536	0,018 496	0,013 898	0,006 173	0,006 388	-0,007 766	0,064 775
18,5	0,014 915	0,017 047	0,012 419	0,005 559	0,005 729	-0,005 309	0,063 114
22	0,014 521	0,016 611	0,012 614	0,002 568	0,002 826	-0,005 610	0,060 415
30	0,010 356	0,013 976	0,008 611	0,006 561	0,009 284	0,000 337	0,048 029
37	0,022 059	0,003 052	0,014 537	0,009 029	-0,002 562	-0,008 081	0,053 231
45	0,010 470	0,013 126	0,011 908	0,004 668	0,004 768	-0,002 944	0,045 438
55	0,007 953	0,013 335	0,012 556	0,004 899	0,005 128	0,001 053	0,033 639
75	0,008 147	0,012 746	0,012 559	0,006 868	0,007 747	-0,006 249	0,030 899
90	0,007 422	0,012 923	0,011 440	0,006 342	0,006 353	-0,002 174	0,027 528
110	0,009 988	0,015 774	0,012 799	0,006 196	0,006 242	-0,002 418	0,023 835
132	0,009 150	0,012 524	0,008 713	0,007 001	0,007 230	-0,004 418	0,029 462
160	0,008 685	0,013 137	0,008 347	0,007 411	0,007 595	-0,003 358	0,025 062
200	0,008 253	0,012 361	0,009 287	0,006 432	0,006 646	-0,003310	0,024 648
250	0,007 973	0,011 493	0,008 782	0,005 903	0,006 134	-0,002 659	0,022 575
315	0,007 726	0,010 630	0,008 266	0,005 373	0,005 622	-0,002 170	0,020 633
355	0,007 304	0,010 197	0,008 104	0,005 290	0,005 473	-0,001 981	0,019 849
400	0,006 549	0,009 745	0,007 804	0,005 259	0,005 507	-0,000 335	0,018 033
500	0,006 472	0,009 322	0,007 784	0,005 142	0,005 156	-0,001 640	0,018 292
560	0,006 368	0,009 195	0,008 457	0,005 010	0,004 850	-0,001 882	0,016 170
630	0,005 987	0,008 960	0,009 242	0,005 104	0,005 158	-0,000 826	0,012 893
710	0,006 027	0,008 993	0,009 864	0,005 123	0,005 155	-0,000 825	0,012 505
800	0,006 070	0,009 023	0,010 484	0,005 128	0,005 150	-0,000 833	0,012 126
900	0,005 714	0,008 565	0,009 440	0,005 122	0,005 144	-0,000 887	0,011 977
1 000	0,005 341	0,008 110	0,008 397	0,005 107	0,005 132	-0,000 872	0,011 765

**Tableau E.3 – Coefficients d'interpolation des machines à induction types bipolaires, de classe de rendement IE2**

Puis- sance assignée kW	Coeff. $c_{L1}$	Coeff. $c_{L2}$	Coeff. $c_{L3}$	Coeff. $c_{L4}$	Coeff. $c_{L5}$	Coeff. $c_{L6}$	Coeff. $c_{L7}$
0,12	0,309 215	0,111 623	0,110 781	-0,001 322	0,002 960	-0,383 548	0,721 923
0,18	0,273 998	0,083 806	0,115 291	0,002 587	0,004 709	-0,348 918	0,561 115
0,25	0,167 541	0,073 171	0,088 958	0,003 867	0,007 011	-0,189 190	0,440 915
0,37	0,110 359	0,055 126	0,073 582	0,009 097	0,011 939	-0,121 045	0,311 147
0,55	0,078 950	0,048 581	0,063 063	0,010 411	0,013 178	-0,090 696	0,259 010
0,75	0,070 365	0,034 987	0,032 732	0,008 746	0,013 292	-0,049 085	0,238 701
1,1	0,056 385	0,031 303	0,030 860	0,005 793	0,007 114	-0,035 794	0,180 159
1,5	0,060 191	0,030 829	0,040 748	0,000 904	0,001 593	-0,022 733	0,136 693
2,2	0,059 162	0,031 190	0,033 312	0,001 914	0,002 587	-0,028 384	0,137 223
3	0,043 406	0,026 104	0,028 245	0,005 760	0,006 097	-0,011 705	0,111 514
4	0,031 784	0,023 241	0,027 211	0,012 913	0,013 211	-0,012 423	0,095 823
5,5	0,028 954	0,021 007	0,030 026	0,002 759	0,003 151	-0,010 740	0,088 128
7,5 <sup>a</sup>	0,024 405	0,015 308	0,019 826	0,008 659	0,008 659	-0,015 092	0,085 584
11	0,016 563	0,013 228	0,014 879	0,006 138	0,006 295	-0,007 512	0,067 897
15	0,016 368	0,013 568	0,025 610	0,005 575	0,005 848	-0,004 907	0,059 672
18,5	0,014 745	0,011 859	0,024 222	0,005 110	0,005 264	-0,005 436	0,052 023
22	0,011 104	0,011 228	0,019 121	0,006 070	0,006 207	-0,004 175	0,047 999
30	0,010 892	0,010 729	0,023 913	0,006 792	0,006 959	-0,001 668	0,040 827
37	0,009 844	0,009 115	0,020 941	0,006 641	0,006 957	-0,006 646	0,044 980
45	0,007 975	0,011 238	0,019 297	0,004 000	0,004 373	-0,002 912	0,031 165
55	0,008 080	0,009 476	0,021 905	0,004 978	0,004 839	-0,000 467	0,030 347
75	0,008 174	0,009 524	0,026 133	0,002 245	0,002 546	-0,001 471	0,025 651
90	0,010 468	0,012 436	0,020 174	0,004 593	0,004 592	-0,000 849	0,024 230
110	0,008 463	0,010 116	0,019 400	0,004 050	0,004 079	-0,001 251	0,019 566
132	0,007 975	0,008 928	0,017 852	0,004 602	0,004 641	-0,001 160	0,019 363
160	0,007 489	0,007 738	0,016 304	0,005 148	0,005 203	-0,001 081	0,019 173
200	0,007 513	0,008 009	0,013 136	0,005 785	0,006 285	-0,003 641	0,020 405
250	0,007 336	0,007 431	0,015 691	0,005 161	0,005 183	-0,001 111	0,016 732
315	0,006 501	0,006 990	0,012 831	0,005 141	0,005 161	-0,001 165	0,016 420
355	0,006 197	0,006 633	0,012 262	0,005 128	0,005 149	-0,001 157	0,015 445
400	0,005 887	0,006 273	0,011 683	0,005 127	0,005 153	-0,001 124	0,014 452
500	0,005 571	0,005 915	0,011 114	0,005 114	0,005 140	-0,001 054	0,013 422
560	0,005 426	0,005 839	0,011 092	0,005 071	0,005 185	-0,001 009	0,012 458
630	0,005 222	0,005 734	0,011 155	0,005 072	0,005 145	-0,000 678	0,011 237
710	0,005 226	0,005 655	0,012 328	0,005 095	0,005 142	-0,000 577	0,009 848
800	0,005 216	0,005 593	0,013 485	0,005 074	0,005 162	-0,000 435	0,008 439
900	0,005 054	0,005 307	0,012 116	0,005 090	0,005 136	-0,000 653	0,009 444
1 000	0,004 875	0,005 040	0,010 724	0,005 098	0,005 121	-0,000 814	0,010 403

<sup>a</sup> Les coefficients de la machine de 7,5 kW ont été corrigés en raison d'une erreur dans l'IEC 61800-9-2:2017.

**Tableau E.4 – Coefficients d’interpolation des machines à induction types tétrapolaires, de classe de rendement IE3**

Puis- sance assignée kW	Coeff. $c_{L1}$	Coeff. $c_{L2}$	Coeff. $c_{L3}$	Coeff. $c_{L4}$	Coeff. $c_{L5}$	Coeff. $c_{L6}$	Coeff. $c_{L7}$
0,12	0,254 566	0,091 513	0,060 052	0,002 345	0,003 073	-0,229 847	0,433 170
0,18	0,197 492	0,074 376	0,048 893	0,001 644	0,002 327	-0,094 329	0,249 898
0,25	0,153 404	0,065 701	0,047 483	0,004 672	0,005 320	-0,078 571	0,195 501
0,37	0,107 215	0,048 873	0,032 934	0,003 178	0,003 567	-0,033 480	0,159 819
0,55	0,089 190	0,037 865	0,025 452	0,000 008	0,000 333	-0,021 167	0,129 094
0,75	0,071 000	0,034 481	0,022 121	0,001 268	0,001 536	-0,017 321	0,126 142
1,1	0,057 233	0,031 643	0,022 538	0,000 721	0,001 090	-0,013 396	0,116 468
1,5	0,049 428	0,028 837	0,018 452	0,000 958	0,001 359	-0,015 575	0,114 716
2,2	0,030 458	0,025 820	0,017 448	0,008 135	0,006 957	0,013 335	0,075 256
3	0,032 125	0,021 792	0,013 197	0,003 653	0,003 809	-0,006 916	0,091 522
4	0,028 982	0,022 880	0,015 947	0,003 462	0,003 901	-0,010 782	0,081 698
5,5	0,024 170	0,020 309	0,015 133	0,006 019	0,006 343	-0,007 810	0,070 301
7,5	0,019 793	0,018 445	0,012 707	0,005 629	0,005 998	-0,013 416	0,076 459
11	0,016 546	0,016 828	0,012 313	0,004 774	0,004 941	-0,007 482	0,060 327
15	0,013 671	0,015 292	0,011 490	0,005 103	0,005 281	-0,006 420	0,053 552
18,5	0,012 352	0,014 118	0,010 285	0,004 604	0,004 744	-0,004 397	0,052 271
22	0,011 918	0,013 634	0,010 353	0,002 108	0,002 320	-0,004 605	0,049 588
30	0,008 488	0,011 455	0,007 058	0,005 377	0,007 609	0,000 277	0,039 366
37	0,018 197	0,002 518	0,011 992	0,007 449	-0,002 114	-0,006 667	0,043 912
45	0,008 698	0,010 905	0,009 893	0,003 878	0,003 961	-0,002 446	0,037 748
55	0,006 530	0,010 949	0,010 310	0,004 023	0,004 210	0,000 864	0,027 621
75	0,006 718	0,010 510	0,010 356	0,005 663	0,006 388	-0,005 153	0,025 479
90	0,006 078	0,010 583	0,009 368	0,005 193	0,005 203	-0,001 781	0,022 542
110	0,008 274	0,013 068	0,010 604	0,005 134	0,005 172	-0,002 004	0,019 747
132	0,007 525	0,010 299	0,007 165	0,005 758	0,005 946	-0,003 634	0,024 229
160	0,007 085	0,010 717	0,006 809	0,006 046	0,006 196	-0,002 740	0,020 445
200	0,006 674	0,009 996	0,007 510	0,005 201	0,005 374	-0,002 676	0,019 932
250	0,006 448	0,009 294	0,007 101	0,004 774	0,004 960	-0,002 151	0,018 256
315	0,006 248	0,008 596	0,006 685	0,004 345	0,004 547	-0,001 755	0,016 686
355	0,005 907	0,008 246	0,006 553	0,004 278	0,004 426	-0,001 602	0,016 051
400	0,005 296	0,007 880	0,006 311	0,004 253	0,004 454	-0,000 271	0,014 583
500	0,005 234	0,007 538	0,006 295	0,004 158	0,004 169	-0,001 326	0,014 792
560	0,005 150	0,007 435	0,006 839	0,004 051	0,003 922	-0,001 522	0,013 076
630	0,004 841	0,007 245	0,007 474	0,004 127	0,004 171	-0,000 668	0,010 426
710	0,004 874	0,007 272	0,007 977	0,004 143	0,004 169	-0,000 667	0,010 112
800	0,004 909	0,007 297	0,008 478	0,004 147	0,004 165	-0,000 674	0,009 806
900	0,004 621	0,006 926	0,007 634	0,004 142	0,004 160	-0,000 717	0,009 686
1 000	0,004 319	0,006 559	0,006 790	0,004 130	0,004 150	-0,000 705	0,009 514

**Tableau E.5 – Coefficients d'interpolation des machines à induction types tétrapolaires, de classe de rendement IE4**

Puis- sance assignée kW	Coeff. $c_{L1}$	Coeff. $c_{L2}$	Coeff. $c_{L3}$	Coeff. $c_{L4}$	Coeff. $c_{L5}$	Coeff. $c_{L6}$	Coeff. $c_{L7}$
0,12	0,202 761	0,072 890	0,047 831	0,001 868	0,002 447	-0,183 073	0,345 019
0,18	0,155 332	0,058 498	0,038 455	0,001 293	0,001 830	-0,074 192	0,196 550
0,25	0,120 707	0,051 698	0,037 363	0,003 677	0,004 186	-0,061 824	0,153 831
0,37	0,085 084	0,038 785	0,026 136	0,002 522	0,002 831	-0,026 569	0,126 831
0,55	0,072 027	0,030 578	0,020 554	0,000 006	0,000 269	-0,017 093	0,104 251
0,75	0,055 851	0,027 124	0,017 401	0,000 997	0,001 208	-0,013 625	0,099 227
1,1	0,044 436	0,024 568	0,017 499	0,000 560	0,000 846	-0,010 401	0,090 427
1,5	0,038 372	0,022 387	0,014 325	0,000 744	0,001 055	-0,012 092	0,089 058
2,2	0,023 293	0,019 747	0,013 344	0,006 222	0,005 321	0,010 199	0,057 554
3	0,024 324	0,016 501	0,009 992	0,002 766	0,002 884	-0,005 237	0,069 298
4	0,022 005	0,017 372	0,012 108	0,002 629	0,002 962	-0,008 186	0,062 031
5,5	0,018 354	0,015 422	0,011 491	0,004 570	0,004 817	-0,005 930	0,053 384
7,5	0,014 894	0,013 880	0,009 562	0,004 236	0,004 514	-0,010 096	0,057 537
11	0,012 628	0,012 843	0,009 397	0,003 643	0,003 771	-0,005 710	0,046 042
15	0,010 354	0,011 581	0,008 702	0,003 865	0,004 000	-0,004 862	0,040 557
18,5	0,009 517	0,010 877	0,007 925	0,003 547	0,003 655	-0,003 388	0,040 273
22	0,009 216	0,010 542	0,008 005	0,001 630	0,001 794	-0,003 561	0,038 343
30	0,006 671	0,009 003	0,005 547	0,004 226	0,005 980	0,000 217	0,030 940
37	0,014 123	0,001 954	0,009 307	0,005 781	-0,001 640	-0,005 174	0,034 082
45	0,006 812	0,008 540	0,007 747	0,003 037	0,003 102	-0,001 915	0,029 562
55	0,005 140	0,008 619	0,008 115	0,003 166	0,003 314	0,000 680	0,021 742
75	0,005 318	0,008 321	0,008 198	0,004 483	0,005 057	-0,004 079	0,020 170
90	0,004 892	0,008 518	0,007 540	0,004 180	0,004 187	-0,001 433	0,018 144
110	0,006 593	0,010 413	0,008 450	0,004 091	0,004 121	-0,001 597	0,015 735
132	0,006 106	0,008 357	0,005 814	0,004 672	0,004 824	-0,002 948	0,019 659
160	0,005 688	0,008 604	0,005 467	0,004 854	0,004 974	-0,002 200	0,016 414
200	0,005 466	0,008 187	0,006 151	0,004 260	0,004 402	-0,002 192	0,016 325
250	0,005 281	0,007 612	0,005 816	0,003 910	0,004 062	-0,001 761	0,014 952
315	0,005 117	0,007 041	0,005 475	0,003 559	0,003 724	-0,001 437	0,013 666
355	0,004 838	0,006 754	0,005 367	0,003 504	0,003 625	-0,001 312	0,013 147
400	0,004 337	0,006 454	0,005 169	0,003 483	0,003 648	-0,000 222	0,011 944
500	0,004 287	0,006 174	0,005 156	0,003 406	0,003 415	-0,001 086	0,012 115
560	0,004 218	0,006 090	0,005 601	0,003 318	0,003 212	-0,001 246	0,010 710
630	0,003 965	0,005 934	0,006 121	0,003 380	0,003 416	-0,000 547	0,008 539
710	0,003 992	0,005 956	0,006 533	0,003 393	0,003 414	-0,000 547	0,008 282
800	0,004 020	0,005 976	0,006 944	0,003 396	0,003 411	-0,000 552	0,008 031
900	0,003 784	0,005 673	0,006 252	0,003 393	0,003 407	-0,000 587	0,007 933
1 000	0,003 538	0,005 372	0,005 562	0,003 383	0,003 399	-0,000 578	0,007 792

**Tableau E.6 – Coefficients d'interpolation des machines à induction types tétrapolaires, de classe de rendement IE5**

Puis- sance assignée kW	Coeff. $c_{L1}$	Coeff. $c_{L2}$	Coeff. $c_{L3}$	Coeff. $c_{L4}$	Coeff. $c_{L5}$	Coeff. $c_{L6}$	Coeff. $c_{L7}$
0,12	0,162 098	0,058 272	0,038 239	0,001 493	0,001 956	-0,146 358	0,275 826
0,18	0,124 127	0,046 747	0,030 730	0,001 033	0,001 463	-0,059 287	0,157 065
0,25	0,096 581	0,041 365	0,029 895	0,002 942	0,003 349	-0,049 467	0,123 085
0,37	0,067 996	0,030 995	0,020 887	0,002 016	0,002 262	-0,021 233	0,101 357
0,55	0,057 579	0,024 445	0,016 431	0,000 005	0,000 215	-0,013 664	0,083 339
0,75	0,044 780	0,021 748	0,013 952	0,000 800	0,000 969	-0,010 925	0,079 559
1,1	0,035 515	0,019 636	0,013 986	0,000 448	0,000 676	-0,008 313	0,072 272
1,5	0,030 458	0,017 770	0,011 370	0,000 591	0,000 838	-0,009 598	0,070 690
2,2	0,018 682	0,015 837	0,010 702	0,004 990	0,004 267	0,008 179	0,046 159
3	0,019 647	0,013 328	0,008 071	0,002 234	0,002 329	-0,004 230	0,055 974
4	0,017 476	0,013 796	0,009 616	0,002 088	0,002 352	-0,006 501	0,049 263
5,5	0,014 715	0,012 364	0,009 213	0,003 664	0,003 862	-0,004 754	0,042 799
7,5	0,011 897	0,011 087	0,007 638	0,003 383	0,003 605	-0,008 064	0,045 957
11	0,010 038	0,010 209	0,007 470	0,002 896	0,002 998	-0,004 539	0,036 599
15	0,008 212	0,009 185	0,006 902	0,003 065	0,003 172	-0,003 857	0,032 168
18,5	0,007 623	0,008 713	0,006 348	0,002 841	0,002 928	-0,002 714	0,032 259
22	0,007 461	0,008 535	0,006 481	0,001 319	0,001 452	-0,002 883	0,031 043
30	0,005 307	0,007 163	0,004 413	0,003 362	0,004 758	0,000 173	0,024 614
37	0,011 368	0,001 573	0,007 491	0,004 653	-0,001 320	-0,004 165	0,027 432
45	0,005 428	0,006 805	0,006 173	0,002 420	0,002 472	-0,001 526	0,023 556
55	0,004 149	0,006 957	0,006 551	0,002 556	0,002 675	0,000 549	0,017 550
75	0,004 356	0,006 815	0,006 715	0,003 672	0,004 142	-0,003 341	0,016 520
90	0,003 857	0,006 715	0,005 944	0,003 295	0,003 301	-0,001 130	0,014 303
110	0,005 307	0,008 382	0,006 802	0,003 293	0,003 317	-0,001 285	0,012 666
132	0,004 883	0,006 683	0,004 649	0,003 736	0,003 858	-0,002 358	0,015 722
160	0,004 656	0,007 042	0,004 474	0,003 973	0,004 071	-0,001 800	0,013 434
200	0,004 276	0,006 404	0,004 811	0,003 332	0,003 443	-0,001 715	0,012 770
250	0,004 131	0,005 954	0,004 550	0,003 058	0,003 178	-0,001 378	0,011 696
315	0,004 003	0,005 507	0,004 283	0,002 784	0,002 913	-0,001 124	0,010 690
355	0,003 784	0,005 283	0,004 198	0,002 741	0,002 835	-0,001 026	0,010 283
400	0,003 393	0,005 049	0,004 043	0,002 724	0,002 853	-0,000 174	0,009 343
500	0,003 353	0,004 829	0,004 033	0,002 664	0,002 671	-0,000 850	0,009 477
560	0,003 299	0,004 764	0,004 381	0,002 595	0,002 513	-0,000 975	0,008 377
630	0,003 102	0,004 642	0,004 788	0,002 644	0,002 672	-0,000 428	0,006 680
710	0,003 122	0,004 659	0,005 110	0,002 654	0,002 671	-0,000 428	0,006 478
800	0,003 145	0,004 675	0,005 432	0,002 657	0,002 668	-0,000 432	0,006 282
900	0,002 960	0,004 437	0,004 891	0,002 654	0,002 665	-0,000 460	0,006 205
1000	0,002 767	0,004 202	0,004 350	0,002 646	0,002 659	-0,000 452	0,006 095

Les données relatives aux pertes et au rendement des autres types de moteurs, nombres de pôles et classes de moteur peuvent être consultées dans l'IEC TS 60034-31.

## Annexe F (informative)

### Exemple d'application pour le calcul des pertes d'un CDM et d'un PDS

#### F.1 Généralités

L'Annexe F donne un exemple de calcul des pertes d'un CDM physique et d'un PDS physique à un point de fonctionnement défini. Le point de fonctionnement du PDS est choisi pour être à 80 % du couple assigné et à 75 % de la vitesse assignée d'un PDS de 7,5 kW à titre d'exemple.

À cet effet, la première étape consiste à calculer les pertes du CDM. L'étape suivante détermine les pertes du moteur. La troisième étape calcule les pertes du PDS.

L'Article F.6 donne des exemples d'application pour la détermination des pertes et la classification IE d'un SDIM, du SDOM et d'un CDM avec des fonctionnalités améliorées.

#### F.2 Détermination des pertes du CDM

##### F.2.1 Généralités

Pour déterminer les pertes relatives d'un CDM à un point de fonctionnement arbitraire, l'un des modèles de calcul suivants peut être utilisé:

- l'interpolation ou l'extrapolation linéaire bidimensionnelle à partir de points de perte voisins;
- le calcul des pertes selon le modèle mathématique décrit en 5.2 et à l'Annexe C.

Pour la méthode d'interpolation linéaire bidimensionnelle (méthode a)), il est nécessaire de diviser la zone de fonctionnement représentée à la Figure 6 en quatre segments, comme représenté à la Figure F.1.

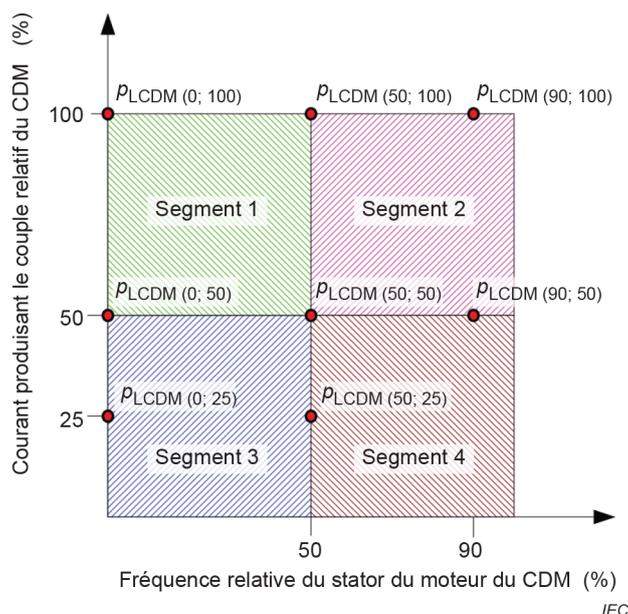


Figure F.1 – Segments des points de fonctionnement

Le segment 1 contient les points de fonctionnement jusqu'à 50 % de la fréquence relative  $f$  du stator du moteur et supérieurs à 50 % du courant relatif produisant le couple  $i_q$ .

Le segment 2 contient les points de fonctionnement supérieurs à 50 % de la fréquence relative  $f$  du stator du moteur et supérieurs à 50 % du courant relatif produisant le couple  $i_q$ .

Le segment 3 contient les points de fonctionnement jusqu'à 50 % de la fréquence relative  $f$  du stator du moteur et jusqu'à 50 % du courant relatif produisant le couple  $i_q$ .

Le segment 4 contient les points de fonctionnement supérieurs à 50 % de la fréquence relative  $f$  du stator du moteur et jusqu'à 50 % du courant relatif produisant le couple  $i_q$ .

Les paragraphes suivants démontrent la façon de déterminer les pertes au point de fonctionnement qui est à 75 % de la fréquence relative du stator du moteur et à 80 % du courant relatif produisant le couple. L'exemple de CDM (IE2) utilisé dans l'exemple de PDS présente une puissance apparente assignée de 9,95 kVA. Les pertes aux points de fonctionnement prédéfinis sont par hypothèse celles présentées dans le Tableau F.1.

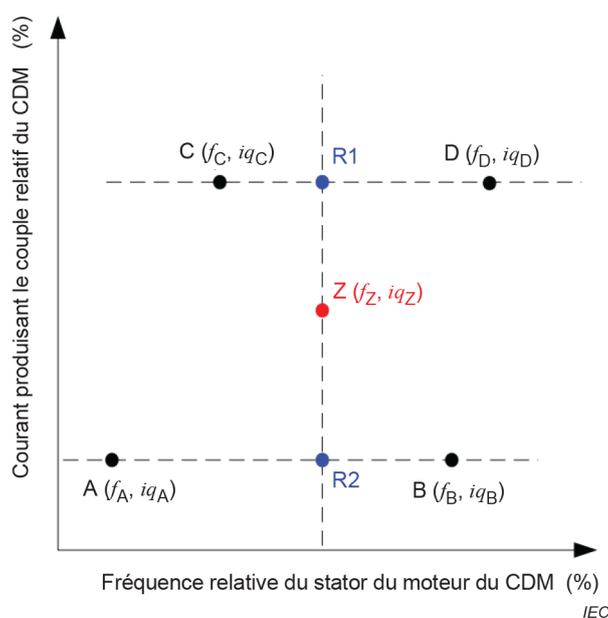
**Tableau F.1 – Pertes relatives d'un exemple de CDM (IE1) de 400 V/9,95 kVA aux points de fonctionnement prédéfinis**

$P_{rM}$ kW	$S_{r, equ}$ kVA	$P_{L, CDM}$ (0;25)	$P_{L, CDM}$ (0;50)	$P_{L, CDM}$ (0;100)	$P_{L, CDM}$ (50;25)	$P_{L, CDM}$ (50;50)	$P_{L, CDM}$ (50;100)	$P_{L, CDM}$ (90;50)	$P_{L, CDM}$ (90;100)
7,5	9,95	2,80	3,09	4,02	2,86	3,28	4,64	3,61	5,84

## F.2.2 Détermination des pertes par interpolation bidimensionnelle des pertes aux points de perte voisins

### F.2.2.1 Modèle général d'interpolation bidimensionnelle

L'interpolation entre quatre points définis A, B, C et D à un point de fonctionnement Z est calculée en trois étapes. Voir Figure F.2.



**Figure F.2 – Interpolation bidimensionnelle**

À la première étape, une interpolation linéaire entre les points C et D est calculée pour le point R1. La composante horizontale  $f$  de R1 est choisie équivalente à la composante horizontale  $f_Z$  du point de fonctionnement Z exigé. Si la composante verticale des points C et D est identique ( $iq_C = iq_D$ ), les pertes au point R1 sont uniquement fonction de la composante horizontale  $f_Z$  et peuvent être calculées par:

$$p_{L,R1}(f_Z) = p_{L,C} + \frac{p_{L,D} - p_{L,C}}{f_D - f_C} \cdot (f_Z - f_C) \quad (\text{F.1})$$

À la deuxième étape, les pertes sont interpolées de la même manière pour le point R2:

$$p_{L,R2}(f_Z) = p_{L,A} + \frac{p_{L,B} - p_{L,A}}{f_B - f_A} \cdot (f_Z - f_A) \quad (\text{F.2})$$

À la troisième étape, les pertes du point de fonctionnement Z sont finalement calculées par interpolation entre R1 et R2. Comme R1 et R2 ont par définition la même composante horizontale  $f_Z$ , cette interpolation est uniquement fonction de la composante verticale  $iq_Z$ :

$$p_{L,Z}(iq_Z) = p_{L,R2} + \frac{p_{L,R1} - p_{L,R2}}{iq_{R1} - iq_{R2}} \cdot (iq_Z - iq_{R2}) \quad (\text{F.3})$$

En insérant les Formules (F.1) et (F.2) dans (F.3), le calcul final des pertes au point de fonctionnement Z est obtenu en une étape:

$$p_{L,Z}(f_Z, iq_Z) = p_{L,A} + \frac{p_{L,B} - p_{L,A}}{f_B - f_A} \cdot (f_Z - f_A) + \frac{\left( p_{L,C} + \frac{p_{L,D} - p_{L,C}}{f_D - f_C} \cdot (f_Z - f_C) \right) - \left( p_{L,A} + \frac{p_{L,B} - p_{L,A}}{f_B - f_A} \cdot (f_Z - f_A) \right)}{iq_C - iq_A} \cdot (iq_Z - iq_A) \quad (\text{F.4})$$

En prenant en compte les points de pertes prédéfinis sur la Figure 6, le calcul des segments de la Figure F.1 donne pour le segment 1:

$$\begin{aligned}
 p_{L,Z}(f_Z, iq_Z) = & \\
 & p_{L,CDM(0,50)} + \frac{p_{L,CDM(50,50)} - p_{L,CDM(0,50)}}{50} \cdot f_Z + \\
 & \left( \frac{\left( p_{L,CDM(0,100)} + \frac{p_{L,CDM(50,100)} - p_{L,CDM(0,100)}}{50} \cdot f_Z \right)}{50} - \right. \\
 & \left. \frac{\left( p_{L,CDM(0,50)} + \frac{p_{L,CDM(50,50)} - p_{L,CDM(0,50)}}{50} \cdot f_Z \right)}{50} \right) \cdot (iq_Z - 50)
 \end{aligned} \tag{F.5}$$

Pour le segment 2, le calcul donne:

$$\begin{aligned}
 p_{L,Z}(f_Z, iq_Z) = & \\
 & p_{L,CDM(50,50)} + \frac{p_{L,CDM(90,50)} - p_{L,CDM(50,50)}}{40} \cdot (f_Z - 50) + \\
 & \left( \frac{\left( p_{L,CDM(50,100)} + \frac{p_{L,CDM(90,100)} - p_{L,CDM(50,100)}}{40} \cdot (f_Z - 50) \right)}{50} - \right. \\
 & \left. \frac{\left( p_{L,CDM(50,50)} + \frac{p_{L,CDM(90,50)} - p_{L,CDM(50,50)}}{40} \cdot (f_Z - 50) \right)}{50} \right) \cdot (iq_Z - 50)
 \end{aligned} \tag{F.6}$$

Pour le segment 3, le calcul donne:

$$\begin{aligned}
 p_{L,Z}(f_Z, iq_Z) = & \\
 & p_{L,CDM(0,25)} + \frac{p_{L,CDM(50,25)} - p_{L,CDM(0,25)}}{50} \cdot f_Z + \\
 & \left( \frac{\left( p_{L,CDM(0,50)} + \frac{p_{L,CDM(50,50)} - p_{L,CDM(0,50)}}{50} \cdot f_Z \right)}{25} - \right. \\
 & \left. \frac{p_{L,CDM(0,25)} + \frac{p_{L,CDM(50,25)} - p_{L,CDM(0,25)}}{50} \cdot f_Z}{25} \right) \cdot (iq_Z - 25)
 \end{aligned} \tag{F.7}$$

Pour le segment 4, le calcul donne:

$$p_{L,Z}(f_Z, iq_Z) = \left( \frac{p_{L,CDM(0,25)} + \frac{p_{L,CDM(50,25)} - p_{L,CDM(0,25)} \cdot f_Z}{50} + \left( \frac{p_{L,CDM(50,50)} + \frac{p_{L,CDM(90,50)} - p_{L,CDM(50,50)} \cdot (f_Z - 50)}{40} \right)}{25} - \frac{p_{L,CDM(0,25)} + \frac{p_{L,CDM(50,25)} - p_{L,CDM(0,25)} \cdot f_Z}{50}}{25} \right) \cdot (iq_Z - 25) \quad (F.8)$$

### F.2.2.2 Calcul numérique pour le point de fonctionnement demandé

Le point de fonctionnement demandé à 75 % de la fréquence relative du stator du moteur et à 80 % du courant produisant le couple se trouve dans le segment 2. Par conséquent, la Formule (F.6) s'applique. À ce point de fonctionnement, les pertes résultantes sont:

$$p_{L,Z}(75,80) = 3,09 + \frac{3,45 - 3,09}{40} \cdot (75 - 50) + \left( \frac{\left( 4,58 + \frac{5,91 - 4,58}{40} \cdot (75 - 50) \right)}{50} - \frac{\left( 3,09 + \frac{3,45 - 3,09}{40} \cdot (75 - 50) \right)}{50} \right) \cdot (80 - 50) \quad (F.9)$$

$$= 4,57$$

Les pertes relatives à 75 % de la fréquence relative du stator du moteur et à 80 % du couple relatif sont de 4,57 %.

### F.2.3 Détermination des pertes à l'aide du modèle mathématique décrit à l'Annexe C

Cette méthode de détermination des pertes fournit la meilleure précision. Elle exige toutefois tous les paramètres techniques pour les Formules (C.1) à (C.10) et (6). Comme ces données ne sont en général pas disponibles dans la documentation d'un CDM, cette méthode de calcul s'adresse principalement aux fournisseurs de CDM.

Dans cet exemple de calcul, les valeurs des paramètres du CDM évalué sont données dans le Tableau F.2.

**Tableau F.2 – Paramètres de l'exemple de CDM**

Symbole	Description	Valeurs des paramètres de l'exemple de CDM	Unité
$U_{T,th}$	Tension de seuil du transistor de puissance (IGBT)	1,0	V
$U_{T,r}$	Tension à l'état passant du transistor de puissance (IGBT) au courant de sortie assigné du CDM	2,6	V
$U_{D,th}$	Tension de seuil de la diode de puissance	1,1	V
$U_{D,r}$	Tension à l'état passant de la diode de puissance au courant de sortie assigné du CDM	2,7	V
$U_{D,th,rectifier}$	Tension de seuil de la diode de puissance du redresseur	0,9	V
$U_{D,r,rectifier}$	Tension à l'état passant de la diode de puissance du redresseur au courant d'entrée assigné du CDM	2,0	V
$E_T$	Énergie des pertes de commutation du transistor de puissance (IGBT) par volt et par ampère	$6,5 \times 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$
$E_D$	Énergie des pertes de commutation de la diode de puissance par volt et par ampère	$3,5 \times 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$
$U_{DC}$	Tension de la liaison à courant continu de l'onduleur	540	V
$f_{sw}$	Fréquence de commutation de l'onduleur	4 000	Hz
$I_{cable}$	Courant du câble du moteur à utiliser lorsque les pertes de commutation sont plus importantes	10	A
$k1_{choke}$	Impédance de la bobine d'arrêt, par rapport à l'impédance nominale de l'onduleur	0,03	
$k2_{choke}$	Chute de tension relative sur la partie résistive de la bobine d'arrêt	0,25	
$\lambda$	Facteur de puissance d'entrée	0,7	
$k1_{DC\_link}$	Pertes de la liaison à courant continu indépendantes de la charge par ampère assigné et volt au carré	$7 \times 10^{-7}$	$\frac{1}{\Omega \cdot A}$
$k2_{DC\_link}$	Pertes de la liaison à courant continu dépendantes de la charge par ampère	1,7	$\Omega \cdot A$
$U_{rails}$	Chute de tension des éléments de conducteur ohmique au courant assigné du CDM	0,7	V
$k_{L,cooling}$	Facteur pour les pertes de refroidissement	0,15	
$P_{L,control}$	Pertes de commande et pertes en veille	45	W

La tension d'entrée assignée entre phases de l'exemple de CDM est de 400 V et son courant de sortie assigné est de 14,4 A. L'interpolation linéaire du Tableau 1 à 80 % du courant produisant le couple calcule un courant de sortie de CDM qui représente 83,2 % du courant de sortie assigné, ce qui donne 11,65 A. L'interpolation linéaire au même courant produisant le couple du Tableau 2 donne un facteur de puissance de 0,81 à la sortie de l'onduleur.

Avec ces données, le modèle mathématique décrit en 5.2 et à l'Annexe C peut être calculé et donne les résultats présentés dans le Tableau F.3.

**Tableau F.3 – Résultats du calcul pour le CDM d'après le modèle mathématique**

Terme	Formule	Pertes	Unité
Pertes à l'état passant d'un transistor d'onduleur	(C.1)	10,8	W
Pertes à l'état passant d'une diode d'onduleur	(C.2)	2,72	W
Pertes de commutation d'un transistor d'onduleur	(C.3)	13,9	W
Pertes de commutation d'une diode d'onduleur	(C.4)	7,48	W
Pertes totales de l'onduleur de sortie	(C.5)	209	W
Pertes du redresseur	(C.6)	46,8	W
Pertes des bobines d'arrêt d'entrée	(C.7)	45,9	W
Pertes de la liaison à courant continu	(C.8)	4,59	W
Pertes du rail d'alimentation en courant	(C.9)	6,98	W
Pertes de refroidissement	(C.10)	76,7	W
Pertes absolues globales du CDM	(5)	435	W
Pertes relatives globales du CDM	(6)	4,37	%

En conclusion, les pertes relatives de l'exemple de CDM sont déterminées par les deux méthodes d'évaluation différentes présentées avec les valeurs obtenues dans le Tableau F.4.

**Tableau F.4 – Comparaison des différentes méthodes d'évaluation des pertes**

Méthode d'évaluation	Pertes relatives
Interpolation bidimensionnelle aux points voisins	4,57 %
Modèle mathématique	4,37 %

### F.3 Détermination des pertes du moteur

Pour l'exemple de PDS, les pertes d'un exemple de moteur de 7,5 kW, telles que spécifiées par le fournisseur du moteur, sont données dans le Tableau F.5.

**Tableau F.5 – Données relatives aux pertes de l'exemple de moteur de 7,5 kW**

$P_{rM}$	$P_{L, RM, \text{relative}} (25;25)$	$P_{L, RM, \text{relative}} (25;100)$	$P_{L, RM, \text{relative}} (50;25)$	$P_{L, RM, \text{relative}} (50;50)$	$P_{L, RM, \text{relative}} (50;100)$	$P_{L, RM, \text{relative}} (90;50)$	$P_{L, RM, \text{relative}} (90;100)$
kW	$P_{L7}$	$P_{L3}$	$P_{L6}$	$P_{L5}$	$P_{L2}$	$P_{L4}$	$P_{L1}$
7,5	3,73	5,1	4,66	4,98	6,94	6,31	9,6

À la première étape, les coefficients d'interpolation  $c_{L1}$  à  $c_{L7}$  sont calculés par les Formules (F.10) à (F.16), basées sur l'IEC 60034-2-3.

$$c_{L1} = -\frac{25}{156} \cdot 9,6 \% + \frac{529}{780} \cdot 6,94 \% - \frac{12}{65} \cdot 5,1 \% + \frac{25}{39} \cdot 6,31 \% - \frac{103}{39} \cdot 4,98 \% - \frac{56}{195} \cdot 4,66 \% + \frac{192}{65} \cdot 3,73 \% = -1,467 \% \quad (\text{F.10})$$

$$c_{L2} = \frac{25}{26} \cdot 9,6 \% - \frac{599}{390} \cdot 6,94 \% + \frac{112}{195} \cdot 5,1 \% - \frac{50}{13} \cdot 6,31 \% + \frac{50}{13} \cdot 4,98 \% + \frac{1792}{195} \cdot 4,66 \% - \frac{1792}{195} \cdot 3,73 \% = 14,63 \% \quad (\text{F.11})$$

$$c_{L3} = -\frac{50}{39} \cdot 9,6 \% + \frac{22}{13} \cdot 6,94 \% - \frac{16}{39} \cdot 5,1 \% + \frac{200}{39} \cdot 6,31 \% - \frac{200}{39} \cdot 4,98 \% - \frac{256}{39} \cdot 4,66 \% + \frac{256}{39} \cdot 3,73 \% = -14,92 \% \quad (\text{F.12})$$

$$c_{L4} = -\frac{50}{13} \cdot 9,6 \% + \frac{2542}{195} \cdot 6,94 \% - \frac{1792}{195} \cdot 5,1 \% + \frac{500}{13} \cdot 6,31 \% - \frac{50}{13} \cdot 4,98 \% - \frac{1792}{195} \cdot 4,66 \% + \frac{1792}{195} \cdot 3,73 \% = -5,419 \% \quad (\text{F.13})$$

$$c_{L5} = \frac{200}{39} \cdot 9,6 \% - \frac{152}{13} \cdot 6,94 \% + \frac{256}{39} \cdot 5,1 \% - \frac{200}{39} \cdot 6,31 \% + \frac{200}{39} \cdot 4,98 \% + \frac{256}{39} \cdot 4,66 \% - \frac{256}{39} \cdot 3,73 \% = 13,09 \% \quad (\text{F.14})$$

$$c_{L6} = -2 \cdot 6,94 \% + 10 \cdot 4,98 \% - 8 \cdot 4,66 \% = 11,94 \% \quad (\text{F.15})$$

$$c_{L7} = \frac{25}{39} \cdot 9,6 \% - \frac{181}{95} \cdot 6,94 \% + \frac{192}{65} \cdot 5,1 \% - \frac{25}{39} \cdot 6,31 \% - \frac{287}{39} \cdot 4,98 \% + \frac{1616}{195} \cdot 4,66 \% - \frac{192}{65} \cdot 3,73 \% = 7,682 \% \quad (\text{F.16})$$

À la seconde étape, les pertes du moteur au point de fonctionnement à 75 % de vitesse et à 80 % de couple sont calculées conformément à l'IEC 60034-2-3 conformément à la Formule (E.4), comme indiqué dans la Formule (F.17).

$$p_{L,M}(75,80) = -1,467 \% + 14,63 \% \cdot 0,75 - 14,92 \% \cdot 0,75^2 - 5,419 \% \cdot 0,75 \cdot 0,8^2 + 13,09 \% \cdot 0,75^2 \cdot 0,8^2 + 11,94 \% \cdot 0,8 + 7,682 \% \cdot 0,8^2 = 7,86 \% \quad (\text{F.17})$$

#### F.4 Détermination des pertes du PDS

Pour déterminer les pertes du PDS, les pertes absolues du CDM et du moteur sont calculées:

$$P_{L,CDM}(75 \%, 80 \%) = p_{L,CDM}(75;80) \cdot S_{r,equ} = 0,0437 \cdot 9,95 \text{ kVA} = 435 \text{ W} \quad (\text{F.18})$$

$$P_{L,Mot}(75 \%, 80 \%) = p_{L,M}(75;80) \cdot P_{r,M} = 0,0786 \cdot 7,5 \text{ kW} = 590 \text{ W} \quad (\text{F.19})$$

Le point de fonctionnement évalué n'est pas à la vitesse et au couple assignés du PDS. Le facteur  $k_{VD}$  ne s'applique donc pas. Pour déterminer les pertes du PDS, le calcul de ses pertes est effectué d'après la Formule (12):

$$P_{L,PDS}(75\%,80\%) = 435\text{ W} + 590\text{ W} = 1\,025\text{ W} \quad (\text{F.20})$$

$$P_{L,PDS}(75\%,80\%) = \frac{1\,025\text{ W}}{7\,500\text{ W}} = 13,67\% \quad (\text{F.21})$$

NOTE 1 Le courant assigné du moteur est égal au courant de sortie assigné du CDM.

NOTE 2 Les écarts du cosphi entre le moteur réel et la charge d'essai pour le CDM sont négligés.

## F.5 Détermination des facteurs de charge partielle pour les SDIM

Les facteurs de charge partielle  $P_{SDIM}/P_{CDMe,SDIM}$  sont définis dans le Tableau 4. Les paragraphes suivants fournissent des exemples de détermination de ces facteurs pour la plage de puissances de 1,29 kVA ... 7,94 kVA (0,75 kW ... 5,5 kW). À cet effet, les facteurs de charge d'essai indiqués dans le Tableau 1 et les facteurs de déphasage de charge d'essai correspondants donnés dans le Tableau 2 sont exigés.

En utilisant la Formule (10), les facteurs exacts de charge partielle pour les points de fonctionnement  $(f_{op}, i_{op})$  peuvent être calculés d'après:

$$\frac{P_{SDIM}(f_{op}, i_{op})}{P_{CDMe,SDIM}} = m(f_{op}) \frac{I_{out}(i_{op})}{I_{1,r,out}} \frac{\cos\Phi(f_{op}, i_{op})}{\cos\Phi(90,100)} \quad (\text{F.22})$$

Les résultats sont fournis dans le Tableau F.6 où, pour les points de fonctionnement à vitesse nulle, un indice de modulation  $m(f_{op}=0) = 0,1$  est utilisé. Cette méthode peut être répétée pour les plages de puissance restantes qui aboutissent finalement aux facteurs de charge partielle consolidés définis dans le Tableau F.6.

**Tableau F.6 – Facteurs de charge partielle calculés pour les points de fonctionnement à charge partielle du SDIM**

Point de fonctionnement du CDM ( $f_{op}; i_{op}$ )	$M(f_{op})$	$\frac{I_{out}(i_{op})}{I_{r,out}}$	$\cos\phi(f_{op}, i_{op})$	Puissance active du SDIM $\frac{P_{SDIM}}{P_{CDMe,SDIM}}$ %
(90; 100)	0,9	1	0,79	90 %
(50; 100)	0,5	1	0,79	50 %
(0; 100)	0,1	1	0,79	10 %
(90; 50)	0,9	0,71	0,6	48,5 %
(50; 50)	0,5	0,71	0,6	27 %
(0; 50)	0,1	0,71	0,6	5,4 %
(50; 25)	0,5	0,58	0,38	13,9 %
(0; 25)	0,1	0,58	0,38	2,8 %

## F.6 Exemples d'application des pertes de référence et des classes de rendement pour la fonctionnalité modifiée

### F.6.1 Généralités

Les exemples suivants portent sur l'application de facteurs de correction pour les CDM avec fonction modifiée.

### F.6.2 Exemple 1 – Classification IE d'un SDIM

Le calcul des pertes et la classification IE d'un SDIM ayant la caractéristique suivante sont indiqués:

- SDIM, récupération,  $I_{SDIM,out} = 70$  A,  $U_{nom} = 400$  V ( $U_{DC} = 540$  V);
- $THD_1 < 10$  %;
- filtre d'entrée inclus.

#### a) Choix du CDM de référence correct

À une première étape, il est nécessaire de déterminer le CDM de référence correct. À cet effet, la puissance apparente du SDIM est calculée:

$$S_{r,SDIM} = U_{DC} I_{SDIM,out} = 540 \text{ V } 70 \text{ A} = 37,8 \text{ kVA} \quad (\text{F.23})$$

où

$U_{DC}$  est la tension de la liaison à courant continu du SDIM;

$I_{SDIM,out}$  est le courant de sortie du SDIM.

Le CDM de référence est choisi d'après le Tableau 6 à 38,2 kVA.

## b) Choisir le facteur de correction

D'après le Tableau 8, le facteur de correction d'un SDIM à faible harmonique avec capacité de récupération est  $k_{cf} = 0,5$ .

En utilisant le Tableau 7, les pertes du CDM de référence au point de fonctionnement (90;100) peuvent être lues à  $p_{L,RCDM,(90;100)} = 4,87 \%$ .

En appliquant la Formule (15), les pertes de référence pour ce SDIM peuvent être calculées d'après:

$$p_{L,RSDIM(90\%;100\%)} = (k_{cf} + 1) \cdot p_{L,RCDM(90\%;100\%)} = (0,5 + 1) \cdot 4,87 \% = 7,31 \% \quad (\text{F.24})$$

## c) Déterminer la classe IE

La classe IE de ce SDIM peut être déterminée en comparant les pertes de ce SDIM avec les pertes de référence calculées  $p_{L,RSDIM(90;100)}$ .

**F.6.3 Exemple 2 – Classification IE d'un SDOM**

Cet exemple traite de la classification IE d'un SDOM ayant la caractéristique suivante:

- SDOM,  $I_{nom} = 45 \text{ A}$ ,  $U_{nom} = 400 \text{ V}$ ;
- aucun filtre de sortie.

## a) Choix du CDM de référence correct

À une première étape, il est nécessaire de déterminer le CDM de référence correct. À cet effet, la puissance apparente du SDOM est calculée:

$$S_{r,SDOM} = \sqrt{3} U_{r,out} I_{r,out} = \sqrt{3} 400 \text{ V } 45 \text{ A} = 31,2 \text{ kVA} \quad (\text{F.25})$$

Le CDM de référence est choisi d'après le Tableau 7 à 38,2 kVA.

## b) Choisir le facteur de correction

D'après le Tableau 8, le facteur de correction d'un étage onduleur sans filtre de sortie est  $k_{cf,I} = -0,25$ .

En utilisant le Tableau 7, les pertes relatives du CDM de référence au point de fonctionnement (90;100) peuvent être lues à  $p_{L,RCDM,(90;100)} = 4,87 \%$ .

En appliquant la Formule (15), les pertes de référence pour le SDOM peuvent être calculées d'après:

$$p_{L,RSDOM(90\%;100\%)} = (k_{cf} + 1) \cdot p_{L,RCDM(90\%;100\%)} = (-0,25 + 1) \cdot 4,87 \% = 3,65 \% \quad (\text{F.26})$$

## c) Déterminer la classe IE

La classe IE du SDOM peut être déterminée en comparant les pertes du SDOM avec les pertes de référence calculées  $p_{L,RSDOM(90;100)}$ .

#### F.6.4 Exemple 3 – Classification IE d'un CDM avec capacité de récupération et filtre de sortie sinusoïdal

Dans cet exemple, la classification IE d'un CDM avec capacité de récupération et filtre de sortie sinusoïdal est indiquée:

- CDM,  $I_{\text{nom}} = 55 \text{ A}$ ,  $U_{\text{nom}} = 400 \text{ V}$ ;
- capacité de récupération ( $THD_1 > 10 \%$ );
- filtre de sortie sinusoïdal.

##### a) Choix du CDM de référence correct

À une première étape, il est nécessaire de déterminer le CDM de référence correct. À cet effet, la puissance apparente du CDM est calculée:

$$S_{r,\text{CDM}} = \sqrt{3} U_{r,\text{out}} I_{r,\text{out}} = \sqrt{3} 400 \text{ V } 55 \text{ A} = 38,1 \text{ kVA} \quad (\text{F.27})$$

Le CDM de référence est choisi d'après le Tableau 7 à 38,2 kVA.

##### b) Choisir le facteur de correction

Conformément au Tableau 8, le facteur de correction pour la capacité de récupération avec un  $THD_1 > 10 \%$  est  $k_{\text{cf1}} = 0,4$  et le facteur de correction pour un filtre de sortie sinusoïdal est  $k_{\text{cf2}} = 0,8$ .

En utilisant le Tableau 7, les pertes du CDM de référence au point de fonctionnement (90;100) peuvent être lues à  $p_{L,\text{RCDM},(90;100)} = 4,87 \%$ .

En appliquant la Formule (15), les pertes de référence pour le SDOM peuvent être calculées d'après:

$$\begin{aligned} p_{L,\text{RCDM},m(90\%;100\%)} &= (k_{\text{cf1}} + k_{\text{cf2}} + 1) \cdot p_{L,\text{RCDM}(90\%;100\%)} \\ &= (0,4 + 0,8 + 1) \cdot 4,87 \% = 10,71 \% \end{aligned} \quad (\text{F.28})$$

##### c) Déterminer la classe IE

La classe IE du CDM peut être déterminée en comparant les pertes du CDM avec les pertes de référence modifiées  $p_{L,\text{RCDM},m(90;100)}$ .

## Annexe G (informative)

### Incertitude de la méthode de détermination des pertes

#### G.1 Généralités

L'incertitude de la méthode de détermination des pertes peut être spécifiée avec des pertes de puissance de tolérance aux pannes  $\Delta P_L$ . L'objectif est de désigner la perte de puissance sous la forme  $P_L = P_{L,determined} + \Delta P_L$ . Pour calculer l'incertitude, il est obligatoire de connaître toutes les tolérances de la méthode de détermination utilisée. Les tolérances peuvent être spécifiées sous forme de pourcentage par rapport à la valeur mesurée ou absolue. Pendant le calcul de pertes, plusieurs facteurs influent sur le résultat. Il est donc nécessaire de tenir compte de la propagation des erreurs.

#### G.2 Calcul de l'incertitude sur les erreurs aléatoires

Pour le calcul de l'incertitude avec une hypothèse d'erreur aléatoire, l'écart-type est exigé. Dans le cas présent, la fonction  $y$  représente la perte de puissance du CDM ou du PDS et la fonction  $y$  dépend des facteurs  $x_i$ . Pour l'écart-type  $s_y$  avec des erreurs aléatoires et des facteurs  $x_i$  indépendants avec des écarts-types  $s_i$ , il en résulte:

$$s_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\delta y}{\delta x_i} s_i \right)^2} \quad (\text{G.1})$$

Dans le cas présent, la survenue d'écarts positifs et négatifs est envisagée. Ainsi, pour l'écart-type relatif, il en résulte:

$$\Delta p_L = \frac{\Delta R_L}{R_L} = \frac{s_y}{y} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\delta y}{\delta x_i} s_i \right)^2}}{y} \quad (\text{G.2})$$

#### G.3 Comparaison des incertitudes pour différentes méthodes de détermination des pertes

Dans le cas de pertes réduites, l'incertitude de la méthode de détermination des pertes d'entrée-sortie augmente car un faible nombre (de pertes) est calculé par soustraction de deux nombres bien plus importants (puissance d'entrée et de sortie). Dans ce cas, le matériel de mesure est à choisir avec le plus grand soin.

Pour des pertes relatives par exemple inférieures à 3 %, les calculs peuvent présenter une exactitude identique ou meilleure que celle des mesurages à l'entrée-sortie.

Les mesurages calorimétriques offrent une grande exactitude, même avec des pertes réduites. Toutefois, l'effort nécessaire pour cette méthode de détermination des pertes est maximal.

## Annexe H (informative)

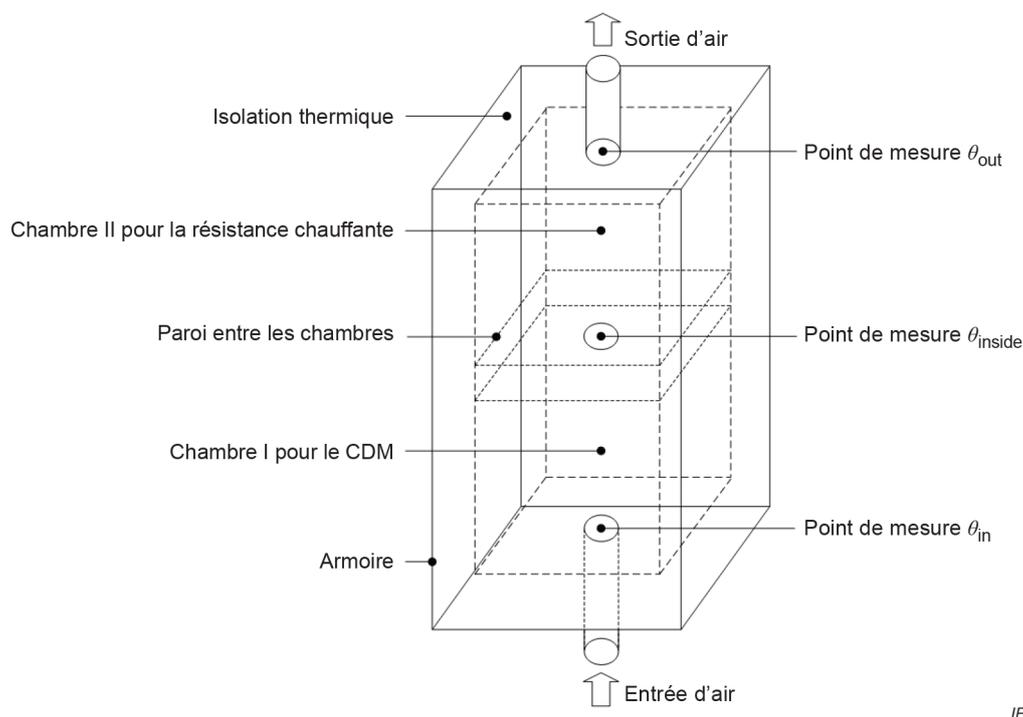
### Mesurage calorimétrique pour les pertes du CDM

#### H.1 Généralités

La méthode de détermination calorimétrique des pertes de puissance repose sur le mesurage calorimétrique des pertes de puissance dissipée. Les mesurages doivent être effectués en équilibre thermique et le composant à mesurer doit être isolé thermiquement pour s'assurer que les pertes de puissance dissipées sont conduites par le milieu de refroidissement (air ou eau). Dans les Articles H.2 à H.4, trois différents types de méthodes sont décrits.

#### H.2 Calorimètre à deux chambres utilisant l'air comme milieu de refroidissement

Dans la première méthode, le mesurage des pertes peut être effectué par une procédure de mesure à une seule étape. La Figure H.1 donne une vue d'ensemble de l'installation d'essai calorimétrique. Cette installation comprend une armoire thermiquement isolée à deux chambres, la première chambre étant destinée au CDM à mesurer et la seconde à la résistance chauffante. Cette méthode exige que le CDM à mesurer et la résistance chauffante pour l'étalonnage se trouvent dans le même flux d'air, et la résistance à l'écoulement doit être équivalente dans toutes les sections de l'essai. Dans ces conditions, les conditions physiques sont équivalentes puisque les mesurages sont simultanés.



IEC

**Figure H.1 – Installation de mesure calorimétrique en une étape pour le mesurage comparatif des pertes (CDM et résistance chauffante chargés simultanément)**

La dissipation de puissance peut être déterminée à partir de la température à l'entrée et à la sortie du milieu de refroidissement à mesurer, et entre le CDM et la résistance chauffante pour l'étalonnage de sa perte de puissance absorbante. La dissipation de puissance du CDM mesuré peut être déterminée en mesurant trois températures et la puissance de la résistance chauffante. La résistance chauffante est alimentée par une source de puissance avec des mesurages de puissance. Tous les mesurages doivent être réalisés après avoir obtenu l'équilibre thermique.

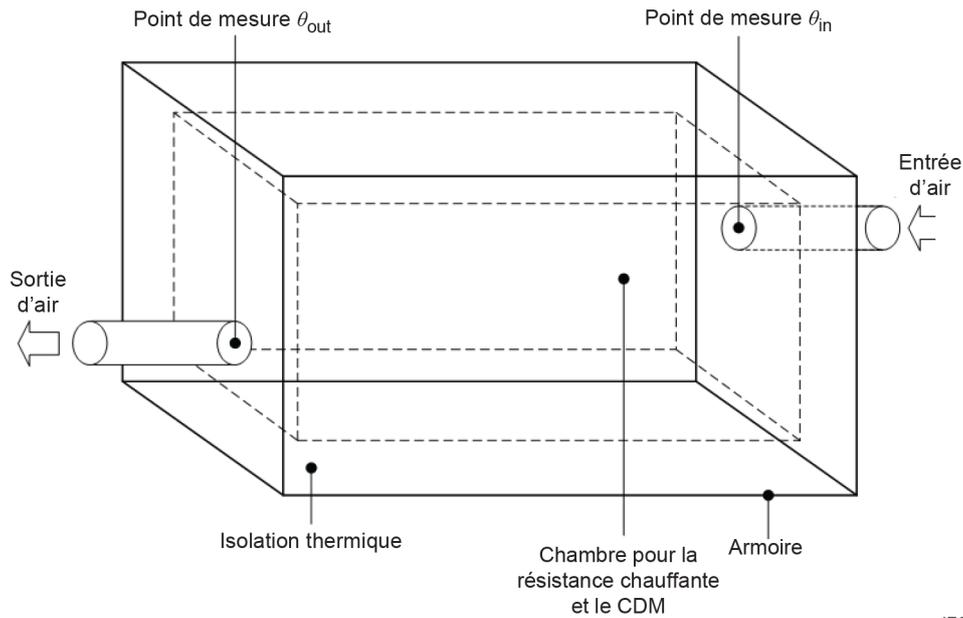
$$R_{L,CDM,determined} = R_{L,resistor} \frac{\theta_{inside} - \theta_{in}}{\theta_{out} - \theta_{inside}} \quad (H.1)$$

Des différences dans la vitesse, la pression et la température de l'air, ainsi que la température ambiante peuvent avoir des conséquences sur l'exactitude des résultats. Il est évident que la tension du réseau n'est pas constante pendant les mesurages. Les pertes du CDM présentent donc certaines variations. Ce phénomène constitue l'une des sources d'erreur de cette méthode, de même que pour d'autres mesurages où le système est alimenté par le réseau non commandé.

### H.3 Calorimètre à une chambre utilisant l'air comme milieu de refroidissement

La Figure H.2 décrit une autre installation de mesure calorimétrique qui comporte une armoire isolée thermiquement à une seule chambre. Le CDM à mesurer et la résistance chauffante pour l'étalonnage se trouvent tous deux dans la même chambre. Le CDM et la résistance sont dans le même flux d'air. Dans l'installation en deux étapes, le CDM à mesurer est chargé à la première étape, et la vitesse d'écoulement de l'air et les températures sont enregistrées à l'équilibre thermique. À la seconde étape, la vitesse d'écoulement de l'air enregistrée est appliquée et la résistance chauffante est chargée, de sorte que le même équilibre thermique qu'à la première étape peut être obtenu. La dissipation de puissance du CDM peut être déterminée à partir de la puissance mesurée de la résistance chauffante. La formule des pertes de puissance (H.1) part de l'hypothèse que la vitesse d'écoulement de l'air et les températures à l'entrée et à la sortie sont exactement identiques aux deux étapes de mesure.

$$R_{L,CDM,determined} = R_{L,resistor} \quad (H.2)$$



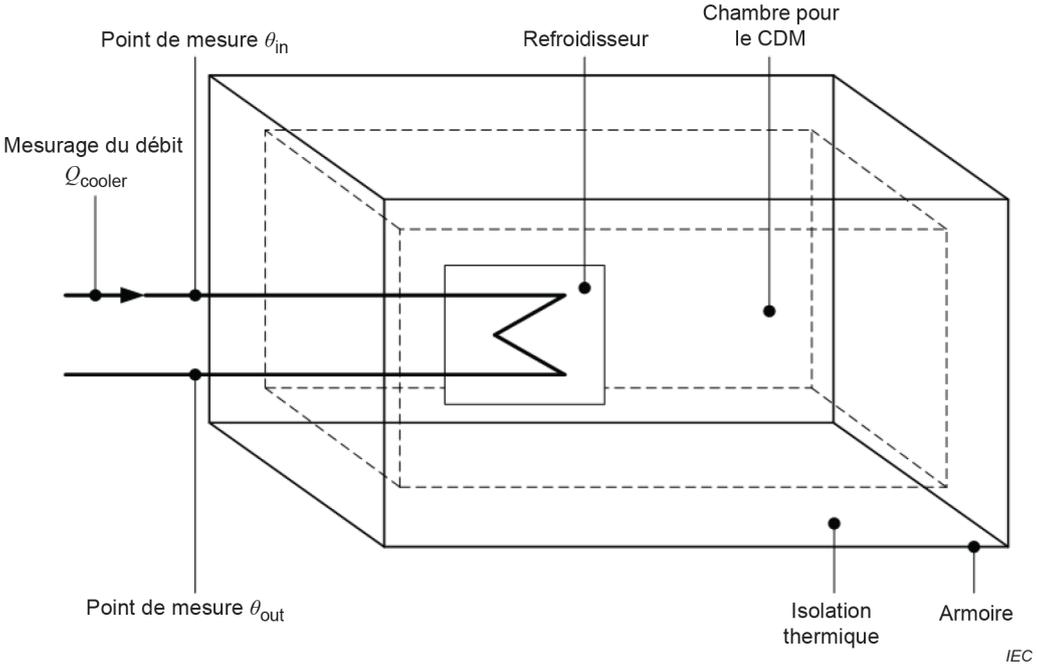
**Figure H.2 – Installation de mesure calorimétrique en deux étapes pour le mesurage comparatif des pertes (CDM et résistance chauffante non chargés simultanément)**

Des différences dans la vitesse, la pression et la température de l'air, ainsi que la température ambiante peuvent avoir des conséquences sur l'exactitude des résultats. Il est évident que la tension du réseau n'est pas constante pendant les mesurages. Les pertes du CDM présentent donc certaines variations. Ce phénomène constitue l'une des sources d'erreur de cette méthode, de même que pour d'autres mesurages où le système est alimenté par le réseau non commandé.

#### H.4 Calorimètre utilisant un liquide comme milieu de refroidissement

La Figure H.3 décrit une installation de mesure calorimétrique avec du liquide comme milieu de refroidissement. Cette installation comporte une armoire isolée thermiquement à une seule chambre. La chambre contient un refroidisseur utilisé pour transférer la puissance thermique produite par le CDM. Pour le mesurage, le CDM à mesurer est chargé et le débit volumique du liquide et les températures sont enregistrés à l'équilibre thermique. La dissipation de puissance du CDM peut être déterminée d'après la Formule (H.3):

$$P_{L,CDM,determined} = Q_{cooler} \cdot \rho_{liquid} \cdot c_{liquid} \cdot (\theta_{out} - \theta_{in}) \quad (H.3)$$



**Figure H.3 – Installation de mesure calorimétrique refroidie par liquide pour le mesurage des pertes du CDM**

## **Annexe I** (informative)

### **Calcul des pertes du PDS au-delà de la vitesse et du couple assignés**

#### **I.1 Généralités**

Un moteur peut fonctionner au-dessus de la vitesse et/ou du couple assignés. Cela soulève la question de savoir s'il est possible de calculer les pertes du PDS à ces points de fonctionnement à partir des données relatives aux pertes du CDM et du moteur aux points de fonctionnement, conformément à la Figure 5 et à la Figure 6.

#### **I.2 Points de fonctionnement au-dessus du couple assigné**

Les points de fonctionnement situés au-dessus du couple assigné du CDM ou du PDS exigent un courant de moteur supérieur à sa valeur assignée. Par conséquent, un fonctionnement du PDS et du CDM à ces points de fonctionnement ne sera possible que sur une courte durée. Pour les pertes globales, cette courte période aura un impact mineur.

Les applications asservies comportent des sections à cycle de service fixe avec une petite fraction de temps en condition de surcharge, suivie d'une grande fraction de temps à couple réduit. Cependant, les applications asservies ne relèvent pas du domaine d'application du présent document car elles constituent une application spéciale et leur consommation d'énergie nécessite d'être calculée d'une manière différente, par exemple en tenant compte de l'inertie de la machine en charge.

Les mesurages des pertes en conditions de surcharge sont très critiques car ils peuvent détruire l'équipement en essai (EUT). Ils ne peuvent être réalisés que sur une courte durée. Cependant, la détermination des pertes calorimétriques n'est pas possible lorsque l'EUT fonctionne pendant une courte durée. Même les mesurages directs exigent une certaine durée de mesure (jusqu'à 1 min selon l'IEC 60034-2-3). Par conséquent, le mesurage d'un seul ou de plusieurs points de surcharge peut être impossible sans dépasser les limites thermiques du PDS. Des calculs peuvent être effectués, mais leur valeur est limitée si aucune validation par un mesurage n'est possible. De plus, les effets physiques tels que l'augmentation de la température des semiconducteurs et des éléments en cuivre accroissent l'incertitude de calcul.

En résumé, la détermination des pertes pour les valeurs de couple supérieures au couple assigné n'est pas recommandée.

#### **I.3 Points de fonctionnement au-dessus de la vitesse assignée**

##### **I.3.1 Généralités**

L'Annexe E décrit trois types de connexion de moteur avec deux plages de fonctionnement pour chaque type de connexion de moteur. Tant que la plage de fonctionnement est comprise dans la plage a de l'Annexe E (flux constant), les pertes du CDM peuvent être calculées conformément à l'Article F.2. La fréquence assignée du stator du moteur est la fréquence maximale dans la plage a. Les pertes du PDS peuvent être calculées conformément à l'Article F.4.

Pour la plage b de l'Annexe E (plage de fonctionnement en régime défluxé), ce qui suit s'applique.

### I.3.2 Dépendance des pertes du moteur aux performances du CDM

Dans la plage de fonctionnement en régime défluxé, le CDM fournit au moteur une tension fondamentale qui est aussi élevée que possible. Des algorithmes très élaborés sont mis en œuvre dans le logiciel de commande du CDM pour augmenter la tension de sortie fondamentale, même de quelques volts. Toute réduction de la tension de sortie fondamentale nécessite d'être compensée par une augmentation du courant du moteur, ce qui entraîne des pertes de moteur nettement plus élevées. De plus, le contenu harmonique du courant du moteur dépend des algorithmes de commande du CDM au point de fonctionnement de la tension de sortie maximale.

La grandeur de la tension de sortie fondamentale du CDM dépend non seulement des algorithmes de commande de la partie onduleur du moteur du CDM, mais aussi de la grandeur de la tension de la liaison à courant continu. La grandeur de la tension de la liaison à courant continu est une caractéristique du redresseur de ligne du CDM, qui peut faire partie d'une même unité qui comprend également l'onduleur du moteur, mais le redresseur de ligne et l'onduleur du moteur peuvent également être mis en œuvre sous forme d'unités séparées.

### I.3.3 Dépendance du CDM aux performances du moteur

Aux points de fonctionnement situés dans la plage de fonctionnement en régime défluxé, la grandeur de courant exigée par un moteur dépend fortement de sa conception. Dans cette plage de fonctionnement, il n'est généralement pas possible de définir un moteur d'essai comme pour la plage de vitesses de base du paragraphe 5.1. La différence de courant attendue entre différents moteurs augmente avec la vitesse et peut dépasser les cibles d'exactitude pour la détermination des pertes.

### I.3.4 Calcul des pertes du PDS dans la plage de fonctionnement en régime défluxé jusqu'à 200 % de la vitesse assignée

Pour une plage de vitesses limitée jusqu'à 200 % de la valeur assignée, les effets décrits au paragraphe I.3.2 sont suffisamment faibles pour être négligés. Dans ce cas, les pertes du moteur peuvent être calculées selon la plage b de l'Annexe E pour la plage b.

Dans la plage de fonctionnement en régime défluxé, les pertes du CDM ne dépendent pas de la vitesse du moteur car la tension de sortie du CDM est à sa tension maximale et l'angle de phase de sortie entre la tension de sortie fondamentale du CDM et le courant est constant dans une première approximation. La seule variable est le courant de sortie du CDM  $I_{\text{out}}(n_{\text{op}}, T_{\text{op}})$ , qui peut être calculé d'après les Formules (E.6) et (E.7) en fonction du type de la connexion du moteur. Les pertes du CDM sont identiques aux pertes à 90 % de la fréquence de sortie assignée et à ce courant de sortie du CDM.

Ceci permet de calculer les pertes du PDS  $p_{L,\text{PDS}}(n_{\text{op}}, T_{\text{op}})$  dans la plage de fonctionnement en régime défluxé jusqu'à 200 % de la vitesse assignée au point de fonctionnement  $(n_{\text{op}}, T_{\text{op}})$  en utilisant les étapes suivantes.

- a) Calculer le courant relatif produisant le couple  $i_{\text{op}}$  au point de fonctionnement couple/vitesse  $(n_{\text{op}}, T_{\text{op}})$ :

$$i_{\text{op}} = \frac{I_{\text{out}}(n_{\text{op}}, T_{\text{op}})}{I_{r,M}} \quad (I.1)$$

- b) Déterminer les pertes du CDM conformément à l'Article F.2 à 90 % de la fréquence du stator du moteur et au courant de sortie du CDM conformément à l'étape 1) donnée dans la Formule (I.1) en utilisant la Formule (I.2):

$$P_{L,CDM}(n_{op}, T_{op}) = P_{L,CDM(90,i_{op})} \cdot S_{r,CDM} \quad (I.2)$$

- c) Calculer les pertes du moteur  $P_{L,M}(n_{op}, T_{op})$  au point de fonctionnement  $(n_{op}, T_{op})$  conformément à l'Annexe E.
- d) Calculer les pertes relatives du PDS  $p_{L,PDS}(n_{op}, T_{op})$  en utilisant la Formule (I.3).

$$p_{L,PDS}(n_{op}, T_{op}) = \frac{P_{L,CDM}(n_{op}, i_{op}) + k_{VD} \cdot P_{L,M}(n_{op}, T_{op})}{P_{r,M}} \quad (I.3)$$

## Annexe J (informative)

### Explication des facteurs de correction pour les pertes de référence du Tableau 8

#### J.1 Généralités

L'Annexe J a pour objet d'expliquer la façon dont les facteurs de correction du Tableau 8 ont été obtenus d'un point de vue spécifique au produit.

De plus, elle indique également le raisonnement sous-jacent à l'attribution de tels facteurs de correction à certaines topologies, en dehors de leurs spécificités aux produits, en fonction de leur impact sur le rendement global du système.

L'Annexe J n'a aucun impact sur l'évaluation des produits. Si certaines fonctions sont réalisées d'une autre manière, les facteurs de correction du Tableau 8 restent inchangés.

#### J.2 CDM

##### J.2.1 CDM sans capacité de récupération

###### J.2.1.1 CDM avec $THD_1 > 60 \%$

Le CDM de référence en 6.2 et à l'Annexe C est basé sur un étage d'entrée avec redresseur à diodes et bobine d'arrêt de ligne qui réduit le  $THD_1$  à  $< 60 \%$  (voir Figure 11). Si aucune bobine d'arrêt de ligne n'est utilisée, le  $THD_1$  est  $> 60 \%$ , mais les pertes du CDM sont moins élevées. Dans l'exemple de CDM du Tableau F.3, les pertes de la bobine d'arrêt d'entrée représentent environ 10 % des pertes totales du CDM,

ce qui conduit à un facteur de correction de  $-0,1$  pour les pertes de référence.

Ce CDM de référence est principalement utilisé dans les applications de machines, où la conformité globale aux normes harmoniques pertinentes est traitée avec une solution centrale pour l'ensemble de la machine. Ainsi, une connexion directe au réseau public ne serait pas autorisée et ces normes n'imposent normalement pas de pertes supplémentaires en amont de la machine. Les facteurs de correction représentent la correction technique justifiée.

###### J.2.1.2 CDM avec $10 \% < THD_1 \leq 60 \%$

Il s'agit du CDM de référence en 6.2 et à l'Annexe C. Par conséquent, il n'y a pas de correction des pertes de référence et le facteur de correction est 0.

###### J.2.1.3 CDM avec $THD_1 \leq 10 \%$

Pour atteindre cette faible valeur de  $THD_1$ , un étage d'entrée actif (voir Figure B.5) et/ou un filtre antiharmonique d'entrée passif de grande taille (voir Figure B.3) est nécessaire. Les pertes de l'étage d'entrée actif sans récupération sont évaluées comme suit.

- Les pertes des semiconducteurs sont similaires aux pertes du convertisseur de sortie du CDM, qui représentent environ 50 % des pertes du CDM (voir Tableau F.3).
- Les pertes du filtre de ligne pour l'étage d'entrée actif génèrent environ 30 % des pertes du RCDM, car ce filtre a besoin d'au moins une bobine d'arrêt comparable à la bobine d'arrêt de ligne du RCDM (10 % des pertes du RCDM conformément au Tableau F.3) et engendre également 20 % de pertes supplémentaires dues au courant du filtre capacitif.

En résumé, ceci entraîne environ 80 % de pertes supplémentaires et un facteur de correction de 0,8.

Le facteur de correction tient également compte du fait que les CDM présentant des performances améliorées des harmoniques ont probablement des pertes individuelles plus élevées que celles du CDM de référence, comme indiqué ci-dessus, afin d'obtenir de meilleures performances des harmoniques. L'amélioration des performances des harmoniques réduit les pertes dans l'ensemble du système, en réduisant les pertes dans les transformateurs, les générateurs, les moteurs directement connectés et les câbles connectés au même système.

Par souci d'applicabilité de l'IEC 61800-9-2, aucune différenciation n'a été faite pour différents niveaux de  $THD_1$  inférieurs à 10 %. Cependant, il convient de mentionner qu'un CDM fonctionnant de 3 % à 5 %  $THD_1$  engendrera des pertes de système plus faibles que celles d'un CDM fonctionnant avec 6 % à 10 %  $THD_1$ .

## **J.2.2 CDM avec capacité de récupération**

### **J.2.2.1 CDM avec capacité de récupération et $THD_1 > 10 \%$**

En mode de récupération, l'étage d'entrée utilise des transistors de puissance à la place de diodes, ce qui ajoute des pertes à l'état passant et une faible quantité de pertes de commutation dues à une fréquence de commutation proche de la fréquence fondamentale. Ces pertes de semiconducteurs représentent environ 30 % des pertes du RCDM au lieu des 10 % de pertes des redresseurs (voir Tableau F.3) pour le RCDM.

En outre, une bobine d'arrêt de filtre plus grande que pour le RCDM est exigée, ce qui entraîne des pertes d'environ 20 % plus élevées que les pertes supplémentaires de la bobine d'arrêt du RCDM.

et conduit à un facteur de correction global de 0,4.

Le facteur de correction reconnaît également qu'étant donné la capacité de récupération, le bilan énergétique total des applications levage ou enrouleur/dérouleur, par exemple, sera sensiblement réduit.

### **J.2.2.2 CDM avec capacité de récupération et $THD_1 \leq 10 \%$**

Cette topologie est très proche de la topologie décrite au paragraphe J.2.1.3. Par rapport à cette topologie, les pertes sont légèrement supérieures car tous les semiconducteurs doivent être assignés pour le courant assigné dans le sens de la récupération. Il est également nécessaire que le filtre d'entrée soit plus grand car dans le sens de la récupération, le filtre d'entrée exige des éléments d'amortissement supplémentaires pour éviter les oscillations avec le réseau,

ce qui conduit à un facteur de correction global d'environ 1,0.

Le facteur de correction tient compte de deux faits.

Tout d'abord, comme indiqué ci-dessus, les CDM présentant des performances améliorées des harmoniques ont probablement des pertes individuelles plus élevées que celles décrites ci-dessus pour le RCDM, afin d'obtenir de meilleures performances des harmoniques. Cependant, l'amélioration des performances des harmoniques réduit les pertes dans l'ensemble du système, en réduisant les pertes dans les transformateurs, les générateurs et les moteurs directement connectés et les câbles connectés au même système.

Par souci d'applicabilité du présent document, aucune différenciation n'a été faite pour différents niveaux de THD inférieurs à 10 %. Cependant, il convient de mentionner qu'un CDM fonctionnant de 3 % à 5 %  $THD_1$  fonctionnera avec des pertes de système plus faibles que celles d'un CDM fonctionnant avec 6 % à 10 %  $THD_1$ .

Le facteur de correction reconnaît également qu'étant donné la capacité de récupération, le bilan énergétique total des applications levage ou enrouleur/dérouleur, par exemple, sera sensiblement réduit.

### **J.2.3 CDM avec $DF_U \leq 10$ %**

Cette fonctionnalité exige une topologie avec un filtre sinusoïdal à la sortie du CDM (voir Figure B.11). Pour obtenir une taille de filtre acceptable, ces CDM fonctionnent à une fréquence de commutation nettement plus élevée, ce qui augmente les pertes de l'onduleur de sortie de 50 % dans le Tableau F.3.

De plus, comme décrit au paragraphe J.2.1.3, le filtre lui-même engendre des pertes et des courants de filtre supplémentaires, ce qui entraîne 30 % de pertes supplémentaires.

Par conséquent, un CDM avec une tension de sortie sinusoïdale exige un facteur de correction de 0,8.

Le facteur de correction tient compte du fait que cette topologie réduit les pertes du câble de sortie et du moteur de manière significative. Il permet également l'utilisation de câbles non blindés et réduit le courant de fuite dans les câbles de moteur.

### **J.2.4 CDM avec une tension d'entrée assignée $\leq 250$ V (triphasée)**

Les CDM ayant une tension d'entrée assignée inférieure exigent un courant plus élevé pour obtenir la même puissance de sortie apparente. Un courant plus élevé augmente les pertes à l'état passant de tous les semiconducteurs, les pertes dans les rails d'alimentation en courant et les pertes des composants passifs, en particulier dans les bobines d'arrêt.

Pour supporter ces pertes plus élevées, un facteur de correction de 0,5 est introduit.

Ce facteur de correction tient compte du fait que le CDM est installé dans des réseaux existants avec leur tension de réseau définie type, ce qui entraînera une augmentation des pertes dues à l'augmentation des courants.

### **J.2.5 CDM avec entrée monophasée**

#### **J.2.5.1 Tension d'entrée assignée $> 250$ V**

Pour les CDM monophasés, les courants d'entrée par phase sont plus élevés qu'en triphasé. Par conséquent, les courants des semiconducteurs de puissance au niveau de la section redresseur sont plus élevés et les pertes par conduction sont donc plus élevées. De plus, le courant d'ondulation dans le condensateur de liaison à courant continu est plus élevé, ce qui entraîne également des pertes plus élevées.

Ceci conduit à un facteur de correction de 0,2.

Ce facteur de correction tient compte du fait que les CDM sont installés dans des réseaux existants avec leurs topologies et tension de réseau définies types, ce qui entraînera une augmentation des pertes dues à l'augmentation des courants.

### J.2.5.2 Tension d'entrée assignée $\leq 250$ V

Il s'agit d'une situation similaire à celle d'un CDM triphasé avec une tension d'entrée  $\leq 250$  V. La combinaison d'une seule phase et d'une tension inférieure à 250 V entraîne des pertes légèrement supérieures à celles de trois phases et d'une tension inférieure à 250 V.

Ceci conduit à un facteur de correction de 0,6.

Ce facteur de correction tient compte du fait que les CDM sont installés dans des réseaux existants avec leurs topologies et tension de réseau définies types, ce qui entraînera une augmentation des pertes dues à l'augmentation des courants.

## J.3 SDIM et SDOM

### J.3.1 Généralités

Si la fonction d'un CDM est composée de deux composants séparés - un SDIM et un SDOM - alors la somme des pertes du SDIM et du SDOM est plus élevée que les pertes du seul composant CDM. Il existe un référentiel des pertes par composant (pertes de commande et pertes de refroidissement, par exemple), qui apparaissent deux fois en cas de combinaison de deux composants. De plus, la liaison à courant continu est disponible dans les deux sous-modules et entraîne donc des pertes plus élevées par rapport à un CDM.

Par conséquent, l'addition de facteurs de correction d'un SDIM à fonctionnalité spéciale et d'un SDOM est toujours légèrement supérieure aux facteurs de correction d'un CDM doté d'une fonctionnalité similaire.

### J.3.2 SDIM sans capacité de récupération

#### J.3.2.1 $10 \% < THD_1 \leq 60 \%$

Cette topologie repose sur un redresseur à diodes avec bobine d'arrêt de ligne, tel qu'il est inclus dans le CDM de référence de 6.2 et Annexe C (voir Figure B.4). Pour un CDM, les pertes de l'étage d'entrée sont considérées environ égales à un tiers des pertes totales du CDM (voir Tableau F.3). Cependant, si un CDM est formé par combinaison d'un SDIM et d'un SDOM, les pertes sont légèrement supérieures en raison des pertes de référence décrites ci-dessus.

Ceci conduit à un facteur de correction de  $-0,55$ .

#### J.3.2.2 $THD_1 > 60 \%$ (harmonique élevée)

Comparé à la topologie du SDIM avec  $10 \% < THD_1 > 60 \%$  du paragraphe J.3.2.1, aucune bobine d'arrêt de ligne n'est prise en compte pour un SDIM à harmonique élevé. Ce cas est similaire à celui du CDM à harmonique élevé par rapport au CDM de référence.

Ceci conduit à un facteur de correction de  $-0,65$ .

#### J.3.2.3 $THD_1 \leq 10 \%$ (harmonique faible)

Pour atteindre cette faible valeur de  $THD_1$ , une fonction d'entrée supplémentaire et un filtrage sont nécessaires. Cette topologie est comparable au paragraphe J.2.1.3, l'onduleur de sortie étant absent.

Ceci conduit à un facteur de correction de 0,35.

### **J.3.3 SDIM avec capacité de récupération**

#### **J.3.3.1 $THD_1 > 10 \%$**

Cette topologie est similaire à la topologie décrite au paragraphe J.2.2.1, l'onduleur de sortie étant absent. Le schéma de cette topologie est représenté à la Figure B.5, les transistors commutant à une basse fréquence proche de la fréquence fondamentale.

Ceci conduit à un facteur de correction de  $-0,1$ .

#### **J.3.3.2 $THD_1 \leq 10 \%$**

Cette topologie est similaire à la topologie décrite au paragraphe J.2.2.2, l'onduleur de sortie étant absent. Sa structure de base est représentée à la Figure B.5, les transistors commutant à une fréquence élevée de plusieurs kHz.

Ceci conduit à un facteur de correction de  $0,5$ .

### **J.3.4 SDOM**

#### **J.3.4.1 $DF_U > 10 \%$**

Un SDOM à usage général sans fonctionnalité spéciale présente la topologie du RCDM de 6.2 et Annexe C (voir Figure 11), la bobine d'arrêt d'entrée et le redresseur d'entrée étant absents. La topologie de base est représentée à la Figure B.10. D'après le Tableau F.3, ces parties du CDM engendrent  $20 \%$  des pertes du RCDM.

Par conséquent, le facteur de correction pour un SDOM à usage général est fixé à  $-0,2$ .

#### **J.3.4.2 $DF_U \leq 10 \%$**

La topologie de base de ce SDOM est représentée à la Figure B.11. Elle est similaire à la topologie décrite au paragraphe J.2.3, la bobine d'arrêt d'entrée et le redresseur d'entrée étant absents.

Le facteur de correction de ce SDOM est fixé à  $0,35$ .

## **J.4 CDM, SDIM et SDOM avec refroidissement externe**

Dans le RCDM du paragraphe 6.2 et de l'Annexe C, les pertes de refroidissement sont fixées à  $20 \%$ . Ainsi, si un CDM n'est pas refroidi, les pertes de refroidissement ne sont pas incluses,

ce qui conduit à un facteur de correction de  $-0,2$  pour le CDM.

Pour le SDIM et le SDOM, le facteur de correction est fixé à  $-0,1$ .

## **J.5 CDM et SDOM avec plusieurs sorties à courant alternatif**

Dans un CDM ou un SDOM avec plusieurs sorties comme décrit en 6.3.3, le système de refroidissement ou l'électronique de commande sont conçus pour gérer l'ensemble du système. Il est peu probable que toutes ces fonctions soient actives si seules quelques sorties sont utilisées. Par conséquent, certaines pertes supplémentaires doivent être incluses,

ce qui conduit à un facteur de correction de  $0,1$  pour le CDM et de  $0,05$  pour le SDOM.

## Bibliographie

IEC 60034 (toutes les parties), *Machines électriques tournantes*

IEC TS 60034-25, *Rotating electrical machines – Part 25: AC electrical machines used in power drive systems – Application guide* (disponible en anglais seulement)

IEC 60034-30, *Machines électriques tournantes – Classes de rendement*

IEC 60146-1-1, *Convertisseurs à semiconducteurs – Exigences générales et convertisseurs commutés par le réseau – Partie 1-1: Spécification des exigences de base*

IEC 60947-4-2, *Appareillage à basse tension – Partie 4-2: Contacteurs et démarreurs de moteurs – Gradateurs, démarreurs et démarreurs progressifs à semiconducteurs de moteurs*

IEC 61800-1, *Entraînements électriques de puissance à vitesse variable – Partie 1: Exigences générales – Spécifications de dimensionnement pour systèmes d'entraînement de puissance à vitesse variable en courant continu et basse tension*

IEC 61800-2, *Entraînements électriques de puissance à vitesse variable – Partie 2: Exigences générales – Spécifications de dimensionnement pour entraînements électriques de puissance à vitesse variable en courant alternatif*

IEC 61800-3, *Entraînements électriques de puissance à vitesse variable – Partie 3: Exigences de CEM et méthodes d'essai spécifiques pour les PDS et machines-outils*

IEC 61800-5-1, *Entraînements électriques de puissance à vitesse variable – Partie 5-1: Exigences de sécurité – Électrique, thermique et énergétique*

IEC TS 61800-8:2010, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 8: Specification of voltage on the power interface* (disponible en anglais seulement)

IEC 61800-9-1, *Entraînements électriques de puissance à vitesse variable – Partie 9-1: Écoconception des entraînements électriques de puissance, des démarreurs de moteurs, de l'électronique de puissance et de leurs applications entraînées – Exigences générales pour définir les normes d'efficacité énergétique d'un équipement entraîné via l'approche produit étendu (EPA) et le modèle semi-analytique (SAM)*

IEC TS 62578:2015, *Systèmes et équipements électroniques de puissance – Conditions de fonctionnement et caractéristiques des convertisseurs à alimentation active (AIC), y compris les recommandations de conception pour leurs valeurs d'émission inférieures à 150 kHz*

IEEE 112, *Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*

CSA 838-13, *Energy efficiency test methods for three-phase variable frequency drive systems*



INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

3, rue de Varembé  
PO Box 131  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)