

# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE



**Voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) power transmission – Electrical testing**

**Valves à convertisseur de source de tension (VSC) pour le transport d'énergie en courant continu à haute tension (CCHT) – Essais électriques**



**THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED**  
**Copyright © 2024 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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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, graphical symbols and the glossary. 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 22 500 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 25 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, symboles graphiques et le glossaire. 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 22 500 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 25 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE



**Voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) power transmission – Electrical testing**

**Valves à convertisseur de source de tension (VSC) pour le transport d'énergie en courant continu à haute tension (CCHT) – Essais électriques**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

ICS 29.200, 29.240.99

ISBN 978-2-8322-8514-5

**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.....	5
1 Scope.....	7
2 Normative references .....	7
3 Terms and definitions .....	7
3.1 Insulation coordination terms .....	8
3.2 Power semiconductor terms .....	8
3.3 Operating states of converter.....	8
3.4 VSC construction terms .....	9
3.5 Valve structure terms.....	10
4 General requirements .....	11
4.1 Guidelines for the performance of type tests .....	11
4.1.1 Evidence in lieu .....	11
4.1.2 Selection of test object .....	12
4.1.3 Test procedure .....	12
4.1.4 Ambient temperature for testing.....	12
4.1.5 Frequency for testing.....	12
4.1.6 Test reports.....	12
4.1.7 Conditions to be considered in determination of type test parameters.....	12
4.2 Atmospheric correction factor .....	13
4.3 Treatment of redundancy .....	13
4.3.1 Operational tests .....	13
4.3.2 Dielectric tests.....	13
4.4 Criteria for successful type testing .....	14
4.4.1 General .....	14
4.4.2 Criteria applicable to valve levels .....	14
4.4.3 Criteria applicable to the valve as a whole.....	15
5 List of type tests .....	15
6 Operational tests .....	16
6.1 Purpose of tests.....	16
6.2 Test object.....	16
6.3 Test circuit.....	17
6.4 Maximum continuous operating duty test .....	17
6.5 Maximum temporary over-load operating duty test .....	18
6.6 Minimum DC voltage test .....	18
7 Dielectric tests on valve support structure .....	19
7.1 Purpose of tests.....	19
7.2 Test object.....	19
7.3 Test requirements.....	19
7.3.1 General .....	19
7.3.2 Valve support DC voltage test.....	19
7.3.3 Valve support AC voltage test.....	20
7.3.4 Valve support switching impulse test .....	21
7.3.5 Valve support lightning impulse test.....	21
8 Dielectric tests on multiple valve unit.....	22
8.1 General.....	22
8.2 Purpose of tests.....	22

8.3	Test object.....	22
8.4	Test requirements.....	22
8.4.1	MVU DC voltage test to earth.....	22
8.4.2	MVU AC voltage test.....	23
8.4.3	MVU switching impulse test.....	24
8.4.4	MVU lightning impulse test.....	25
9	Dielectric tests between valve terminals.....	25
9.1	Purpose of the test.....	25
9.2	Test object.....	26
9.3	Test methods.....	26
9.3.1	General.....	26
9.3.2	Method one.....	27
9.3.3	Method two.....	27
9.4	Test requirements.....	28
9.4.1	Composite AC-DC voltage test.....	28
9.4.2	Alternative tests (Method 2 only).....	29
9.4.3	Valve impulse tests.....	31
10	IGBT overcurrent turn-off test.....	33
10.1	Purpose of test.....	33
10.2	Test object.....	33
10.3	Test requirements.....	33
11	Short-circuit current test.....	34
11.1	Purpose of tests.....	34
11.2	Test object.....	34
11.3	Test requirements.....	34
12	Tests for valve insensitivity to electromagnetic disturbance.....	35
12.1	Purpose of tests.....	35
12.2	Test object.....	35
12.3	Test requirements.....	36
12.3.1	General.....	36
12.3.2	Approach one.....	36
12.3.3	Approach two.....	36
12.3.4	Acceptance criteria.....	36
13	Tests for dynamic braking valves.....	36
14	Production tests.....	37
14.1	General.....	37
14.2	Purpose of tests.....	37
14.3	Test object.....	37
14.4	Test requirements.....	37
14.5	Production test objectives.....	38
14.5.1	Visual inspection.....	38
14.5.2	Connection check.....	38
14.5.3	Voltage-grading circuit check.....	38
14.5.4	Control, protection and monitoring circuit checks.....	38
14.5.5	Voltage withstand check.....	38
14.5.6	Turn-on / turn-off check.....	38
14.5.7	Pressure test.....	38
15	Presentation of type test results.....	39

Annex A (informative) Overview of VSC converters in HVDC power transmission .....	40
A.1 General.....	40
A.2 VSC basics .....	40
A.3 Overview of main types of VSC valve.....	42
A.4 Switch type VSC valve .....	42
A.4.1 General .....	42
A.4.2 2-level converter.....	43
A.4.3 Multi-level diode clamped converter.....	43
A.4.4 Multi-level flying capacitor converter .....	44
A.5 Controllable voltage source type VSC valve .....	45
A.5.1 General .....	45
A.5.2 Modular multi-level converter (MMC) .....	46
A.5.3 Cascaded two-level converter (CTL) .....	47
A.5.4 Terminology for valves of the controllable voltage source type.....	48
A.6 Hybrid VSC valves .....	50
A.7 Main differences between VSC and conventional HVDC valves.....	50
Annex B (informative) Valve component fault tolerance.....	51
Annex C (informative) Valve losses determination .....	53
Bibliography.....	54
Figure A.1 – A single VSC phase unit and its idealized output voltage .....	41
Figure A.2 – Output voltage of a VSC phase unit for a 2-level converter .....	41
Figure A.3 – Output voltage of a VSC phase unit for a 15-level converter, without PWM .....	42
Figure A.4 – Basic circuit topology of one phase unit of a 2-level converter .....	43
Figure A.5 – Basic circuit topology of one phase unit of a 3-level diode-clamped converter .....	44
Figure A.6 – Basic circuit topology of one phase unit of a 5-level diode-clamped converter .....	44
Figure A.7 – Basic circuit topology of one phase unit of a 3-level flying capacitor converter .....	45
Figure A.8 – A single VSC phase unit with controllable voltage source type VSC valves .....	46
Figure A.9 – The half-bridge MMC circuit .....	46
Figure A.10 – The full-bridge MMC circuit .....	47
Figure A.11 – The half-bridge CTL circuit.....	48
Figure A.12 – Construction terms in MMC valves .....	49
Figure A.13 – Construction terms in CTL valves.....	49
Table 1 – Conditions for use of evidence in lieu from another HVDC project .....	11
Table 2 – Minimum number of valve levels to be operational type tested as a function of the number of valve levels per valve .....	12
Table 3 – Valve level faults permitted during type tests.....	15
Table 4 – List of type tests .....	16

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

---

**VOLTAGE SOURCED CONVERTER (VSC)  
VALVES FOR HIGH-VOLTAGE DIRECT CURRENT (HVDC)  
POWER TRANSMISSION – ELECTRICAL TESTING****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 62501 has been prepared by subcommittee 22F: Power electronics for electrical transmission and distribution systems, of IEC technical committee 22: Power electronic systems and equipment. It is an International Standard.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 2009, Amendment 1:2014 and Amendment 2:2017. This edition constitutes a technical revision.

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

- a) Conditions for use of evidence in lieu are inserted as a new Table 1;
- b) Test parameters for valve support DC voltage test, 7.3.2, and MVU DC voltage test, 8.4.1, updated;
- c) AC-DC voltage test between valve terminals, Clause 9, is restructured and alternative tests, by individual AC and DC voltage tests, added in 9.4.2;

- d) Partial discharge test in routine test program is removed;
- e) More information on valve component fault tolerance, Annex B, is added;
- f) Valve losses determination is added as Annex C.

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

Draft	Report on voting
22F/731/CDV	22F/748A/RVC

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).

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, or
- revised.

**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.**

# VOLTAGE SOURCED CONVERTER (VSC) VALVES FOR HIGH-VOLTAGE DIRECT CURRENT (HVDC) POWER TRANSMISSION – ELECTRICAL TESTING

## 1 Scope

This International Standard applies to self-commutated converter valves, for use in a three-phase bridge voltage sourced converter (VSC) for high voltage DC power transmission or as part of a back-to-back link, and to dynamic braking valves. It is restricted to electrical type and production tests.

This document can be used as a guide for testing of high-voltage VSC valves used in energy storage systems (ESS).

The tests specified in this document are based on air insulated valves. The test requirements and acceptance criteria can be used for guidance to specify the electrical type and production tests of other types of valves.

## 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 60060 (all parts), *High-voltage test techniques*

IEC 60071 (all parts), *Insulation co-ordination*

IEC 60270, *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*

IEC 60700-1:2015, *Thyristor valves for high voltage direct current (HVDC) power transmission – Part 1: Electrical testing*  
IEC 60700-1:2015/AMD1:2021

IEC 62747, *Terminology for voltage-sourced converters (VSC) for high-voltage direct current (HVDC) systems*

ISO/IEC 17025, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*

## 3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 62747 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 Insulation coordination terms

#### 3.1.1

##### **test withstand voltage**

value of a test voltage of standard waveshape at which a new valve, with unimpaired integrity, does not show any disruptive discharge and meets all other acceptance criteria specified for the particular test, when subjected to a specified number of applications or a specified duration of the test voltage, under specified conditions

#### 3.1.2

##### **internal insulation**

air external to the components and insulating materials of the valve, but contained within the profile of the valve or multiple valve unit

#### 3.1.3

##### **external insulation**

air between the external surface of the valve or multiple valve unit and its surroundings

### 3.2 Power semiconductor terms

#### 3.2.1

##### **turn-off semiconductor device**

controllable semiconductor device which may be turned on and off by a control signal, for example an IGBT

Note 1 to entry: There are several types of turn-off semiconductor devices which can be used in VSC converters for HVDC. For convenience, the term IGBT is used throughout this standard to refer to the main turn-off semiconductor device. However, the standard is equally applicable to other types of turn-off semiconductor devices.

#### 3.2.2

##### **insulated gate bipolar transistor IGBT**

turn-off semiconductor device with three terminals: a gate terminal (G) and two load terminals emitter (E) and collector (C)

Note 1 to entry: By applying appropriate gate to emitter voltages, the load current can be controlled, i.e. turned on and turned off.

#### 3.2.3

##### **free-wheeling diode**

##### **FWD**

power semiconductor device with diode characteristic

Note 1 to entry: A FWD has two terminals: an anode (A) and a cathode (K). The current through FWDs is in the opposite direction to the IGBT current.

Note 2 to entry: FWDs are characterized by the capability to cope with high rates of decrease of current caused by the switching behaviour of the IGBT.

#### 3.2.4

##### **IGBT-diode pair**

arrangement of IGBT and FWD connected in inverse parallel

### 3.3 Operating states of converter

#### 3.3.1

##### **blocking state**

condition of the converter, in which a turn-off signal is applied continuously to all IGBTs of the converter

Note 1 to entry: Typically, the converter is in the blocking state condition after energization.

### 3.3.2

#### **de-blocked state**

condition of the converter, in which turn-on and turn-off signals are applied repetitively to IGBTs of the converter

### 3.3.3

#### **valve protective blocking**

means of protecting the valve or converter from excessive electrical stress by the emergency turn-off of all IGBTs in one or more valves

### 3.3.4

#### **voltage step level**

voltage step caused by switching of a valve or part of a valve during the de-blocked state of the converter

Note 1 to entry: For valves of the controllable voltage source type, the voltage step level corresponds to the change of voltage caused by switching one submodule or cell. For valves of the switch type, the voltage step level corresponds to the change of voltage caused by switching the complete valve.

Note 2 to entry: Annex A gives an overview of VSC converters in HVDC power transmission.

## 3.4 VSC construction terms

### 3.4.1

#### **VSC phase unit**

equipment used to connect the two DC busbars to one AC terminal

### 3.4.2

#### **switch type VSC valve**

arrangement of IGBT-diode pairs connected in series and arranged to be switched simultaneously as a single function unit

### 3.4.3

#### **controllable voltage source type VSC valve**

complete controllable voltage source assembly, which is generally connected between one AC terminal and one DC terminal

### 3.4.4

#### **diode valve**

semiconductor valve containing only diodes as the main semiconductor devices, which might be used in some VSC topologies

### 3.4.5

#### **dynamic braking valve**

complete controllable device assembly, which is used to control energy absorption in braking resistor or other components

### 3.4.6

#### **valve**

VSC valve, dynamic braking valve or diode valve according to the context

### 3.4.7

#### **submodule**

part of a VSC valve comprising controllable switches and diodes connected to a half bridge or full bridge arrangement, together with their immediate auxiliaries, storage capacitor, if any, where each controllable switch consists of only one switched valve device connected in series

**3.4.8****cell**

MMC building block where each switch position consists of more than one IGBT-diode pair connected in series

Note 1 to entry: See Figure A.13.

**3.4.9****VSC valve level**

smallest indivisible functional unit of VSC valve

Note 1 to entry: For any VSC valve in which IGBTs are connected in series and operated simultaneously, one VSC valve level is one IGBT-diode pair including its auxiliaries (see Figure A.13). For MMC type without IGBT-diode pairs connected in series one valve level is one submodule together with its auxiliaries (see Figure A.12).

**3.4.10****diode valve level**

part of a diode valve composed of a diode and associated circuits and components, if any

**3.4.11****redundant levels**

maximum number of series connected VSC valve levels or diode valve levels in a valve that may be short-circuited externally or internally without affecting the safe operation of the valve as demonstrated by type tests, and which if and when exceeded, would require shutdown of the valve to replace the failed levels or acceptance of increased risk of failures

Note 1 to entry: In valve designs such as the cascaded two level converter, which contain two or more conduction paths within each cell and have series-connected VSC valve levels in each path, redundant levels shall be counted only in one conduction path in each cell.

**3.4.12****dynamic braking valve level**

part of a dynamic braking valve comprising a controllable switch and an associated diode, or controllable switches and diodes connected in parallel, or controllable switches and diodes connected to a bridge arrangement, together with their immediate auxiliaries, storage capacitor and energy dissipation resistors, if any

**3.5 Valve structure terms****3.5.1****valve structure**

structural components of a valve, required in order to physically support the valve modules

**3.5.2****valve support**

that part of the valve which mechanically supports and electrically insulates the active part of the valve from earth

**3.5.3****multiple valve unit****MVU**

mechanical arrangement of 2 or more valves or 1 or more VSC phase units sharing a common valve support

Note 1 to entry: A MVU might not exist in all topologies and physical arrangement of converters.

### 3.5.4 valve section

electrical assembly defined for test purposes, comprising a number of valve levels and other components, which exhibits pro-rated electrical properties of a complete valve

Note 1 to entry: For valves of controllable voltage source type the valve section shall include cell or submodule DC capacitor in addition to VSC valve levels.

Note 2 to entry: The minimum number of VSC or diode valve levels allowed in a valve section is defined along with the requirements of each test.

## 4 General requirements

### 4.1 Guidelines for the performance of type tests

#### 4.1.1 Evidence in lieu

Each design of valve shall be subjected to the type tests specified in this document. If the valve is demonstrably similar to one previously tested, the supplier may, in lieu of performing a type test or individual parts of it, submit a test report of a previous type test for consideration by the purchaser. This should be accompanied by a separate report detailing the differences in the design and demonstrating how the referenced type test satisfies the test objectives for the proposed design. Conditions for use of evidence in lieu are listed in Table 1.

**Table 1 – Conditions for use of evidence in lieu from another HVDC project**

Type test	Clause	Conditions
Operational tests	6	<ul style="list-style-type: none"> <li>Equal or smaller number of valve levels to be tested</li> <li>Same valve level design</li> <li>Same valve electronics design</li> <li>Identical or lower voltage stress and thermal stress<sup>a</sup> on each valve level</li> </ul>
Dielectric tests on valve support structure	7	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identical valve structure, including cooling pipes, cable paths, earthing system, if any</li> <li>Same valve material and geometrical dimension</li> <li>Equal or higher air clearance to valve hall and other related equipment inside the valve hall</li> <li>Equal or lower voltage stress, including DC voltage stress, AC voltage stress and impulse voltage stresses</li> </ul>
Dielectric tests on multiple valve unit	8	<ul style="list-style-type: none"> <li>Same MVU geometry between valves</li> </ul>
Dielectric tests between valve terminals	9	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identical valve structure, including cooling pipes, cable paths and earthing system, if any</li> <li>Same valve material and geometrical dimension</li> <li>Equal or lower voltage stress</li> </ul>
IGBT overcurrent turn-off test	10	<ul style="list-style-type: none"> <li>Same valve level design</li> <li>Same valve electronics design</li> <li>Identical or lower prospective current stress</li> </ul>
Short-circuit current test	11	<ul style="list-style-type: none"> <li>Same valve level design</li> <li>Same short-circuit bypass components, if any, and function</li> <li>Same valve electronics design</li> <li>Identical or lower short-circuit current stress</li> </ul>
Tests for valve insensitivity to electromagnetic disturbance	12	<ul style="list-style-type: none"> <li>Same as those indicated for Clauses 6 and 9</li> </ul>
<sup>a</sup> Semiconductor devices thermal stress is a combined effect of current and cooling. Device thermal stress is characterised by the device junction temperature.		

#### 4.1.2 Selection of test object

This subclause does not apply to tests on the valve supporting structure and multiple valve unit. The test object for those tests is defined in 7.2 and 8.3.

- a) Type tests may be performed either on a complete valve or MVU, or parts thereof, as indicated in Table 4.
- b) The minimum number of valve levels to be operational type tested, depending on the valve levels in a single valve, is as shown in Table 2. This number applies to the type tests in Clauses 6, 10, 11 and 12. Those valve levels shall be tested in one test setup or multiple setups on several valve sections as defined in those clauses.

**Table 2 – Minimum number of valve levels to be operational type tested as a function of the number of valve levels per valve**

Number of valve levels, including redundant level per valve	Total number of valve levels to be tested
1 to 50	Number of valve levels in one valve
51 to 250	50
≥ 251	20 %

The minimum number of valve levels to be dielectric type tested can be equal to or lower than the number specified for the operational type test.

The minimum number of valve levels, however, shall be representative of the valve dielectric design.

- c) Generally, the same valve sections are recommended to be used for all type tests. However, different tests may be performed on different valve sections in parallel, in order to speed up the programme for executing the tests.
- d) Prior to commencement of type tests, the valve, valve sections and/or the components of them shall be demonstrated to have withstood the production tests to ensure proper manufacture.

#### 4.1.3 Test procedure

The tests shall be performed in accordance with IEC 60060, where applicable with due account for IEC 60071 (all parts). Partial discharge measurements shall be performed in accordance with IEC 60270.

#### 4.1.4 Ambient temperature for testing

The tests shall be performed at the prevailing ambient temperature of the test facility, unless otherwise specified.

#### 4.1.5 Frequency for testing

AC dielectric tests can be performed at either 50 Hz or 60 Hz. Operational tests shall be performed at the service frequency.

#### 4.1.6 Test reports

At the completion of the type tests, the supplier shall provide type test reports in accordance with Clause 15.

#### 4.1.7 Conditions to be considered in determination of type test parameters

Type test parameters shall be determined based on the worst operating and fault conditions to which the valve can be subjected, according to system studies. Guidance on the conditions can be found in CIGRE Technical Brochure No. 447.

## 4.2 Atmospheric correction factor

When specified in the relevant clause, atmospheric correction shall be applied to the test voltages in accordance with IEC 60060-1. The reference conditions to which correction shall be made are the following:

- pressure:
  - If the insulation coordination of the tested part of the valve is based on standard rated withstand voltages according to IEC 60071-1, correction factors are only applied for altitudes exceeding 1 000 m. Hence if the altitude of the site  $a_s$  at which the equipment will be installed is  $\leq 1\,000$  m, then the standard atmospheric air pressure ( $b_0 = 101,3$  kPa) shall be used with no correction for altitude. If  $a_s > 1\,000$  m, then the standard procedure according to IEC 60060-1 is used except that the reference atmospheric pressure  $b_0$  is replaced by the atmospheric pressure corresponding to an altitude of 1 000 m ( $b_{1\,000\text{ m}}$ ).
  - If the insulation coordination of the tested part of the valve is not based on standard rated withstand voltages according to IEC 60071-1, then the standard procedure according to IEC 60060-1 is used with the reference atmospheric pressure  $b_0$  ( $b_0 = 101,3$  kPa).
- temperature: design maximum valve hall air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ );
- humidity: design minimum valve hall absolute humidity ( $\text{g}/\text{m}^3$ ).

Realistic worst-case combinations of temperature and humidity which can occur in practice shall be used for atmospheric correction.

The values to be used shall be specified by the supplier.

## 4.3 Treatment of redundancy

### 4.3.1 Operational tests

For operational tests, redundant valve levels shall not be short-circuited. The test voltages used shall be adjusted by means of a scaling factor  $k_n$ :

$$k_n = \frac{N_{\text{tut}}}{N_t - N_r}$$

where

$N_{\text{tut}}$  is the number of series valve levels in the test object;

$N_t$  is the total number of series valve levels in the valve;

$N_r$  is the total number of redundant series valve levels in the valve.

### 4.3.2 Dielectric tests

For all dielectric tests between valve terminals, the redundant valve levels shall be short-circuited. The location of valve levels to be short-circuited shall be agreed by the purchaser and supplier.

NOTE Depending on the design, limitations might be imposed upon the distribution of short-circuited valve levels. For example, there might be an upper limit to the number of short-circuited valve levels in one valve section.

For all dielectric tests on valve section, the test voltages used shall be adjusted by means of a scaling factor  $k_0$ :

$$k_0 = \frac{N_{tu}}{N_t - N_r}$$

where

$N_{tu}$  is the number of series valve levels not short circuit connected in the test object;

$N_t$  is the total number of series valve levels in the valve;

$N_r$  is the total number of redundant series valve levels in the valve.

#### 4.4 Criteria for successful type testing

##### 4.4.1 General

Experience in semiconductor application shows that, even with the most careful design of valves, it is not possible to avoid occasional random failures of valve level components during service operation. Even though these failures may be stress-related, they are considered random to the extent that the cause of failure or the relationship between failure rate and stress cannot be predicted or is not amenable to precise quantitative definition. Type tests subject valves or valve sections, within a short time, to multiple stresses that generally correspond to the worst stresses that can be experienced by the equipment not more than a few times during the life of the valve. Considering the above, the criteria for successful type testing set out below therefore permit a small number of valve levels to fail during type testing, providing that the failures are rare and do not show any pattern that is indicative of inadequate design and providing that the failed valve level permits the rest of the valve or valve section to continue operating without degraded performance.

##### 4.4.2 Criteria applicable to valve levels

Criteria applicable to valve levels are as follows.

- a) If, following a type test as listed in Clause 5, more than one valve level (alternatively more than 1 % of the tested valve levels, if greater) has become short or open circuited, then the valve shall be deemed to have failed the type tests.
- b) If, following a type test, one valve level (or more if still within the 1 % limit) has become short or open circuited, then the failed level(s) shall be restored and this type test repeated.
- c) If the cumulative number of short or open circuited valve levels during all type tests is more than 3 % of the tested valve levels, then the valve shall be deemed to have failed the type test.
- d) The valve or valve sections shall be checked after each type test to determine whether or not any valve levels have become short or open circuited. Failed IGBT/diode or auxiliary components found during or at the end of a type test may be replaced before further testing.
- e) At the completion of the test programme, the valve or valve sections shall undergo a series of check tests, which shall include as a minimum:
  - check for voltage withstand of valve levels;
  - check of the gating circuits;
  - check of the monitoring circuits;
  - check of any protection circuits forming an integral part of the valve;
  - check of the voltage grading circuits.

- f) Valve levels short circuits occurring during the check tests shall be counted as part of the criteria for acceptance defined above. In addition to short or open circuited levels, the total number of valve levels exhibiting faults which do not result in valve level short circuit, which are discovered during the type test programme and the subsequent check test, shall not exceed 3 % of the number of tested valve levels in dielectric and operational type tests. If the number of such levels exceeds 3 %, then the nature of the faults and their cause shall be reviewed and additional action, if any, agreed between purchaser and supplier.
- g) When applying the percentage criteria to determine the permitted maximum number of short or open circuited valve levels and the permitted maximum number of levels with faults which have not resulted in a valve level becoming short or open circuited, it is usual practice to round off all fractions to the next highest integer, as illustrated in Table 3.

**Table 3 – Valve level faults permitted during type tests**

Number of valve levels tested	Number of valve levels permitted to become short or open circuited in any one type test	Total number of valve levels permitted to become short or open circuited in all type tests	Additional number of valve levels, in all type tests, which have experienced a fault but have not become short or open circuited
Up to 33	1	1	1
34 to 67	1	2	2
68 to 100	1	3	3
101 to 133	2	4	4

The distribution of short or open circuited levels and of other valve level faults at the end of all type tests shall be essentially random and not show any pattern that may be indicative of inadequate design.

#### **4.4.3 Criteria applicable to the valve as a whole**

Breakdown of or external flashover across common electrical equipment associated with more than one valve level of the valve, or disruptive discharge in dielectric material forming part of the valve structure, cooling ducts, light guides or other insulating parts of the pulse transmission and distribution system shall not be permitted.

Component and conductor surface temperatures, together with associated current-carrying joints and connections, and the temperature of adjacent mounting surfaces shall at all times remain within limits permitted by the design.

## **5 List of type tests**

Table 4 lists the type tests given in Clauses 6, 7, 8, 9, 10, 11 and 12.

**Table 4 – List of type tests**

Type test	Clause or subclause	Test object
Maximum continuous operating duty test	6.4	Valve or valve section
Maximum temporary over-load operating duty test	6.5	Valve or valve section
Minimum DC voltage test	6.6	Valve or valve section
Valve support DC voltage test	7.3.2	Valve support
Valve support AC voltage test	7.3.3	Valve support
Valve support switching impulse test	7.3.4	Valve support
Valve support lightning impulse test	7.3.5	Valve support
MVU DC voltage test to earth	8.4.1	MVU
MVU AC voltage test	8.4.2	MVU
MVU switching impulse test	8.4.3	MVU
MVU lightning impulse test	8.4.4	MVU
Valve AC – DC voltage test	9.4.1 or 9.4.2	Valve or valve section
Valve switching impulse test	9.4.3.2	
Valve lightning impulse test	9.4.3.3	
IGBT overcurrent turn-off test	10	Valve or valve section
Short-circuit current test	11	Valve or valve section
Test for valve insensitivity to electromagnetic disturbance	12	Valve or valve section
NOTE Valve section used in the valve AC–DC voltage test (9.4.1 or 9.4.2), valve switching impulse voltage test (9.4.3.2) and valve lightning impulse voltage test (9.4.3.3) should be a single structure representative of valve dielectric design.		

## 6 Operational tests

### 6.1 Purpose of tests

The principal objectives of the operational tests are:

- a) to check the adequacy of the VSC/diode level and associated electrical circuits in a valve with regard to current, voltage and temperature stresses in the conducting state, at turn-on and turn-off under the worst repetitive stress conditions;
- b) to demonstrate correct interaction between valve electronics and power circuits of the VSC valves.

### 6.2 Test object

The tests may be performed on either the complete valve or on valve sections. The choice depends mainly upon the valve design and the test facilities available. The tests specified in this clause are valid for valve sections containing five or more series-connected valve levels. If tests with fewer than five levels are proposed, additional test safety factors shall be agreed. Under no circumstances shall the number of series-connected levels for tests be less than three.

The valve or valve sections under test shall be assembled with all auxiliary components. For the valves with valve surge arrester, a proportionally scaled valve arrester may be included.

The coolant shall be in a condition representative of service conditions. Flow and temperature, in particular, shall be set to the most unfavourable values appropriate to the test in question, such that the relevant component temperature(s) are equal to the values applicable in service.

### 6.3 Test circuit

For valve designs which act as a controllable voltage source and contain in-built DC capacitance, the DC capacitance and its connections to the semiconductor devices are an integral part of the test object.

However, for valve designs which function as switches, where the DC capacitor is separate from the valve, the DC capacitor needs to be correctly represented in the test circuit. In particular, the series stray inductance in the connections between the DC capacitor and the valve, and the stray capacitance across the valve section, shall be correctly reproduced and scaled to the size of valve section under test. Test circuit interconnections shall be of a type that is representative of the type used in the converter, in order not to introduce unrealistic levels of damping due to skin effects.

### 6.4 Maximum continuous operating duty test

The test needs to reproduce the following parameters based on the worst in service operating conditions of the converter. More than one test may be necessary to reproduce all parameters at their maximum values.

For VSC valves:

- maximum steady-state IGBT junction temperatures;
- maximum steady-state FWD junction temperatures;
- where snubbers are used, maximum steady-state snubber component temperatures;
- maximum steady-state turn-on and turn-off voltage and current.

For diode valves:

- maximum steady-state diode junction temperature;
- where snubbers are used, maximum steady-state snubber component temperatures;
- maximum steady-state diode turn-off voltage and current.

All of these parameters need to be reproduced during the maximum continuous operating duty test. They may be reproduced either in separate tests or as a combined test.

The test voltage shall be based on the maximum continuous direct voltage, the test switching frequency shall be based on the maximum continuous switching frequency and the modulation pattern shall be representative of that used in service.

The test current, in RMS, shall be determined taking harmonic currents into account and any other additional currents through the valve.

The test current value shall incorporate a test safety factor of 1,05.

For switch type valve, the test voltage  $U_{\text{tpv1}}$  corresponding to the maximum continuous operating DC voltage shall be determined as follows:

$$U_{\text{tpv1}} = U_{\text{dmax}} \times k_n \times k_1$$

where

$U_{\text{dmax}}$  is the maximum continuous operating DC voltage of the valve, including ripple;

$k_n$  is a test scaling factor according to 4.3.1;

$k_1$  is a test safety factor;

$k_1 = 1,05$ .

For controllable voltage source type valve the test voltage,  $U_{\text{tpv1}}$ , per valve level shall be determined as follows:

$$U_{\text{tpv1}} = U_{\text{cmax}} \times k_1$$

where

$U_{\text{cmax}}$  is the maximum continuous operating DC voltage of the valve level, including ripple;

$k_1$  is a test safety factor;

$k_1 = 1,05$ .

The duration of the test shall be not less than 30 min after the exit coolant temperature has stabilized.

### 6.5 Maximum temporary over-load operating duty test

If the valve is specified for temporary over-load operation, a maximum temporary operating duty test shall be performed.

NOTE Capability of converter valves in a maximum temporary over-load operation is typically in a few seconds of time while valve cooling is unable to act.

The test conditions, where required, shall be determined using the same methodology as in 6.4 above. However, the test current shall be the specified over-load current without a test safety factor.

Prior to the test, the valve or valve section shall be brought to thermal equilibrium under the conditions of 6.4. The temporary operating duty test is then started from this initial condition and continued for a duration equal to the duration of the temporary overload multiplied by 1,2.

After the temporary over-load operation, return to the conditions of maximum continuous operation as in 6.4 and maintain constant for 10 min.

### 6.6 Minimum DC voltage test

This test is to verify the correct performance of those valve designs in which energy for the valve electronic circuits is extracted from the voltage appearing between the valve terminals.

The test consists of applying a DC voltage between the terminals of the valve or valve section. For this test, only the voltage, not the current, is important.

The correct operation of the valve electronic circuits may be demonstrated either by deblocking the valve or valve section, or by remaining in the blocked state and monitoring the data back signals from the valve electronics.

The test voltage  $U_{\text{min}}$  is defined as:

$$U_{\text{min}} = \frac{N_{\text{tut}}}{N_{\text{t}}} \times U_{\text{W}} \times k_2$$

where

$U_{\text{W}}$  is the lowest DC voltage across one valve in service operation where proper function of the valve electronics is required;

$N_{\text{tut}}$  is the number of series-connected VSC levels under test;

$N_{\text{t}}$  is the total number of series-connected VSC levels in a single valve, including redundancy;

$k_2$  is a test safety factor;

$k_2 = 0,95$ .

The duration of test shall be not less than 10 min.

## **7 Dielectric tests on valve support structure**

### **7.1 Purpose of tests**

The principal objectives of these tests are:

- a) to verify the voltage withstand capability of the insulation of the valve support, cooling ducts, light guides and other insulating components associated with the valve support. If there is insulation to earth other than the valve support, then additional tests may be necessary;
- b) to verify that the partial discharge inception and extinction voltages are above the maximum operating voltage appearing on the valve support.

NOTE Depending upon the application, it might be possible to eliminate some of the tests on the valve support, subject to agreement between purchaser and supplier.

### **7.2 Test object**

The valve support to be used for the tests may be a representative separate object including representation of the adjacent parts of the valve or may form part of the assembly used for single valve or multiple valve unit tests. It shall be assembled with all ancillary components in place and shall have the adjacent earth potential surfaces properly represented. The proximity of adjacent earth potential surfaces (equipment or building infrastructure) shall be assessed, and representation included where appropriate. For clearances that are significantly greater than those determined by insulation co-ordination requirements, e.g. clearances driven instead by access requirements, then consideration may be given to omit earth potential surfaces in these locations. If a single valve consists of a single structure, then its large size may sometimes make it impractical to test the complete valve in a laboratory. In such cases it is permitted to perform the valve support structure tests on a pro-rated section of the support structure, provided it can be demonstrated that the design of the test object is representative of the design of the full structure and the tests cover the worst stresses experienced by any part of the valve support structure.

The coolant shall be in a condition representative of the most onerous service condition for the purpose of the test.

If a single valve consists of more than one structure such that there is more than one valve support structure per valve, then it shall be demonstrated that the tests proposed cover the worst stresses experienced by any of the valve support structures.

### **7.3 Test requirements**

#### **7.3.1 General**

All test levels below are subject to atmospheric correction as described in 4.2.

#### **7.3.2 Valve support DC voltage test**

The two main terminals of the valve shall be connected together, and the DC voltage then applied between the two main terminals thus connected and earth. Starting from a voltage not higher than 50 % of the 1 min test voltage, the voltage shall be raised to the specified 1 min test voltage as fast as possible, kept constant for 1 min, reduced to the specified 3 h test voltage, kept constant for 3 h and then reduced to zero. During the last hour of the specified 3 h test, the number of partial discharges exceeding 300 pC shall be recorded as described in IEC 60700-1:2015 and IEC 60700-1:2015/AMD1:2021, Annex B.

The number of pulses exceeding 300 pC shall not exceed 15 pulses per minute, averaged over the recording period. Of these, no more than seven pulses per minute shall exceed 500 pC, no more than three pulses per minute shall exceed 1 000 pC and no more than one pulse per minute shall exceed 2 000 pC.

If an increasing trend in the magnitude or rate of partial discharge is observed, the test duration may be extended by mutual agreement between the purchaser and supplier.

The test shall then be repeated with the voltage of opposite polarity.

Prior to the test and before repeating the test with voltage of opposite polarity, the valve support may be short-circuited and earthed for a duration of several hours. The same procedure may be followed at the end of DC voltage test.

The valve support DC test voltage  $U_{tds}$  shall be determined in accordance with the following:

1 min test

$$U_{tds} = \pm U_{dmS1} \times k_3 \times k_t$$

3 h test

$$U_{tds} = \pm U_{dmS2} \times k_3$$

where

$U_{dmS1}$  is the maximum short-duration voltage appearing across the valve support, as determined by insulation coordination studies.  $U_{dmS1}$  shall be the higher of (a) the highest voltage averaged over a 1 s period and (b) the average voltage during the time from the peak voltage to the time when the voltage decreases rapidly through the action of fast discharge devices or re-configuration, if any;

$U_{dmS2}$  is the maximum value of the DC component of the steady-state operating voltage appearing across the valve support;

$k_3$  is a test safety factor;

$k_3 = 1,10$  for 1 min test;

$k_3 = 1,15$  for 3 h test;

$k_t$  is the atmospheric correction factor according to 4.2.

### 7.3.3 Valve support AC voltage test

To perform the test, the two main terminals of the valve shall be connected together, and the AC test voltage then applied between the two main terminals thus connected and earth.

Starting from a voltage not higher than 50 % of the 1 min test voltage, the voltage shall be raised to the specified 1 min test voltage, kept constant for 1 min, reduced to the specified 30 min test voltage, kept constant for 30 min and then reduced to zero.

Before the end of the 30 min test, the level of partial discharge shall be monitored and recorded over a 1 min period. If the value of partial discharge is below 200 pC, the design may be accepted unconditionally. If the value of partial discharge exceeds 200 pC, the test results shall be evaluated.

The valve support AC test voltage  $U_{\text{tas}}$  shall be determined in accordance with the following:

1 min test:

$$U_{\text{tas}} = \frac{U_{\text{mS1}}}{\sqrt{2}} \times k_4 \times k_t$$

30 min test

$$U_{\text{tas}} = \frac{U_{\text{mS2}}}{\sqrt{2}} \times k_4$$

where

$U_{\text{mS1}}$  is the peak value of maximum voltage appearing on the valve support in service, particularly in system fault condition and valve fault operation condition. The overvoltage limiting effect of phase arrester or other overvoltage protection means, if any, shall be taken into account to derive this overvoltage;

$U_{\text{mS2}}$  is the peak value of the maximum repetitive operating voltage across the valve support during steady-state operation, including switching overshoot;

$k_4$  is a test safety factor;

$k_4 = 1,10$  for 1 min test;

$k_4 = 1,15$  for 30 min test;

$k_t$  is the atmospheric correction factor according to 4.2.

### 7.3.4 Valve support switching impulse test

The test shall comprise three applications of positive polarity and three applications of negative polarity switching impulse voltages between the main terminals of the valve (connected together) and earth.

A standard switching impulse voltage wave shape in accordance with IEC 60060 shall be used.

The test voltage shall be selected in accordance with the insulation coordination of the VSC substation.

### 7.3.5 Valve support lightning impulse test

The test shall comprise three applications of positive polarity and three applications of negative polarity lightning impulse voltages between the main terminals of the valve (connected together) and earth.

A standard lightning impulse voltage wave shape in accordance with IEC 60060 shall be used.

The test voltage shall be selected in accordance with the insulation coordination of the VSC substation.

## **8 Dielectric tests on multiple valve unit**

### **8.1 General**

This clause is only applicable if more than one valve is installed in a common valve structure (multiple valve unit). In the case where each individual valve is mounted in a dedicated valve structure, this clause is not applicable.

### **8.2 Purpose of tests**

The principal objectives of these tests are:

- a) to verify the voltage withstand capability of the external insulation of the MVU, with respect to its surroundings, especially for the valve(s) connected at pole potential;
- b) to verify the voltage withstand capability between single valves in a MVU structure;
- c) to verify that the partial discharge levels are within specified limits.

### **8.3 Test object**

There are many possible arrangements of valves and multiple valve units. The test object(s) shall be chosen to reflect, as accurately as possible, the service configuration of valves insofar as is necessary for the test in question. The test object shall be fully equipped unless it can be shown that some components can be simulated or omitted without reducing the significance of the results.

Individual valves may have to be short-circuited depending on the configuration of the MVU and the objectives of the test.

When the low-voltage terminal of the MVU is not connected to earth potential, care shall be taken to suitably terminate the low voltage terminal of the MVU during tests to correctly simulate the voltage appearing at this terminal. Earth planes shall be used, whose separation shall be determined by the proximity of other valves and earth potential surfaces.

### **8.4 Test requirements**

#### **8.4.1 MVU DC voltage test to earth**

The DC test voltage shall be applied between the highest potential DC terminal of the MVU and earth.

Starting from a voltage not higher than 50 % of the 1 min test voltage, the voltage shall be raised to the specified 1 min test voltage as fast as possible, kept constant for 1 min, reduced to the specified 3 h test voltage, kept constant for 3 h and then reduced to zero.

Where possible the test voltage shall be increased from 50 % to the 1 min test voltage level within approximately 10 s.

During the last hour of the specified 3 h test, the number of partial discharges exceeding 300 pC shall be recorded.

The number of pulses exceeding 300 pC shall not exceed 15 pulses per minute, averaged over the recording period. Of these, no more than seven pulses per minute shall exceed 500 pC, no more than three pulses per minute shall exceed 1 000 pC, and no more than one pulse per minute shall exceed 2 000 pC.

If an increasing trend in the magnitude or rate of partial discharge is observed, the test duration may be extended by mutual agreement between the purchaser and supplier.

The test shall then be repeated with the voltage of opposite polarity.

Prior to the test and before repeating the test with voltage of opposite polarity, the MVU terminals may be short-circuited together and earthed for a duration of several hours. The same procedure may be followed at the end of DC voltage test.

The MVU DC test voltage  $U_{\text{tdm}}$  shall be determined in accordance with the following:

1 min test

$$U_{\text{tdm}} = \pm U_{\text{dmm1}} \times k_5 \times k_t$$

3 h test

$$U_{\text{tdm}} = \pm U_{\text{dmm2}} \times k_5$$

where

$U_{\text{dmm1}}$  is the maximum short-duration voltage appearing between the high-voltage terminal of MVU and earth, as determined by insulation coordination studies.  $U_{\text{dmm1}}$  shall be the higher of (a) the highest voltage averaged over a 1 second period and (b) the average voltage during the time from the peak voltage to the time when the voltage decreases rapidly through the action of fast discharge devices or re-configuration, if any;

$U_{\text{dmm2}}$  is the maximum value of the DC component of the steady-state operating voltage appearing between the high-voltage terminal of the MVU and earth;

$k_5$  is a test safety factor;

$k_5 = 1,10$  for 1 min test;

$k_5 = 1,15$  for 3 h test;

$k_t$  is the atmospheric correction factor according to 4.2.

#### 8.4.2 MVU AC voltage test

If a MVU experiences AC or composite AC plus DC voltage stresses between any two terminals, the withstand capability of which is not adequately demonstrated by other tests, then it will be necessary to perform an AC voltage test between these terminals of the MVU.

To perform the test, the test voltage source shall be connected to the pair of MVU terminals in question. The point of earth connection is dependent on the test circuit arrangement.

Starting from a voltage not higher than 50 % of the 1 min test voltage, the voltage shall be raised to the specified 1 min test voltage, kept constant for 1 min, then reduced to the 30 min value, kept constant for 30 min and then reduced to zero.

Before the end of the 30 min test, the level of partial discharge shall be monitored and recorded over a 1 min period. If the value of partial discharge is below 200 pC, the design may be accepted unconditionally. If the value of partial discharge exceeds 200 pC, the test results shall be evaluated.

The MVU AC test voltage  $U_{tam}$  shall be determined in accordance with the following:

1 min test

$$U_{tam} = \frac{U_{mm1}}{\sqrt{2}} \times k_6 \times k_t$$

30 min test

$$U_{tam} = \frac{U_{mm2}}{\sqrt{2}} \times k_6$$

where

$U_{mm1}$  is the peak value of maximum voltage between the terminals of the MVU in service, particularly in system fault condition and valve fault operation condition. The overvoltage limiting effect of phase arrester or other overvoltage protection means, if any, shall be taken into account to derive this overvoltage;

$U_{mm2}$  is the peak value of the maximum repetitive operating voltage between the terminals of the MVU during steady-state operation, including switching overshoot;

$k_6$  is a test safety factor;

$k_6 = 1,10$  for 1 min test;

$k_6 = 1,15$  for 30 min test;

$k_t$  is the atmospheric correction factor according to 4.2.

#### 8.4.3 MVU switching impulse test

A standard switching impulse voltage waveshape in accordance with IEC 60060 shall be used.

The MVU switching impulse test voltage shall be applied between the high voltage terminal of the MVU and earth.

The test shall comprise three applications of positive polarity and three applications of negative polarity switching impulse voltage of a specified amplitude.

The MVU switching impulse test voltage  $U_{tsm}$  shall be determined in accordance with the following:

$$U_{tsm} = \pm U_{SIPL\_m} \times k_7 \times k_t$$

where

$U_{SIPL\_m}$  is the switching impulse protective level determined by insulation coordination taking into account the arrester(s) connected between the MVU high voltage terminal and earth;

$k_7$  is a test safety factor;

$k_7 = 1,10$ ;

$k_t$  is the atmospheric correction factor;

$k_t$  is the value according to 4.2.

If the test prescribed above does not adequately test the switching impulse withstand between all terminals of the MVU, then consideration shall be given to performing extra tests to check the insulation.

NOTE Subject to agreement between the purchaser and supplier, the MVU switching impulse test need not be performed if it can be shown by other means that:

- a) the external air clearances to other valves and to earth are adequate for the switching impulse voltage withstand level required, and
- b) the switching impulse withstand between any two terminals of the MVU is adequately demonstrated by other tests.

#### 8.4.4 MVU lightning impulse test

A standard lightning impulse voltage wave shape in accordance with IEC 60060 shall be used.

The MVU lightning impulse test voltage shall be applied between the high voltage terminal of the MVU and earth.

The test shall comprise three applications of positive polarity and three applications of negative polarity lightning impulse voltage of specified amplitude.

The MVU lightning impulse test voltage  $U_{\text{tlm}}$  shall be determined in accordance with the following:

$$U_{\text{tlm}} = \pm U_{\text{LIPL}_m} \times k_8 \times k_t$$

where

$U_{\text{LIPL}_m}$  is the lightning impulse protective level determined by insulation co-ordination, taking into account the arrester(s) connected between the MVU high voltage terminal and earth;

$k_8$  is a test safety factor;

$k_8 = 1,10$ ;

$k_t$  is the atmospheric correction factor;

$kt$  is the value according to 4.2.

If the test prescribed above does not adequately test the lightning impulse withstand voltage between all terminals of the MVU, then consideration shall be given to performing extra tests to check this insulation.

NOTE Subject to agreement between the purchaser and supplier, the MVU lightning impulse test need not be performed if it can be shown by other means that:

- a) the external air clearances to other valves and to earth are adequate for the lightning impulse voltage withstand level required, and
- b) the lightning impulse withstand voltage between any two terminals of the MVU is adequately demonstrated by other tests.

## 9 Dielectric tests between valve terminals

### 9.1 Purpose of the test

These tests are intended to verify the design of the valve regarding its voltage-related characteristics for various types of overvoltages (DC, AC, switching impulse and lightning impulse overvoltages). The tests shall demonstrate that:

- a) the valve will withstand the specified overvoltages;

- b) partial discharges will be within specified limits under specified test conditions;
- c) the internal voltage grading circuits, if any, have sufficient power rating.

It should be noted that the tests described in this clause are based on standard wave shapes and standard test procedures as developed for the testing of high-voltage AC systems and components. This approach offers great advantages to the industry because it allows much of the existing technology of high-voltage testing to be carried over to the qualification of HVDC valves. On the other hand, it must be recognized that a particular HVDC application may result in wave shapes different from the standards and, in this case, the test may be modified so as to realistically reflect expected conditions.

It should be also noted that the atmospheric correction is not needed in dielectric tests between valve terminals if the site altitude is less than 1 000 m. However, for valves installed at an altitude exceeding 1 000 m the valve internal air clearance shall be verified by additional tests under the atmospheric corrected test voltages. IGBT-diode pairs can be replaced by insulating blocks in these tests.

## 9.2 Test object

For valves of the switch type, the test object should generally be a complete valve. For valves of the controllable voltage source type, testing a complete valve might not be practical because of its large physical size. In such cases the test object should generally be a single structure representative of valve dielectric design. Tests on individual valve sections are acceptable if the supplier can demonstrate that the voltage distribution between valve sections, under test conditions, is representative of the voltage distribution within a complete valve in service. The test valve or valve section shall be assembled with all auxiliary components except for the valve arrester if provided. The valve may form part of a multiple valve unit.

If a valve section is used as the test object, the minimum number of valve levels in the test section shall be agreed by the purchaser. In such cases, additional tests to verify the insulation between different parts of the complete valve may be needed and shall be agreed between purchaser and supplier.

The coolant shall be in a condition that represents service conditions except for flow rate which can be reduced. If any object external to the structure is necessary for proper representation of the stresses during tests, it shall be included or simulated in the test. The proximity of adjacent earth potential surfaces (equipment or building infrastructure) shall be assessed, and representation included where appropriate. For clearances that are significantly greater than those determined by insulation coordination requirements, e.g. clearances driven instead by access requirements, then consideration may be given to omit earth potential surfaces in these locations.

## 9.3 Test methods

### 9.3.1 General

VSC valves differ from line commutated converter (LCC) valves and other high-voltage equipment in several aspects. One of the most important differences is that the converter contains very large capacitive energy storage. For valves of the controllable voltage-source type, the storage is an integral part of the valve while for switch-type valves it is closely connected to the valve. The second major difference is the active voltage control at individual VSC valve levels. As a result of these characteristics, the test method used in LCC valve dielectric tests cannot be applied to such valves.

Performing the valve dielectric test presents considerable practical difficulties on controllable voltage source type VSC valves because of the high current drawn by those in-built capacitances. The very limited current ratings of available test supplies in practical high-voltage test laboratories mean that, without modifying the test object, an excessively long time is required to charge up the capacitance of the test object to the required voltage during the AC–DC voltage test, and this unreasonably over-stresses the test object. The very large capacitance

also makes measurement of partial discharges impossible, and impulse voltages between the valve terminals do not occur on a deblocked valve during operation. For this reason, two valve dielectric test methods, on the same principle, are defined for controllable voltage source type valve dielectric tests. Supplier can use either of them for the valve dielectric test.

Valve dielectric test on switch type VSC valves shall follow Method one.

### **9.3.2 Method one**

Temporary substitution of a special test capacitor with reduced capacitance but the same housing as the original capacitor in each valve level is necessary if this method is used in test of controllable voltage source type valves. This test capacitor shall allow a test voltage build-up across the test object during test.

In addition, it may be necessary to disable gate electronics or other auxiliary circuits in this test or provide independent means for powering them, in order to prevent interference with partial discharge measurement, for example, from gate unit power supply circuits.

When gate electronics or other auxiliary circuits are disabled for the 10 s test, the active voltage control function, if any, provided by gate electronics or other auxiliary circuits on each IGBT level may be represented by other means, for example, high resistance shunt resistors across test IGBT levels for appropriate voltage sharing.

If it is not possible to disable gate electronics or other auxiliary circuits in this test and interference can be proven to be caused by electronics circuit, then this interference may be deducted from measurement.

### **9.3.3 Method two**

Tests on individual valve sections are acceptable if the supplier can demonstrate that the voltage distribution between valve sections under test conditions, is representative of the voltage distribution within a complete valve in service.

In case of a controllable voltage source type VSC valve the active control of sub-module capacitor voltages equalises the voltage distribution across the complete valve. The in-built capacitances react as constant voltage sources with very low internal impedance. An impulse voltage will drive a high current, the resulting change of the sub-module voltage follows the tolerance of the in-built capacitor.

Valve dielectric test is done in single steps. Step one focuses on the component level and step two on the valve or valve section.

In step one, valve levels are tested independently. Insulation and partial discharge tests with AC, DC and/or combined AC–DC voltage shall be performed on sub-component level (e.g. without power module electronics activated and without capacitor) or on full submodule level. The aim is to demonstrate both the insulation withstand capability for every single sub-component and freedom from partial discharge for every sensitive point within the valve level.

As stated, the even distribution by actively controlled sub-module voltages allows to perform the dielectric test between valve terminals and also between tiers with adjusted test voltage levels.

Consequently, in step two, the test is done with submodule levels short-circuited, interconnections between adjacent submodules removed, and valve or valve section voltage distribution controlled by an external grading circuit, for example a resistor array, capacitor array or RC array.

The inter-tier structure represents a typical section of the tower structure. Essential components of the tower structure are exposed to the specified voltage values and shapes. Test of air clearance and creepage distances of tier insulators and capacitor's housing, fibre optics including their ducts, water cooling pipes and mechanical design. AC, DC (both including PD measurement) and impulse voltages will be tested. Additional safety margin to the specific test voltages is possible and used, e.g. atmospheric correction to the specific test voltages can be added.

NOTE The addition of external grading networks could modify the profile of the test object such that it is not fully representative of in-service equipment. Practically this could lead to difficulties in performing the test, especially in determining sources of partial discharge. Hence an alternative method can be used instead of fitting grading networks, where each insulation gap is tested independently at voltages relevant to each particular gap. This can be achieved by a combination of either removing interconnections and/or shorting out relevant parts of the test object, then applying the equivalent scaled voltage across the gap. The test is performed once for each design of insulation gap e.g. inter-tier, inter-stack, inter-sub-module. Where appropriate in the design, the test set-up also needs to consider diagonal gaps (gaps between sub-modules belonging to different stacks and different tiers, one above the other).

## 9.4 Test requirements

### 9.4.1 Composite AC-DC voltage test

This test reproduces the composite AC-DC voltage resulting from certain converter or system faults and in steady-state operation. The test consists of a short-duration test and a long-duration test.

In this test, a capacitor can be used in conjunction with an AC test voltage source to produce a composite AC-DC voltage waveform. Depending on the converter topology, the capacitor could be an integral part of the valve, or it could be a separate item (part of the test circuit, not part of the test object).

Alternatively, a separate DC voltage source could be used to substitute the capacitor.

Starting from a voltage not higher than 50 % of the 10 s test voltage, the voltage shall be raised to the specified 10 s test level as fast as possible, reduced to the specified 3 h test voltage, kept constant for 3 h and then reduced to zero.

For AC PD (partial discharge) measurement, the level of partial discharge recorded during the last minute of the 3 h test shall be less than 200 pC, provided that the components which are sensitive to partial discharge in the valve have been separately tested. For DC PD measurement the recording time shall be the last hour of the 3 h test. The number of pulses exceeding 300 pC shall not exceed 15 per minute, averaged over the record period. Of these, no more than seven pulses per minute shall exceed 500 pC, no more than three pulses per minute shall exceed 1 000 pC and no more than one pulse per minute shall exceed 2 000 pC.

NOTE 1 If an increasing trend in the rate or magnitude of partial discharge is observed, the test duration might be extended by mutual agreement between the purchaser and supplier.

NOTE 2 It may be necessary to disable gate electronics or other auxiliary circuits in this test, or provide independent means for powering them, in order to prevent interference with partial discharge measurement, for example, from gate unit power supply circuits.

The valve test voltages have a sinusoidal waveshape superimposed on a DC level.

The valve 10 s test voltage  $U_{tv1}$  shall be determined in accordance with the following:

$$U_{tv1} = (k_{c1} \times U_{tac1} \times \sin(2\pi ft) + U_{tdc1}) \times k_0 \times k_g$$

where

- $U_{tac1}$  is the peak value of the AC component of maximum temporary overvoltage appearing between the terminals of the valve, calculated from the peak-to-peak valve voltage divided by two;
- $U_{tdc1}$  is the maximum of 1 s average value of the DC component of voltage appearing between the terminals of the valve at faults, after taking into account of voltage limiting effect of DC pole surge arrester;
- $k_{c1}$  is the voltage step overshoot factor related to one output voltage step of the converter, under the condition consistent with that used to define  $U_{tac1}$ . For a MMC or CTL type converter the voltage step overshoot factor relates to the overshoot factor of one cell or submodule;
- $k_0$  is a test scaling factor according to 4.3.2;
- $k_g$  is a test safety factor;
- $k_g = 1,1$ ;
- $f$  is the test frequency (50 Hz or 60 Hz depending on test facilities).

NOTE 3 The conditions leading to the highest values of  $U_{tac1}$  and  $U_{tdc1}$  might not occur simultaneously. When performing a combined AC–DC test it is important to use self-consistent conditions that lead to the worst combined valve stress, in order to avoid over-stressing, the test object. For the 10 s test, the most important parameter is generally the peak of the combined voltage.

The valve 3 h test voltage  $U_{tv2}$  shall be determined in accordance with the following:

$$U_{tv2} = U_{tac2} + U_{tdc2}$$

$$U_{tac2} = U_{max-cont} \times \sin(2\pi ft) \times k_{c2} \times k_0 \times k_g$$

$$U_{tdc2} = U_{dmax} \times k_0 \times k_g$$

where

- $U_{max-cont}$  is the peak value of the AC component of steady-state voltage appearing between the terminals of the valve, calculated from the peak-to-peak valve voltage divided by two;
- $U_{dmax}$  is the maximum value of the DC component of the steady-state operating voltage between the terminals of the valve, calculated from the voltage between the DC terminals of the converter divided by two;
- $k_{c2}$  is the voltage step overshoot factor related to one output voltage step of the converter, under the condition consistent with that used to define  $U_{tac2}$ . For a MMC or CTL type converter the voltage step overshoot factor relates to the overshoot factor of one cell or submodule;
- $f$  is the test frequency (50 Hz or 60 Hz depending on test facilities).

#### 9.4.2 Alternative tests (Method 2 only)

##### 9.4.2.1 General

When method two is adopted, the composite AC-DC voltage test specified in the previous sub-clause may be replaced, during step two, by an AC voltage test and an DC voltage test performed separately.

NOTE It is generally only possible to apply the alternative test method when testing passive insulation gaps, since the freewheel diodes in the valve will normally prevent the application of a pure AC voltage.

### 9.4.2.2 Valve AC voltage test

The test consists of applying the specified test voltages  $U_{tac1}$  and  $U_{tac2}$  for the specified duration.  $U_{tac1}$  and  $U_{tac2}$  have sinusoidal waveshapes with a frequency of 50 Hz or 60 Hz, depending on the test facility.

The test will be done with a short duration of 10 s and a long duration of 30 min.

Starting from a voltage not higher than 50 % of the 10 s test voltage, the voltage shall be raised to the specified 10 s test level, kept constant for 10 s, reduced to the specified 30 min test voltage, kept constant for 30 min and then reduced to zero. Before the end of the 30 min test, the level of partial discharge shall be monitored and recorded over a 1 min period. If the value of partial discharge is below 200 pC, the design may be accepted unconditionally. If the value of partial discharge exceeds 200 pC, the test results shall be evaluated.

The RMS value of valve 10 s AC test voltage,  $U_{tac1}$ , and 30 min AC test voltage,  $U_{tac2}$ , shall be determined in accordance with the following:

$$U_{tac1} = \frac{U_{vp1}}{\sqrt{2}} \times k_{c1} \times k_0 \times k_{10}$$

$$U_{tac2} = \frac{U_{vp2}}{\sqrt{2}} \times k_{c1} \times k_0 \times k_{10}$$

where

$U_{vp1}$  is the peak value of the maximum temporary overvoltage across the valve;

$U_{vp2}$  is the peak value of the maximum steady-state voltage across the valve;

$k_{c1}$  is the voltage step overshoot factor related to one output voltage step of the converter, under the condition consistent with that used to define  $U_{tac1}$ . For a MMC or CTL type converter the voltage step overshoot factor relates to the overshoot factor of one cell or submodule;

$k_{c2}$  is the voltage step overshoot factor related to one output voltage step of the converter, under the condition consistent with that used to define  $U_{tac2}$ ; For a MMC or CTL type converter the voltage step overshoot factor relates to the overshoot factor of one cell or submodule;

$k_0$  is the test scaling factor according to 4.3.2;

$k_{10}$  is a test safety factor;

$k_{10} = 1, 10$ .

### 9.4.2.3 Valve DC voltage test

The test consists of applying the specified test voltages  $U_{tdc1}$  and  $U_{tdc2}$  for the specified duration.

The test will be done with a short duration of 10 s and a long duration of 3 h.

Starting from a voltage not higher than 50 % of 10 s test voltage, the voltage shall be raised to the specified 10 s test level as fast as possible, reduced to the specified 3 h test voltage, kept constant for 3 h and then reduced to zero.

For DC PD measurement the recording time shall be the last hour of the 3 h test. The number of pulses exceeding 300 pC shall not exceed 15 per minute, averaged over the record period. Of these, no more than seven pulses per minute shall exceed 500 pC, no more than three pulses per minute shall exceed 1 000 pC and no more than one pulse per minute shall exceed 2 000 pC.

The valve 10 s DC test voltage,  $U_{tdc1}$ , and 3 h DC test voltage,  $U_{tdc2}$ , shall be determined in accordance with the following:

$$U_{tdc1} = U_{vp1} \times k_0 \times k_{10}$$

$$U_{tdc2} = U_{vp2} \times k_0 \times k_{10}$$

### 9.4.3 Valve impulse tests

#### 9.4.3.1 General

The following shall be taken into account during valve impulse tests.

- a) For some applications, for instance no overhead line is present in DC side and the busbar between phase reactor and valves is completely protected against direct lightning strike in AC side or in topologies, where the valve acts as a controllable voltage source with its own inbuilt DC capacitance, the valve impulse tests are less important since the valves do not see impulses at an amplitude which could be decisive in the electric performance of valves. Impulse tests in such applications can be omitted.

NOTE 1 Unless all equipment between the transformer and DC reactors are completely enclosed, the possibility of lightning striking an exposed section of busbar adjacent to the valve (for example between the valve reactors and the valve) cannot be excluded. However, taking into account the small area affected and the low probability of having a lightning impulse of magnitude low enough to evade the shielding, this event is extremely unlikely to occur in practice and can therefore be ignored.

NOTE 2 The emergency turn-off of the IGBT valve while it is carrying current (IGBT overcurrent turn-off test: Clause 10) can also generate a transient overvoltage between the terminals of the valve. Part of this overvoltage appears directly across the valve levels and is covered by the IGBT overcurrent turn-off test but there might, in addition, be a transient voltage developed across the stray inductance of the busbars through the valve which might need to be considered in the assessment of impulse voltage stresses between terminals.

- b) The impulse test will be applied only in one polarity which corresponds to the polarity of valve withstand voltage.
- c) If the valve impulse withstand levels are equal to or less than the valve AC-DC test level, it is deemed that the valve AC-DC test can cover the impulse tests and consequently the impulse tests can be omitted.

#### 9.4.3.2 Valve switching impulse test

A standard switching impulse voltage waveshape in accordance with IEC 60060 shall be used.

The test shall comprise three applications of switching impulse voltages of specified amplitude on the valve.

The valve switching impulse test withstand voltage  $U_{tsv}$  shall be determined in accordance with the following:

- Valve with valve arrester protection:

$$U_{tsv} = U_{SIPL\_v} \times k_0 \times k_{11}$$

where

$U_{\text{SIPL}_v}$  is the switching impulse protective level of valve arrester or protection level derived from AC and DC side arresters;

$k_0$  is a test scaling factor according to 4.3.2;

$k_{11}$  is a test safety factor;

$k_{11} = 1,10$ .

- Valve without valve arrester protection:

This test is intended to verify the valve insulation when the valve is not directly protected by surge arresters.

$$U_{\text{tsv}} = U_{\text{cms}} \times k_0 \times k_{12}$$

where

$U_{\text{cms}}$  is the switching impulse prospective voltage across valve terminals according to system insulation coordination studies;

$k_0$  is a test scaling factor according to 4.3.2;

$k_{12}$  is a test safety factor;

$k_{12} = 1,15$ .

The valve shall withstand the test voltage without switching or insulation breakdown.

#### 9.4.3.3 Valve lightning impulse test

A standard lightning impulse voltage waveshape in accordance with IEC 60060 shall be used.

The test shall comprise three applications of impulse voltages of specified amplitude on the valve.

The valve lightning impulse withstand voltage  $U_{\text{tlv}}$  shall be determined in accordance with the following.

- Valve with valve surge arrester protection:

$$U_{\text{tlv}} = U_{\text{LIPL}_v} \times k_0 \times k_{13}$$

where

$U_{\text{LIPL}_v}$  is the lightning impulse protective level of the valve arrester or protection level derived from AC and DC side arresters;

$k_0$  is a test scaling factor according to 4.3.2;

$k_{13}$  is a test safety factor;

$k_{13} = 1,10$ .

- Valve without valve surge arrester protection:

This test is intended to verify the valve insulation when the valve is not directly protected by surge arresters.

$$U_{\text{tlv}} = U_{\text{cml}} \times k_0 \times k_{14}$$

where

$U_{\text{cml}}$  is the lightning impulse prospective voltage across valve terminals according to system insulation coordination studies;

$k_0$  is a test scaling factor according to 4.3.2;

$k_{14}$  is a test safety factor;

$k_{14} = 1,15$ .

The valve shall withstand the test voltage without switching or insulation breakdown.

## 10 IGBT overcurrent turn-off test

### 10.1 Purpose of test

The principal objective is to check the adequacy of the VSC valve design, especially the IGBT, and the associated electrical circuits with regard to current and voltage stresses at turn-off in the event of certain short circuit faults or misfiring events.

The test shall replicate the worst combination of voltage stress and instantaneous junction temperature, based on conditions that represent the most unfavourable tolerance settings of the monitoring/protection circuits. Depending on the control and protection strategy more than one test may be required in order to reproduce all relevant stresses.

General requirements related to the test circuit and the representation of DC capacitor, loop stray inductance, etc. are as stated in 6.3.

### 10.2 Test object

The test object is as described in 6.2. However, it is also necessary to represent certain protection or monitoring circuits if these are essential for the detection of an overcurrent event. For controllable voltage source type VSC valves, this test may also be performed on valve level.

### 10.3 Test requirements

The test consists of operating the test object to thermal equilibrium under the conditions which lead to the highest steady-state junction temperature of the relevant IGBT (see 6.4) and then initiating an overcurrent event. The control and protection system then detects the overcurrent and suppresses the overcurrent by turning off the IGBTs at a current below the maximum safe turn-off limit.

For switch type valve, the test voltage  $U_{\text{tpv}2}$  shall be determined as follows:

$$U_{\text{tpv}2} = U_{\text{dtemp}} \times k_n \times k_{15}$$

where

$U_{\text{dtemp}}$  is the maximum temporary DC overvoltage of the valve, including ripple;

$k_n$  is a test scaling factor according to 4.3.1;

$k_{15}$  is a test safety factor;

$k_{15} = 1,05$ .

For controllable voltage source type valve, the test voltage  $U_{\text{tpvl}2}$  per valve level shall be determined as follows:

$$U_{\text{tpvl}2} = U_{\text{ctemp}} \times k_{15}$$

where

$U_{\text{ctemp}}$  is the maximum temporary DC overvoltage per valve level, including ripple;

$k_{15}$  is a test safety factor;

$k_{15} = 1,05$ .

The rate-of-rise  $di/dt$  of the overcurrent shall be taken into consideration in the test to show that the control and protection system is able to turn-off the IGBTs fast enough before maximum safe turn-off limits are reached. This consideration can be shown either by increasing the rate-of-rise  $di/dt$  of the test current waveform if the test circuit allows for it or by increasing the protection level by taking into consideration of the total inherent delay in the control and protection system.

## 11 Short-circuit current test

### 11.1 Purpose of tests

The principal objective is to check the adequacy of the devices, especially the diodes, any additional components used to protect the diodes (such as bypass thyristors) and the associated electrical circuits with regard to current stresses under specified short circuit conditions, such as short-circuit fault at DC side, until the control and protection circuit breaks the fault current. The VSC valves shall be designed to withstand the short circuit overcurrent for the number of cycles needed to open the main AC circuit breaker, without any failure or damage in the equipment, considering also that a possible recovery voltage could appear. Valve electronics shall normally be energized for the part of the fault event where any actions are taken by it. For example, when blocking the IGBTs or turning on protective devices such as bypass thyristors. For other parts of the fault event, it is not necessary to energize the valve electronics.

### 11.2 Test object

The test object is as described in 6.2.

### 11.3 Test requirements

The test consists of operating the test object to thermal equilibrium under the conditions which lead to the highest steady-state junction temperature of the relevant semiconductor component (see 6.4) and then initiating a fault current event. In order to define the maximum junction

temperature rise of the IGBTs and the diodes, all the possible overload conditions (in terms of amplitude and duration) shall be taken into consideration.

The fault current amplitude, duration and the number of cycles shall be the maximum values expected in the actual field operation.

Alternative test waveform may be used, provided that the amplitude and energy accumulation are representative of those in fault conditions.

Where the test object experiences a recovery voltage between cycles of fault current, then this recovery voltage, including commutation overshoot where applicable, shall also be reproduced during the test. A test safety factor of 1,05 is applied to the recovery voltage.

Considering the difficulty in test laboratory to perform this test in generation of the recovery voltage between cycles of fault current, this test may, subjected to the agreement between purchaser and supplier, be performed on component level.

## **12 Tests for valve insensitivity to electromagnetic disturbance**

### **12.1 Purpose of tests**

The principal objective is to demonstrate the insensitivity of the valve to electromagnetic interference (electromagnetic disturbance) arising from voltage and current transients generated within the valve and imposed on it from the outside. The sensitive elements of the valve are generally electronic circuits used for controlling, protection and monitoring of the valve levels.

Generally, the valve insensitivity to electromagnetic disturbance can be checked by monitoring the valve during other type tests. Of these, the valve maximum continuous operating duty test and maximum temporary overload operating duty test (see 6.4 and 6.5), the valve impulse tests (see 9.4.3) and the IGBT overcurrent turn-off test (see Clause 10) are the most important.

The tests shall demonstrate that:

- a) out-of-sequence or spurious switching of IGBT does not occur;
- b) the electronic protection circuits installed in the valve operate as intended;
- c) false indication of valve level faults or erroneous signals sent to the converter control and protection systems by the valve base electronics, arising from receipt of false data from the valve monitoring circuits, does not occur.

NOTE For this document, tests to demonstrate valve insensitivity to electromagnetic disturbance apply only to the VSC valve and that part of the signal transmission system that connects the valve to earth. Demonstration of the insensitivity to electromagnetic disturbance of equipment located at earth potential and characterization of the valve as a source of electromagnetic disturbance for other equipment are not within the scope of this document.

### **12.2 Test object**

Generally, the test object is the valve or valve sections as used for other tests.

When insensitivity to electromagnetic disturbance arising from coupling between adjacent valves in a MVU is to be demonstrated, two approaches are acceptable as defined in 12.3. In this case, the test object will be a separate valve or valve section according to the approach adopted.

## 12.3 Test requirements

### 12.3.1 General

When demonstrating insensitivity to electromagnetic disturbance arising from coupling between adjacent valves of a MVU, the test requirements depend on which of the two recommended approaches is adopted.

The specific geometric arrangement to be used and the magnitude of the forward voltage for the electromagnetic disturbance test object shall be representative of the service conditions.

### 12.3.2 Approach one

Approach one is to simulate the source of electromagnetic disturbance directly as part of a test set-up. Such a test set-up will require more than one valve or valve section in order to check for interaction between them. The geometric arrangements of the source of the electromagnetic disturbance with respect to the valve under test shall be as close as possible to the service arrangement (or worse from an electromagnetic disturbance point of view). The electronics of the electromagnetic disturbance test object shall be energized. Those parts of the valve base electronics that are necessary for the proper exchange of information with the electromagnetic disturbance test object shall be included.

### 12.3.3 Approach two

Approach two is to determine the intensity of electromagnetic fields under worst operational conditions, either from theoretical considerations or by measurements. In a second step, these fields are simulated by a test circuit which generates correct (or worse) electromagnetic radiation at the respective frequencies. A valve section is then exposed to the fields generated by the test source.

An essential prerequisite to approach two is the determination of the dynamic field strength and direction at key locations in the valve. This can generally be obtained from search coil measurements taken during firing tests on a single valve. Alternatively, the field can be predicted from three-dimensional field modelling programs. A valve section shall then be tested using a separate field coil to produce field intensity, frequency content and direction which is at least as severe as the predicted values.

The following conditions for the valve section under test shall be met:

- the valve section shall have operational voltage (proportionally scaled) between its terminals and be forward biased at the time of energization of the field coil;
- the electronics of the valve section under test shall be energized;
- those parts of the valve base electronics that are necessary for the proper exchange of information with the valve section shall be included.

### 12.3.4 Acceptance criteria

The criteria for acceptance for both approaches one and two shall be as defined in 12.1.

## 13 Tests for dynamic braking valves

In some VSC HVDC schemes, but particularly where the HVDC system is exporting power from a small islanded AC system with little or no load (for example an offshore wind farm) the HVDC system may be required to include a dynamic braking system, for example as a chopper connected to the DC terminals of the VSC system. The function of the dynamic braking system is to absorb and dissipate the power generated in the islanded AC system during faults in the receiving-end AC system, typically for durations of 1 s to 2 s.

There are several possible ways of implementing such a dynamic braking system but the valves in this system will, in general, be of similar design to the main VSC valves used for power transmission.

The dynamic braking valves may require type tests, for which the requirements given in the preceding Clauses 6 to 12 are generally applicable; however, the dynamic braking valves generally require only a sub-set of the type tests applicable to VSC valves.

The dynamic braking valve normally remains in the standby state but is required to operate and carry current for short durations when the receiving-end AC system suffers a fault. The dielectric test conditions are therefore similar to those for the VSC valve but the operational test conditions only need to be applied for short durations.

NOTE 1 Subclause 4.1.1, *Evidence in lieu*, is applicable when the same valve design is used in both VSC valve and dynamic braking valve.

NOTE 2 For dynamic braking valve with a design of distributed in-built resistors or energy absorber element the operational duties can be done on site, due to the power limitation of test laboratory.

## 14 Production tests

### 14.1 General

This clause covers tests on assemblies of components that are parts of valves, valve sections, or auxiliary circuits for their protection, control and monitoring. It does not cover tests on individual components that are used within the valve, the valve support, or valve structure.

For valve component fault tolerance, information is provided in Annex B.

### 14.2 Purpose of tests

The purpose of the production tests is to verify proper manufacture by demonstrating that:

- all components and subassemblies used in the valve have been correctly installed in accordance with the design;
- the valve equipment functions as intended and predefined parameters are within prescribed acceptance limits;
- the valve sections and IGBT-diode pair levels (as appropriate) have adequate voltage withstand capability;
- consistency and uniformity in production is achieved.

### 14.3 Test object

All valve sections or parts thereof manufactured for the project shall be subjected to the routine production tests. The tests may be performed on valve sections or individual levels as appropriate to the design and available test facilities.

### 14.4 Test requirements

Uniformity in the specified production tests of different suppliers is unnecessary. The production tests shall take into account the special design characteristics of the valve and its components, the extent to which the components are tested prior to assembly, and the particular manufacturing procedures and techniques are involved. In this clause, only production test objectives are given.

In all cases, the supplier shall submit, for approval by the purchaser, a detailed description of the test procedures proposed to meet the production test objectives.

The minimum requirements for routine production tests are listed in 14.5. The order in which the tests are listed implies neither ranking of importance nor the order in which the tests shall be performed.

In some cases, it may be necessary to perform production sample tests on complete assemblies in addition to the routine tests, for example when modifications are introduced in the course of production. The nature and extent of such additional tests shall be agreed on a case-by-case basis.

## **14.5 Production test objectives**

### **14.5.1 Visual inspection**

To check that all materials and components are undamaged and are correctly installed in accordance with the latest approved revision of the production documentation.

### **14.5.2 Connection check**

To check that all the main current-carrying connections have been made correctly.

### **14.5.3 Voltage-grading circuit check**

To check the grading circuit parameters and thereby ensure that voltage division between series-connected levels will be correct for applied voltages from DC to impulse waveshapes, if applicable.

### **14.5.4 Control, protection and monitoring circuit checks**

To check the function of any control, protection or monitoring circuits that form an integral part of the valve, such as IGBT gate drive circuits and any local protection or monitoring circuits.

If type tests and tests of the effectiveness of fuse protection are considered to be necessary, they shall be specified separately with conditions for tests.

### **14.5.5 Voltage withstand check**

To check that the valve components can withstand the voltage corresponding to the maximum value specified for the valve. The checks shall include AC–DC test voltage and switching impulse as applicable.

### **14.5.6 Turn-on / turn-off check**

To check that the IGBT(s) in each valve level turns on and turn off correctly in response to switching commands.

### **14.5.7 Pressure test**

To check that there are no coolant leaks.

## 15 Presentation of type test results

The type test report shall be issued in accordance with the general guidelines as given in ISO/IEC 17025, and shall include the following information:

- name and address of the laboratory and location where the tests were carried out;
- name and address of the purchaser;
- unambiguous identification of the test object, including type and ratings, serial number and any other information aimed to identify the test object;
- dates of performance of the tests;
- description of test circuits and test procedures used for the performance of the tests;
- reference to the normative documents and clear description of deviations, if any, from procedures stated in the normative documents;
- description of measuring equipment and statement of the measuring uncertainty;
- test results in the form of tables, graphs, oscillograms, and photographs as appropriate;
- description of equipment or component failure;
- other data/statement/description as intention of evidence in lieu.

## **Annex A** (informative)

### **Overview of VSC converters in HVDC power transmission**

#### **A.1 General**

Voltage sourced converter (VSC) valves are an evolving technology, in which different manufacturers may have substantially different technological approaches and where, in the future, there may be new circuit topologies that have not yet been described.

Voltage sourced converters for HVDC differ fundamentally from conventional HVDC converters (which are line commutated converters) in that in order to reverse the direction of power flow, it is the direction of direct current, not the polarity of direct voltage, that is reversed. Smoothing of the direct voltage is performed by a large DC capacitor, which plays an analogous role to the DC inductor (which may partly be fulfilled by the inductance of the DC transmission system and the leakage inductance of the converter transformers) in a conventional HVDC project.

In fact, in a great many respects, the role of voltage in a VSC valve is equivalent to that of current in a conventional HVDC thyristor valve, and vice-versa.

A detailed treatment of all possible VSC valve technologies is far beyond the scope of this standard. The purpose of this annex is simply to present a brief overview of the main differences between VSC and conventional HVDC thyristor valves, and of the main types of VSC valve, insofar as they affect the criteria for testing such valves.

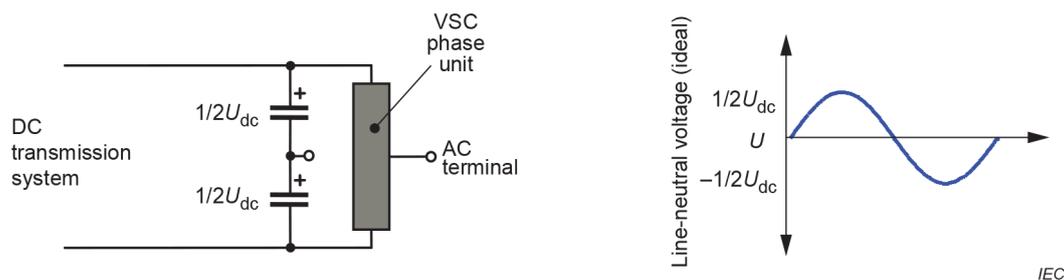
This annex is intended to give an overview of the main converter technologies known at the time of writing. However, it is not intended to limit or constrain in any way the types of technology that can be utilized.

For determination and evaluation of the VSC valve losses, information is provided in Annex C.

#### **A.2 VSC basics**

All voltage sourced converters aim to synthesize, from the DC capacitor voltage, an approximately sinusoidal voltage at the AC terminals. However, in practice, the output voltage of the VSC cannot be perfectly sinusoidal but instead consists of a number of discrete steps of voltage, or "output levels". The term "level" here refers to a discrete output voltage level and should not be confused with the term "VSC valve level" which refers to a physical building-block of the valve, for example an individual IGBT and associated components.

For power systems, 3-phase converters are almost always used, but in considering the number of output levels of a converter, each "phase unit" of the converter is normally considered independently. The number of output levels refers to the number of discrete states in which the line-to-neutral output voltage of a phase unit can exist (Figure A.1). It is important to note that an  $n$ -level converter will have  $(2n-1)$  possible values of line-to-line voltage.

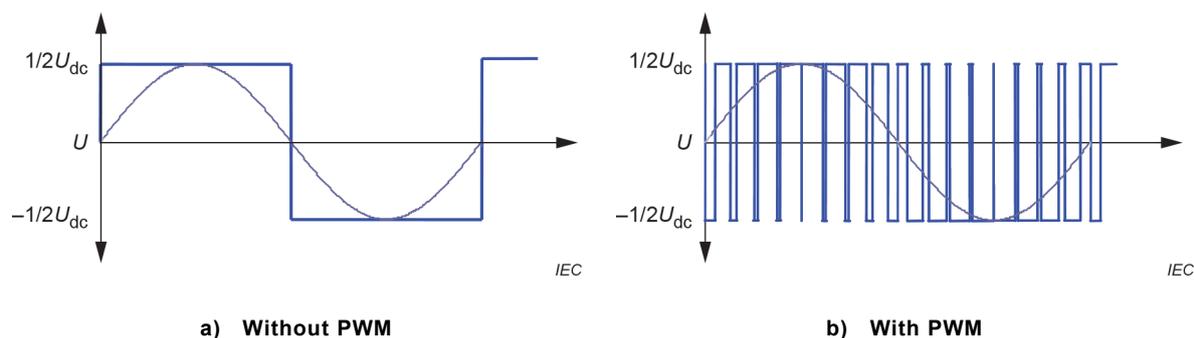


**Figure A.1 – A single VSC phase unit and its idealized output voltage**

In the simplest possible VSC topology, the "two-level converter", the AC output voltage of each phase arm (with respect to the midpoint of the DC capacitor, which is normally earthed) has only two possible states:  $+\frac{1}{2}U_{dc}$  and  $-\frac{1}{2}U_{dc}$ .

If the VSC valves in this phase arm are switched only at fundamental frequency, the resulting AC output voltage waveform is an extremely poor approximation to sinusoidal. Such a waveform would be totally unacceptable in a power system.

However, by switching the valves ON and OFF more than once per fundamental frequency cycle and employing pulse width modulation (PWM) it is possible to obtain an output voltage that is, after filtering, reasonably sinusoidal. Figure A.2 illustrates both cases.

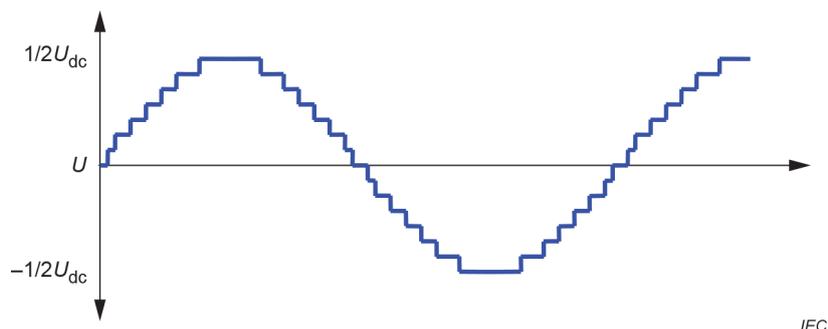


**Figure A.2 – Output voltage of a VSC phase unit for a 2-level converter**

PWM is an established technique in converters for motor drives, but carries the disadvantage of much increased switching losses.

An alternative to PWM is to use a more complex converter with a higher number of output levels – a "multi-level converter". There are a number of 3-level or 5-level converter topologies available, but in a power system application these too will generally still require PWM in order to obtain sufficiently low harmonics.

However, there are some converter topologies that are capable of producing much higher numbers of output levels, such that even without using PWM, the output voltage waveform is highly sinusoidal and little or no filtering is required. Figure A.3 shows the output voltage of a 15-level converter, which can be seen to be reasonably sinusoidal. In practice, higher numbers of levels than 15 would normally be used for HVDC transmission applications.



**Figure A.3 – Output voltage of a VSC phase unit for a 15-level converter, without PWM**

### A.3 Overview of main types of VSC valve

Unlike conventional HVDC thyristor valves, which have evolved towards a largely common overall design, VSC valves are at an early stage in their technological evolution and exist in a number of forms.

At the time of writing of this standard, the VSC valves that are available commercially fall into two basic categories.

- Switch type VSC valves. These valves, like their thyristor counterparts, function only as a controllable switch, with only two permanent states: ON and OFF. In converters based on this topology, the DC capacitors are completely separated from the valves and can be tested in isolation.
- Controllable voltage source type VSC valves. In valves of this type, the DC capacitors form an integral part of the valve and cannot conveniently be separated from it for testing purposes.

Certain type tests need to be performed in a quite different way depending on which of the above categories the valve falls into.

Some other categories of "hybrid" VSC valve have also been described in literature and exhibit a mixture of characteristics from the two categories above; however at the time of writing, development work in these topologies is in the relatively early stages and these topologies are not yet commercially available.

### A.4 Switch type VSC valve

#### A.4.1 General

VSC valves of this type bear a close apparent resemblance to conventional thyristor valves, in that they consist of a large number of series connected IGBT devices which are switched simultaneously. As with conventional thyristor valves, simultaneous switching of the series connected IGBTs is vital. Redundancy can be provided in the same way as for an LCC thyristor valve, by providing a few additional IGBT devices in series and either ensuring that the IGBTs are of a special type with short-circuit failure mode or are equipped with a parallel-connected shorting switch.

Valves of this type are normally used with converters with a relatively low number of output levels. To compensate for the low number of output levels, such converters usually use pulse width modulation (PWM) to achieve a good approximation of a sinusoidal output voltage.

Some of the more common converter topologies that can be used with this type of VSC valve are described below.

### A.4.2 2-level converter

In this, the simplest type of VSC, each VSC phase unit comprises just two VSC valves connected in series and sharing an AC terminal. The two valves are switched alternately such that, at any given time, either one or the other valve is conducting, but never both. (In practice, there is usually a slight dead-time or "underlap" between the two valves in order to prevent a "shoot-through" or simultaneous conduction of the two valves in series).

The circuit topology of this converter is very simple (see Figure A.4) and requires very little explanation. When V1 is conducting, the AC terminal is connected to the upper DC terminal and therefore produces an output voltage of  $+\frac{1}{2}U_{dc}$ . When V2 is conducting, the AC terminal is connected to the lower DC terminal and therefore produces an output voltage of  $-\frac{1}{2}U_{dc}$ .

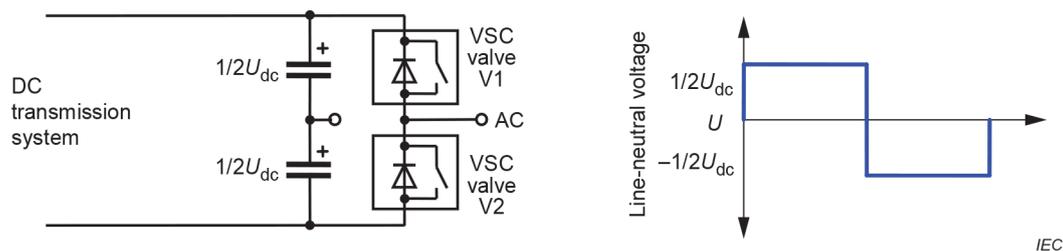


Figure A.4 – Basic circuit topology of one phase unit of a 2-level converter

### A.4.3 Multi-level diode clamped converter

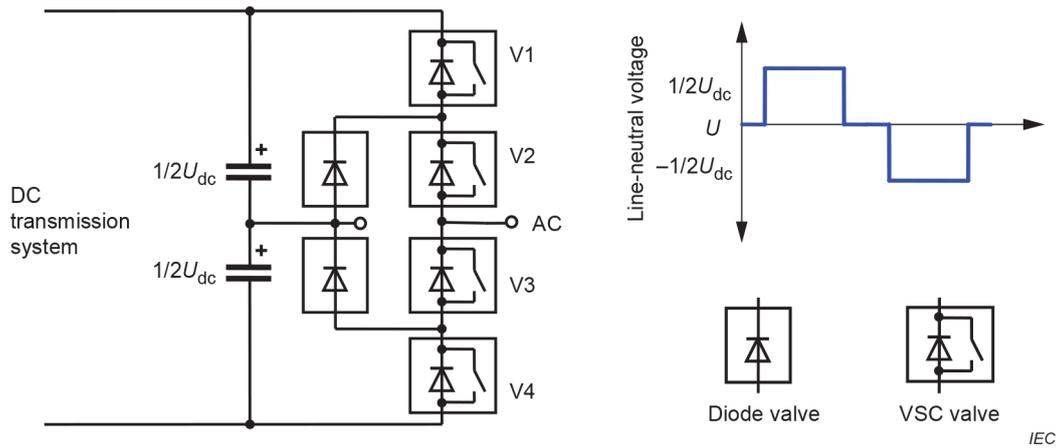
In this family of converters, the DC capacitor is sub-divided into a number of discrete stages connected in series, more than two IGBT valves are provided per phase unit and diode valves are used to connect between various intermediate points in the DC capacitor and in the phase unit.

In the simplest version of this circuit (see Figure A.5), the three-level converter, each phase unit contains four independent VSC valves connected in series. The DC capacitor is subdivided into two series-connected units (as it frequently is for a 2-level converter). The AC terminal is connected to the terminal between V2 and V3, and the  $\frac{1}{4}$  and  $\frac{3}{4}$  points (between valves V1/V2 and V3/V4) are connected to the DC midpoint via diode valves.

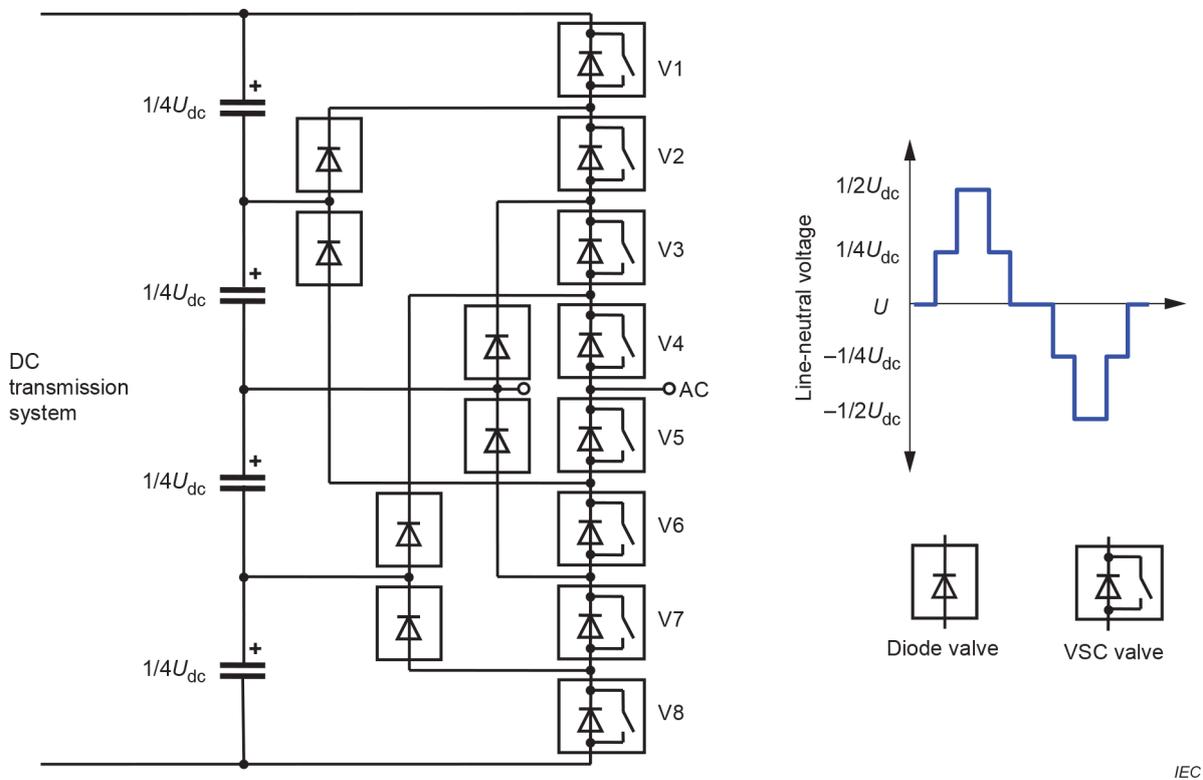
With this converter, three output states are possible from a single phase unit. When valves V1+V2 are conducting, the AC terminal is connected to the upper DC terminal and therefore produces an output voltage of  $+\frac{1}{2}U_{dc}$ . When valves V3+V4 are conducting, the AC terminal is connected to the lower DC terminal and therefore produces an output voltage of  $-\frac{1}{2}U_{dc}$ . When valves V2+V3 are conducting, the AC output voltage is "clamped" at the DC midpoint voltage by the diode valves.

The same principle can be extended to higher numbers of levels by further subdividing the DC capacitor and using more VSC and diode valves. In a 5-level converter, the DC capacitor is subdivided into four discrete stages, and there are eight VSC valves and six diode valves (see Figure A.6). In this circuit, the valves are switched in adjacent groups of four, for example V1+V2+V3+V4 gives an output voltage of  $+\frac{1}{2}U_{dc}$ , V2+V3+V4+V5 gives an output voltage of  $+\frac{1}{4}U_{dc}$ , etc.

It can be seen that as the number of output levels increases, the complexity of the circuit increases disproportionately. This is made worse by the fact that not only the number, but also the voltage rating of the diode valves increases rapidly with the number of output levels.



**Figure A.5 – Basic circuit topology of one phase unit of a 3-level diode-clamped converter**

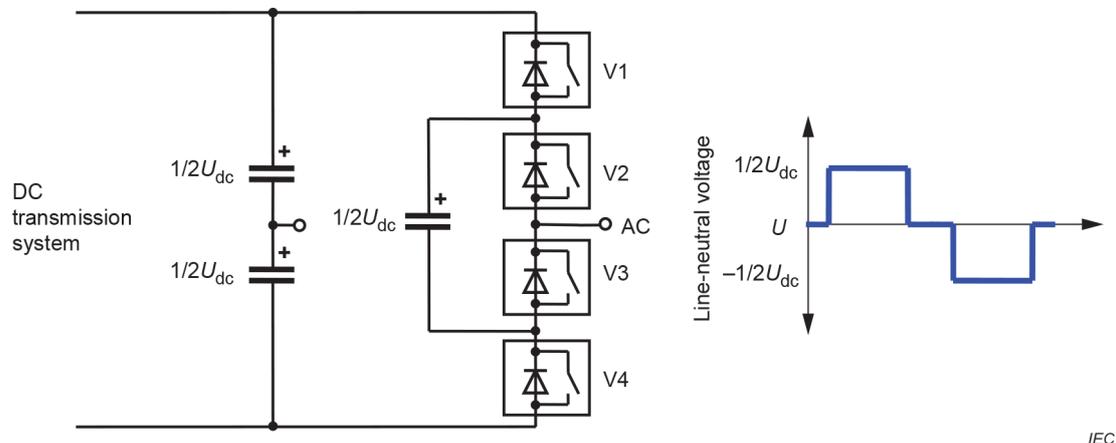


**Figure A.6 – Basic circuit topology of one phase unit of a 5-level diode-clamped converter**

**A.4.4 Multi-level flying capacitor converter**

This circuit achieves the same result as the diode-clamped converter by a different method. Instead of using diode valves to clamp the output voltage to one of the intermediate DC capacitor stages, it uses one or more additional DC capacitors, which are isolated from the DC terminals and hence "floating" or "flying", to achieve the same effect. This circuit is sometimes also referred to as the "Foch-Meynard" circuit after its inventors.

The 3-level flying capacitor converter (see Figure A.7) has a single flying capacitor with a nominal voltage of  $\frac{1}{2}U_{dc}$ . This capacitor is connected between the terminals shared by V1/V2 and those shared by V3/V4. As with the 3-level diode-clamped converter, valves are switched in pairs but the pattern to achieve zero output voltage is different. To achieve an output state of 0, either valves V1+V3 or valves V2+V4 are switched on. V2+V3 is an illegal combination as it would short-circuit the flying capacitor.



**Figure A.7 – Basic circuit topology of one phase unit of a 3-level flying capacitor converter**

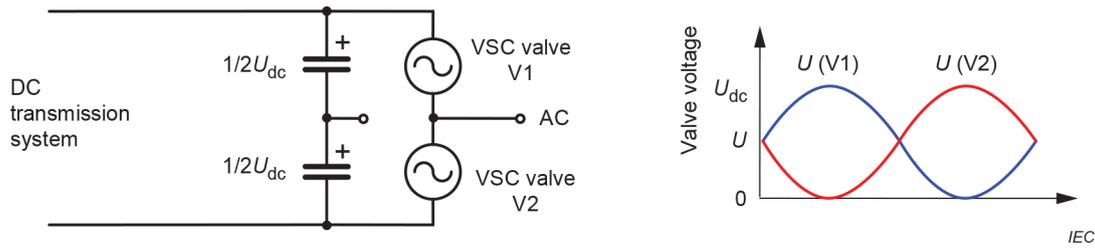
The number of VSC valves per phase unit is the same for this converter as it is for a diode-clamped converter with the same number of output levels. Like the diode-clamped converter, higher numbers of output levels are possible, but at the expense of disproportionately increased complexity.

## A.5 Controllable voltage source type VSC valve

### A.5.1 General

In the 2-level converter, the valves and DC capacitor are clearly separated items of equipment and can be designed and tested in isolation. However, as the number of output levels increases, it is seen from Subclauses A.4.3 and A.4.4 that the DC capacitor(s) become increasing subdivided and the valves and DC capacitor become increasingly inter-dependent.

As the converter starts to approach the ideal, where the number of output levels is sufficient to obtain a good approximation to a sinusoidal waveform without using PWM, the subdivision of the DC capacitor and the interconnectivity between capacitors and IGBTs can become so complex that it is no longer practical to make a clear distinction between the two. In such cases, it may be more convenient to consider the "VSC valve" to be not simply the IGBT elements that perform the switching, but also the distributed DC capacitors. In effect, such a valve is no longer simply a switch but is now a controllable voltage source, connected between the AC terminal of the corresponding phase unit, and one of the DC terminals (see Figure A.8).



**Figure A.8 – A single VSC phase unit with controllable voltage source type VSC valves**

Each of the valves V1 and V2 in the phase unit produces an output voltage consisting of a sinusoidal AC component with a DC offset (equal to  $\frac{1}{2} U_{dc}$ ). The output voltages of the two valves are varied such that at any given time,  $U(V1) + U(V2) = U_{dc}$ .

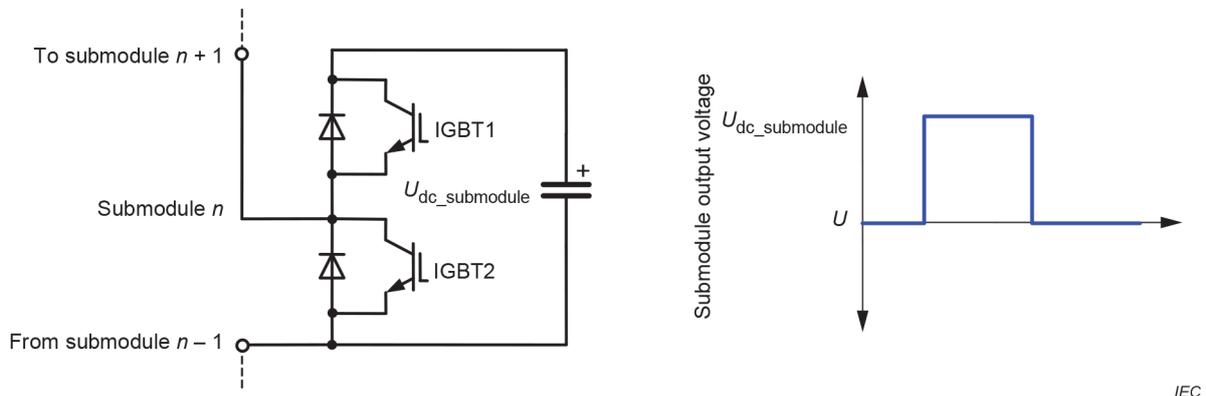
In principle, there can be many different methods of implementing such a valve, but two (closely related) methods have found widespread application: the modular multi-level converter (MMC) and the cascaded two-level converter (CTL).

**A.5.2 Modular multi-level converter (MMC)**

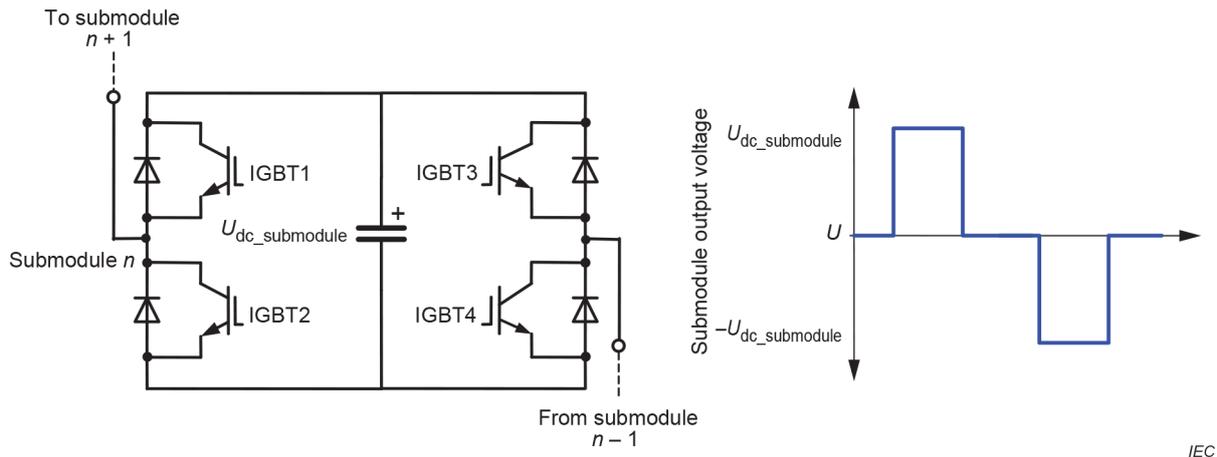
One implementation of the MMC circuit is shown in Figure A.9. The circuit of each submodule is modular, each submodule comprising a single, isolated DC capacitor and two IGBT switches. In effect, this circuit is very similar to that of the basic 2-level converter (see Figure A.4) except that the interconnections between submodules are made from the AC terminal (between IGBT1 and IGBT2) of one submodule, to one of the DC terminals of the neighbouring submodule. With this circuit, each submodule can produce two discrete output states:  $U = 0$  (obtained by switching IGBT2 on) or  $U = U_{dc\_submodule}$  (obtained by switching IGBT1 on).  $U_{dc\_submodule}$  is the DC link voltage of a single submodule, which is much less than  $U_{dc}$ , the DC link voltage of the complete system.

With this circuit, it is possible to synthesize a unipolar valve output voltage with a maximum of  $U = U_{dc}$  and a minimum of  $U = 0$ . However, in common with all the converter topologies discussed so far, the converter has no capacity to suppress the overcurrent which arises from a short-circuit between the DC terminals of the converter. This is because although the two IGBTs can be turned off very quickly, a conducting path always remains through the freewheel diode in parallel with IGBT2.

Another implementation of the MMC circuit addresses this shortcoming by using a full-bridge arrangement, as shown on Figure A.10, instead of the half-bridge arrangement shown in Figure A.9.



**Figure A.9 – The half-bridge MMC circuit**



**Figure A.10 – The full-bridge MMC circuit**

In the full-bridge version of the MMC, each submodule contains four IGBTs instead of two, and can produce three discrete output voltage states:

- $U = 0$  (obtained by switching on either IGBT1 + IGBT3 or IGBT2 + IGBT4);
- $U = +U_{dc\_submodule}$  (obtained by switching on IGBT1 + IGBT4); or
- $U = -U_{dc\_submodule}$  (obtained by switching on IGBT2 + IGBT3).

The full-bridge circuit allows the valve to synthesize an output voltage of either polarity, allowing a new voltage-sourced converter to be connected as a tap to an existing HVDC line. Even when used on a unipolar DC line, the additional flexibility provided by the circuit allows the AC component of valve voltage to exceed the DC component (which is not possible with the half-bridge circuit), resulting in a lower AC current in the valve. In addition, the ability to suppress fault currents arising from short-circuits between the DC terminals can allow some simplification of protective functions. On the other hand the IGBT component count and the conduction losses, are increased by nearly double compared with the half-bridge version.

Since the MMC circuit is inherently modular, it is relatively straightforward to obtain high numbers of output levels, without requiring either PWM (which leads to higher switching losses and requires filtering) or series connected IGBTs (which leads to problems of ensuring voltage distribution). Industry standard IGBT devices can be used, which is not the case for valves of the switch type. Redundancy cannot be provided within each submodule (because the correct operation of the submodule requires both IGBTs to be healthy) and is usually provided by equipping the valve with a few extra submodules and ensuring that the entire submodule is shorted out in the event of a failure.

On the other hand, the number and size of discrete DC capacitors required can be considerable, and there may be difficulties in ensuring that all DC capacitor voltages remain balanced. In comparison with two- or three-level converters, therefore, this topology allows for a simpler valve design and lower losses at the expense of a more complex controls architecture and greater space requirement.

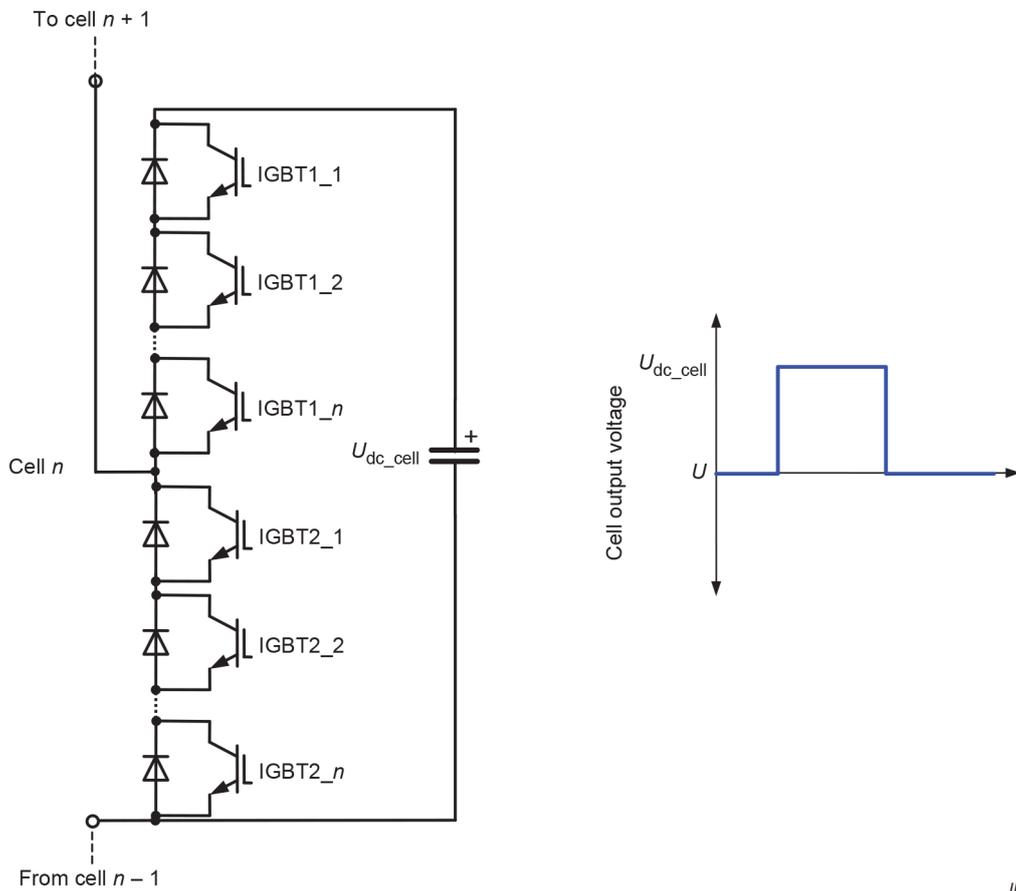
### A.5.3 Cascaded two-level converter (CTL)

An advantage of the MMC circuit is that it avoids the need for IGBTs to be directly connected and switched synchronously in series. However, it is also possible to realise the MMC circuit with more than one IGBT in series in each switching position. Converters designed in this way are referred to as cascaded two-level converters in order to distinguish them from the MMC circuit, although in nearly every respect the circuit functions in exactly the same way as the MMC circuit.

In common with the MMC circuit, the CTL circuit can exist in half-bridge and full-bridge variants. The building-block of the CTL valve is referred to as a "cell" and the half-bridge version of a cell is shown on Figure A.11. Each of the two switch positions consists of  $n$  IGBTs in series, switched synchronously, and the cell DC capacitor will operate at approximately  $n$  times the voltage of a submodule DC capacitor in the MMC circuit.

In operational terms the only significant difference between the CTL and MMC circuits is that the CTL circuit produces a valve output voltage containing fewer, larger, steps than the MMC circuit. Its harmonic performance is therefore not quite as good as that of the MMC circuit, although if the number of IGBTs per switching position is modest (for example, 5 to 10) then it can still achieve very high waveform quality while permitting some simplification of the control system compared to the MMC circuit. The CTL circuit does, however, require sophisticated IGBT gate drive circuits and a more specialised type of IGBT, in common with all valves of the switch type.

Redundancy is provided within each cell by equipping each switch position with more IGBTs than are normally required to operate within the rated voltage of the converter.



**Figure A.11 – The half-bridge CTL circuit**

**A.5.4 Terminology for valves of the controllable voltage source type**

Figure A.12 and Figure A.13 illustrate the main constructional terms for valves of the MMC and CTL type respectively, to explain the meaning of terms such as VSC level, submodule and cell.

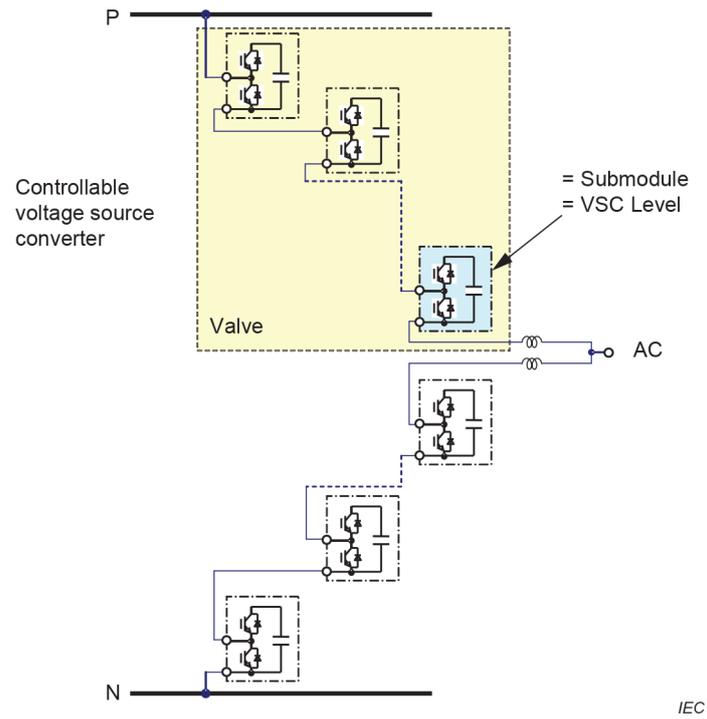


Figure A.12 – Construction terms in MMC valves

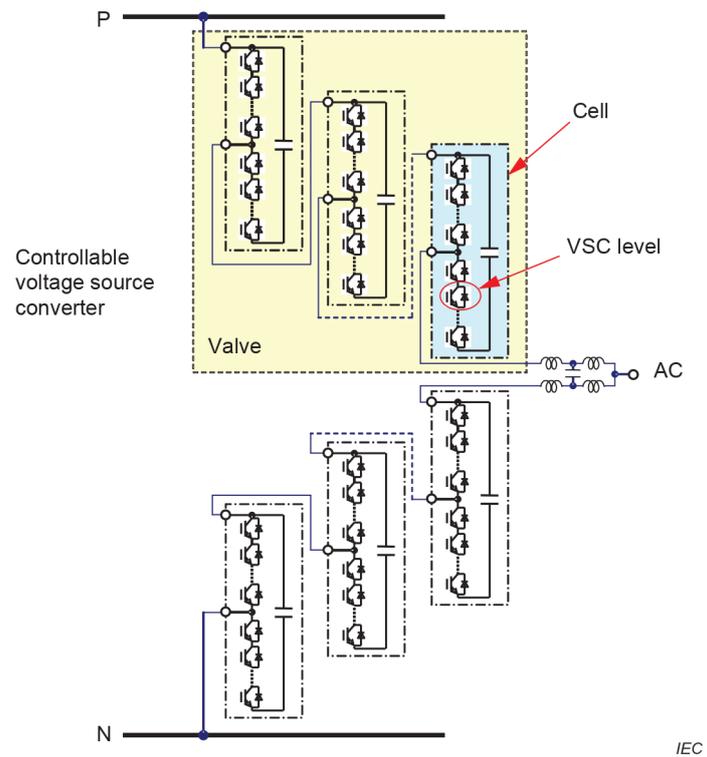


Figure A.13 – Construction terms in CTL valves

## A.6 Hybrid VSC valves

Some published literature has suggested alternative types of VSC valve which possess characteristics of both the switch type and controllable voltage source type. Since the pace of development in this field is quite rapid it is considered beyond the scope of this document to present a detailed treatment of these new converter topologies; however, a basic treatment is given in CIGRE Technical Brochure No. 492.

## A.7 Main differences between VSC and conventional HVDC valves

VSC valves differ from conventional thyristor-based HVDC valves in many respects. It is important to appreciate these differences in order to understand the differences in approach that need to be taken when testing such valves.

Whilst there are a great many differences, the principal ones that affect valve testing are as follows.

- VSC valves are capable of both being turned ON and being turned OFF by control action. In contrast, conventional HVDC thyristor valves can only be turned ON by control action and, to achieve turn OFF, require the external circuit to force the current to zero and then apply a period of reverse voltage. Hence, tests to demonstrate minimum extinction angles or positive voltage transients during the recovery interval (which are so important for thyristor valves), have no significance for VSC valves.
- In most VSC valves, the valve is not capable of supporting reverse voltage (because it contains in-built freewheel diodes), but can conduct reverse current. In conventional HVDC thyristor valves, the valve can withstand reverse voltage but not conduct reverse current.
- In VSC valves, protective turn-ON is generally not used because of the risk of creating a short-circuit across the DC capacitor, but instead protective turn-OFF is employed as a means of suppressing overcurrents. By contrast, in conventional HVDC thyristor valves, protective turn-ON is widely used and protective turn-OFF is not possible.
- The large DC-side capacitance means that there are few circumstances where a VSC phase unit can experience fast voltage transients between terminals. In valves of the "controllable voltage source" type (where some of the DC capacitance is embedded within the valve) the same is also true for voltages between the terminals of the valve.

## Annex B (informative)

### Valve component fault tolerance

Fault tolerance capability may be defined as the ability of an HVDC VSC valve to perform its intended function, until a scheduled shutdown, with faulted components or subsystems or overloaded components, and not lead to any unacceptable failure of other components, or extension of the damage due to the faulted condition. Special features may be required in the design to ensure fault tolerance.

Tests to demonstrate the valve component fault tolerance are not categorized as type tests since most of them are destructive tests of valve or valve components and the tests are usually done on small number of valve levels. Those tests should be done in design stage of new type of valves for compliance check of valve fault component tolerance. Supplier should document the tests and provide project related report, based on experience in lieu, on purchasers' request.

Examples of faults for which fault tolerance may be required are given below:

a) Failure of an IGBT or diode

Even though a short-circuit IGBT-diode pair or the operation of an external valve level shorting device will shunt the other components at the valve level, in some designs there may be a danger of overload of current connections or changes in clamping load.

b) Missing of on-gate at one valve level due to loss of normal on-gate pulses to that level

Missing of on-gate leads to parallel overvoltage of the components at the affected level.

c) Insulation failure of a snubber capacitor, snubber resistor or other components if applicable

Insulation failure of any component in parallel with the IGBTs or diodes can attract load current into it, leading to a hazardous condition.

d) Leakage of small quantities of valve coolant

If the valve is liquid cooled, small leaks may not be easily detected. Escaped coolant can contaminate sensitive components, leading to malfunction, and can increase the probability of insulation failure. However, experience acquired in the wet test performed on both LCC and VSC valves indicates that the valve wet test on a new and dust free valve surface is unable to identify locations where might cause valve dielectric failure in service due to the leakage of small quantities of valve coolant. IEEE Std 857™-1996, *IEEE Recommended Practice for Test Procedures for High-Voltage Direct-Current Thyristor Valves*, to which the wet test is often referred, was withdrawn in 2010.

e) Submodule / Cell internal short-circuit current

Either misfiring of IGBT, short-circuit of IGBT-diode pair or insulation failure may lead to an internal capacitor discharge current. Under these short-circuit conditions, the fault should be self-contained without impacting the normal operation of adjacent submodule / cell. In particular, the fault should not lead to a flashover outside the affected submodule / cell, damage leading to mal-operation caused by projected debris or electromagnetic interference on neighbouring submodule / cell. Any visible light escaping from the faulted submodule / cell should not cause fire or arc detection systems in the valve hall to shut down the converter.

f) Submodule / Cell external short-circuit current

Similarly to case (e) above, if a short-circuit takes place between the external terminals of the submodule / cell, or across several submodule / cell (for example between tiers of a valve stack) then the capacitors of the submodule / cell(s) that were in the output state at the time of the short circuit, will discharge their capacitors into the short-circuit. Although the rate of change of current is lower than for case (e) because of the larger loop inductance, it is still very high and can lead to a severe rate of change of magnetic field, potentially affecting nearby electronic circuits. Depending on the design philosophy adopted for the valve, tests may be needed to demonstrate that the IGBTs will safely turn off before the capacitors can fully discharge and that the resulting electromagnetic disturbance does not cause mal-operation of nearby electronic circuits.

g) Effects of fast transient overvoltages on electronics

Certain events such as lightning strikes on the AC or DC systems close to the converter station, switching actions of the valves (including protective blocking) and bushing flashovers inside the valve hall may lead to fast transient overvoltages which, although not necessarily of an amplitude sufficient to pose a risk of insulation failure, could subject the electronic boards in the valve to a very high dv/dt. Depending on the design philosophy of the overall converter station for such faults, tests may be necessary to demonstrate that the electronic boards continue in operation without damage or malfunction under such conditions.

The purchaser should review the design offered with the supplier to determine the probability and likely consequences of certain failures. Where appropriate, consideration should be given, to the performance of special tests to verify critical aspects of the fault tolerance capability of the valve. The details of such tests are subject to agreement on a case-by-case basis.

## **Annex C** (informative)

### **Valve losses determination**

As transmission losses are directly related to the investment and operational costs, they are one of the most important factors for high voltage direct current (HVDC) project evaluation. For voltage sourced converters (VSC), valve losses are the largest part of the total converter station losses and therefore the determination and evaluation of the VSC valve losses becomes highly important.

Presently, the losses of VSC valves are determined based on the calculation methods of IEC 62751-1 and IEC 62571-2. The calculation method requires detailed information such as the parameters of semiconductor devices, VSC valve design characteristics and operating modes, which are usually not directly available to the HVDC system purchaser/user, who consequently finds it difficult to evaluate the calculated losses results.

Therefore, CIGRE working group B4.75 was set up in 2017 to perform a feasibility study to assess laboratory loss measurement methods on VSC valves for loss calculation evaluation purposes and to make recommendations considering the pros and cons of such measurement methods versus the methods in IEC 62751. The results of this working group were published in 2021 as CIGRE TB 844: "Feasibility study for assessment of lab losses measurement of VSC valves".

The brochure starts with a general description of losses in VSC HVDC converter valves, the origins of different losses in components, the dependency of the losses on different operating modes, as well as special aspects of different designs. This is followed by a summary of the current practice for valve losses determination, including the modelling of the semiconductor parameters and then by a discussion on how the transparency of the overall calculation process can be enhanced. As the main study results of the WG B4.75, an evaluation of the existing methods to measure losses is provided. This is complemented by an overview of the operation conditions and additional aspects for losses measurement (such as commercial aspects) that need to be taken into account. In the last part, the results are summarized and recommendations for application of losses measurement are given, which can be used as guidance for the introduction of losses measurements in the operational type tests of VSC valves.

The conclusion of CIGRE TB 844 is that the laboratory measurement of valve losses is feasible, although the level of accuracy achievable is still quite poor. The general recommendation therefore is that the laboratory measurement should become a standard part of the operational type tests of the VSC valves, such that in the coming years greater industry experience can be gained in this area. However, it is not recommended that the measured valve losses are used as part of the financial evaluation criteria for the HVDC project, until there is a good industry experience and consensus over what should be a realistically achievable level of measurement uncertainty.

## Bibliography

IEC 60146-2, *Semiconductor converters – Part 2: Self-commutated semiconductor converters including direct d.c. converters*

IEC 61975, *High-voltage direct current (HVDC) installations – System tests*

IEC TR 62543, *High-voltage direct current (HVDC) power transmission using voltage sourced converters (VSC)*

IEC 62751-1, *Power losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems – Part 1: General requirements*

IEEE Std 857™-1996, *IEEE Recommended Practice for Test Procedures for High-Voltage Direct-Current Thyristor Valves*

CIGRE Technical Brochure No. 269, *VSC Transmission*

CIGRE Technical Brochure No. 447, *Components Testing of VSC Systems for HVDC Applications*

CIGRE Technical Brochure No. 492, *Voltage Sourced Converter (VSC) for HVDC Power Transmission – Economic Aspects and Comparison with other AC and DC Technologies*

CIGRE Technical Brochure No. 844, *Feasibility study for assessment of lab losses measurement of VSC valves*

---



## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS .....	60
1 Domaine d'application .....	62
2 Références normatives .....	62
3 Termes et définitions .....	62
3.1 Termes relatifs à la coordination de l'isolement.....	63
3.2 Termes relatifs aux semiconducteurs de puissance.....	63
3.3 États de fonctionnement du convertisseur .....	64
3.4 Termes relatifs à la construction des VSC.....	64
3.5 Termes relatifs à la structure des valves .....	65
4 Exigences générales .....	66
4.1 Lignes directrices concernant la réalisation d'essais de type.....	66
4.1.1 Substitution de preuve .....	66
4.1.2 Choix de l'objet d'essai .....	67
4.1.3 Procédure d'essai .....	68
4.1.4 Température ambiante pour les essais .....	68
4.1.5 Fréquence des essais.....	68
4.1.6 Rapports d'essai.....	68
4.1.7 Conditions à prendre en compte pour la détermination des paramètres des essais de type.....	68
4.2 Facteur de correction atmosphérique .....	69
4.3 Traitement de la redondance .....	69
4.3.1 Essais de fonctionnement.....	69
4.3.2 Essais diélectriques.....	69
4.4 Critères de réussite des essais de type.....	70
4.4.1 Généralités .....	70
4.4.2 Critères applicables aux niveaux de valve .....	70
4.4.3 Critères applicables à la valve dans son ensemble .....	71
5 Liste des essais de type .....	71
6 Essais de fonctionnement.....	72
6.1 Objectif des essais.....	72
6.2 Objet d'essai.....	72
6.3 Circuit d'essai .....	73
6.4 Essai en service permanent maximal .....	73
6.5 Essai en surcharge temporaire maximale.....	74
6.6 Essai sous tension continue minimale .....	75
7 Essais diélectriques sur la structure de support de valve .....	75
7.1 Objectif des essais.....	75
7.2 Objet d'essai.....	76
7.3 Exigences d'essai .....	76
7.3.1 Généralités .....	76
7.3.2 Essai de support de valve sous tension continue .....	76
7.3.3 Essai de support de valve sous tension alternative .....	77
7.3.4 Essai de support de valve sous tension de choc de manœuvre.....	78
7.3.5 Essai de support de valve sous tension de choc de foudre .....	78
8 Essais diélectriques sur un ensemble à valves multiples .....	78
8.1 Généralités .....	78

8.2	Objectif des essais.....	79
8.3	Objet d'essai.....	79
8.4	Exigences d'essai.....	79
8.4.1	Essai de MVU sous tension continue à la terre.....	79
8.4.2	Essai de MVU sous tension alternative.....	80
8.4.3	Essai de MVU sous tension de choc de manœuvre.....	81
8.4.4	Essai de MVU sous tension de choc de foudre.....	82
9	Essais diélectriques entre les bornes de valve.....	83
9.1	Objectifs des essais.....	83
9.2	Objet d'essai.....	83
9.3	Méthodes d'essai.....	84
9.3.1	Généralités.....	84
9.3.2	Première méthode.....	84
9.3.3	Seconde méthode.....	84
9.4	Exigences d'essai.....	85
9.4.1	Essai sous tension alternative-continue composite.....	85
9.4.2	Variantes d'essai (seconde méthode seulement).....	87
9.4.3	Essais de valve sous tension de choc.....	89
10	Essai de blocage de l'IGBT en cas de surintensité.....	91
10.1	Objectif de l'essai.....	91
10.2	Objet d'essai.....	91
10.3	Exigences d'essai.....	91
11	Essai de courant de court-circuit.....	92
11.1	Objectif des essais.....	92
11.2	Objet d'essai.....	92
11.3	Exigences d'essai.....	92
12	Essais d'insensibilité de la valve aux perturbations électromagnétiques.....	93
12.1	Objectif des essais.....	93
12.2	Objet d'essai.....	93
12.3	Exigences d'essai.....	93
12.3.1	Généralités.....	93
12.3.2	Première approche.....	94
12.3.3	Seconde approche.....	94
12.3.4	Critères d'acceptation.....	94
13	Essais pour valves à freinage dynamique.....	94
14	Essais de série.....	95
14.1	Généralités.....	95
14.2	Objectif des essais.....	95
14.3	Objet d'essai.....	95
14.4	Exigences d'essai.....	95
14.5	Objectifs des essais de série.....	96
14.5.1	l'examen visuel;.....	96
14.5.2	Vérification de la connexion.....	96
14.5.3	Vérification du circuit de répartition des potentiels.....	96
14.5.4	Vérification des circuits de commande, de protection et de surveillance.....	96
14.5.5	Vérification de la tenue en tension.....	96
14.5.6	Vérification du changement d'état passant/bloqué.....	96
14.5.7	Essai de pression.....	96

15	Présentation des résultats des essais de type .....	97
Annexe A (informative) Vue d'ensemble des convertisseurs VSC utilisés pour le transport d'énergie CCHT .....		98
A.1	Généralités .....	98
A.2	Caractéristiques élémentaires d'un VSC .....	98
A.3	Vue d'ensemble des principaux types de valves à VSC.....	100
A.4	Valve à VSC de type commutateur.....	100
A.4.1	Généralités .....	100
A.4.2	Convertisseur à 2 niveaux .....	101
A.4.3	Convertisseur à diode de blocage multiniveau .....	101
A.4.4	Convertisseur à condensateur volant multiniveau .....	103
A.5	Valve à VSC de type à source de tension commandable .....	103
A.5.1	Généralités .....	103
A.5.2	Convertisseur multiniveau modulaire (MMC).....	104
A.5.3	Convertisseur à deux niveaux monté en cascade (CTL).....	106
A.5.4	Terminologie relative aux valves de type à source de tension commandable .....	107
A.6	Valves à VSC hybrides .....	109
A.7	Principales différences entre les valves à VSC et les valves CCHT classiques.....	109
Annexe B (informative) Tolérance aux pannes des composants de valves .....		110
Annexe C (informative) Détermination des pertes de valve .....		112
Bibliographie.....		113
Figure A.1 – Unité de phase VSC unique et sa tension de sortie idéale .....		99
Figure A.2 – Tension de sortie d'une unité de phase VSC pour un convertisseur à 2 niveaux.....		99
Figure A.3 – Tension de sortie d'une unité de phase VSC pour un convertisseur à 15 niveaux, sans MLI .....		100
Figure A.4 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur à 2 niveaux.....		101
Figure A.5 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur à diode de blocage à 3 niveaux.....		102
Figure A.6 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur à diode de blocage à 5 niveaux.....		102
Figure A.7 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur à condensateur volant à 3 niveaux.....		103
Figure A.8 – Unité de phase VSC unique avec valves à VSC de type source de tension commandable .....		104
Figure A.9 – Circuit MMC en demi-pont.....		105
Figure A.10 – Circuit MMC en pont complet .....		105
Figure A.11 – Circuit CTL en demi-pont .....		107
Figure A.12 – Termes relatifs à la construction des valves de type MMC .....		108
Figure A.13 – Termes relatifs à la construction des valves de type CTL.....		108

Tableau 1 – Conditions d'utilisation de la substitution de preuve issue d'un autre projet CCHT .....	67
Tableau 2 – Nombre minimal de niveaux de valve à soumettre à l'essai de type fonctionnel en fonction du nombre de niveaux de valve par valve .....	68
Tableau 3 – Défauts de niveaux de valve autorisés au cours des essais de type .....	71
Tableau 4 – Liste des essais de type .....	72

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

---

### **VALVES À CONVERTISSEUR DE SOURCE DE TENSION (VSC) POUR LE TRANSPORT D'ÉNERGIE EN COURANT CONTINU À HAUTE TENSION (CCHT) – ESSAIS ÉLECTRIQUES**

#### AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique 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 brevet revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'IEC n'a pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à 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 tout ou partie de tels droits de propriété.

L'IEC 62501 a été établie par le sous-comité 22F: Électronique de puissance pour les réseaux électriques de transport et de distribution, du comité d'études 22 de l'IEC: Systèmes et équipements électroniques de puissance. Il s'agit d'une Norme internationale.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2009, son Amendement 1:2014 et son Amendement 2:2017. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) un nouveau tableau relatif aux conditions d'utilisation de la substitution de preuve (Tableau 1) a été inséré;
- b) les paramètres d'essai relatifs à l'essai de support de valve sous tension continue (7.3.2) et à l'essai de MVU sous tension continue (8.4.1) ont été mis à jour;
- c) l'Article 9 concernant l'essai sous tension alternative-continue entre les bornes de valve a été réorganisé et des variantes ont été ajoutées en 9.4.2 pour les essais individuels sous tension alternative et continue;
- d) l'essai de décharge partielle a été supprimé du programme des essais individuels de série;
- e) des informations complémentaires relatives à la tolérance aux pannes des composants de valve ont été ajoutées à l'Annexe B;
- f) la détermination des pertes de valve a été ajoutée à l'Annexe C.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

Projet	Rapport de vote
22F/731/CDV	22F/748A/RVC

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/).

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, ou
- révisé.

**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.**

# VALVES À CONVERTISSEUR DE SOURCE DE TENSION (VSC) POUR LE TRANSPORT D'ÉNERGIE EN COURANT CONTINU À HAUTE TENSION (CCHT) – ESSAIS ÉLECTRIQUES

## 1 Domaine d'application

La présente Norme internationale s'applique aux valves à convertisseur auto-commuté, conçues pour être utilisées dans un convertisseur de source de tension (VSC) en pont triphasé pour le transport d'énergie en courant continu à haute tension ou dans une liaison dos-à-dos, ainsi qu'aux valves à freinage dynamique. Elle est limitée aux essais de type électriques et de série.

Le présent document peut servir de guide pour les essais des valves à VSC à haute tension utilisées dans les systèmes de stockage d'énergie (ESS).

Les essais spécifiés dans le présent document sont basés sur des valves isolées par l'air. Les exigences d'essai et les critères d'acceptation peuvent servir de guide pour spécifier les essais de type électriques et de série d'autres types de valves.

## 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 60060 (toutes les parties), *Techniques des essais à haute tension*

IEC 60071 (toutes les parties), *Coordination de l'isolement*

IEC 60270, *Techniques des essais à haute tension – Mesures des décharges partielles*

IEC 60700-1:2015, *Valves à thyristors pour le transport d'énergie en courant continu à haute tension (CCHT) - Partie 1: Essais électriques*  
IEC 60700-1:2015/AMD1:2021

IEC 62747, *Terminologie relative aux convertisseurs de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT)*

ISO/IEC 17025, *Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais*

## 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et les définitions de l'IEC 62747 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 Termes relatifs à la coordination de l'isolement

#### 3.1.1

##### **tension de tenue d'essai**

valeur d'une tension d'essai de forme d'onde normalisée pour laquelle une nouvelle valve, dont l'intégrité est intacte, ne présente aucune décharge disruptive et respecte tous les autres critères d'acceptation spécifiés pour l'essai particulier, lorsqu'elle est soumise à un nombre spécifié d'applications ou à une durée spécifiée d'application de la tension d'essai, dans les conditions spécifiées

#### 3.1.2

##### **isolement interne**

air extérieur aux composants et matériaux isolants de la valve mais contenu dans le profil de la valve ou de l'ensemble à valves multiples

#### 3.1.3

##### **isolement externe**

air situé entre la surface externe de la valve ou de l'ensemble à valves multiples et son environnement

### 3.2 Termes relatifs aux semiconducteurs de puissance

#### 3.2.1

##### **dispositif à semiconducteur blocable**

dispositif à semiconducteur commandable qui peut être réactivé et coupé par un signal de commande, IGBT, par exemple

Note 1 à l'article: Il existe plusieurs types de dispositifs à semiconducteur blocable qui peuvent être utilisés dans les convertisseurs VSC pour des applications CCHT. Pour des raisons pratiques, le terme IGBT est utilisé tout au long de la présente norme pour faire référence au principal dispositif à semiconducteur blocable. Cependant, la norme s'applique également aux autres types de dispositifs à semiconducteur blocable.

#### 3.2.2

##### **transistor bipolaire à grille isolée**

##### **IGBT**

dispositif à semiconducteur blocable possédant trois bornes: une borne de grille (G) et deux bornes de charge: émetteur (E) et collecteur (C)

Note 1 à l'article: En appliquant des tensions appropriées entre la grille et l'émetteur, le courant de charge peut être commandé, c'est-à-dire qu'il peut être établi ou coupé.

Note 2 à l'article: L'abréviation "IGBT" est dérivée du terme anglais développé correspondant "insulated gate bipolar transistor".

#### 3.2.3

##### **diode de roue libre**

##### **DRL**

dispositif à semiconducteur de puissance ayant les caractéristiques d'une diode

Note 1 à l'article: Une DRL possède deux bornes: une anode (A) et une cathode (K). Le courant dans les DRL circule en sens opposé au courant de l'IGBT.

Note 2 à l'article: Les DRL sont caractérisées par leur capacité à faire face à des taux élevés de chute de courant dus au comportement de commutation de l'IGBT.

#### 3.2.4

##### **paire IGBT-diode**

combinaison de l'IGBT et de la DRL connectés en parallèle en sens inverse

### 3.3 États de fonctionnement du convertisseur

#### 3.3.1

##### **état bloqué**

condition du convertisseur dans laquelle un signal de fermeture est appliqué en continu à tous les IGBT du convertisseur

Note 1 à l'article: Généralement, le convertisseur est à l'état bloqué après la mise sous tension.

#### 3.3.2

##### **état débloqué**

condition du convertisseur dans laquelle des signaux d'ouverture et de fermeture sont appliqués de manière répétitive aux IGBT du convertisseur

#### 3.3.3

##### **blocage de protection de la valve**

dispositif de protection de la valve ou du convertisseur d'une contrainte électrique excessive par la fermeture d'urgence de tous les IGBT dans une ou plusieurs valves

#### 3.3.4

##### **niveau de palier de tension**

échelon de tension dû à la commutation d'une valve ou d'une partie d'une valve pendant l'état débloqué du convertisseur

Note 1 à l'article: Pour les valves de type à source de tension commandable, le niveau de palier de tension correspond à la variation de tension due à la commutation d'un sous-module ou d'une cellule. Pour les valves de type commutateur, le niveau de palier de tension correspond à la variation de tension due à la commutation de la valve complète.

Note 2 à l'article: L'Annexe A fournit une vue d'ensemble des convertisseurs VSC utilisés pour le transport d'énergie CCHT.

### 3.4 Termes relatifs à la construction des VSC

#### 3.4.1

##### **unité de phase VSC**

équipement utilisé pour raccorder les deux barres omnibus de courant continu à une borne de courant alternatif

#### 3.4.2

##### **valve à VSC de type commutateur**

combinaison de paires IGBT-diode connectées en série et configurées de manière à être commutées simultanément en une unité fonctionnelle simple

#### 3.4.3

##### **valve à VSC de type à source de tension commandable**

ensemble complet à source de tension commandable, généralement connecté entre une borne de courant alternatif et une borne de courant continu

#### 3.4.4

##### **valve à diode**

valve à semiconducteur contenant uniquement des diodes comme principaux dispositifs à semiconducteur, pouvant servir dans certaines topologies de VSC

#### 3.4.5

##### **valve à freinage dynamique**

dispositif commandable complet qui sert à réguler l'absorption d'énergie dans la résistance de freinage ou autres composants

### 3.4.6

#### **valve**

valve à VSC, valve à freinage dynamique ou valve à diode, selon le contexte

### 3.4.7

#### **sous-module**

partie d'une valve à VSC comprenant des commutateurs et des diodes commandables connectés en demi-pont ou en pont complet, ainsi que leurs auxiliaires immédiats et condensateurs de stockage, le cas échéant, où chaque commutateur commandable comporte un seul dispositif à valve commuté connecté en série

### 3.4.8

#### **cellule**

bloc module MMC dans lequel chaque position de commutateur est composée de plusieurs paires IGBT-diode connectées en série

Note 1 à l'article: Voir Figure A.13.

### 3.4.9

#### **niveau de valve à VSC**

plus petite unité fonctionnelle indivisible d'une valve à VSC

Note 1 à l'article: Pour toute valve à VSC dans laquelle les IGBT sont connectés en série et manœuvrés simultanément, un niveau de valve à VSC correspond à une paire IGBT-diode, y compris ses auxiliaires (voir Figure A.13). Pour un type MMC sans paires IGBT-diode connectées en série, un niveau de valve correspond à un sous-module associé à ses auxiliaires (voir Figure A.12).

### 3.4.10

#### **niveau de valve à diode**

partie d'une valve à diode composée d'une diode et des circuits et composants associés, le cas échéant

### 3.4.11

#### **niveaux redondants**

nombre maximal de niveaux de valve à VSC connectés en série ou de niveaux de valve à diode dans une valve, qui peut être court-circuité par un ordre externe ou interne sans que le fonctionnement sécurisé de la valve en soit altéré, comme il est démontré par les essais de type, et qui, en cas de dépassement, exige l'arrêt de la valve pour permettre le remplacement des niveaux défaillants ou l'acceptation d'un risque accru de dysfonctionnements

Note 1 à l'article: Dans les conceptions de valves telles que le convertisseur à deux niveaux monté en cascade, qui contiennent deux chemins de conduction ou plus dans chaque cellule et comportent des niveaux de valve à VSC connectés en série dans chaque chemin, les niveaux redondants doivent être comptés uniquement dans un chemin de conduction de chaque cellule.

### 3.4.12

#### **niveau de valve à freinage dynamique**

partie d'une valve à freinage dynamique comprenant un commutateur commandable et une diode associée, ou des commutateurs et des diodes commandables connectés en parallèle, ou des commutateurs et des diodes commandables connectés en pont, ainsi que leurs auxiliaires immédiats, condensateurs de stockage et résistances de dissipation d'énergie, le cas échéant

## 3.5 Termes relatifs à la structure des valves

### 3.5.1

#### **structure de valve**

composants de structure d'une valve, exigés afin de soutenir physiquement les modules de valve

### **3.5.2**

#### **support de valve**

partie de la valve fournissant un support mécanique et l'isolation électrique de la terre à la partie sous tension de la valve

### **3.5.3**

#### **ensemble à valves multiples**

##### **MVU**

disposition mécanique comportant au moins deux valves ou une ou plusieurs unités de phase à VSC partageant un support de valve commun

Note 1 à l'article: Toutes les topologies et la disposition physique des convertisseurs peuvent ne pas contenir de MVU.

Note 2 à l'article: L'abréviation "MVU" est dérivée du terme anglais développé correspondant "multiple valve unit".

### **3.5.4**

#### **section de valve**

assemblage électrique défini à des fins d'essais, comportant un certain nombre de niveaux de valve et d'autres composants, et présentant les propriétés électriques préassignées d'une valve complète

Note 1 à l'article: Pour les valves du type à source de tension commandable, la section de valve doit inclure le condensateur à courant continu de cellule ou de sous-module en plus des niveaux de valve à VSC.

Note 2 à l'article: Le nombre minimal de niveaux de valve à VSC ou à diode autorisé dans une section de valve est défini avec les exigences de chaque essai.

## **4 Exigences générales**

### **4.1 Lignes directrices concernant la réalisation d'essais de type**

#### **4.1.1 Substitution de preuve**

Chaque conception de valve doit être soumise aux essais de type spécifiés dans le présent document. S'il est possible de démontrer que la valve est similaire à une valve précédemment soumise à essai, au lieu de réaliser un essai de type ou des parties individuelles de cet essai, le fournisseur peut soumettre à l'acheteur, pour examen, le rapport d'essai d'un essai de type précédent. Il convient de l'accompagner d'un rapport distinct détaillant les différences de conception et démontrant la manière dont l'essai de type référencé satisfait aux objectifs de l'essai pour la conception proposée. Les conditions d'utilisation de la substitution de preuve sont énumérées dans le Tableau 1.

**Tableau 1 – Conditions d'utilisation de la substitution de preuve issue d'un autre projet CCHT**

Essai de type	Paragraphe	Conditions
Essais de fonctionnement	6	<ul style="list-style-type: none"> <li>Niveaux de valve à soumettre à essai inférieurs en nombre ou identiques</li> <li>Même conception des niveaux de valve</li> <li>Même conception de l'électronique de valve</li> <li>Contrainte de tension et contrainte thermique identiques ou inférieures <sup>a</sup> sur chaque niveau de valve</li> </ul>
Essais diélectriques sur la structure de support de valve	7	<ul style="list-style-type: none"> <li>Structure de valve identique, y compris les tuyaux de refroidissement, les chemins de câble et le système de mise à la terre, le cas échéant</li> <li>Même matériau de valve et même dimension géométrique</li> <li>Distance d'isolement supérieure ou égale par rapport à la salle des valves et aux autres équipements associés à l'intérieur de la salle des valves</li> <li>Contrainte de tension inférieure ou égale, y compris la contrainte de tension continue, la contrainte de tension alternative et les contraintes de tension de choc</li> </ul>
Essais diélectriques sur un ensemble à valves multiples	8	<ul style="list-style-type: none"> <li>Même géométrie de MVU entre les valves</li> </ul>
Essais diélectriques entre les bornes de valve	9	<ul style="list-style-type: none"> <li>Structure de valve identique, y compris les tuyaux de refroidissement, les chemins de câble et le système de mise à la terre, le cas échéant</li> <li>Même matériau de valve et même dimension géométrique</li> <li>Contrainte de tension inférieure ou égale</li> </ul>
Essai de blocage de l'IGBT en cas de surintensité	10	<ul style="list-style-type: none"> <li>Même conception des niveaux de valve</li> <li>Même conception de l'électronique de valve</li> <li>Contrainte de courant présumé identique ou inférieure</li> </ul>
Essai de courant de court-circuit	11	<ul style="list-style-type: none"> <li>Même conception des niveaux de valve</li> <li>Mêmes composants de mise en court-circuit, s'il existe, et même fonction</li> <li>Même conception de l'électronique de valve</li> <li>Contrainte de courant de court-circuit identique ou inférieure</li> </ul>
Essais d'insensibilité de la valve aux perturbations électromagnétiques	12	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identiques à celles indiquées dans les Articles 6 et 9</li> </ul>
<p><sup>a</sup> La contrainte thermique des dispositifs à semiconducteur est un effet combiné du courant et du refroidissement. La contrainte thermique du dispositif est caractérisée par la température de jonction dudit dispositif.</p>		

#### 4.1.2 Choix de l'objet d'essai

Le présent paragraphe ne s'applique pas aux essais réalisés sur la structure de support de la valve et sur l'ensemble à valves multiples. L'objet d'essai pour ces essais est défini en 7.2 et 8.3.

- a) Les essais de type peuvent être réalisés soit sur une valve ou un MVU complet, soit sur leurs parties, comme indiqué dans le Tableau 4.
- b) Le nombre minimal de niveaux de valve à soumettre à l'essai de type fonctionnel, en fonction des niveaux de valve dans une valve unique, est tel qu'indiqué dans le Tableau 2. Ce nombre s'applique aux essais de type des Articles 6, 10, 11 et 12. Ces niveaux de valve doivent être soumis à essai dans un ou plusieurs montages d'essai sur plusieurs sections de valve telles que définies dans ces articles.

**Tableau 2 – Nombre minimal de niveaux de valve à soumettre à l'essai de type fonctionnel en fonction du nombre de niveaux de valve par valve**

Nombre de niveaux de valve, y compris le niveau redondant par valve	Nombre total de niveaux de valve à soumettre à essai
1 à 50	Nombre de niveaux de valve dans une valve
51 à 250	50
≥ 251	20 %

Le nombre minimal de niveaux de valve à soumettre à l'essai de type diélectrique peut être inférieur ou égal au nombre spécifié pour l'essai de type fonctionnel.

Le nombre minimal de niveaux de valve doit toutefois être représentatif de la conception diélectrique de la valve.

- c) Il est généralement recommandé d'utiliser les mêmes sections de valve pour tous les essais de type. Cependant, différents essais peuvent être réalisés sur différentes sections de valve en parallèle, afin d'accélérer le programme d'exécution des essais.
- d) Avant le début des essais de type, la résistance de la valve, des sections et/ou des composants de valve aux essais de production doit être démontrée afin d'assurer une fabrication appropriée.

#### **4.1.3 Procédure d'essai**

Les essais doivent être effectués conformément à l'IEC 60060, le cas échéant en tenant dûment compte de l'IEC 60071 (toutes les parties). Les mesures de décharge partielle doivent être réalisées conformément à l'IEC 60270.

#### **4.1.4 Température ambiante pour les essais**

Les essais doivent être effectués à la température ambiante prédominante de l'installation d'essai, sauf spécification contraire.

#### **4.1.5 Fréquence des essais**

Les essais diélectriques en courant alternatif peuvent être réalisés soit à 50 Hz, soit à 60 Hz. Les essais de fonctionnement doivent être effectués à la fréquence de service.

#### **4.1.6 Rapports d'essai**

À l'issue des essais de type, le fournisseur doit produire des rapports d'essais de type conformément à l'Article 15.

#### **4.1.7 Conditions à prendre en compte pour la détermination des paramètres des essais de type**

Les paramètres des essais de type doivent être déterminés sur la base des conditions de fonctionnement et de défaut les plus défavorables auxquelles la valve peut être soumise, conformément aux études du système. La Brochure technique n° 447 du CIGRE fournit des recommandations concernant les conditions.

## 4.2 Facteur de correction atmosphérique

Lorsque l'article correspondant le spécifie, une correction atmosphérique doit être appliquée aux tensions d'essai conformément à l'IEC 60060-1. Les conditions de référence auxquelles les corrections doivent être apportées sont les suivantes:

- pression:
  - si la coordination de l'isolement de la partie soumise à essai de la valve est fondée sur les tensions de tenue assignées normalisées conformes à l'IEC 60071-1, les facteurs de correction sont uniquement appliqués aux altitudes supérieures à 1 000 m. Ainsi, si l'altitude du site  $a_s$  sur lequel le matériel est installé est  $\leq 1\ 000$  m, la pression d'air atmosphérique normale ( $b_0 = 101,3$  kPa) doit alors être utilisée sans correction de l'altitude; si  $a_s > 1\ 000$  m, la procédure normalisée conforme à l'IEC 60060-1 est utilisée, mais la pression atmosphérique de référence  $b_0$  est remplacée par la pression atmosphérique correspondant à une altitude de 1 000 m ( $b_{1\ 000m}$ );
  - si la coordination de l'isolement de la partie soumise à essai de la valve n'est pas fondée sur les tensions de tenue assignées normalisées conformes à l'IEC 60071-1, la procédure normalisée conforme à l'IEC 60060-1 est utilisée avec la pression atmosphérique de référence  $b_0$  ( $b_0 = 101,3$  kPa);
- température: température de l'air maximale de conception de la salle des valves ( $^{\circ}\text{C}$ );
- humidité: humidité absolue minimale de conception de la salle des valves ( $\text{g}/\text{m}^3$ ).

Les combinaisons réalistes les plus défavorables de température et d'humidité qui peuvent exister dans la pratique doivent être utilisées pour la correction atmosphérique.

Les valeurs à utiliser doivent être spécifiées par le fournisseur.

## 4.3 Traitement de la redondance

### 4.3.1 Essais de fonctionnement

Pour les essais de fonctionnement, les niveaux de valve redondants ne doivent pas être court-circuités. Les tensions d'essai utilisées doivent être ajustées au moyen d'un facteur d'échelle  $k_n$ :

$$k_n = \frac{N_{\text{tut}}}{N_t - N_r}$$

où

$N_{\text{tut}}$  est le nombre de niveaux de valve en série dans l'objet d'essai;

$N_t$  est le nombre total de niveaux de valve en série dans la valve;

$N_r$  est le nombre total de niveaux de valve redondants en série dans la valve.

### 4.3.2 Essais diélectriques

Pour tous les essais diélectriques entre les bornes de valves, les niveaux de valve redondants doivent être court-circuités. L'emplacement des niveaux de valve à court-circuiter doit faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fournisseur.

NOTE En fonction de la conception, des limites peuvent être imposées au niveau de la répartition des niveaux de valve court-circuités. Par exemple, il peut exister une limite supérieure relative au nombre de niveaux de valve court-circuités dans une seule section de valve.

Pour tous les essais diélectriques sur une section de valve, les tensions d'essai utilisées doivent être ajustées au moyen d'un facteur d'échelle  $k_0$ :

$$k_0 = \frac{N_{tu}}{N_t - N_r}$$

où

$N_{tu}$  est le nombre de niveaux de valve non court-circuités en série connectés dans l'objet d'essai;

$N_t$  est le nombre total de niveaux de valve en série dans la valve;

$N_r$  est le nombre total de niveaux de valve redondants en série dans la valve.

#### 4.4 Critères de réussite des essais de type

##### 4.4.1 Généralités

Même si le plus grand soin est apporté à la conception des valves, l'expérience des applications à semiconducteur montre qu'il est impossible d'éviter des défaillances aléatoires occasionnelles des composants de niveaux de valve pendant l'exploitation. Même si ces défaillances peuvent être liées à des contraintes, elles sont considérées comme aléatoires dans la mesure où leur cause ou la relation entre le taux de défaillance et la contrainte n'est pas prévisible ou ne peut être quantifiée de manière précise. Les essais de type soumettent, dans un délai très court, les valves ou sections de valve à plusieurs contraintes correspondant généralement aux pires contraintes auxquelles peut parfois être soumis le matériel pendant la durée de vie de la valve. De ce fait, les critères de réussite des essais de type définis ci-dessous n'autorisent qu'un nombre réduit de défaillances des niveaux de valve au cours des essais de type, à condition que ces défaillances soient rares et ne soient pas le révélateur d'une conception inappropriée et à condition que le niveau de valve défaillant permette au reste de la valve ou section de valve de continuer à fonctionner sans altérer la performance.

##### 4.4.2 Critères applicables aux niveaux de valve

Les critères suivants sont applicables aux niveaux de valve.

- a) Si, à la suite d'un essai de type répertorié à l'Article 5, plusieurs niveaux de valve (ou plus de 1 % des niveaux de valve soumis à essai, si cette valeur est supérieure) ont été court-circuités ou mis à circuit ouvert, la valve doit alors être considérée comme n'ayant pas satisfait aux essais de type.
- b) Si, à la suite d'un essai de type, un niveau de valve (ou plus si la valeur s'inscrit dans une limite de 1 %) a été court-circuité ou mis à circuit ouvert, le ou les niveaux défaillants doivent alors être rétablis et cet essai de type répété.
- c) Si le nombre cumulé des niveaux de valve court-circuités ou à circuit ouvert au cours de tous les essais de type dépasse 3 % des niveaux de valve soumis à essai, la valve doit alors être considérée comme n'ayant pas satisfait aux essais de type.
- d) La valve ou les sections de valve doivent être vérifiées après chaque essai de type afin de déterminer si des niveaux de valve ont été court-circuités ou mis à circuit ouvert. Avant de poursuivre les essais, les paires IGBT-diode ou les composants auxiliaires qui se sont révélés défaillants au cours ou à la fin d'un essai de type peuvent être remplacés.
- e) À l'issue du programme d'essais, la valve ou les sections de valve doivent faire l'objet d'une série d'essais de vérification, qui doivent inclure au minimum:
  - la vérification de la tenue en tension des niveaux de valve;
  - la vérification des circuits de déclenchement;
  - la vérification des circuits de surveillance;
  - la vérification des circuits de protection faisant partie intégrante de la valve;
  - la vérification des circuits de répartition des potentiels.

- f) Les courts-circuits des niveaux de valve survenant au cours des essais de vérification doivent être décomptés en tant que partie des critères d'acceptation définis ci-dessus. En plus des niveaux court-circuités ou mis à circuit ouvert, le nombre total de niveaux de valve présentant des défauts n'occasionnant pas de court-circuit de niveaux de valve, qui sont découverts au cours du programme d'essais de type et de l'essai de vérification ultérieur, ne doit pas dépasser 3 % du nombre de niveaux de valve soumis à essai lors des essais de type diélectrique et de fonctionnement. Si le nombre de ces niveaux dépasse 3 %, la nature des défauts et leur cause doivent être revues et une action supplémentaire, s'il y a lieu, doit faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fournisseur.
- g) Lorsque les critères de pourcentage sont appliqués pour déterminer le nombre maximal autorisé de niveaux de valve court-circuités ou mis à circuit ouvert ainsi que le nombre maximal autorisé de niveaux avec des défauts n'ayant pas occasionné de court-circuit de niveaux de valve, il est courant d'arrondir toutes les fractions au nombre entier supérieur, comme représenté dans le Tableau 3.

**Tableau 3 – Défauts de niveaux de valve autorisés au cours des essais de type**

Nombre de niveaux de valve soumis à essai	Nombre de niveaux de valve qu'il est permis de court-circuiter ou de mettre à circuit ouvert dans un essai de type quelconque	Nombre total de niveaux de valve qu'il est permis de court-circuiter ou de mettre à circuit ouvert dans un essai de type quelconque	Nombre supplémentaire de niveaux de valve, dans tous les essais de type, ayant fait l'objet d'un défaut mais n'ayant pas été court-circuités ou mis à circuit ouvert
Jusqu'à 33	1	1	1
34 à 67	1	2	2
68 à 100	1	3	3
101 à 133	2	4	4

La répartition de niveaux court-circuités ou mis à circuit ouvert et d'autres défauts de niveaux de valve à l'issue de tous les essais de type doit être essentiellement aléatoire et ne doit présenter aucun signe indiquant une conception inappropriée.

#### 4.4.3 Critères applicables à la valve dans son ensemble

Une défaillance ou un claquage externe sur un matériel électrique commun associé à plusieurs niveaux de valve de la valve, ou une décharge disruptive dans le matériau diélectrique faisant partie de la structure de la valve, des conduits de refroidissement, des conduits de lumière ou d'autres parties isolantes du système de transmission et de répartition des impulsions, ne doit pas être autorisé.

Les températures de surface des composants et des conducteurs, ainsi que les jonctions et connexions associées acheminant du courant, et la température des surfaces de montage adjacentes doivent toujours rester dans les limites autorisées par la conception.

## 5 Liste des essais de type

Le Tableau 4 dresse la liste des essais de type présentés dans les Articles 6, 7, 8, 9, 10, 11 et 12.

**Tableau 4 – Liste des essais de type**

Essai de type	Article ou paragraphe	Objet d'essai
Essai en service permanent maximal	6.4	Valve ou section de valve
Essai en surcharge temporaire maximale	6.5	Valve ou section de valve
Essai sous tension continue minimale	6.6	Valve ou section de valve
Essai de support de valve sous tension continue	7.3.2	Support de valve
Essai de support de valve sous tension alternative	7.3.3	Support de valve
Essai de support de valve sous tension de choc de manœuvre	7.3.4	Support de valve
Essai de support de valve sous tension de choc de foudre	7.3.5	Support de valve
Essai de MVU sous tension continue à la terre	8.4.1	MVU
Essai de MVU sous tension alternative	8.4.2	MVU
Essai de MVU sous tension de choc de manœuvre	8.4.3	MVU
Essai de MVU sous tension de choc de foudre	8.4.4	MVU
Essai de valve sous tension alternative-continue	9.4.1 ou 9.4.2	Valve ou section de valve
Essai de valve sous tension de choc de manœuvre	9.4.3.2	
Essai de valve sous tension de choc de foudre	9.4.3.3	
Essai de blocage de l'IGBT en cas de surintensité	10	Valve ou section de valve
Essai de courant de court-circuit	11	Valve ou section de valve
Essai d'insensibilité de la valve aux perturbations électromagnétiques	12	Valve ou section de valve
NOTE Il convient que la section de valve utilisée dans l'essai de valve sous tension alternative-continue (9.4.1 ou 9.4.2), l'essai de valve sous tension de choc de manœuvre (9.4.3.2) et l'essai de valve sous tension de choc de foudre (9.4.3.3) soit une structure unique représentative de la conception diélectrique de la valve.		

## 6 Essais de fonctionnement

### 6.1 Objectif des essais

Les principaux objectifs des essais de fonctionnement sont de:

- a) vérifier l'adéquation du niveau de la paire VSC/diode et des circuits électriques associés dans une valve en fonction des contraintes de courant, de tension et de température à l'état conducteur, lors de l'ouverture et de la fermeture dans les conditions de contraintes répétitives les plus défavorables;
- b) démontrer l'interaction correcte entre l'électronique de la valve et les circuits de puissance des valves à VSC.

### 6.2 Objet d'essai

Les essais peuvent être réalisés soit sur une valve complète, soit sur des sections de valve. Le choix dépend principalement de la conception de la valve et des installations d'essai disponibles. Les essais spécifiés dans le présent article sont applicables aux sections de valve contenant cinq niveaux de valve ou plus, connectés en série. Si des essais utilisant moins de cinq niveaux sont proposés, des facteurs de sécurité d'essai supplémentaires doivent être convenus. En aucun cas, le nombre de niveaux connectés en série ne doit être inférieur à trois pour les essais.

La valve ou les sections de valve en essai doivent être assemblées avec tous les composants auxiliaires. Pour les valves équipées d'un parafoudre, un parafoudre de valve à échelle réduite peut être inclus.

Le fluide de refroidissement doit être dans un état représentatif des conditions de service. Le débit et la température, en particulier, doivent être établis en fonction des valeurs les plus défavorables correspondant à l'essai en question, de sorte que la ou les températures de composants appropriées soient égales aux valeurs applicables en service.

### 6.3 Circuit d'essai

Dans les conceptions dans lesquelles la valve agit comme une source de tension commandable et dispose d'une capacité à courant continu intégrée, la capacité à courant continu et ses connexions aux composants à semiconducteur font partie intégrante de l'objet d'essai.

Pendant, dans les conceptions dans lesquelles la valve fonctionne à la manière d'un commutateur et où le condensateur à courant continu est distinct de la valve, il est nécessaire que le condensateur à courant continu soit correctement représenté dans le circuit d'essai. En particulier, l'inductance de fuite en série des connexions entre le condensateur à courant continu et la valve, ainsi que la capacité parasite au niveau de la section de valve, doivent être correctement reproduites et mises à l'échelle en fonction de la taille de la section de valve en essai. Les interconnexions du circuit d'essai doivent être représentatives du type utilisé dans le convertisseur, afin de ne pas introduire de niveaux d'amortissement peu réalistes dus à des effets de peau.

### 6.4 Essai en service permanent maximal

Il est nécessaire que l'essai reproduise les paramètres suivants basés sur les conditions de service du convertisseur les plus défavorables. Plusieurs essais peuvent également être nécessaires pour reproduire tous les paramètres à leurs valeurs maximales.

Pour les valves à VSC:

- température maximale de jonction de l'IGBT en régime permanent;
- température maximale de jonction de la DRL en régime permanent;
- lorsque des circuits d'amortissement sont utilisés, température maximale des composants d'amortissement en régime permanent;
- tension et courant maximaux d'amorçage et de blocage en régime permanent.

Pour les valves à diode:

- température maximale de jonction de la diode en régime permanent;
- lorsque des circuits d'amortissement sont utilisés, température maximale des composants d'amortissement en régime permanent;
- tension et courant maximaux d'amorçage et de désamorçage de la diode en régime permanent.

Il est nécessaire que tous ces paramètres soient reproduits au cours de l'essai en service permanent maximal. Ils peuvent être reproduits dans le cadre d'essais séparés ou sous la forme d'un essai combiné.

La tension d'essai doit être basée sur la tension continue en régime permanent maximal, la fréquence de commutation d'essai doit être fondée sur la fréquence de commutation en régime permanent maximal et le modèle de modulation doit être représentatif de celui utilisé en service.

Le courant d'essai, en valeur efficace, doit être déterminé en tenant compte des harmoniques de courant et de tout autre courant supplémentaire circulant dans la valve.

La valeur du courant d'essai doit intégrer un facteur de sécurité d'essai de 1,05.

Pour une valve de type commutateur, la tension d'essai  $U_{tpv1}$  correspondant à la tension continue en régime permanent maximal doit être déterminée de la façon suivante:

$$U_{tpv1} = U_{dmax} \times k_n \times k_1$$

où

$U_{dmax}$  est la tension continue en régime permanent maximal de la valve, y compris l'ondulation;

$k_n$  est un facteur d'échelle d'essai selon 4.3.1;

$k_1$  est un facteur de sécurité d'essai;

$k_1 = 1,05$ .

Pour une valve de type à source de tension commandable, la tension d'essai,  $U_{tpv1}$ , par niveau de valve, doit être déterminée de la façon suivante:

$$U_{tpv1} = U_{cmax} \times k_1$$

où

$U_{cmax}$  est la tension continue en régime permanent maximal du niveau de valve, y compris l'ondulation;

$k_1$  est un facteur de sécurité d'essai;

$k_1 = 1,05$ .

La durée de l'essai ne doit pas être inférieure à 30 min après la stabilisation de la température du fluide de refroidissement en sortie.

## 6.5 Essai en surcharge temporaire maximale

Si la valve est spécifiée pour un fonctionnement en surcharge temporaire, un essai en service temporaire maximal doit être réalisé.

NOTE La capacité des valves à convertisseur fonctionnant en surcharge temporaire maximale est généralement de quelques secondes, le refroidissement de la valve étant alors impossible.

Les conditions d'essai, lorsqu'elles sont exigées, doivent être déterminées en appliquant la même méthodologie qu'en 6.4 ci-dessus. Cependant, le courant d'essai doit être le courant de surcharge spécifié sans facteur de sécurité d'essai.

Avant l'essai, la valve ou la section de valve doit être amenée à un équilibre thermique dans les conditions indiquées en 6.4. L'essai en service temporaire maximal est alors engagé à partir de cette condition initiale et poursuivi pendant une durée égale à la durée de la surcharge temporaire multipliée par 1,2.

À l'issue du fonctionnement en surcharge temporaire, rétablir les conditions de régime permanent maximal spécifiées en 6.4 et les maintenir stables pendant 10 min.

## 6.6 Essai sous tension continue minimale

Le but de cet essai est de vérifier le bon fonctionnement des conceptions de valve dans lesquelles l'énergie des circuits électroniques de la valve provient de la tension apparaissant entre les bornes de la valve.

L'essai consiste à appliquer une tension continue entre les bornes de la valve ou section de valve. Pour cet essai, seule la tension est importante, le courant étant secondaire.

Le fonctionnement correct des circuits électroniques de la valve peut être démontré soit en débloquent la valve ou la section de valve, soit en prolongeant l'état bloqué et en surveillant les signaux de retour de données de l'électronique de la valve.

La tension d'essai  $U_{\min}$  est définie de la façon suivante:

$$U_{\min} = \frac{N_{\text{tut}}}{N_{\text{t}}} \times U_{\text{W}} \times k_2$$

où

$U_{\text{W}}$  est la tension continue minimale d'une valve en service où le fonctionnement correct de l'électronique de la valve est exigé;

$N_{\text{tut}}$  est le nombre de niveaux de VSC en essai, connectés en série;

$N_{\text{t}}$  est le nombre total de niveaux de VSC connectés en série dans une valve unique, redondance incluse;

$k_2$  est un facteur de sécurité d'essai;

$k_2 = 0,95$ .

La durée de l'essai ne doit pas être inférieure à 10 min.

## 7 Essais diélectriques sur la structure de support de valve

### 7.1 Objectif des essais

Les principaux objectifs de ces essais sont de:

- vérifier la capacité de tenue en tension au niveau de l'isolation du support de valve, des conduits de refroidissement, des conduits de lumière et d'autres composants isolants associés au support de valve. S'il existe une isolation à la terre autre que le support de valve, des essais supplémentaires peuvent alors être nécessaires;
- vérifier que les tensions d'allumage et d'extinction des décharges partielles sont supérieures à la tension de fonctionnement maximale présente sur le support de valve.

NOTE Selon l'application, il est possible d'éliminer certains des essais réalisés sur le support de valve, après accord entre l'acheteur et le fournisseur.

## 7.2 Objet d'essai

Le support de valve à utiliser pour les essais peut être un objet représentatif distinct comprenant une représentation des parties adjacentes de la valve, ou il peut faire partie de l'assemblage utilisé pour les essais de valve unique ou d'ensemble à valves multiples. Il doit être assemblé avec tous les composants auxiliaires en place et les surfaces au potentiel de terre adjacentes doivent être correctement représentées. La proximité des surfaces au potentiel de terre adjacentes (matériel ou infrastructure de bâtiment) doit être évaluée et la représentation incluse le cas échéant. Pour les distances d'isolement nettement supérieures à celles déterminées par les exigences relatives à la coordination de l'isolement, par exemple des distances d'isolement imposées à la place des exigences d'accès, il peut alors être envisagé d'omettre les surfaces au potentiel de terre à ces emplacements. Si une valve unique est composée d'une seule structure, sa grande taille peut parfois rendre impossible l'essai de la valve complète dans un laboratoire. Dans ces cas, il est admis d'effectuer les essais de structure de support de valve sur une section préassignée de la structure de support, à condition de pouvoir démontrer que la conception de l'objet d'essai est représentative de la conception de la structure complète et que les essais couvrent les contraintes les plus défavorables exercées sur toute partie de la structure de support de la valve.

Pour les besoins de l'essai, le fluide de refroidissement doit être dans un état représentatif des conditions de service les plus pénalisantes.

Si une valve unique est composée de plusieurs structures de sorte qu'il existe plusieurs structures de support de valve par valve, il doit alors être démontré que les essais proposés couvrent les contraintes les plus défavorables exercées sur toute structure de support de valve.

## 7.3 Exigences d'essai

### 7.3.1 Généralités

Tous les niveaux d'essai indiqués ci-dessous sont soumis à une correction atmosphérique selon la description donnée en 4.2.

### 7.3.2 Essai de support de valve sous tension continue

Les deux bornes principales de la valve doivent être connectées entre elles, puis la tension continue doit être appliquée entre les deux bornes principales ainsi connectées et la terre. À partir d'une tension égale au maximum à 50 % de la tension d'essai pendant 1 min, la tension doit être élevée le plus rapidement possible à la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 1 min, être maintenue constante pendant 1 min, réduite à la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 3 h, maintenue constante pendant 3 h, puis réduite à zéro. Durant la dernière heure de l'essai de 3 h spécifié, le nombre de décharges partielles dépassant 300 pC doit être enregistré comme décrit à l'Annexe B de l'IEC 60700-1:2015+AMD1:2021.

Le nombre d'impulsions supérieures à 300 pC ne doit pas dépasser 15 impulsions par minute, selon une moyenne établie sur l'ensemble de la période d'enregistrement. Parmi celles-ci, pas plus de sept impulsions par minute ne doivent dépasser 500 pC, pas plus de trois impulsions par minute ne doivent dépasser 1 000 pC, et pas plus d'une impulsion par minute ne doit dépasser 2 000 pC.

Si une tendance croissante est observée au niveau de l'amplitude ou du taux de décharge partielle, la durée de l'essai peut être prolongée après accord mutuel entre l'acheteur et le fournisseur.

L'essai doit alors être répété avec une tension de polarité opposée.

Préalablement à l'essai et avant de répéter l'essai avec une tension de polarité opposée, le support de valve peut être court-circuité et mis à la terre pendant plusieurs heures. Cette procédure peut être répétée à la fin de l'essai sous tension continue.

La tension d'essai continue du support de valve  $U_{tds}$  doit être déterminée de la façon suivante:

essai de 1 min

$$U_{tds} = \pm U_{dmS1} \times k_3 \times k_t$$

essai de 3 h

$$U_{tds} = \pm U_{dmS2} \times k_3$$

où

$U_{dmS1}$  est la tension maximale de courte durée apparaissant au niveau du support de valve, telle que déterminée par des études de coordination de l'isolement.  $U_{dmS1}$  doit être la valeur la plus élevée entre (a) la tension moyenne maximale sur une période de 1 s et (b) la tension moyenne entre l'instant où la tension de crête apparaît et l'instant où la tension diminue rapidement par l'action de dispositifs à décharge rapide ou de la reconfiguration, le cas échéant;

$U_{dmS2}$  est la valeur maximale de la composante continue de la tension de fonctionnement en régime permanent apparaissant au niveau du support de valve;

$k_3$  est un facteur de sécurité d'essai;

$k_3 = 1,10$  pour l'essai de 1 min;

$k_3 = 1,15$  pour l'essai de 3 h;

$k_t$  est le facteur de correction atmosphérique selon 4.2.

### 7.3.3 Essai de support de valve sous tension alternative

Pour effectuer l'essai, les deux bornes principales de la valve doivent être connectées entre elles, puis la tension alternative doit être appliquée entre les deux bornes principales ainsi connectées et la terre.

À partir d'une tension égale au maximum à 50 % de la tension d'essai pendant 1 min, la tension doit être élevée à la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 1 min, être maintenue constante pendant 1 min, réduite à la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 30 min, maintenue constante pendant 30 min, puis réduite à zéro.

Avant la fin de l'essai de 30 min, le niveau de décharge partielle doit être surveillé et enregistré sur une période de 1 min. Si la valeur de décharge partielle est inférieure à 200 pC, la structure peut être acceptée sans condition. Si la valeur de décharge partielle est supérieure à 200 pC, les résultats d'essai doivent être évalués.

La tension d'essai alternative du support de valve  $U_{tas}$  doit être déterminée de la façon suivante:

essai de 1 min:

$$U_{tas} = \frac{U_{mS1}}{\sqrt{2}} \times k_4 \times k_t$$

essai de 30 min

$$U_{\text{tas}} = \frac{U_{\text{mS2}}}{\sqrt{2}} \times k_4$$

où

$U_{\text{mS1}}$  est la valeur de crête de la tension maximale présente sur le support de valve en service, en particulier en condition de défaut du système et en condition de fonctionnement en défaut de la valve. L'effet limitatif en surtension du parafoudre de phase ou d'autres dispositifs de protection contre les surtensions, le cas échéant, doit être pris en compte pour en déduire cette surtension;

$U_{\text{mS2}}$  est la valeur de crête de la tension de fonctionnement répétitive maximale au niveau du support de valve pendant le fonctionnement en régime permanent, y compris le dépassement de commutation;

$k_4$  est un facteur de sécurité d'essai;

$k_4$  = 1,10 pour l'essai de 1 min;

$k_4$  = 1,15 pour l'essai de 30 min;

$k_t$  est le facteur de correction atmosphérique selon 4.2.

#### **7.3.4 Essai de support de valve sous tension de choc de manœuvre**

L'essai doit comprendre trois applications de tensions de choc de manœuvre de polarité positive et trois applications de tensions de choc de manœuvre de polarité négative entre les bornes principales de la valve (connectées entre elles) et la terre.

Une forme d'onde de tension de choc de manœuvre normalisée, conforme à l'IEC 60060, doit être utilisée.

La tension d'essai doit être choisie conformément à la coordination de l'isolement du poste VSC.

#### **7.3.5 Essai de support de valve sous tension de choc de foudre**

L'essai doit comprendre trois applications de tensions de choc de foudre de polarité positive et trois applications de tensions de choc de foudre de polarité négative entre les bornes principales de la valve (connectées entre elles) et la terre.

Une forme d'onde de tension de choc de foudre normalisée, conforme à l'IEC 60060, doit être utilisée.

La tension d'essai doit être choisie conformément à la coordination de l'isolement du poste VSC.

## **8 Essais diélectriques sur un ensemble à valves multiples**

### **8.1 Généralités**

Le présent article s'applique uniquement si au moins deux valves sont installées dans une structure de valve commune (ensemble à valves multiples). Si chaque valve est montée individuellement dans sa propre structure de valve, le présent article ne s'applique pas.

## 8.2 Objectif des essais

Les principaux objectifs de ces essais sont de:

- a) vérifier la capacité de tenue en tension de l'isolation externe du MVU, par rapport à son environnement, en particulier pour la ou les valves connectées au potentiel du pôle;
- b) vérifier la capacité de tenue en tension entre des valves uniques dans une structure de MVU;
- c) vérifier que les niveaux de décharge partielle se situent dans les limites spécifiées.

## 8.3 Objet d'essai

De nombreuses dispositions de valves et d'ensembles à valves multiples sont possibles. L'objet ou les objets d'essai doivent être choisis afin de refléter, aussi précisément que possible, la configuration en service des valves, dans la mesure où cela est nécessaire pour l'essai en question. L'objet d'essai doit être entièrement équipé à moins qu'il soit possible de démontrer que la simulation ou l'omission de certains composants ne rend pas les résultats moins significatifs.

Des valves individuelles peuvent devoir être court-circuitées en fonction de la configuration du MVU et des objectifs de l'essai.

Lorsque la borne à basse tension du MVU n'est pas connectée au potentiel de terre, des précautions doivent être prises afin d'effectuer une terminaison convenable de la borne à basse tension du MVU au cours des essais pour simuler correctement la tension existant au niveau de cette borne. Des plans de masse, dont la séparation doit être déterminée en fonction de la proximité d'autres valves et des surfaces au potentiel de terre, doivent être utilisés.

## 8.4 Exigences d'essai

### 8.4.1 Essai de MVU sous tension continue à la terre

La tension d'essai continue doit être appliquée entre la borne à courant continu de potentiel le plus élevé du MVU et la terre.

À partir d'une tension égale au maximum à 50 % de la tension d'essai pendant 1 min, la tension doit être élevée le plus rapidement possible à la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 1 min, être maintenue constante pendant 1 min, réduite à la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 3 h, maintenue constante pendant 3 h, puis réduite à zéro.

Dans la mesure du possible, la tension d'essai doit être augmentée de 50 % jusqu'au niveau de tension de l'essai pendant 1 min en moins de 10 s environ.

Pendant la dernière heure de l'essai de 3 h spécifié, le nombre de décharges partielles dépassant 300 pC doit être enregistré.

Le nombre d'impulsions supérieures à 300 pC ne doit pas dépasser 15 impulsions par minute, selon une moyenne établie sur l'ensemble de la période d'enregistrement. Parmi celles-ci, pas plus de sept impulsions par minute ne doivent dépasser 500 pC, pas plus de trois impulsions par minute ne doivent dépasser 1 000 pC, et pas plus d'une impulsion par minute ne doit dépasser 2 000 pC.

Si une tendance croissante est observée au niveau de l'amplitude ou du taux de décharge partielle, la durée de l'essai peut être prolongée après accord mutuel entre l'acheteur et le fournisseur.

L'essai doit alors être répété avec une tension de polarité opposée.

Préalablement à l'essai et avant de répéter l'essai avec une tension de polarité opposée, les bornes du MVU peuvent être court-circuitées ensemble et mises à la terre pendant plusieurs heures. Cette procédure peut être répétée à la fin de l'essai sous tension continue.

La tension d'essai continue du MVU  $U_{tdm}$  doit être déterminée de la façon suivante:

essai de 1 min

$$U_{tdm} = \pm U_{dmm1} \cdot k_5 \cdot k_t$$

essai de 3 h

$$U_{tdm} = \pm U_{dmm2} \times k_5$$

où

$U_{dmm1}$  est la tension maximale de courte durée apparaissant entre la borne à haute tension du MVU et la terre, telle que déterminée par des études de coordination de l'isolement;  $U_{dmm1}$  doit être la valeur la plus élevée entre (a) la tension moyenne maximale sur une période de 1 seconde et (b) la tension moyenne entre l'instant où la tension de crête apparaît et l'instant où la tension diminue rapidement par l'action de dispositifs à décharge rapide ou de la reconfiguration, le cas échéant;

$U_{dmm2}$  est la valeur maximale de la composante de courant continu de la tension de fonctionnement en régime permanent apparaissant entre la borne à haute tension du MVU et la terre;

$k_5$  est un facteur de sécurité d'essai;

$k_5 = 1,10$  pour l'essai de 1 min;

$k_5 = 1,15$  pour l'essai de 3 h;

$k_t$  est le facteur de correction atmosphérique selon 4.2.

#### 8.4.2 Essai de MVU sous tension alternative

Si un MVU subit des contraintes de tension alternative ou composite alternative et continue entre deux bornes quelconques, dont la capacité de tenue n'est pas démontrée de façon adéquate par d'autres essais, il est alors nécessaire de réaliser un essai sous tension alternative entre les bornes concernées du MVU.

Pour réaliser l'essai, la source de tension d'essai doit être connectée à la paire de bornes du MVU en question. Le point de connexion à la terre dépend de la disposition du circuit d'essai.

À partir d'une tension égale au maximum à 50 % de la tension d'essai pendant 1 min, la tension doit être élevée à la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 1 min, être maintenue constante pendant 1 min, réduite à la valeur à maintenir pendant 30 min, maintenue constante pendant 30 min, puis réduite à zéro.

Avant la fin de l'essai de 30 min, le niveau de décharge partielle doit être surveillé et enregistré sur une période de 1 min. Si la valeur de décharge partielle est inférieure à 200 pC, la structure peut être acceptée sans condition. Si la valeur de décharge partielle est supérieure à 200 pC, les résultats d'essai doivent être évalués.

La tension d'essai alternative du MVU  $U_{\text{tam}}$  doit être déterminée de la façon suivante:

essai de 1 min

$$U_{\text{tam}} = \frac{U_{\text{mm1}}}{\sqrt{2}} \times k_6 \times k_t$$

essai de 30 min

$$U_{\text{tam}} = \frac{U_{\text{mm2}}}{\sqrt{2}} \times k_6$$

où

$U_{\text{mm1}}$  est la valeur de crête de la tension maximale entre les bornes du MVU en service, en particulier en condition de défaut du système et en condition de fonctionnement en défaut de la valve. L'effet limitatif en surtension du parafoudre de phase ou d'autres dispositifs de protection contre les surtensions, le cas échéant, doit être pris en compte pour en déduire cette surtension;

$U_{\text{mm2}}$  est la valeur de crête de la tension de fonctionnement répétitive maximale entre les bornes du MVU pendant le fonctionnement en régime permanent, y compris le dépassement de commutation;

$k_6$  est un facteur de sécurité d'essai;

$k_6 = 1,10$  pour l'essai de 1 min;

$k_6 = 1,15$  pour l'essai de 30 min;

$k_t$  est le facteur de correction atmosphérique selon 4.2.

#### 8.4.3 Essai de MVU sous tension de choc de manœuvre

Une forme d'onde de tension de choc de manœuvre normalisée, conforme à l'IEC 60060, doit être utilisée.

La tension d'essai de choc de manœuvre du MVU doit être appliquée entre la borne à haute tension du MVU et la terre.

L'essai doit comprendre trois applications de tension de choc de manœuvre de polarité positive et trois applications de tension de choc de manœuvre de polarité négative d'amplitude spécifiée.

La tension d'essai de choc de manœuvre du MVU  $U_{\text{tsm}}$  doit être déterminée de la façon suivante:

$$U_{\text{tsm}} = \pm U_{\text{SIPL}_m} \times k_7 \times k_t$$

où

$U_{\text{SIPL}_m}$  est le niveau de protection aux surtensions de manœuvre déterminé par la coordination de l'isolement en tenant compte du ou des parafoudres connectés entre la borne à haute tension du MVU et la terre;

$k_7$  est un facteur de sécurité d'essai;

$k_7 = 1,10$ ;

$k_t$  est le facteur de correction atmosphérique;

$k_t$  est la valeur selon 4.2.

Si l'essai spécifié ci-dessus ne vérifie pas de manière adéquate la tenue aux chocs de manœuvre entre toutes les bornes du MVU, la réalisation d'essais supplémentaires doit alors être envisagée pour vérifier l'isolement.

NOTE Il n'est pas nécessaire de réaliser l'essai du MVU sous tension de choc de manœuvre, sous réserve d'accord entre l'acheteur et le fournisseur, à condition qu'il soit possible de démontrer d'une autre manière que:

- a) les distances d'isolement externes dans l'air par rapport à d'autres valves et à la terre sont adaptées pour le niveau exigé de résistance à la tension de choc de manœuvre; et
- b) la résistance aux surtensions de manœuvre entre deux bornes quelconques du MVU est correctement démontrée par d'autres essais.

#### 8.4.4 Essai de MVU sous tension de choc de foudre

Une forme d'onde de tension de choc de foudre normalisée, conforme à l'IEC 60060, doit être utilisée.

La tension d'essai de choc de foudre du MVU doit s'appliquer entre la borne à haute tension du MVU et la terre.

L'essai doit comprendre trois applications de tension de choc de foudre de polarité positive et trois applications de tension de choc de foudre de polarité négative d'amplitude spécifiée.

La tension d'essai de choc de foudre du MVU  $U_{\text{tlm}}$  doit être déterminée de la façon suivante:

$$U_{\text{tlm}} = \pm U_{\text{LIPL}_m} \times k_8 \times k_t$$

où

$U_{\text{LIPL}_m}$  est le niveau de protection aux surtensions de foudre déterminé par la coordination de l'isolement en tenant compte du ou des parafoudres connectés entre la borne à haute tension du MVU et la terre;

$k_8$  est un facteur de sécurité d'essai;

$k_8 = 1,10$ ;

$k_t$  est le facteur de correction atmosphérique;

$kt$  est la valeur selon 4.2.

Si l'essai spécifié ci-dessus ne vérifie pas de manière adéquate la tension de tenue au choc de foudre entre toutes les bornes du MVU, la réalisation d'essais supplémentaires doit alors être envisagée pour vérifier cet isolement.

NOTE Il n'est pas nécessaire de réaliser l'essai du MVU sous tension de choc de foudre, sous réserve d'accord entre l'acheteur et le fournisseur, à condition qu'il soit possible de démontrer d'une autre manière que:

- a) les distances d'isolement externes dans l'air par rapport à d'autres valves et par rapport à la terre sont adaptées pour le niveau exigé de tension de tenue au choc de foudre; et
- b) la tension de tenue au choc de foudre entre deux bornes quelconques du MVU est correctement démontrée par d'autres essais.

## 9 Essais diélectriques entre les bornes de valve

### 9.1 Objectifs des essais

Ces essais sont destinés à vérifier la conception de la valve en fonction de ses caractéristiques liées à la tension pour différents types de surtensions (surtensions en courant continu, en courant alternatif, de choc de manœuvre et de choc de foudre). Les essais doivent démontrer les points suivants:

- a) la valve résiste aux surtensions spécifiées;
- b) les décharges partielles s'inscrivent dans les limites spécifiées dans les conditions d'essai spécifiées;
- c) les circuits internes de répartition des potentiels présentent une puissance assignée suffisante;

Il convient de noter que les essais décrits dans le présent article sont basés sur des formes d'ondes et des procédures d'essai normalisées mises au point pour l'essai de réseaux et de composants à courant alternatif à haute tension. Cette approche offre de grands avantages pour l'industrie car elle permet d'appliquer une grande partie de la technologie existante en matière d'essais à haute tension à la qualification des valves CCHT. En revanche, il faut admettre qu'une application CCHT particulière peut engendrer des formes d'ondes différentes des formes d'ondes normalisées et que, dans ce cas, l'essai peut être modifié afin de refléter les conditions attendues de façon réaliste.

Il convient également de noter que la correction atmosphérique n'est pas nécessaire lors des essais diélectriques entre les bornes de valve si l'altitude du site est inférieure à 1 000 m. Toutefois, pour les valves installées à une altitude supérieure à 1 000 m, les distances d'isolement internes dans l'air de la valve doivent être vérifiées par des essais supplémentaires sous les tensions d'essai à correction atmosphérique. Les paires IGBT-diode peuvent être remplacées par des blocs isolants lors de ces essais.

### 9.2 Objet d'essai

Pour les valves du type à commutateur, il convient généralement que l'objet d'essai soit une valve complète. Pour les valves du type à source de tension commandable, l'essai d'une valve complète peut ne pas être pratique en raison de ses grandes dimensions physiques. Dans ces cas, il convient que l'objet d'essai soit généralement une seule structure représentative de la conception diélectrique de la valve. Les essais portant sur des sections de valve individuelles sont acceptables à condition que le fournisseur soit en mesure de démontrer que la répartition de la tension entre les sections de valve, dans les conditions d'essai, est représentative de la répartition de la tension dans une valve complète en service. La valve ou section de valve d'essai doit être assemblée avec tous les composants auxiliaires, à l'exception du parafoudre de valve lorsqu'il existe. La valve peut faire partie d'un ensemble à valves multiples.

Si une section de valve est utilisée comme objet d'essai, le nombre minimal de niveaux de valve dans la section d'essai doit être convenu avec l'acheteur. Dans ces cas, des essais supplémentaires pour vérifier l'isolement entre les différentes parties de la valve complète peuvent s'avérer nécessaires et doivent être convenus entre l'acheteur et le fournisseur.

Le fluide de refroidissement doit être dans un état représentant les conditions de service, à l'exception du débit qui peut être réduit. Si un objet, extérieur à la structure, est nécessaire pour représenter correctement les contraintes au cours de l'essai, il doit être inclus ou simulé dans l'essai. La proximité des surfaces au potentiel de terre adjacentes (matériel ou infrastructure de bâtiment) doit être évaluée et la représentation incluse le cas échéant. Pour les distances d'isolement nettement supérieures à celles déterminées par les exigences relatives à la coordination de l'isolement, par exemple des distances d'isolement imposées à la place des exigences d'accès, il peut alors être envisagé d'omettre les surfaces au potentiel de terre à ces emplacements.

## **9.3 Méthodes d'essai**

### **9.3.1 Généralités**

Les valves VSC diffèrent des valves à convertisseur commuté par le réseau (LCC) et autres matériels à haute tension par plusieurs aspects. L'une des différences majeures est que le convertisseur a une très grande capacité de stockage d'énergie. Pour les valves du type à source de tension commandable, le stockage fait partie intégrante de la valve alors que pour les valves de type commutateur, il est étroitement lié à la valve. La seconde différence majeure est la commande de tension active aux niveaux de valve VSC individuels. En conséquence de ces caractéristiques, la méthode d'essai utilisée lors des essais diélectriques des valves LCC ne peut pas être appliquée à de telles valves.

La réalisation de l'essai diélectrique des valves présente des difficultés pratiques considérables sur les valves à VSC de type à source de tension commandable, en raison du courant élevé consommé par la capacité intégrée. Les courants assignés très limités des alimentations d'essai disponibles dans les laboratoires en mesure de réaliser des essais à haute tension impliquent que, sans modifier l'objet d'essai, une durée excessivement longue est exigée pour charger la capacité de l'objet d'essai à la tension exigée pendant l'essai sous tension alternative-continue, ce qui engendre des contraintes exagérément excessives pour l'objet d'essai. La capacité très élevée rend également impossible la mesure des décharges partielles et les tensions de choc entre les bornes de valve ne se produisent pas sur une valve débloquée en fonctionnement. C'est la raison pour laquelle deux méthodes d'essais diélectriques de valve, qui reposent sur le même principe, sont définies pour les essais diélectriques de valve de type à source de tension commandable. Le fournisseur peut utiliser l'une ou l'autre pour l'essai diélectrique de valve.

L'essai diélectrique de valve sur les valves à VSC de type commutateur doit suivre la première méthode.

### **9.3.2 Première méthode**

La substitution temporaire d'un condensateur d'essai spécial par une capacité réduite mais avec le même boîtier que le condensateur d'origine dans chaque niveau de valve est nécessaire si cette méthode est utilisée pour l'essai des valves de type à source de tension commandable. Ce condensateur d'essai doit permettre de réaliser le profil de tension au niveau de l'objet d'essai pendant ledit essai.

De plus, il peut s'avérer nécessaire de désactiver les cartes électroniques de commande ou d'autres circuits auxiliaires au cours de cet essai, ou de prévoir des moyens indépendants pour leur alimentation, afin de prévenir toute interférence avec la mesure des décharges partielles, provenant par exemple des circuits d'alimentation de cartes électroniques de commande.

Lorsque les cartes électroniques de commande ou d'autres circuits auxiliaires sont désactivés pendant l'essai de 10 s, la fonction de contrôle actif de la tension, le cas échéant, fournie par la carte électronique de commande ou d'autres circuits auxiliaires à chaque niveau d'IGBT peut être représentée par d'autres moyens, par exemple des shunts résistifs à résistance élevée aux niveaux des IGBT d'essai, pour assurer une répartition de tension appropriée.

Si la désactivation des cartes électroniques de commande ou d'autres circuits auxiliaires n'est pas possible pendant cet essai et s'il peut être démontré que les interférences sont provoquées par un circuit électronique, ces interférences peuvent alors être déduites des mesures.

### **9.3.3 Seconde méthode**

Les essais portant sur des sections de valve individuelles sont acceptables à condition que le fournisseur soit en mesure de démontrer que la répartition de la tension entre les sections de valve, dans les conditions d'essai, est représentative de la répartition de la tension dans une valve complète en service.

Dans le cas d'une valve à VSC de type à source de tension commandable, la commande active des tensions du condensateur de sous-module équivaut à la distribution de tension à travers la valve complète. Les capacités intégrées réagissent comme des sources de tension constante avec une impédance interne très faible. Une tension de choc entraîne un courant élevé, la variation résultante de la tension du sous-module suivant la tolérance du condensateur intégré.

L'essai diélectrique de la valve est réalisé en une seule étape. La première étape porte au niveau du composant et la seconde sur la valve ou section de valve.

À la première étape, les niveaux de valve sont indépendamment soumis à essai. Les essais d'isolement et de décharge partielle avec une tension alternative, continue et/ou alternative-continue doivent être réalisés au niveau du sous-composant (par exemple, sans activation de la carte électronique de commande du module de puissance et sans condensateur) ou au niveau du sous-module complet. L'objectif est de démontrer à la fois la capacité de tenue d'isolement de chaque sous-composant et l'absence de décharge partielle à chaque point sensible d'un niveau de valve.

Comme indiqué, la distribution uniforme par des tensions de sous-module commandées activement permet de réaliser l'essai diélectrique entre les bornes de valve ainsi que sur des étages de valves avec des niveaux de tension d'essai ajustés.

Par conséquent, à la seconde étape, l'essai est réalisé avec des niveaux de sous-module court-circuités, des interconnexions entre sous-modules adjacents retirées et la répartition de tension à travers la valve ou section de valve est contrôlée par un circuit de répartition externe, par exemple un réseau de résistances, un réseau de condensateurs ou un réseau de RC.

La structure interétage de valve représente une section type de la structure de la tour. Les composants essentiels de la structure de la tour sont exposés aux valeurs et aux formes de tension spécifiées. Les essais portent sur les distances d'isolement dans l'air et les lignes de fuite des isolateurs entre étages et du boîtier du condensateur, les fibres optiques, y compris leurs gaines, les tuyaux de refroidissement par eau et la structure mécanique. La tension alternative, la tension continue (incluant la mesure des décharges partielles pour ces deux tensions) et les tensions de choc sont soumises à essai. Une marge de sécurité supplémentaire pour les tensions d'essai spécifiques est possible et utilisée, par exemple une correction atmosphérique des tensions d'essai spécifiques peut être ajoutée.

NOTE L'ajout de réseaux de répartition externes peut modifier le profil de l'objet d'essai de sorte qu'il ne soit pas entièrement représentatif du matériel en service. Dans la pratique, ceci peut entraîner des difficultés dans la réalisation de l'essai, en particulier pour déterminer les sources de décharge partielle. Par conséquent, une méthode alternative au raccordement des réseaux de répartition peut être utilisée à la place, où chaque espace d'isolement est soumis à essai indépendamment à des tensions correspondant à chaque espace particulier. Ceci peut être réalisé en retirant des interconnexions et/ou en raccourcissant des parties pertinentes de l'objet d'essai, puis en appliquant la tension équivalente mise à l'échelle à travers l'espace. L'essai est réalisé une seule fois pour chaque espace représentant une distance d'isolement, par exemple interétage, intermodule, intersous-module. Si nécessaire, selon la conception, le montage d'essai doit également tenir compte des espaces d'isolement diagonaux (espaces entre des sous-modules appartenant à différentes piles de modules et différents étages, les uns au-dessus des autres).

## **9.4 Exigences d'essai**

### **9.4.1 Essai sous tension alternative-continue composite**

Cet essai reproduit la tension alternative-continue composite résultant de certains défauts de convertisseur ou de réseau et pendant le fonctionnement en régime permanent. L'essai comprend un essai de courte durée et un essai de longue durée.

Pendant cet essai, un condensateur peut être utilisé conjointement avec une source de tension d'essai alternative pour produire une forme d'onde de tension alternative-continue composite. Selon la topologie du convertisseur, le condensateur peut faire partie intégrante de la valve ou constituer un élément séparé (une partie du circuit d'essai, et non une partie de l'objet d'essai).

Une autre possibilité consiste à utiliser une source de tension continue distincte, à la place du condensateur.

À partir d'une tension égale au maximum à 50 % de la tension d'essai pendant 10 s, la tension doit être élevée le plus rapidement possible au niveau d'essai spécifié pour l'essai de 10 s, réduite à la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 3 h, maintenue constante pendant 3 h, puis réduite à zéro.

Pour la mesure des décharges partielles en courant alternatif, le niveau des décharges partielles enregistré au cours de la dernière minute de l'essai de 3 h doit être inférieur à 200 pC, à condition que les composants sensibles aux décharges partielles dans la valve aient fait l'objet d'essais séparés. Pour la mesure des décharges partielles en courant continu, la durée d'enregistrement doit être la dernière heure de l'essai de 3 h. Le nombre d'impulsions supérieures à 300 pC ne doit pas dépasser 15 impulsions par minute, selon une moyenne établie sur l'ensemble de la période d'enregistrement. Parmi celles-ci, pas plus de sept impulsions par minute ne doivent dépasser 500 pC, pas plus de trois impulsions par minute ne doivent dépasser 1 000 pC, et pas plus d'une impulsion par minute ne doit dépasser 2 000 pC.

NOTE 1 Si une tendance croissante est observée au niveau de l'amplitude ou du taux de décharge partielle, la durée de l'essai peut être prolongée après accord mutuel entre l'acheteur et le fournisseur.

NOTE 2 Il peut s'avérer nécessaire de désactiver le circuit électronique de commande ou d'autres circuits auxiliaires au cours de cet essai, ou de prévoir des moyens indépendants pour leur alimentation, afin de prévenir toute interférence avec la mesure des décharges partielles, provenant par exemple des circuits d'alimentation de la carte électronique de commande.

Les tensions d'essai de valve ont une forme d'onde sinusoïdale superposée à un niveau de tension continue.

La tension d'essai de 10 s de la valve,  $U_{tv1}$ , doit être déterminée de la façon suivante:

$$U_{tv1} = (k_{c1} \times U_{tac1} \times \sin(2\pi ft) + U_{tdc1}) \times k_0 \times k_g$$

où

$U_{tac1}$  est la valeur de crête de la composante alternative de la surtension temporaire maximale apparaissant entre les bornes de la valve, calculée à partir de la tension de valve crête à crête divisée par deux;

$U_{tdc1}$  est la valeur moyenne maximale pendant 1 s de la composante continue de la tension apparaissant entre les bornes de la valve au moment des défauts, après avoir tenu compte de l'effet limitatif en tension du parafoudre du pôle à courant continu;

$k_{c1}$  est le facteur de dépassement du palier de tension associé à un palier de tension de sortie du convertisseur, dans les conditions cohérentes avec celles appliquées pour définir  $U_{tac1}$ . Pour un convertisseur de type MMC ou CTL, le facteur de dépassement du palier de tension est lié au facteur de dépassement d'une cellule ou d'un sous-module;

$k_0$  est le facteur d'échelle d'essai selon 4.3.2;

$k_g$  est un facteur de sécurité d'essai;

$k_g = 1,1$ ;

$f$  est la fréquence d'essai (50 Hz ou 60 Hz, selon les installations d'essai).

NOTE 3 Les conditions conduisant aux valeurs les plus élevées de  $U_{tac1}$  et  $U_{tdc1}$  peuvent ne pas survenir simultanément. Lors de la réalisation d'un essai de tension alternative-continue combinée, il est important d'utiliser des conditions autocohérentes qui conduisent à la combinaison de contraintes de valve la plus défavorable, afin d'éviter toute contrainte excessive de l'objet d'essai. Pour l'essai de 10 s, le paramètre le plus important est généralement la crête de la tension combinée.

La tension d'essai de 3 s de la valve,  $U_{tv2}$ , doit être déterminée de la façon suivante:

$$U_{tv2} = U_{tac2} + U_{tdc2}$$

$$U_{tac2} = U_{max-cont} \cdot \sin(2\pi ft) \cdot k_{c2} \cdot k_0 \cdot k_9$$

$$U_{tdc2} = U_{dmax} \cdot k_0 \cdot k_9$$

où

$U_{max-cont}$  est la valeur de crête de la composante alternative de la tension en régime permanent apparaissant entre les bornes de la valve, calculée à partir de la tension de valve crête à crête divisée par deux;

$U_{dmax}$  est la valeur maximale de la composante continue de la tension en régime permanent apparaissant entre les bornes de la valve, calculée à partir de la tension entre les bornes de courant continu du convertisseur divisée par deux;

$k_{c2}$  est le facteur de dépassement du palier de tension associé à un palier de tension de sortie du convertisseur, dans les conditions cohérentes avec celles appliquées pour définir  $U_{tac2}$ . Pour un convertisseur de type MMC ou CTL, le facteur de dépassement du palier de tension est lié au facteur de dépassement d'une cellule ou d'un sous-module;

$f$  est la fréquence d'essai (50 Hz ou 60 Hz, selon les installations d'essai).

#### 9.4.2 Variantes d'essai (seconde méthode seulement)

##### 9.4.2.1 Généralités

Lorsque la seconde méthode est adoptée, l'essai de tension alternative-continue composite spécifié au paragraphe précédent peut être remplacé, au cours de la seconde étape, par un essai de tension alternative et un essai de tension continue réalisés séparément.

NOTE En général, il est uniquement possible d'appliquer la variante de la méthode d'essai lorsque des espaces d'isolement passifs sont soumis à essai, car les diodes de roue libre dans la valve empêchent normalement l'application d'une tension alternative pure.

##### 9.4.2.2 Essai de valve sous tension alternative

L'essai consiste à appliquer les tensions d'essai spécifiées  $U_{tac1}$  et  $U_{tac2}$  pendant la durée spécifiée.  $U_{tac1}$  et  $U_{tac2}$  ont des formes d'onde sinusoïdales avec une fréquence de 50 Hz ou 60 Hz, selon l'installation d'essai.

L'essai est réalisé sur une durée courte de 10 s et une durée longue de 30 min.

À partir d'une tension égale au maximum à 50 % de la tension d'essai pendant 0 s, la tension doit être élevée au niveau d'essai spécifié à maintenir pendant 10 s, être maintenue constante pendant 10 s, réduite à la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 30 min, maintenue constante pendant 30 min, puis réduite à zéro. Avant la fin de l'essai de 30 min, le niveau de décharge partielle doit être surveillé et enregistré sur une période de 1 min. Si la valeur de décharge partielle est inférieure à 200 pC, la structure peut être acceptée sans condition. Si la valeur de décharge partielle est supérieure à 200 pC, les résultats d'essai doivent être évalués.

La valeur efficace de la tension d'essai de 10 s de la valve sous courant alternatif,  $U_{tac1}$ , et de la tension d'essai de 30 min sous courant continu,  $U_{tac2}$ , doit être déterminée de la façon suivante:

$$U_{tac1} = \frac{U_{vp1}}{\sqrt{2}} \cdot k_{c1} \cdot k_0 \cdot k_{10}$$

$$U_{\text{tac}2} = \frac{U_{\text{vp}2}}{\sqrt{2}} \cdot k_{c1} \cdot k_0 \cdot k_{10}$$

où

- $U_{\text{vp}1}$  est la valeur de crête de la surtension temporaire maximale au niveau de la valve;
- $U_{\text{vp}2}$  est la valeur de crête de la tension maximale en régime permanent au niveau de la valve;
- $k_{c1}$  est le facteur de dépassement du palier de tension associé à un palier de tension de sortie du convertisseur, dans les conditions cohérentes avec celles appliquées pour définir  $U_{\text{tac}1}$ . Pour un convertisseur de type MMC ou CTL, le facteur de dépassement du palier de tension est lié au facteur de dépassement d'une cellule ou d'un sous-module;
- $K_{c2}$  est le facteur de dépassement du palier de tension associé à un palier de tension de sortie du convertisseur, dans les conditions cohérentes avec celles appliquées pour définir  $U_{\text{tac}2}$ . Pour un convertisseur de type MMC ou CTL, le facteur de dépassement du palier de tension est lié au facteur de dépassement d'une cellule ou d'un sous-module;
- $k_0$  est le facteur d'échelle d'essai selon 4.3.2;
- $k_{10}$  est un facteur de sécurité d'essai;
- $k_{10} = 1,10$ .

#### 9.4.2.3 Essai de valve sous tension continue

L'essai consiste à appliquer les tensions d'essai spécifiées  $U_{\text{tdc}1}$  et  $U_{\text{tdc}2}$  pendant la durée spécifiée.

L'essai est réalisé sur une durée courte de 10 s et une durée longue de 3 h.

À partir d'une tension égale au maximum à 50 % de la tension d'essai pendant 0 s, la tension doit être élevée le plus rapidement possible au niveau d'essai spécifié pour l'essai de 10 s, réduite à la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 3 h, maintenue constante pendant 3 h, puis réduite à zéro.

Pour la mesure des décharges partielles en courant continu, la durée d'enregistrement doit être la dernière heure de l'essai de 3 h. Le nombre d'impulsions supérieures à 300 pC ne doit pas dépasser 15 impulsions par minute, selon une moyenne établie sur l'ensemble de la période d'enregistrement. Parmi celles-ci, pas plus de sept impulsions par minute ne doivent dépasser 500 pC, pas plus de trois impulsions par minute ne doivent dépasser 1 000 pC, et pas plus d'une impulsion par minute ne doit dépasser 2 000 pC.

La tension d'essai de 10 s de la valve sous courant continu,  $U_{\text{tdc}1}$ , et la tension d'essai de 3 h sous courant continu,  $U_{\text{tdc}2}$ , doit être déterminée de la façon suivante:

$$U_{\text{tdc}1} = U_{\text{vp}1} \times k_0 \times k_{10}$$

$$U_{\text{tdc}2} = U_{\text{vp}2} \times k_0 \times k_{10}$$

### 9.4.3 Essais de valve sous tension de choc

#### 9.4.3.1 Généralités

Les facteurs suivants doivent être pris en compte au cours des essais de valve sous tension de choc.

- a) Pour certaines applications, par exemple si aucune ligne aérienne n'est présente du côté courant continu et si la barre omnibus entre la bobine d'inductance de phase et les valves est entièrement protégée contre le foudroiement direct du côté courant alternatif ou dans les topologies, lorsque la valve joue le rôle d'une source de tension commandable avec sa propre capacité de courant continu intégrée, les essais de valve sous tension de choc sont moins importants car les valves ne subissent pas les chocs à une amplitude pouvant s'avérer décisive pour leur fonctionnement électrique. Dans ce type d'applications, les essais sous tension de choc peuvent être omis.

NOTE 1 À moins que tous les équipements entre le transformateur et les bobines d'inductance en courant continu ne soient complètement enfermés, la possibilité de foudroiement d'une section exposée de la barre omnibus adjacente à la valve (par exemple entre les bobines d'inductance de valve et la valve) ne peut pas être exclue. Cependant, compte tenu de la petite zone affectée et de la faible probabilité d'avoir un choc de foudre d'amplitude suffisamment faible pour éviter le blindage, l'occurrence de cet événement est extrêmement peu probable dans la pratique et peut donc être ignorée.

NOTE 2 La fermeture d'urgence de la valve d'IGBT pendant qu'elle achemine le courant (essai de blocage de l'IGBT en cas de surintensité: Article 10) peut également générer une surtension transitoire entre les bornes de la valve. Une partie de cette surtension apparaît directement sur les niveaux de la valve et est couverte par l'essai de blocage de l'IGBT en cas de surintensité, mais une tension transitoire peut en outre se développer au niveau de l'inductance de fuite des barres omnibus au niveau de la valve, dont il peut être nécessaire de tenir compte lors de l'évaluation des contraintes de tension de choc entre les bornes.

- b) L'essai de tension de choc s'applique uniquement dans la polarité qui correspond à la polarité de tension de tenue de la valve.
- c) Si les niveaux de résistance à la tension de choc de la valve sont inférieurs ou égaux au niveau d'essai de la valve sous tension alternative-continue, l'essai de la valve sous tension alternative-continue est jugé couvrir les essais sous tension de choc et, par conséquent, les essais sous tension de choc peuvent être omis.

#### 9.4.3.2 Essai de valve sous tension de choc de manœuvre

Une forme d'onde de tension de choc de manœuvre normalisée, conforme à l'IEC 60060, doit être utilisée.

L'essai doit comprendre trois applications de tensions de choc de manœuvre d'amplitude spécifiée sur la valve.

La tension de tenue d'essai de choc de manœuvre de la valve  $U_{tsv}$  doit être déterminée de la façon suivante.

- Valve avec protection par parafoudre de valve:

$$U_{tsv} = U_{SIPL\_v} \times k_0 \times k_{11}$$

où

$U_{SIPL\_v}$  est le niveau de protection contre les chocs de manœuvre du parafoudre de valve ou le niveau de protection dérivé des parafoudres côté courant alternatif et courant continu;

$k_0$  est le facteur d'échelle d'essai selon 4.3.2;

$k_{11}$  est un facteur de sécurité d'essai;

$k_{11} = 1,10$ .

- Valve sans protection par parafoudre de valve:

Cet essai est destiné à vérifier l'isolement de la valve lorsqu'elle n'est pas directement protégée par des parafoudres.

$$U_{\text{tsv}} = U_{\text{cms}} \times k_0 \times k_{12}$$

où

$U_{\text{cms}}$  est la tension prévue de choc de manœuvre présumée aux bornes de la valve, conformément aux études de coordination d'isolement du système;

$k_0$  est le facteur d'échelle d'essai selon 4.3.2;

$k_{12}$  est un facteur de sécurité d'essai;

$k_{12} = 1,15$ .

La valve doit résister à la tension d'essai sans coupure de la manœuvre ou de l'isolement.

#### 9.4.3.3 Essai de valve sous tension de choc de foudre

Une forme d'onde de tension de choc de foudre normalisée, conforme à l'IEC 60060, doit être utilisée.

L'essai doit comprendre trois applications de tensions de choc d'amplitude spécifiée sur la valve.

La tension de tenue au choc de foudre de la valve  $U_{\text{tlv}}$  doit être déterminée de la façon suivante.

- Valve avec protection par parafoudre de valve:

$$U_{\text{tlv}} = U_{\text{LIPL}_V} \times k_0 \times k_{13}$$

où

$U_{\text{LIPL}_V}$  est le niveau de protection contre les chocs de foudre du parafoudre de valve ou le niveau de protection dérivé des parafoudres côté courant alternatif et courant continu;

$k_0$  est le facteur d'échelle d'essai selon 4.3.2;

$k_{13}$  est un facteur de sécurité d'essai;

$k_{13} = 1,10$ .

- Valve sans protection par parafoudre de valve:

Cet essai est destiné à vérifier l'isolement de la valve lorsqu'elle n'est pas directement protégée par des parafoudres.

$$U_{\text{tlv}} = U_{\text{cml}} \times k_0 \times k_{14}$$

où

$U_{\text{cml}}$  est la tension prévue de choc de foudre présumée aux bornes de la valve, conformément aux études de coordination d'isolement du système;

$k_0$  est le facteur d'échelle d'essai selon 4.3.2;

$k_{14}$  est un facteur de sécurité d'essai;

$k_{14} = 1,15$ .

La valve doit résister à la tension d'essai sans coupure de la manœuvre ou de l'isolement.

## 10 Essai de blocage de l'IGBT en cas de surintensité

### 10.1 Objectif de l'essai

Le principal objectif est de vérifier l'adéquation de la conception de la valve à VSC, notamment l'IGBT, et des circuits électriques associés en fonction des contraintes de tension et de courant, lors du blocage, en cas de pannes de type court-circuit ou de ratés d'allumage.

L'essai doit simuler la combinaison de contrainte de tension et de température de jonction instantanée la plus défavorable, sur la base des conditions représentant les paramètres de tolérance les moins favorables des circuits de surveillance/protection. Selon la stratégie de commande et de protection, au moins deux essais peuvent être exigés afin de reproduire toutes les contraintes pertinentes.

Les exigences générales relatives au circuit d'essai et à la représentation du condensateur à courant continu, de l'inductance de fuite de la boucle, etc. sont telles qu'indiquées en 6.3.

### 10.2 Objet d'essai

L'objet d'essai est tel que décrit en 6.2. Cependant, il peut également être nécessaire de représenter certains circuits de protection ou de surveillance si ceux-ci sont essentiels pour détecter un événement de surintensité. Pour les valves à VSC de type à source de tension commandable, cet essai peut également être réalisé au niveau de la valve.

### 10.3 Exigences d'essai

L'essai consiste à amener l'objet d'essai à l'équilibre thermique dans les conditions qui entraînent la température de jonction en régime permanent la plus élevée pour l'IGBT concerné (voir 6.4) et à déclencher ensuite un événement de surintensité. Le système de commande et de protection détecte alors la surintensité et la supprime en mettant l'IGBT hors tension à un courant inférieur à la limite de blocage sécurisée maximale.

Pour une valve de type commutateur, la tension d'essai  $U_{tpv2}$  doit être déterminée de la façon suivante:

$$U_{tpv2} = U_{dtemp} \times k_n \times k_{15}$$

où

$U_{dtemp}$  est la surtension continue temporaire maximale de la valve, y compris l'ondulation;

$k_n$  est un facteur d'échelle d'essai selon 4.3.1;

$k_{15}$  est un facteur de sécurité d'essai;

$k_{15} = 1,05$ .

Pour une valve de type à source de tension commandable, la tension d'essai,  $U_{tpv12}$ , par niveau de valve, doit être déterminée de la façon suivante:

$$U_{tpv12} = U_{dtemp} \times k_n \times k_{15}$$

où

$U_{dtemp}$  est la surtension continue temporaire maximale par niveau de valve, y compris l'ondulation;

$k_{15}$  est un facteur de sécurité d'essai;

$k_{15} = 1,05$ .

La vitesse d'élévation  $di/dt$  de la surintensité doit être prise en compte au cours de l'essai afin de montrer que le système de commande et de protection est en mesure de mettre hors tension les IGBT suffisamment rapidement avant que les limites de blocage sécurisées maximales soient atteintes. La prise en compte de cet aspect peut être montrée soit en augmentant la vitesse d'élévation  $di/dt$  de la forme d'onde du courant d'essai si le circuit d'essai le permet, soit en augmentant le niveau de protection en tenant compte du retard inhérent total dans le système de commande et de protection.

## **11 Essai de courant de court-circuit**

### **11.1 Objectif des essais**

Le principal objectif est de vérifier l'adéquation des dispositifs, en particulier des diodes, des éventuels composants supplémentaires utilisés pour protéger les diodes (tels que les thyristors de dérivation) et des circuits électriques associés, en fonction des contraintes de courant dans des conditions de court-circuit spécifiées, telles qu'un défaut de court-circuit du côté courant continu, jusqu'à la coupure du courant de défaut par le circuit de commande et de protection. Les valves à VSC doivent être conçues de manière à résister à la surintensité de court-circuit pendant le nombre de cycles nécessaires pour ouvrir le disjoncteur à courant alternatif principal, sans aucune défaillance ni aucun endommagement du matériel, en tenant également compte d'une possible apparition d'une tension de rétablissement. L'électronique de valve doit normalement être sous tension pendant la partie de l'événement de défaut où elle engage des actions, par exemple lors du blocage des IGBT ou de l'activation de dispositifs de protection tels que des thyristors de dérivation. Pour les autres parties de l'événement de défaut, il n'est pas nécessaire d'alimenter l'électronique de valve.

### **11.2 Objet d'essai**

L'objet d'essai est tel que décrit en 6.2.

### **11.3 Exigences d'essai**

L'essai consiste à amener l'objet d'essai à l'équilibre thermique dans les conditions qui entraînent la température de jonction en régime permanent la plus élevée pour le composant à semiconducteur concerné (voir 6.4) et à déclencher ensuite un événement de courant de défaut. Pour définir l'élévation maximale de la température de jonction des IGBT et des diodes, toutes les conditions de surcharge possibles (en matière d'amplitude et de durée) doivent être prises en considération.

L'amplitude du courant de défaut, sa durée et le nombre de cycles correspondants doivent représenter les valeurs maximales attendues pendant le fonctionnement réel sur le terrain.

La variante de forme d'onde d'essai peut être utilisée, à condition que l'amplitude et l'accumulation d'énergie soient représentatives de celles en conditions de défaut.

Lorsque l'objet d'essai est soumis à une tension de rétablissement entre les cycles de courant de défaut, cette tension de rétablissement, y compris le dépassement de commutation le cas échéant, doit également être reproduite lors de l'essai. Un facteur de sécurité d'essai de 1,05 s'applique à la tension de rétablissement.

Compte tenu de la difficulté du laboratoire d'essai à réaliser cet essai en générant la tension de rétablissement entre des cycles de courant de défaut, cet essai peut, à la suite d'un accord entre l'acheteur et le fabricant, être réalisé au niveau du composant.

## 12 Essais d'insensibilité de la valve aux perturbations électromagnétiques

### 12.1 Objectif des essais

Le principal objectif est de démontrer l'insensibilité de la valve au brouillage électromagnétique (perturbations électromagnétiques) résultant des transitoires de tension et de courant générés à l'intérieur de la valve et qui lui sont imposés de l'extérieur. Les éléments sensibles de la valve sont généralement les circuits électroniques utilisés pour la commande, la protection et la surveillance des niveaux de valve.

Généralement, l'insensibilité de la valve aux perturbations électromagnétiques peut être vérifiée en surveillant la valve pendant d'autres essais de type. Parmi ceux-ci, l'essai de valve en régime permanent maximal et l'essai en surcharge temporaire maximale (voir 6.4 et 6.5), les essais de valve sous tension de choc (voir 9.4.3) et l'essai de blocage de l'IGBT en cas de surintensité (voir l'Article 10) sont les plus importants.

Les essais doivent démontrer les points suivants:

- a) aucune manœuvre hors séquence ou intempestive de l'IGBT ne survient;
- b) les circuits de protection électroniques installés dans la valve fonctionnent comme prévu;
- c) aucune indication erronée des défauts de niveaux de valve ni aucun signal erroné ne sont transmis aux systèmes de commande et de protection du convertisseur par l'électronique de base de la valve, du fait de la réception de données erronées en provenance des circuits de surveillance de la valve.

NOTE Dans le cadre du présent document, les essais visant à démontrer l'insensibilité de la valve aux perturbations électromagnétiques s'appliquent uniquement à la valve à VSC et à la partie du système de transmission de signal reliant la valve à la terre. La démonstration de l'insensibilité aux perturbations électromagnétiques du matériel au potentiel de terre et la caractérisation de la valve en tant que source de perturbations électromagnétiques pour d'autres matériels ne relèvent pas du domaine d'application du présent document.

### 12.2 Objet d'essai

En général, l'objet d'essai est la valve ou les sections de valve utilisées pour les autres essais.

Lorsqu'il s'agit de démontrer l'insensibilité aux perturbations électromagnétiques résultant du couplage entre des valves adjacentes dans un MVU, deux approches sont acceptables selon la définition de 12.3. Dans ce cas, l'objet d'essai est, selon l'approche adoptée, une valve ou une section de valve séparée.

### 12.3 Exigences d'essai

#### 12.3.1 Généralités

Lors de la démonstration de l'insensibilité aux perturbations électromagnétiques résultant du couplage entre des valves adjacentes d'un MVU, les exigences d'essai dépendent de l'approche adoptée parmi les deux approches recommandées.

La disposition géométrique spécifique à utiliser et l'amplitude de la tension directe pour l'objet soumis à l'essai de perturbations électromagnétiques doivent être représentatives des conditions de service.

### 12.3.2 Première approche

La première approche consiste à simuler la source des perturbations électromagnétiques en l'intégrant directement à un montage d'essai. Ce montage d'essai exige plusieurs valves ou sections de valve afin de vérifier leur interaction. La disposition géométrique de la source des perturbations électromagnétiques par rapport à la valve en essai doit être aussi proche que possible de la disposition de service (ou plus défavorable du point de vue des perturbations électromagnétiques). L'électronique de l'objet soumis à l'essai de perturbations électromagnétiques doit être alimentée. Les parties de l'électronique de base de la valve nécessaires à l'échange correct des informations avec l'objet soumis à l'essai de perturbations électromagnétiques doivent être incluses.

### 12.3.3 Seconde approche

La seconde approche consiste à déterminer l'intensité des champs électromagnétiques dans les conditions de fonctionnement les plus défavorables, soit à partir de considérations théoriques, soit au moyen de mesures. Dans un deuxième temps, ces champs sont simulés par un circuit d'essai qui génère un rayonnement électromagnétique correct (ou plus défavorable) aux fréquences respectives. Une section de valve est ensuite exposée aux champs générés par la source d'essai.

Une condition préalable primordiale de la seconde approche est de déterminer la force et la direction du champ dynamique aux emplacements clés de la valve. Cette détermination est généralement obtenue au moyen de mesures effectuées par une bobine d'exploration au cours d'essais d'allumage réalisés sur une valve unique. Une autre solution consiste à prévoir le champ à l'aide de programmes de modélisation de champ en trois dimensions. Une section de valve doit ensuite être soumise à essai en utilisant une bobine de champ séparée pouvant produire une intensité de champ, des composantes et une direction fréquentielles présentant une sévérité au moins égale aux valeurs prévues.

Les conditions suivantes doivent être remplies pour la section de valve en essai:

- la section de valve doit présenter une tension de fonctionnement (échelonnée proportionnellement) entre ses bornes et être polarisée en sens direct au moment de l'excitation de la bobine de champ;
- l'électronique de la section de valve en essai doit être alimentée;
- les parties de l'électronique de base de la valve, nécessaires à l'échange correct des informations avec la section de valve, doivent être incluses.

### 12.3.4 Critères d'acceptation

Les critères d'acceptation pour les deux approches doivent être conformes à ceux décrits en 12.1.

## 13 Essais pour valves à freinage dynamique

Dans certains systèmes CCHT à VSC, mais en particulier lorsque le système CCHT exporte de l'énergie à partir d'un petit système à courant alternatif séparé avec une charge faible ou inexistante (par exemple un parc éolien en mer), il peut être exigé que le système CCHT comporte un système de freinage dynamique, par exemple sous la forme d'un hacheur connecté aux bornes en courant continu du système VSC. La fonction du système de freinage dynamique est d'absorber et de dissiper l'énergie générée dans le système à courant alternatif séparé en cas de pannes dans le système à courant alternatif récepteur, généralement pendant des durées de 1 s à 2 s.

Ce type de système de freinage dynamique peut être mis en œuvre de plusieurs manières, mais la conception des valves de ce système est généralement identique à celle des valves à VSC principales utilisées pour le transport d'énergie.

Les valves à freinage dynamique peuvent exiger des essais de type pour lesquels les exigences spécifiées aux Articles 6 à 12 précédents sont généralement applicables; toutefois, les valves à freinage dynamique n'exigent généralement qu'un sous-ensemble des essais de type applicables aux valves à VSC.

La valve à freinage dynamique reste normalement en attente mais elle est tenue de fonctionner et d'acheminer le courant sur de courtes durées dès que le système à courant alternatif récepteur rencontre une panne. Les conditions des essais diélectriques sont donc similaires à celles applicables à la valve à VSC, mais il n'est nécessaire d'appliquer les conditions des essais de fonctionnement que sur de courtes durées.

NOTE 1 Le paragraphe 4.1.1 relatif à la substitution de preuve s'applique lorsque la même conception de valve est utilisée dans la valve à VSC et la valve à freinage dynamique.

NOTE 2 Pour la valve à freinage dynamique avec une conception de résistances intégrées réparties ou un élément absorbeur d'énergie, les tâches opérationnelles peuvent être effectuées sur site, en raison de la limitation du laboratoire d'essai en matière de puissance.

## **14 Essais de série**

### **14.1 Généralités**

Le présent article traite des essais réalisés sur des ensembles de composants faisant partie des valves, sections de valve ou sur des circuits auxiliaires destinés à leur protection, leur commande et leur surveillance. Il ne couvre pas les essais réalisés sur des composants individuels utilisés à l'intérieur de la valve, du support de valve ou de la structure de valve.

L'Annexe B fournit de l'information concernant la tolérance aux pannes des composants de valves.

### **14.2 Objectif des essais**

L'objectif des essais de série est de vérifier l'adéquation de la fabrication en démontrant que:

- tous les composants et sous-ensembles utilisés dans la valve ont été correctement installés conformément à la conception;
- l'équipement de la valve fonctionne comme prévu et que les paramètres prédéfinis s'inscrivent dans les limites d'acceptation spécifiées;
- les sections de valve et les niveaux de paire IGBT-diode (selon le cas) présentent une capacité de tenue en tension appropriée;
- la cohérence et l'uniformité en production sont atteintes.

### **14.3 Objet d'essai**

Toutes les sections de valve ou leurs parties fabriquées dans le cadre du projet doivent être soumises à des essais individuels de série. Les essais peuvent être réalisés sur les sections de valve ou les niveaux individuels, selon la conception et les installations d'essai disponibles.

### **14.4 Exigences d'essai**

L'uniformité des essais de série spécifiés des différents fournisseurs n'est pas nécessaire. Les essais de série doivent tenir compte des caractéristiques de conception spécifiques de la valve et de ses composants, de la portée des essais réalisés sur les composants avant l'assemblage, et des procédures et techniques de fabrication particulières impliquées. Dans le présent article, seuls les objectifs des essais de série sont indiqués.

Dans tous les cas, le fournisseur doit soumettre, pour approbation par l'acheteur, une description détaillée des procédures d'essai proposées pour satisfaire aux objectifs des essais de série.

Les exigences minimales relatives aux essais individuels de série sont répertoriées en 14.5. L'ordre dans lequel les essais sont répertoriés ne reflète ni un classement par ordre d'importance, ni l'ordre dans lequel ils doivent être réalisés.

Dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire d'effectuer des essais d'échantillons de production sur des ensembles complets en plus des essais de série, par exemple lorsque des modifications sont introduites au cours de la production. La nature et l'étendue de ces essais supplémentaires doivent être convenues au cas par cas.

## **14.5 Objectifs des essais de série**

### **14.5.1 l'examen visuel;**

Vérifier que tous les matériaux et composants sont intacts et sont correctement installés, conformément à la dernière révision approuvée de la documentation de production.

### **14.5.2 Vérification de la connexion**

Vérifier que toutes les connexions principales conduisant du courant ont été réalisées correctement.

### **14.5.3 Vérification du circuit de répartition des potentiels**

Vérifier les paramètres du circuit de répartition et s'assurer ainsi que la division de tension entre les niveaux connectés en série est adaptée pour les tensions appliquées à partir du courant continu aux formes d'onde de choc, le cas échéant.

### **14.5.4 Vérification des circuits de commande, de protection et de surveillance**

Vérifier le fonctionnement de tous les circuits de commande, de protection ou de surveillance faisant partie intégrante de la valve, tels que les circuits de commande de grille IGBT et tous les circuits locaux de protection ou de surveillance.

Si des essais de type et des essais concernant l'efficacité de la protection par fusible sont jugés nécessaires, ils doivent être spécifiés séparément avec les conditions d'essais.

### **14.5.5 Vérification de la tenue en tension**

Vérifier que les composants de la valve peuvent résister à la tension correspondant à la valeur maximale spécifiée pour la valve. Les vérifications doivent inclure la tension d'essai alternative-continue et les chocs de manœuvre, suivant le cas.

### **14.5.6 Vérification du changement d'état passant/bloqué**

Vérifier que le changement d'état de l'IGBT de passant à bloqué et inversement, est correct pour chaque niveau de valve, en réponse aux commandes de commutation.

### **14.5.7 Essai de pression**

Vérifier qu'il n'existe aucune fuite de fluide de refroidissement.

## 15 Présentation des résultats des essais de type

Le rapport d'essai de type doit être émis conformément aux lignes directrices générales figurant dans l'ISO/IEC 17025 et doit inclure les informations suivantes:

- le nom et l'adresse du laboratoire et le lieu de réalisation des essais;
- le nom et l'adresse de l'acheteur;
- l'identification sans ambiguïté de l'objet d'essai, comprenant le type et les valeurs assignées, le numéro de série et toute autre information destinée à identifier l'objet d'essai;
- les dates de réalisation des essais;
- la description des circuits d'essai et des procédures d'essai utilisées pour la réalisation des essais;
- la référence aux documents normatifs et, le cas échéant, une description claire des écarts par rapport aux procédures indiquées dans les documents normatifs;
- la description du matériel de mesure et l'indication de l'incertitude de mesure;
- les résultats d'essai sous forme de tableaux, graphiques, oscillogrammes et photographies selon le cas;
- la description de la défaillance du matériel ou du composant;
- autres données/indications/descriptions pour la substitution de preuve.

## **Annexe A** (informative)

### **Vue d'ensemble des convertisseurs VSC utilisés pour le transport d'énergie CCHT**

#### **A.1 Généralités**

Les valves à convertisseur de source de tension (VSC) sont une technologie émergente, exploitée par différents fabricants suivant éventuellement des approches technologiques très différentes. À l'avenir, elles pourront présenter de nouvelles topologies de circuits qui n'ont pas encore été décrites.

La différence fondamentale entre les convertisseurs de source de tension en courant continu à haute tension (CCHT) et les convertisseurs CCHT classiques (qui sont des convertisseurs commutés par le réseau) tient au fait que pour inverser le sens d'un flux d'énergie, le sens du courant continu est inversé, et non la polarité de la tension continue. Le lissage de la tension continue est effectué à l'aide d'un condensateur à courant continu de grande taille, qui joue un rôle analogue à celui de l'inducteur à courant continu (qui peut être en partie joué par l'inductance du système de transport à courant continu et l'inductance de fuite des transformateurs du convertisseur) dans un projet CCHT classique.

En fait, le rôle de la tension dans une valve à VSC équivaut, à de très nombreux égards, à celui du courant dans une valve à thyristor CCHT classique, et inversement.

Le traitement détaillé de toutes les technologies de valve à VSC possibles va bien au-delà du domaine d'application de la présente norme. L'objectif de la présente annexe est simplement de donner un aperçu rapide des principales différences entre les valves à VSC et les valves à thyristor CCHT classiques, ainsi que des principaux types de valves à VSC, dans la mesure où ils influencent les critères d'essais de ces valves.

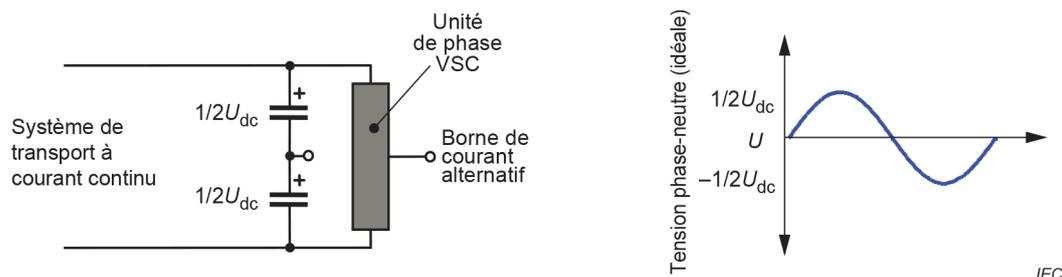
La présente annexe vise à donner une vue d'ensemble des principales technologies de convertisseur connues au moment de sa rédaction. Elle n'a toutefois pas pour objectif de limiter ou restreindre d'une quelconque manière les types de technologie qui peuvent être utilisés.

L'Annexe C fournit de l'information concernant la détermination et l'évaluation des pertes de valves à VSC.

#### **A.2 Caractéristiques élémentaires d'un VSC**

Tous les convertisseurs de source de tension visent à synthétiser, à partir de la tension du condensateur à courant continu, une tension sensiblement sinusoïdale aux bornes de courant alternatif. Cependant, dans la pratique, la tension de sortie du VSC ne peut pas être parfaitement sinusoïdale mais elle se compose plutôt de plusieurs paliers de tension ou "niveaux de sortie" discrets. Le terme "niveau" fait ici référence à un niveau de tension de sortie discret, qu'il convient de ne pas confondre avec le terme "niveau de valve à VSC" qui désigne un bloc module physique de la valve, par exemple un IGBT individuel et ses composants associés.

Pour les systèmes d'alimentation, des convertisseurs triphasés sont presque toujours utilisés, mais en considérant le nombre de niveaux de sortie d'un convertisseur, chaque "unité de phase" du convertisseur est normalement considérée de manière indépendante. Le nombre de niveaux de sortie se rapporte au nombre d'états discrets dans lesquels la tension de sortie phase-neutre d'une unité de phase peut se trouver (Figure A.1). Il est important de noter qu'un convertisseur présentant un nombre de niveaux  $n$  disposera de  $(2n-1)$  valeurs possibles de tension entre phases.

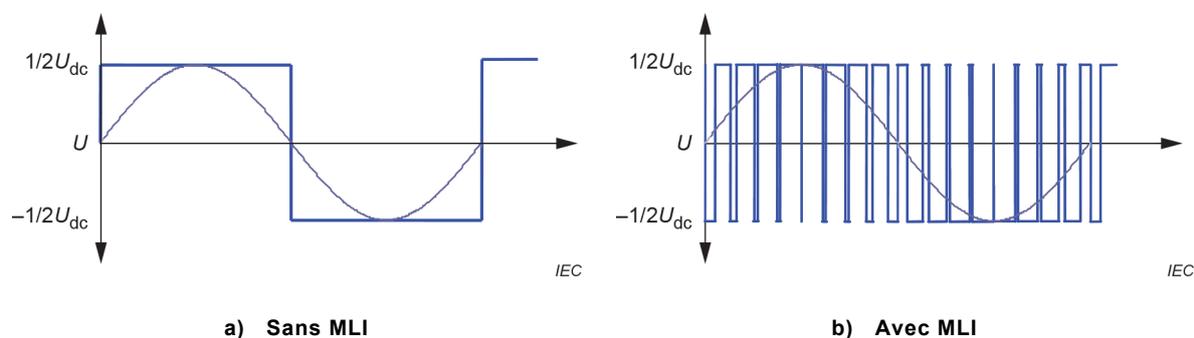


**Figure A.1 – Unité de phase VSC unique et sa tension de sortie idéale**

Dans la topologie de VSC la plus simple, à savoir un "convertisseur à deux niveaux", la tension alternative de sortie de chaque branche de phase (par rapport au point milieu du condensateur à courant continu, qui est normalement mis à la terre) n'a que deux états possibles:  $+1/2U_{dc}$  et  $-1/2U_{dc}$ .

Si les valves à VSC dans cette branche de phase sont uniquement manœuvrées à la fréquence fondamentale, la forme d'onde résultante de la tension alternative de sortie est une très piètre approximation de la tension sinusoïdale. Une telle forme d'onde est totalement inacceptable dans un système d'alimentation.

Cependant, en coupant et en réactivant les valves plusieurs fois par cycle de fréquence fondamentale et en utilisant la modulation de largeur d'impulsions (MLI), il est possible d'obtenir une tension de sortie qui est, après filtrage, raisonnablement sinusoïdale. La Figure A.2 représente les deux cas.

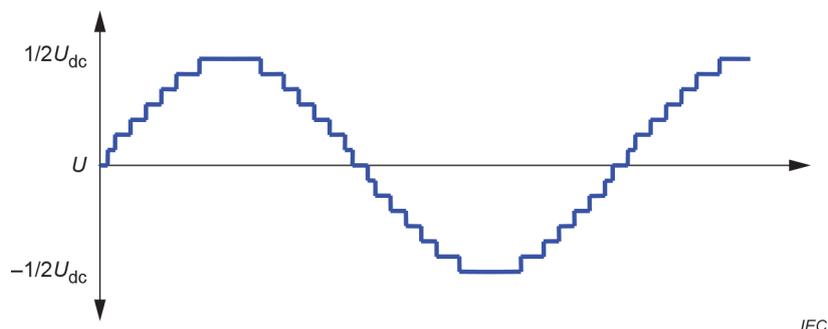


**Figure A.2 – Tension de sortie d'une unité de phase VSC pour un convertisseur à 2 niveaux**

La MLI est une technique classique utilisée dans les convertisseurs des commandes de moteur, mais elle présente l'inconvénient d'accroître considérablement les pertes de commutation.

Une alternative à la MLI consiste à utiliser un convertisseur plus complexe présentant un plus grand nombre de niveaux de sortie, c'est-à-dire un "convertisseur multiniveau". Il existe plusieurs topologies de convertisseurs à 3 ou 5 niveaux mais, en général, dans une application de système d'alimentation, ces convertisseurs n'en exigent pas moins une MLI afin d'obtenir des harmoniques suffisamment basses.

Cependant, certaines topologies de convertisseurs permettent de produire un nombre de niveaux de sortie nettement plus élevé, de sorte que même sans recourir à une MLI, la forme d'onde de la tension de sortie est fortement sinusoïdale et que peu de (voire aucun) filtrage est exigé. La Figure A.3 représente la tension de sortie d'un convertisseur à 15 niveaux, qui peut être considérée comme raisonnablement sinusoïdale. Dans la pratique, des nombres de niveaux supérieurs à 15 sont normalement utilisés pour les applications de transport CCHT.



**Figure A.3 – Tension de sortie d'une unité de phase VSC pour un convertisseur à 15 niveaux, sans MLI**

### A.3 Vue d'ensemble des principaux types de valves à VSC

À la différence des valves à thyristor CCHT classiques, qui ont évolué vers une conception globale en grande partie commune, les valves à VSC se situent à un stade précoce de leur évolution technologique et prennent un grand nombre de formes.

Au moment de la rédaction de la présente norme, les valves à VSC disponibles dans le commerce se répartissent en deux catégories fondamentales.

- Valves à VSC de type commutateur. Ces valves, à l'instar de leurs équivalents à thyristor, fonctionnent uniquement à la manière d'un commutateur commandable, présentant uniquement deux états permanents: passant et bloqué. Dans les convertisseurs présentant cette topologie, les condensateurs à courant continu sont entièrement séparés des valves et peuvent être soumis à essai individuellement.
- Valves à VSC de type à source de tension commandable. Dans les valves de ce type, les condensateurs à courant continu font partie intégrante de la valve et ne peuvent pas en être séparés aisément à des fins d'essais.

Il est nécessaire de procéder à certains essais de type de manière légèrement différente selon la catégorie à laquelle les valves appartiennent.

D'autres catégories de valve à VSC "hybride" ont également été décrites dans les ouvrages de référence et présentent des caractéristiques conjointes issues des deux catégories susmentionnées; cependant, au moment de la rédaction, les travaux de développement de ces topologies sont relativement récents et ces topologies ne sont pas encore disponibles dans le commerce.

### A.4 Valve à VSC de type commutateur

#### A.4.1 Généralités

Les valves à VSC de ce type présentent une forte ressemblance avec les valves à thyristor classiques, en ce sens qu'elles sont constituées d'un grand nombre de dispositifs IGBT connectés en série et manœuvrés simultanément. Comme pour les valves à thyristor classiques, la commutation simultanée des IGBT connectés en série est cruciale. La redondance peut être assurée de la même manière que pour une valve à thyristor LCC, en ajoutant quelques dispositifs IGBT supplémentaires connectés en série et en s'assurant que les IGBT sont d'un type spécial avec un mode de défaillance en court-circuit, ou qu'ils comportent un commutateur de court-circuit connecté en parallèle.

Les valves de ce type sont normalement utilisées avec des convertisseurs présentant un nombre de niveaux de sortie relativement faible. Pour compenser leur faible nombre de niveaux de sortie, ces convertisseurs ont généralement recours à la modulation de largeur d'impulsions (MLI) pour obtenir une bonne approximation d'une tension de sortie sinusoïdale.

Certaines des topologies de convertisseur les plus courantes utilisables avec ce type de valves à VSC sont décrites ci-dessous.

#### A.4.2 Convertisseur à 2 niveaux

Dans ce type de VSC, qui est le plus simple, chaque unité de phase VSC comprend simplement deux valves à VSC connectées en série et partageant une borne de courant alternatif. Les deux valves sont manœuvrées alternativement de telle sorte qu'à tout moment, l'une ou l'autre est conductrice, mais jamais les deux. (Dans la pratique, il existe un léger temps mort ou une "non-juxtaposition" entre les deux valves afin d'empêcher une "reconduction" ou la conduction simultanée des deux valves connectées en série).

La topologie du circuit de ce convertisseur est très simple (voir Figure A.4) et exige très peu d'explications. Lorsque V1 est conductrice, la borne de courant alternatif est connectée à la borne de courant continu supérieure et produit donc une tension de sortie de  $+\frac{1}{2}U_{CC}$ . Lorsque V2 est conductrice, la borne de courant alternatif est connectée à la borne de courant continu inférieure et produit donc une tension de sortie de  $-\frac{1}{2}U_{CC}$ .

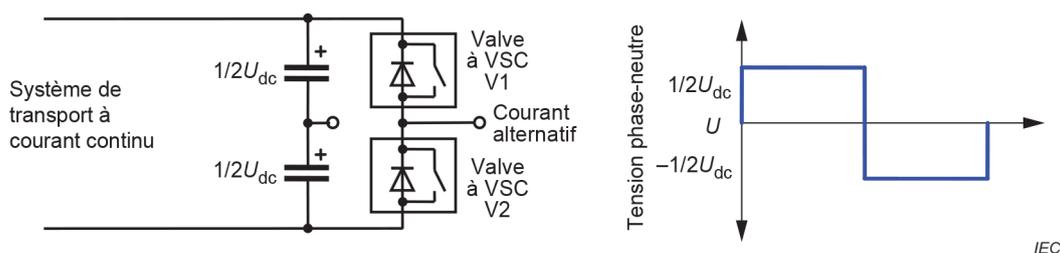


Figure A.4 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur à 2 niveaux

#### A.4.3 Convertisseur à diode de blocage multiniveau

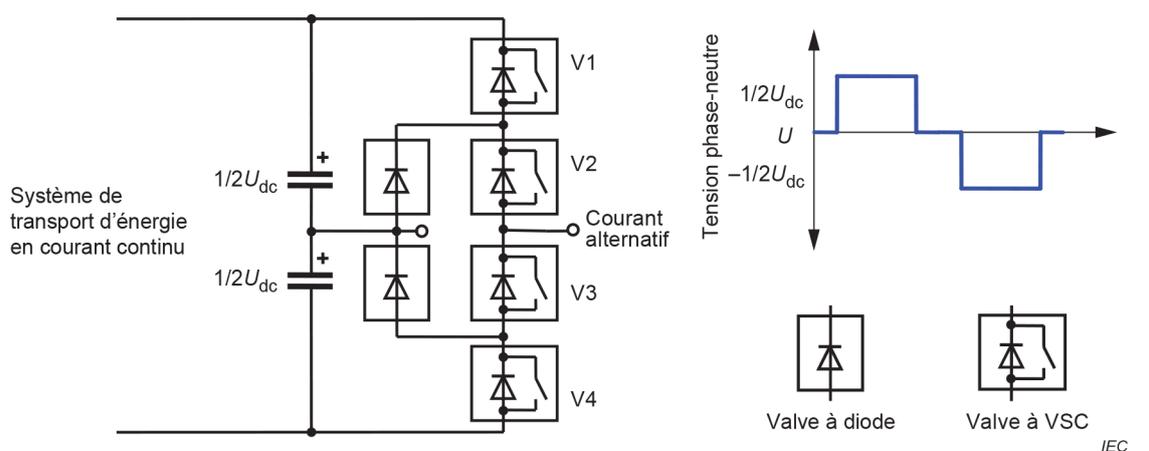
Dans cette famille de convertisseurs, le condensateur à courant continu est subdivisé en plusieurs étages discrets connectés en série, plus de deux valves IGBT sont fournies par unité de phase et des valves à diode sont utilisées pour la connexion entre différents points intermédiaires dans le condensateur à courant continu et dans l'unité de phase.

Dans la plus simple version de ce circuit (voir Figure A.5), le convertisseur à trois niveaux, chaque unité de phase contient quatre valves à VSC indépendantes connectées en série. Le condensateur à courant continu est subdivisé en deux unités connectées en série (comme c'est souvent le cas pour un convertisseur à deux niveaux). La borne de courant alternatif est connectée à la borne entre V2 et V3, et les points  $\frac{1}{4}$  et  $\frac{3}{4}$  (entre les valves V1/V2 et V3/V4) sont connectés au point milieu de courant continu par l'intermédiaire des valves à diode.

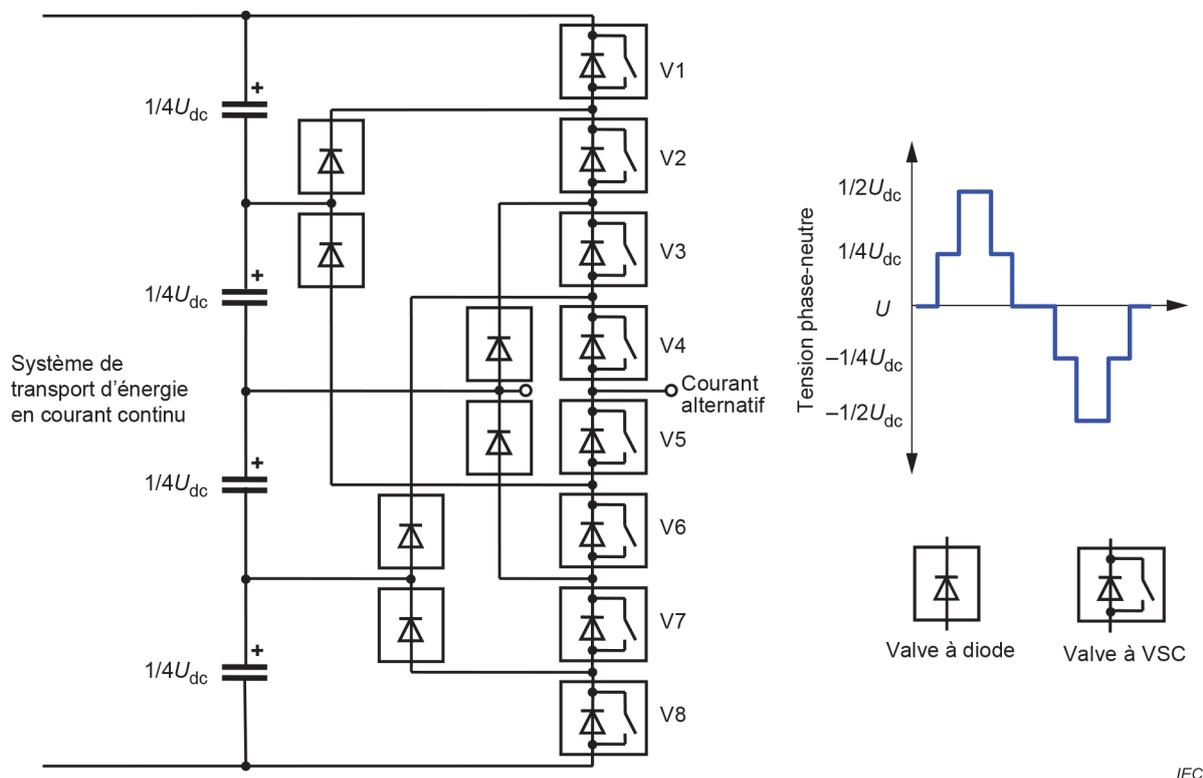
Avec ce convertisseur, trois états de sortie sont possibles à partir d'une seule unité de phase. Lorsque les valves V1+V2 sont conductrices, la borne de courant alternatif est connectée à la borne de courant continu supérieure et produit donc une tension de sortie de  $+\frac{1}{2}U_{CC}$ . Lorsque les valves V3+V4 sont conductrices, la borne de courant alternatif est connectée à la borne de courant continu inférieure et produit donc une tension de sortie de  $-\frac{1}{2}U_{CC}$ . Lorsque les valves V2+V3 sont conductrices, la tension alternative de sortie est "bloquée" en fonction de la tension du point milieu de courant continu par les valves à diode.

Le même principe peut être étendu à des nombres de niveaux plus élevés en subdivisant davantage le condensateur de courant continu et en utilisant plus de valves à VSC et de valves à diode. Dans un convertisseur à 5 niveaux, le condensateur de courant continu est subdivisé en quatre étages discrets, et huit valves à VSC et six valves à diode sont présentes (voir Figure A.6). Dans ce circuit, les valves sont manœuvrées par groupes adjacents de quatre, par exemple V1+V2+V3+V4 donne une tension de sortie de  $+\frac{1}{2}U_{dc}$ , V2+V3+V4+V5, une tension de sortie de  $+\frac{1}{4}U_{dc}$ , etc.

Il peut être souligné que la complexité du circuit s'accroît de manière disproportionnée à mesure que le nombre de niveaux de sortie augmente. Cette situation est aggravée par le fait que non seulement le nombre, mais aussi les caractéristiques de tension des valves à diode, augmentent rapidement avec le nombre des niveaux de sortie.



**Figure A.5 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur à diode de blocage à 3 niveaux**



**Figure A.6 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur à diode de blocage à 5 niveaux**

#### A.4.4 Convertisseur à condensateur volant multiniveau

Ce circuit permet d'obtenir le même résultat que le convertisseur à diode de blocage par une méthode différente. Au lieu d'utiliser des valves à diode pour bloquer la tension de sortie dans l'un des étages du condensateur à courant continu intermédiaire, il utilise un ou plusieurs convertisseurs à courant continu supplémentaires, qui sont isolés des bornes de courant continu et sont donc "flottants" ou "volants", pour obtenir le même effet. Ce circuit est aussi parfois appelé "circuit Foch-Meynard", en référence à ses inventeurs.

Le convertisseur à condensateur volant à 3 niveaux (voir Figure A.7) a un condensateur volant unique présentant une tension nominale de  $\frac{1}{2}U_{cc}$ . Ce condensateur est connecté entre les bornes partagées par V1/V2 et celles partagées par V3/V4. Comme pour le convertisseur à diode de blocage à 3 niveaux, les valves sont manœuvrées par paires mais le modèle permettant d'atteindre une tension de sortie nulle est différent. Pour obtenir un état de sortie de 0, soit les valves V1+V3, soit les valves V2+V4 sont à l'état passant. V2+V3 représente une combinaison illégale qui entraîne le court-circuit du condensateur volant.

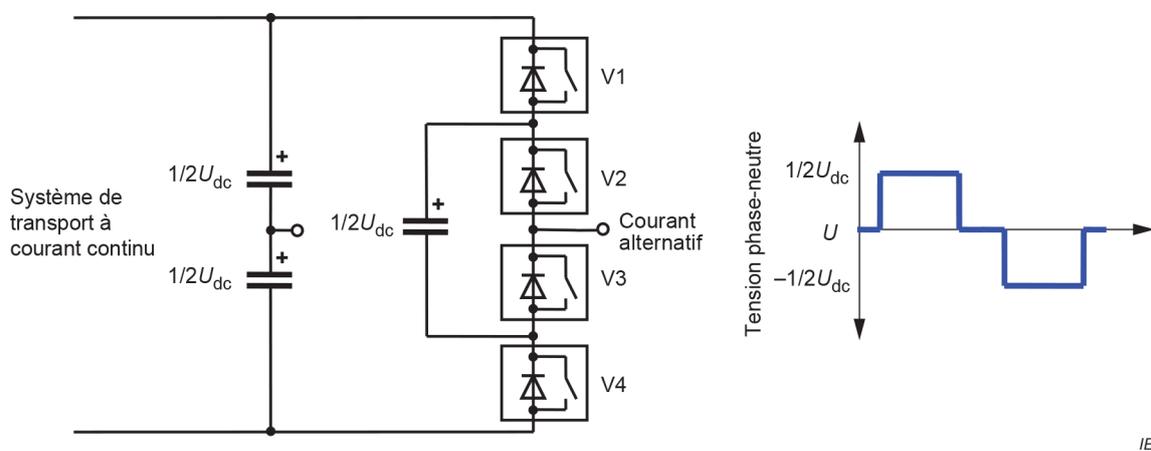


Figure A.7 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur à condensateur volant à 3 niveaux

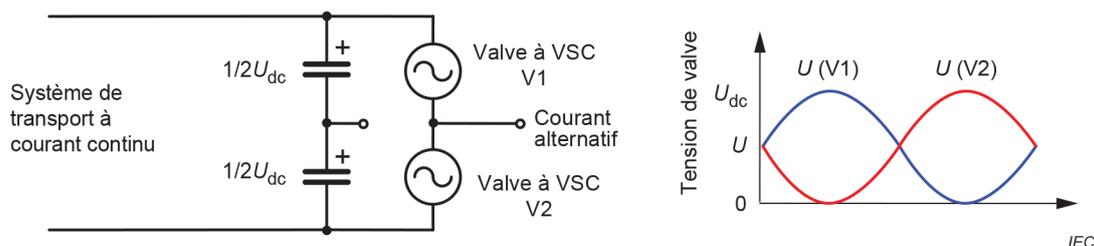
Le nombre de valves à VSC par unité de phase est le même pour ce convertisseur que pour le convertisseur à diode de blocage avec le même nombre de niveaux de sortie. Comme pour le convertisseur à diode de blocage, il est possible d'augmenter le nombre de niveaux de sortie, mais au risque d'une augmentation disproportionnée de la complexité.

### A.5 Valve à VSC de type à source de tension commandable

#### A.5.1 Généralités

Dans le convertisseur à 2 niveaux, les valves et le condensateur à courant continu sont des éléments de l'équipement clairement séparés et peuvent être conçus et soumis à essai individuellement. Cependant, les paragraphes A.4.3 et A.4.4 montrent que, à mesure que le nombre de niveaux de sortie augmente, la subdivision du ou des condensateurs à courant continu augmente, de même que l'interdépendance des valves et des condensateurs à courant continu.

À mesure que le convertisseur s'approche de la situation idéale où le nombre de niveaux de sortie est suffisant pour obtenir une approximation correcte d'une forme d'onde sinusoïdale sans avoir recours à la MLI, la subdivision du condensateur à courant continu et l'interconnexion entre les condensateurs et les IGBT peuvent se compliquer au point de n'être plus utiles pour établir une distinction claire entre les deux. Dans ce type de cas, il peut s'avérer plus pratique de considérer la "valve à VSC" non seulement comme un élément IGBT effectuant la commutation, mais aussi comme un condensateur à courant continu distribué. En effet, une telle valve ne constitue plus simplement un commutateur mais est désormais une source de tension commandable, connectée entre la borne de courant alternatif de l'unité de phase correspondante et l'une des bornes de courant continu (voir Figure A.8).



**Figure A.8 – Unité de phase VSC unique avec valves à VSC de type source de tension commandable**

Chacune des valves V1 et V2 dans l'unité de phase produit une tension de sortie constituée d'une composante alternative sinusoïdale avec un décalage en courant continu (égal à  $\frac{1}{2} U_{dc}$ ). Les tensions de sortie des deux valves varient de sorte qu'à tout moment  $U(V1) + U(V2) = U_{cc}$ .

En principe, il peut exister de nombreuses méthodes différentes de mise en œuvre d'une valve de ce type, mais deux méthodes (étroitement liées) sont très répandues: le convertisseur multiniveau modulaire (MMC) et le convertisseur à deux niveaux monté en cascade (CTL).

### A.5.2 Convertisseur multiniveau modulaire (MMC)

Une mise en œuvre du circuit MMC est représentée sur la Figure A.9. Le circuit de chaque sous-module est modulaire, chaque sous-module comprenant un condensateur à courant continu isolé unique et deux commutateurs IGBT. Ce circuit est donc très similaire à celui du convertisseur de base à 2 niveaux (voir Figure A.4), à cette exception près que les interconnexions entre les sous-modules sont effectuées à partir de la borne de courant alternatif (entre IGBT1 et IGBT2) d'un sous-module, vers l'une des bornes de courant continu du sous-module voisin. Avec ce circuit, chaque sous-module peut produire deux états de sortie discrets:  $U = 0$  (obtenu en activant l'IGBT2) ou  $U = U_{dc\_submodule}$  (obtenu en activant l'IGBT1).  $U_{dc\_submodule}$  représente la tension de liaison continue d'un sous-module unique, qui est très inférieure à  $U_{dc}$ , la tension de liaison continue du système complet.

Ce circuit permet de synthétiser une tension de sortie de valve unipolaire avec une tension maximale de  $U = U_{dc}$  et une tension minimale de  $U = 0$ . Toutefois, comme pour toutes les topologies de convertisseur étudiées jusqu'à présent, le convertisseur n'est pas capable d'éliminer la surintensité générée par un court-circuit qui se produit entre ses bornes de courant continu. Ceci est dû au fait que, bien que les deux IGBT puissent être désactivés très rapidement, un chemin conducteur demeure toujours dans la diode de roue libre parallèle à l'IGBT2.

Une autre mise en œuvre du circuit MMC pallie cette lacune par une disposition en pont complet, telle que représentée à la Figure A.10, en lieu et place de la disposition en demi-pont représentée à la Figure A.9.

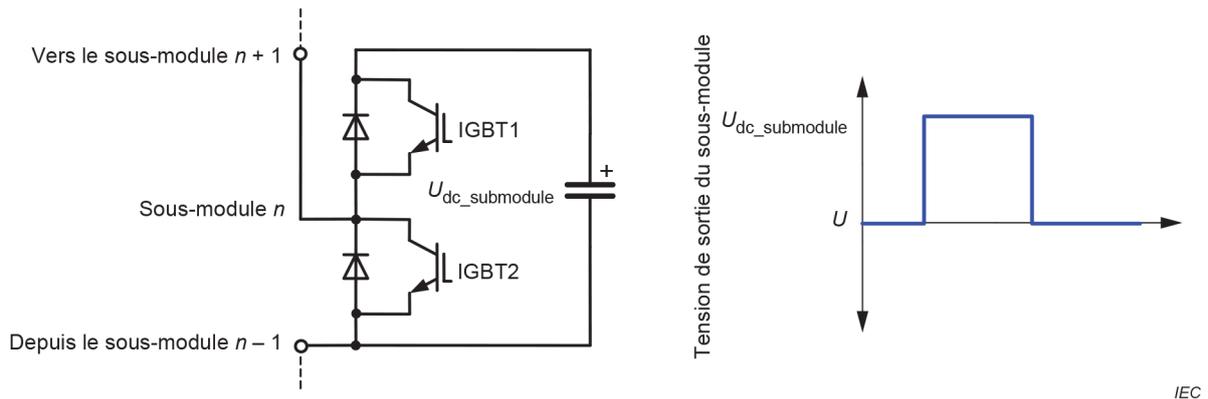


Figure A.9 – Circuit MMC en demi-pont

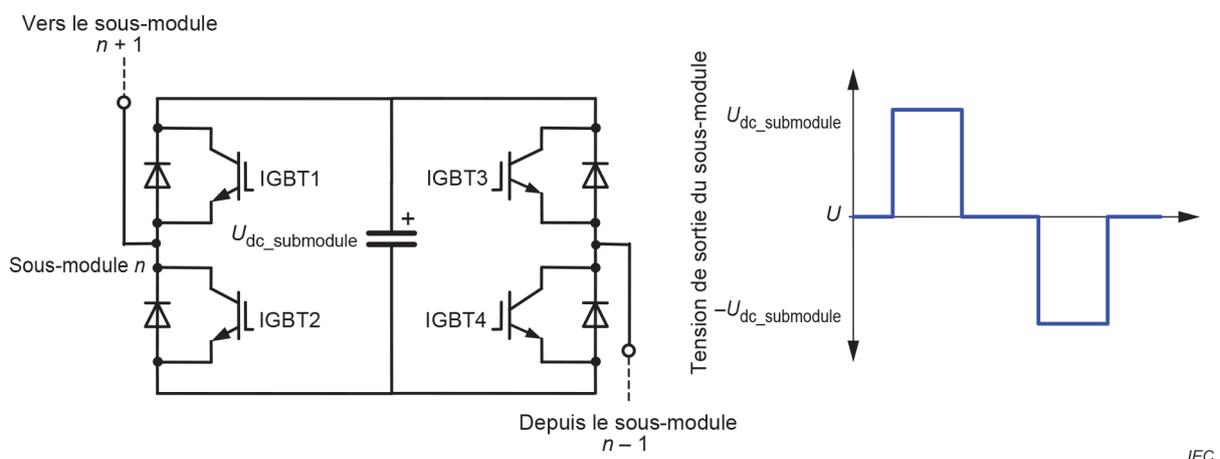


Figure A.10 – Circuit MMC en pont complet

Dans la version "pont complet" du circuit MMC, chaque sous-module contient quatre IGBT au lieu de deux, et peut produire trois états de tension de sortie discrets:

- $U = 0$  (obtenu en activant IGBT1 + IGBT3 ou IGBT2 + IGBT4);
- $U = +U_{dc\_submodule}$  (obtenu en activant IGBT1 + IGBT4); ou
- $U = -U_{dc\_submodule}$  (obtenu en activant IGBT2 + IGBT3).

Le circuit en pont complet permet à la valve de synthétiser une tension de sortie de l'une ou l'autre polarité, ce qui permet également de connecter un nouveau convertisseur de source de tension à une ligne CCHT existante, sous forme de piquage. Même lorsqu'il est utilisé sur une ligne à courant continu unipolaire, le circuit donne une flexibilité supplémentaire qui permet à la composante alternative de la tension de la valve de dépasser la composante continue (ce qui n'est pas possible avec le circuit en demi-pont), en générant un courant alternatif réduit dans la valve. De plus, la possibilité d'éliminer les courants de défaut dus aux courts-circuits qui se produisent entre les bornes de courant continu peut autoriser une certaine simplification des fonctions de protection. D'autre part, le nombre de composants IGBT et les pertes par conduction sont quasiment multipliés par deux par rapport à la version "demi-pont".

Dans la mesure où le circuit MMC est intrinsèquement modulaire, il est relativement simple d'obtenir des nombres élevés de niveaux de sortie, sans avoir recours à une MLI (qui entraîne des pertes de commutation plus importantes et exige un filtrage) ou des IGBT connectés en série (qui entraînent des problèmes de distribution de la tension). Des dispositifs IGBT du commerce peuvent être utilisés, ce qui n'est pas le cas des valves de type commutateur. La redondance ne peut pas être assurée dans chaque sous-module (car le fonctionnement correct du sous-module exige que les deux IGBT soient en bon état), mais est habituellement obtenue en intégrant à la valve quelques sous-modules supplémentaires et en veillant à ce que le sous-module complet soit mis en court-circuit en cas de défaillance.

En revanche, le nombre et la taille des condensateurs à courant continu discrets exigés peuvent être considérables et il peut s'avérer difficile de s'assurer que toutes les tensions de condensateur à courant continu restent équilibrées. Par rapport aux convertisseurs à deux ou trois niveaux, cette topologie permet donc une conception de valve plus simple et réduit les pertes, au prix d'une architecture des commandes plus complexe et d'une exigence d'encombrement plus important.

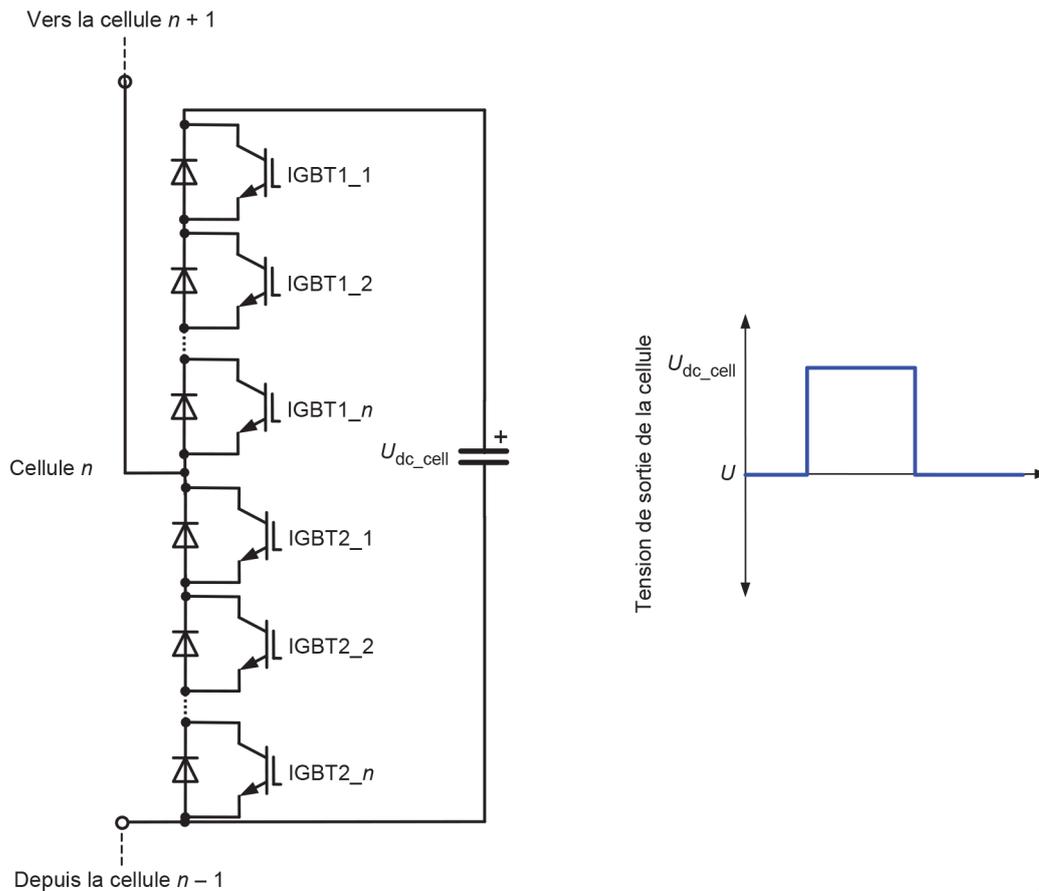
### **A.5.3 Convertisseur à deux niveaux monté en cascade (CTL)**

Le circuit MMC présente l'avantage de ne pas nécessiter la connexion directe et la commutation synchrone en série des IGBT. Toutefois, il est également possible de construire le circuit MMC avec plusieurs IGBT connectés en série dans chaque position de commutation. Les convertisseurs conçus ainsi sont appelés convertisseurs à deux niveaux montés en cascade afin de les différencier du circuit MMC, bien que le circuit de ces convertisseurs fonctionne, pratiquement à tous les égards, exactement de la même manière que le circuit MMC.

Tout comme le circuit MMC, le circuit CTL peut exister en versions demi-pont et pont complet. Le bloc module de la valve CTL est désigné par le terme "cellule" et la version demi-pont d'une cellule est représentée sur la Figure A.11. Chacune des deux positions du commutateur comporte  $n$  IGBT connectés en série et à commutation synchrone, et le condensateur à courant continu de la cellule fonctionne à environ  $n$  fois la tension d'un condensateur à courant continu du sous-module dans le circuit MMC.

En matière de fonctionnement, la seule différence importante entre les circuits CTL et MMC réside dans le fait que le circuit CTL génère une tension de sortie de valve qui contient un plus petit nombre de paliers, plus grands, que le circuit MMC. Par conséquent, ses harmoniques ne sont pas d'aussi bonne qualité que celles du circuit MMC, bien que, si le nombre d'IGBT par position de commutation est réduit (par exemple de 5 à 10), il puisse toujours produire une très bonne qualité de forme d'onde, tout en permettant une certaine simplification du système de commande par rapport au circuit MMC. Le circuit CTL exige toutefois des circuits de commande de grille IGBT complexes et un type d'IGBT plus spécialisé, tout comme pour l'ensemble des valves de type commutateur.

La redondance est assurée dans chaque cellule en intégrant à chaque position du commutateur un nombre plus important d'IGBT que ce qui est normalement exigé pour un fonctionnement avec la tension assignée du convertisseur.



IEC

**Figure A.11 – Circuit CTL en demi-pont**

#### A.5.4 Terminologie relative aux valves de type à source de tension commandable

La Figure A.12 et la Figure A.13 représentent respectivement les principaux termes relatifs à la construction des valves de types MMC et CTL, afin d'expliquer la signification de termes tels que niveau de VSC, sous-module et cellule.

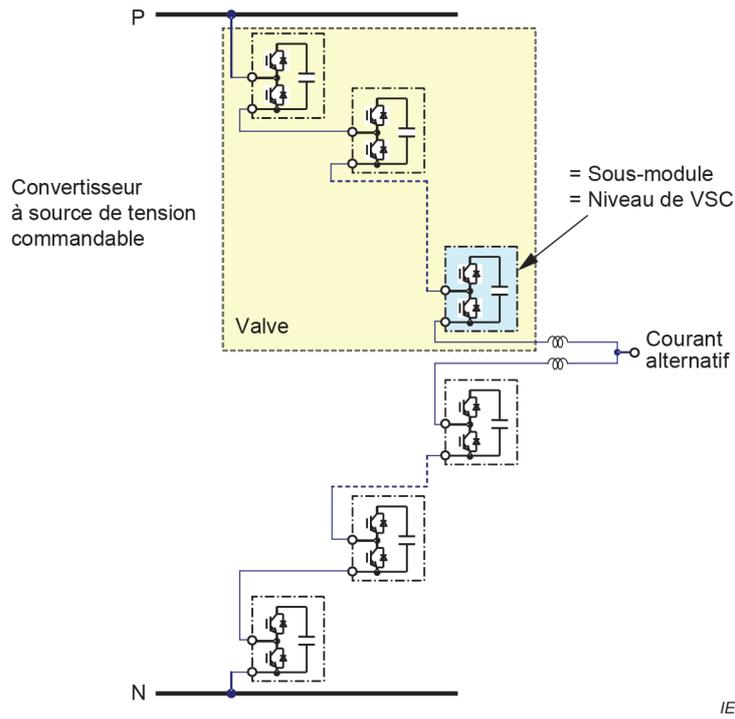


Figure A.12 – Termes relatifs à la construction des valves de type MMC

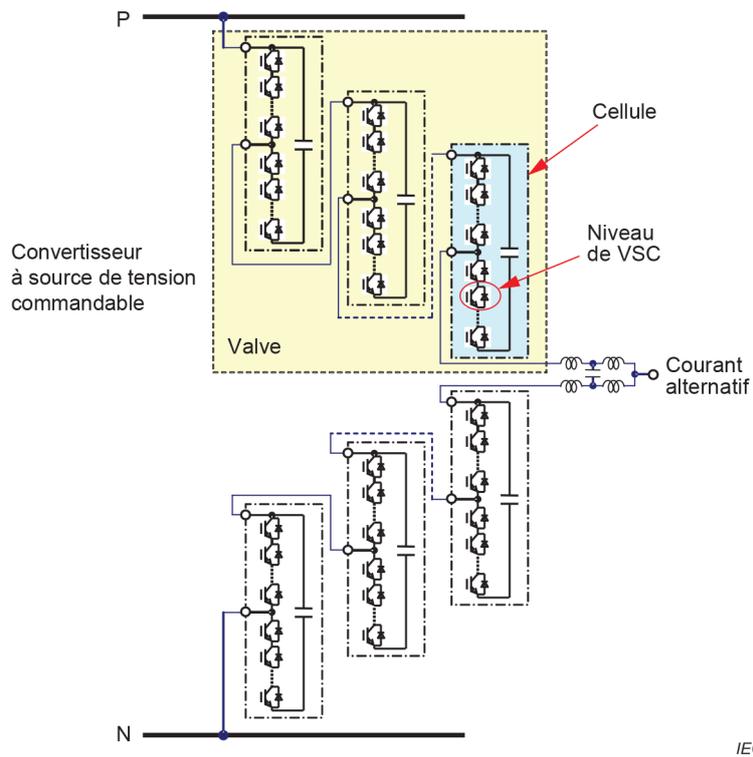


Figure A.13 – Termes relatifs à la construction des valves de type CTL

## A.6 Valves à VSC hybrides

Certains ouvrages de référence publiés ont proposé d'autres types de valves à VSC qui présentent à la fois les caractéristiques du type commutateur et du type à source de tension commandable. Face au rythme de développement relativement rapide dans ce domaine, il est considéré que la présentation d'un traitement détaillé de ces nouvelles topologies de convertisseur ne relève pas du domaine d'application du présent document; toutefois, un traitement de base est spécifié dans la Brochure technique n° 492 du CIGRE.

## A.7 Principales différences entre les valves à VSC et les valves CCHT classiques

Les valves à VSC diffèrent des valves CCHT à thyristor classiques à plusieurs égards. Il est important d'apprécier ces différences pour comprendre les différences entre les approches à adopter lors des essais de ces valves.

Parmi les très nombreuses différences, les principales différences qui influent sur les essais des valves sont les suivantes.

- Les valves à VSC peuvent être bloquées et réactivées par une action de commande. En revanche, les valves à thyristor CCHT classiques peuvent uniquement être activées par une action de commande et exigent, pour passer à l'état bloqué, que le circuit externe contraigne le courant à zéro et applique ensuite une période de tension inversée. De ce fait, les essais visant à démontrer les angles d'extinction minimaux ou les transitoires de tension positive au cours de l'intervalle de rétablissement (qui sont si importants pour les valves à thyristor), ne sont pas importants pour les valves à VSC.
- Dans la plupart des valves à VSC, la valve n'est pas capable de supporter une tension inversée (car elle contient des diodes de roue libre intégrées), mais peut conduire le courant inversé. Dans les valves à thyristor CCHT classiques, la valve peut résister à une tension inversée mais ne peut pas conduire le courant inversé.
- Dans les valves à VSC, une activation de protection n'est généralement pas utilisée en raison du risque de créer un court-circuit dans le condensateur à courant continu, mais un blocage de protection est utilisé comme un moyen permettant d'éliminer les surintensités. En revanche, dans les valves à thyristor CCHT classiques, l'activation de protection est largement utilisée et le blocage de protection n'est pas possible.
- La grande capacité côté courant continu indique qu'en de rares circonstances, une unité de phase VSC peut expérimenter des transitoires de tension rapides entre les bornes. Dans les valves de type à source de tension commandable (où une partie de la capacité de courant continu est intégrée dans la valve), la même remarque prévaut également pour les tensions entre les bornes de la valve.

## **Annexe B** (informative)

### **Tolérance aux pannes des composants de valves**

La capacité de tolérance aux pannes peut se définir comme l'aptitude d'une valve CCHT à VSC à assurer sa fonction prévue, jusqu'à son arrêt programmé, avec des composants ou sous-ensembles défectueux ou des composants surchargés, sans entraîner de défaillance inacceptable des autres composants, ni laisser s'étendre les dommages dus à la condition de fonctionnement en défaut. Des caractéristiques particulières de conception peuvent être exigées pour assurer la tolérance aux pannes.

Les essais visant à démontrer la tolérance aux pannes des composants de valve ne sont pas classés comme des essais de type car la plupart d'entre eux sont des essais destructifs des composants de valve ou de la valve et les essais sont généralement effectués sur un petit nombre de niveaux de valve. Il convient de réaliser ces essais au stade de la conception d'un nouveau type de valves pour vérifier la conformité de la tolérance aux pannes des composants de valve. Il est recommandé au fournisseur de documenter les essais et de produire un rapport relatif au projet, basé sur l'expérience acquise, sur demande de l'acheteur.

Des exemples de pannes pour lesquelles la mise en œuvre de la tolérance aux pannes peut être exigée, sont indiqués ci-dessous.

a) Défaillance d'un IGBT ou d'une diode

Même si le court-circuit d'une paire IGBT-diode ou le fonctionnement d'un dispositif de court-circuit au niveau de la valve externe entraîne la dérivation des autres composants au niveau de la valve, certaines conceptions peuvent représenter un danger de surcharge des connexions de courant ou de modification de la charge de blocage.

b) Perte du signal de fermeture des IGBT au niveau de valve, provoqué par la perte d'impulsions normales contrôlant l'état passant du niveau en question

La perte du signal de fermeture entraîne simultanément une surtension sur d'autres composants du niveau concerné.

c) Défaut d'isolement d'un condensateur d'amortissement, d'une résistance d'amortissement ou d'autres composants, s'ils existent

Défaut d'isolement de tout composant en parallèle avec des IGBT ou des diodes, pouvant entraîner un courant de charge dans le composant et provoquer une situation de stress.

d) Fuite de petites quantités de fluide de refroidissement de la valve

Si la valve est refroidie par liquide, de petites fuites peuvent s'avérer difficiles à détecter. Le fluide de refroidissement échappé est susceptible de contaminer des composants sensibles, d'entraîner un dysfonctionnement et d'augmenter le risque de défaut d'isolement. Cependant, l'expérience acquise lors de l'essai sous pluie réalisé sur les valves à LCC et VSC indique que l'essai sous pluie de valve sur une surface de valve neuve et sans poussière ne permet pas d'identifier les emplacements susceptibles de provoquer une défaillance diélectrique de la valve en service en raison de la fuite de petites quantités de fluide de refroidissement de valve. L'IEEE Std 857™-1996 (*IEEE Recommended Practice for Test Procedures for High-Voltage Direct-Current Thyristor Valves*), souvent citée dans l'essai sous pluie, a été annulée en 2010.

e) Courant de court-circuit interne au sous-module/à la cellule

Le raté d'allumage de l'IGBT, le court-circuit d'une paire IGBT-diode ou un défaut d'isolement peut conduire à un courant de décharge interne du condensateur. Dans ces conditions de court-circuit, il convient que le défaut soit isolé et ne compromette pas le fonctionnement normal du sous-module adjacent ou de la cellule adjacente. En particulier, il convient que le défaut ne conduise pas à un contournement à l'extérieur de la cellule/du sous-module affecté, à un dommage entraînant un défaut de fonctionnement causé par des débris projetés ou des interférences électromagnétiques sur la cellule ou le sous-module voisin. Il convient que toute lumière visible qui s'échappe de la cellule/du sous-module défectueux ne provoque pas d'arrêt du convertisseur dû à l'activation des systèmes de détection d'incendie ou d'arc dans la salle des valves.

f) Courant de court-circuit externe au sous-module/à la cellule

De manière analogue au cas (e) ci-dessus, si un court-circuit a lieu entre les bornes externes du sous-module/de la cellule, ou au niveau de plusieurs sous-modules/cellules (par exemple entre les étages d'une pile de valve), alors les condensateurs des sous-modules/cellules qui étaient dans la valve au moment du court-circuit, déchargent leurs condensateurs dans le court-circuit. Bien que la vitesse de variation du courant soit inférieure à celle du cas (e) en raison de l'inductance de boucle plus élevée, elle reste encore très élevée et peut conduire à une forte vitesse de variation du champ magnétique, en affectant potentiellement les circuits électroniques situés à proximité. Selon la philosophie de conception adoptée pour la valve, des essais peuvent être nécessaires pour démontrer que les IGBT se bloquent en toute sécurité avant que les condensateurs ne puissent se décharger complètement et que les perturbations électromagnétiques résultantes n'entraînent pas un mauvais fonctionnement des circuits électroniques proches.

g) Effets des surtensions transitoires rapides sur l'électronique

Certains événements tels que les coups de foudre sur les systèmes à courant alternatif ou continu à proximité de la station de conversion, les commutations des valves (y compris le blocage de protection) et les contournements de traversées à l'intérieur de la salle des valves, peuvent conduire à des surtensions transitoires rapides qui, bien que leur amplitude ne soit pas nécessairement suffisante pour présenter un risque de défaut d'isolement, peuvent soumettre les cartes électroniques de la valve à une valeur  $dv/dt$  très élevée. Selon la philosophie de conception de la station de conversion globale pour de tels défauts, des essais peuvent être nécessaires pour démontrer que les cartes électroniques restent en fonctionnement sans dommage ni dysfonctionnement dans ces conditions.

Il convient que l'acheteur étudie la conception proposée avec le fournisseur afin de déterminer la probabilité et les conséquences possibles de certaines défaillances. Si nécessaire, il convient de considérer les résultats d'essais spéciaux visant à vérifier les aspects critiques de la capacité de tolérance aux pannes de la valve. Les détails de tels essais sont soumis à un accord établi au cas par cas.

## **Annexe C** (informative)

### **Détermination des pertes de valve**

Comme les pertes de transmission sont directement liées aux coûts d'investissement et d'exploitation, elles constituent l'un des facteurs les plus importants pour l'évaluation d'un projet de courant continu à haute tension (CCHT). Pour les convertisseurs de source de tension (VSC), les pertes des valves constituent la plus grande partie des pertes totales de la station de conversion et, par conséquent, la détermination et l'évaluation des pertes des valves à VSC deviennent très importantes.

À l'heure actuelle, les pertes des valves à VSC sont déterminées sur la base des méthodes de calcul de l'IEC 62751-1 et l'IEC 62571-2. La méthode de calcul exige des informations détaillées telles que les paramètres des dispositifs à semiconducteur, les caractéristiques de conception des valves à VSC et les modes de fonctionnement, qui ne sont généralement pas directement accessibles à l'acheteur/utilisateur du système CCHT, pour lequel il est donc difficile d'évaluer les résultats des pertes calculées.

Par conséquent, le groupe de travail B4.75 du CIGRE a été créé en 2017 afin de mener une étude de faisabilité pour évaluer les méthodes de mesure des pertes en laboratoire sur les valves à VSC à des fins d'évaluation du calcul des pertes et pour formuler des recommandations en tenant compte des avantages et des inconvénients de ces méthodes de mesure par rapport aux méthodes de l'IEC 62751. Les résultats de ce groupe de travail ont été publiés en 2021 dans la Brochure technique n° 844 du CIGRE: "Feasibility Study for assessment of lab losses measurement of VSC valves".

Cette brochure débute par une description générale des pertes dans les valves à VSC des convertisseurs CCHT, suivie des origines des différentes pertes dans les composants, de la dépendance des pertes aux différents modes de fonctionnement, ainsi que des aspects particuliers de différentes conceptions. S'ensuit un résumé de la pratique actuelle pour la détermination des pertes des valves, y compris la modélisation des paramètres des semiconducteurs, puis une discussion sur les possibilités d'amélioration de la transparence du processus de calcul global. Les principaux résultats de l'étude du groupe de travail B4.75 sont une évaluation des méthodes existantes pour la mesure des pertes. Cette évaluation est complétée par une vue d'ensemble des conditions de fonctionnement et des aspects supplémentaires pour la mesure des pertes (tels que les aspects commerciaux) qu'il convient de prendre en compte. Dans la dernière partie, les résultats sont résumés et des recommandations sont données pour l'application de mesure des pertes, lesquelles recommandations peuvent servir de guide pour l'introduction à la mesure des pertes dans les essais de type de fonctionnement des valves à VSC.

La conclusion de la Brochure technique n° 844 du CIGRE est que la mesure des pertes de valves est réalisable en laboratoire, bien que le niveau de précision pouvant être obtenu soit encore relativement faible. Par conséquent, la recommandation générale est d'intégrer la mesure en laboratoire dans les essais de type de fonctionnement des valves à VSC, de manière à pouvoir acquérir, dans les années à venir, une plus grande expérience de l'industrie dans ce domaine. En revanche, il est déconseillé d'utiliser les pertes mesurées des valves dans le cadre des critères d'évaluation financiers pour le projet de CCHT, tant que l'expérience de l'industrie n'est pas suffisante et qu'il n'existe pas de consensus quant au niveau d'incertitude de mesure réalisable de manière réaliste.

## Bibliographie

IEC 60146-2, *Convertisseurs à semiconducteurs – Partie 2: Convertisseurs autocommutés à semiconducteurs y compris les convertisseurs à courant continu directs*

IEC 61975, *Installations en courant continu à haute tension (CCHT) – Essais systèmes*

IEC TR 62543, *High voltage direct current (HVDC) power transmission using voltage sourced converters (VSC)* (disponible en anglais seulement)

IEC 62751-1, *Pertes de puissance dans les valves à convertisseur de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT) – Partie 1: Exigences générales*

IEEE Std 857™-1996, *IEEE Recommended Practice for Test Procedures for High-Voltage Direct-Current Thyristor Valves* (disponible en anglais seulement)

CIGRE Technical Brochure No. 269, *VSC Transmission*

CIGRE Technical Brochure No. 447, *Components Testing of VSC Systems for HVDC Applications*

CIGRE Technical Brochure No. 492, *Voltage Sourced Converter (VSC) for HVDC Power Transmission - Economic Aspects and Comparison with other AC and DC Technologies*

CIGRE Technical Brochure No. 844, *Feasibility study for assessment of lab losses measurement of VSC valves*

---





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)