

CONSOLIDATED VERSION

VERSION CONSOLIDÉE



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 © 2014 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 Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
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 corrigenda or an amendment might have been published.

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 14 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

More than 55 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

IEC Customer Service Centre - 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: csc@iec.ch.

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.

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - www.iec.ch/searchpub

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

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 14 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

Plus de 55 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: csc@iec.ch.

CONSOLIDATED VERSION

VERSION CONSOLIDÉE



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

ISBN 978-2-8322-1816-7

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.
--

REDLINE VERSION

VERSION REDLINE



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

CONTENTS

FOREWORD.....	5
1 Scope	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	7
3.1 Insulation co-ordination terms	8
3.2 Power semiconductor terms	8
3.3 Operating states of converter	9
3.3.1 Operating state of an IGBT-diode pair	9
3.3.2 Operating state of converter	9
3.4 VSC construction terms	9
3.5 Valve structure terms.....	11
4 General requirements	11
4.1 Guidelines for the performance of type tests.....	11
4.1.1 Evidence in lieu	11
4.1.2 Test object.....	12
4.1.3 Sequence of test	12
4.1.43 Test procedure.....	12
4.1.54 Ambient temperature for testing.....	12
4.1.65 Frequency for testing	12
4.1.76 Test reports	12
4.1.7 Conditions to be considered in determination of type test parameters.....	13
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	16
6.4 Maximum continuous operating duty test.....	17
6.5 Maximum temporary over-load operating duty test.....	17
6.6 Minimum d.c. voltage test	18
7 Dielectric tests on valve support structure	18
7.1 Purpose of tests	18
7.2 Test object	18
7.3 Test requirements.....	19
7.3.1 Valve support d.c. voltage test	19
7.3.2 Valve support a.c. voltage test	20
7.3.3 Valve support switching impulse test	20
7.3.4 Valve support lightning impulse test	21
8 Dielectric tests on multiple valve unit	21

8.1	Purpose of tests	21
8.2	Test object	21
8.3	Test requirements.....	21
8.3.1	MVU d.c. voltage test to earth	21
8.3.2	MVU a.c. voltage test	22
8.3.3	MVU switching impulse test.....	23
8.3.4	MVU lightning impulse test	24
9	Dielectric tests between valve terminals	24
9.1	Purpose of the test	24
9.2	Test object	25
9.3	Test requirements.....	25
9.3.1	Valve a.c. – d.c. voltage test	25
9.3.2	Valve impulse tests (general)	27
9.3.3	Valve switching impulse test.....	27
9.3.4	Valve lightning impulse test.....	28
10	IGBT overcurrent turn-off test	29
10.1	Purpose of test	29
10.2	Test object	29
10.3	Test requirements.....	29
11	Short-circuit current test	30
11.1	Purpose of tests	30
11.2	Test object	30
11.3	Test requirements.....	30
12	Tests for valve insensitivity to electromagnetic disturbance	30
12.1	Purpose of tests	30
12.2	Test object	31
12.3	Test requirements.....	31
12.3.1	General	31
12.3.2	Approach one	31
12.3.3	Approach two.....	31
12.3.4	Acceptance criteria	32
13	Production tests	32
13.1	Purpose of tests	32
13.2	Test object	33
13.3	Test requirements.....	33
13.4	Production test objectives	33
13.4.1	Visual inspection.....	33
13.4.2	Connection check	33
13.4.3	Voltage-grading circuit check	33
13.4.4	Control, protection and monitoring circuit checks	33
13.4.5	Voltage withstand check.....	33
13.4.6	Partial discharge tests.....	34
13.4.7	Turn-on / turn-off check.....	34
13.4.8	Pressure test	34
14	Presentation of type test results.....	34
15	Tests for dynamic braking valves	32
Annex A (informative)	Overview of VSC topology converters in HVDC power transmission	35

Annex B (informative) Valve component fault tolerance capability	48
Bibliography	49
Figure A.1 – A single VSC phase unit and its idealized output voltage	36
Figure A.2 – Output voltage of a VSC phase unit for a 2-level converter	36
Figure A.3 – Output voltage of a VSC phase unit for a 15-level converter, without PWM	37
Figure A.4 – Basic circuit topology of one phase unit of a 2-level converter	38
Figure A.5 – Basic circuit topology of one phase unit of a 3-level diode-clamped converter	39
Figure A.6 – Basic circuit topology of one phase unit of a 5-level diode-clamped converter	40
Figure A.7 – Basic circuit topology of one phase unit of a 3-level flying capacitor converter	41
Figure A.8 – A single VSC phase unit with valves of the “controllable voltage source” type	42
Figure A.9 – One possible implementation of a multi-level “voltage source” VSC valve The half-bridge MMC circuit	43
Figure A.10 – The full-bridge MMC circuit	43
Figure A.11 – The half-bridge CTL circuit	45
Figure A.12 – Construction terms in MMC valves	46
Figure A.13 – Construction terms in CTL valves	46
Table 1 – Minimum number of valve levels to be tested as a function of the number of valve levels per valve	12
Table 2 – Valve level faults permitted during type tests	15
Table 3 – List of type tests	15

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) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

This Consolidated version of IEC 62501 bears the edition number 1.1. It consists of the first edition (2009-06) [documents 22F/185/FDIS and 22F/193/RVD] and its amendment 1 (2014-08) [documents 22F/299/CDV and 22F/316A/RVC]. The technical content is identical to the base edition and its amendment.

In this Redline version, a vertical line in the margin shows where the technical content is modified by amendment 1. Additions and deletions are displayed in red, with deletions being struck through. A separate Final version with all changes accepted is available in this publication.

This publication has been prepared for user convenience.

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.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendment will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

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

IMPORTANT – The “colour inside” logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this publication 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 d.c. power transmission or as part of a back-to-back link. It is restricted to electrical type and production tests.

The scope of this standard includes the electrical type and production tests of dynamic braking valves which may be used in some HVDC schemes for d.c. overvoltage limitation.

This standard can be used as a guide for testing of STATCOM valves.

The tests specified in this standard are based on air insulated valves. For other types of valves, the test requirements and acceptance criteria ~~must~~ should be agreed between the purchaser and the supplier.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application 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 60060-1:1989, High voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements~~

~~IEC 60071-1:2006, Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules~~

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

IEC 60270:2000, *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*

IEC 60700-1:1998, *Thyristor valves for high voltage direct current (HVDC) power transmission – Part 1: Electrical testing*¹⁾

Amendment 1(2003)
Amendment (2008)

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

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

¹⁾ There exists a consolidated edition 1.2 (2008) that comprises IEC 60700-1, Amendment 1 and Amendment 2.

3.1 Insulation co-ordination 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

~~There are several types of controllable semiconductor switch device which can be used in VSC converters for HVDC. For convenience, the term IGBT is used throughout this standard to refer to the main, controllable, semiconductor switch device. However, the standard is equally applicable to other types of controllable semiconductor switch device.~~

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 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.

~~3.2.13.2.2~~

insulated gate bipolar transistor

IGBT

~~a controllable switch with the capability to turn-on and turn-off a load current~~

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

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

~~3.2.23.2.3~~

free-wheeling diode

FWD

power semiconductor device with diode characteristic

NOTE 1 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 FWDs are characterized by the capability to cope with high rates of decrease of current caused by the switching behaviour of the IGBT.

~~3.2.33.2.4~~

IGBT-diode pair

arrangement of IGBT and FWD connected in inverse parallel

3.3 Operating states of converter

3.3.1 ~~Operating state of an IGBT-diode pair~~

3.3.1.1

blocking state

~~condition in which an IGBT-diode pair is turned off~~

~~In that state, the load current does not flow through the IGBT. However, a load current can flow through the diode as the diode is not controllable.~~

3.3.1.2

de-blocked state

~~the condition when the load current flows either through the IGBT or diode of an IGBT-diode pair depending on the load current direction~~

3.3.2 ~~Operating state of converter~~

3.3.2.13.3.1

blocking state

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

NOTE Typically, the converter is in the blocking state condition after energization.

3.3.2.23.3.2

de-blocked state

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

3.3.2.33.3.3

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 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.

3.4 VSC construction terms

3.4.1

VSC phase unit

equipment used to connect the two d.c. busbars to one a.c. terminal

3.4.2

switch type VSC valve

~~complete controllable device assembly, which represents a functional unit as part of a VSC phase unit and characterized by switching actions of the power electronic devices upon control signals of the converter base electronics arrangement of IGBT-diode pairs connected in series and arranged to be switched simultaneously as a single function unit~~

~~NOTE Dependent on the converter topology, a valve can either have the function to act like a controllable switch or to act like a controllable voltage source.~~

3.4.3

controllable voltage source type VSC valve

complete controllable voltage source assembly, which is generally connected between one a.c. terminal and one d.c. terminal

3.4.3.4.4

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

3.4.4.3.4.6

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 See Figure A.13

3.4.5.3.4.9

VSC valve level

~~part of a VSC 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 half bridge arrangement, together with their immediate auxiliaries, storage capacitor, if any~~
smallest indivisible functional unit of VSC valve

NOTE 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).

3.4.6.3.4.10

diode valve level

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

3.4.7.3.4.11

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 ~~during service~~ 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 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 half bridge arrangement, together with their immediate auxiliaries, storage capacitor, if any

3.5 Valve structure terms

3.5.1

valve structure

~~physical structure holding the levels of a valve which is insulated to the appropriate voltage above earth potential~~ 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

~~NOTE A part of a valve which is clearly identifiable in a discrete form to be a valve support may not exist in all designs of valves.~~

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 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 ~~VSC or diode~~ valve levels and other components, which exhibits pro-rated electrical properties of a complete valve

NOTE 1 For valves of controllable voltage source type the valve section shall include cell or submodule d.c. capacitor in addition to VSC valve levels.

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

3.5.5

valve base electronics

electronic unit, at earth potential, ~~which is the interface providing the electrical to optical conversion~~ between the converter control system and the VSC valves

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 standard. If the valve is demonstrably similar to one previously tested, the supplier may, in lieu of performing a type test, 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.

4.1.2 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 8.2.

- a) Type tests may be performed either on a complete valve or, in certain circumstances, on valve sections, as indicated in Table 3.
- b) The minimum number of valve levels to be tested, depending on the valve levels in a single valve, is as shown in Table 1.

Table 1 – Minimum number of valve levels to be tested as a function of the number of valve levels per valve

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

- c) Generally, the same valve sections are recommended to be used for all type tests. However, with the agreement of the purchaser and supplier, 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 should be demonstrated to have withstood the production tests to ensure proper manufacture.

4.1.3 Sequence of test

~~In order to confirm that the valve terminal-terminal insulation has not been degraded by the fast repetitive switching stresses experienced by the converter in operation, the valve a.c. — d.c. voltage test between terminals with partial discharge measurement should be performed after the operational tests. Other type tests specified can be carried out in any order.~~

~~NOTE For valves of the "controllable voltage source" type (Clause A.5), the test sequence, where the a.c. — d.c. voltage test is performed before the operational test, may be acceptable by mutual agreement between the purchaser and supplier.~~

4.1.44.1.3 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.

4.1.54.1.4 Ambient temperature for testing

The tests shall be performed ~~in accordance with IEC 60060, where applicable~~ at the prevailing ambient temperature of the test facility, unless otherwise specified.

4.1.64.1.5 Frequency for testing

AC dielectric tests can be performed at either 50 Hz or 60 Hz. For operational tests, specific requirements regarding the frequency for testing are given in the relevant clauses.

NOTE Guidance on the worst service conditions can be found in CIGRÉ Technical Brochure No. 447.

4.1.74.1.6 Test reports

At the completion of the type tests, the supplier shall provide type test reports in accordance with Clause 14.

4.1.7 Conditions to be considered in determination of type test parameters

Type test parameters should 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 CIGRÉ 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_{1000m}).
 - 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 (°C);
- humidity: design minimum valve hall absolute humidity (g/m³).

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_{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 may be imposed upon the distribution of short-circuited valve levels. For example, there may 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.

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, whichever is lower. If the ~~total~~ 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 2.

Table 2 – 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
etc.			

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 3 lists the type tests given in Clauses 6 to 12.

Table 3 – 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 d.c. voltage test	6.6	Valve or valve section
Valve support d.c. voltage test	7.3.1	Valve support
Valve support a.c. voltage test	7.3.2	Valve support
Valve support switching impulse test	7.3.3	Valve support
Valve support lightning impulse test	7.3.4	Valve support
MVU d.c. voltage test to earth	8.3.1	MVU
MVU a.c. voltage test	8.3.2	MVU

Type test	Clause or subclause	Test object
MVU switching impulse test	8.3.3	MVU
MVU lightning impulse test	8.3.4	MVU
Valve a.c. – d.c. voltage test	9.3.1	Valve (or valve section if agreed between supplier and purchaser)
Valve switching impulse test	9.3.3	
Valve lightning impulse test	9.3.4	
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 if agreed between supplier and purchaser)

6 Operational tests

6.1 Purpose of tests

The principal objectives of the operational tests are:

- 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;
- 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 ~~VSC/diode~~ **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. When required, a proportionally scaled valve arrester shall be included. The arrester shall be scaled to the number of series-connected levels under test to give a protective level which corresponds at least to the maximum characteristic of the service arrester.

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 d.c. capacitance, the d.c. 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 d.c. capacitor is separate from the valve, the d.c. capacitor needs to be correctly represented in the test circuit. In particular, the series-stray inductance in the connections between the d.c. 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 continuous IGBT junction temperatures;
- maximum continuous FWD junction temperatures;
- maximum continuous snubber component temperatures;
- maximum continuous turn-on and turn-off voltage and current.

For diode valves:

- maximum continuous diode junction temperature;
- maximum continuous snubber component temperatures;
- maximum continuous 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 coolant temperature shall be not less than that which will give the highest steady-state IGBT junction and/or Diode junction temperatures in service.~~

The test current, in r.m.s. value, shall incorporate a test safety factor of 1,05.

The test voltage U_{tpv1} corresponding to the maximum continuous operating d.c. voltage shall be determined as follows:

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

where

U_{dmax} is the maximum continuous operating d.c. voltage, including ripple;

k_n is a test scaling factor according to 4.3.1;

k_1 is a test safety factor;

$k_1 = 1,05$.

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.

The test conditions, where required, shall be determined using the same methodology as in 6.4 above.

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 duty test, 10 min maximum continuous operating duty test shall be performed.

6.6 Minimum d.c. 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 d.c. 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 databack signals from the valve electronics.

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

$$U_{\min} = \frac{N_{\text{tut}}}{N_t} \cdot U_W \cdot k_2$$

where

U_W is the lowest d.c. voltage across one valve in service operation where proper function of the valve electronics is required;

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

N_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:

- 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;
- 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 may 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 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

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

7.3.1 Valve support d.c. voltage test

The two main terminals of the valve shall be connected together and the d.c. voltage then applied between the two main terminals thus connected and earth. Starting from a voltage not higher than 50 % of the maximum test voltage, the voltage shall be raised to the specified 1 min test voltage ~~in approximately 10 s 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 Annex B of IEC 60700-1.

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.

NOTE 1 Where possible the test voltage should be increased from 50 % to the maximum voltage level within approximately 10 s. A longer time may be used; however, this may overstress the test object.

NOTE 2 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 ~~shall~~ ~~may~~ be short-circuited and earthed for a ~~minimum of 2 h~~ duration of several hours. The same procedure may be followed at the end of d.c. voltage test.

The valve support d.c. test voltage U_{tds} shall be determined in accordance with the following:

1 min. test

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

3 h test

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

where

U_{dmS1} is the maximum of 1 s average value of voltage appearing across the valve support as determined by the insulation coordination study;

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

k_3 is a test safety factor;

~~$k_3 = 1,6$ for the 1 min test;~~

$k_3 = 1,1$ ~~for the 3 h test;~~

k_t is the atmospheric correction factor according to 4.2;

~~k_t is the value according to 4.2 for the 1 min test;~~

~~$k_t = 1,0$ for the 3 h test.~~

7.3.2 Valve support a.c. voltage test

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

Starting from a voltage not higher than 50 % of the maximum test voltage, the voltage shall be raised to the specified 1 min test voltage ~~U_{tas1} within approximately 10 s~~, kept constant for 1 min, reduced to the specified 30 min test voltage ~~U_{tas2}~~ , kept constant for 30 min and then reduced to zero.

~~During the last 1 min of specified~~ 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 r.m.s. value of the valve support a.c. test voltage U_{tas} shall be determined in accordance with the following:

$$U_{tas} = \frac{U_{mS}}{\sqrt{2}} \cdot k_r \cdot k_4 \cdot k_t$$

where

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

~~U_{tas1} is the 1 min test voltage;~~

~~U_{tas2} is the 30 min test voltage;~~

k_4 is a test safety factor;

$k_4 = 1,3$ for the 1 min test;

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

k_t is the atmospheric correction factor;

k_t is the value according to 4.2 for the 1 min test;

$k_t = 1,0$ for the 30 min test;

k_r is the temporary overvoltage factor;

k_r is the value determined from system studies for the 1 min test;

$k_r = 1,0$ for the 30 min test.

7.3.3 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 co-ordination of the VSC substation.

7.3.4 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 co-ordination of the VSC substation.

8 Dielectric tests on multiple valve unit

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.

8.1 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.

8.2 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.

8.3 Test requirements

8.3.1 MVU d.c. voltage test to earth

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

Starting from a voltage not higher than 50 % of the maximum test voltage, the voltage shall be raised to the specified 1 min test voltage ~~in approximately 10 s~~ 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.

NOTE 1 Where possible the test voltage should be increased from 50 % to the maximum voltage level within approximately 10 s. A longer time may be used; however, this may overstress the test object.

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.

NOTE 2 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 ~~shall~~ may be short-circuited together and earthed for a ~~minimum of 2 h~~ duration of several hours. The same procedure may be followed at the end of d.c. voltage test.

The MVU d.c. test voltage U_{tdm} shall be determined in accordance with the following:

1 min. test

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

3 h test

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

where

U_{dmm1} is the maximum of 1 s average value of voltage appearing between the high-voltage terminal of the MVU and earth;

U_{dmm2} is the maximum value of the d.c. 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;

~~$k_5 = 1,6$ for the 1 min test;~~

$k_5 = 1,1$ ~~for the 3 h test;~~

k_t is the atmospheric correction factor according to 4.2.

~~k_t is the value according to 4.2 for the 1 min test;~~

~~$k_t = 1,0$ for the 3 h test.~~

8.3.2 MVU a.c. voltage test

If a MVU experiences a.c. or composite a.c. plus d.c. 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 a.c. 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.

~~During the specified~~ 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 r.m.s. value of the MVU a.c. test voltage U_{tam} shall be determined in accordance with the following:

$$U_{tam} = \frac{U_{mm}}{\sqrt{2}} \cdot k_r \cdot k_6 \cdot k_t$$

where

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

k_6 is a test safety factor;

$k_6 = 1,3$ for the 1 min test;

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

k_r is the temporary overvoltage factor;

k_r is the value determined from system studies for the 1 min test;

$k_r = 1,0$ for the 30 min test;

k_t is the atmospheric correction factor;

k_t is the value according to 4.2 for the 1 min test;

$k_t = 1,0$ for the 30 min test.

8.3.3 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:

$$U_{tsm} = \pm SIPL_m \cdot k_7 \cdot k_t$$

where

$SIPL_m$ is the switching impulse protective level determined by insulation co-ordination 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.

8.3.4 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_{tlm} shall be determined in accordance with the following:

$$U_{tlm} = \pm LIPL_m \cdot k_g \cdot k_t$$

where

$LIPL_m$ 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_g is a test safety factor;

$k_g = 1,10$;

k_t is the atmospheric correction factor;

k_t is the value according to 4.2.

If it cannot be demonstrated that the test prescribed above adequately tests 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 (d.c., a.c., switching impulse and lightning impulse overvoltages). The tests should 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 have sufficient power rating;
- d) the valve electronic circuits behave as expected.

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 a.c. 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.

9.2 Test object

The test object should generally be a complete valve. 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 ~~surge~~ arrester **if provided**. The valve may form part of a multiple valve unit.

For all impulse tests, the valve electronics shall be energized unless otherwise specified.

If valve section is used as test object, the minimum number of valve levels in the test section should 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. Earth planes shall be used, whose separation shall be determined by the proximity of other adjacent valves and earth potential surfaces.

The test object used for the valve dielectric tests will normally not permit the application of atmospheric correction to the specified test voltages without overstressing the internal components. For this reason, no atmospheric correction factor is applied to any of the dielectric tests between valve terminals. The supplier shall demonstrate that the effects of atmospheric conditions on the valve internal withstand have been allowed for adequately.

9.3 Test requirements

9.3.1 Valve a.c. – d.c. voltage test

This test consists of a short-duration test and a long-duration test. The short-duration test reproduces the composite a.c. – d.c. voltage resulting from certain converter or system faults.

~~The worst case will depend upon the valve design. The cases to be considered include, but are not limited to, the following:~~

- ~~• a.c. terminal short circuit to ground;~~
- ~~• a.c. terminal short circuit between phases;~~
- ~~• a.c. terminal open circuit;~~
- ~~• a.c. system load rejection;~~
- ~~• short circuit across or misfiring of another valve in the same phase unit;~~
- ~~• d.c. pole earth fault to ground.~~

In this test, a capacitor can be used in conjunction with an a.c. test voltage source to produce a composite a.c. – d.c. 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 d.c. voltage source could be used to substitute the capacitor.

Starting from a voltage not higher than 50 % of the maximum test voltage, the voltage shall be ~~ramped-up~~ raised to the specified 10 s test level ~~within approximately 10 s~~ as fast as possible, reduced to the specified ~~30 min~~ 3h test voltage, kept constant for ~~30 min~~ 3h and then reduced to zero.

For a.c. PD (partial discharge) measurement, the peak value of the periodic partial discharge recorded during the last minute of ~~30 min~~ the 3h 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 d.c 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 Performing the valve a.c. – d.c. voltage test presents considerable practical difficulties on valves of the “controllable voltage source” type because of the high current drawn by the in-built capacitance during start-up and the slow discharge rate of the capacitor at the end of the first part of the test. For this reason, it may be necessary to modify the test procedure when testing valves of this type. Alternative test methods to be considered include the temporary substitution of a special test capacitor with reduced capacitance but the same physical size, or the pre-charging of the cell or submodule d.c. capacitor from a separate source before commencing the test.

NOTE 2 Where possible the test voltage should be increased from 50 % to the maximum voltage level within approximately 10 s. A longer time may be used; however, this overstresses the test object.

NOTE 13 If an increasing trend in the rate or magnitude of partial discharge is observed, the test duration may be extended by mutual agreement between the purchaser and supplier.

NOTE 24 It may be necessary to disable gate ~~units~~ 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.

NOTE 5 In the event that 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.

NOTE 6 The use of a capacitor instead of a d.c. source in the test circuit should be mutually agreed by manufacturer and purchaser as the test voltage is higher than actual value.

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

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

$$U_{tv1} = (U_{ac1} \sin(2\pi ft) + U_{dc1}) \cdot k_0 \cdot k_g$$

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

where

U_{ac1} is the peak value of maximum transient a.c. component over-voltage across valve. The limiting effect of valve arrester or pole arrester can be taken into account to derive the over-voltage in service condition;

U_{dc1} is the maximum transient d.c. component over-voltage across valve. The limiting effect of valve arrester or pole arrester can be taken into account to derive the over-voltage in service condition;

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_{ac1} . 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_9 is a test safety factor;

$k_9 = 1,10$;

f is the test frequency (50 Hz or 60 Hz depending on test facilities).

The valve ~~30 min~~ 3h test voltage U_{tv2} shall be determined in accordance with the following:

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

$$U_{tac2} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\max-\text{cont}} \cdot \sin(2\pi ft)}{\sqrt{3}} \cdot k_0 \cdot k_{10}$$

$$U_{tac2} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\max-\text{cont}} \cdot \sin(2\pi ft)}{\sqrt{3}} \cdot k_{c2} \cdot k_0 \cdot k_{10}$$

$$U_{tdc2} = U_{d\max} \cdot k_0 \cdot k_{10}$$

where

$U_{\max-\text{cont}}$ is the maximum steady-state phase-to-phase voltage on the a.c. system or the valve side of the transformer, if a converter transformer is used in between a.c. system and converters;

$U_{d\max}$ is the maximum value of the d.c. component of the steady-state operating voltage of the d.c. system;

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} ;

k_0 is a test scaling factor according to 4.3.2;

k_{10} is a test safety factor;

$k_{10} = 1,10$;

f is the test frequency (50 Hz or 60 Hz depending on test facilities).

~~NOTE 3 The use of a capacitor instead of a d.c. source in the test circuit should be mutually agreed by manufacturer and purchaser as the test voltage is higher than actual value.~~

9.3.2 Valve impulse tests (general)

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

- For some applications, for instance no overhead line is present in d.c. side and the busbar between phase reactor and valves is completely protected against direct lightning strike in a.c. side or in topologies, where the valve acts as a controllable voltage source with its own inbuilt d.c. capacitance, the valve impulse tests are less important since the valves don't see impulses at an amplitude which could be decisive in the electric performance of valves. Impulse tests in such applications can be omitted.
- The impulse test will be applied only in one polarity which corresponds to the polarity of valve withstand voltage.
- If the valve impulse withstand levels are equal to or less than the valve a.c. – d.c. test level, it is deemed that the valve a.c. – d.c. test can cover the impulse tests and consequently the impulse tests can be omitted.

9.3.3 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:

$$U_{tsv} = SIPL_v \cdot k_o \cdot k_{11}$$

where

$SIPL_v$ is the switching impulse protective level of the valve arrester;

k_o 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.

$$U_{tsv} = U_{cms} \cdot k_o \cdot k_{12}$$

where

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

k_o is a test scaling factor according to 4.3.2;

k_{12} is a test safety factor;

$k_{12} = 1, 3, 1, 15$.

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

9.3.4 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_{tlv} shall be determined in accordance with the following.

- Valve with valve surge arrester protection:

$$U_{tlv} = LIPL_v \cdot k_o \cdot k_{13}$$

where

$LIPL_v$ is the lightning impulse protective level of the valve arrester;

k_o 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.

$$U_{tlv} = U_{cml} \cdot k_o \cdot k_{14}$$

where

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

k_o is a test scaling factor according to 4.3.2;

k_{14} is a test safety factor;

$k_{14} = 1,3 \text{ } 1,15$.

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 d.c. capacitor, loop stray inductance, etc. are as stated in 6.3.

~~The worst case will depend upon the valve design but the cases to be considered include, but are not limited to, the following:~~

- ~~• a.c. terminal short circuit to ground;~~
- ~~• a.c. terminal short circuit between phases;~~
- ~~• short circuit across or misfiring of another valve in the same phase unit.~~

10.2 Test object

As described in 6.2. However, it shall also be necessary to represent certain protection or monitoring circuits if these are essential for the detection of an overcurrent event.

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.

The test voltage U_{tpv2} corresponding to the maximum temporary d.c. over-voltage shall be determined as follows:

$$U_{tpv2} = U_{dtemp} \cdot k_n \cdot k_{15}$$

where

U_{dtemp} is the maximum temporary d.c. over-voltage, including ripple;

k_n is a test scaling factor according to 4.3.1;

k_{15} is a test safety factor;

$k_{15} = 1,05$.

The test current waveform in the time interval between detection of the overcurrent and the instant of turn-off of the IGBTs should be representative of the service condition, particularly in terms of current rate-of-rise di/dt.

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 d.c. side, until the control and protection circuit breaks the fault current. ~~Energization of converter valve should also be considered.~~ The VSC valves should 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. The test should normally be performed with the valve electronics initially energized, unless the short-circuit current can occur under conditions where the valve is de-energized (for example due to the inrush current when the converter breaker is closed at start-up).

11.2 Test object

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 should be the maximum values expected in the actual field operation. No test safety factor is applied to the current.

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.

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 and the valve maximum continuous operating duty test and maximum temporary overload operating duty test (see 6.4 and 6.5), the valve impulse test (see 9.3.3 and 9.3.4) 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 standard, 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 standard.

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.

NOTE The specific geometric arrangement to be used and the magnitude of the forward voltage for the electromagnetic disturbance test object should be agreed, based on the design of MVU.

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.

15 Tests for dynamic braking valves

In some VSC HVDC schemes, but particularly where the HVDC system is exporting power from a small islanded a.c. 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 d.c. 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 a.c. 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.

13 Production tests

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.

13.1 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.

13.2 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.

13.3 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 13.4. The order in which the tests are listed implies neither ranking of importance nor the order in which the tests should be performed.

NOTE 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 should be agreed on a case-by-case basis.

13.4 Production test objectives

13.4.1 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.

13.4.2 Connection check

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

13.4.3 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 d.c. to impulse waveshapes, if applicable.

13.4.4 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.

13.4.5 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 a.c. – d.c. test voltage and switching impulse as applicable.

13.4.6 Partial discharge tests

To demonstrate correct manufacture, the purchaser and supplier shall agree which components and subassemblies are critical to the design, and appropriate partial discharge tests shall be performed.

13.4.7 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.

13.4.8 Pressure test

To check that there are no coolant leaks.

14 Presentation of type test results

The 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.

Annex A (informative)

Overview of VSC ~~topology~~ converters in HVDC power transmission

A.1 General

Voltage sourced converter (VSC) valves are an emerging 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 current-sourced 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 d.c. capacitor, which plays an analogous role to the d.c. inductor (which may partly be fulfilled by the inductance of the d.c. 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.

A.2 VSC basics

All voltage sourced converters aim to synthesize, from the d.c. capacitor voltage, an approximately sinusoidal voltage at the a.c. 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.

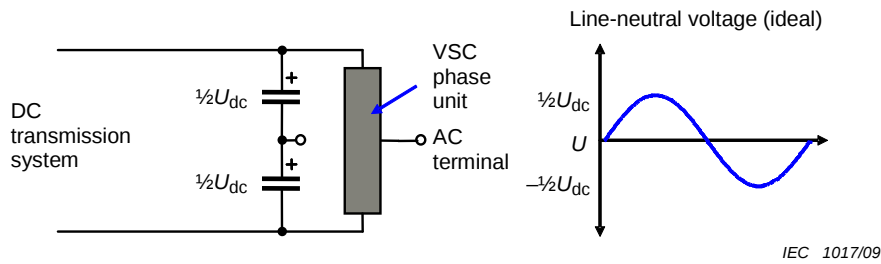


Figure A.1 – A single VSC phase unit and its idealized output voltage

In the simplest possible VSC topology, the “two-level converter”, the a.c. output voltage of each phase arm (with respect to the midpoint of the d.c. 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 a.c. 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.

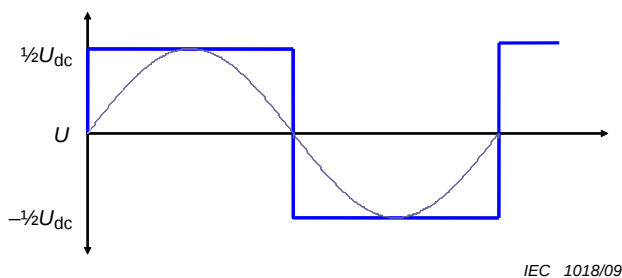


Figure A.2a – Without PWM

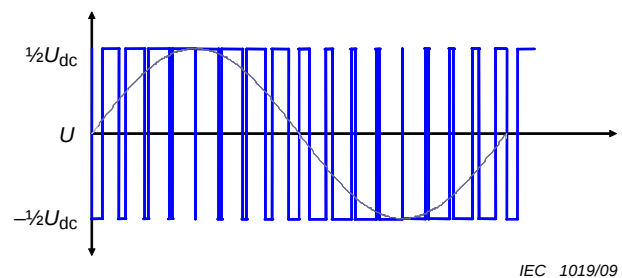


Figure A.2b – With PWM

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.

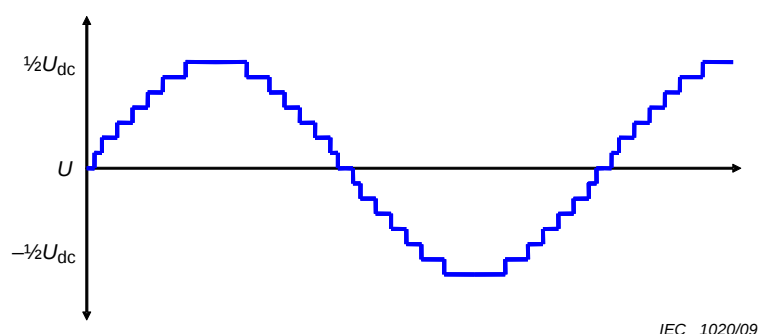


Figure A.3 – Output voltage of a VSC phase unit for a 15-level converter, without PWM

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 ~~or have been described in literature~~ fall into two basic categories.

- VSC valves of the “switch” type. 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 d.c. capacitors are completely separated from the valves and can be tested in isolation.
- VSC valves of the “controllable voltage source” type. In valves of this type, the d.c. 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 VSC valves of the “switch” type

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. ~~Valves of this type are normally used with converters with a relatively low number of output levels.~~ 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 a.c. 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 a.c. terminal is connected to the upper d.c. terminal and therefore produces an output voltage of $+\frac{1}{2}U_{dc}$. When V2 is conducting, the a.c. terminal is connected to the lower d.c. terminal and therefore produces an output voltage of $-\frac{1}{2}U_{dc}$.

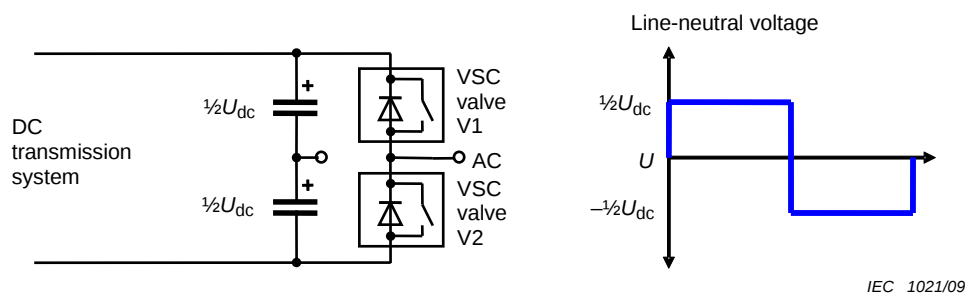


Figure A.4 – Basic circuit topology of one phase unit of a 2-level converter

A.4.3 Multi-level diode clamped converter

In this family of converters, the d.c. 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 d.c. 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 d.c. capacitor is subdivided into two series-connected units (as it frequently is for a 2-level converter). The a.c. 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 d.c. midpoint via diode valves.

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

The same principle can be extended to higher numbers of levels by further subdividing the d.c. capacitor and using more VSC and diode valves. In a 5-level converter, the d.c. 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.

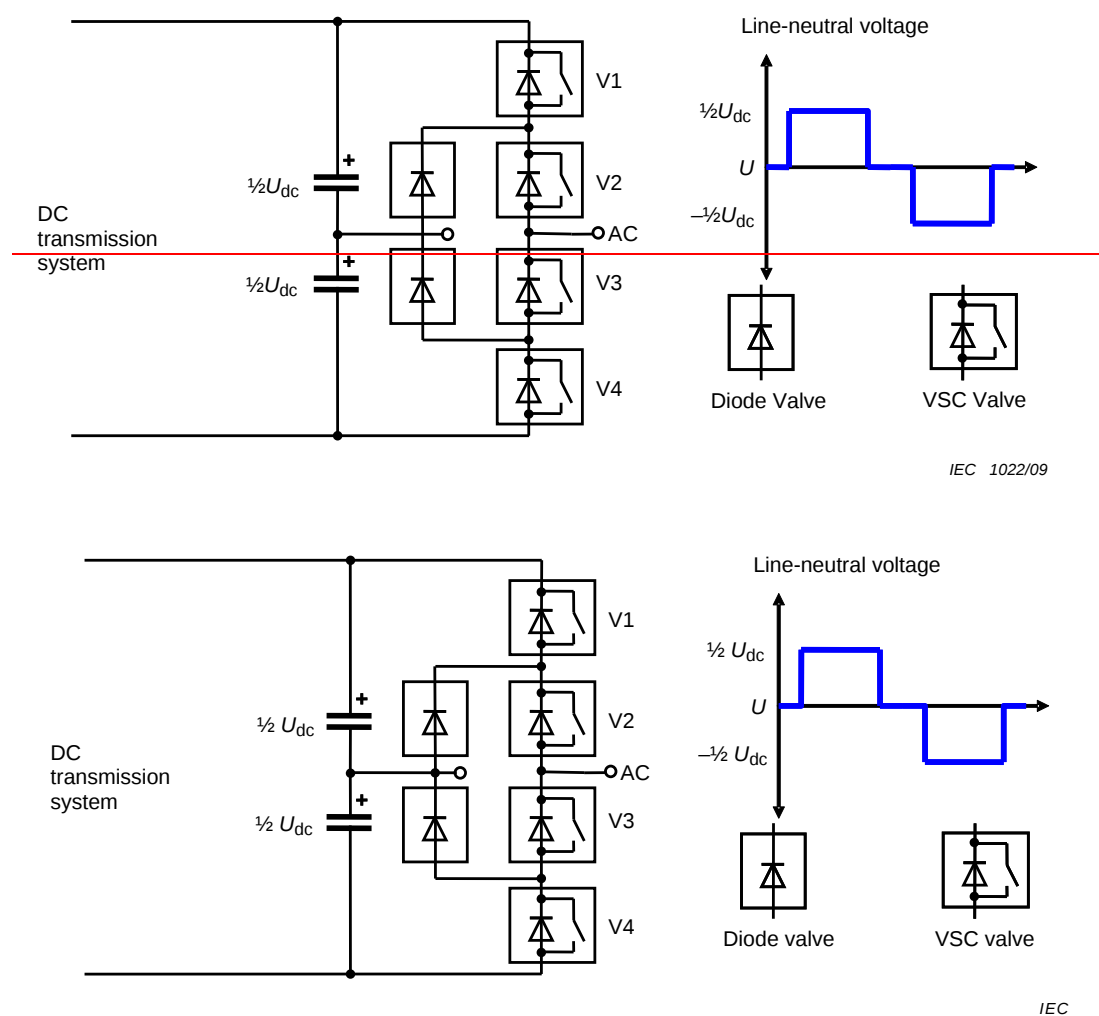


Figure A.5 – Basic circuit topology of one phase unit of a 3-level diode-clamped converter

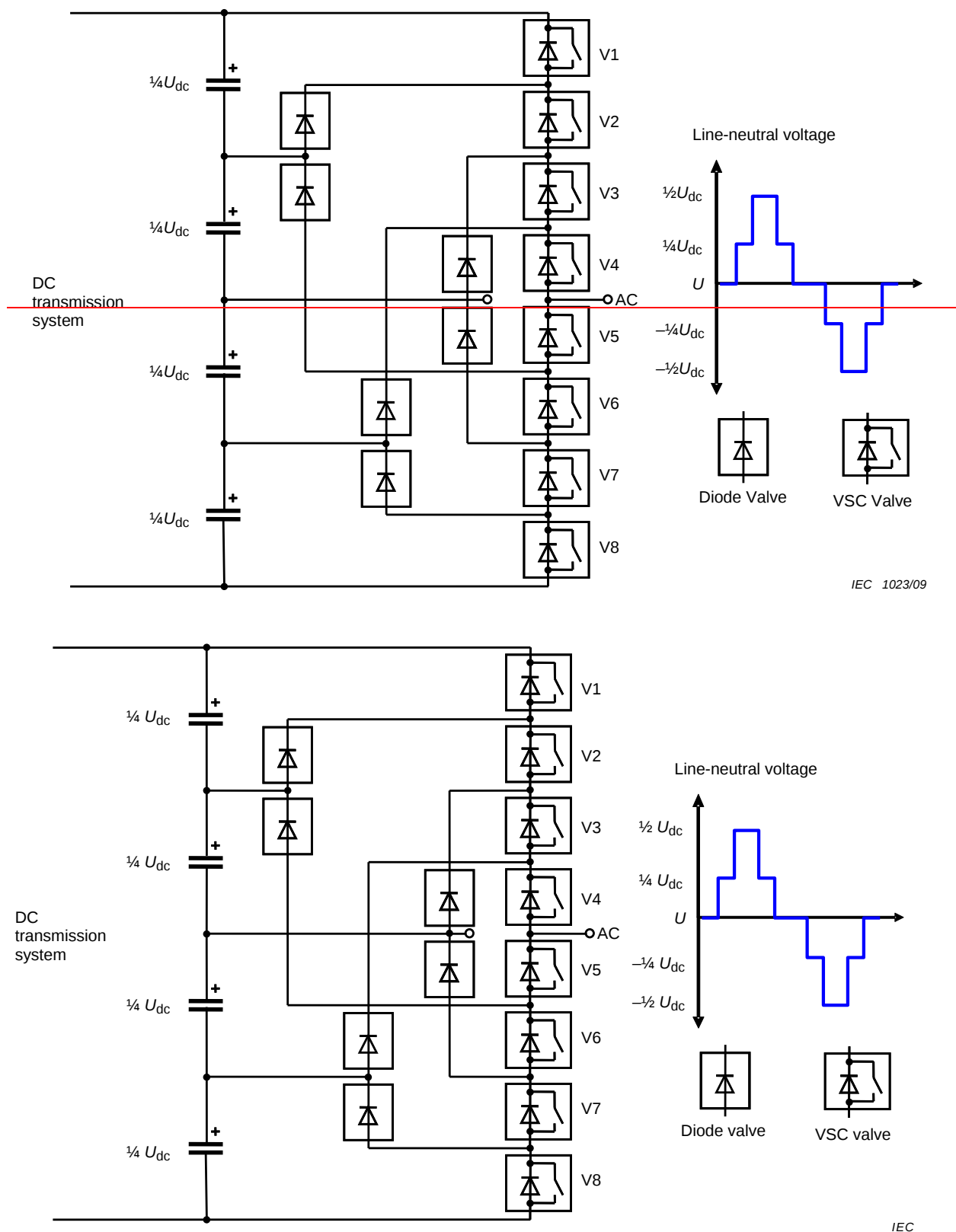


Figure A.6 – Basic circuit topology of one phase unit of a 5-level diode-clamped converter

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 d.c. capacitor stages, it uses one or more additional d.c. capacitors, which are isolated from the

d.c. 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.

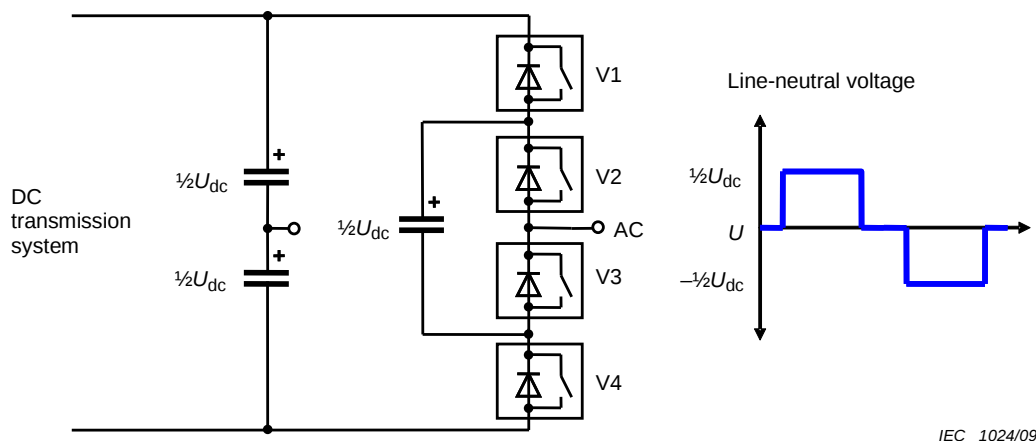


Figure A.7 – Basic circuit topology of one phase unit of a 3-level flying capacitor converter

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 VSC valves of the “controllable voltage source” type

A.5.1 General

In the 2-level converter, the valves and d.c. 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 Subclause A.4.3 and A.4.4 that the d.c. capacitor(s) become increasing subdivided and the valves and d.c. 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 d.c. 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 d.c. capacitors. In effect, such a valve is no longer simply a switch but is now a controllable voltage source, connected between the a.c. terminal of the corresponding phase unit, and one of the d.c. terminals (see Figure A.8).

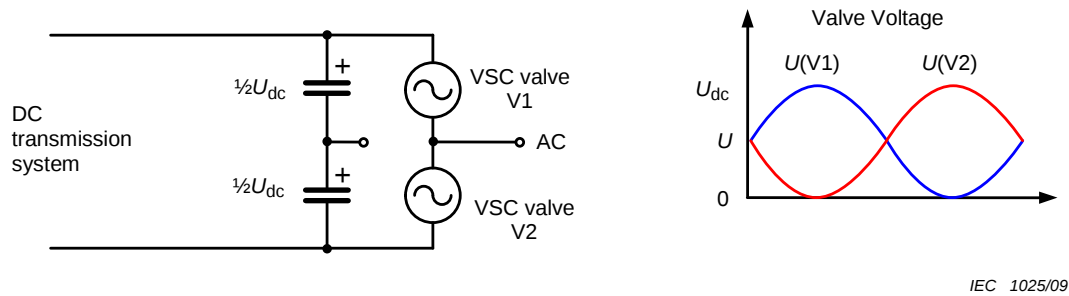


Figure A.8 – A single VSC phase unit with valves of the “controllable voltage source” type

Each of the valves V1 and V2 in the phase unit produces ~~a unipolar~~ an output voltage approximating to a fully offset sinusoidal waveform with extremes of $U=0$ and $U=U_{dc}$ consisting of a sinusoidal a.c. component with a d.c. 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 one such implementation is that shown in Figure A.9. This circuit is modular, each module comprising a single, isolated d.c. 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 modules are made from the a.c. terminal (between IGBT1 and IGBT2) of one module, to one of the d.c. terminals of the neighbouring module. With this circuit, each module can produce two discrete output states: $U=0$ (obtained by switching IGBT2 on) or $U=U_{dc_module}$ (obtained by switching IGBT1 on). U_{dc_module} is the d.c. link voltage of a single module, which is much less than U_{dc} , the d.c. link voltage of the complete system.~~

~~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).~~

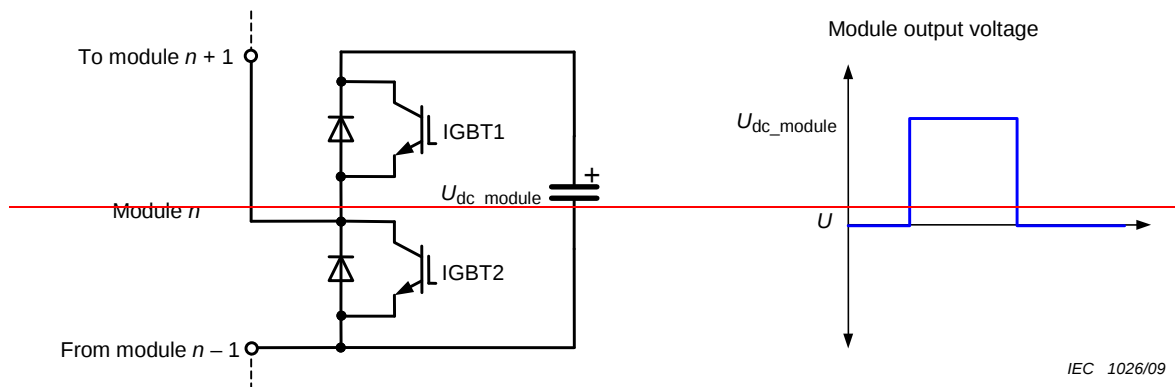


Figure A.9 – One possible implementation of a multi-level “voltage source” VSC valve

Since the 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). On the other hand, the number and size of discrete d.c. capacitors required can be considerable, and there may be difficulties in ensuring that all d.c. 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.5.2 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 d.c. 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 a.c. terminal (between IGBT1 and IGBT2) of one submodule, to one of the d.c. 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 d.c. link voltage of a single submodule, which is much less than U_{dc} , the d.c. 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 d.c. 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.

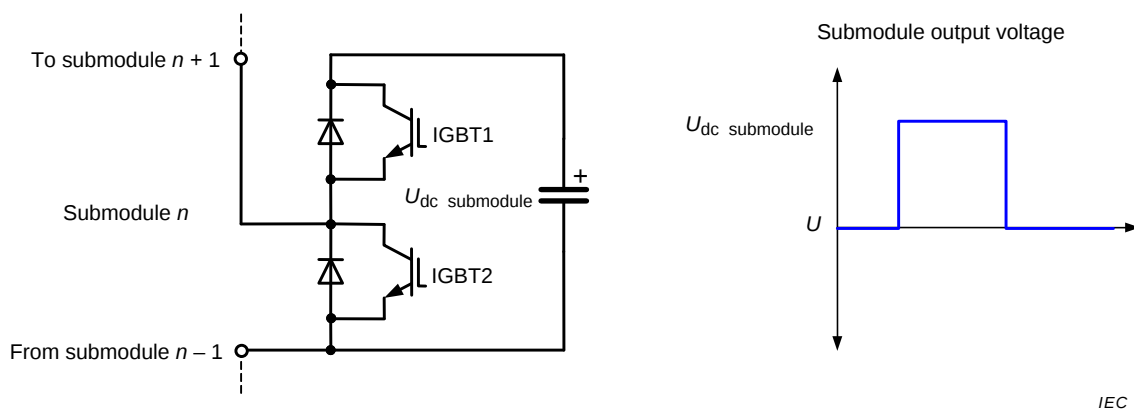


Figure A.9 – The half-bridge MMC circuit

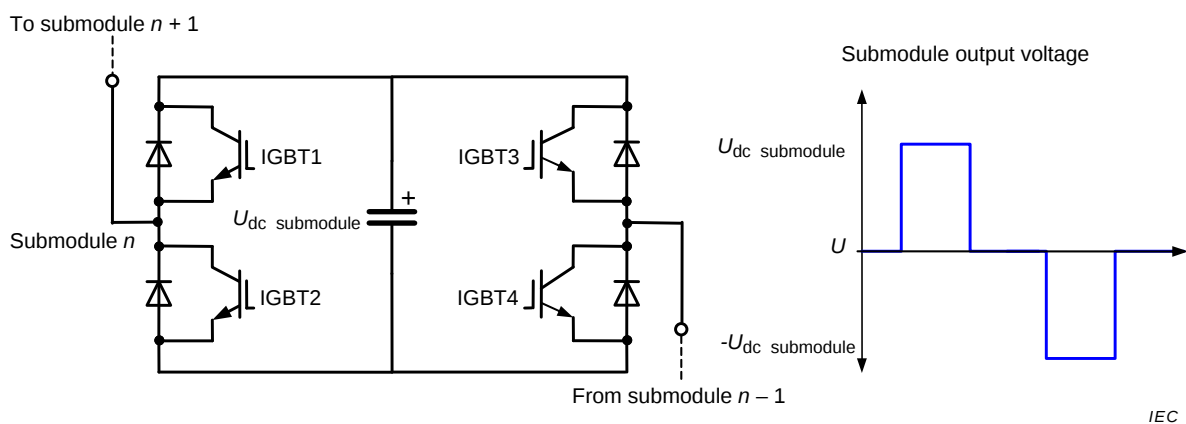


Figure A.10 – The full-bridge MMC circuit

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 d.c. line, the additional flexibility provided by the circuit allows the a.c. component of valve voltage to exceed the d.c. component (which is not possible with the half-bridge circuit), resulting in a lower a.c. current in the valve. In addition, the ability to suppress fault currents arising from short-circuits between the d.c. 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 d.c. capacitors required can be considerable, and there may be difficulties in ensuring that all d.c. 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 consist of n IGBTs in series, switched synchronously, and the cell d.c. capacitor will operate at approximately n times the voltage of a submodule d.c. 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.

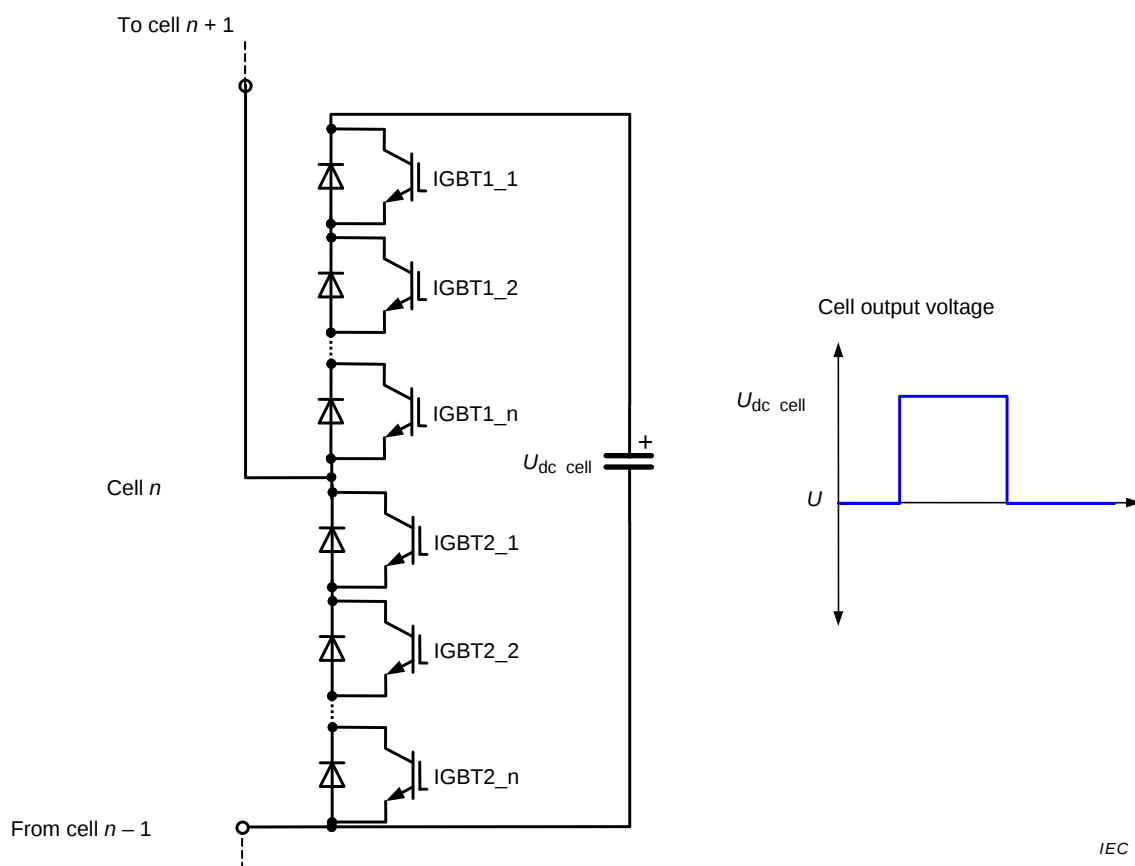


Figure A.11 – The half-bridge CTL circuit

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

Figures A.12 and 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.

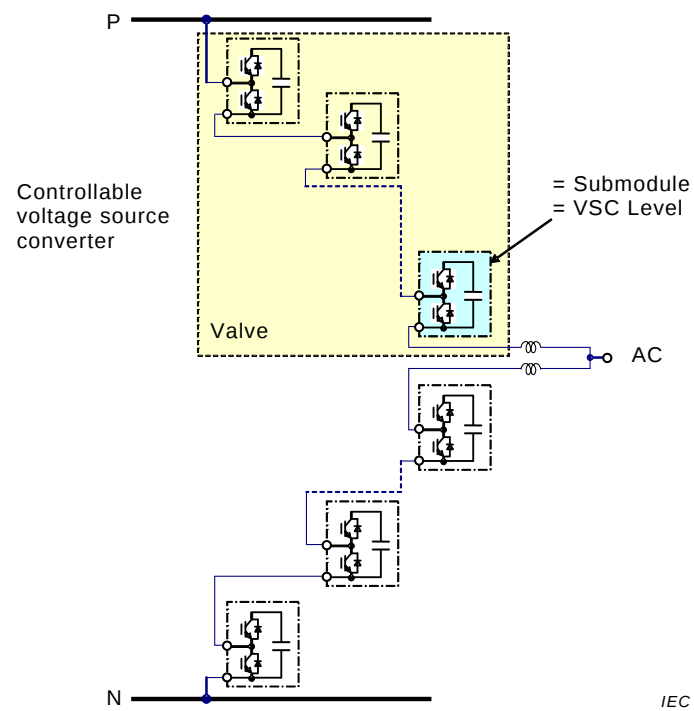


Figure A.12 – Construction terms in MMC valves

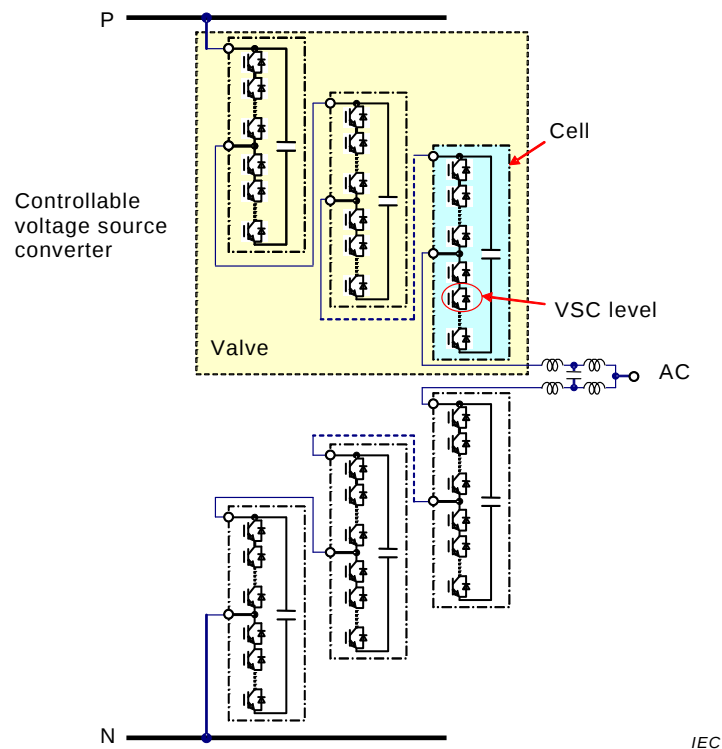


Figure A.13 – Construction terms in CTL valves

A.7 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 CIGRÉ Technical Brochure No. 492.

A.6 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 d.c. 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 d.c.-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 d.c. 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 ~~capability~~

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

a) Short circuit of ~~an IGBT or diode~~ a VSC valve

Even though a short-circuit IGBT ~~or~~ -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 ~~overloading gate driving circuits~~, overload of current connections ~~(where parallel IGBT or diode are used)~~, 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.

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, ~~in the type test programme~~, 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.

Bibliography

IEC 60146-2:1999, *Semiconductor converters – Part 2: Self-commutated semiconductor converters including direct d.c. converters*

IEC PAS 61975:2004, *System tests for high-voltage direct current (HVDC) installations*

~~CIGRÉ B4-WG37 technical report, VSC Transmission~~

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

CIGRÉ Technical Brochure No. 269, *VSC Transmission*

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

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	53
1 Domaine d'application	55
2 Références normatives	55
3 Termes et définitions	56
3.1 Termes relatifs à la coordination de l'isolement	56
3.2 Termes relatifs au semi-conducteur de puissance	56
3.3 États de fonctionnement du convertisseur	57
3.3.1 État de fonctionnement d'une paire IGBT-diode	57
3.3.2 État de fonctionnement d'un convertisseur	57
3.4 Termes relatifs à la construction du VSC	57
3.5 Termes relatifs à la structure de la valve	59
4 Exigences générales	60
4.1 Lignes directrices pour l'exécution des essais de type	60
4.1.1 Autres éléments pouvant faire office de preuve	60
4.1.2 Objet d'essai	60
4.1.3 Séquence d'essai	61
4.1.43 Procédure d'essai	61
4.1.54 Température ambiante pour les essais	61
4.1.65 Fréquence des essais	61
4.1.76 Rapports d'essai	61
4.1.7 Conditions à prendre en considération pour la détermination des paramètres des essais de type	61
4.2 Facteur de correction atmosphérique	61
4.3 Traitement de la redondance	62
4.3.1 Essais de fonctionnement	62
4.3.2 Essais diélectriques	62
4.4 Critères pour des essais de type réussis	62
4.4.1 Généralités	62
4.4.2 Critères applicables aux niveaux de valve	63
4.4.3 Critères applicables à l'ensemble de la valve	64
5 Liste des essais de type	64
6 Essais de fonctionnement	65
6.1 Objectif des essais	65
6.2 Objet d'essai	65
6.3 Circuit d'essai	66
6.4 Essai de contrainte en fonctionnement continu maximal	66
6.5 Essai de contrainte en fonctionnement en surcharge temporaire maximale	67
6.6 Essai de tension c.c. minimale	67
7 Essais diélectriques sur la structure de support de valve	68
7.1 Objectif des essais	68
7.2 Objet d'essai	68
7.3 Exigences relatives aux essais	68
7.3.1 Essai de tension c.c. du support de valve	68
7.3.2 Essai de tension c.a. du support de valve	69
7.3.3 Essai d'impulsion de commutation de support de valve	70
7.3.4 Essai d'impulsion de foudre du support de valve	70

8	Essais diélectriques sur une unité de valves multiples	70
8.1	Objectif des essais	70
8.2	Objet d'essai	71
8.3	Exigences relatives aux essais	71
8.3.1	Essai de tension c.c. de la MVU à la terre	71
8.3.2	Essai de tension c.a. de la MVU	72
8.3.3	Essai d'impulsion de commutation de la MVU	73
8.3.4	Essai d'impulsion de foudre de la MVU	74
9	Essais diélectriques entre les bornes de la valve	74
9.1	Objectif de l'essai	74
9.2	Objet d'essai	75
9.3	Exigences relatives aux essais	75
9.3.1	Essai de tension c.a. – c.c. de la valve	75
9.3.2	Essais d'impulsion de la valve (généralités)	77
9.3.3	Essai d'impulsion de commutation de la valve	78
9.3.4	Essai d'impulsion de foudre de la valve	78
10	Essai de mise hors tension de l'IGBT en cas de surintensité	79
10.1	Objectif de l'essai	79
10.2	Objet d'essai	80
10.3	Exigences relatives à l'essai	80
11	Essai de courant de court-circuit	80
11.1	Objectif des essais	80
11.2	Objet d'essai	80
11.3	Exigences relatives aux essais	81
12	Essai d'insensibilité de la valve aux perturbations électromagnétiques	81
12.1	Objectif des essais	81
12.2	Objet d'essai	81
12.3	Exigences relatives aux essais	82
12.3.1	Généralités	82
12.3.2	Première approche	82
12.3.3	Deuxième approche	82
12.3.4	Critères d'acceptation	82
13	Essais de production	83
13.1	Objectif des essais	83
13.2	Objet d'essai	83
13.3	Exigences relatives aux essais	83
13.4	Objectifs des essais de production	84
13.4.1	Examen visuel	84
13.4.2	Vérification de la connexion	84
13.4.3	Vérification du circuit d'évaluation de la tension	84
13.4.4	Vérification des circuits de commande, de protection et de surveillance	84
13.4.5	Vérification de la tenue en tension	84
13.4.6	Essais de décharge partielle	84
13.4.7	Vérification de la mise sous / hors tension	84
13.4.8	Essais de pression	85
14	Présentation des résultats d'essais de type	85
15	Essais pour les valves à freinage dynamique	83

Annexe A (informative) Vue d'ensemble de la topologie des VSC des convertisseurs VSC dans le cadre du transport d'énergie CCHT	86
Annexe B (informative) Capacité de Tolérance aux pannes des composants de valves	99
Bibliographie.....	100
Figure A.1 – Une unité de phase VSC unique et sa tension de sortie idéale.....	87
Figure A.2 – Tension de sortie d'une unité de phase VSC pour un convertisseur à 2 niveaux.....	87
Figure A.3 – Tension de sortie d'une unité de phase VSC pour un convertisseur à 15 niveaux, sans MLI.....	88
Figure A.4 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur à 2 niveaux.....	89
Figure A.5 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur lié à une diode à 3 niveaux	90
Figure A.6 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur lié à une diode à 5 niveaux	91
Figure A.7 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur à condensateur volant à 3 niveaux.....	92
Figure A.8 – Une unité de phase VSC unique avec des valves du type «source de tension commandable»	93
Figure A.9 – Une mise en œuvre possible d'une valve à VSC «à source de tension» multi-niveaux Circuit MMC en demi-pont	94
Figure A.10 – Circuit MMC en pont intégral.....	95
Figure A.11 – Circuit CTL en demi-pont	96
Figure A.12 – Termes relatifs à la construction des valves du type MMC	97
Figure A.13 – Termes relatifs à la construction des valves du type CTL.....	97
Tableau 1 – Nombre minimal de niveaux de valve à essayer en fonction du nombre de niveaux de valve par valve.....	60
Tableau 2 – Pannes de niveau de valve autorisées au cours des essais de type	64
Tableau 3 – Liste des essais de type	65

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. A 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'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

Cette version consolidée de l'IEC 62501 porte le numéro d'édition 1.1. Elle comprend la première édition (2009-06) [documents 22F/185/FDIS et 22F/193/RVD] et son amendement 1 (2014-08) [documents 22F/299/CDV et 22F/316A/RVC]. Le contenu technique est identique à celui de l'édition de base et à son amendement.

Dans cette version Redline, une ligne verticale dans la marge indique où le contenu technique est modifié par l'amendement 1. Les ajouts et les suppressions apparaissent en rouge, les suppressions étant barrées. Une version Finale avec toutes les modifications acceptées est disponible dans cette publication.

Cette publication a été préparée par commodité pour l'utilisateur.

L'IEC 62501 a été établie par le sous-comité 22F: Electronique 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.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de son amendement ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IMPORTANT – Le logo "*colour inside*" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication 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 autocommuté, conçues pour être utilisées dans un convertisseur de source de tension (VSC, valve sourced converter en anglais) en pont triphasé pour le transport d'énergie en courant continu à haute tension ou en tant qu'élément d'une liaison dos-à-dos. Elle se limite aux essais de type électrique et de production.

Le domaine d'application de la présente norme inclut les essais de type électrique et de production des valves à freinage dynamique qui peuvent être utilisées dans certains systèmes CCHT destinés à limiter la surtension à courant continu.

La présente norme peut être utilisée comme guide pour l'essai des valves STATCOM.

Les essais spécifiés dans la présente norme sont établis à partir de valves dans l'air. Pour les autres types de valves, il ~~faud~~ **convient** que les exigences relatives aux essais et les critères d'acceptation fassent l'objet d'un accord **entre le client et le fournisseur**.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application 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 (y compris les éventuels amendements) s'applique.

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

~~IEC 60060-1:1989, Techniques des essais à haute tension – Partie 1: Définitions et prescriptions générales relatives aux essais~~

~~IEC 60071-1:2006, Coordination de l'isolement – Partie 1: Définitions, principes et règles~~

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

IEC 60270:2000, *Techniques des essais à haute tension – Mesures des décharges partielles*

IEC 60700-1:1998, *Valves à thyristors pour le transport d'énergie en courant continu à haute tension (CCHT) – Partie 1: Essais électriques*¹⁾

Amendement 1(2003)
Amendement (2008)

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

¹⁾ Il existe une édition consolidée 1.2 (2008) comprenant l'IEC 60700-1, l'Amendement 1 et l'Amendement 2.

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

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 valve neuve, dont l'intégrité est intacte, n'indique aucune décharge disruptive et satisfait à l'ensemble des critères d'acceptation spécifiés pour cet essai particulier, lorsqu'elle est soumise à un nombre spécifié d'applications ou à une durée spécifiée de tension d'essai, dans des conditions spécifiées

3.1.2

isolement interne

air extérieur aux composants et aux matériaux d'isolement de la valve mais contenu dans le profil de la valve ou dans l'unité de valve multiple

3.1.3

isolement externe

air situé entre la surface externe de la valve ou de l'unité de valve multiple et son environnement

3.2 Termes relatifs au semi-conducteur de puissance

~~Il existe de quelques types de dispositifs de commutation à semi-conducteur commandables pouvant être utilisés dans les convertisseurs VSC en courant continu à haute tension (CCHT). Pour des raisons pratiques, le terme IGBT est utilisé tout au long de la présente norme pour faire référence au principal dispositif de commutation à semi-conducteur commandable. Cependant, la norme s'applique également aux autres types de dispositifs de commutation à semi-conducteur commandables.~~

3.2.1

dispositif à semi-conducteur blocable

dispositif à semi-conducteur commandable qui peut être réactivé et coupé par un signal de commande, par exemple, un transistor bipolaire à grille isolée (ou IGBT)

NOTE Il existe plusieurs types de dispositifs à semi-conducteur blocables qui peuvent être utilisés dans les convertisseurs VSC en courant continu à haute tension (CCHT). Pour des raisons pratiques, le terme IGBT est utilisé tout au long de la présente norme pour faire référence au principal dispositif à semi-conducteur blocable. Cependant, la norme s'applique également aux autres types de dispositif à semi-conducteur blocable.

~~3.2.13.2.2~~

transistor bipolaire à grille isolée

IGBT (*insulated gate bipolar transistor* en anglais)

~~commutateur commandable permettant de réactiver ou de couper un courant de charge~~

~~Un IGBT possède~~ dispositif à semi-conducteur blocable à trois bornes: une borne de grille (G) et deux bornes de charge: émetteur (E) et collecteur (C).

NOTE En appliquant la grille appropriée aux tensions de l'émetteur, le courant de charge peut être commandé, c'est-à-dire être coupé ou réactivé.

~~3.2.23.2.3~~

diode de roue libre

DRL

dispositif à semi-conducteur de puissance ayant les caractéristiques d'une diode

NOTE 1 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 Les DRL sont caractérisées par leur capacité à faire face à des chutes brutales de courant dues au comportement de commutation de l'IGBT.

~~3.2.33.2.4~~

paire diode-IGBT

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 de fonctionnement d'une paire IGBT-diode~~

~~3.3.1.1~~

~~état de blocage~~

~~situation dans laquelle une paire IGBT-diode est hors tension~~

~~Dans cet état, le courant de charge ne circule pas à travers l'IGBT. Cependant, un courant de charge peut circuler à travers la diode dans la mesure où la diode n'est pas commandable.~~

~~3.3.1.2~~

~~état débloqué~~

~~condition lorsque le courant de charge circule soit à travers l'IGBT soit à travers la diode d'une paire IGBT-diode, selon la direction du courant de charge~~

~~3.3.2 État de fonctionnement d'un convertisseur~~

~~3.3.2.13.3.1~~

état de blocage

situation du convertisseur dans laquelle un signal de mise hors tension est appliqué **de manière continue** à tous les IGBT du convertisseur

NOTE Généralement, le convertisseur est à l'état de blocage après la mise sous tension.

~~3.3.2.23.3.2~~

état débloqué

situation du convertisseur dans laquelle des signaux de mise sous tension **et de mise hors tension** sont appliqués **de manière répétitive** à tous les IGBT du convertisseur

~~3.3.2.33.3.3~~

blocage de protection de la valve

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

3.3.4

niveau de palier de tension

palier de tension provoqué par la commutation d'une valve ou d'une partie d'une valve lors de l'état débloqué du convertisseur

NOTE Pour les valves du 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 du type commutateur, le niveau de palier de tension correspond à la variation de tension due à la commutation de la valve entière.

3.4 Termes relatifs à la construction du VSC

3.4.1

unité de phase du VSC

équipement utilisé pour connecter les deux barres omnibus c.c. à une borne c.a.

3.4.2

valve à VSC du type «commutateur»

~~ensemble complet d'un dispositif commandable, représentant une unité fonctionnelle en tant que partie d'une unité de phase du VSC, caractérisée par des actions de commutation des dispositifs électroniques de puissance en fonction des signaux de commande électroniques du convertisseur~~ disposition de paires diode-IGBT connectées en série et configurées de manière à être commutées simultanément en une unité fonctionnelle simple

~~NOTE Selon la topologie du convertisseur, une valve peut avoir pour fonction de jouer le rôle soit d'un commutateur commandable soit d'une source de tension commandable.~~

3.4.3

valve à VSC du type à source de tension commandable

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

~~3.4.33.4.4~~

valve à diode

valve à semi-conducteur comprenant uniquement des diodes comme principaux dispositifs à semi-conducteur, 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

~~3.4.43.4.6~~

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 intégral, ainsi que leurs auxiliaires immédiats et condensateur 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 où chaque position de commutateur se compose de deux paires diode-IGBT ou plus connectées en série

NOTE Voir Figure A.13.

~~3.4.53.4.9~~

niveau de valve à VSC

~~partie d'une valve à VSC comprenant un commutateur commandable et une diode associée, ou bien des commutateurs et des diodes commandables connectés en parallèle, ou encore des commutateurs et des diodes commandables connectés en demi pont, ainsi que leurs auxiliaires immédiats, condensateur de stockage, le cas échéant~~ plus petite unité fonctionnelle indivisible d'une valve à VSC

NOTE 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 diode-IGBT, y compris ses auxiliaires (voir Figure A.13). Pour un type MMC sans paires diode-IGBT connectées en série, un niveau de valve correspond à un sous-module associé à ses auxiliaires (voir Figure A.12).

~~3.4.63.4.10~~

niveau de valve à diode

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

3.4.73.4.11

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 supporter un court-circuit externe ou interne ~~au cours de l'utilisation~~ sans que le fonctionnement sécurisé de la valve n'en soit altéré, comme il est démontré par les essais de type, et qui, en cas de dépassement, entraîne l'arrêt de la valve pour permettre le remplacement des niveaux défectueux ou l'acceptation d'un risque accru de dysfonctionnements

NOTE 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 dénombrés 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 bien des commutateurs et des diodes commandables connectés en parallèle, ou encore des commutateurs et des diodes commandables connectés en demi-pont, ainsi que leurs auxiliaires immédiats et condensateur de stockage, le cas échéant

3.5 Termes relatifs à la structure de la valve

3.5.1

structure de la valve

~~structure physique maintenant les niveaux d'une valve et qui est isolée à la tension appropriée supérieure au potentiel de terre~~ composants de structure d'une valve, exigés afin de soutenir physiquement les modules de valves

3.5.2

soutien de valve

partie de la valve qui soutient mécaniquement et isole électriquement de la terre la partie active de la valve

~~NOTE Une partie de valve clairement identifiable sous une forme discrète comme étant un soutien de valve n'est pas nécessairement présente sur tous les modèles de valves.~~

3.5.3

unité de valve multiple

MVU (*multiple valve unit* en anglais)

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

NOTE Toutes les topologies et la disposition physique des convertisseurs ne disposent pas nécessairement d'une MVU.

3.5.4

section de valve

assemblage électrique défini à des fins d'essais, comportant un certain nombre de niveaux de valve ~~à VSC ou à diode~~ et d'autres composants, qui présente les propriétés électriques **pré**assignées d'une valve complète

~~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.~~

NOTE 1 Pour les valves du type à source de tension commandable, la section de valve doit inclure un condensateur à courant continu de cellule ou de sous-module outre les niveaux de valve à VSC.

NOTE 2 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.

3.5.5

électronique de base de la valve

unité électronique, au potentiel de terre, qui ~~constitue l'interface~~ assure la conversion ~~électrique-optique~~ entre le système de commande du convertisseur et les valves à VSC

4 Exigences générales

4.1 Lignes directrices pour l'exécution des essais de type

4.1.1 Autres éléments pouvant faire office de preuve

Chaque conception de valve doit être soumise aux essais de type spécifiés dans la présente norme. S'il est démontré que la valve est identique à l'une des valves essayées précédemment, le fournisseur peut, au lieu de réaliser un essai de type, soumettre le rapport d'essai d'un essai de type précédent à l'examen du client. Il convient que ce rapport soit accompagné d'un deuxième rapport détaillant les différences de conception et démontrant que l'essai de type de référence satisfait aux objectifs d'essai pour la conception proposée.

4.1.2 Objet d'essai

Le présent paragraphe ne s'applique pas aux essais sur la structure de support de la valve ni sur l'unité de valve multiple. L'objet d'essai pour ces essais est défini en 7.2 et en 8.2.

- a) Les essais de type peuvent être réalisés soit sur une valve complète soit, dans certaines circonstances, sur des sections de valve, comme indiqué au Tableau 3.
- b) Le nombre minimal de niveaux de valve à essayer, en fonction des niveaux de valve dans une valve unique, est comme indiqué au Tableau 1.

**Tableau 1 – Nombre minimal de niveaux de valve à essayer
en fonction du nombre de niveaux de valve par valve**

Nombre de niveaux de valve par valve	Nombre total de niveaux de valve à soumettre à essai
1 – 50	Nombre de niveaux de valve dans une valve
51 – 250	50
≥ 251	20 %

- c) Il est généralement recommandé d'utiliser les mêmes sections de valves pour tous les essais de type. Cependant, avec l'accord du fournisseur et de l'acheteur, 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, il convient de démontrer que la valve, les sections et/ou les composants de valves ont résisté aux essais de production pour garantir une fabrication appropriée.

~~4.1.3 Séquence d'essai~~

~~Afin de confirmer que l'isolement borne à borne de la valve n'a pas été endommagé par les contraintes de commutation répétitives rapides subies par le convertisseur en fonctionnement, il est recommandé que l'essai de tension c.a. – c.c. de la valve entre les bornes avec mesurage de la décharge partielle soit effectué après les essais de fonctionnement. Les autres essais de type spécifiés peuvent être réalisés dans n'importe quel ordre.~~

~~NOTE Pour les valves à VSC du type « à source de tension commandable » (Article A.5), la séquence d'essai, où l'essai de tension c.a. – c.c. est effectué avant l'essai de fonctionnement, peut être acceptée par accord mutuel entre le client et le fournisseur.~~

4.1.44.1.3 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 mesurages des décharges partielles doivent être réalisés conformément à l'IEC 60270.**

4.1.54.1.4 Température ambiante pour les essais

Les essais doivent être effectués ~~conformément à l'IEC 60060, le cas échéant~~ à la température ambiante prédominant dans l'installation d'essai, sauf spécification contraire.

4.1.64.1.5 Fréquence des essais

Les essais diélectriques c.a. peuvent être effectués soit à 50 Hz soit à 60 Hz. Pour les essais de fonctionnement, des exigences spécifiques relatives à la fréquence des essais sont indiquées aux articles correspondants.

NOTE Les lignes directrices concernant les conditions d'utilisation les plus défavorables peuvent être obtenues dans la brochure technique n° 447 du CIGRÉ.

4.1.74.1.6 Rapports d'essai

À la fin des essais de type, le fournisseur doit produire des rapports d'essais de type conformément à l'Article 14.

4.1.7 Conditions à prendre en considération pour la détermination des paramètres des essais de type

Il convient de déterminer les paramètres des essais de type sur la base des conditions de fonctionnement et de panne les plus défavorables auxquelles la valve peut être soumise, selon les études du système. Les lignes directrices concernant les conditions peuvent être obtenues dans la brochure technique 447 du CIGRÉ.

4.2 Facteur de correction atmosphérique

Quand elle est spécifiée dans l'article concerné, la correction atmosphérique doit être appliquée aux tensions d'essai conformément à l'IEC 60060-1. Les conditions de référence dans lesquelles la correction doit être effectuée sont les suivantes:

- pression:
 - Si la coordination de l'isolement de la partie essayée de la valve est établie sur les tensions de tenue assignées normalisées conformément à l'IEC 60071-1, les facteurs de correction s'appliquent uniquement aux altitudes supérieures à 1 000 m. C'est pourquoi si l'altitude du site a_s à laquelle l'équipement sera installé est $\leq 1\,000$ m, la pression d'air atmosphérique normalisée ($b_0=101,3$ kPa) doit alors être utilisée sans correction relative à l'altitude. Si $a_s > 1\,000$ m, la procédure normalisée conformément 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_{1000m}).
 - Si la coordination de l'isolement de la partie essayée de la valve n'est pas établie sur les tensions de tenue assignées normalisées conformément à l'IEC 60071-1, la procédure normalisée conformément 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 théorique dans une armoire de redresseur de valve (°C);
- humidité: humidité absolue minimale théorique d'une armoire de redresseur de valve (g/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 subir de court-circuit. Les tensions d'essai utilisées doivent être réglées à l'aide d'un facteur d'échelle k_n :

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

où

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

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

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

4.3.2 Essais diélectriques

Pour tous les essais diélectriques entre les bornes de la valve, les niveaux de valve redondants doivent subir un court-circuit. La localisation des niveaux de valve devant subir un court-circuit doit faire l'objet d'un accord entre le client et le fournisseur.

NOTE En fonction de la conception, des limites peuvent être imposées à la distribution de niveaux de valves court-circuitées. Par exemple, il peut exister une limite supérieure au nombre de niveaux de valves court-circuitées dans une section de valve.

Pour tous les essais diélectriques sur section de valve, les tensions d'essai utilisées doivent être réglées à l'aide d'un facteur d'échelle k_o :

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

où

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

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

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

4.4 Critères pour des essais de type réussis

4.4.1 Généralités

Concernant les applications de semi-conducteur, l'expérience montre que, même avec la conception de valves la plus soignée, il n'est pas possible d'éviter des dysfonctionnements aléatoires ponctuels de composants de niveau de valve lors du fonctionnement de service. Même si ces dysfonctionnements peuvent être liés à la contrainte, ils sont considérés comme aléatoires dans la mesure où leur cause ou la relation entre le taux de dysfonctionnement et la contrainte ne peut être ni prévue ni régulée pour correspondre à une définition quantitative précise. Les valves ou sections de valves sont soumises à des essais de type, pendant une période de temps courte, aux contraintes multiples qui correspondent généralement aux pires contraintes pouvant être expérimentées par l'équipement tout au plus un petit nombre de fois au cours de la durée de vie de la valve. En tenant compte des éléments précédents, les critères nécessaires à des essais de type réussis définis ci-dessous permettent donc à un

petit nombre de niveaux de valve de présenter un dysfonctionnement au cours des essais de type, à condition que les dysfonctionnements soient rares et ne révèlent pas de défaut de conception.

4.4.2 Critères applicables aux niveaux de valve

Les critères applicables aux niveaux de valve sont les suivants.

- a) Si, à la suite d'un essai de type tel qu'indiqué à l'Article 5, plus d'un niveau de valve (ou bien, plus de 1 % des niveaux de valve essayés, si supérieur) a subi un court-circuit **ou est à circuit ouvert**, la valve doit être jugée comme ayant échoué aux essais de type.
- b) Si, à la suite d'un essai de type, un niveau de valve (ou plus s'il se situe toujours dans la limite de 1 %) a subi un court-circuit **ou est à circuit ouvert**, le ou les niveaux défaillants doivent être rétablis et cet essai de type, répété.
- c) Si la somme des niveaux de valve court-circuités **ou à circuit ouvert** au cours de tous les essais de type est supérieure à 3 % des niveaux de valve essayés, la valve doit être jugée comme ayant échoué aux essais de type.
- d) La valve ou les sections de valve doivent être vérifiées après chaque essai de type pour déterminer si un ou plusieurs niveaux de valve ont subi un court-circuit **ou sont à circuit ouvert**. Une paire IGBT/diode ou des composants auxiliaires défaillants, identifiés pendant ou à la fin d'un essai de type peuvent être remplacés avant un essai ultérieur.
- e) A la fin du programme d'essai, la valve ou les sections de valve doivent subir une série d'essais de vérification, qui doivent comprendre au moins:
 - une vérification de la tension de tenue des niveaux de valve;
 - une vérification des circuits de déclenchement;
 - une vérification des circuits de surveillance;
 - une vérification de tous les circuits de protection faisant partie intégrante de la valve;
 - une vérification des circuits d'évaluation de la tension.
- f) Les courts-circuits de niveaux de valve se produisant au cours des essais de vérification doivent être comptés en tant qu'éléments des critères d'acceptation définis ci-dessus. En plus des niveaux court-circuités **ou à circuit ouvert**, le nombre total de niveaux de valve présentant des pannes ne produisant pas de court-circuit de niveau de valve, découverts au cours du programme d'essai de type et de l'essai de vérification qui le suit, ne doit pas dépasser 3 % du nombre de niveaux de valve essayés lors des essais de types diélectriques et de fonctionnement, la valeur la plus faible étant retenue. Si le nombre **total** de ces niveaux dépasse 3 %, la nature et la cause des pannes doivent être revues et une action supplémentaire, le cas échéant, doit faire l'objet d'un accord entre le client et le fournisseur.
- g) Lors de l'application des critères de pourcentage pour déterminer le nombre maximal autorisé de niveaux de valve court-circuités **ou à circuit ouvert** et le nombre maximal autorisé de niveaux présentant des pannes qui n'ont pas produit de court-circuit d'un niveau de valve, il est dans la pratique courante d'arrondir toutes les fractions au nombre entier supérieur, comme illustré au Tableau 2.

Tableau 2 – Pannes de niveau de valve autorisées au cours des essais de type

Nombre de niveaux de valve soumis à essai	Nombre de niveaux de valve autorisés à subir un court-circuit ou à être à circuit ouvert lors de l'un des essais de type	Nombre total de niveaux de valve autorisés à subir un court-circuit ou à être à circuit ouvert lors de tous les essais de type	Nombre supplémentaire de niveaux de valve, dans tous les essais de type, qui ont expérimenté une panne mais n'ont pas subi de court-circuit ou n'ont pas été à circuit ouvert
Jusqu'à 33	1	1	1
de 34 à 67	1	2	2
de 68 à 100	1	3	3
etc.			

La distribution de niveaux court-circuités **ou à circuit ouvert** et d'autres pannes de niveau de valve à la fin de tous les essais de type doit être essentiellement aléatoire et ne doit pas révéler de défaut de conception.

4.4.3 Critères applicables à l'ensemble de la valve

Les ruptures ou contournements externes autour de l'équipement électrique commun associé à plus d'un niveau de valve de la valve, ou les décharges disruptives dans le matériau diélectrique faisant partie de la structure de la valve, des conduits de refroidissement, des guides de lumière ou d'autres parties isolantes du système de transport et de distribution d'impulsions ne doivent pas être autorisés.

Les températures de surface du composant et du conducteur, prises avec les connexions et les joints parcourus par un courant associés, et la température des surfaces de montage adjacentes doivent en permanence rester dans les limites autorisées par la conception.

5 Liste des essais de type

Le Tableau 3 dresse la liste des essais de type indiqués dans les Articles 6 à 12.

Tableau 3 – Liste des essais de type

Essai de type	Article ou paragraphe	Objet d'essai
Essai de contrainte en fonctionnement continu maximal	6.4	Valve ou section de valve
Essai de contrainte en fonctionnement en surcharge temporaire maximale	6.5	Valve ou section de valve
Essai de tension c.c. minimale	6.6	Valve ou section de valve
Essai de tension c.c. du support de valve	7.3.1	Support de valve
Essai de tension c.a. du support de valve	7.3.2	Support de valve
Essai d'impulsion de commutation du support de valve	7.3.3	Support de valve
Essai d'impulsion de foudre du support de valve	7.3.4	Support de valve
Essai de tension c.c. de la MVU à la terre	8.3.1	MVU
Essai de tension c.a. de la MVU	8.3.2	MVU
Essai d'impulsion de commutation de la MVU	8.3.3	MVU
Essai d'impulsion de foudre de la MVU	8.3.4	MVU
Essai de tension c.c. – c.a. de la valve	9.3.1	Valve (ou section de valve selon accord entre le fournisseur et le client)
Essai d'impulsion de commutation de la valve	9.3.3	
Essai d'impulsion de foudre de la valve	9.3.4	
Essai de mise hors tension 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 selon accord entre le fournisseur et le client)

6 Essais de fonctionnement

6.1 Objectif des essais

Les principaux objectifs des essais de fonctionnement consistent:

- à vérifier la compatibilité du niveau de la paire VSC/diode et des circuits électriques associés dans une valve en termes de courant, de tension et de contraintes de température à l'état conducteur, à la mise sous tension et à la mise hors tension dans les pires conditions de contraintes répétées;
- à démontrer que l'électronique de la valve et les circuits de puissance des valves à VSC interagissent correctement.

6.2 Objet d'essai

Les essais peuvent être réalisés soit sur l'ensemble de la valve soit sur des sections de valve. Ce choix dépend principalement du type de valve et des installations d'essai disponibles. Les essais spécifiés dans le présent article conviennent aux sections de valve comportant au moins cinq niveaux de paires ~~VSC/diode~~ de valves connectées en série. En cas de proposition d'essais pour un nombre de niveaux inférieur à cinq, des facteurs de sécurité d'essai supplémentaires doivent faire l'objet d'un accord. En aucun cas le nombre de niveaux connectés en série pour les essais ne doit être inférieur à trois.

La valve et les sections de valve soumises à essai doivent être assemblées avec tous les composants auxiliaires. Si nécessaire, une protection de valve échelonnée proportionnellement doit être intégrée. Cette protection doit être échelonnée en fonction du nombre de niveaux connectés en série soumis à essai afin de garantir un niveau de protection correspondant au moins aux caractéristiques maximales de la protection de service.

Le liquide de refroidissement doit être dans un état représentatif des conditions d'utilisation. Son débit et sa température doivent notamment être réglés de manière à correspondre aux valeurs les moins favorables adaptées à l'essai concerné, de sorte que la ou les températures de composant appropriées soient égales aux valeurs applicables lors de l'utilisation.

6.3 Circuit d'essai

Pour les conceptions dans lesquelles la valve agit comme une source de tension commandable et dispose d'une capacité c.c. intégrée, la capacité c.c. et ses connexions aux dispositifs de semi-conducteur font partie intégrante de l'objet d'essai.

Cependant, pour les modèles dans lesquels la valve fonctionne à la manière d'un commutateur et où le condensateur c.c. n'est pas intégré à la valve, il est nécessaire que le condensateur c.c. soit correctement représenté dans le circuit d'essai. En particulier, l'inductance de fuite de série des connexions entre le condensateur c.c. et la valve, et la capacité parasite autour de la section de valve doivent être correctement reproduites et échelonnées en fonction de la taille de la section de valve soumise à essai. Il convient que les interconnexions de circuit d'essai soient représentatives du type utilisé dans le convertisseur, afin de ne pas introduire de niveaux d'amortissement irréalistes causés par les effets pelliculaires.

6.4 Essai de contrainte en fonctionnement continu maximal

Il est nécessaire que l'essai reproduise les paramètres suivants en fonction des pires conditions de fonctionnement en utilisation du convertisseur. Il peut s'avérer nécessaire de procéder à plusieurs essais pour reproduire l'ensemble des paramètres à leurs valeurs maximales.

Pour les valves à VSC:

- températures continues maximales à la jonction de l'IGBT;
- températures continues maximales à la jonction de la DRL;
- températures continues maximales du parasurtenseur;
- tension et courant de mise sous tension et de mise hors tension continus maximaux.

Pour les valves à diode:

- température continue maximale à la jonction de la diode;
- températures continues maximales du parasurtenseur;
- tension et courant de mise hors tension de diode continus maximaux.

Il est nécessaire que tous ces paramètres soient reproduits lors de l'essai de contrainte en fonctionnement continu maximale. Ils peuvent être reproduits soit dans des essais individuels soit dans un essai combiné.

La tension d'essai doit être établie sur la tension directe continue maximale, la fréquence de commutation d'essai doit être établie sur la fréquence de commutation continue maximale et le modèle de modulation doit être représentatif de celui employé au cours de l'utilisation. ~~La température du liquide de refroidissement ne doit pas être inférieure à celle nécessaire pour fournir les températures en régime permanent à la jonction de l'IGBT et/ou à la jonction de la diode les plus élevées au cours de l'utilisation.~~

Le courant d'essai, en valeur efficace, doit intégrer un facteur de sécurité d'essai de 1,05.

La tension d'essai U_{tpv1} correspondant à la tension c.c. de fonctionnement continu maximale doit être déterminée comme suit:

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

où

U_{dmax} est la tension c.c. de fonctionnement continue maximale, y compris l'ondulation;

k_n est un facteur d'échelle d'essai conformément à 4.3.1;

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 que la température du liquide de refroidissement de sortie soit stabilisée.

6.5 Essai de contrainte en fonctionnement en surcharge temporaire maximale

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

Les conditions d'essai, si nécessaire, doivent être déterminées à l'aide de la même méthodologie qu'en 6.4 ci-dessus.

Préalablement à 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 de contrainte en fonctionnement temporaire 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.

Après l'essai de contrainte en fonctionnement en surcharge temporaire, un essai de contrainte en fonctionnement continu maximal de 10 min doit être effectué.

6.6 Essai de tension c.c. minimale

Cet essai sert à vérifier le fonctionnement correct de ces conceptions de valve dans lesquelles l'énergie pour les circuits électroniques de valve est extraite de la tension apparaissant entre les bornes de la valve.

L'essai consiste à appliquer une tension c.c. entre les bornes de la valve ou de la section de valve. Pour cet essai, seule la tension compte, le courant lui ne compte pas.

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 des données de l'électronique de la valve.

La tension d'essai U_{min} se définit comme suit:

$$U_{min} = \frac{N_{tut}}{N_t} \cdot U_W \cdot k_2$$

où

U_W est la tension c.c. la plus basse pour une valve en fonctionnement où la fonction appropriée de l'électronique de la valve est nécessaire;

N_{tut} est le nombre de niveaux de valve connectés en série soumis à essai;

N_t est le nombre total de niveaux de valve connectés en série dans une valve unique, y compris la redondance;

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 consistent:

- à vérifier la capacité de tenue en tension de l'isolement du support de valve, des conduits de refroidissement, des guides de lumière et d'autres composants isolants associés au support de valve. En cas d'isolement à la terre autre que le support de valve, des essais supplémentaires peuvent s'avérer nécessaires;
- à vérifier que les tensions de début et de fin de la décharge partielle sont supérieures à la tension de fonctionnement maximale apparaissant sur le support de valve.

NOTE En fonction de l'application, il peut s'avérer possible d'éliminer certains des essais réalisés sur le support de valve, qui font l'objet d'un accord entre le client et le fournisseur.

7.2 Objet d'essai

Le support de valve à utiliser pour les essais peut être un objet séparé représentatif incluant une représentation des parties adjacentes à la valve, ou faire partie de l'assemblage utilisé pour les essais de valve unique ou d'unité de valve multiple. Il doit être assemblé avec tous les composants auxiliaires en place et disposer de surfaces de potentiel de terre adjacentes représentées de manière appropriée. Le liquide de refroidissement doit se trouver dans un état représentatif de l'état d'utilisation le plus coûteux pour l'objectif de l'essai.

Si une valve unique est composée de plusieurs structures de sorte qu'il existe plusieurs structures de support de valve par valve, il doit être démontré que les essais proposés couvrent les pires contraintes subies par les structures de support de valve.

7.3 Exigences relatives aux essais

Tous les niveaux d'essais ci-dessous font l'objet d'une correction atmosphérique telle que décrite en 4.2.

7.3.1 Essai de tension c.c. du support de valve

Les deux principales bornes de la valve doivent être connectées entre elles et ensuite la tension c.c. doit être appliquée entre les deux bornes connectées entre elles et la terre. En partant d'une tension inférieure à 50 % de la tension d'essai maximale, la tension doit être augmentée jusqu'à atteindre la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 1 min ~~en~~ **approximativement 10 s le plus rapidement possible**, rester constante pendant 1 min, être ensuite réduite jusqu'à atteindre la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 3 h, rester constante pendant 3 h et enfin être réduite à zéro. Pendant la dernière heure de l'essai de 3 h spécifié, le nombre de décharges partielles dépassant 300 pC doit être consigné comme indiqué dans l'Annexe B de l'IEC 60700-1.

Le nombre d'impulsions dépassant 300 pC ne doit pas être supérieur à 15 par minute, en moyenne pendant toute la durée de l'enregistrement. Parmi ces impulsions, le nombre d'impulsions dépassant 500 pC doit se limiter à sept par minute, le nombre d'impulsions dépassant 1 000 pC doit se limiter à trois par minute et le nombre d'impulsions dépassant 2 000 pC doit se limiter à une par minute.

NOTE 1 Il convient, dans toute la mesure du possible, d'augmenter la tension d'essai de 50 % au niveau de tension maximale en approximativement 10 s. Une durée plus longue peut être utilisée; toutefois, ceci peut soumettre l'objet d'essai à une contrainte excessive.

NOTE 2 Si une tendance croissante est observée dans l'amplitude ou le taux de décharge partielle, la durée de l'essai peut être augmentée par accord mutuel entre le client et le fournisseur.

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

Préalablement à l'essai ~~et avant de recommencer l'essai avec la tension de polarité opposée,~~ le support de valve ~~doit~~ peut être court-circuité et mis à la terre pendant ~~au moins 2 h~~ plusieurs heures. Cette procédure peut être répétée à la fin de l'essai de tension continue.

La tension d'essai ~~c.e. continue~~ du support de valve U_{tds} doit être déterminée conformément aux éléments suivants:

essai pendant 1 min.

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

essai pendant 3 h

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

où

U_{dmS1} est la valeur moyenne maximale de la tension pendant 1 s apparaissant à travers le support de valve, déterminée par l'étude de coordination de l'isolement;

U_{dmS2} est la valeur maximale ~~du composant c.e. de la composante continue~~ de la tension de fonctionnement en régime permanent apparaissant à travers le support de valve;

k_3 est un facteur de sécurité d'essai;

~~$k_3 = 1,6$ pour l'essai de maintien de la tension pendant 1 min;~~

$k_3 = 1,1$ ~~pour l'essai de maintien de la tension pendant 3 h;~~

k_t est le facteur de correction atmosphérique selon 4.2;

~~k_t est la valeur conformément à 4.2 pour l'essai de maintien de la tension pendant 1 min;~~

~~$k_t = 1,0$ pour l'essai de maintien de la tension pendant 3 h.~~

7.3.2 Essai de tension c.a. du support de valve

Pour effectuer l'essai, les deux principales bornes de la valve doivent être connectées entre elles et ensuite, la tension d'essai ~~c.a. alternative~~ doit être appliquée entre les deux principales bornes connectées entre elles et la terre.

En partant d'une tension inférieure à 50 % de la tension d'essai maximale, la tension doit être augmentée jusqu'à atteindre la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 1 min ~~U_{tas1} en approximativement 10 s~~, rester constante pendant 1 min, être réduite jusqu'à atteindre la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 30 min ~~U_{tas2}~~ , rester constante pendant 30 min et enfin être ramenée à zéro.

~~Au cours de la dernière minute de l'essai spécifié de maintien de la tension pendant~~ 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, le modèle peut être accepté 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 c.a. du support de valve U_{tas} doit être déterminée conformément aux éléments suivants:

$$U_{tas} = \frac{U_{mS}}{\sqrt{2}} \cdot k_r \cdot k_4 \cdot k_t$$

où

U_{mS} est la valeur de crête de la tension de fonctionnement répétée maximale dans le support de valve au cours d'un fonctionnement en régime permanent, y compris le dépassement de commutation;

~~U_{tas1} est la tension d'essai à maintenir pendant 1 min;~~

~~U_{tas2} est la tension d'essai à maintenir pendant 30 min;~~

k_4 est un facteur de sécurité d'essai;

k_4 = 1,3 pour l'essai de maintien de la tension pendant 1 min;

k_4 = 1,15 pour l'essai de maintien de la tension pendant 30 min;

k_t est le facteur de correction atmosphérique;

k_t est la valeur conformément à 4.2 pour l'essai de maintien de la tension pendant 1 min;

k_t = 1,0 pour l'essai de maintien de la tension pendant 30 min;

k_r est le facteur de surtension temporaire;

k_r est la valeur déterminée à partir des études du système pour l'essai de maintien de la tension pendant 1 min;

k_r = 1,0 pour l'essai de maintien de la tension pendant 30 min.

7.3.3 Essai d'impulsion de commutation de support de valve

Cet essai doit comprendre trois applications de tensions d'impulsion de commutation de polarité positive et trois applications de tensions d'impulsion de commutation de polarité négative entre les bornes principales de la valve (connectées entre elles) et la terre.

Une forme d'onde de tension d'impulsion de commutation normalisée conforme à l'IEC 60060 doit être utilisée.

La tension d'essai doit être choisie conformément à la coordination de l'isolement de la sous-station VSC.

7.3.4 Essai d'impulsion de foudre du support de valve

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

Une forme d'onde de tension d'impulsion 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 de la sous-station VSC.

8 Essais diélectriques sur une unité de valves multiples

Le présent article s'applique uniquement si au moins deux valves sont installées dans une structure de valve commune (unité de valve multiple). Dans le cas où chaque valve est montée individuellement dans sa propre structure de valve, le présent article ne s'applique pas.

8.1 Objectif des essais

Les principaux objectifs de ces essais consistent:

- a) à vérifier la capacité de tenue en tension de l'isolement externe de la MVU, par rapport à son environnement, notamment dans le cas de valve(s) connectée(s) au potentiel de pôle;
- b) à vérifier la capacité de tenue en tension entre chaque valve dans une structure de MVU;
- c) à vérifier que les niveaux de décharge partielle se situent dans les limites spécifiées.

8.2 Objet d'essai

De nombreuses dispositions de valves et d'unités de valve multiple sont possibles. Le ou les objets d'essai doivent être choisis pour refléter, le plus précisément possible, la configuration d'utilisation des valves dans la mesure où elle 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.

Il peut s'avérer nécessaire de court-circuiter certaines valves individuellement en fonction de la configuration de la MVU et des objectifs de l'essai.

Quand la borne à basse tension de la MVU n'est pas connectée au potentiel de terre, la borne à basse tension de la MVU doit être arrêtée au cours des essais afin de simuler avec exactitude la tension apparaissant 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.

8.3 Exigences relatives aux essais

8.3.1 Essai de tension c.c. de la MVU à la terre

La tension d'essai c.c. doit être appliquée entre la borne c.c. de potentiel le plus élevé de la MVU et la terre.

En partant d'une tension inférieure à 50 % de la tension d'essai maximale, la tension doit être augmentée jusqu'à atteindre la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 1 min ~~en~~ **approximativement 10 s le plus rapidement possible**, rester constante pendant 1 min, être ensuite réduite jusqu'à atteindre la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 3 h, rester constante pendant 3 h et enfin être ramenée à zéro.

NOTE 1 Il convient, dans toute la mesure du possible, d'augmenter la tension d'essai de 50 % au niveau de tension maximale en approximativement 10 s. Une durée plus longue peut être utilisée; toutefois, ceci peut soumettre l'objet d'essai à une contrainte excessive.

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

Le nombre d'impulsions dépassant 300 pC ne doit pas être supérieur à 15 par minute, en moyenne pendant toute la durée de l'enregistrement. Parmi ces impulsions, le nombre d'impulsions dépassant 500 pC doit se limiter à sept par minute, le nombre d'impulsions dépassant 1 000 pC doit se limiter à trois par minute et le nombre d'impulsions dépassant 2 000 pC doit se limiter à une par minute.

NOTE 2 Si une tendance croissante est observée dans l'amplitude ou le taux de décharge partielle, la durée de l'essai peut être augmentée par accord mutuel entre le client et le fournisseur.

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

Préalablement à l'essai **et avant de recommencer l'essai avec une tension de polarité opposée**, les bornes de la MVU ~~doivent~~ **peuvent** être court-circuitées ensemble et mises à la terre pendant ~~au moins 2 h~~ **plusieurs heures**. Cette procédure peut être répétée à la fin de l'essai de tension continue.

La tension d'essai ~~c.c.~~ continue de la MVU U_{tdm} doit être déterminée conformément aux éléments suivants:

essai pendant 1 min.

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

essai pendant 3 h

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

où

U_{dmm1} est la valeur moyenne maximale de la tension pendant 1 s apparaissant entre la borne à haute tension de la MVU et la terre;

U_{dmm2} est la valeur maximale ~~du composant c.c.~~ de la composante continue de la tension de fonctionnement en régime permanent apparaissant entre la borne à haute tension de la MVU et la terre;

k_5 est le facteur de sécurité d'essai;

~~$k_5 = 1,6$ pour l'essai de maintien de la tension pendant 1 min;~~

$k_5 = 1,1$ ~~pour l'essai de maintien de la tension pendant 3 h;~~

k_t est le facteur de correction atmosphérique selon 4.2;

~~k_t est la valeur conformément à 4.2 pour l'essai de maintien de la tension pendant 1 min;~~

~~$k_t = 1,0$ pour l'essai de maintien de la tension pendant 3 h.~~

8.3.2 Essai de tension c.a. de la MVU

Si une MVU subit des contraintes de tension composée c.a. ou c.a. et c.c. entre deux bornes, dont la capacité de tenue de n'a pas été démontrée de manière appropriée par d'autres essais, il sera nécessaire d'effectuer un essai de tension c.a. entre les bornes concernées de la MVU.

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

En partant d'une tension inférieure à 50 % de la tension d'essai à maintenir pendant 1 min, la tension doit être augmentée jusqu'à atteindre la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 1 min, rester constante pendant 1 min, être ensuite réduite jusqu'à atteindre la valeur à maintenir pendant 30 min, rester constante pendant 30 min et enfin être ramenée à zéro.

~~Au cours de l'essai spécifié de maintien de la tension pendant~~ 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, le modèle peut être accepté 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 c.a. de la MVU U_{tam} doit être déterminée conformément aux éléments suivants:

$$U_{tam} = \frac{U_{mm}}{\sqrt{2}} \cdot k_r \cdot k_6 \cdot k_t$$

où

U_{mm} est la valeur de crête de la tension de fonctionnement répétée maximale apparaissant entre les bornes de la MVU au cours d'un fonctionnement en régime permanent, y compris le dépassement de commutation;

k_6 est un facteur de sécurité d'essai;

k_6 = 1,3 pour l'essai de maintien de la tension pendant 1 min;

k_6 = 1,15 pour l'essai de maintien de la tension pendant 30 min;

k_r est le facteur de surtension temporaire;

k_r est la valeur déterminée à partir des études du système pour l'essai de maintien de la tension pendant 1 min;

k_r = 1,0 pour l'essai de maintien de la tension pendant 30 min;

k_t est le facteur de correction atmosphérique;

k_t est la valeur conformément à 4.2 pour l'essai de maintien de la tension pendant 1 min;

k_t = 1,0 pour l'essai de maintien de la tension pendant 30 min.

8.3.3 Essai d'impulsion de commutation de la MVU

Une forme d'onde de tension d'impulsion de commutation normalisée conforme à l'IEC 60060 doit être utilisée.

La tension d'essai d'impulsion de commutation de la MVU doit être appliquée entre la borne à haute tension de la MVU et la terre.

L'essai doit comprendre trois applications de tension d'impulsion de commutation de polarité positive et trois applications de tension d'impulsion de commutation de polarité négative d'une amplitude spécifiée.

La tension d'essai d'impulsion de commutation de la MVU U_{tsm} doit être déterminée conformément aux éléments suivants:

$$U_{tsm} = \pm SIPL_m \cdot k_7 \cdot k_t$$

où

$SIPL_m$ est le niveau de protection d'impulsion de commutation déterminé par la coordination de l'isolement en tenant compte du ou des parasurtenseurs connectés entre la borne à haute tension de la 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 conformément à 4.2.

Si l'essai indiqué ci-dessus n'évalue pas de manière appropriée la tenue des impulsions de commutation entre toutes les bornes de la MVU, on doit alors envisager de procéder à des essais supplémentaires pour vérifier l'isolement.

NOTE Un accord entre le client et le fournisseur peut rendre l'essai d'impulsion de commutation de la MVU inutile, à condition qu'il soit possible de démontrer d'une autre manière que:

- les distances d'isolement dans l'air extérieures aux autres valves et à la terre sont adaptées au niveau de tenue en tension d'impulsion de commutation requis; et
- la tenue des impulsions de commutation entre deux bornes de la MVU est correctement démontrée par d'autres essais.

8.3.4 Essai d'impulsion de foudre de la MVU

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

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

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

La tension d'essai d'impulsion de foudre de MVU U_{tIm} doit être déterminée conformément aux éléments suivants:

$$U_{tIm} = \pm LIPL_m \cdot k_8 \cdot k_t$$

où

$LIPL_m$ est le niveau de protection d'impulsion de foudre déterminé par la coordination de l'isolement en tenant compte du ou des parasurtenseurs connectés entre la borne à haute tension de la 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;

k_t est la valeur conformément à 4.2.

S'il n'est pas possible de démontrer que l'essai indiqué ci-dessus évalue de manière appropriée la tension de tenue d'impulsion de foudre entre toutes les bornes de la MVU, on doit alors envisager de procéder à des essais supplémentaires pour vérifier l'isolement.

NOTE Un accord entre le client et le fournisseur peut rendre l'essai d'impulsion de foudre de la MVU inutile, à condition qu'il soit possible de démontrer d'une autre manière que:

- les distances d'isolement dans l'air extérieures aux autres valves et à la terre sont adaptées au niveau de tenue en tension d'impulsion de foudre requis; et
- la tension de tenue d'impulsion de foudre entre deux bornes de la MVU est correctement démontrée par d'autres essais.

9 Essais diélectriques entre les bornes de la valve

9.1 Objectif de l'essai

L'objectif de ces essais consiste à vérifier la conception de la valve en ce qui concerne les caractéristiques relatives à la tension de différents types de surtensions (surtensions c.c., c.a., d'impulsion de commutation et d'impulsion de foudre). Il convient que les essais démontrent que:

- la valve résistera aux surtensions spécifiées;
- les décharges partielles se situeront dans les limites spécifiées des conditions d'essai spécifiées;
- les circuits internes d'évaluation de la tension ont une puissance nominale suffisante;
- les circuits électroniques de la valve se comportent comme prévu.

Il convient d'indiquer que les essais décrits dans le présent article sont établis sur des formes d'onde normalisées et des procédures d'essai normalisées telles que développées pour l'essai des systèmes et des composants c.a. à haute tension. Cette approche présente de nombreux avantages aux industries car elle permet d'appliquer la plus grande part 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 entraîner des formes d'onde différentes des formes d'onde normalisées et que, dans ce cas, l'essai peut être modifié afin de refléter de manière réaliste les conditions attendues.

9.2 Objet d'essai

Il convient que l'objet d'essai soit généralement une valve complète. Les essais portant sur des sections de valve individuelles sont acceptés à condition que le fournisseur puisse 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 utilisation. La valve ou section de valve d'essai doit être montée avec tous les composants auxiliaires à l'exception du parasurtenseur de valve **lorsqu'il existe**. La valve peut faire partie d'une unité de valve multiple.

Sauf spécification contraire, l'électronique de la valve doit être alimentée pour tous les essais d'impulsion.

Si une section de valve est utilisée comme objet d'essai, il convient que le nombre minimal de niveaux de valve dans la section d'essai soit convenu avec le client. Dans ce 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 le client et le fournisseur.

L'état du liquide de refroidissement doit être représentatif des conditions d'utilisation, à l'exception du débit, qui peut être réduit. Si un objet extérieur à la structure est nécessaire pour représenter de manière appropriée les contraintes subies au cours des essais, cet objet doit être intégré ou simulé dans l'essai. Des plans de masse, dont la séparation doit être déterminée en fonction de la proximité d'autres valves et surfaces de potentiel de terre adjacentes, doivent être utilisés.

L'objet d'essai utilisé pour les essais diélectriques de la valve ne permet normalement pas d'appliquer une correction atmosphérique aux tensions d'essai spécifiées sans soumettre à des contraintes excessives les composants internes. C'est la raison pour laquelle aucun facteur de correction atmosphérique n'est appliqué aux essais diélectriques entre les bornes de la valve. Le fournisseur doit démontrer que les effets des conditions atmosphériques sur la tenue interne de la valve ont été pris en compte de manière appropriée.

9.3 Exigences relatives aux essais

9.3.1 Essai de tension c.a. – c.c. de la valve

Cet essai comprend un essai de courte durée et un essai de longue durée. L'essai de courte durée reproduit la tension ~~composée c.a.~~ **c.e. composite alternative – continue** provoquée par certaines pannes **au niveau** du convertisseur ou du système.

~~Le pire cas possible dépend du modèle de valve. Les cas à prendre en considération comprennent, de manière non exhaustive:~~

- ~~• le court-circuit de la borne c.a. à la terre;~~
- ~~• le court-circuit de la borne c.a. entre les phases;~~
- ~~• le circuit ouvert de la borne c.a.;~~
- ~~• le rejet de charge du système c.a.;~~
- ~~• le court-circuit ou le raté d'allumage d'une autre valve dans la même unité de phase;~~
- ~~• la panne de mise à la terre du pôle c.c.~~

Dans cet essai, un condensateur peut être utilisé conjointement à une source de tension d'essai ~~c.a.~~ **c.e. composite alternative – continue** pour produire une forme d'onde de tension ~~composée c.a.~~ **c.e. composite alternative – continue**. En fonction de 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 ~~c.c. séparée~~ continue distincte, à la place du condensateur.

En partant d'une tension inférieure à 50 % de la tension d'essai maximale, la tension doit être accélérée ~~en approximativement 10 s~~ le plus rapidement possible pour atteindre le niveau d'essai spécifié de maintien de la tension pendant 10 s, être ensuite réduite pour atteindre la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant ~~30 min~~ 3h, et rester constante pendant ~~30 min~~ 3h, puis enfin être ramenée à zéro.

Pour un mesurage de la décharge partielle en courant alternatif, la valeur de crête de la décharge partielle périodique enregistrée au cours de la dernière minute de l'essai de maintien de la tension pendant ~~30 min~~ 3h doit être inférieure à 200 pC, à condition que les composants sensibles à la décharge partielle dans la valve aient fait l'objet d'essais séparés. **Pour un mesurage de la décharge partielle en courant continu**, la durée de l'enregistrement doit correspondre à la dernière heure de l'essai de 3 h. Le nombre d'impulsions dépassant 300 pC ne doit pas être supérieur à 15 par minute, en moyenne pendant toute la durée de l'enregistrement. Parmi ces impulsions, le nombre d'impulsions dépassant 500 pC doit se limiter à sept par minute, le nombre d'impulsions dépassant 1 000 pC doit se limiter à trois par minute et le nombre d'impulsions dépassant 2 000 pC doit se limiter à une par minute.

NOTE 1 Réaliser l'essai de tension alternative - continue de la valve présente des difficultés pratiques importantes avec les valves du type à "source de tension commandable", en raison du courant élevé appelé par la capacité intégrée lors du démarrage et du taux de décharge lente du condensateur à la fin de la première partie de l'essai. Pour cette raison, il peut se révéler nécessaire de modifier le mode opératoire d'essai des valves de ce type. Les autres méthodes d'essai à prendre en considération incluent le remplacement provisoire d'un condensateur d'essai spécial à capacité réduite, mais de mêmes dimensions physiques, ou le préchargement du condensateur à courant continu de la cellule ou du sous-module à partir d'une source distincte avant de commencer l'essai.

NOTE 2 Il convient, dans toute la mesure du possible, d'augmenter la tension d'essai de 50 % au niveau de tension maximale en approximativement 10 s. Une durée plus longue peut être utilisée; toutefois, ceci soumet l'objet d'essai à une contrainte excessive.

NOTE 13 Si une tendance croissante est observée dans le taux ou ~~la magnitude~~ l'amplitude de décharge partielle, la durée de l'essai peut être augmentée par accord mutuel entre le client et le fournisseur.

NOTE 24 Il peut s'avérer nécessaire de désactiver ~~les unités~~ l'électronique de grille ou d'autres circuits auxiliaires lors de cet essai, **ou de prévoir des moyens indépendants pour leur alimentation**, afin de prévenir toute interférence avec le mesurage de la décharge partielle, provenant par exemple des circuits d'alimentation de l'unité de grille.

NOTE 5 Dans le cas où la désactivation de l'électronique de grille ou d'autres circuits auxiliaires lors de cet essai n'est pas possible, et où il peut être démontré que les interférences sont provoquées par un circuit électronique, ces interférences peuvent alors être déduites du mesurage.

NOTE 6 Il convient que l'utilisation d'un condensateur au lieu d'une source en courant continu dans le circuit d'essai soit convenue par accord mutuel entre le fabricant et le client puisque la tension d'essai est plus élevée que la valeur réelle.

Les tensions d'essai de valve ont une forme d'onde sinusoïdale superposée à un niveau ~~c.c.~~ de courant continu.

La tension d'essai de 10 s de la valve, U_{TV1} , doit être déterminée conformément à la formule suivante:

$$\cancel{U_{TV1}} = (\cancel{U_{ac1}} \sin(2\pi ft) + \cancel{U_{dc1}}) \cdot \cancel{k_o} \cdot \cancel{k_g}$$

$$U_{TV1} = (k_{c1} \cdot U_{tac1} \cdot \sin(2\pi ft) + U_{tdc1}) \cdot k_o \cdot k_g$$

où

U_{ac1} est la valeur de crête de la surtension ~~du composant c.a. de~~ transitoire maximale de la ~~composante alternative à travers~~ au niveau de la valve. L'effet ~~restrictif de limitation~~ du parasurtenseur de ~~la~~ valve ou du ~~parasurtenseur de~~ pôle peut être pris en considération pour ~~déduire~~ calculer la surtension en ~~état~~ condition d'utilisation;

U_{dc1} est la surtension ~~du composant c.c. de~~ transitoire maximale de la ~~composante alternative à travers~~ au niveau de la valve. L'effet ~~restrictif de limitation~~ du parasurtenseur de ~~la~~ valve ou du ~~parasurtenseur de~~ pôle peut être pris en considération pour ~~déduire~~ calculer la surtension en ~~état~~ condition d'utilisation;

k_{c1} est le facteur de dépassement du palier de tension lié au palier de tension de sortie du convertisseur, dans les conditions conformes à celles appliquées pour définir U_{ac1} . 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_o est le facteur d'échelle d'essai conformément à 4.3.2;

k_g est le facteur de sécurité d'essai;

$k_g = 1,10$;

f est la fréquence d'essai (50 Hz ou 60 Hz, selon les installations d'essai).

La tension d'essai de ~~30 min~~ 3h de la valve, U_{tv2} , doit être déterminée conformément aux éléments suivants:

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

$$U_{tac2} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\max\text{-cont}} \cdot \sin(2\pi ft)}{\sqrt{3}} \cdot k_o \cdot k_{10}$$

$$U_{tac2} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\max\text{-cont}} \cdot \sin(2\pi ft)}{\sqrt{3}} \cdot k_{c2} \cdot k_o \cdot k_{10}$$

$$U_{tdc2} = U_{d\max} \cdot k_o \cdot k_{10}$$

$U_{\max\text{-cont}}$ est la tension ~~phase à phase~~ maximale ~~entre phases~~ en régime permanent sur le système ~~c.a.~~ à courant alternatif ou le côté valve du transformateur, si un transformateur de convertisseur est utilisé entre le système ~~c.a.~~ à courant alternatif et les convertisseurs;

$U_{d\max}$ est la valeur maximale ~~du composant c.c. de la composante continue~~ de la tension de fonctionnement en régime permanent du système ~~c.c.~~ à courant continu;

k_{c2} est le facteur de dépassement du palier de tension lié au palier de tension de sortie du convertisseur, dans les conditions conformes à celles appliquées pour définir U_{tac2} ;

k_o est le facteur d'échelle d'essai conformément à 4.3.2;

k_{10} est le facteur de sécurité d'essai;

$k_{10} = 1,10$;

f est la fréquence d'essai (50 Hz ou 60 Hz, selon les installations d'essai).

NOTE 3 — Il convient que l'utilisation d'un condensateur à la place d'une source c.c. dans le circuit d'essai fasse l'objet d'un accord entre le fournisseur et le client dans la mesure où la tension d'essai est supérieure à la valeur réelle.

9.3.2 Essais d'impulsion de la valve (généralités)

Il convient de tenir compte de ce qui suit pendant les essais d'impulsion de la valve.

- a) Pour certaines applications, si par exemple aucune ligne aérienne n'est présente du côté c.c. et que la barre omnibus entre la bobine d'inductance de phase et les valves est entièrement protégée contre le foudroiement direct du côté c.a. ou dans les topologies, où la valve joue le rôle d'une source de tension commandable avec sa propre capacité c.c. intégrée, les essais d'impulsion de valve sont moins importants puisque les valves ne subissent pas les impulsions à une amplitude pouvant s'avérer décisive pour leur fonctionnement électrique. Dans ce type d'applications, les essais d'impulsion peuvent être omis.
- b) L'essai d'impulsion s'applique uniquement dans la polarité correspondant à la polarité de tension de tenue de la valve.
- c) Si les niveaux de tenue d'impulsion de la valve sont inférieurs ou égaux au niveau d'essai c.a. – c.c. de la valve, l'essai c.a. – c.c. de la valve est supposé pouvoir couvrir les essais d'impulsion **et par conséquent, les essais d'impulsion peuvent être omis.**

9.3.3 Essai d'impulsion de commutation de la valve

Une forme d'onde de tension d'impulsion de commutation normalisée conforme à l'IEC 60060 doit être utilisée.

L'essai doit comprendre trois applications de tensions d'impulsion de commutation d'une amplitude spécifiée sur la valve.

La tension de tenue d'essai d'impulsion de commutation de la valve U_{tsv} doit être déterminée conformément aux éléments suivants.

- Valve avec protection par parasurtenseur de la valve:

$$U_{tsv} = SIPL_v \cdot k_0 \cdot k_{11}$$

où

$SIPL_v$ est le niveau de protection d'impulsion de commutation du parasurtenseur de la valve;

k_0 est un facteur d'échelle d'essai conformément à 4.3.2;

k_{11} est un facteur de sécurité d'essai;

$k_{11} = 1,10$.

- Valve sans protection par parasurtenseur de la valve:

L'objectif de cet essai consiste à vérifier l'isolement de la valve quand elle n'est pas directement protégée par des parasurtenseurs.

$$U_{tsv} = U_{cms} \cdot k_0 \cdot k_{12}$$

où

U_{cms} est la tension prévue d'impulsion de commutation à travers les bornes de la valve, conformément aux études de coordination de l'isolement du système;

k_0 est un facteur d'échelle d'essai conformément à 4.3.2;

k_{12} est un facteur de sécurité d'essai;

$k_{12} = 1,3$ **1,15.**

La valve doit résister à la tension d'essai sans rupture de la commutation ni de l'isolement.

9.3.4 Essai d'impulsion de foudre de la valve

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

L'essai doit comprendre trois applications de tensions d'impulsion de foudre d'une amplitude spécifiée sur la valve.

La tension de tenue d'impulsion de foudre de la valve U_{tlv} doit être déterminée conformément aux éléments suivants.

- Valve avec protection par parasurtenseur de la valve:

$$U_{tlv} = LIPL_V \cdot k_o \cdot k_{13}$$

où

$LIPL_V$ est le niveau de protection d'impulsion de foudre du parasurtenseur de la valve;

k_o est un facteur d'échelle d'essai conformément à 4.3.2;

k_{13} est un facteur de sécurité d'essai;

$k_{13} = 1,10$.

- Valve sans protection par parasurtenseur de la valve:

L'objectif de cet essai consiste à vérifier l'isolement de la valve quand elle n'est pas directement protégée par des parasurtenseurs.

$$U_{tlv} = U_{cml} \cdot k_o \cdot k_{14}$$

où

U_{cml} est la tension prospective d'impulsion de foudre prévue à travers les bornes de la valve conformément aux études de coordination de l'isolement du système;

k_o est un facteur d'échelle d'essai conformément à 4.3.2;

k_{14} est un facteur de sécurité d'essai;

$k_{14} = 1,3$ 1,15.

La valve doit résister à la tension d'essai sans rupture de la commutation ni de l'isolement.

10 Essai de mise hors tension de l'IGBT en cas de surintensité

10.1 Objectif de l'essai

Le principal objectif consiste à vérifier la qualité de conception de la valve à VSC, notamment l'IGBT, et des circuits électriques associés par rapport aux contraintes de tension et de courant à la mise hors tension, en cas de pannes de type court-circuit ou de ratés d'allumage.

L'essai doit simuler la pire combinaison de contrainte de tension et de température de jonction instantanée, dans des conditions représentant les situations les moins favorables en matière de tolérance des circuits de surveillance/protection. **Selon la stratégie de commande et de protection, deux essais ou plus peuvent être exigés afin de reproduire toutes les contraintes appropriées.**

Les exigences générales relatives au circuit d'essai et à la représentation du condensateur c.c., de l'inductance de boucle, etc. sont telles qu'indiquées en 6.3.

~~Le pire cas possible dépend de la conception de la valve mais les situations suivantes, dont la liste n'est pas exhaustive, sont à prendre en considération:~~

- ~~• le court-circuit de la borne c.a. à la terre;~~
- ~~• le court-circuit de la borne c.a. entre les phases;~~

~~• le court-circuit ou le raté d'allumage d'une autre valve dans la même unité de phase.~~

10.2 Objet d'essai

Comme décrit en 6.2. Cependant, il peut également s'avérer nécessaire de représenter certains circuits de protection ou de surveillance dans les cas où ceux-ci sont essentiels pour détecter une surintensité.

10.3 Exigences relatives à l'essai

L'essai consiste à faire atteindre à l'objet d'essai l'équilibre thermique dans les conditions produisant la température de jonction en régime permanent la plus élevée pour l'IGBT concerné (voir 6.4) et à susciter ensuite une 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 mise hors tension sécurisée maximale.

La tension d'essai U_{tpv2} correspondant à la surtension c.c. temporaire maximale doit être déterminée comme suit:

$$U_{tpv2} = U_{dtemp} \cdot k_n \cdot k_{15}$$

où

U_{dtemp} est la surtension c.c. temporaire maximale, y compris l'ondulation;

k_n est un facteur d'échelle d'essai conformément à 4.3.1;

k_{15} est un facteur de sécurité d'essai;

$k_{15} = 1,05$.

Il convient que la forme d'onde de courant d'essai, dans l'intervalle de temps compris entre la détection de la surintensité et l'instant de la mise hors tension des IGBT, soit représentative des conditions d'utilisation, notamment en termes de vitesse de montée du courant di/dt.

11 Essai de courant de court-circuit

11.1 Objectif des essais

Le principal objectif consiste à vérifier l'adéquation des dispositifs, notamment des diodes, ~~des composants supplémentaires éventuels utilisés pour protéger les diodes (tels que les thyristors de dérivation)~~ et des circuits électriques associés, par rapport aux contraintes de courant dans des conditions de court-circuit spécifiées, telles qu'une panne produisant un court-circuit du côté ~~c.c. courant continu~~, jusqu'à la coupure du courant de panne par le circuit de commande et de protection. ~~Il convient de prendre également en considération l'alimentation de la valve à convertisseur.~~ Il convient de concevoir les valves à VSC afin qu'elles résistent à la surintensité de court-circuit pendant le nombre de cycles nécessaires pour ouvrir le disjoncteur à courant alternatif principal, sans aucune défaillance ou aucun endommagement de l'équipement, compte tenu également du fait qu'une tension de rétablissement potentielle peut apparaître. Il convient normalement de réaliser l'essai avec l'électronique de la valve initialement sous tension, à moins que le courant de court-circuit puisse se produire dans les conditions où la valve est mise hors tension (par exemple, en raison du courant d'appel existant lors de la fermeture du disjoncteur du convertisseur au démarrage).

11.2 Objet d'essai

Comme décrit en 6.2.

11.3 Exigences relatives aux essais

L'essai consiste à faire atteindre à l'objet d'essai l'équilibre thermique dans les conditions produisant la température de jonction en régime permanent la plus élevée pour le composant à semi-conducteur concerné (voir 6.4) et à susciter un courant de panne. **Afin de définir l'élévation de la température de jonction maximale des IGBT et des diodes, toutes les conditions de surcharge possibles (en termes d'amplitude et de durée) doivent être prises en considération.**

Il convient que l'amplitude, la durée et le nombre de cycles du courant de panne représentent les valeurs maximales attendues dans le fonctionnement réel. Aucun facteur de sécurité d'essai ne s'applique au courant.

Quand l'objet d'essai connaît une tension de rétablissement entre les cycles de courant de panne, 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.

12 Essai d'insensibilité de la valve aux perturbations électromagnétiques

12.1 Objectif des essais

Le principal objectif consiste à démontrer l'insensibilité de la valve à l'interférence électromagnétique (perturbations électromagnétiques) découlant des transitoires de tension et de courant générés à l'intérieur de la valve et qui lui sont imposés depuis l'extérieur. Les éléments sensibles de la valve correspondent généralement aux 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 au cours d'autres essais de type. Parmi ces essais, l'essai de contrainte de la valve, l'essai de contrainte en fonctionnement continu maximal, l'essai de contrainte en fonctionnement en surcharge temporaire maximal (voir 6.4 et 6.5), l'essai d'impulsion de la valve (voir 9.3.3 et 9.3.4) et l'essai de mise hors tension en cas de surintensité de l'IGBT (voir l'Article 10) sont les plus importants.

Il convient que les essais démontrent:

- a) qu'il ne se produit pas de déclassement ou de commutation parasite de l'IGBT;
- b) que les circuits de protection électroniques installés dans la valve fonctionnent comme prévu;
- c) qu'une indication fausse de pannes de niveaux de valve ou des signaux erronés ne sont pas envoyés aux systèmes de commande et de protection du convertisseur par l'électronique de base de la valve, en raison de la réception de données erronées des circuits de surveillance de la valve.

NOTE Pour la présente norme, 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 qui connecte la valve à la terre. La démonstration de l'insensibilité aux perturbations électromagnétiques de l'équipement situé au potentiel de terre et la caractérisation de la valve comme source de perturbations électromagnétiques pour d'autres éléments de l'équipement n'entrent pas dans le domaine d'application de la présente norme.

12.2 Objet d'essai

En général, l'objet d'essai est la valve ou les sections de valve, telles qu'utilisées pour les autres essais.

Quand il faut démontrer l'insensibilité aux perturbations électromagnétiques provoquées par le couplage entre des valves adjacentes dans une MVU, deux approches sont possibles,

telles que définies en 12.3. Dans ce cas, l'objet d'essai est une valve ou une section de valve séparée selon l'approche adoptée.

12.3 Exigences relatives aux essais

12.3.1 Généralités

Lors de la démonstration de l'insensibilité aux perturbations électromagnétiques provoquées par le couplage entre des valves adjacentes d'une MVU, les exigences relatives aux essais dépendent de l'approche adoptée parmi les deux approches recommandées.

NOTE Il convient que la disposition géométrique spécifique à utiliser et que l'amplitude de la tension directe pour l'objet soumis à l'essai de perturbations électromagnétiques fassent l'objet d'un accord en fonction de la conception de la MVU.

12.3.2 Première approche

La première approche consiste à simuler directement la source des perturbations électromagnétiques en tant qu'élément d'un montage d'essai. Ce type de montage d'essai implique 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 soumise à essai doit être aussi proche que possible de la disposition d'utilisation (ou pire, 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 au bon échange d'informations avec l'objet soumis à l'essai de perturbations électromagnétiques doivent être incluses.

12.3.3 Deuxième approche

La deuxième approche consiste à déterminer l'intensité des champs électromagnétique dans les pires conditions de fonctionnement, soit à partir de considérations théoriques, soit au moyen de mesurages. Dans un deuxième temps, ces champs sont simulés par un circuit d'essai qui génère un rayonnement électromagnétique exact (ou pire) aux fréquences respectives. Une section de valve est ensuite exposée aux champs générés par la source d'essai.

Un prérequis essentiel de la deuxième approche est la détermination de la puissance et la direction du champ dynamique aux emplacements clés de la valve. Cette détermination s'obtient généralement au moyen de mesurages effectués par une bobine d'exploration au cours d'essais d'allumage sur une valve unique. Une autre possibilité consiste à prévoir le champ à l'aide de programmes de modélisation de champ en trois dimensions. Ensuite, une section de valve doit être soumise à essai à l'aide d'une bobine de champ séparée pouvant produire une intensité, un contenu de fréquence et une direction de champ au moins aussi importantes que les valeurs prévues.

Les conditions suivantes relatives à la section de valve soumise à essai doivent être satisfaites:

- 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 soumise à essai doit être alimentée;
- les parties de l'électronique de base de la valve nécessaires au bon échange d'informations avec la section de valve doivent être incluses.

12.3.4 Critères d'acceptation

Les critères d'acceptation pour la première et la deuxième approches doivent être tels que définis en 12.1.

15 Essais pour les valves à freinage dynamique

Dans certains systèmes CCHT VSC, mais notamment lorsque le système CCHT exporte de l'énergie à partir d'un système à courant alternatif îloté de petites dimensions avec une charge faible ou inexistante (par exemple, un parc éolien en haute 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 consiste à absorber et à dissiper l'énergie générée dans le système à courant alternatif îloté lors de pannes au niveau du système à courant alternatif de réception, généralement pendant des durées de 1 s à 2 s.

Il existe plusieurs méthodes possibles de mise en œuvre de ce type de système de freinage dynamique, mais la conception des valves de ce système est en règle générale 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 données dans les Articles 6 à 12 précédents sont généralement applicables; toutefois, les valves à freinage dynamique exigent généralement uniquement un sous-ensemble des essais de type applicables aux valves à VSC.

La valve à freinage dynamique reste normalement dans l'état d'attente, mais est tenue de fonctionner et d'acheminer le courant pendant de courtes durées lorsque le système à courant alternatif de réception subit une panne. Les conditions d'essai diélectrique sont par conséquent similaires à celles applicables à la valve à VSC, mais il est nécessaire d'appliquer les conditions d'essai de fonctionnement uniquement pendant de courtes durées.

13 Essais de production

Le présent article traite des essais effectués 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 effectués sur des composants individuels, utilisés à l'intérieur de la valve, du support de valve ou de la structure de valve.

13.1 Objectif des essais

L'objectif des essais de production consiste à 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 préétablis sont compris dans les limites d'acceptation prescrites;
- les sections de valve et les niveaux de paire IGBT-diode (comme approprié) présentent une capacité de tenue en tension appropriée;
- la cohérence et l'uniformité en production sont atteintes.

13.2 Objet d'essai

Toutes les sections de valve ou les parties fabriquées pour le projet doivent être soumises aux essais de production 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.

13.3 Exigences relatives aux essais

L'uniformité des essais de production spécifiés par différents fournisseurs n'est pas nécessaire. Les essais de production doivent prendre en compte les caractéristiques de conception spécifiques à la valve et à ses composants, la portée de l'essai des composants

effectué préalablement à l'essai de l'ensemble, et les procédures et techniques de fabrication particulières mises en œuvre. Dans le présent article, seuls les objectifs de l'essai de production sont indiqués.

Dans tous les cas, le fournisseur doit soumettre, pour approbation par le client, une description détaillée des procédures d'essai proposées pour satisfaire aux objectifs d'essai de production.

Les exigences minimales des essais de production de série sont indiquées en 13.4. L'ordre dans lequel les essais sont répertoriés ne reflète ni un classement par ordre d'importance, ni l'ordre dans lequel il convient de les réaliser.

NOTE Dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire d'effectuer des essais d'échantillon de production sur les ensembles complets en plus des essais de série, comme par exemple quand des modifications sont introduites au cours de la production. Il convient de s'accorder sur la nature et l'étendue de ces essais supplémentaires au cas par cas.

13.4 Objectifs des essais de production

13.4.1 Examen visuel

Vérifier que tous les matériaux et composants sont correctement installés et qu'aucun d'entre eux n'est endommagé, conformément à la dernière révision approuvée de la documentation de production.

13.4.2 Vérification de la connexion

Vérifier que les principales connexions conduisant du courant ont été réalisées correctement.

13.4.3 Vérification du circuit d'évaluation de la tension

Vérifier les paramètres du circuit d'évaluation et garantir ainsi que la division de la tension entre les niveaux connectés en série sera adaptée pour les tensions appliquées à partir de courant c.c. aux formes d'onde d'impulsion, le cas échéant.

13.4.4 Vérification des circuits de commande, de protection et de surveillance

Vérifier le fonctionnement de chaque circuit de commande, de protection ou de surveillance faisant partie intégrante de la valve, comme 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 considérés comme nécessaires, ils doivent être spécifiés séparément avec les conditions d'essais.

13.4.5 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 c.a. – c.c. et l'impulsion de commutation, le cas échéant.

13.4.6 Essais de décharge partielle

Pour démontrer que la fabrication est correcte, le client et le fournisseur doivent se mettre d'accord sur les composants et sous-ensembles critiques pour la conception, et des essais appropriés de décharge partielle doivent être réalisés.

13.4.7 Vérification de la mise sous / hors tension

Vérifier que les IGBT dans chaque niveau de valve se met correctement sous et hors tension, en réponse aux commandes de commutation.

13.4.8 Essais de pression

Vérifier qu'il n'y a pas de fuite du liquide de refroidissement.

14 Présentation des résultats d'essais de type

Le rapport d'essai doit être édité conformément aux lignes directrices générales indiquées dans l'ISO/IEC 17025, et comprendre les informations suivantes:

- le nom et l'adresse du laboratoire et le lieu de réalisation des essais;
- le nom et l'adresse du client;
- l'identification sans ambiguïté de l'objet d'essai, comprenant son type et ses caractéristiques, son numéro de série et tout autre renseignement utile à son identification;
- 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 la description claire des points de divergence, s'il y en a, avec les procédures indiquées dans les documents normatifs;
- la description de l'équipement de mesurage et l'indication de l'incertitude de mesure;
- les résultats d'essais sous forme de tableaux, de graphiques, d'oscillogrammes et de photographies, selon les cas;
- la description du dysfonctionnement de l'équipement ou du composant.

Annexe A (informative)

Vue d'ensemble ~~de la topologie~~ des convertisseurs VSC dans le cadre du 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 circuit, 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 de source de courant) tient au fait que pour inverser le sens d'un flux de puissance, ils procèdent à l'inversion du sens du courant direct, et non à celle de la polarité de la tension directe. Le lissage de la tension directe est effectué à l'aide d'un condensateur c.c. de grande taille, qui joue un rôle analogue à celui de l'inducteur c.c. (qui peut être assumé en partie par l'inductance du système de transmission c.c. 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 est, à un grand nombre d'égards, équivalent à celui du courant dans une valve à thyristor CCHT classique, et vice-versa.

Le traitement détaillé de toutes les technologies de valve à VSC possibles s'étend bien au-delà du domaine d'application de la présente norme. L'objectif de la présente annexe consiste simplement à présenter 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 fournir un aperçu des principales technologies de convertisseur connues au moment de sa rédaction. Cependant, elle n'a pas pour objectif de limiter ou de restreindre en aucune manière les types de technologie pouvant être utilisés.

A.2 Caractéristiques élémentaires du VSC

Tous les convertisseurs de source de tension visent à synthétiser, à partir de la tension du condensateur c.c., une tension à peu près sinusoïdale aux bornes c.a. Cependant, en pratique, la tension de sortie du VSC ne peut pas être parfaitement sinusoïdale mais se trouve plutôt constituée de plusieurs pas de tension, ou « niveaux de sortie ». 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 fait référence à un bloc module physique de la valve, par exemple, à un IGBT individuel et à 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 fait référence au nombre d'états discrets dans lesquels la tension de sortie entre phase et neutre d'une unité de phase peut se trouver (Figure A.1). Il est important de remarquer qu'un convertisseur présentant un nombre de niveaux n disposera de $(2n-1)$ valeurs possibles de tension entre phases.

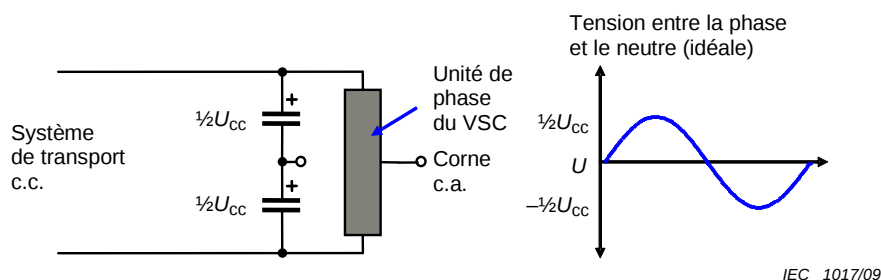
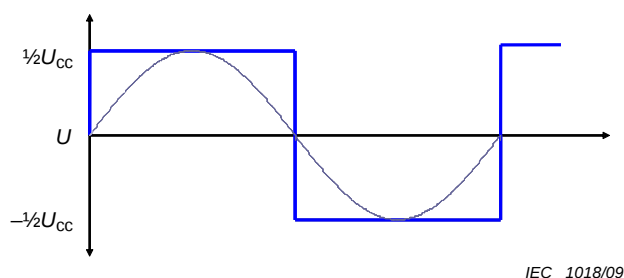


Figure A.1 – Une unité de phase VSC unique et sa tension de sortie idéale

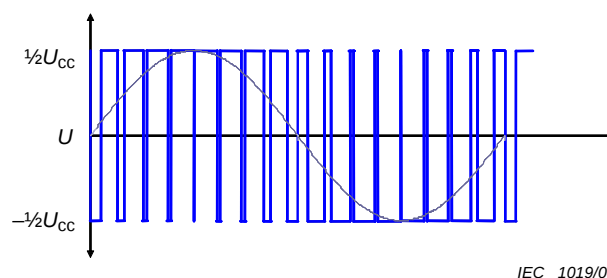
Dans la topologie VSC la plus simple, à savoir un « convertisseur à deux niveaux », la tension de sortie c.a. de chaque bras de phase (par rapport au point médian du condensateur c.c., qui est normalement mis à la terre) a uniquement deux états possibles: $+\frac{1}{2}U_{cc}$ et $-\frac{1}{2}U_{cc}$.

Si les valves à VSC dans ce bras de phase sont uniquement commutées à la fréquence fondamentale, la forme d'onde de tension de sortie c.a. résultante constitue une approximation de tension sinusoïdale de qualité tout à fait médiocre. Une telle forme d'onde est totalement inacceptable dans un système d'alimentation.

En revanche, en commutant les valves en modes ON et OFF plus d'une fois par cycle de fréquence fondamentale et en utilisant la modulation de largeur d'impulsion (MLI), il est possible d'obtenir une tension de sortie étant, après filtrage, raisonnablement sinusoïdale. La Figure A.2 fournit une illustration de ces deux cas.



IEC 1018/09



IEC 1019/09

Figure A.2a – Sans MLI

Figure A.2b – Avec MLI

Figure A.2 – Tension de sortie d'une unité de phase VSC pour un convertisseur à 2 niveaux

La MLI constitue une technique avérée pour les entraînements de moteur, mais 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 multi-niveaux ». Il existe plusieurs topologies de convertisseur à 3 ou 5 niveaux, mais dans une application de système d'alimentation, ces convertisseurs, en général, n'en exigent pas moins une MLI pour atteindre une harmonique suffisamment basse.

Cependant, certaines topologies de convertisseurs permettent de produire un plus grand nombre de niveaux de sortie, de sorte que même sans recours à une MLI, la forme d'onde de tension de sortie est hautement sinusoïdale et que peu de (ou aucun) filtrage n'est nécessaire. La Figure A.3 fournit la tension de sortie d'un convertisseur à 15 niveaux, qui peut être considérée comme raisonnablement sinusoïdale. Dans la pratique, les nombres de niveaux supérieurs à 15 sont normalement utilisés pour des applications de transmission CCHT.

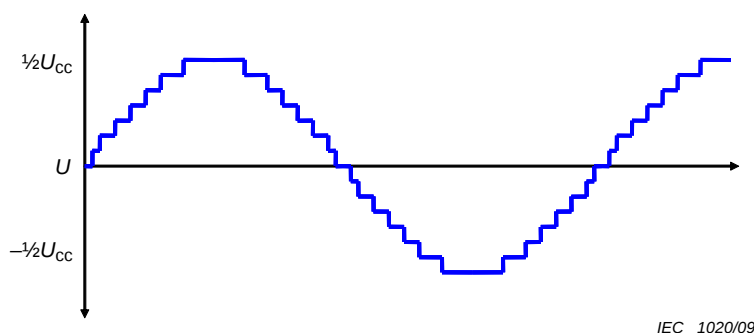


Figure A.3 – Tension de sortie d'une unité de phase VSC pour un convertisseur à 15 niveaux, sans MLI

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 d'ensemble en grande partie commune, les valves à VSC se situent à une étape 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 ~~ou décrites dans les documents spécialisés~~ se répartissent en deux catégories fondamentales.

- Les valves à VSC du 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: ON et OFF. Dans les convertisseurs présentant cette topologie, les condensateurs c.c. sont entièrement séparés des valves et peuvent être soumis à essai individuellement.
- Les valves à VSC du type « à source de tension commandable ». Dans les valves de ce type, les condensateurs c.c. font partie intégrante de la valve et ne peuvent pas en être séparés **aisément** en vue des essais.

Il est nécessaire de procéder à certains essais de type de manière légèrement différente selon la catégorie à laquelle les valves appartiennent, parmi les deux catégories présentées ci-dessus.

Certaines 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; toutefois, au moment de la rédaction, les travaux de développement dans le domaine de ces topologies sont relativement récents, et ces topologies ne sont pas encore disponibles dans le commerce.

A.4 Valves à VSC du type «commutateur»

A.4.1 Généralités

Les valves à VSC de ce type sont assez ressemblantes en apparence aux valves à thyristor classiques, en cela qu'elles sont constituées d'un nombre important de dispositifs IGBT connectés en série et commutés simultanément. Comme pour les valves à thyristor classiques, la commutation simultanée des IGBT connectés en série est cruciale. ~~Les valves de ce type sont normalement utilisées avec des convertisseurs présentant un nombre relativement faible de niveaux de sortie.~~ La redondance peut être assurée de la même manière que pour une valve à thyristor LCC, en fournissant quelques dispositifs IGBT supplémentaires connectés en série et en s'assurant que les IGBT sont d'un type spécial en

mode de défaillance par 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 relativement faible de niveaux de sortie. Pour compenser leur faible nombre de niveaux de sortie, ces convertisseurs ont généralement recours à la modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour atteindre une approximation correcte de tension de sortie sinusoïdale.

Certaines des topologies de convertisseur les plus courantes pouvant être utilisées 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 du VSC comprend simplement deux valves à VSC connectées en série et partageant une borne c.a. Les deux valves sont commutées alternativement de telle sorte qu'à tout moment, soit l'une soit l'autre est conductrice, mais jamais les deux. (En pratique, il existe un léger « chevauchement » ou temps mort entre les deux valves afin d'empêcher une « reconduction » ou la conduction simultanée de deux valves connectées en série).

La topologie du circuit de ce convertisseur est très simple (voir Figure A.4) et demande très peu d'explications. Lorsque V1 est conductrice, la borne c.a. est connectée à la borne c.c. supérieure et produit donc une tension de sortie de $+\frac{1}{2}U_{cc}$. Lorsque V2 est conductrice, la borne c.a. est connectée à la borne c.c. inférieure et produit donc une tension de sortie de $-\frac{1}{2}U_{cc}$.

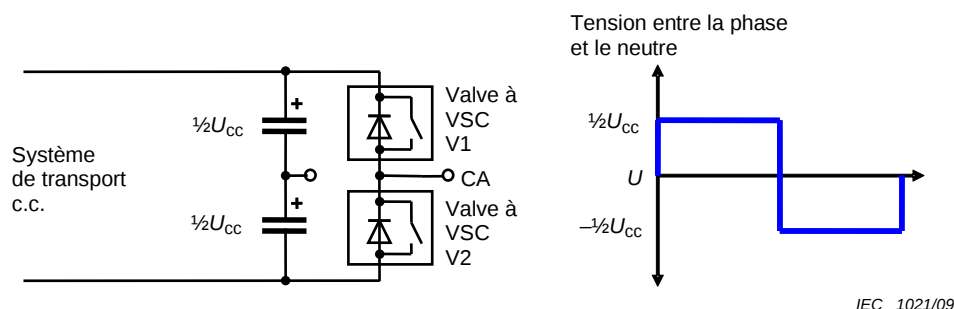


Figure A.4 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur à 2 niveaux

A.4.3 Convertisseur encastré dans une diode multi-niveaux

Dans cette famille de convertisseurs, le condensateur c.c. est subdivisé en un nombre de zones discrètes connectées 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 c.c. 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 c.c. est subdivisé en deux unités connectées en série (comme c'est souvent le cas pour un convertisseur à deux niveaux). La borne c.a. 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 médian c.c. par l'intermédiaire des valves à diode.

Avec ce convertisseur, trois états de sortie sont possibles à partir d'une unité de phase unique. Lorsque les valves V1+V2 sont conductrices, la borne c.a. est connectée à la borne c.c. supérieure et produit donc une tension de sortie de $+\frac{1}{2}U_{cc}$. Lorsque les valves V3+V4 sont conductrices, la borne c.a. est connectée à la borne c.c. inférieure et produit donc une

tension de sortie de $-\frac{1}{2}U_{cc}$. Lorsque les valves V2+V3 sont conductrices, la tension de sortie c.a. est « fixée » en fonction de la tension du point médian c.c. par les valves à diode.

Le même principe peut être étendu à des nombres de niveaux plus élevés en subdivisant davantage le condensateur c.c. et en utilisant plus de valves à VSC et à diode. Dans un convertisseur à 5 niveaux, le condensateur c.c. est subdivisé en quatre zones discrètes, et huit valves à VSC et six valves à diode sont présentes (voir Figure A.6). Dans ce circuit, les valves sont commutées en groupes adjacents de quatre, par exemple V1+V2+V3+V4 donne une tension de sortie de $+\frac{1}{2}U_{cc}$, V2+V3+V4+V5, une tension de sortie de $+\frac{1}{4}U_{cc}$, etc.

Il faut souligner que la complexité du circuit augmente de manière disproportionnée à mesure que le nombre de niveaux de sortie augmente. Cette situation est empirée par le fait que non seulement le nombre, mais aussi les caractéristiques de tension des valves à diode, augmente rapidement avec le nombre des niveaux de sortie.

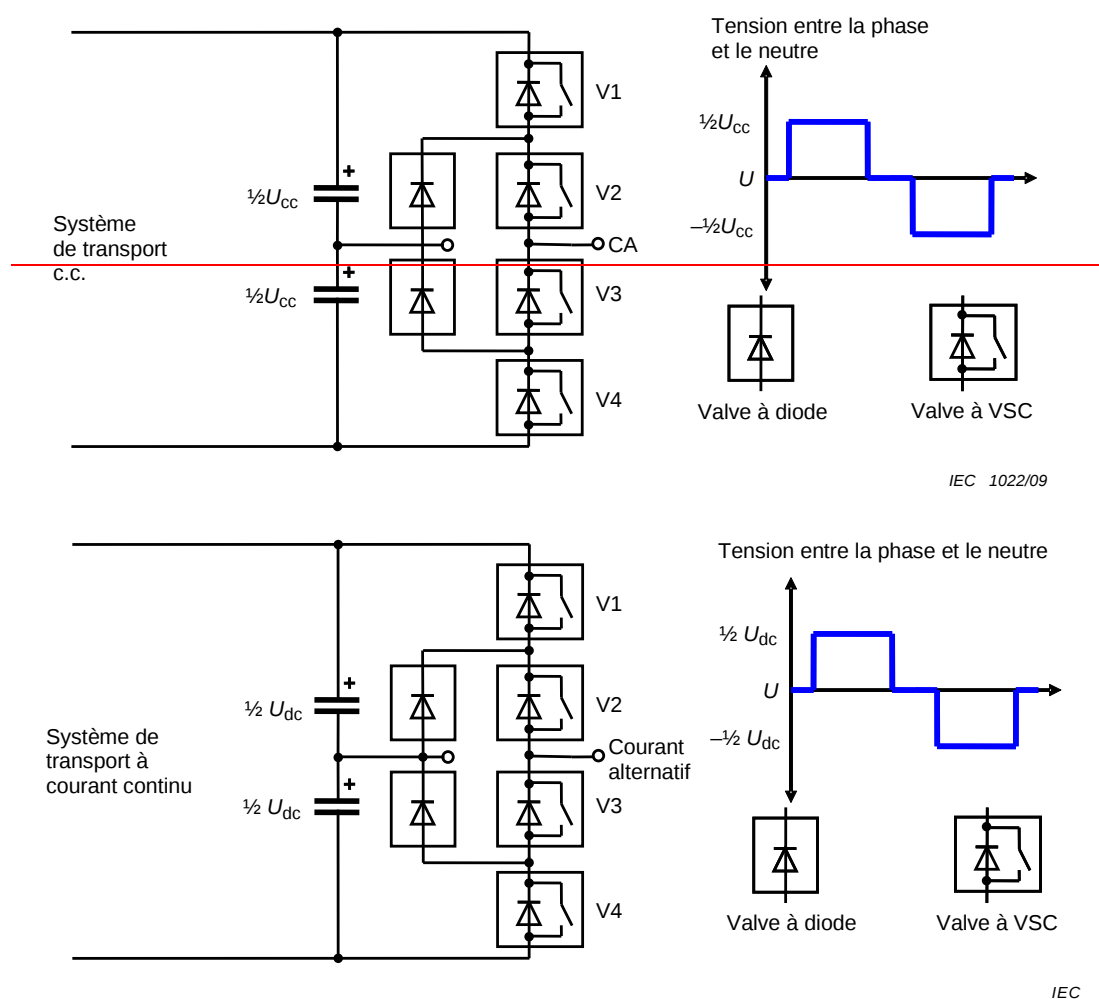


Figure A.5 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur lié à une diode à 3 niveaux

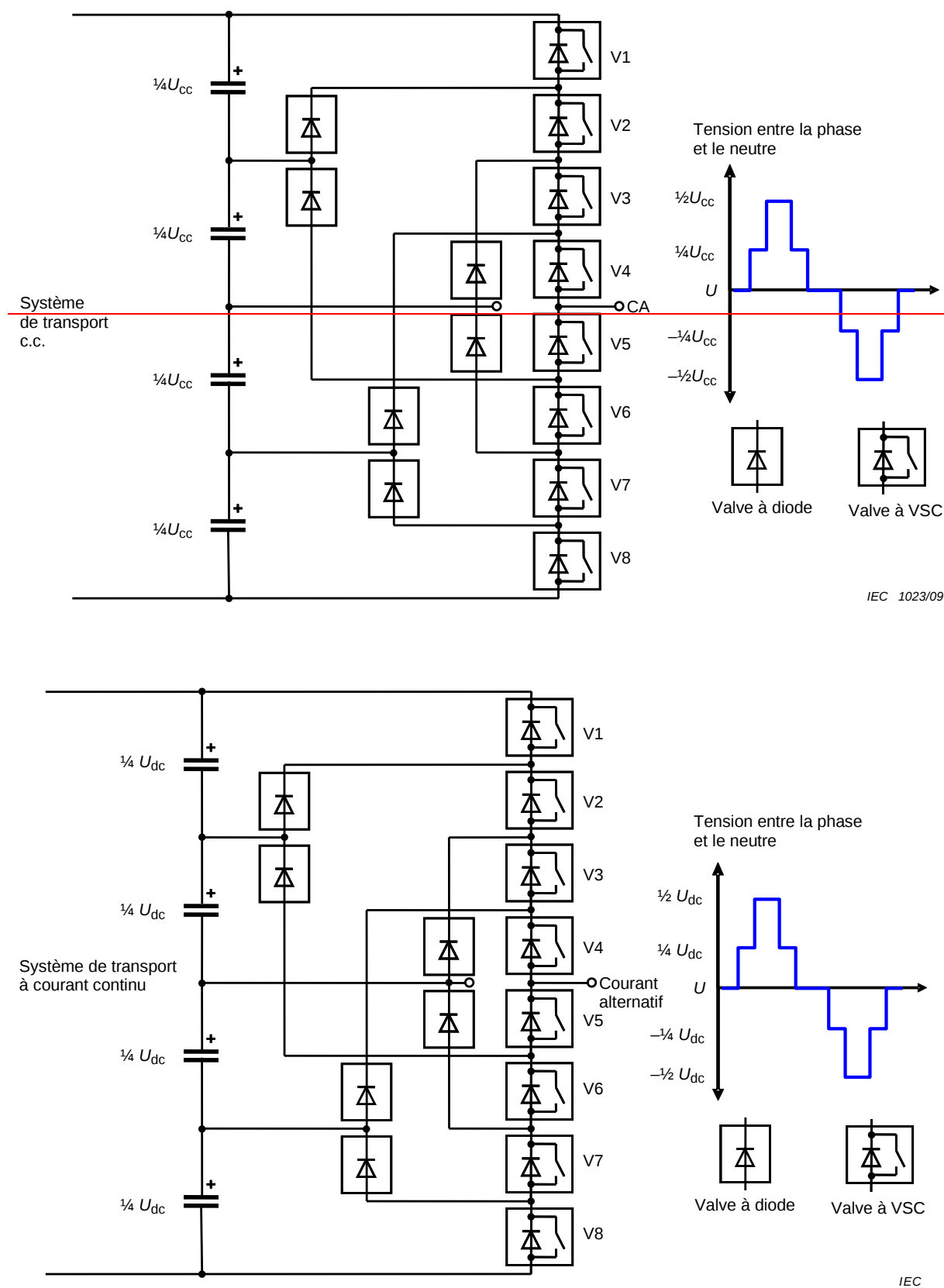


Figure A.6 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur lié à une diode à 5 niveaux

A.4.4 Convertisseur à condensateur volant multi-niveaux

Ce circuit permet d'atteindre le même résultat que le convertisseur lié à une diode à l'aide d'une méthode différente. Au lieu d'utiliser des valves à diode pour fixer la tension de sortie dans l'une des zones du condensateur c.c. intermédiaire, il a recours à un ou plusieurs convertisseurs c.c. supplémentaires, qui sont isolés des bornes c.c. et sont donc « flottants » ou « volants », pour obtenir le même effet. Ce circuit est également appelé parfois le 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 lié à une diode à 3 niveaux, les valves sont commutées par paires mais le modèle permettant d'atteindre une tension de sortie nulle est différent. Pour atteindre un état de sortie de 0, soit les valves V1+V3, soit les valves V2+V4 sont sous tension. V2+V3 représente une combinaison illégale qui entraîne le court-circuit du condensateur volant.

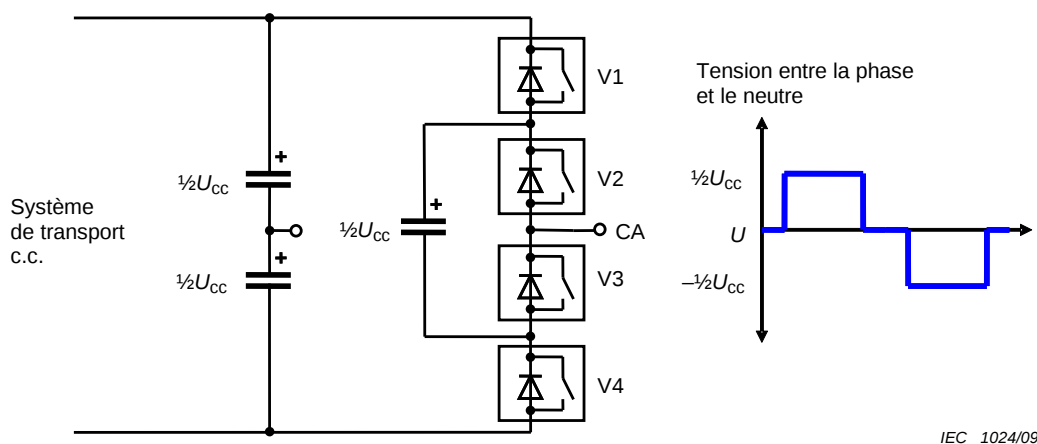


Figure A.7 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur à condensateur volant à 3 niveaux.

Le nombre de valves à VSC par unité de phase est le même pour ce convertisseur que pour le convertisseur lié à une diode présentant le même nombre de niveaux de sortie. Comme pour le convertisseur lié à une diode, un nombre important de niveaux de sortie est possible, mais au risque d'une augmentation disproportionnée de la complexité.

A.5 Valves à VSC du type «à source de tension commandable»

A.5.1 Généralités

Dans le convertisseur à 2 niveaux, les valves et le condensateur c.c. 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 c.c. augmente, de même que l'interdépendance des valves et du condensateur c.c.

A mesure que le convertisseur s'approche de l'idéal, où le nombre de niveaux de sortie est suffisant pour atteindre une approximation correcte de forme d'onde sinusoïdale sans avoir recours à la MLI, la subdivision du condensateur c.c. 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 élément IGBT effectuant la commutation, mais également comme condensateur c.c. distribué. En effet, une telle valve ne constitue plus simplement un commutateur mais est désormais une source de tension

commandable, connectée entre la borne c.a. de l'unité de phase correspondante et l'une des bornes c.c. (voir Figure A.8).

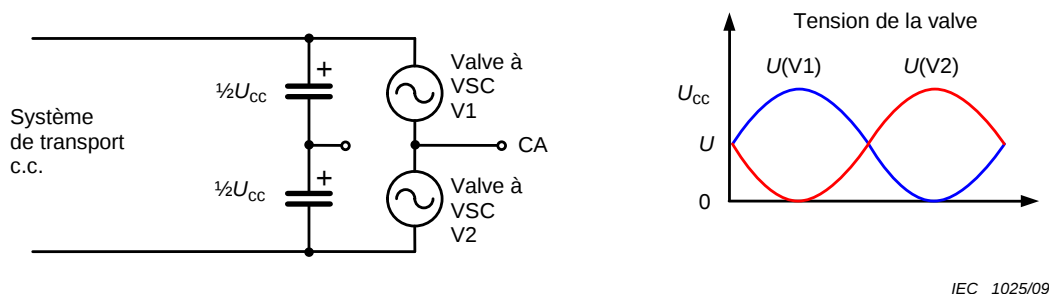


Figure A.8 – Une unité de phase VSC unique avec des valves du type «source de tension commandable»

Chacune des valves V1 et V2 dans l'unité de phase produit une tension de sortie ~~unipolaire s'approchant d'une forme d'onde sinusoïdale complètement décalée avec des extrêmes $U=0$ et $U=U_{cc}$~~ , 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 $U(V1) + U(V2) = U_{edc}$.

~~En principe, il peut exister de nombreuses méthodes différentes de mise en œuvre d'une valve de ce type, mais une mise en œuvre de ce type est indiquée dans la Figure A.9. Ce circuit est modulaire, chaque module comprenant un condensateur c.c. isolé unique et deux commutateurs IGBT. De fait, ce circuit est très similaire à celui du convertisseur de base à 2 niveaux (voir Figure A.4) à cette exception près que les interconnexions entre les modules sont effectuées à partir de la borne c.a. (entre IGBT1 et IGBT2) d'un module, vers l'une des bornes c.c. du module voisin. Avec ce circuit, chaque module peut produire deux états de sortie discrets: $U=0$ (obtenu en commutant l'IGBT2 en mode ON) ou $U=U_{cc_module}$ (obtenu en commutant l'IGBT1 en mode ON). U_{cc_module} représente la tension de liaison c.c. d'un module unique, qui est très inférieure à U_{cc} , la tension de liaison c.c. du système dans son ensemble.~~

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 multiniveaux modulaire» (MMC – modular multi-level converter) et le «Convertisseur à deux niveaux monté en cascade» (CTL – cascaded two-level converter).

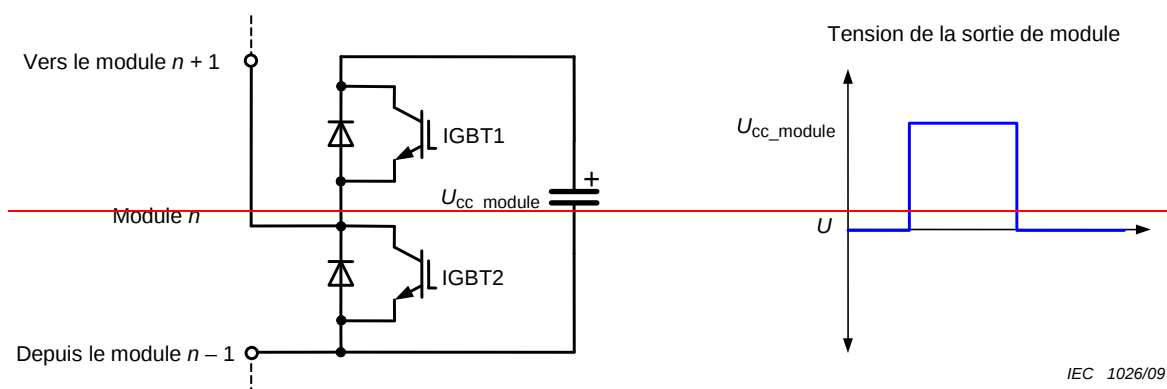


Figure A.9 – Une mise en œuvre possible d'une valve à VSC «à source de tension» multi-niveaux

Dans la mesure où le circuit 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 implique un filtrage) ou des IGBT connectés en série (qui entraînent des problèmes de distribution de la tension). En revanche, le nombre et la taille des condensateurs c.c. discrets requis peuvent être considérables, et il peut s'avérer difficile d'assurer que toutes les tensions de condensateur c.c. 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'un besoin d'espace plus important.

A.5.2 Convertisseur multiniveaux modulaire (MMC)

Une mise en œuvre du circuit MMC est illustrée à 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. De fait, ce circuit est 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 en courant alternatif (entre IGBT1 et IGBT2) d'un sous-module, vers l'une des bornes en courant continu du sous-module voisin. Avec ce circuit, chaque sous-module peut produire deux états de sortie discrets: $U = 0$ (obtenu en commutant l'IGBT2 en mode ON) ou $U = U_{dc_submodule}$ (obtenu en commutant l'IGBT1 en mode ON). $U_{dc_submodule}$ 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 dans son ensemble.

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 en 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 intégral, telle qu'illustrée à la Figure A.10, en lieu et place de la disposition en demi-pont illustrée à la Figure A.9.

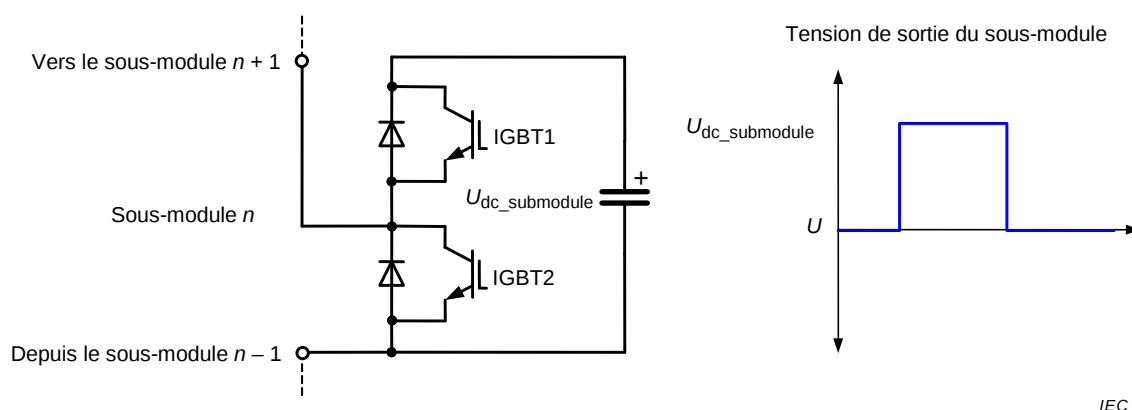


Figure A.9 – Circuit MMC en demi-pont

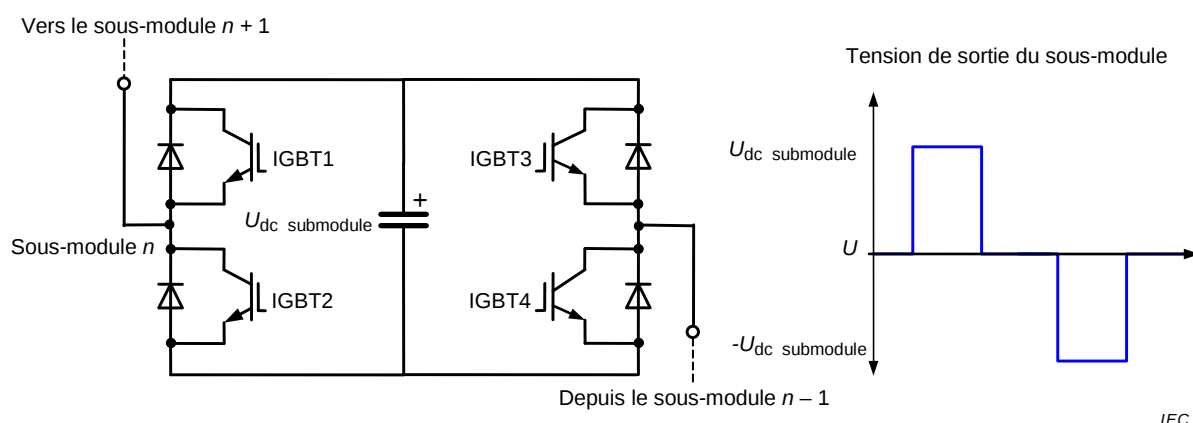


Figure A.10 – Circuit MMC en pont intégral

Dans la version "pont intégral" 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 par commutation sur IGBT1 + IGBT3 ou IGBT2 + IGBT4);
- $U = +U_{dc_submodule}$ (obtenu par commutation sur IGBT1+IGBT4); ou
- $U = -U_{dc_submodule}$ (obtenu par commutation sur IGBT2+IGBT3)

Le circuit en pont intégral 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 prise. Même lorsqu'il est utilisé sur une ligne à courant continu unipolaire, le circuit fournit une souplesse 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), ce qui génère un courant alternatif réduit dans la valve. De plus, la capacité à éliminer les courants de défaut dus aux courts-circuits qui se produisent entre les bornes en 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 comparaison avec 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 exiger 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 du type commutateur. La redondance ne peut pas être assurée dans chaque sous-module (étant donné que le fonctionnement correct du sous-module exige que les deux IGBT soient en bon état), mais est en revanche habituellement pourvu 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.

Par ailleurs, le nombre et la taille des condensateurs à courant continu discrets exigés peuvent être considérables, et il peut s'avérer difficile d'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 en termes d'espace plus importante.

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, à presque 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 intégral. Le bloc module de la valve du type CTL est désigné par le terme «cellule» et la version demi-pont d'une cellule est illustrée à 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 termes 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 nombre plus petit de paliers plus grands, que le circuit MMC. Ses performances harmoniques ne sont par conséquent pas aussi bonnes que celles du circuit MMC, bien que, si le nombre de IGBT par position de commutation est réduit (par exemple, 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 comparaison avec le 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 du 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.

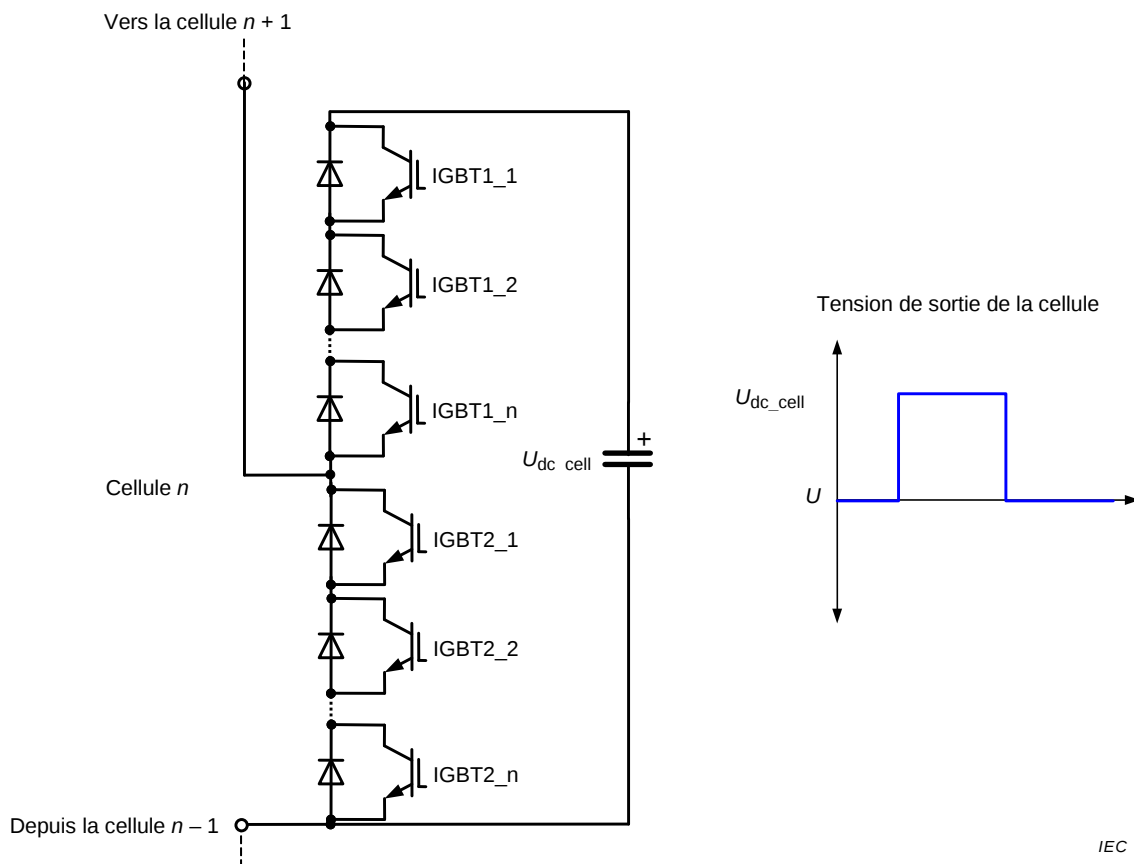


Figure A.11 – Circuit CTL en demi-pont

A.5.4 Terminologie relative aux valves du type «à source de tension commandable»

Les Figures A.12 et A.13 illustrent les principaux termes relatifs à la construction des valves des types MMC et CTL respectivement, afin d'expliquer la signification de termes tels que niveau VSC, sous-module et cellule.

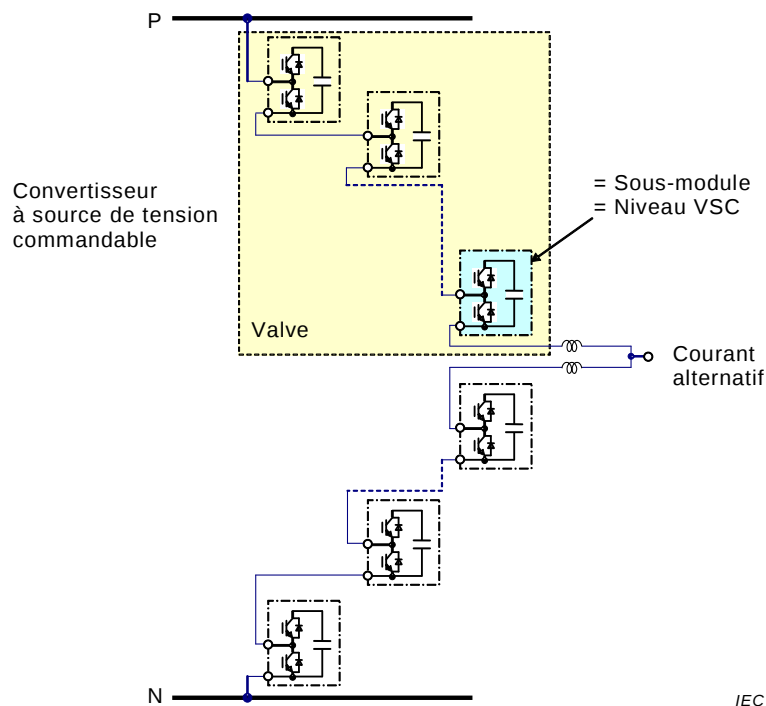


Figure A.12 – Termes relatifs à la construction des valves du type MMC

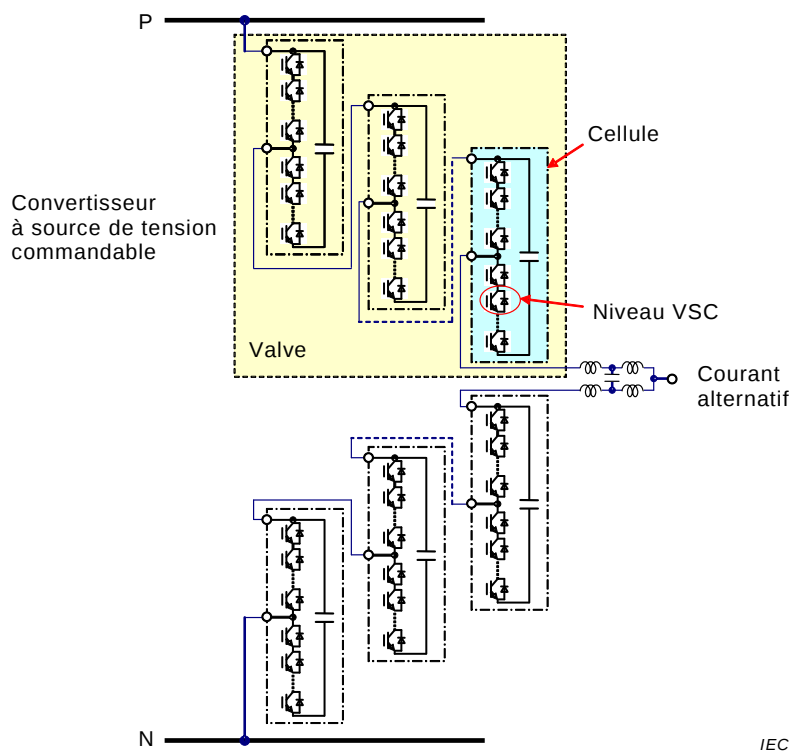


Figure A.13 – Termes relatifs à la construction des valves du type CTL

A.7 Valves à VSC hybrides

Certains ouvrages de référence publiés ont proposé d'autres types de valve 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 CIGRÉ.

A.6 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 de l'essai des valves.

Parmi les très nombreuses différences, les différences principales qui influencent l'essai des valves sont les suivantes.

- Les valves à VSC peuvent être mises en modes ON et OFF par une action de commande. En revanche, les valves à thyristor CCHT classiques peuvent uniquement être mises en mode ON par une action de commande et exigent, pour passer en mode OFF, que le circuit externe contraigne le courant à zéro et applique ensuite une période de tension inversée. C'est pourquoi les essais visant à démontrer les angles d'extinction minimaux ou les transitoires de tension positive au cours de l'intervalle de rétablissement (qui s'avèrent tellement importants pour les valves à thyristor), n'ont aucune signification pour les valves à VSC.
- Dans ~~les~~ la plupart des valves à VSC, la valve n'est pas capable de supporter une tension inversée (car elle comporte 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 mise en mode ON de protection n'est généralement pas utilisée en raison du risque de créer un court-circuit dans le condensateur c.c., mais une mise en mode OFF de protection est employée comme un moyen permettant d'éliminer les surintensités. En revanche, dans les valves à thyristor CCHT classiques, la mise en mode ON de protection est largement utilisée et la mise en mode OFF de protection n'est pas possible.
- La grande capacité côté c.c. indique qu'en de rares circonstances, une unité de phase VSC peut expérimenter des transitoires de tension rapides entre les bornes. Dans les valves du type « à source de tension commandable » (où une partie de la capacité c.c. est intégrée dans la valve), la même remarque est également vraie en ce qui concerne les tensions entre les bornes de la valve.

Annexe B (informative)

Capacité de Tolérance aux pannes des composants de valves

La capacité de tolérance aux pannes peut se définir comme l'aptitude d'une valve à VSC en CCHT à assurer sa fonction prévue, jusqu'à son arrêt programmé, avec des composants ou sous-ensembles défectueux ou des composants surchargés, sans entraîner de dysfonctionnement inacceptable des autres composants, ni laisser s'étendre les dommages dus à la situation de panne. Des caractéristiques particulières de conception peuvent s'avérer nécessaires pour assurer la tolérance aux pannes. Des exemples de pannes, pour lesquelles la mise en œuvre de la tolérance aux pannes peut être exigée, sont indiqués ci-dessous.

a) Court-circuit ~~d'un IGBT ou d'une diode~~ d'une valve à VSC

Même si le court-circuit d'une ~~paire d'iode-IGBT ou d'une 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 circuits conducteurs de grille,~~ de surcharge des connexions de courant ~~(en cas de diode ou d'IGBT en parallèle)~~ ou de modification de la charge de serrage.

b) Manque de câbles sur grille au niveau de valve, provoqué par la perte d'impulsions normales sur grille au niveau en question

Manque de charges sur grilles pour la mise en parallèle de la surtension des composants au niveau concerné.

c) Dysfonctionnement de l'isolement d'un condensateur d'amortissement, d'une résistance d'amortissement ou d'autres composants, le cas échéant

Dysfonctionnement de l'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 danger.

d) Fuite de petites quantités de liquide de refroidissement de la valve

Si la valve est à refroidissement par liquide, de petites fuites peuvent s'avérer difficiles à détecter. Le liquide de refroidissement échappé est susceptible de contaminer des composants sensibles, d'entraîner un dysfonctionnement et d'augmenter le risque de dysfonctionnement de l'isolement.

Il convient que le client étudie la conception proposée avec le fournisseur afin de déterminer les risques et les conséquences probables de certains dysfonctionnements. Si nécessaire, il convient de considérer, ~~dans le programmes d'essai de type,~~ les résultats d'essais spéciaux visant à vérifier les aspects critiques de la capacité de tolérance aux pannes de la valve. Les détails de chacun de ces essais sont soumis à un accord établi au cas par cas.

Bibliographie

IEC 60146-2:1999, *Convertisseurs à semiconducteurs – Partie 2: Convertisseurs autocommutés à semiconducteurs y compris les convertisseurs à courant continu directs*

IEC PAS 61975:2004, *System tests for high-voltage direct current (HVDC) installations*

~~Rapport technique CIGRÉ B4-WG37, VSC Transmission~~

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

CIGRÉ Technical Brochure No. 269, *VSC Transmission*

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

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

FINAL VERSION

VERSION FINALE



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

CONTENTS

FOREWORD.....	5
1 Scope	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	7
3.1 Insulation co-ordination 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 Test object.....	11
4.1.3 Test procedure.....	11
4.1.4 Ambient temperature for testing.....	11
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.....	12
4.3 Treatment of redundancy	12
4.3.1 Operational tests.....	12
4.3.2 Dielectric tests	13
4.4 Criteria for successful type testing	13
4.4.1 General	13
4.4.2 Criteria applicable to valve levels	13
4.4.3 Criteria applicable to the valve as a whole	14
5 List of type tests	14
6 Operational tests	15
6.1 Purpose of tests	15
6.2 Test object	15
6.3 Test circuit	16
6.4 Maximum continuous operating duty test.....	16
6.5 Maximum temporary over-load operating duty test.....	17
6.6 Minimum d.c. voltage test	17
7 Dielectric tests on valve support structure	17
7.1 Purpose of tests	17
7.2 Test object	18
7.3 Test requirements.....	18
7.3.1 Valve support d.c. voltage test	18
7.3.2 Valve support a.c. voltage test	19
7.3.3 Valve support switching impulse test	19
7.3.4 Valve support lightning impulse test	20
8 Dielectric tests on multiple valve unit	20
8.1 Purpose of tests	20
8.2 Test object	20

8.3	Test requirements.....	20
8.3.1	MVU d.c. voltage test to earth	20
8.3.2	MVU a.c. voltage test	21
8.3.3	MVU switching impulse test.....	22
8.3.4	MVU lightning impulse test	23
9	Dielectric tests between valve terminals	23
9.1	Purpose of the test	23
9.2	Test object	24
9.3	Test requirements.....	24
9.3.1	Valve a.c. – d.c. voltage test	24
9.3.2	Valve impulse tests (general)	26
9.3.3	Valve switching impulse test.....	26
9.3.4	Valve lightning impulse test.....	27
10	IGBT overcurrent turn-off test	27
10.1	Purpose of test	27
10.2	Test object	28
10.3	Test requirements.....	28
11	Short-circuit current test	28
11.1	Purpose of tests	28
11.2	Test object	28
11.3	Test requirements.....	29
12	Tests for valve insensitivity to electromagnetic disturbance	29
12.1	Purpose of tests	29
12.2	Test object	29
12.3	Test requirements.....	30
12.3.1	General	30
12.3.2	Approach one	30
12.3.3	Approach two.....	30
12.3.4	Acceptance criteria	30
13	Production tests	31
13.1	Purpose of tests	31
13.2	Test object	31
13.3	Test requirements.....	31
13.4	Production test objectives	32
13.4.1	Visual inspection.....	32
13.4.2	Connection check	32
13.4.3	Voltage-grading circuit check	32
13.4.4	Control, protection and monitoring circuit checks	32
13.4.5	Voltage withstand check.....	32
13.4.6	Partial discharge tests.....	32
13.4.7	Turn-on / turn-off check.....	32
13.4.8	Pressure test	32
14	Presentation of type test results.....	32
15	Tests for dynamic braking valves	30
Annex A (informative)	Overview of VSC converters in HVDC power transmission	34
Annex B (informative)	Valve component fault tolerance.....	46
Bibliography		47

Figure A.1 – A single VSC phase unit and its idealized output voltage.....	35
Figure A.2 – Output voltage of a VSC phase unit for a 2-level converter.....	35
Figure A.3 – Output voltage of a VSC phase unit for a 15-level converter, without PWM	36
Figure A.4 – Basic circuit topology of one phase unit of a 2-level converter	37
Figure A.5 – Basic circuit topology of one phase unit of a 3-level diode-clamped converter	38
Figure A.6 – Basic circuit topology of one phase unit of a 5-level diode-clamped converter	38
Figure A.7 – Basic circuit topology of one phase unit of a 3-level flying capacitor converter	39
Figure A.8 – A single VSC phase unit with valves of the “controllable voltage source” type.....	40
Figure A.9 – The half-bridge MMC circuit.....	41
Figure A.10 – The full-bridge MMC circuit.....	41
Figure A.11 – The half-bridge CTL circuit	43
Figure A.12 – Construction terms in MMC valves	44
Figure A.13 – Construction terms in CTL valves	44
Table 1 – Minimum number of valve levels to be tested as a function of the number of valve levels per valve.....	11
Table 2 – Valve level faults permitted during type tests.....	14
Table 3 – List of type tests	15

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) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

This Consolidated version of IEC 62501 bears the edition number 1.1. It consists of the first edition (2009-06) [documents 22F/185/FDIS and 22F/193/RVD] and its amendment 1 (2014-08) [documents 22F/299/CDV and 22F/316A/RVC]. The technical content is identical to the base edition and its amendment.

This Final version does not show where the technical content is modified by amendment 1. A separate Redline version with all changes highlighted is available in this publication.

This publication has been prepared for user convenience.

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.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendment will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

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

IMPORTANT – The “colour inside” logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this publication 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 d.c. power transmission or as part of a back-to-back link. It is restricted to electrical type and production tests.

The scope of this standard includes the electrical type and production tests of dynamic braking valves which may be used in some HVDC schemes for d.c. overvoltage limitation.

This standard can be used as a guide for testing of STATCOM valves.

The tests specified in this standard are based on air insulated valves. For other types of valves, the test requirements and acceptance criteria should be agreed between the purchaser and the supplier.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application 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 60270:2000, *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*

IEC 60700-1:1998, *Thyristor valves for high voltage direct current (HVDC) power transmission – Part 1: Electrical testing*¹⁾

Amendment 1(2003)

Amendment (2008)

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

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

¹⁾ There exists a consolidated edition 1.2 (2008) that comprises IEC 60700-1, Amendment 1 and Amendment 2.

3.1 Insulation co-ordination 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 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 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 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 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 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 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.

3.4 VSC construction terms**3.4.1****VSC phase unit**

equipment used to connect the two d.c. busbars to one a.c. 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 a.c. terminal and one d.c. 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

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 See Figure A.13

3.4.9

VSC valve level

smallest indivisible functional unit of VSC valve

NOTE 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 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 half bridge arrangement, together with their immediate auxiliaries, storage capacitor, 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 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 For valves of controllable voltage source type the valve section shall include cell or submodule d.c. capacitor in addition to VSC valve levels.

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

3.5.5

valve base electronics

electronic unit, at earth potential, providing the electrical to optical conversion between the converter control system and the VSC valves

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 standard. If the valve is demonstrably similar to one previously tested, the supplier may, in lieu of performing a type test, 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.

4.1.2 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 8.2.

- a) Type tests may be performed either on a complete valve or, in certain circumstances, on valve sections, as indicated in Table 3.
- b) The minimum number of valve levels to be tested, depending on the valve levels in a single valve, is as shown in Table 1.

Table 1 – Minimum number of valve levels to be tested as a function of the number of valve levels per valve

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

- c) Generally, the same valve sections are recommended to be used for all type tests. However, with the agreement of the purchaser and supplier, 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 should 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. For operational tests, specific requirements regarding the frequency for testing are given in the relevant clauses.

NOTE Guidance on the worst service conditions can be found in CIGRÉ Technical Brochure No. 447.

4.1.6 Test reports

At the completion of the type tests, the supplier shall provide type test reports in accordance with Clause 14.

4.1.7 Conditions to be considered in determination of type test parameters

Type test parameters should 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 CIGRÉ 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_{1000m}).
 - 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 (°C);
- humidity: design minimum valve hall absolute humidity (g/m³).

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_{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 may be imposed upon the distribution of short-circuited valve levels. For example, there may 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_o :

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

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.

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, whichever is lower. 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 2.

Table 2 – 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
etc.			

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 3 lists the type tests given in Clauses 6 to 12.

Table 3 – 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 d.c. voltage test	6.6	Valve or valve section
Valve support d.c. voltage test	7.3.1	Valve support
Valve support a.c. voltage test	7.3.2	Valve support
Valve support switching impulse test	7.3.3	Valve support
Valve support lightning impulse test	7.3.4	Valve support
MVU d.c. voltage test to earth	8.3.1	MVU
MVU a.c. voltage test	8.3.2	MVU
MVU switching impulse test	8.3.3	MVU
MVU lightning impulse test	8.3.4	MVU
Valve a.c. – d.c. voltage test	9.3.1	Valve (or valve section if agreed between supplier and purchaser)
Valve switching impulse test	9.3.3	
Valve lightning impulse test	9.3.4	
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 if agreed between supplier and purchaser)

6 Operational tests

6.1 Purpose of tests

The principal objectives of the operational tests are:

- 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;
- 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. When required, a proportionally scaled valve arrester shall be included. The arrester shall be scaled to the number of series-connected levels under test to give a protective level which corresponds at least to the maximum characteristic of the service arrester.

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 d.c. capacitance, the d.c. 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 d.c. capacitor is separate from the valve, the d.c. capacitor needs to be correctly represented in the test circuit. In particular, the series-stray inductance in the connections between the d.c. 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 continuous IGBT junction temperatures;
- maximum continuous FWD junction temperatures;
- maximum continuous snubber component temperatures;
- maximum continuous turn-on and turn-off voltage and current.

For diode valves:

- maximum continuous diode junction temperature;
- maximum continuous snubber component temperatures;
- maximum continuous 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 r.m.s. value, shall incorporate a test safety factor of 1,05.

The test voltage U_{tpv1} corresponding to the maximum continuous operating d.c. voltage shall be determined as follows:

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

where

U_{dmax} is the maximum continuous operating d.c. voltage, including ripple;

k_n is a test scaling factor according to 4.3.1;

k_1 is a test safety factor;

$k_1 = 1,05$.

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.

The test conditions, where required, shall be determined using the same methodology as in 6.4 above.

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 duty test, 10 min maximum continuous operating duty test shall be performed.

6.6 Minimum d.c. 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 d.c. 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 databack signals from the valve electronics.

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

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

where

U_{W} is the lowest d.c. voltage across one valve in service operation where proper function of the valve electronics is required;

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

N_{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 may 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 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

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

7.3.1 Valve support d.c. voltage test

The two main terminals of the valve shall be connected together and the d.c. voltage then applied between the two main terminals thus connected and earth. Starting from a voltage not higher than 50 % of the maximum 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 Annex B of IEC 60700-1.

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.

NOTE 1 Where possible the test voltage should be increased from 50 % to the maximum voltage level within approximately 10 s. A longer time may be used; however, this may overstress the test object.

NOTE 2 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 d.c. voltage test.

The valve support d.c. test voltage U_{tds} shall be determined in accordance with the following:

1 min. test

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

3 h test

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

where

U_{dmS1} is the maximum of 1 s average value of voltage appearing across the valve support as determined by the insulation coordination study;

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

k_3 is a test safety factor;

$k_3 = 1,1$;

k_t is the atmospheric correction factor according to 4.2;

7.3.2 Valve support a.c. voltage test

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

Starting from a voltage not higher than 50 % of the maximum 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 r.m.s. value of the valve support a.c. test voltage U_{tas} shall be determined in accordance with the following:

$$U_{tas} = \frac{U_{mS}}{\sqrt{2}} \cdot k_r \cdot k_4 \cdot k_t$$

where

U_{mS} 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;

$k_4 = 1,3$ for the 1 min test;

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

k_t is the atmospheric correction factor;

k_t is the value according to 4.2 for the 1 min test;

$k_t = 1,0$ for the 30 min test;

k_r is the temporary overvoltage factor;

k_r is the value determined from system studies for the 1 min test;

$k_r = 1,0$ for the 30 min test.

7.3.3 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 co-ordination of the VSC substation.

7.3.4 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 co-ordination of the VSC substation.

8 Dielectric tests on multiple valve unit

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.

8.1 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.

8.2 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.

8.3 Test requirements

8.3.1 MVU d.c. voltage test to earth

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

Starting from a voltage not higher than 50 % of the maximum 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.

NOTE 1 Where possible the test voltage should be increased from 50 % to the maximum voltage level within approximately 10 s. A longer time may be used; however, this may overstress the test object.

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.

NOTE 2 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 d.c. voltage test.

The MVU d.c. test voltage U_{tdm} shall be determined in accordance with the following:

1 min. test

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

3 h test

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

where

U_{dmm1} is the maximum of 1 s average value of voltage appearing between the high-voltage terminal of the MVU and earth;

U_{dmm2} is the maximum value of the d.c. 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;

$k_5 = 1,1$;

k_t is the atmospheric correction factor according to 4.2.

8.3.2 MVU a.c. voltage test

If a MVU experiences a.c. or composite a.c. plus d.c. 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 a.c. 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 r.m.s. value of the MVU a.c. test voltage U_{tam} shall be determined in accordance with the following:

$$U_{\text{tam}} = \frac{U_{\text{mm}}}{\sqrt{2}} \cdot k_r \cdot k_6 \cdot k_t$$

where

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

k_6 is a test safety factor;

$k_6 = 1,3$ for the 1 min test;

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

k_r is the temporary overvoltage factor;

k_r is the value determined from system studies for the 1 min test;

$k_r = 1,0$ for the 30 min test;

k_t is the atmospheric correction factor;

k_t is the value according to 4.2 for the 1 min test;

$k_t = 1,0$ for the 30 min test.

8.3.3 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:

$$U_{\text{tsm}} = \pm SIPL_m \cdot k_7 \cdot k_t$$

where

$SIPL_m$ is the switching impulse protective level determined by insulation co-ordination 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:

- 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.

8.3.4 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_{tlim} shall be determined in accordance with the following:

$$U_{tlim} = \pm LIPL_m \cdot k_g \cdot k_t$$

where

$LIPL_m$ 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_g is a test safety factor;

$k_g = 1,10$;

k_t is the atmospheric correction factor;

k_t is the value according to 4.2.

If it cannot be demonstrated that the test prescribed above adequately tests 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 (d.c., a.c., switching impulse and lightning impulse overvoltages). The tests should 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 have sufficient power rating;
- d) the valve electronic circuits behave as expected.

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 a.c. 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.

9.2 Test object

The test object should generally be a complete valve. 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.

For all impulse tests, the valve electronics shall be energized unless otherwise specified.

If valve section is used as test object, the minimum number of valve levels in the test section should 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. Earth planes shall be used, whose separation shall be determined by the proximity of other adjacent valves and earth potential surfaces.

The test object used for the valve dielectric tests will normally not permit the application of atmospheric correction to the specified test voltages without overstressing the internal components. For this reason, no atmospheric correction factor is applied to any of the dielectric tests between valve terminals. The supplier shall demonstrate that the effects of atmospheric conditions on the valve internal withstand have been allowed for adequately.

9.3 Test requirements

9.3.1 Valve a.c. – d.c. voltage test

This test consists of a short-duration test and a long-duration test. The short-duration test reproduces the composite a.c. – d.c. voltage resulting from certain converter or system faults.

In this test, a capacitor can be used in conjunction with an a.c. test voltage source to produce a composite a.c. – d.c. 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 d.c. voltage source could be used to substitute the capacitor.

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

For a.c. PD (partial discharge) measurement, the peak value of the periodic partial discharge recorded during the last minute of the 3h 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 d.c. 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 Performing the valve a.c. – d.c. voltage test presents considerable practical difficulties on valves of the “controllable voltage source” type because of the high current drawn by the in-built capacitance during start-up and the slow discharge rate of the capacitor at the end of the first part of the test. For this reason, it may be necessary to modify the test procedure when testing valves of this type. Alternative test methods to be considered include the temporary substitution of a special test capacitor with reduced capacitance but the same physical size, or the pre-charging of the cell or submodule d.c. capacitor from a separate source before commencing the test.

NOTE 2 Where possible the test voltage should be increased from 50 % to the maximum voltage level within approximately 10 s. A longer time may be used; however, this overstresses the test object.

NOTE 3 If an increasing trend in the rate or magnitude of partial discharge is observed, the test duration may be extended by mutual agreement between the purchaser and supplier.

NOTE 4 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.

NOTE 5 In the event that 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.

NOTE 6 The use of a capacitor instead of a d.c. source in the test circuit should be mutually agreed by manufacturer and purchaser as the test voltage is higher than actual value.

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

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

$$U_{tv1} = (k_{c1} \cdot U_{tac1} \cdot \sin(2\pi ft) + U_{tdc1}) \cdot k_o \cdot k_9$$

where

U_{ac1} is the peak value of maximum transient a.c. component over-voltage across valve. The limiting effect of valve arrester or pole arrester can be taken into account to derive the over-voltage in service condition;

U_{dc1} is the maximum transient d.c. component over-voltage across valve. The limiting effect of valve arrester or pole arrester can be taken into account to derive the over-voltage in service condition;

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_{ac1} . For a MMC or CTL type converter the voltage step overshoot factor relates to the overshoot factor of one cell or submodule;

k_o is a test scaling factor according to 4.3.2;

k_9 is a test safety factor;

$k_9 = 1,10$;

f is the test frequency (50 Hz or 60 Hz depending on test facilities).

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

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

$$U_{tac2} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\max-\text{cont}} \cdot \sin(2\pi ft)}{\sqrt{3}} \cdot k_{c2} \cdot k_o \cdot k_{10}$$

$$U_{tdc2} = U_{d\max} \cdot k_o \cdot k_{10}$$

where

$U_{\text{max-cont}}$	is the maximum steady-state phase-to-phase voltage on the a.c. system or the valve side of the transformer, if a converter transformer is used in between a.c. system and converters;
U_{dmax}	is the maximum value of the d.c. component of the steady-state operating voltage of the d.c. system;
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} ;
k_o	is a test scaling factor according to 4.3.2;
k_{10}	is a test safety factor;
k_{10}	= 1,10;
f	is the test frequency (50 Hz or 60 Hz depending on test facilities).

9.3.2 Valve impulse tests (general)

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

- For some applications, for instance no overhead line is present in d.c. side and the busbar between phase reactor and valves is completely protected against direct lightning strike in a.c. side or in topologies, where the valve acts as a controllable voltage source with its own inbuilt d.c. capacitance, the valve impulse tests are less important since the valves don't see impulses at an amplitude which could be decisive in the electric performance of valves. Impulse tests in such applications can be omitted.
- The impulse test will be applied only in one polarity which corresponds to the polarity of valve withstand voltage.
- If the valve impulse withstand levels are equal to or less than the valve a.c. – d.c. test level, it is deemed that the valve a.c. – d.c. test can cover the impulse tests and consequently the impulse tests can be omitted.

9.3.3 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:

$$U_{\text{tsv}} = SIPL_v \cdot k_o \cdot k_{11}$$

where

- $SIPL_v$ is the switching impulse protective level of the valve arrester;
- k_o 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.

$$U_{\text{tsv}} = U_{\text{cms}} \cdot k_o \cdot k_{12}$$

U_{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.

9.3.4 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_{tlv} shall be determined in accordance with the following.

- Valve with valve surge arrester protection:

$$U_{tlv} = LIPL_V \cdot k_0 \cdot k_{13}$$

where

$LIPL_V$ is the lightning impulse protective level of the valve arrester;

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.

$$U_{tlv} = U_{cml} \cdot k_0 \cdot k_{14}$$

where

U_{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 d.c. capacitor, loop stray inductance, etc. are as stated in 6.3.

10.2 Test object

As described in 6.2. However, it shall also be necessary to represent certain protection or monitoring circuits if these are essential for the detection of an overcurrent event.

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.

The test voltage U_{tpv2} corresponding to the maximum temporary d.c. over-voltage shall be determined as follows:

$$U_{\text{tpv2}} = U_{\text{dtemp}} \cdot k_n \cdot k_{15}$$

where

U_{dtemp} is the maximum temporary d.c. over-voltage, including ripple;

k_n is a test scaling factor according to 4.3.1;

k_{15} is a test safety factor;

$k_{15} = 1,05$.

The test current waveform in the time interval between detection of the overcurrent and the instant of turn-off of the IGBTs should be representative of the service condition, particularly in terms of current rate-of-rise di/dt.

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 d.c. side, until the control and protection circuit breaks the fault current. The VSC valves should 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. The test should normally be performed with the valve electronics initially energized, unless the short-circuit current can occur under conditions where the valve is de-energized (for example due to the inrush current when the converter breaker is closed at start-up).

11.2 Test object

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 should be the maximum values expected in the actual field operation. No test safety factor is applied to the current.

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.

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 and the valve maximum continuous operating duty test and maximum temporary overload operating duty test (see 6.4 and 6.5), the valve impulse test (see 9.3.3 and 9.3.4) 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 standard, 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 standard.

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.

NOTE The specific geometric arrangement to be used and the magnitude of the forward voltage for the electromagnetic disturbance test object should be agreed, based on the design of MVU.

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.

15 Tests for dynamic braking valves

In some VSC HVDC schemes, but particularly where the HVDC system is exporting power from a small islanded a.c. 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 d.c. 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 a.c. 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.

13 Production tests

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.

13.1 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.

13.2 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.

13.3 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 13.4. The order in which the tests are listed implies neither ranking of importance nor the order in which the tests should be performed.

NOTE 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 should be agreed on a case-by-case basis.

13.4 Production test objectives

13.4.1 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.

13.4.2 Connection check

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

13.4.3 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 d.c. to impulse waveshapes, if applicable.

13.4.4 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.

13.4.5 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 a.c. – d.c. test voltage and switching impulse as applicable.

13.4.6 Partial discharge tests

To demonstrate correct manufacture, the purchaser and supplier shall agree which components and subassemblies are critical to the design, and appropriate partial discharge tests shall be performed.

13.4.7 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.

13.4.8 Pressure test

To check that there are no coolant leaks.

14 Presentation of type test results

The 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;

+AMD1:2014 CSV © IEC 2014

- 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.

Annex A (informative)

Overview of VSC converters in HVDC power transmission

A.1 General

Voltage sourced converter (VSC) valves are an emerging 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 current-sourced 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 d.c. capacitor, which plays an analogous role to the d.c. inductor (which may partly be fulfilled by the inductance of the d.c. 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.

A.2 VSC basics

All voltage sourced converters aim to synthesize, from the d.c. capacitor voltage, an approximately sinusoidal voltage at the a.c. 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.

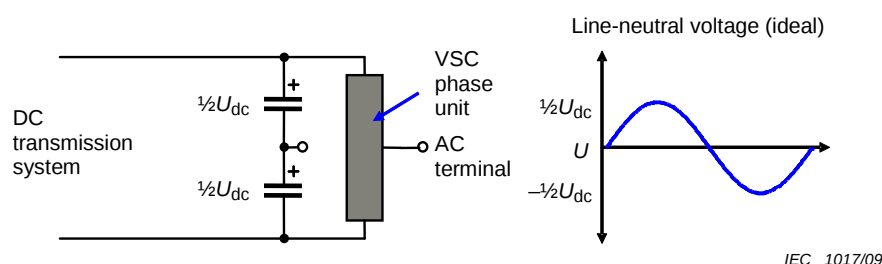


Figure A.1 – A single VSC phase unit and its idealized output voltage

In the simplest possible VSC topology, the “two-level converter”, the a.c. output voltage of each phase arm (with respect to the midpoint of the d.c. 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 a.c. 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.

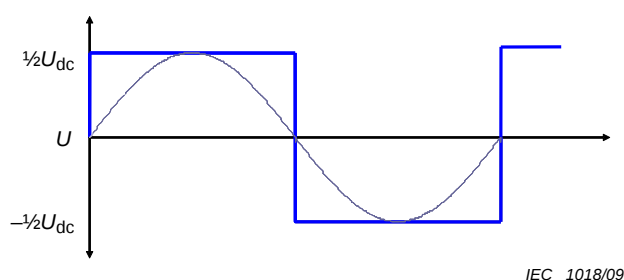


Figure A.2a – Without PWM

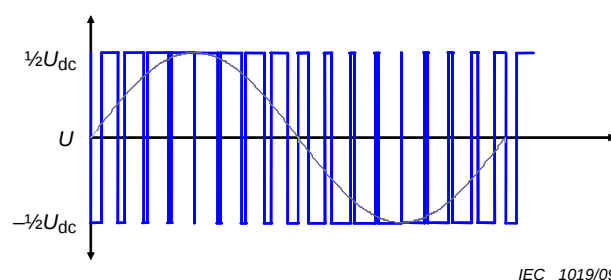


Figure A.2b – With PWM

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.

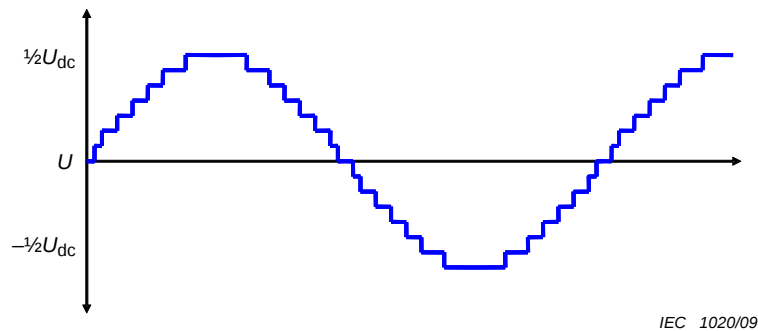


Figure A.3 – Output voltage of a VSC phase unit for a 15-level converter, without PWM

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.

- VSC valves of the “switch” type. 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 d.c. capacitors are completely separated from the valves and can be tested in isolation.
- VSC valves of the “controllable voltage source” type. In valves of this type, the d.c. 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 VSC valves of the “switch” type

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 a.c. 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 a.c. terminal is connected to the upper d.c. terminal and therefore produces an output voltage of $+\frac{1}{2}U_{dc}$. When V2 is conducting, the a.c. terminal is connected to the lower d.c. terminal and therefore produces an output voltage of $-\frac{1}{2}U_{dc}$.

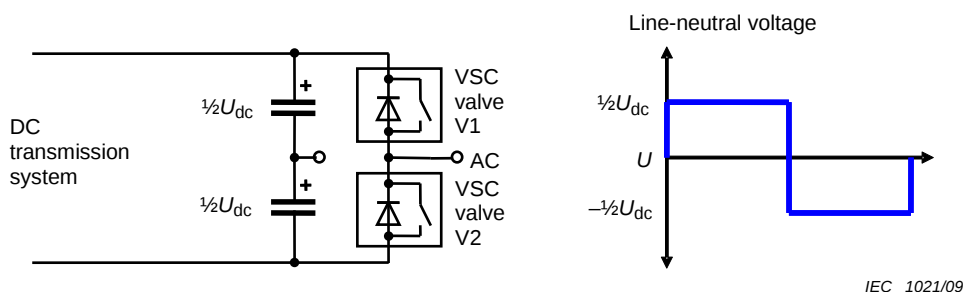


Figure A.4 – Basic circuit topology of one phase unit of a 2-level converter

A.4.3 Multi-level diode clamped converter

In this family of converters, the d.c. 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 d.c. 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 d.c. capacitor is subdivided into two series-connected units (as it frequently is for a 2-level converter). The a.c. 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 d.c. midpoint via diode valves.

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

The same principle can be extended to higher numbers of levels by further subdividing the d.c. capacitor and using more VSC and diode valves. In a 5-level converter, the d.c. 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.

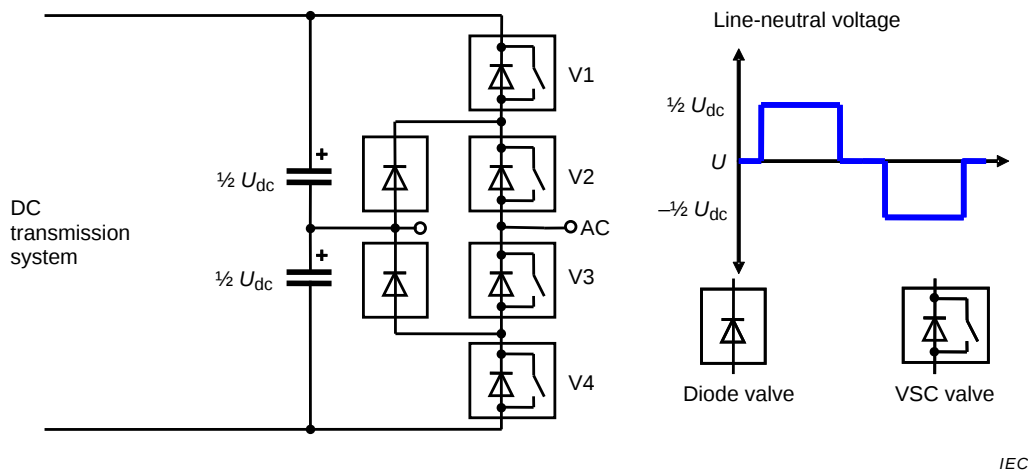


Figure A.5 – Basic circuit topology of one phase unit of a 3-level diode-clamped converter

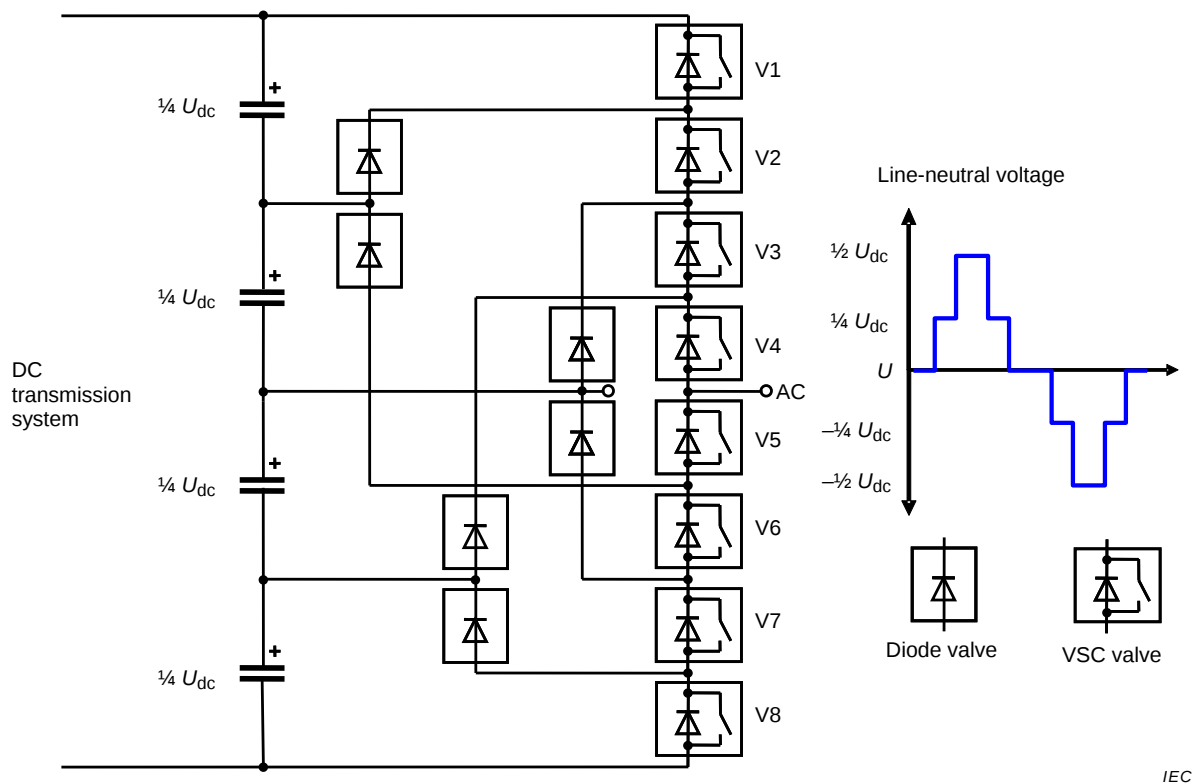


Figure A.6 – Basic circuit topology of one phase unit of a 5-level diode-clamped converter

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 d.c. capacitor stages, it uses one or more additional d.c. capacitors, which are isolated from the

d.c. 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.

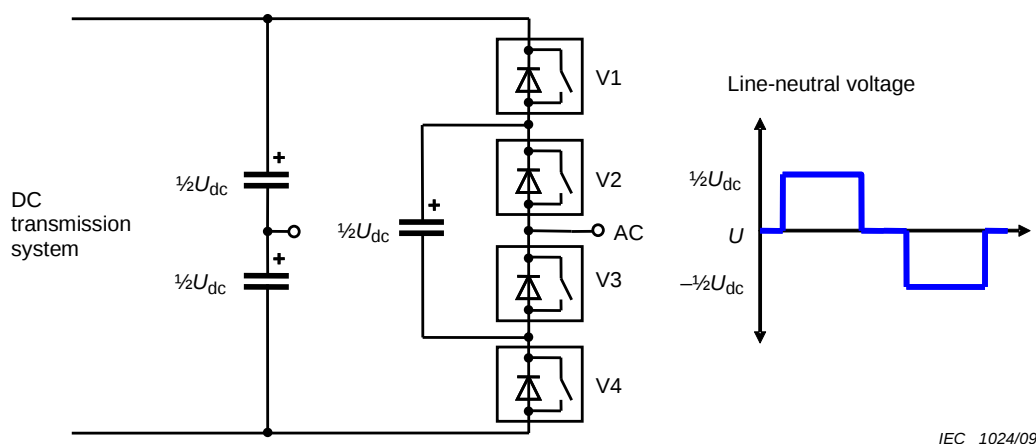


Figure A.7 – Basic circuit topology of one phase unit of a 3-level flying capacitor converter

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 VSC valves of the “controllable voltage source” type

A.5.1 General

In the 2-level converter, the valves and d.c. 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 Subclause A.4.3 and A.4.4 that the d.c. capacitor(s) become increasing subdivided and the valves and d.c. 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 d.c. 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 d.c. capacitors. In effect, such a valve is no longer simply a switch but is now a controllable voltage source, connected between the a.c. terminal of the corresponding phase unit, and one of the d.c. terminals (see Figure A.8).

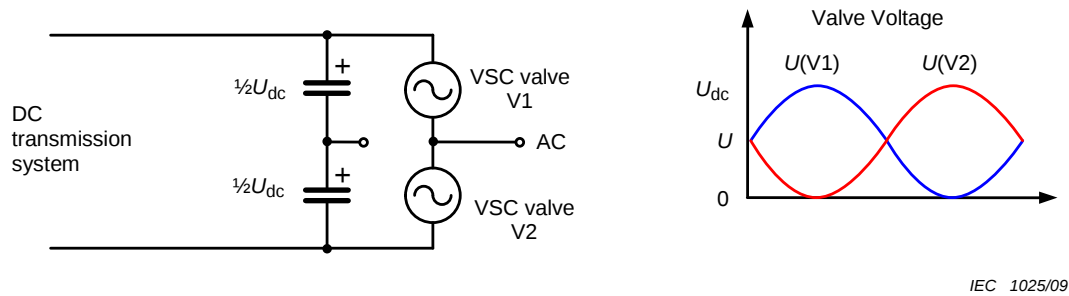


Figure A.8 – A single VSC phase unit with valves of the “controllable voltage source” type

Each of the valves V1 and V2 in the phase unit produces an output voltage consisting of a sinusoidal a.c. component with a d.c. 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).

Since the 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). On the other hand, the number and size of discrete d.c. capacitors required can be considerable, and there may be difficulties in ensuring that all d.c. 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.5.2 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 d.c. 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 a.c. terminal (between IGBT1 and IGBT2) of one submodule, to one of the d.c. 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 d.c. link voltage of a single submodule, which is much less than U_{dc} , the d.c. 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 d.c. 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.

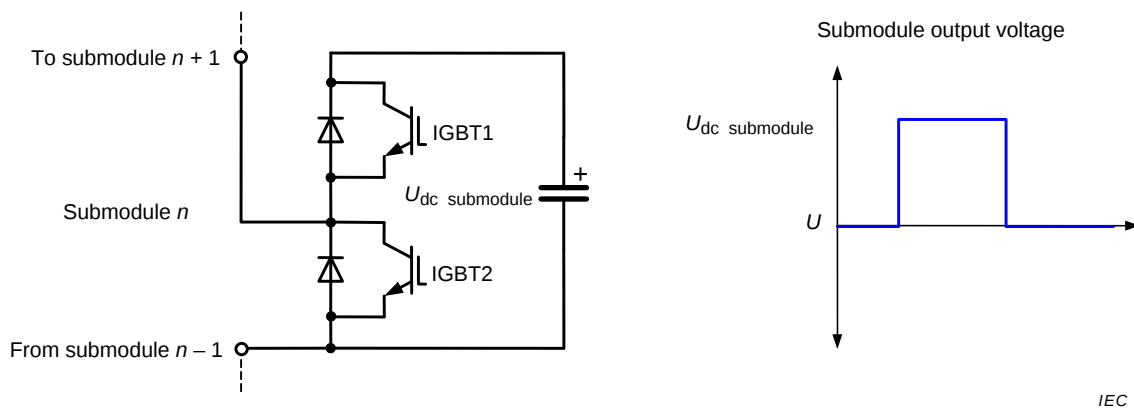


Figure A.9 – The half-bridge MMC circuit

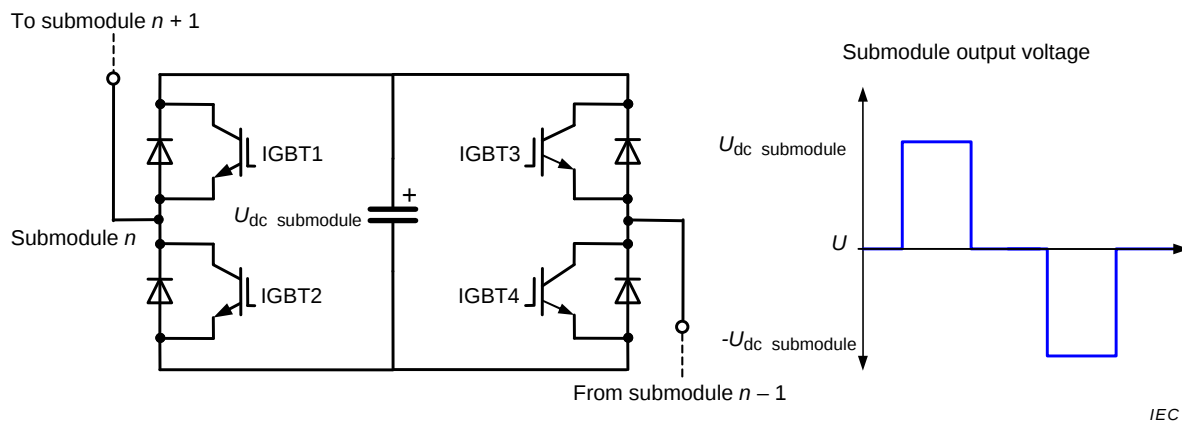


Figure A.10 – The full-bridge MMC circuit

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 d.c. line, the additional flexibility provided by the circuit allows the a.c. component of valve voltage to exceed the d.c. component (which is not possible with the half-bridge circuit), resulting in a lower a.c. current in the valve. In addition, the ability to suppress fault currents arising from short-circuits between the d.c. 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 d.c. capacitors required can be considerable, and there may be difficulties in ensuring that all d.c. 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 consist of n IGBTs in series, switched synchronously, and the cell d.c. capacitor will operate at approximately n times the voltage of a submodule d.c. 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.

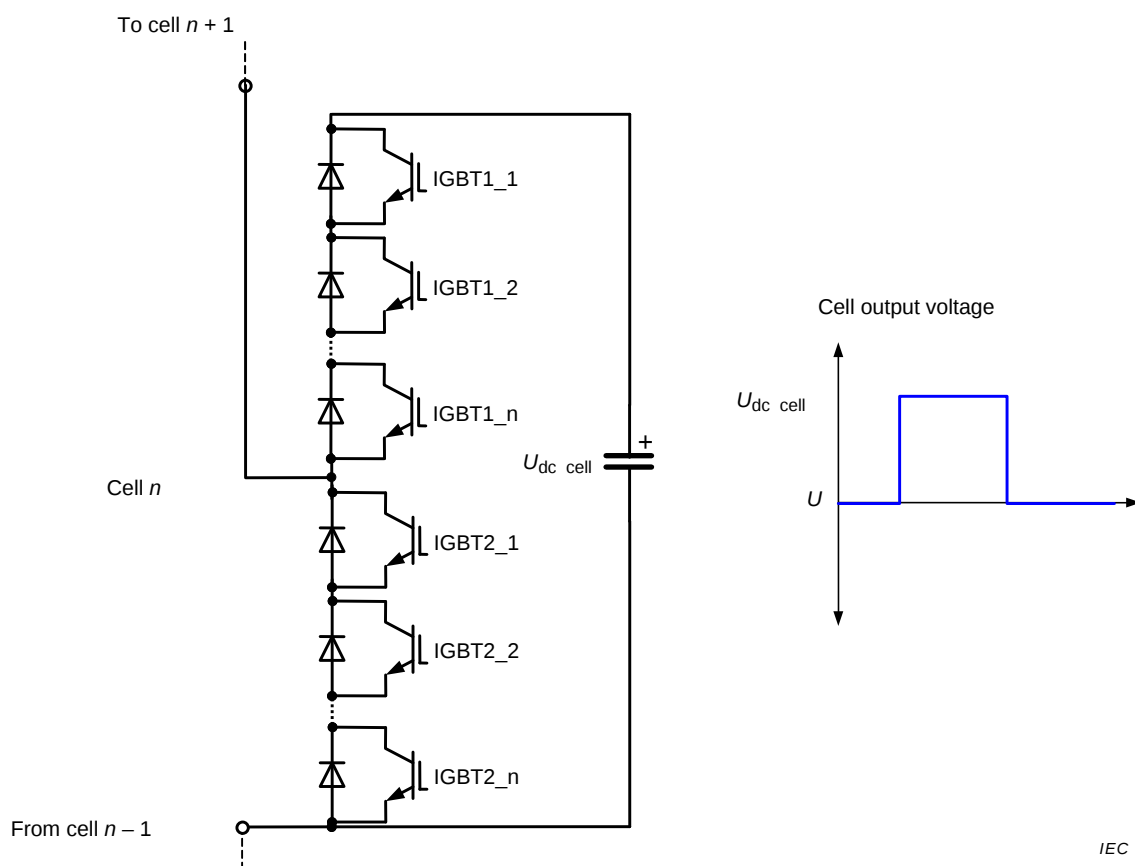


Figure A.11 – The half-bridge CTL circuit

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

Figures A.12 and 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.

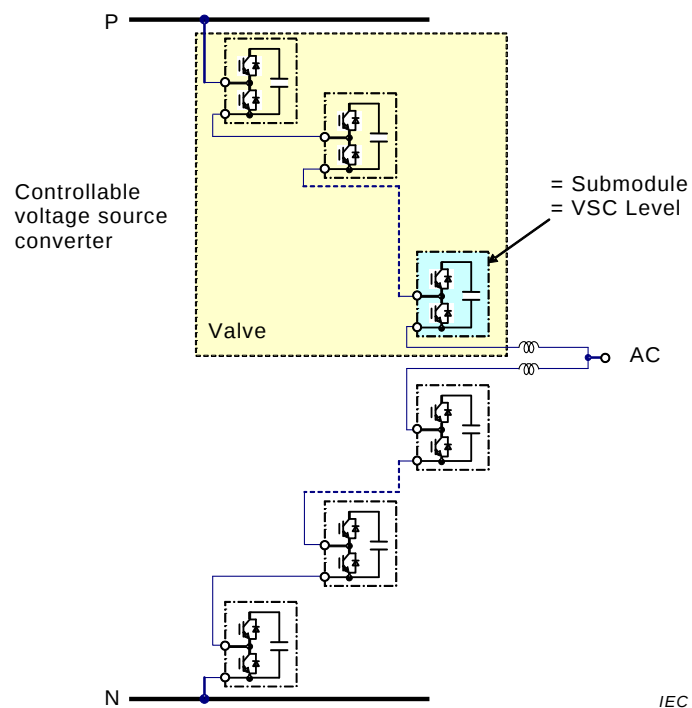


Figure A.12 – Construction terms in MMC valves

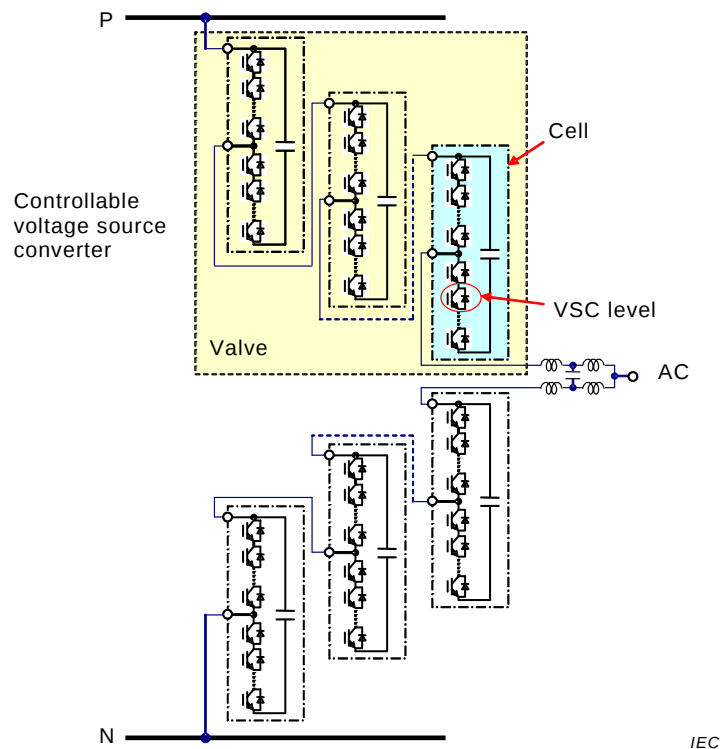


Figure A.13 – Construction terms in CTL valves

A.7 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 CIGRÉ Technical Brochure No. 492.

A.6 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 d.c. 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 d.c.-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 d.c. 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. Examples of faults for which fault tolerance may be required are given below.

a) Short circuit of a VSC valve

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.

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.

Bibliography

IEC 60146-2:1999, *Semiconductor converters – Part 2: Self-commutated semiconductor converters including direct d.c. converters*

IEC PAS 61975:2004, *System tests for high-voltage direct current (HVDC) installations*

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

CIGRÉ Technical Brochure No. 269, *VSC Transmission*

CIGRÉ 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*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	51
1 Domaine d'application	53
2 Références normatives	53
3 Termes et définitions	53
3.1 Termes relatifs à la coordination de l'isolement	54
3.2 Termes relatifs au semi-conducteur de puissance	54
3.3 États de fonctionnement du convertisseur	54
3.4 Termes relatifs à la construction du VSC	55
3.5 Termes relatifs à la structure de la valve	56
4 Exigences générales	57
4.1 Lignes directrices pour l'exécution des essais de type	57
4.1.1 Autres éléments pouvant faire office de preuve	57
4.1.2 Objet d'essai	57
4.1.3 Procédure d'essai	58
4.1.4 Température ambiante pour les essais	58
4.1.5 Fréquence des essais	58
4.1.6 Rapports d'essai	58
4.1.7 Conditions à prendre en considération pour la détermination des paramètres des essais de type	58
4.2 Facteur de correction atmosphérique	58
4.3 Traitement de la redondance	59
4.3.1 Essais de fonctionnement	59
4.3.2 Essais diélectriques	59
4.4 Critères pour des essais de type réussis	59
4.4.1 Généralités	59
4.4.2 Critères applicables aux niveaux de valve	60
4.4.3 Critères applicables à l'ensemble de la valve	61
5 Liste des essais de type	61
6 Essais de fonctionnement	62
6.1 Objectif des essais	62
6.2 Objet d'essai	62
6.3 Circuit d'essai	63
6.4 Essai de contrainte en fonctionnement continu maximal	63
6.5 Essai de contrainte en fonctionnement en surcharge temporaire maximale	64
6.6 Essai de tension c.c. minimale	64
7 Essais diélectriques sur la structure de support de valve	65
7.1 Objectif des essais	65
7.2 Objet d'essai	65
7.3 Exigences relatives aux essais	65
7.3.1 Essai de tension c.c. du support de valve	65
7.3.2 Essai de tension c.a. du support de valve	66
7.3.3 Essai d'impulsion de commutation de support de valve	67
7.3.4 Essai d'impulsion de foudre du support de valve	67
8 Essais diélectriques sur une unité de valves multiples	67
8.1 Objectif des essais	67
8.2 Objet d'essai	67

8.3	Exigences relatives aux essais	68
8.3.1	Essai de tension c.c. de la MVU à la terre	68
8.3.2	Essai de tension c.a. de la MVU	69
8.3.3	Essai d'impulsion de commutation de la MVU	70
8.3.4	Essai d'impulsion de foudre de la MVU	70
9	Essais diélectriques entre les bornes de la valve	71
9.1	Objectif de l'essai	71
9.2	Objet d'essai	71
9.3	Exigences relatives aux essais	72
9.3.1	Essai de tension c.a. – c.c. de la valve	72
9.3.2	Essais d'impulsion de la valve (généralités)	74
9.3.3	Essai d'impulsion de commutation de la valve	74
9.3.4	Essai d'impulsion de foudre de la valve	75
10	Essai de mise hors tension de l'IGBT en cas de surintensité	76
10.1	Objectif de l'essai	76
10.2	Objet d'essai	76
10.3	Exigences relatives à l'essai	76
11	Essai de courant de court-circuit	76
11.1	Objectif des essais	76
11.2	Objet d'essai	77
11.3	Exigences relatives aux essais	77
12	Essai d'insensibilité de la valve aux perturbations électromagnétiques	77
12.1	Objectif des essais	77
12.2	Objet d'essai	78
12.3	Exigences relatives aux essais	78
12.3.1	Généralités	78
12.3.2	Première approche	78
12.3.3	Deuxième approche	78
12.3.4	Critères d'acceptation	79
13	Essais de production	79
13.1	Objectif des essais	79
13.2	Objet d'essai	80
13.3	Exigences relatives aux essais	80
13.4	Objectifs des essais de production	80
13.4.1	Examen visuel	80
13.4.2	Vérification de la connexion	80
13.4.3	Vérification du circuit d'évaluation de la tension	80
13.4.4	Vérification des circuits de commande, de protection et de surveillance	80
13.4.5	Vérification de la tenue en tension	81
13.4.6	Essais de décharge partielle	81
13.4.7	Vérification de la mise sous / hors tension	81
13.4.8	Essais de pression	81
14	Présentation des résultats d'essais de type	81
15	Essais pour les valves à freinage dynamique	79
Annexe A (informative) Vue d'ensemble des convertisseurs VSC dans le cadre du transport d'énergie CCHT		82
Annexe B (informative) Tolérance aux pannes des composants de valves		94

Bibliographie.....	95
Figure A.1 – Une unité de phase VSC unique et sa tension de sortie idéale.....	83
Figure A.2 – Tension de sortie d'une unité de phase VSC pour un convertisseur à 2 niveaux.....	83
Figure A.3 – Tension de sortie d'une unité de phase VSC pour un convertisseur à 15 niveaux, sans MLI.....	84
Figure A.4 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur à 2 niveaux.....	85
Figure A.5 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur lié à une diode à 3 niveaux.....	86
Figure A.6 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur lié à une diode à 5 niveaux.....	86
Figure A.7 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur à condensateur volant à 3 niveaux.....	87
Figure A.8 – Une unité de phase VSC unique avec des valves du type «source de tension commandable».....	88
Figure A.9 – Circuit MMC en demi-pont.....	89
Figure A.10 – Circuit MMC en pont intégral.....	89
Figure A.11 – Circuit CTL en demi-pont.....	91
Figure A.12 – Termes relatifs à la construction des valves du type MMC.....	92
Figure A.13 – Termes relatifs à la construction des valves du type CTL.....	92
Tableau 1 – Nombre minimal de niveaux de valve à essayer en fonction du nombre de niveaux de valve par valve.....	57
Tableau 2 – Pannes de niveau de valve autorisées au cours des essais de type.....	61
Tableau 3 – Liste des essais de type.....	62

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. A 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'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

Cette version consolidée de l'IEC 62501 porte le numéro d'édition 1.1. Elle comprend la première édition (2009-06) [documents 22F/185/FDIS et 22F/193/RVD] et son amendement 1 (2014-08) [documents 22F/299/CDV et 22F/316A/RVC]. Le contenu technique est identique à celui de l'édition de base et à son amendement.

Cette version Finale ne montre pas les modifications apportées au contenu technique par l'amendement 1. Une version Redline montrant toutes les modifications est disponible dans cette publication.

Cette publication a été préparée par commodité pour l'utilisateur.

L'IEC 62501 a été établie par le sous-comité 22F: Electronique 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.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de son amendement ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IMPORTANT – Le logo "*colour inside*" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication 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 autocommuté, conçues pour être utilisées dans un convertisseur de source de tension (VSC, valve sourced converter en anglais) en pont triphasé pour le transport d'énergie en courant continu à haute tension ou en tant qu'élément d'une liaison dos-à-dos. Elle se limite aux essais de type électrique et de production.

Le domaine d'application de la présente norme inclut les essais de type électrique et de production des valves à freinage dynamique qui peuvent être utilisées dans certains systèmes CCHT destinés à limiter la surtension à courant continu.

La présente norme peut être utilisée comme guide pour l'essai des valves STATCOM.

Les essais spécifiés dans la présente norme sont établis à partir de valves dans l'air. Pour les autres types de valves, il convient que les exigences relatives aux essais et les critères d'acceptation fassent l'objet d'un accord entre le client et le fournisseur.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application 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 (y compris les éventuels amendements) s'applique.

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

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

IEC 60270:2000, *Techniques des essais à haute tension – Mesures des décharges partielles*

IEC 60700-1:1998, *Valves à thyristors pour le transport d'énergie en courant continu à haute tension (CCHT) – Partie 1: Essais électriques*¹⁾

Amendement 1(2003)

Amendement (2008)

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 définitions suivants s'appliquent.

¹⁾ Il existe une édition consolidée 1.2 (2008) comprenant l'IEC 60700-1, l'Amendement 1 et l'Amendement 2.

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 valve neuve, dont l'intégrité est intacte, n'indique aucune décharge disruptive et satisfait à l'ensemble des critères d'acceptation spécifiés pour cet essai particulier, lorsqu'elle est soumise à un nombre spécifié d'applications ou à une durée spécifiée de tension d'essai, dans des conditions spécifiées

3.1.2

isolement interne

air extérieur aux composants et aux matériaux d'isolement de la valve mais contenu dans le profil de la valve ou dans l'unité de valve multiple

3.1.3

isolement externe

air situé entre la surface externe de la valve ou de l'unité de valve multiple et son environnement

3.2 Termes relatifs au semi-conducteur de puissance

3.2.1

dispositif à semi-conducteur blocable

dispositif à semi-conducteur commandable qui peut être réactivé et coupé par un signal de commande, par exemple, un transistor bipolaire à grille isolée (ou IGBT)

NOTE Il existe plusieurs types de dispositifs à semi-conducteur blocables qui peuvent être utilisés dans les convertisseurs VSC en courant continu à haute tension (CCHT). Pour des raisons pratiques, le terme IGBT est utilisé tout au long de la présente norme pour faire référence au principal dispositif à semi-conducteur blocable. Cependant, la norme s'applique également aux autres types de dispositif à semi-conducteur blocable.

3.2.2

transistor bipolaire à grille isolée

IGBT (*insulated gate bipolar transistor* en anglais)

dispositif à semi-conducteur blocable à trois bornes: une borne de grille (G) et deux bornes de charge: émetteur (E) et collecteur (C).

NOTE En appliquant la grille appropriée aux tensions de l'émetteur, le courant de charge peut être commandé, c'est-à-dire être coupé ou réactivé.

3.2.3

diode de roue libre

DRL

dispositif à semi-conducteur de puissance ayant les caractéristiques d'une diode

NOTE 1 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 Les DRL sont caractérisées par leur capacité à faire face à des chutes brutales de courant dues au comportement de commutation de l'IGBT.

3.2.4

paire diode-IGBT

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 de blocage

situation du convertisseur dans laquelle un signal de mise hors tension est appliqué de manière continue à tous les IGBT du convertisseur

NOTE Généralement, le convertisseur est à l'état de blocage après la mise sous tension.

3.3.2

état débloqué

situation du convertisseur dans laquelle des signaux de mise sous tension et de mise hors tension sont appliqués de manière répétitive à tous les 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 mise hors tension d'urgence de tous les IGBT dans une ou plusieurs valves

3.3.4

niveau de palier de tension

palier de tension provoqué par la commutation d'une valve ou d'une partie d'une valve lors de l'état débloqué du convertisseur

NOTE Pour les valves du 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 du type commutateur, le niveau de palier de tension correspond à la variation de tension due à la commutation de la valve entière.

3.4 Termes relatifs à la construction du VSC

3.4.1

unité de phase du VSC

équipement utilisé pour connecter les deux barres omnibus c.c. à une borne c.a.

3.4.2

valve à VSC du type «commutateur»

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

3.4.3

valve à VSC du type à source de tension commandable

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

3.4.4

valve à diode

valve à semi-conducteur comprenant uniquement des diodes comme principaux dispositifs à semi-conducteur, 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

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 intégral, ainsi que leurs auxiliaires immédiats et condensateur 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 où chaque position de commutateur se compose de deux paires diode-IGBT ou plus connectées en série

NOTE Voir Figure A.13.

3.4.9 **niveau de valve à VSC**

plus petite unité fonctionnelle indivisible d'une valve à VSC

NOTE 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 diode-IGBT, y compris ses auxiliaires (voir Figure A.13). Pour un type MMC sans paires diode-IGBT 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 de ses 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 supporter un court-circuit externe ou interne sans que le fonctionnement sécurisé de la valve n'en soit altéré, comme il est démontré par les essais de type, et qui, en cas de dépassement, entraîne l'arrêt de la valve pour permettre le remplacement des niveaux défectueux ou l'acceptation d'un risque accru de dysfonctionnements

NOTE 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 dénombrés 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 bien des commutateurs et des diodes commandables connectés en parallèle, ou encore des commutateurs et des diodes commandables connectés en demi-pont, ainsi que leurs auxiliaires immédiats et condensateur de stockage, le cas échéant

3.5 Termes relatifs à la structure de la valve

3.5.1 **structure de la valve**

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

3.5.2 **soutien de valve**

partie de la valve qui soutient mécaniquement et isole électriquement de la terre la partie active de la valve

3.5.3 **unité de valve multiple**

MVU (*multiple valve unit* en anglais)

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

NOTE Toutes les topologies et la disposition physique des convertisseurs ne disposent pas nécessairement d'une MVU.

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, qui présente les propriétés électriques préassignées d'une valve complète

NOTE 1 Pour les valves du type à source de tension commandable, la section de valve doit inclure un condensateur à courant continu de cellule ou de sous-module outre les niveaux de valve à VSC.

NOTE 2 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.

3.5.5

électronique de base de la valve

unité électronique, au potentiel de terre, qui assure la conversion électrique-optique entre le système de commande du convertisseur et les valves à VSC

4 Exigences générales

4.1 Lignes directrices pour l'exécution des essais de type

4.1.1 Autres éléments pouvant faire office de preuve

Chaque conception de valve doit être soumise aux essais de type spécifiés dans la présente norme. S'il est démontré que la valve est identique à l'une des valves essayées précédemment, le fournisseur peut, au lieu de réaliser un essai de type, soumettre le rapport d'essai d'un essai de type précédent à l'examen du client. Il convient que ce rapport soit accompagné d'un deuxième rapport détaillant les différences de conception et démontrant que l'essai de type de référence satisfait aux objectifs d'essai pour la conception proposée.

4.1.2 Objet d'essai

Le présent paragraphe ne s'applique pas aux essais sur la structure de support de la valve ni sur l'unité de valve multiple. L'objet d'essai pour ces essais est défini en 7.2 et en 8.2.

- a) Les essais de type peuvent être réalisés soit sur une valve complète soit, dans certaines circonstances, sur des sections de valve, comme indiqué au Tableau 3.
- b) Le nombre minimal de niveaux de valve à essayer, en fonction des niveaux de valve dans une valve unique, est comme indiqué au Tableau 1.

**Tableau 1 – Nombre minimal de niveaux de valve à essayer
en fonction du nombre de niveaux de valve par valve**

Nombre de niveaux de valve par valve	Nombre total de niveaux de valve à soumettre à essai
1 – 50	Nombre de niveaux de valve dans une valve
51 – 250	50
≥ 251	20 %

- c) Il est généralement recommandé d'utiliser les mêmes sections de valves pour tous les essais de type. Cependant, avec l'accord du fournisseur et de l'acheteur, 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, il convient de démontrer que la valve, les sections et/ou les composants de valves ont résisté aux essais de production pour garantir 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 mesurages des décharges partielles doivent être réalisés conformément à l'IEC 60270.

4.1.4 Température ambiante pour les essais

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

4.1.5 Fréquence des essais

Les essais diélectriques c.a. peuvent être effectués soit à 50 Hz soit à 60 Hz. Pour les essais de fonctionnement, des exigences spécifiques relatives à la fréquence des essais sont indiquées aux articles correspondants.

NOTE Les lignes directrices concernant les conditions d'utilisation les plus défavorables peuvent être obtenues dans la brochure technique n° 447 du CIGRÉ.

4.1.6 Rapports d'essai

À la fin des essais de type, le fournisseur doit produire des rapports d'essais de type conformément à l'Article 14.

4.1.7 Conditions à prendre en considération pour la détermination des paramètres des essais de type

Il convient de déterminer les paramètres des essais de type sur la base des conditions de fonctionnement et de panne les plus défavorables auxquelles la valve peut être soumise, selon les études du système. Les lignes directrices concernant les conditions peuvent être obtenues dans la brochure technique 447 du CIGRÉ.

4.2 Facteur de correction atmosphérique

Quand elle est spécifiée dans l'article concerné, la correction atmosphérique doit être appliquée aux tensions d'essai conformément à l'IEC 60060-1. Les conditions de référence dans lesquelles la correction doit être effectuée sont les suivantes:

- pression:
 - Si la coordination de l'isolement de la partie essayée de la valve est établie sur les tensions de tenue assignées normalisées conformément à l'IEC 60071-1, les facteurs de correction s'appliquent uniquement aux altitudes supérieures à 1 000 m. C'est pourquoi si l'altitude du site a_s à laquelle l'équipement sera installé est $\leq 1\,000$ m, la pression d'air atmosphérique normalisée ($b_0=101,3$ kPa) doit alors être utilisée sans correction relative à l'altitude. Si $a_s > 1\,000$ m, la procédure normalisée conformément 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_{1000m}).
 - Si la coordination de l'isolement de la partie essayée de la valve n'est pas établie sur les tensions de tenue assignées normalisées conformément à l'IEC 60071-1, la procédure normalisée conformément 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 théorique dans une armoire de redresseur de valve (°C);
- humidité: humidité absolue minimale théorique d'une armoire de redresseur de valve (g/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 subir de court-circuit. Les tensions d'essai utilisées doivent être réglées à l'aide d'un facteur d'échelle k_n :

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

où

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

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

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

4.3.2 Essais diélectriques

Pour tous les essais diélectriques entre les bornes de la valve, les niveaux de valve redondants doivent subir un court-circuit. La localisation des niveaux de valve devant subir un court-circuit doit faire l'objet d'un accord entre le client et le fournisseur.

NOTE En fonction de la conception, des limites peuvent être imposées à la distribution de niveaux de valves court-circuitées. Par exemple, il peut exister une limite supérieure au nombre de niveaux de valves court-circuitées dans une section de valve.

Pour tous les essais diélectriques sur section de valve, les tensions d'essai utilisées doivent être réglées à l'aide d'un facteur d'échelle k_o :

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

où

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

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

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

4.4 Critères pour des essais de type réussis

4.4.1 Généralités

Concernant les applications de semi-conducteur, l'expérience montre que, même avec la conception de valves la plus soignée, il n'est pas possible d'éviter des dysfonctionnements aléatoires ponctuels de composants de niveau de valve lors du fonctionnement de service. Même si ces dysfonctionnements peuvent être liés à la contrainte, ils sont considérés comme aléatoires dans la mesure où leur cause ou la relation entre le taux de dysfonctionnement et la contrainte ne peut être ni prévue ni régulée pour correspondre à une définition quantitative précise. Les valves ou sections de valves sont soumises à des essais de type, pendant une période de temps courte, aux contraintes multiples qui correspondent généralement aux pires contraintes pouvant être expérimentées par l'équipement tout au plus un petit nombre de fois au cours de la durée de vie de la valve. En tenant compte des éléments précédents, les

critères nécessaires à des essais de type réussis définis ci-dessous permettent donc à un petit nombre de niveaux de valve de présenter un dysfonctionnement au cours des essais de type, à condition que les dysfonctionnements soient rares et ne révèlent pas de défaut de conception.

4.4.2 Critères applicables aux niveaux de valve

Les critères applicables aux niveaux de valve sont les suivants.

- a) Si, à la suite d'un essai de type tel qu'indiqué à l'Article 5, plus d'un niveau de valve (ou bien, plus de 1 % des niveaux de valve essayés, si supérieur) a subi un court-circuit ou est à circuit ouvert, la valve doit être jugée comme ayant échoué aux essais de type.
- b) Si, à la suite d'un essai de type, un niveau de valve (ou plus s'il se situe toujours dans la limite de 1 %) a subi un court-circuit ou est à circuit ouvert, le ou les niveaux défaillants doivent être rétablis et cet essai de type, répété.
- c) Si la somme des niveaux de valve court-circuités ou à circuit ouvert au cours de tous les essais de type est supérieure à 3 % des niveaux de valve essayés, la valve doit être jugée comme ayant échoué aux essais de type.
- d) La valve ou les sections de valve doivent être vérifiées après chaque essai de type pour déterminer si un ou plusieurs niveaux de valve ont subi un court-circuit ou sont à circuit ouvert. Une paire IGBT/diode ou des composants auxiliaires défaillants, identifiés pendant ou à la fin d'un essai de type peuvent être remplacés avant un essai ultérieur.
- e) A la fin du programme d'essai, la valve ou les sections de valve doivent subir une série d'essais de vérification, qui doivent comprendre au moins:
 - une vérification de la tension de tenue des niveaux de valve;
 - une vérification des circuits de déclenchement;
 - une vérification des circuits de surveillance;
 - une vérification de tous les circuits de protection faisant partie intégrante de la valve;
 - une vérification des circuits d'évaluation de la tension.
- f) Les courts-circuits de niveaux de valve se produisant au cours des essais de vérification doivent être comptés en tant qu'éléments des critères d'acceptation définis ci-dessus. En plus des niveaux court-circuités ou à circuit ouvert, le nombre total de niveaux de valve présentant des pannes ne produisant pas de court-circuit de niveau de valve, découverts au cours du programme d'essai de type et de l'essai de vérification qui le suit, ne doit pas dépasser 3 % du nombre de niveaux de valve essayés lors des essais de types diélectriques et de fonctionnement, la valeur la plus faible étant retenue. Si le nombre de ces niveaux dépasse 3 %, la nature et la cause des pannes doivent être revues et une action supplémentaire, le cas échéant, doit faire l'objet d'un accord entre le client et le fournisseur.
- g) Lors de l'application des critères de pourcentage pour déterminer le nombre maximal autorisé de niveaux de valve court-circuités ou à circuit ouvert et le nombre maximal autorisé de niveaux présentant des pannes qui n'ont pas produit de court-circuit d'un niveau de valve, il est dans la pratique courante d'arrondir toutes les fractions au nombre entier supérieur, comme illustré au Tableau 2.

Tableau 2 – Pannes de niveau de valve autorisées au cours des essais de type

Nombre de niveaux de valve soumis à essai	Nombre de niveaux de valve autorisés à subir un court-circuit ou à être à circuit ouvert lors de l'un des essais de type	Nombre total de niveaux de valve autorisés à subir un court-circuit ou à être à circuit ouvert lors de tous les essais de type	Nombre supplémentaire de niveaux de valve, dans tous les essais de type, qui ont expérimenté une panne mais n'ont pas subi de court-circuit ou n'ont pas été à circuit ouvert
Jusqu'à 33	1	1	1
de 34 à 67	1	2	2
de 68 à 100	1	3	3
etc.			

La distribution de niveaux court-circuités ou à circuit ouvert et d'autres pannes de niveau de valve à la fin de tous les essais de type doit être essentiellement aléatoire et ne doit pas révéler de défaut de conception.

4.4.3 Critères applicables à l'ensemble de la valve

Les ruptures ou contournements externes autour de l'équipement électrique commun associé à plus d'un niveau de valve de la valve, ou les décharges disruptives dans le matériau diélectrique faisant partie de la structure de la valve, des conduits de refroidissement, des guides de lumière ou d'autres parties isolantes du système de transport et de distribution d'impulsions ne doivent pas être autorisés.

Les températures de surface du composant et du conducteur, prises avec les connexions et les joints parcourus par un courant associés, et la température des surfaces de montage adjacentes doivent en permanence rester dans les limites autorisées par la conception.

5 Liste des essais de type

Le Tableau 3 dresse la liste des essais de type indiqués dans les Articles 6 à 12.

Tableau 3 – Liste des essais de type

Essai de type	Article ou paragraphe	Objet d'essai
Essai de contrainte en fonctionnement continu maximal	6.4	Valve ou section de valve
Essai de contrainte en fonctionnement en surcharge temporaire maximale	6.5	Valve ou section de valve
Essai de tension c.c. minimale	6.6	Valve ou section de valve
Essai de tension c.c. du support de valve	7.3.1	Support de valve
Essai de tension c.a. du support de valve	7.3.2	Support de valve
Essai d'impulsion de commutation du support de valve	7.3.3	Support de valve
Essai d'impulsion de foudre du support de valve	7.3.4	Support de valve
Essai de tension c.c. de la MVU à la terre	8.3.1	MVU
Essai de tension c.a. de la MVU	8.3.2	MVU
Essai d'impulsion de commutation de la MVU	8.3.3	MVU
Essai d'impulsion de foudre de la MVU	8.3.4	MVU
Essai de tension c.c. – c.a. de la valve	9.3.1	Valve (ou section de valve selon accord entre le fournisseur et le client)
Essai d'impulsion de commutation de la valve	9.3.3	
Essai d'impulsion de foudre de la valve	9.3.4	
Essai de mise hors tension 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 selon accord entre le fournisseur et le client)

6 Essais de fonctionnement

6.1 Objectif des essais

Les principaux objectifs des essais de fonctionnement consistent:

- à vérifier la compatibilité du niveau de la paire VSC/diode et des circuits électriques associés dans une valve en termes de courant, de tension et de contraintes de température à l'état conducteur, à la mise sous tension et à la mise hors tension dans les pires conditions de contraintes répétées;
- à démontrer que l'électronique de la valve et les circuits de puissance des valves à VSC interagissent correctement.

6.2 Objet d'essai

Les essais peuvent être réalisés soit sur l'ensemble de la valve soit sur des sections de valve. Ce choix dépend principalement du type de valve et des installations d'essai disponibles. Les essais spécifiés dans le présent article conviennent aux sections de valve comportant au moins cinq niveaux de paires de valves connectées en série. En cas de proposition d'essais pour un nombre de niveaux inférieur à cinq, des facteurs de sécurité d'essai supplémentaires doivent faire l'objet d'un accord. En aucun cas le nombre de niveaux connectés en série pour les essais ne doit être inférieur à trois.

La valve et les sections de valve soumises à essai doivent être assemblées avec tous les composants auxiliaires. Si nécessaire, une protection de valve échelonnée proportionnellement doit être intégrée. Cette protection doit être échelonnée en fonction du nombre de niveaux connectés en série soumis à essai afin de garantir un niveau de protection correspondant au moins aux caractéristiques maximales de la protection de service.

Le liquide de refroidissement doit être dans un état représentatif des conditions d'utilisation. Son débit et sa température doivent notamment être réglés de manière à correspondre aux valeurs les moins favorables adaptées à l'essai concerné, de sorte que la ou les températures de composant appropriées soient égales aux valeurs applicables lors de l'utilisation.

6.3 Circuit d'essai

Pour les conceptions dans lesquelles la valve agit comme une source de tension commandable et dispose d'une capacité c.c. intégrée, la capacité c.c. et ses connexions aux dispositifs de semi-conducteur font partie intégrante de l'objet d'essai.

Cependant, pour les modèles dans lesquels la valve fonctionne à la manière d'un commutateur et où le condensateur c.c. n'est pas intégré à la valve, il est nécessaire que le condensateur c.c. soit correctement représenté dans le circuit d'essai. En particulier, l'inductance de fuite de série des connexions entre le condensateur c.c. et la valve, et la capacité parasite autour de la section de valve doivent être correctement reproduites et échelonnées en fonction de la taille de la section de valve soumise à essai. Il convient que les interconnexions de circuit d'essai soient représentatives du type utilisé dans le convertisseur, afin de ne pas introduire de niveaux d'amortissement irréalistes causés par les effets pelliculaires.

6.4 Essai de contrainte en fonctionnement continu maximal

Il est nécessaire que l'essai reproduise les paramètres suivants en fonction des pires conditions de fonctionnement en utilisation du convertisseur. Il peut s'avérer nécessaire de procéder à plusieurs essais pour reproduire l'ensemble des paramètres à leurs valeurs maximales.

Pour les valves à VSC:

- températures continues maximales à la jonction de l'IGBT;
- températures continues maximales à la jonction de la DRL;
- températures continues maximales du parasurtenseur;
- tension et courant de mise sous tension et de mise hors tension continus maximaux.

Pour les valves à diode:

- température continue maximale à la jonction de la diode;
- températures continues maximales du parasurtenseur;
- tension et courant de mise hors tension de diode continus maximaux.

Il est nécessaire que tous ces paramètres soient reproduits lors de l'essai de contrainte en fonctionnement continu maximale. Ils peuvent être reproduits soit dans des essais individuels soit dans un essai combiné.

La tension d'essai doit être établie sur la tension directe continue maximale, la fréquence de commutation d'essai doit être établie sur la fréquence de commutation continue maximale et le modèle de modulation doit être représentatif de celui employé au cours de l'utilisation.

Le courant d'essai, en valeur efficace, doit intégrer un facteur de sécurité d'essai de 1,05.

La tension d'essai U_{tpv1} correspondant à la tension c.c. de fonctionnement continu maximale doit être déterminée comme suit:

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

où

- U_{dmax} est la tension c.c. de fonctionnement continue maximale, y compris l'ondulation;
- k_n est un facteur d'échelle d'essai conformément à 4.3.1;
- 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 que la température du liquide de refroidissement de sortie soit stabilisée.

6.5 Essai de contrainte en fonctionnement en surcharge temporaire maximale

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

Les conditions d'essai, si nécessaire, doivent être déterminées à l'aide de la même méthodologie qu'en 6.4 ci-dessus.

Préalablement à 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 de contrainte en fonctionnement temporaire 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.

Après l'essai de contrainte en fonctionnement en surcharge temporaire, un essai de contrainte en fonctionnement continu maximal de 10 min doit être effectué.

6.6 Essai de tension c.c. minimale

Cet essai sert à vérifier le fonctionnement correct de ces conceptions de valve dans lesquelles l'énergie pour les circuits électroniques de valve est extraite de la tension apparaissant entre les bornes de la valve.

L'essai consiste à appliquer une tension c.c. entre les bornes de la valve ou de la section de valve. Pour cet essai, seule la tension compte, le courant lui ne compte pas.

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 des données de l'électronique de la valve.

La tension d'essai U_{min} se définit comme suit:

$$U_{\text{min}} = \frac{N_{\text{tut}}}{N_t} \cdot U_W \cdot k_2$$

où

- U_W est la tension c.c. la plus basse pour une valve en fonctionnement où la fonction appropriée de l'électronique de la valve est nécessaire;
- N_{tut} est le nombre de niveaux de valve connectés en série soumis à essai;
- N_t est le nombre total de niveaux de valve connectés en série dans une valve unique, y compris la redondance;
- 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 consistent:

- a) à vérifier la capacité de tenue en tension de l'isolement du support de valve, des conduits de refroidissement, des guides de lumière et d'autres composants isolants associés au support de valve. En cas d'isolement à la terre autre que le support de valve, des essais supplémentaires peuvent s'avérer nécessaires;
- b) à vérifier que les tensions de début et de fin de la décharge partielle sont supérieures à la tension de fonctionnement maximale apparaissant sur le support de valve.

NOTE En fonction de l'application, il peut s'avérer possible d'éliminer certains des essais réalisés sur le support de valve, qui font l'objet d'un accord entre le client et le fournisseur.

7.2 Objet d'essai

Le support de valve à utiliser pour les essais peut être un objet séparé représentatif incluant une représentation des parties adjacentes à la valve, ou faire partie de l'assemblage utilisé pour les essais de valve unique ou d'unité de valve multiple. Il doit être assemblé avec tous les composants auxiliaires en place et disposer de surfaces de potentiel de terre adjacentes représentées de manière appropriée. Le liquide de refroidissement doit se trouver dans un état représentatif de l'état d'utilisation le plus coûteux pour l'objectif de l'essai.

Si une valve unique est composée de plusieurs structures de sorte qu'il existe plusieurs structures de support de valve par valve, il doit être démontré que les essais proposés couvrent les pires contraintes subies par les structures de support de valve.

7.3 Exigences relatives aux essais

Tous les niveaux d'essais ci-dessous font l'objet d'une correction atmosphérique telle que décrite en 4.2.

7.3.1 Essai de tension c.c. du support de valve

Les deux principales bornes de la valve doivent être connectées entre elles et ensuite la tension c.c. doit être appliquée entre les deux bornes connectées entre elles et la terre. En partant d'une tension inférieure à 50 % de la tension d'essai maximale, la tension doit être augmentée jusqu'à atteindre la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 1 min le plus rapidement possible, rester constante pendant 1 min, être ensuite réduite jusqu'à atteindre la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 3 h, rester constante pendant 3 h et enfin être réduite à zéro. Pendant la dernière heure de l'essai de 3 h spécifié, le nombre de décharges partielles dépassant 300 pC doit être consigné comme indiqué dans l'Annexe B de l'IEC 60700-1.

Le nombre d'impulsions dépassant 300 pC ne doit pas être supérieur à 15 par minute, en moyenne pendant toute la durée de l'enregistrement. Parmi ces impulsions, le nombre d'impulsions dépassant 500 pC doit se limiter à sept par minute, le nombre d'impulsions dépassant 1 000 pC doit se limiter à trois par minute et le nombre d'impulsions dépassant 2 000 pC doit se limiter à une par minute.

NOTE 1 Il convient, dans toute la mesure du possible, d'augmenter la tension d'essai de 50 % au niveau de tension maximale en approximativement 10 s. Une durée plus longue peut être utilisée; toutefois, ceci peut soumettre l'objet d'essai à une contrainte excessive.

NOTE 2 Si une tendance croissante est observée dans l'amplitude ou le taux de décharge partielle, la durée de l'essai peut être augmentée par accord mutuel entre le client et le fournisseur.

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

Préalablement à l'essai et avant de recommencer l'essai avec la 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 de tension continue.

La tension d'essai continue du support de valve U_{tds} doit être déterminée conformément aux éléments suivants:

essai pendant 1 min.

$$U_{tds} = \pm U_{dms1} \cdot k_3 \cdot k_t$$

essai pendant 3 h

$$U_{tds} = \pm U_{dms2} \cdot k_3$$

où

U_{dms1} est la valeur moyenne maximale de la tension pendant 1 s apparaissant à travers le support de valve, déterminée par l'étude de coordination de l'isolement;

U_{dms2} est la valeur maximale de la composante continue de la tension de fonctionnement en régime permanent apparaissant à travers le support de valve;

k_3 est un facteur de sécurité d'essai;

$k_3 = 1,1$;

k_t est le facteur de correction atmosphérique selon 4.2;

7.3.2 Essai de tension c.a. du support de valve

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

En partant d'une tension inférieure à 50 % de la tension d'essai maximale, la tension doit être augmentée jusqu'à atteindre la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 1 min, rester constante pendant 1 min, être réduite jusqu'à atteindre la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 30 min, rester constante pendant 30 min et enfin être ramenée 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, le modèle peut être accepté 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 c.a. du support de valve U_{tas} doit être déterminée conformément aux éléments suivants:

$$U_{tas} = \frac{U_{ms}}{\sqrt{2}} \cdot k_r \cdot k_4 \cdot k_t$$

où

U_{ms} est la valeur de crête de la tension de fonctionnement répétée maximale dans le support de valve au cours d'un fonctionnement en régime permanent, y compris le dépassement de commutation;

k_4 est un facteur de sécurité d'essai;

$k_4 = 1,3$ pour l'essai de maintien de la tension pendant 1 min;

$k_4 = 1,15$ pour l'essai de maintien de la tension pendant 30 min;

k_t est le facteur de correction atmosphérique;

k_t est la valeur conformément à 4.2 pour l'essai de maintien de la tension pendant 1 min;

k_t = 1,0 pour l'essai de maintien de la tension pendant 30 min;

k_r est le facteur de surtension temporaire;

k_r est la valeur déterminée à partir des études du système pour l'essai de maintien de la tension pendant 1 min;

k_r = 1,0 pour l'essai de maintien de la tension pendant 30 min.

7.3.3 Essai d'impulsion de commutation de support de valve

Cet essai doit comprendre trois applications de tensions d'impulsion de commutation de polarité positive et trois applications de tensions d'impulsion de commutation de polarité négative entre les bornes principales de la valve (connectées entre elles) et la terre.

Une forme d'onde de tension d'impulsion de commutation normalisée conforme à l'IEC 60060 doit être utilisée.

La tension d'essai doit être choisie conformément à la coordination de l'isolement de la sous-station VSC.

7.3.4 Essai d'impulsion de foudre du support de valve

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

Une forme d'onde de tension d'impulsion 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 de la sous-station VSC.

8 Essais diélectriques sur une unité de valves multiples

Le présent article s'applique uniquement si au moins deux valves sont installées dans une structure de valve commune (unité de valve multiple). Dans le cas où chaque valve est montée individuellement dans sa propre structure de valve, le présent article ne s'applique pas.

8.1 Objectif des essais

Les principaux objectifs de ces essais consistent:

- à vérifier la capacité de tenue en tension de l'isolement externe de la MVU, par rapport à son environnement, notamment dans le cas de valve(s) connectée(s) au potentiel de pôle;
- à vérifier la capacité de tenue en tension entre chaque valve dans une structure de MVU;
- à vérifier que les niveaux de décharge partielle se situent dans les limites spécifiées.

8.2 Objet d'essai

De nombreuses dispositions de valves et d'unités de valve multiple sont possibles. Le ou les objets d'essai doivent être choisis pour refléter, le plus précisément possible, la configuration d'utilisation des valves dans la mesure où elle 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.

Il peut s'avérer nécessaire de court-circuiter certaines valves individuellement en fonction de la configuration de la MVU et des objectifs de l'essai.

Quand la borne à basse tension de la MVU n'est pas connectée au potentiel de terre, la borne à basse tension de la MVU doit être arrêtée au cours des essais afin de simuler avec exactitude la tension apparaissant 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.

8.3 Exigences relatives aux essais

8.3.1 Essai de tension c.c. de la MVU à la terre

La tension d'essai c.c. doit être appliquée entre la borne c.c. de potentiel le plus élevé de la MVU et la terre.

En partant d'une tension inférieure à 50 % de la tension d'essai maximale, la tension doit être augmentée jusqu'à atteindre la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 1 min le plus rapidement possible, rester constante pendant 1 min, être ensuite réduite jusqu'à atteindre la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 3 h, rester constante pendant 3 h et enfin être ramenée à zéro.

NOTE 1 Il convient, dans toute la mesure du possible, d'augmenter la tension d'essai de 50 % au niveau de tension maximale en approximativement 10 s. Une durée plus longue peut être utilisée; toutefois, ceci peut soumettre l'objet d'essai à une contrainte excessive.

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

Le nombre d'impulsions dépassant 300 pC ne doit pas être supérieur à 15 par minute, en moyenne pendant toute la durée de l'enregistrement. Parmi ces impulsions, le nombre d'impulsions dépassant 500 pC doit se limiter à sept par minute, le nombre d'impulsions dépassant 1 000 pC doit se limiter à trois par minute et le nombre d'impulsions dépassant 2 000 pC doit se limiter à une par minute.

NOTE 2 Si une tendance croissante est observée dans l'amplitude ou le taux de décharge partielle, la durée de l'essai peut être augmentée par accord mutuel entre le client et le fournisseur.

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

Préalablement à l'essai et avant de recommencer l'essai avec une tension de polarité opposée, les bornes de la 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 de tension continue.

La tension d'essai continue de la MVU U_{tdm} doit être déterminée conformément aux éléments suivants:

essai pendant 1 min.

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

essai pendant 3 h

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

où

U_{dmm1} est la valeur moyenne maximale de la tension pendant 1 s apparaissant entre la borne à haute tension de la MVU et la terre;

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

k_5 est le facteur de sécurité d'essai;

$k_5 = 1,1$;

k_t est le facteur de correction atmosphérique selon 4.2;

8.3.2 Essai de tension c.a. de la MVU

Si une MVU subit des contraintes de tension composée c.a. ou c.a. et c.c. entre deux bornes, dont la capacité de tenue de n'a pas été démontrée de manière appropriée par d'autres essais, il sera nécessaire d'effectuer un essai de tension c.a. entre les bornes concernées de la MVU.

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

En partant d'une tension inférieure à 50 % de la tension d'essai à maintenir pendant 1 min, la tension doit être augmentée jusqu'à atteindre la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 1 min, rester constante pendant 1 min, être ensuite réduite jusqu'à atteindre la valeur à maintenir pendant 30 min, rester constante pendant 30 min et enfin être ramenée 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, le modèle peut être accepté 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 c.a. de la MVU U_{tam} doit être déterminée conformément aux éléments suivants:

$$U_{tam} = \frac{U_{mm}}{\sqrt{2}} \cdot k_r \cdot k_6 \cdot k_t$$

où

U_{mm} est la valeur de crête de la tension de fonctionnement répétée maximale apparaissant entre les bornes de la MVU au cours d'un fonctionnement en régime permanent, y compris le dépassement de commutation;

k_6 est un facteur de sécurité d'essai;

$k_6 = 1,3$ pour l'essai de maintien de la tension pendant 1 min;

$k_6 = 1,15$ pour l'essai de maintien de la tension pendant 30 min;

k_r est le facteur de surtension temporaire;

k_r est la valeur déterminée à partir des études du système pour l'essai de maintien de la tension pendant 1 min;

$k_r = 1,0$ pour l'essai de maintien de la tension pendant 30 min;

k_t est le facteur de correction atmosphérique;

k_t est la valeur conformément à 4.2 pour l'essai de maintien de la tension pendant 1 min;

$k_t = 1,0$ pour l'essai de maintien de la tension pendant 30 min.

8.3.3 Essai d'impulsion de commutation de la MVU

Une forme d'onde de tension d'impulsion de commutation normalisée conforme à l'IEC 60060 doit être utilisée.

La tension d'essai d'impulsion de commutation de la MVU doit être appliquée entre la borne à haute tension de la MVU et la terre.

L'essai doit comprendre trois applications de tension d'impulsion de commutation de polarité positive et trois applications de tension d'impulsion de commutation de polarité négative d'une amplitude spécifiée.

La tension d'essai d'impulsion de commutation de la MVU U_{tsm} doit être déterminée conformément aux éléments suivants:

$$U_{tsm} = \pm SIPL_m \cdot k_7 \cdot k_t$$

où

$SIPL_m$ est le niveau de protection d'impulsion de commutation déterminé par la coordination de l'isolement en tenant compte du ou des parasurtenseurs connectés entre la borne à haute tension de la 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 conformément à 4.2.

Si l'essai indiqué ci-dessus n'évalue pas de manière appropriée la tenue des impulsions de commutation entre toutes les bornes de la MVU, on doit alors envisager de procéder à des essais supplémentaires pour vérifier l'isolement.

NOTE Un accord entre le client et le fournisseur peut rendre l'essai d'impulsion de commutation de la MVU inutile, à condition qu'il soit possible de démontrer d'une autre manière que:

- a) les distances d'isolement dans l'air extérieures aux autres valves et à la terre sont adaptées au niveau de tenue en tension d'impulsion de commutation requis; et
- b) la tenue des impulsions de commutation entre deux bornes de la MVU est correctement démontrée par d'autres essais.

8.3.4 Essai d'impulsion de foudre de la MVU

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

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

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

La tension d'essai d'impulsion de foudre de MVU U_{tIm} doit être déterminée conformément aux éléments suivants:

$$U_{tIm} = \pm LIPL_m \cdot k_8 \cdot k_t$$

où

$LIPL_m$ est le niveau de protection d'impulsion de foudre déterminé par la coordination de l'isolement en tenant compte du ou des parasurtenseurs connectés entre la borne à haute tension de la MVU et la terre;

k_g est un facteur de sécurité d'essai;

$k_g = 1,10$;

k_t est le facteur de correction atmosphérique;

k_t est la valeur conformément à 4.2.

S'il n'est pas possible de démontrer que l'essai indiqué ci-dessus évalue de manière appropriée la tension de tenue d'impulsion de foudre entre toutes les bornes de la MVU, on doit alors envisager de procéder à des essais supplémentaires pour vérifier l'isolement.

NOTE Un accord entre le client et le fournisseur peut rendre l'essai d'impulsion de foudre de la MVU inutile, à condition qu'il soit possible de démontrer d'une autre manière que:

- a) les distances d'isolement dans l'air extérieures aux autres valves et à la terre sont adaptées au niveau de tenue en tension d'impulsion de foudre requis; et
- b) la tension de tenue d'impulsion de foudre entre deux bornes de la MVU est correctement démontrée par d'autres essais.

9 Essais diélectriques entre les bornes de la valve

9.1 Objectif de l'essai

L'objectif de ces essais consiste à vérifier la conception de la valve en ce qui concerne les caractéristiques relatives à la tension de différents types de surtensions (surtensions c.c., c.a., d'impulsion de commutation et d'impulsion de foudre). Il convient que les essais démontrent que:

- a) la valve résistera aux surtensions spécifiées;
- b) les décharges partielles se situeront dans les limites spécifiées des conditions d'essai spécifiées;
- c) les circuits internes d'évaluation de la tension ont une puissance nominale suffisante;
- d) les circuits électroniques de la valve se comportent comme prévu.

Il convient d'indiquer que les essais décrits dans le présent article sont établis sur des formes d'onde normalisées et des procédures d'essai normalisées telles que développées pour l'essai des systèmes et des composants c.a. à haute tension. Cette approche présente de nombreux avantages aux industries car elle permet d'appliquer la plus grande part 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 entraîner des formes d'onde différentes des formes d'onde normalisées et que, dans ce cas, l'essai peut être modifié afin de refléter de manière réaliste les conditions attendues.

9.2 Objet d'essai

Il convient que l'objet d'essai soit généralement une valve complète. Les essais portant sur des sections de valve individuelles sont acceptés à condition que le fournisseur puisse 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 utilisation. La valve ou section de valve d'essai doit être montée avec tous les composants auxiliaires à l'exception du parasurtenseur de valve lorsqu'il existe. La valve peut faire partie d'une unité de valve multiple.

Sauf spécification contraire, l'électronique de la valve doit être alimentée pour tous les essais d'impulsion.

Si une section de valve est utilisée comme objet d'essai, il convient que le nombre minimal de niveaux de valve dans la section d'essai soit convenu avec le client. Dans ce 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 le client et le fournisseur.

L'état du liquide de refroidissement doit être représentatif des conditions d'utilisation, à l'exception du débit, qui peut être réduit. Si un objet extérieur à la structure est nécessaire pour représenter de manière appropriée les contraintes subies au cours des essais, cet objet doit être intégré ou simulé dans l'essai. Des plans de masse, dont la séparation doit être déterminée en fonction de la proximité d'autres valves et surfaces de potentiel de terre adjacentes, doivent être utilisés.

L'objet d'essai utilisé pour les essais diélectriques de la valve ne permet normalement pas d'appliquer une correction atmosphérique aux tensions d'essai spécifiées sans soumettre à des contraintes excessives les composants internes. C'est la raison pour laquelle aucun facteur de correction atmosphérique n'est appliqué aux essais diélectriques entre les bornes de la valve. Le fournisseur doit démontrer que les effets des conditions atmosphériques sur la tenue interne de la valve ont été pris en compte de manière appropriée.

9.3 Exigences relatives aux essais

9.3.1 Essai de tension c.a. – c.c. de la valve

Cet essai comprend un essai de courte durée et un essai de longue durée. L'essai de courte durée reproduit la tension composite alternative – continue provoquée par certaines pannes au niveau du convertisseur ou du système.

Dans cet essai, un condensateur peut être utilisé conjointement à une source de tension d'essai alternative pour produire une forme d'onde de tension composite alternative – continue. En fonction de 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.

En partant d'une tension inférieure à 50 % de la tension d'essai maximale, la tension doit être accélérée le plus rapidement possible pour atteindre le niveau d'essai spécifié de maintien de la tension pendant 10 s, être ensuite réduite pour atteindre la tension d'essai spécifiée à maintenir pendant 3h, et rester constante pendant 3h, puis enfin être ramenée à zéro.

Pour un mesurage de la décharge partielle en courant alternatif, la valeur de crête de la décharge partielle périodique enregistrée au cours de la dernière minute de l'essai de maintien de la tension pendant 3h doit être inférieure à 200 pC, à condition que les composants sensibles à la décharge partielle dans la valve aient fait l'objet d'essais séparés. Pour un mesurage de la décharge partielle en courant continu, la durée de l'enregistrement doit correspondre à la dernière heure de l'essai de 3 h. Le nombre d'impulsions dépassant 300 pC ne doit pas être supérieur à 15 par minute, en moyenne pendant toute la durée de l'enregistrement. Parmi ces impulsions, le nombre d'impulsions dépassant 500 pC doit se limiter à sept par minute, le nombre d'impulsions dépassant 1 000 pC doit se limiter à trois par minute et le nombre d'impulsions dépassant 2 000 pC doit se limiter à une par minute.

NOTE 1 Réaliser l'essai de tension alternative - continue de la valve présente des difficultés pratiques importantes avec les valves du type à "source de tension commandable", en raison du courant élevé appelé par la capacité intégrée lors du démarrage et du taux de décharge lente du condensateur à la fin de la première partie de l'essai. Pour cette raison, il peut se révéler nécessaire de modifier le mode opératoire d'essai des valves de ce type. Les autres méthodes d'essai à prendre en considération incluent le remplacement provisoire d'un condensateur d'essai spécial à capacité réduite, mais de mêmes dimensions physiques, ou le préchargement du condensateur à courant continu de la cellule ou du sous-module à partir d'une source distincte avant de commencer l'essai.

NOTE 2 Il convient, dans toute la mesure du possible, d'augmenter la tension d'essai de 50 % au niveau de tension maximale en approximativement 10 s. Une durée plus longue peut être utilisée; toutefois, ceci soumet l'objet d'essai à une contrainte excessive.

NOTE 3 Si une tendance croissante est observée dans le taux ou l'amplitude de décharge partielle, la durée de l'essai peut être augmentée par accord mutuel entre le client et le fournisseur.

NOTE 4 Il peut s'avérer nécessaire de désactiver l'électronique de grille ou d'autres circuits auxiliaires lors de cet essai, ou de prévoir des moyens indépendants pour leur alimentation, afin de prévenir toute interférence avec le mesurage de la décharge partielle, provenant par exemple des circuits d'alimentation de l'unité de grille.

NOTE 5 Dans le cas où la désactivation de l'électronique de grille ou d'autres circuits auxiliaires lors de cet essai n'est pas possible, et où il peut être démontré que les interférences sont provoquées par un circuit électronique, ces interférences peuvent alors être déduites du mesurage.

NOTE 6 Il convient que l'utilisation d'un condensateur au lieu d'une source en courant continu dans le circuit d'essai soit convenue par accord mutuel entre le fabricant et le client puisque la tension d'essai est plus élevée que la valeur réelle.

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

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

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

où

U_{ac1} est la valeur de crête de la surtension transitoire maximale de la composante alternative au niveau de la valve. L'effet de limitation du parasurtenseur de valve ou du parasurtenseur de pôle peut être pris en considération pour calculer la surtension en condition d'utilisation;

U_{dc1} est la surtension transitoire maximale de la composante alternative au niveau de la valve. L'effet de limitation du parasurtenseur de valve ou du parasurtenseur de pôle peut être pris en considération pour calculer la surtension en condition d'utilisation;

k_{c1} est le facteur de dépassement du palier de tension lié au palier de tension de sortie du convertisseur, dans les conditions conformes à celles appliquées pour définir U_{ac1} . 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_o est le facteur d'échelle d'essai conformément à 4.3.2;

k_g est le facteur de sécurité d'essai;

$k_g = 1,10$;

f est la fréquence d'essai (50 Hz ou 60 Hz, selon les installations d'essai).

La tension d'essai de 3h de la valve, U_{tv2} , doit être déterminée conformément aux éléments suivants:

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

$$U_{tac2} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\max-\text{cont}} \cdot \sin(2\pi ft)}{\sqrt{3}} \cdot k_{c2} \cdot k_o \cdot k_{10}$$

$$U_{tdc2} = U_{d\max} \cdot k_o \cdot k_{10}$$

$U_{\text{max-cont}}$	est la tension maximale entre phases en régime permanent sur le système à courant alternatif ou le côté valve du transformateur, si un transformateur de convertisseur est utilisé entre le système à courant alternatif et les convertisseurs;
U_{dmax}	est la valeur maximale de la composante continue de la tension de fonctionnement en régime permanent du système à courant continu;
k_{c2}	est le facteur de dépassement du palier de tension lié au palier de tension de sortie du convertisseur, dans les conditions conformes à celles appliquées pour définir U_{tac2} ;
k_0	est le facteur d'échelle d'essai conformément à 4.3.2;
k_{10}	est le facteur de sécurité d'essai;
k_{10}	= 1,10;
f	est la fréquence d'essai (50 Hz ou 60 Hz, selon les installations d'essai).

9.3.2 Essais d'impulsion de la valve (généralités)

Il convient de tenir compte de ce qui suit pendant les essais d'impulsion de la valve.

- Pour certaines applications, si par exemple aucune ligne aérienne n'est présente du côté c.c. et que la barre omnibus entre la bobine d'inductance de phase et les valves est entièrement protégée contre le foudroiement direct du côté c.a. ou dans les topologies, où la valve joue le rôle d'une source de tension commandable avec sa propre capacité c.c. intégrée, les essais d'impulsion de valve sont moins importants puisque les valves ne subissent pas les impulsions à une amplitude pouvant s'avérer décisive pour leur fonctionnement électrique. Dans ce type d'applications, les essais d'impulsion peuvent être omis.
- L'essai d'impulsion s'applique uniquement dans la polarité correspondant à la polarité de tension de tenue de la valve.
- Si les niveaux de tenue d'impulsion de la valve sont inférieurs ou égaux au niveau d'essai c.a. – c.c. de la valve, l'essai c.a. – c.c. de la valve est supposé pouvoir couvrir les essais d'impulsion et par conséquent, les essais d'impulsion peuvent être omis.

9.3.3 Essai d'impulsion de commutation de la valve

Une forme d'onde de tension d'impulsion de commutation normalisée conforme à l'IEC 60060 doit être utilisée.

L'essai doit comprendre trois applications de tensions d'impulsion de commutation d'une amplitude spécifiée sur la valve.

La tension de tenue d'essai d'impulsion de commutation de la valve U_{tsv} doit être déterminée conformément aux éléments suivants.

- Valve avec protection par parasurtenseur de la valve:

$$U_{\text{tsv}} = SIPL_v \cdot k_0 \cdot k_{11}$$

où

- $SIPL_v$ est le niveau de protection d'impulsion de commutation du parasurtenseur de la valve;
- k_0 est un facteur d'échelle d'essai conformément à 4.3.2;
- k_{11} est un facteur de sécurité d'essai;
- $k_{11} = 1,10$.

- Valve sans protection par parasurtenseur de la valve:

L'objectif de cet essai consiste à vérifier l'isolement de la valve quand elle n'est pas directement protégée par des parasurtenseurs.

$$U_{tsv} = U_{cms} \cdot k_0 \cdot k_{12}$$

où

U_{cms} est la tension prévue d'impulsion de commutation à travers les bornes de la valve, conformément aux études de coordination de l'isolement du système;

k_0 est un facteur d'échelle d'essai conformément à 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 rupture de la commutation ni de l'isolement.

9.3.4 Essai d'impulsion de foudre de la valve

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

L'essai doit comprendre trois applications de tensions d'impulsion de foudre d'une amplitude spécifiée sur la valve.

La tension de tenue d'impulsion de foudre de la valve U_{tlv} doit être déterminée conformément aux éléments suivants.

- Valve avec protection par parasurtenseur de la valve:

$$U_{tlv} = LIPL_V \cdot k_0 \cdot k_{13}$$

où

$LIPL_V$ est le niveau de protection d'impulsion de foudre du parasurtenseur de la valve;

k_0 est un facteur d'échelle d'essai conformément à 4.3.2;

k_{13} est un facteur de sécurité d'essai;

$k_{13} = 1,10$.

- Valve sans protection par parasurtenseur de la valve:

L'objectif de cet essai consiste à vérifier l'isolement de la valve quand elle n'est pas directement protégée par des parasurtenseurs.

$$U_{tlv} = U_{cml} \cdot k_0 \cdot k_{14}$$

où

U_{cml} est la tension prospective d'impulsion de foudre prévue à travers les bornes de la valve conformément aux études de coordination de l'isolement du système;

k_0 est un facteur d'échelle d'essai conformément à 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 rupture de la commutation ni de l'isolement.

10 Essai de mise hors tension de l'IGBT en cas de surintensité

10.1 Objectif de l'essai

Le principal objectif consiste à vérifier la qualité de conception de la valve à VSC, notamment l'IGBT, et des circuits électriques associés par rapport aux contraintes de tension et de courant à la mise hors tension, en cas de pannes de type court-circuit ou de ratés d'allumage.

L'essai doit simuler la pire combinaison de contrainte de tension et de température de jonction instantanée, dans des conditions représentant les situations les moins favorables en matière de tolérance des circuits de surveillance/protection. Selon la stratégie de commande et de protection, deux essais ou plus peuvent être exigés afin de reproduire toutes les contraintes appropriées.

Les exigences générales relatives au circuit d'essai et à la représentation du condensateur c.c., de l'inductance de boucle, etc. sont telles qu'indiquées en 6.3.

10.2 Objet d'essai

Comme décrit en 6.2. Cependant, il peut également s'avérer nécessaire de représenter certains circuits de protection ou de surveillance dans les cas où ceux-ci sont essentiels pour détecter une surintensité.

10.3 Exigences relatives à l'essai

L'essai consiste à faire atteindre à l'objet d'essai l'équilibre thermique dans les conditions produisant la température de jonction en régime permanent la plus élevée pour l'IGBT concerné (voir 6.4) et à susciter ensuite une 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 mise hors tension sécurisée maximale.

La tension d'essai U_{tpv2} correspondant à la surtension c.c. temporaire maximale doit être déterminée comme suit:

$$U_{tpv2} = U_{dtemp} \cdot k_n \cdot k_{15}$$

où

U_{dtemp} est la surtension c.c. temporaire maximale, y compris l'ondulation;

k_n est un facteur d'échelle d'essai conformément à 4.3.1;

k_{15} est un facteur de sécurité d'essai;

$k_{15} = 1,05$.

Il convient que la forme d'onde de courant d'essai, dans l'intervalle de temps compris entre la détection de la surintensité et l'instant de la mise hors tension des IGBT, soit représentative des conditions d'utilisation, notamment en termes de vitesse de montée du courant di/dt.

11 Essai de courant de court-circuit

11.1 Objectif des essais

Le principal objectif consiste à vérifier l'adéquation des dispositifs, notamment des diodes, des composants supplémentaires éventuels utilisés pour protéger les diodes (tels que les thyristors de dérivation) et des circuits électriques associés, par rapport aux contraintes de courant dans des conditions de court-circuit spécifiées, telles qu'une panne produisant un court-circuit du côté courant continu, jusqu'à la coupure du courant de panne par le circuit de commande et de protection. Il convient de concevoir les valves à VSC afin qu'elles résistent à

la surintensité de court-circuit pendant le nombre de cycles nécessaires pour ouvrir le disjoncteur à courant alternatif principal, sans aucune défaillance ou aucun endommagement de l'équipement, compte tenu également du fait qu'une tension de rétablissement potentielle peut apparaître. Il convient normalement de réaliser l'essai avec l'électronique de la valve initialement sous tension, à moins que le courant de court-circuit puisse se produire dans les conditions où la valve est mise hors tension (par exemple, en raison du courant d'appel existant lors de la fermeture du disjoncteur du convertisseur au démarrage).

11.2 Objet d'essai

Comme décrit en 6.2.

11.3 Exigences relatives aux essais

L'essai consiste à faire atteindre à l'objet d'essai l'équilibre thermique dans les conditions produisant la température de jonction en régime permanent la plus élevée pour le composant à semi-conducteur concerné (voir 6.4) et à susciter un courant de panne. Afin de définir l'élévation de la température de jonction maximale des IGBT et des diodes, toutes les conditions de surcharge possibles (en termes d'amplitude et de durée) doivent être prises en considération.

Il convient que l'amplitude, la durée et le nombre de cycles du courant de panne représentent les valeurs maximales attendues dans le fonctionnement réel. Aucun facteur de sécurité d'essai ne s'applique au courant.

Quand l'objet d'essai connaît une tension de rétablissement entre les cycles de courant de panne, 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.

12 Essai d'insensibilité de la valve aux perturbations électromagnétiques

12.1 Objectif des essais

Le principal objectif consiste à démontrer l'insensibilité de la valve à l'interférence électromagnétique (perturbations électromagnétiques) découlant des transitoires de tension et de courant générés à l'intérieur de la valve et qui lui sont imposés depuis l'extérieur. Les éléments sensibles de la valve correspondent généralement aux 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 au cours d'autres essais de type. Parmi ces essais, l'essai de contrainte de la valve, l'essai de contrainte en fonctionnement continu maximal, l'essai de contrainte en fonctionnement en surcharge temporaire maximal (voir 6.4 et 6.5), l'essai d'impulsion de la valve (voir 9.3.3 et 9.3.4) et l'essai de mise hors tension en cas de surintensité de l'IGBT (voir l'Article 10) sont les plus importants.

Il convient que les essais démontrent:

- a) qu'il ne se produit pas de déclassement ou de commutation parasite de l'IGBT;
- b) que les circuits de protection électroniques installés dans la valve fonctionnent comme prévu;
- c) qu'une indication fausse de pannes de niveaux de valve ou des signaux erronés ne sont pas envoyés aux systèmes de commande et de protection du convertisseur par l'électronique de base de la valve, en raison de la réception de données erronées des circuits de surveillance de la valve.

NOTE Pour la présente norme, 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 qui connecte la valve à la terre. La démonstration de l'insensibilité aux perturbations électromagnétiques de l'équipement situé au potentiel de terre et la caractérisation de la valve comme source de perturbations électromagnétiques pour d'autres éléments de l'équipement n'entrent pas dans le domaine d'application de la présente norme.

12.2 Objet d'essai

En général, l'objet d'essai est la valve ou les sections de valve, telles qu'utilisées pour les autres essais.

Quand il faut démontrer l'insensibilité aux perturbations électromagnétiques provoquées par le couplage entre des valves adjacentes dans une MVU, deux approches sont possibles, telles que définies en 12.3. Dans ce cas, l'objet d'essai est une valve ou une section de valve séparée selon l'approche adoptée.

12.3 Exigences relatives aux essais

12.3.1 Généralités

Lors de la démonstration de l'insensibilité aux perturbations électromagnétiques provoquées par le couplage entre des valves adjacentes d'une MVU, les exigences relatives aux essais dépendent de l'approche adoptée parmi les deux approches recommandées.

NOTE Il convient que la disposition géométrique spécifique à utiliser et que l'amplitude de la tension directe pour l'objet soumis à l'essai de perturbations électromagnétiques fassent l'objet d'un accord en fonction de la conception de la MVU.

12.3.2 Première approche

La première approche consiste à simuler directement la source des perturbations électromagnétiques en tant qu'élément d'un montage d'essai. Ce type de montage d'essai implique 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 soumise à essai doit être aussi proche que possible de la disposition d'utilisation (ou pire, 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 au bon échange d'informations avec l'objet soumis à l'essai de perturbations électromagnétiques doivent être incluses.

12.3.3 Deuxième approche

La deuxième approche consiste à déterminer l'intensité des champs électromagnétique dans les pires conditions de fonctionnement, soit à partir de considérations théoriques, soit au moyen de mesurages. Dans un deuxième temps, ces champs sont simulés par un circuit d'essai qui génère un rayonnement électromagnétique exact (ou pire) aux fréquences respectives. Une section de valve est ensuite exposée aux champs générés par la source d'essai.

Un prérequis essentiel de la deuxième approche est la détermination de la puissance et la direction du champ dynamique aux emplacements clés de la valve. Cette détermination s'obtient généralement au moyen de mesurages effectués par une bobine d'exploration au cours d'essais d'allumage sur une valve unique. Une autre possibilité consiste à prévoir le champ à l'aide de programmes de modélisation de champ en trois dimensions. Ensuite, une section de valve doit être soumise à essai à l'aide d'une bobine de champ séparée pouvant produire une intensité, un contenu de fréquence et une direction de champ au moins aussi importantes que les valeurs prévues.

Les conditions suivantes relatives à la section de valve soumise à essai doivent être satisfaites:

- 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 soumise à essai doit être alimentée;
- les parties de l'électronique de base de la valve nécessaires au bon échange d'informations avec la section de valve doivent être incluses.

12.3.4 Critères d'acceptation

Les critères d'acceptation pour la première et la deuxième approches doivent être tels que définis en 12.1.

15 Essais pour les valves à freinage dynamique

Dans certains systèmes CCHT VSC, mais notamment lorsque le système CCHT exporte de l'énergie à partir d'un système à courant alternatif îloté de petites dimensions avec une charge faible ou inexistante (par exemple, un parc éolien en haute 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 consiste à absorber et à dissiper l'énergie générée dans le système à courant alternatif îloté lors de pannes au niveau du système à courant alternatif de réception, généralement pendant des durées de 1 s à 2 s.

Il existe plusieurs méthodes possibles de mise en œuvre de ce type de système de freinage dynamique, mais la conception des valves de ce système est en règle générale 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 données dans les Articles 6 à 12 précédents sont généralement applicables; toutefois, les valves à freinage dynamique exigent généralement uniquement un sous-ensemble des essais de type applicables aux valves à VSC.

La valve à freinage dynamique reste normalement dans l'état d'attente, mais est tenue de fonctionner et d'acheminer le courant pendant de courtes durées lorsque le système à courant alternatif de réception subit une panne. Les conditions d'essai diélectrique sont par conséquent similaires à celles applicables à la valve à VSC, mais il est nécessaire d'appliquer les conditions d'essai de fonctionnement uniquement pendant de courtes durées.

13 Essais de production

Le présent article traite des essais effectués 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 effectués sur des composants individuels, utilisés à l'intérieur de la valve, du support de valve ou de la structure de valve.

13.1 Objectif des essais

L'objectif des essais de production consiste à 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 préétablis sont compris dans les limites d'acceptation prescrites;
- les sections de valve et les niveaux de paire IGBT-diode (comme approprié) présentent une capacité de tenue en tension appropriée;

- la cohérence et l'uniformité en production sont atteintes.

13.2 Objet d'essai

Toutes les sections de valve ou les parties fabriquées pour le projet doivent être soumises aux essais de production 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.

13.3 Exigences relatives aux essais

L'uniformité des essais de production spécifiés par différents fournisseurs n'est pas nécessaire. Les essais de production doivent prendre en compte les caractéristiques de conception spécifiques à la valve et à ses composants, la portée de l'essai des composants effectué préalablement à l'essai de l'ensemble, et les procédures et techniques de fabrication particulières mises en œuvre. Dans le présent article, seuls les objectifs de l'essai de production sont indiqués.

Dans tous les cas, le fournisseur doit soumettre, pour approbation par le client, une description détaillée des procédures d'essai proposées pour satisfaire aux objectifs d'essai de production.

Les exigences minimales des essais de production de série sont indiquées en 13.4. L'ordre dans lequel les essais sont répertoriés ne reflète ni un classement par ordre d'importance, ni l'ordre dans lequel il convient de les réaliser.

NOTE Dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire d'effectuer des essais d'échantillon de production sur les ensembles complets en plus des essais de série, comme par exemple quand des modifications sont introduites au cours de la production. Il convient de s'accorder sur la nature et l'étendue de ces essais supplémentaires au cas par cas.

13.4 Objectifs des essais de production

13.4.1 Examen visuel

Vérifier que tous les matériaux et composants sont correctement installés et qu'aucun d'entre eux n'est endommagé, conformément à la dernière révision approuvée de la documentation de production.

13.4.2 Vérification de la connexion

Vérifier que les principales connexions conduisant du courant ont été réalisées correctement.

13.4.3 Vérification du circuit d'évaluation de la tension

Vérifier les paramètres du circuit d'évaluation et garantir ainsi que la division de la tension entre les niveaux connectés en série sera adaptée pour les tensions appliquées à partir de courant c.c. aux formes d'onde d'impulsion, le cas échéant.

13.4.4 Vérification des circuits de commande, de protection et de surveillance

Vérifier le fonctionnement de chaque circuit de commande, de protection ou de surveillance faisant partie intégrante de la valve, comme 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 considérés comme nécessaires, ils doivent être spécifiés séparément avec les conditions d'essais.

13.4.5 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 c.a. – c.c. et l'impulsion de commutation, le cas échéant.

13.4.6 Essais de décharge partielle

Pour démontrer que la fabrication est correcte, le client et le fournisseur doivent se mettre d'accord sur les composants et sous-ensembles critiques pour la conception, et des essais appropriés de décharge partielle doivent être réalisés.

13.4.7 Vérification de la mise sous / hors tension

Vérifier que les IGBT dans chaque niveau de valve se met correctement sous et hors tension, en réponse aux commandes de commutation.

13.4.8 Essais de pression

Vérifier qu'il n'y a pas de fuite du liquide de refroidissement.

14 Présentation des résultats d'essais de type

Le rapport d'essai doit être édité conformément aux lignes directrices générales indiquées dans l'ISO/IEC 17025, et comprendre les informations suivantes:

- le nom et l'adresse du laboratoire et le lieu de réalisation des essais;
- le nom et l'adresse du client;
- l'identification sans ambiguïté de l'objet d'essai, comprenant son type et ses caractéristiques, son numéro de série et tout autre renseignement utile à son identification;
- 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 la description claire des points de divergence, s'il y en a, avec les procédures indiquées dans les documents normatifs;
- la description de l'équipement de mesurage et l'indication de l'incertitude de mesure;
- les résultats d'essais sous forme de tableaux, de graphiques, d'oscillogrammes et de photographies, selon les cas;
- la description du dysfonctionnement de l'équipement ou du composant.

Annexe A **(informative)**

Vue d'ensemble des convertisseurs VSC dans le cadre du 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 circuit, 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 de source de courant) tient au fait que pour inverser le sens d'un flux de puissance, ils procèdent à l'inversion du sens du courant direct, et non à celle de la polarité de la tension directe. Le lissage de la tension directe est effectué à l'aide d'un condensateur c.c. de grande taille, qui joue un rôle analogue à celui de l'inducteur c.c. (qui peut être assumé en partie par l'inductance du système de transmission c.c. 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 est, à un grand nombre d'égards, équivalent à celui du courant dans une valve à thyristor CCHT classique, et vice-versa.

Le traitement détaillé de toutes les technologies de valve à VSC possibles s'étend bien au-delà du domaine d'application de la présente norme. L'objectif de la présente annexe consiste simplement à présenter 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 fournir un aperçu des principales technologies de convertisseur connues au moment de sa rédaction. Cependant, elle n'a pas pour objectif de limiter ou de restreindre en aucune manière les types de technologie pouvant être utilisés.

A.2 Caractéristiques élémentaires du VSC

Tous les convertisseurs de source de tension visent à synthétiser, à partir de la tension du condensateur c.c., une tension à peu près sinusoïdale aux bornes c.a. Cependant, en pratique, la tension de sortie du VSC ne peut pas être parfaitement sinusoïdale mais se trouve plutôt constituée de plusieurs pas de tension, ou « niveaux de sortie ». 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 fait référence à un bloc module physique de la valve, par exemple, à un IGBT individuel et à 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 fait référence au nombre d'états discrets dans lesquels la tension de sortie entre phase et neutre d'une unité de phase peut se trouver (Figure A.1). Il est important de remarquer qu'un convertisseur présentant un nombre de niveaux n disposera de $(2n-1)$ valeurs possibles de tension entre phases.

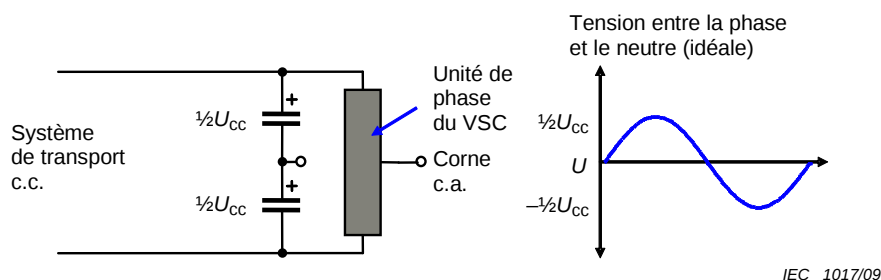


Figure A.1 – Une unité de phase VSC unique et sa tension de sortie idéale

Dans la topologie VSC la plus simple, à savoir un « convertisseur à deux niveaux », la tension de sortie c.a. de chaque bras de phase (par rapport au point médian du condensateur c.c., qui est normalement mis à la terre) a uniquement deux états possibles: $+\frac{1}{2}U_{cc}$ et $-\frac{1}{2}U_{cc}$.

Si les valves à VSC dans ce bras de phase sont uniquement commutées à la fréquence fondamentale, la forme d'onde de tension de sortie c.a. résultante constitue une approximation de tension sinusoïdale de qualité tout à fait médiocre. Une telle forme d'onde est totalement inacceptable dans un système d'alimentation.

En revanche, en commutant les valves en modes ON et OFF plus d'une fois par cycle de fréquence fondamentale et en utilisant la modulation de largeur d'impulsion (MLI), il est possible d'obtenir une tension de sortie étant, après filtrage, raisonnablement sinusoïdale. La Figure A.2 fournit une illustration de ces deux cas.

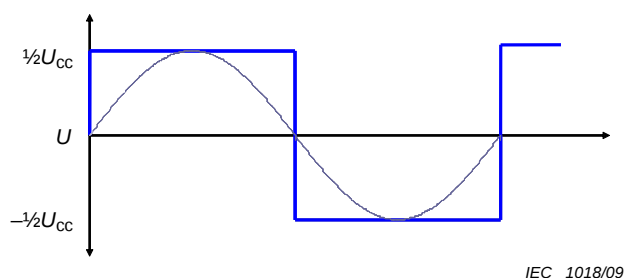


Figure A.2a – Sans MLI

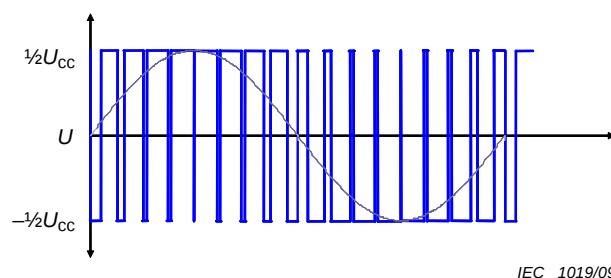


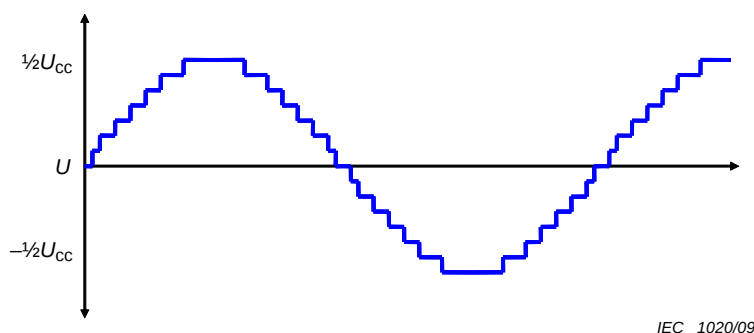
Figure A.2b – Avec MLI

Figure A.2 – Tension de sortie d'une unité de phase VSC pour un convertisseur à 2 niveaux

La MLI constitue une technique avérée pour les entraînements de moteur, mais 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 multi-niveaux ». Il existe plusieurs topologies de convertisseur à 3 ou 5 niveaux, mais dans une application de système d'alimentation, ces convertisseurs, en général, n'en exigent pas moins une MLI pour atteindre une harmonique suffisamment basse.

Cependant, certaines topologies de convertisseurs permettent de produire un plus grand nombre de niveaux de sortie, de sorte que même sans recours à une MLI, la forme d'onde de tension de sortie est hautement sinusoïdale et que peu de (ou aucun) filtrage n'est nécessaire. La Figure A.3 fournit la tension de sortie d'un convertisseur à 15 niveaux, qui peut être considérée comme raisonnablement sinusoïdale. Dans la pratique, les nombres de niveaux supérieurs à 15 sont normalement utilisés pour des applications de transmission CCHT.



IEC 1020/09

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 d'ensemble en grande partie commune, les valves à VSC se situent à une étape 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.

- Les valves à VSC du 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: ON et OFF. Dans les convertisseurs présentant cette topologie, les condensateurs c.c. sont entièrement séparés des valves et peuvent être soumis à essai individuellement.
- Les valves à VSC du type « à source de tension commandable ». Dans les valves de ce type, les condensateurs c.c. font partie intégrante de la valve et ne peuvent pas en être séparés aisément en vue des essais.

Il est nécessaire de procéder à certains essais de type de manière légèrement différente selon la catégorie à laquelle les valves appartiennent, parmi les deux catégories présentées ci-dessus.

Certaines 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; toutefois, au moment de la rédaction, les travaux de développement dans le domaine de ces topologies sont relativement récents, et ces topologies ne sont pas encore disponibles dans le commerce.

A.4 Valves à VSC du type «commutateur»

A.4.1 Généralités

Les valves à VSC de ce type sont assez ressemblantes en apparence aux valves à thyristor classiques, en cela qu'elles sont constituées d'un nombre important de dispositifs IGBT connectés en série et commutés 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 fournissant quelques dispositifs IGBT supplémentaires connectés en série et en s'assurant que les IGBT sont d'un type spécial en mode de défaillance par 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 relativement faible de niveaux de sortie. Pour compenser leur faible nombre de niveaux de sortie, ces

convertisseurs ont généralement recours à la modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour atteindre une approximation correcte de tension de sortie sinusoïdale.

Certaines des topologies de convertisseur les plus courantes pouvant être utilisées 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 du VSC comprend simplement deux valves à VSC connectées en série et partageant une borne c.a. Les deux valves sont commutées alternativement de telle sorte qu'à tout moment, soit l'une soit l'autre est conductrice, mais jamais les deux. (En pratique, il existe un léger « chevauchement » ou temps mort entre les deux valves afin d'empêcher une « reconduction » ou la conduction simultanée de deux valves connectées en série).

La topologie du circuit de ce convertisseur est très simple (voir Figure A.4) et demande très peu d'explications. Lorsque V1 est conductrice, la borne c.a. est connectée à la borne c.c. supérieure et produit donc une tension de sortie de $+\frac{1}{2}U_{cc}$. Lorsque V2 est conductrice, la borne c.a. est connectée à la borne c.c. inférieure et produit donc une tension de sortie de $-\frac{1}{2}U_{cc}$.

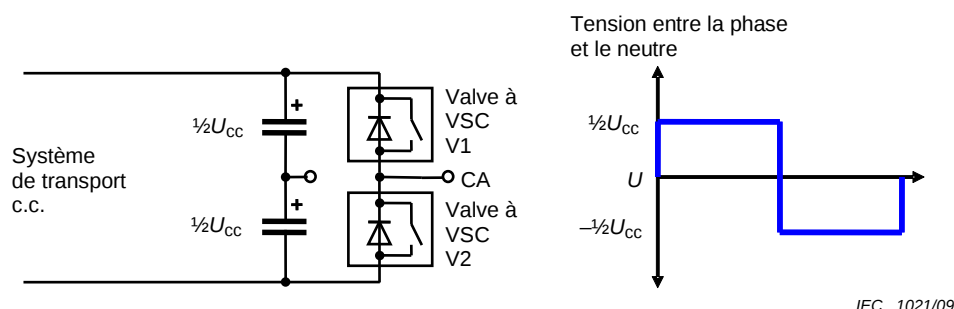


Figure A.4 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur à 2 niveaux

A.4.3 Convertisseur encastré dans une diode multi-niveaux

Dans cette famille de convertisseurs, le condensateur c.c. est subdivisé en un nombre de zones discrètes connectées 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 c.c. et dans l'unité de phase.

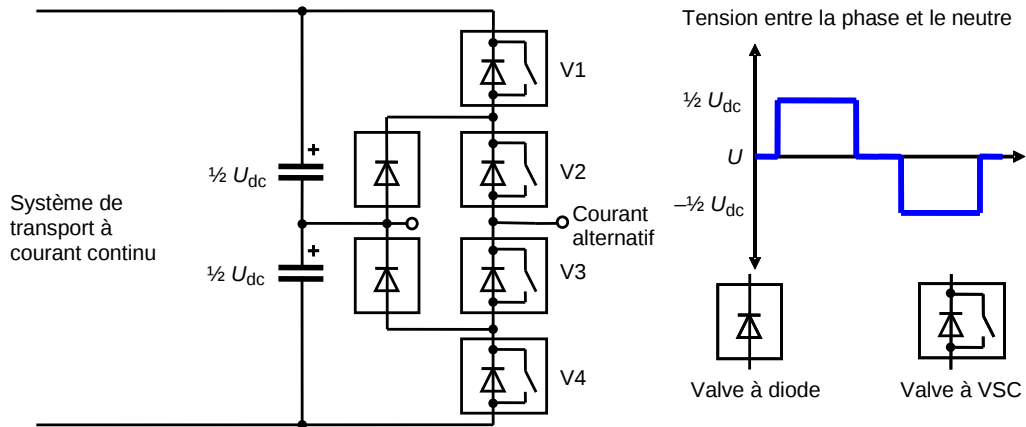
Dans la plus simple version de ce circuit (voir Figure A.5), le convertisseur à trois niveaux, chaque unité de phase contient quatre valves à VSC indépendantes connectées en série. Le condensateur c.c. est subdivisé en deux unités connectées en série (comme c'est souvent le cas pour un convertisseur à deux niveaux). La borne c.a. 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 médian c.c. par l'intermédiaire des valves à diode.

Avec ce convertisseur, trois états de sortie sont possibles à partir d'une unité de phase unique. Lorsque les valves V1+V2 sont conductrices, la borne c.a. est connectée à la borne c.c. supérieure et produit donc une tension de sortie de $+\frac{1}{2}U_{cc}$. Lorsque les valves V3+V4 sont conductrices, la borne c.a. est connectée à la borne c.c. inférieure et produit donc une tension de sortie de $-\frac{1}{2}U_{cc}$. Lorsque les valves V2+V3 sont conductrices, la tension de sortie c.a. est « fixée » en fonction de la tension du point médian c.c. par les valves à diode.

Le même principe peut être étendu à des nombres de niveaux plus élevés en subdivisant davantage le condensateur c.c. et en utilisant plus de valves à VSC et à diode. Dans un convertisseur à 5 niveaux, le condensateur c.c. est subdivisé en quatre zones discrètes, et

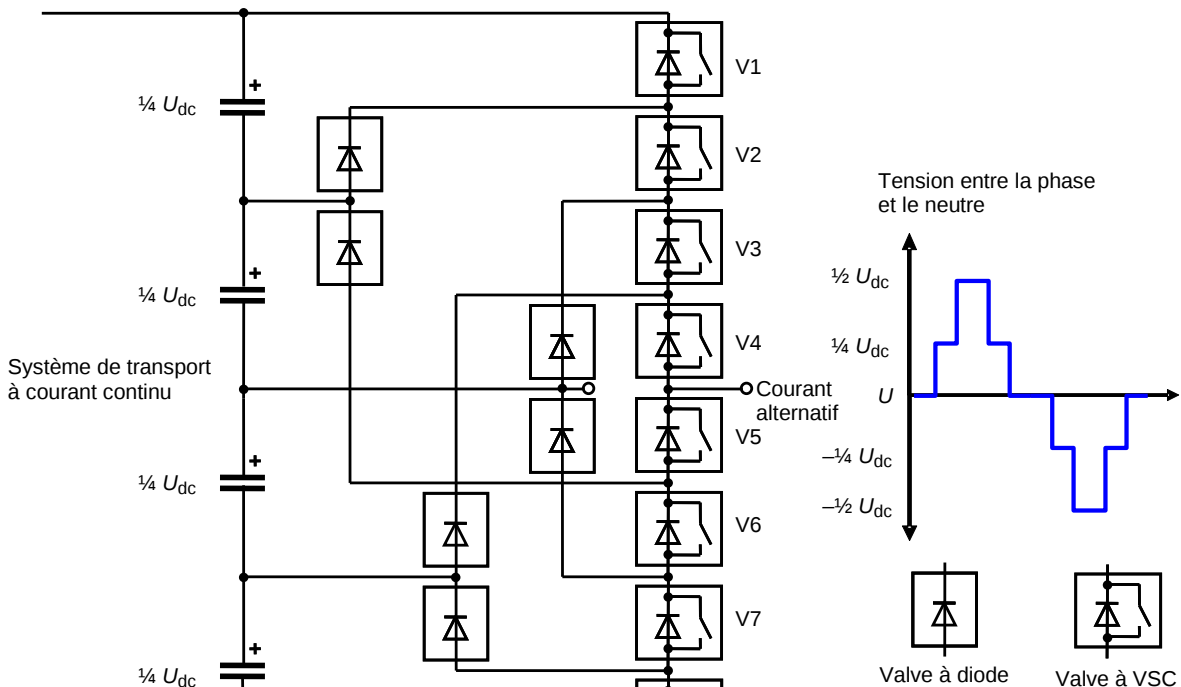
huit valves à VSC et six valves à diode sont présentes (voir Figure A.6). Dans ce circuit, les valves sont commutées en groupes adjacents de quatre, par exemple V1+V2+V3+V4 donne une tension de sortie de $+\frac{1}{2}U_{dc}$, V2+V3+V4+V5, une tension de sortie de $+\frac{1}{4}U_{dc}$, etc.

Il faut souligner que la complexité du circuit augmente de manière disproportionnée à mesure que le nombre de niveaux de sortie augmente. Cette situation est empirée par le fait que non seulement le nombre, mais aussi les caractéristiques de tension des valves à diode, augmente rapidement avec le nombre des niveaux de sortie.



IEC

Figure A.5 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur lié à une diode à 3 niveaux



IEC

Figure A.6 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur lié à une diode à 5 niveaux

A.4.4 Convertisseur à condensateur volant multi-niveaux

Ce circuit permet d'atteindre le même résultat que le convertisseur lié à une diode à l'aide d'une méthode différente. Au lieu d'utiliser des valves à diode pour fixer la tension de sortie dans l'une des zones du condensateur c.c. intermédiaire, il a recours à un ou plusieurs convertisseurs c.c. supplémentaires, qui sont isolés des bornes c.c. et sont donc « flottants » ou « volants », pour obtenir le même effet. Ce circuit est également appelé parfois le 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 lié à une diode à 3 niveaux, les valves sont commutées par paires mais le modèle permettant d'atteindre une tension de sortie nulle est différent. Pour atteindre un état de sortie de 0, soit les valves V1+V3, soit les valves V2+V4 sont sous tension. V2+V3 représente une combinaison illégale qui entraîne le court-circuit du condensateur volant.

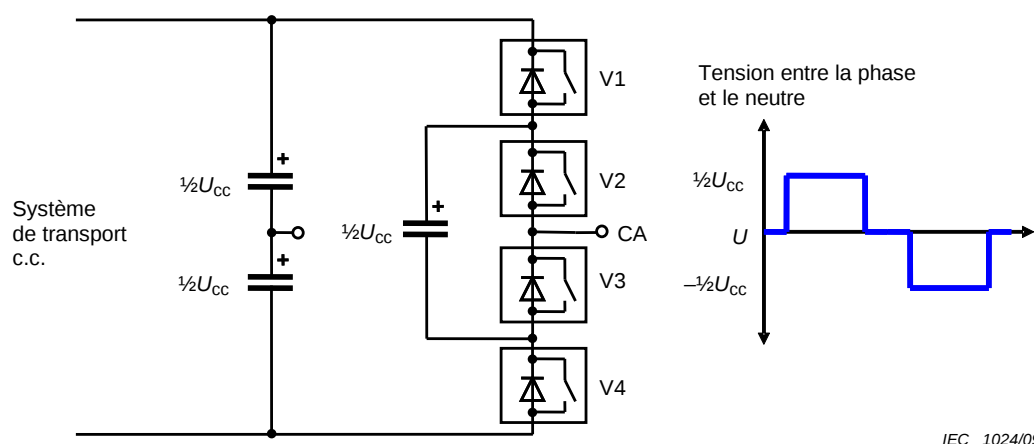


Figure A.7 – Topologie de circuit élémentaire d'une unité de phase d'un convertisseur à condensateur volant à 3 niveaux.

Le nombre de valves à VSC par unité de phase est le même pour ce convertisseur que pour le convertisseur lié à une diode présentant le même nombre de niveaux de sortie. Comme pour le convertisseur lié à une diode, un nombre important de niveaux de sortie est possible, mais au risque d'une augmentation disproportionnée de la complexité.

A.5 Valves à VSC du type «à source de tension commandable»

A.5.1 Généralités

Dans le convertisseur à 2 niveaux, les valves et le condensateur c.c. 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 c.c. augmente, de même que l'interdépendance des valves et du condensateur c.c.

A mesure que le convertisseur s'approche de l'idéal, où le nombre de niveaux de sortie est suffisant pour atteindre une approximation correcte de forme d'onde sinusoïdale sans avoir recours à la MLI, la subdivision du condensateur c.c. 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 élément IGBT effectuant la commutation, mais également comme condensateur c.c. distribué. En effet, une telle valve ne constitue plus simplement un commutateur mais est désormais une source de tension

commandable, connectée entre la borne c.a. de l'unité de phase correspondante et l'une des bornes c.c. (voir Figure A.8).

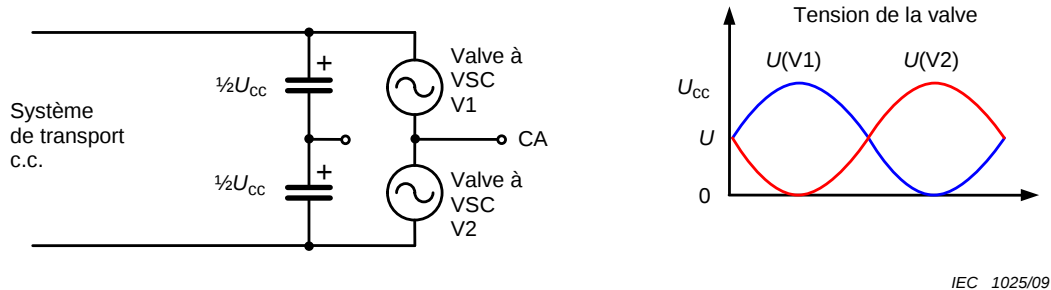


Figure A.8 – Une unité de phase VSC unique avec des valves du type «source de tension commandable»

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 $U(V1) + U(V2) = U_{dc}$.

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 multiniveaux modulaire» (MMC – modular multi-level converter) et le «Convertisseur à deux niveaux monté en cascade» (CTL – cascaded two-level converter).

Dans la mesure où le circuit 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 implique un filtrage) ou des IGBT connectés en série (qui entraînent des problèmes de distribution de la tension). En revanche, le nombre et la taille des condensateurs c.c. discrets requis peuvent être considérables, et il peut s'avérer difficile d'assurer que toutes les tensions de condensateur c.c. 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'un besoin d'espace plus important.

A.5.2 Convertisseur multiniveaux modulaire (MMC)

Une mise en œuvre du circuit MMC est illustrée à 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. De fait, ce circuit est 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 en courant alternatif (entre IGBT1 et IGBT2) d'un sous-module, vers l'une des bornes en courant continu du sous-module voisin. Avec ce circuit, chaque sous-module peut produire deux états de sortie discrets: $U = 0$ (obtenu en commutant l'IGBT2 en mode ON) ou $U = U_{dc_submodule}$ (obtenu en commutant l'IGBT1 en mode ON). $U_{dc_submodule}$ 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 dans son ensemble.

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 en 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 intégral, telle qu'illustrée à la Figure A.10, en lieu et place de la disposition en demi-pont illustrée à la Figure A.9.

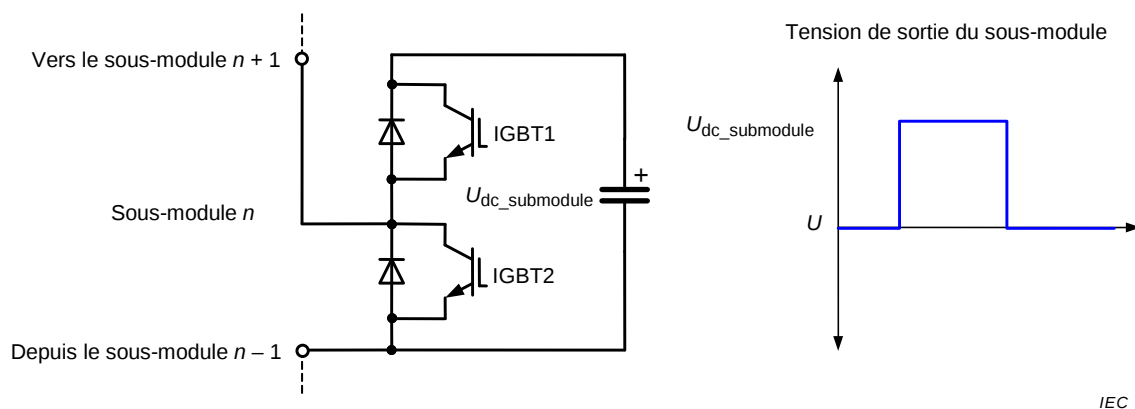


Figure A.9 – Circuit MMC en demi-pont

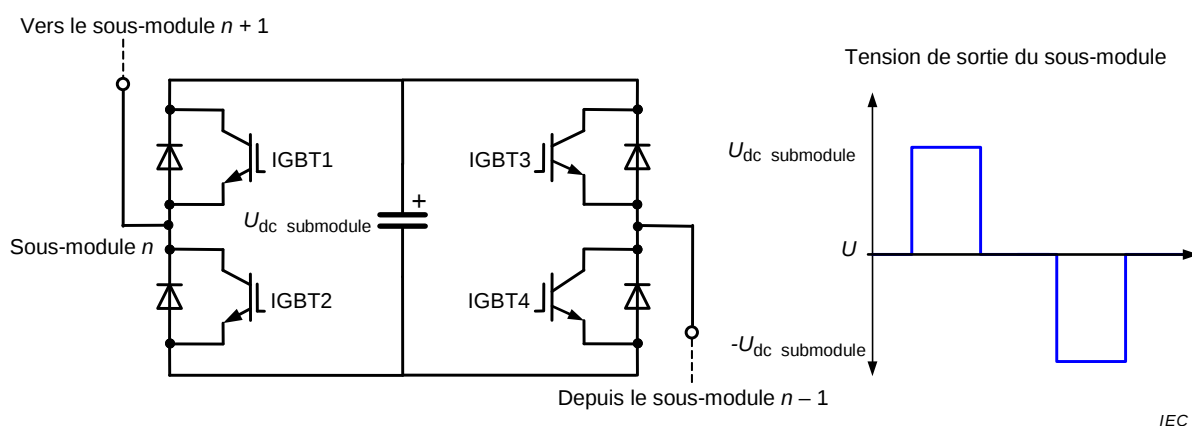


Figure A.10 – Circuit MMC en pont intégral

Dans la version "pont intégral" 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 par commutation sur IGBT1 + IGBT3 ou IGBT2 + IGBT4);
- $U = +U_{dc_submodule}$ (obtenu par commutation sur IGBT1+IGBT4); ou
- $U = -U_{dc_submodule}$ (obtenu par commutation sur IGBT2+IGBT3)

Le circuit en pont intégral 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 prise. Même lorsqu'il est utilisé sur une ligne à courant continu unipolaire, le circuit fournit une souplesse 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), ce qui génère un courant alternatif réduit dans la valve. De plus, la capacité à éliminer les courants de défaut dus aux courts-circuits qui se produisent entre les bornes en 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 comparaison avec 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 exiger 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 du type commutateur. La redondance ne peut pas être assurée dans chaque sous-module (étant donné que le fonctionnement correct du sous-module exige que les deux IGBT soient en bon état), mais est en revanche habituellement pourvu 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.

Par ailleurs, le nombre et la taille des condensateurs à courant continu discrets exigés peuvent être considérables, et il peut s'avérer difficile d'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 en termes d'espace plus importante.

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, à presque 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 intégral. Le bloc module de la valve du type CTL est désigné par le terme «cellule» et la version demi-pont d'une cellule est illustrée à 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 termes 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 nombre plus petit de paliers plus grands, que le circuit MMC. Ses performances harmoniques ne sont par conséquent pas aussi bonnes que celles du circuit MMC, bien que, si le nombre de IGBT par position de commutation est réduit (par exemple, 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 comparaison avec le 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 du 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.

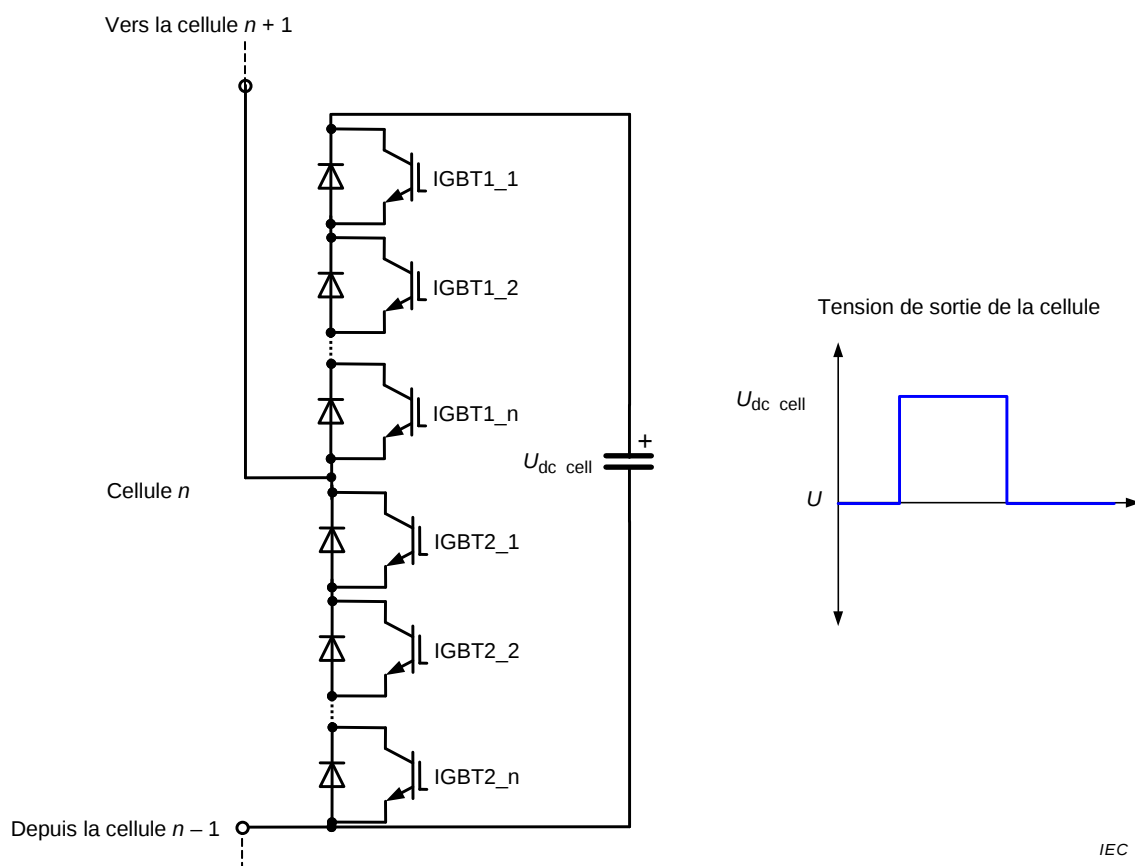


Figure A.11 – Circuit CTL en demi-pont

A.5.4 Terminologie relative aux valves du type «à source de tension commandable»

Les Figures A.12 et A.13 illustrent les principaux termes relatifs à la construction des valves des types MMC et CTL respectivement, afin d'expliquer la signification de termes tels que niveau VSC, sous-module et cellule.

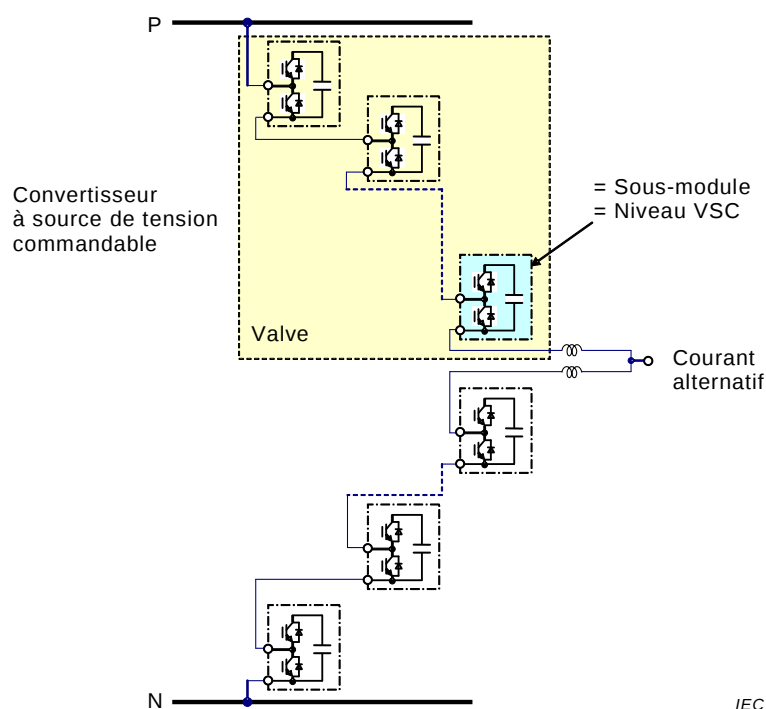


Figure A.12 – Termes relatifs à la construction des valves du type MMC

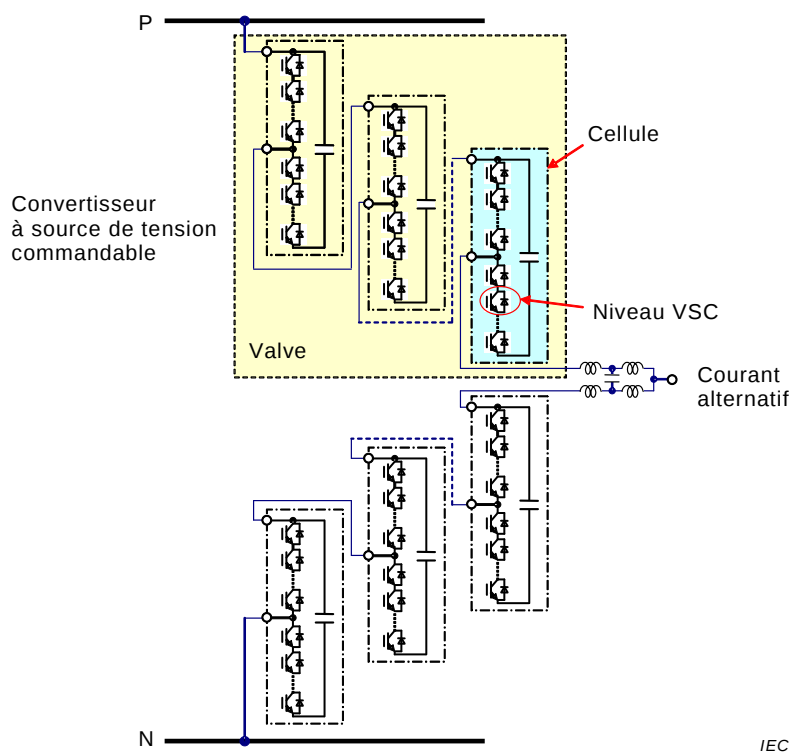


Figure A.13 – Termes relatifs à la construction des valves du type CTL

A.7 Valves à VSC hybrides

Certains ouvrages de référence publiés ont proposé d'autres types de valve 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 CIGRÉ.

A.6 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 de l'essai des valves.

Parmi les très nombreuses différences, les différences principales qui influencent l'essai des valves sont les suivantes.

- Les valves à VSC peuvent être mises en modes ON et OFF par une action de commande. En revanche, les valves à thyristor CCHT classiques peuvent uniquement être mises en mode ON par une action de commande et exigent, pour passer en mode OFF, que le circuit externe contraigne le courant à zéro et applique ensuite une période de tension inversée. C'est pourquoi les essais visant à démontrer les angles d'extinction minimaux ou les transitoires de tension positive au cours de l'intervalle de rétablissement (qui s'avèrent tellement importants pour les valves à thyristor), n'ont aucune signification 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 comporte 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 mise en mode ON de protection n'est généralement pas utilisée en raison du risque de créer un court-circuit dans le condensateur c.c., mais une mise en mode OFF de protection est employée comme un moyen permettant d'éliminer les surintensités. En revanche, dans les valves à thyristor CCHT classiques, la mise en mode ON de protection est largement utilisée et la mise en mode OFF de protection n'est pas possible.
- La grande capacité côté c.c. indique qu'en de rares circonstances, une unité de phase VSC peut expérimenter des transitoires de tension rapides entre les bornes. Dans les valves du type « à source de tension commandable » (où une partie de la capacité c.c. est intégrée dans la valve), la même remarque est également vraie en ce qui concerne 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 à VSC en CCHT à assurer sa fonction prévue, jusqu'à son arrêt programmé, avec des composants ou sous-ensembles défectueux ou des composants surchargés, sans entraîner de dysfonctionnement inacceptable des autres composants, ni laisser s'étendre les dommages dus à la situation de panne. Des caractéristiques particulières de conception peuvent s'avérer nécessaires pour assurer la tolérance aux pannes. Des exemples de pannes, pour lesquelles la mise en œuvre de la tolérance aux pannes peut être exigée, sont indiqués ci-dessous.

a) Court-circuit d'une valve à VSC

Même si le court-circuit d'une paire d'iode-IGBT 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 serrage.

b) Manque de câbles sur grille au niveau de valve, provoqué par la perte d'impulsions normales sur grille au niveau en question

Manque de charges sur grilles pour la mise en parallèle de la surtension des composants au niveau concerné.

c) Dysfonctionnement de l'isolement d'un condensateur d'amortissement, d'une résistance d'amortissement ou d'autres composants, le cas échéant

Dysfonctionnement de l'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 danger.

d) Fuite de petites quantités de liquide de refroidissement de la valve

Si la valve est à refroidissement par liquide, de petites fuites peuvent s'avérer difficiles à détecter. Le liquide de refroidissement échappé est susceptible de contaminer des composants sensibles, d'entraîner un dysfonctionnement et d'augmenter le risque de dysfonctionnement de l'isolement.

Il convient que le client étudie la conception proposée avec le fournisseur afin de déterminer les risques et les conséquences probables de certains dysfonctionnements. 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 chacun de ces essais sont soumis à un accord établi au cas par cas.

Bibliographie

IEC 60146-2:1999, *Convertisseurs à semiconducteurs – Partie 2: Convertisseurs autocommutés à semiconducteurs y compris les convertisseurs à courant continu directs*

IEC PAS 61975:2004, *System tests for high-voltage direct current (HVDC) installations*

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

CIGRÉ Technical Brochure No. 269, *VSC Transmission*

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

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

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch