

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Thyristor valves for thyristor controlled series capacitors (TCSC) – Electrical testing

**Valves à thyristors pour condensateurs série commandés par thyristors (CSCT)
– Essai électrique**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2015 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 15 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

More than 60 000 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 15 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

Plus de 60 000 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.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Thyristor valves for thyristor controlled series capacitors (TCSC) – Electrical testing

**Valves à thyristors pour condensateurs série commandés par thyristors (CSCT)
– Essai électrique**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.240.99

ISBN 978-2-8322-2860-9

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

CONTENTS

FOREWORD	5
1 Scope	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	7
4 TCSC valve and valve operation in general	10
4.1 TCSC installation and TCSC valve	10
4.2 TCSC valve current and voltage at capacitive boost operation	12
4.2.1 General	12
4.2.2 Waveshapes of valve current and voltage in capacitive boost operation	12
4.2.3 Formulas for TCSC valve current and voltage stresses calculation	13
4.3 Typical operating pattern of TCSC installation	15
5 General requirements	15
5.1 Guidelines for the performance of type tests	15
5.1.1 Evidence in lieu	15
5.1.2 Sequence of tests	16
5.1.3 Ambient temperature for testing	16
5.1.4 Frequency for testing	16
5.1.5 Test reports	16
5.2 Test conditions for dielectric tests	16
5.2.1 General	16
5.2.2 Treatment of redundancy in dielectric tests	16
5.2.3 Atmospheric correction factor	17
5.3 Test conditions for operational tests	17
5.3.1 General	17
5.3.2 Treatment of redundancy in operational tests	17
5.4 Criteria for successful type testing	18
5.4.1 General	18
5.4.2 Criteria applicable to valve levels	18
5.4.3 Criteria applicable to the valve as a whole	19
6 Summary of tests	19
7 Dielectric tests between valve terminals and valve enclosure	20
7.1 Purpose of tests	20
7.2 Test object	21
7.3 Test requirements	21
7.3.1 AC test	21
7.3.2 Lightning impulse test	22
8 Dielectric tests between valve terminals	22
8.1 Purpose of tests	22
8.2 Test object	22
8.3 Test requirements	23
8.3.1 AC test	23
8.3.2 Switching impulse test	24
9 Periodic firing and extinction tests	24
9.1 Purpose of tests	24
9.2 Test object	24

9.3	Test requirements	25
9.3.1	General	25
9.3.2	Maximum continuous capacitive boost test	25
9.3.3	Maximum temporary capacitive boost test	26
9.3.4	Minimum capacitive boost test	26
9.3.5	Operation at bypass.....	27
10	Fault current tests	29
10.1	Purpose of tests.....	29
10.2	Test object.....	29
10.3	Test requirements	29
10.3.1	Fault current without subsequent blocking	29
10.3.2	Fault current with subsequent blocking	29
11	Test for valve insensitivity to electromagnetic disturbance	30
11.1	Purpose of tests.....	30
11.2	Test object.....	30
11.3	Test requirements	30
12	Testing of special features.....	30
12.1	Purpose of tests.....	30
12.2	Test object.....	31
12.3	Test requirements	31
13	Routine tests	31
13.1	General.....	31
13.2	Visual inspection.....	31
13.3	Connection check	31
13.4	Voltage grading circuit check	31
13.5	Voltage withstand check	31
13.6	Partial discharge tests	31
13.7	Check of auxiliaries.....	32
13.8	Firing check	32
13.9	Cooling system pressure test	32
14	Presentation of type test results	32
Annex A	(informative) TCSC valve operating and rating considerations	33
A.1	Overview.....	33
A.2	TCSC characteristics	33
A.3	Operating range	34
A.4	Reactive power rating	35
A.5	Power oscillation damping (POD).....	35
A.6	SSR mitigation	35
A.7	Harmonics	36
A.8	Control interactions between TCSCs in parallel lines	36
A.9	Operating range, overvoltages and duty cycles	36
A.9.1	Operating range.....	36
A.9.2	Transient overvoltages	36
A.9.3	Duty cycles.....	37
Annex B	(informative) Valve component fault tolerance.....	38
Bibliography		39

Figure 1 – Typical connection and nomenclature of a TCSC installation.....	11
Figure 2 – TCSC subsegment	11
Figure 3 – TCSC steady state waveforms for control angle α and conduction interval σ	12
Figure 4 – Thyristor valve voltage in a TCSC	13
Figure 5 – Example of operating range diagram for TCSC	15
Figure A.1 – TCSC power frequency steady state apparent reactance characteristics according to Formula (A.1) with $\lambda = 2,5$	34
Table 1 – Valve level faults permitted during type tests.....	19
Table 2 – List of tests	20
Table A.1 – Peak and RMS voltage relationships	33

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**THYRISTOR VALVES FOR THYRISTOR CONTROLLED
SERIES CAPACITORS (TCSC) – 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.

International Standard IEC 62823 has been prepared by subcommittee 22F: Power electronics for electrical transmission and distribution systems, of IEC technical committee 22: Power electronic systems and equipment.

The text of this standard is based on the following documents:

CDV	Report on voting
22F/342/CDV	22F/354A/RVC

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

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

The committee has decided that the contents of this publication 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 document using a colour printer.

THYRISTOR VALVES FOR THYRISTOR CONTROLLED SERIES CAPACITORS (TCSC) – ELECTRICAL TESTING

1 Scope

This International Standard defines routine and type tests on thyristor valves used in thyristor controlled series capacitor (TCSC) installations for AC power transmission.

The tests specified in this International Standard are based on air insulated valves operating in capacitive boost mode or bypass mode. For other types of valve and for a valve operating in inductive boost mode, the test requirements and acceptance criteria are agreed between purchaser and supplier.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60060-1:2010, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*

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

IEC 60071-2, *Insulation co-ordination – Part 2: Application guide*

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

3 Terms and definitions

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

3.1

thyristor valve

electrically and mechanically combined assembly of thyristor levels, complete with all connections, auxiliary components and mechanical structures, which can be connected in series with each phase of the reactor of a TCSC

3.2

valve section

electrical assembly, comprising a number of thyristors and other components, which exhibits prorated electrical properties of a complete valve

Note 1 to entry: This term is mainly used to define a test object for valve testing purposes.

3.3

thyristor level

<of a valve> part of a valve comprising an anti-parallel connected pair of thyristors together with their immediate auxiliaries, and reactor, if any

3.4

redundant thyristor levels, pl

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

3.5

valve arrester

arrester connected across a valve

3.6

valve electronics

VE

electronic circuits at valve potential(s) that perform control functions

Note 1 to entry: This note applies to the French language only.

3.7

valve interface electronics unit

electronic unit which provides an interface between the control equipment, at earth potential, and the valve electronics or valve devices

Note 1 to entry: Valve interface electronics units, if used, are typically located at earth potential close to the valve(s).

Note 2 to entry: The term “valve base electronics” (VBE) is also used to designate this unit.

3.8

thyristor-controlled series capacitor bank

TCSC bank

assembly of thyristor valves, reactor(s), capacitors, and associated auxiliaries, such as structures, support insulators, switches, and protective devices, with control equipment required for a complete operating installation

3.9

TCSC reactor

one or more reactors connected in series with the thyristor valve

SEE: Figure 1, item 4.

3.10

valve enclosure

platform-mounted enclosure containing thyristor valve(s) with associated valve cooling and electronic hardware

3.11

temporary overload

short-term overload capability of the TCSC at rated frequency and ambient temperature range

SEE: Figure 5.

Note 1 to entry: Temporary overload is typically of several seconds duration, less than 10 s.

3.12

valve protective firing

means of protecting the thyristors from excessive voltage by firing them at a predetermined voltage

3.13**line current** i_L

power frequency line current

SEE: Figure 2.

3.14**rated current** I_N RMS line current (I_L) at which the TCSC should be capable of continuous operation with rated reactance (X_N) and rated voltage (U_N)**3.15****valve current** i_V

current through the thyristor valve

SEE: Figure 2.

3.16**bypass current**

current flowing through the thyristor valve in parallel with the series capacitor, when the series capacitor is bypassed

3.17**capacitor voltage** U_C

voltage across the TCSC

SEE: Figure 2.

3.18**nominal reactance** X_N

nominal power frequency reactance for each phase of the TCSC with nominal boost factor

3.19**rated TCSC voltage** U_N power frequency voltage across each phase of the TCSC that can be continuously controlled at nominal reactance (X_N), rated current (I_N), nominal power frequency, and ambient temperature range**3.20****apparent reactance** $X(\alpha)$ TCSC apparent power frequency reactance as a function of thyristor control angle (α)

SEE: Figure 3, Figure A.1 and Formula A.1.

3.21**rated capacitance** C_N

capacitance value for which the TCSC capacitor has been designed

3.22**physical reactance** X_C

power frequency reactance for each phase of the TCSC bank with thyristors blocked and a capacitor internal dielectric temperature of 20 °C

$$X_C = 1/(\omega_N \cdot C_N)$$

3.23**boost factor** k_B

the ratio of apparent reactance $X(\alpha)$ divided by physical reactance X_C

$$k_B = X(\alpha) / X_C$$

3.24**conduction interval** σ

part of a half of a power frequency cycle during which a thyristor valve is in the conducting state

$$\sigma = 2\beta$$

SEE: Figure 3.

3.25**control angle** α

time expressed in electrical angular measure from the capacitor voltage (U_C) zero crossing to the starting of current conduction through the thyristor valve

SEE: Figure 3.

3.26**internal fault**

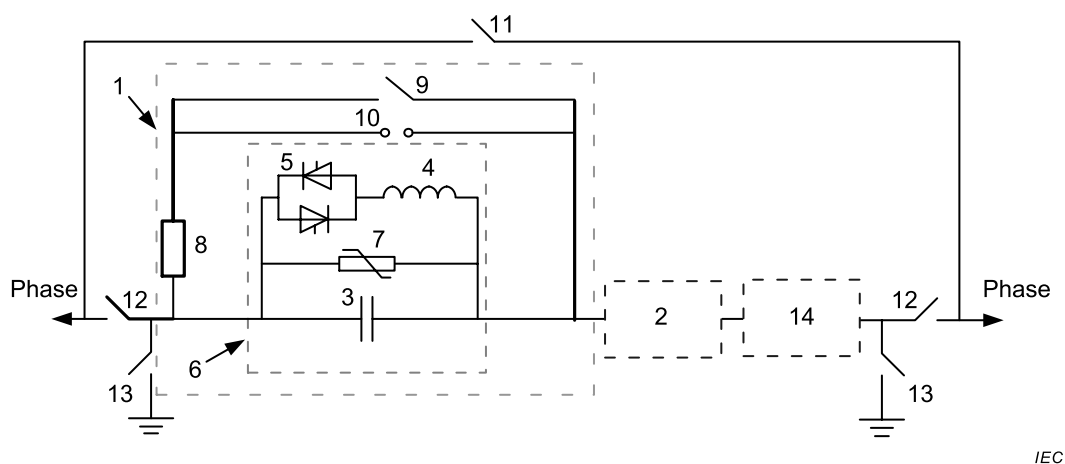
line fault occurring within the protected line section containing the series TCSC subsegment

3.27**external fault**

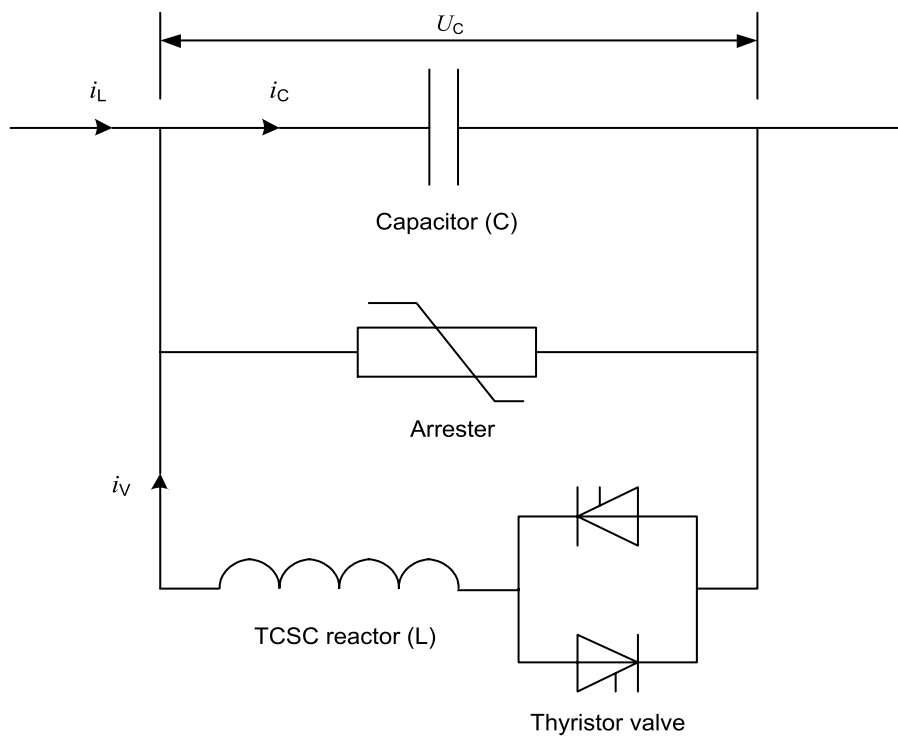
line fault occurring outside the protected line section containing the series TCSC subsegment

4 TCSC valve and valve operation in general**4.1 TCSC installation and TCSC valve**

Transmission line series reactance can be compensated by combinations of fixed series capacitors (FSC) and TCSC based controllable segments, as shown in Figure 1. A TCSC subsegment uses a thyristor-controlled reactor (TCR) in parallel with a capacitor bank with the rated capacitance C_N , as shown in Figure 2. The thyristor valve used in this TCSC subsegment is a TCSC valve (See Figure 1, item 5).

**Key**

1	TCSC unit	8	Discharge current limiter, if applicable
2	Additional TCSC unit when required	9	Bypass switch
3	TCSC capacitor	10	Bypass gap
4	TCSC reactor	11	External bypass disconnector
5	TCSC thyristor valve	12	External isolating switch
6	TCSC subsegment	13	External earth switch
7	Capacitor arrester	14	Additional FSC unit when required

Figure 1 – Typical connection and nomenclature of a TCSC installation**Figure 2 – TCSC subsegment**

4.2 TCSC valve current and voltage at capacitive boost operation

4.2.1 General

Even if a TCSC valve can be, theoretically, operated in an inductive boost mode, this operation is not used in practice in a TCSC installation due to the system compensation need and other limitations. Capacitive boost operation mode is a used operation mode of a TCSC valve.

4.2.2 Waveshapes of valve current and voltage in capacitive boost operation

At a sinusoidal line current and voltage (see Figure 3 a)), the capacitive boost operating of a TCSC valve leads to a deformed sinusoidal current flow through the capacitor bank, C, and TCSC valve (see Figure 3 b)). This current boosts the fundamental frequency voltage drop across the TCSC subsegment.

The waveform of the thyristor valve voltage in a TCSC is shown in Figure 4.

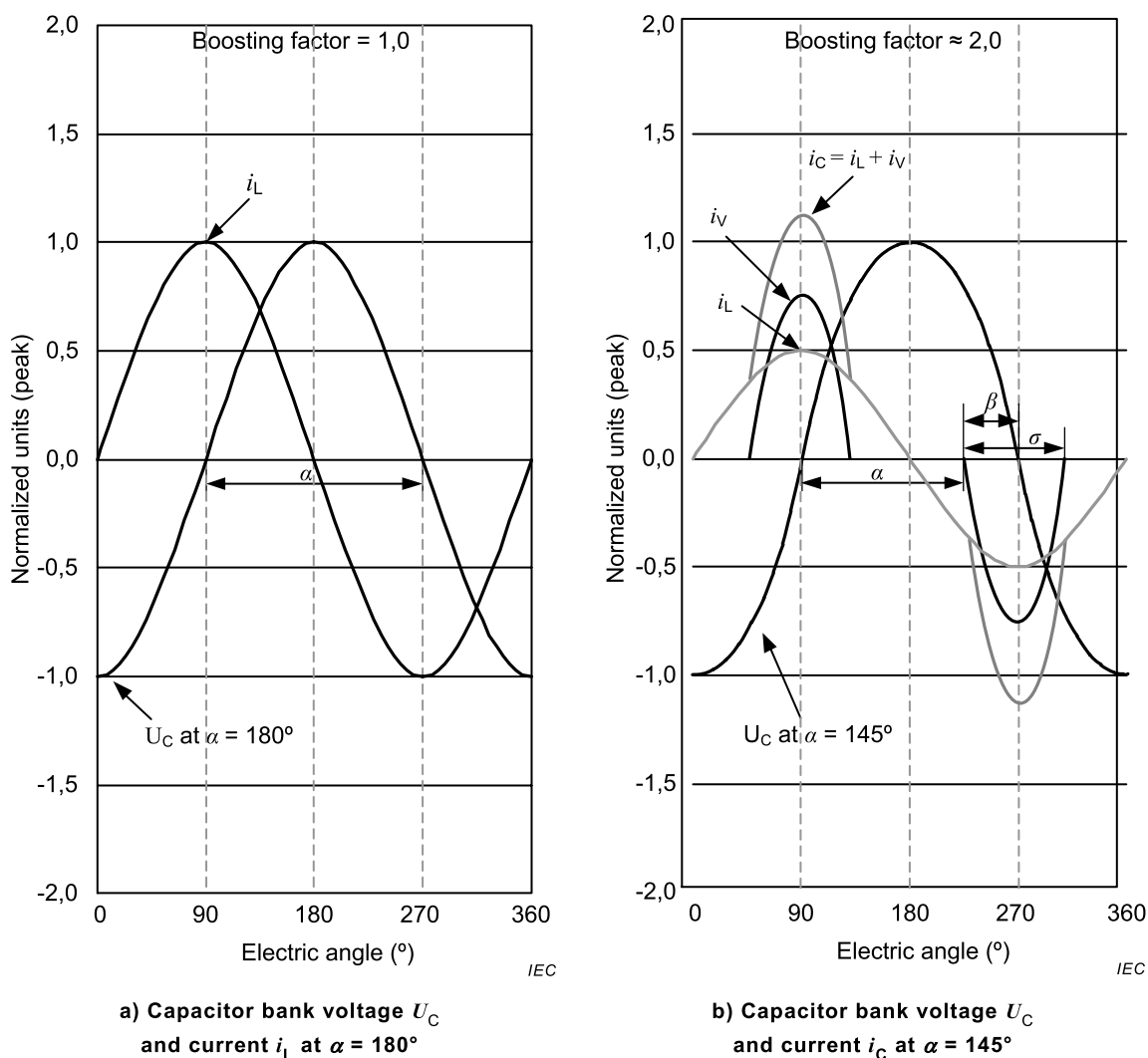
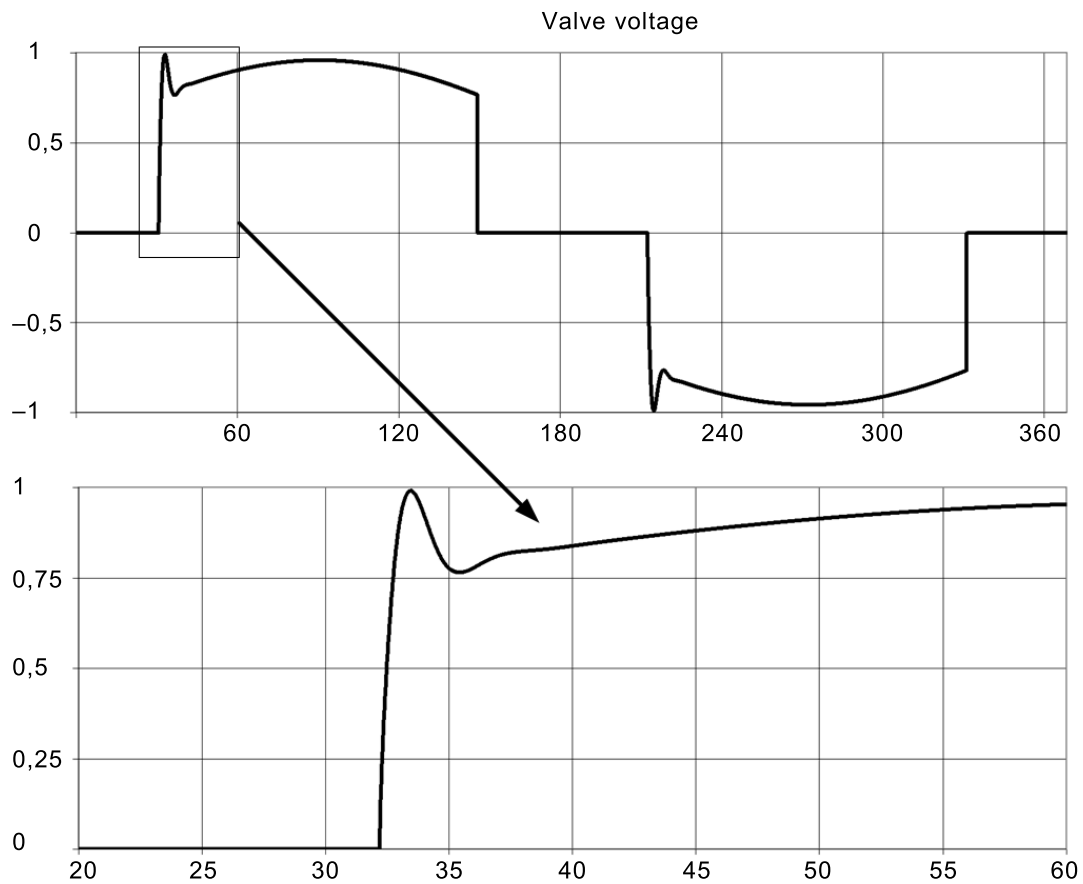


Figure 3 – TCSC steady state waveforms for control angle α and conduction interval σ



IEC

Figure 4 – Thyristor valve voltage in a TCSC

4.2.3 Formulas for TCSC valve current and voltage stresses calculation

4.2.3.1 Capacitive boost operation mode

In TCSC capacitive boost operation mode, the TCSC valve current follows the formulation below:

$$i_V = (-1)^n \cdot \frac{\lambda^2 \cdot i_L}{\lambda^2 - 1} \cdot \left(\cos \omega_N \cdot t - \frac{\cos \beta}{\cos \lambda \cdot \beta} \cdot \cos \lambda \cdot \omega_N \cdot t \right), \quad n \cdot \pi - \beta \leq \omega_N \cdot t \leq n \cdot \pi + \beta$$

$$i_V = 0 \quad n \cdot \pi + \beta < \omega_N \cdot t < (n + 1) \cdot \pi - \beta$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

where

λ is the ratio of TCSC subsegment LC branch natural frequency and AC system power frequency, $\lambda = \frac{1}{\omega_N \cdot \sqrt{L \cdot C}}$;

i_L is the AC system line current;

ω_N nominal angle frequency of AC system;

β is half of the maximum conduction angle of TCSC valves in one direction for capacitive boost at i_L .

The rate of current change, di/dt , at thyristor turn-on and turn-off derives as follows:

$$\left. \frac{di_v}{dt} \right|_{\omega_N \cdot t = \frac{\pi}{2} + \beta} = \frac{\lambda^2 \cdot i_L}{\lambda^2 - 1} \cdot \left[\omega_N \cdot \sin \beta - \omega_N \cdot \frac{\cos \beta}{\cos(\lambda \cdot \beta)} \cdot \sin(\lambda \cdot \beta) \right]$$

The peak current through the TCSC valve is equal to:

$$i_{v_peak} = \frac{\lambda^2 \cdot i_L}{\lambda^2 - 1} \cdot \left[1 - \frac{\cos \beta}{\cos(\lambda \cdot \beta)} \right]$$

The capacitor voltage, U_{C_N} , at thyristor turn-on and turn-off instants is equal to:

$$U_{C_N} = \frac{\lambda \cdot i_L}{\lambda^2 - 1} \cdot X_0 \cdot [\sin \beta - \lambda \cdot \cos \beta \cdot \tan(\lambda \cdot \beta)]$$

where

X_0 is the TCSC subsegment LC branch impedance:

$$X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

where

L is the inductance of TCSC subsegment LC branch (Figure 2);

C is the capacitance of TCSC subsegment LC branch (Figure 2).

The capacitor voltage peak, appearing on the TCSC valve, is equal to:

$$U_P = \lambda \cdot i_L \cdot X_0 \cdot \left[1 + \frac{\lambda \cdot (\cos \beta \cdot \tan(\lambda \cdot \beta) - \lambda \cdot \sin \beta)}{\lambda^2 - 1} \right]$$

The capacitive boost factor of the TCSC subsegment is equal to:

$$k_B = 1 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot \cos^2 \beta}{\lambda^2 - 1} \cdot [\lambda \cdot \tan(\lambda \cdot \beta) - \tan \beta] - \beta - \frac{\sin(2 \cdot \beta)}{\beta} \right\}$$

4.2.3.2 Bypass operation mode

In TCSC bypass operation mode the TCSC valve is full conduction and the valve conducts a power frequency sinusoidal waveform bypass current equal to:

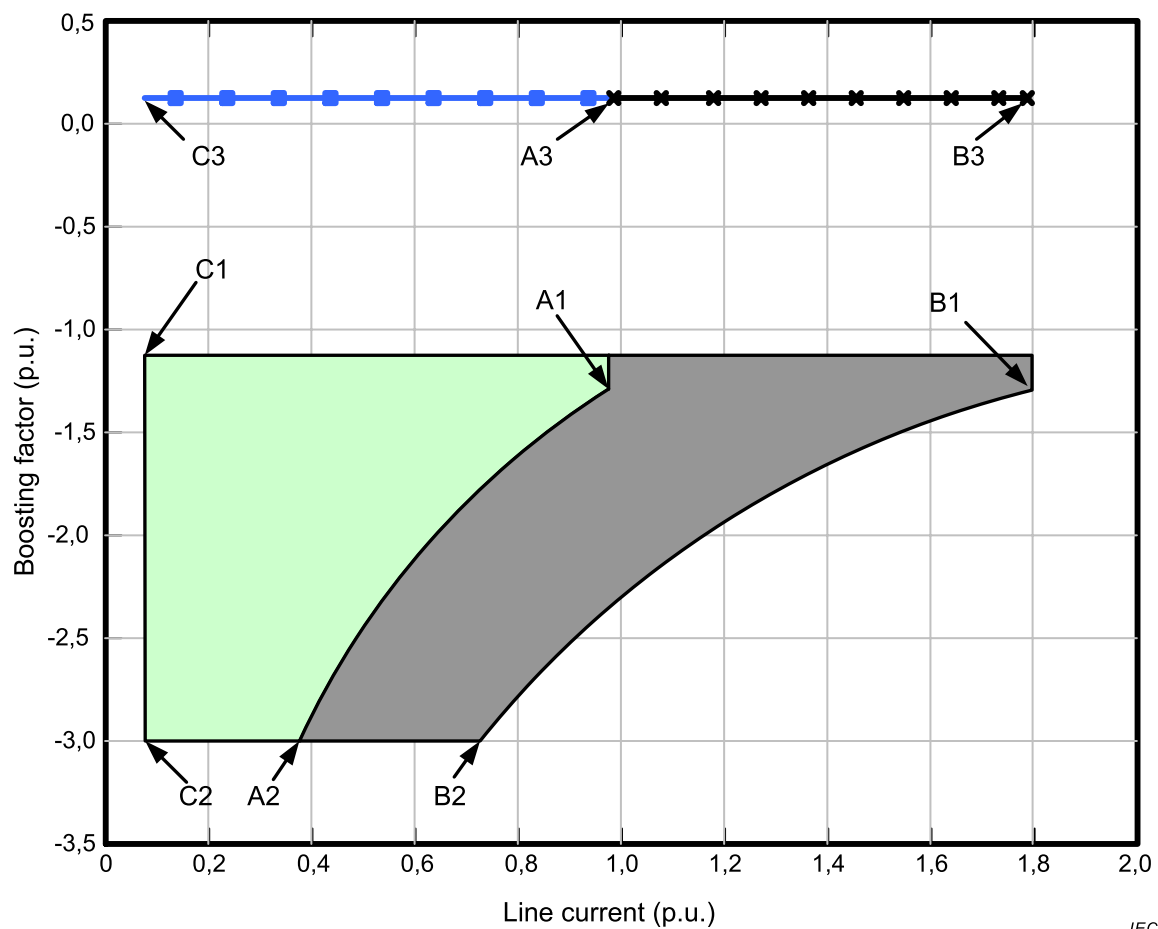
$$i_{bypass} = \frac{1}{1 - \omega_N^2 \cdot L \cdot C} \cdot i_L$$

The capacitor voltage at bypass operation follows the formula below:

$$U_C = \frac{-i_L}{(\lambda^2 - 1) \cdot \omega_N \cdot C}$$

4.3 Typical operating pattern of TCSC installation

See Figure 5.



IEC

- Continuous capacitive boost operation area
- Temporary capacitive boost operation area
- Continuous bypass operation
- Temporary bypass operation

Figure 5 – Example of operating range diagram for TCSC

5 General requirements

5.1 Guidelines for the performance of type tests

5.1.1 Evidence in lieu

5.1.1.1 General

Each design of valve shall be subjected to the type tests specified in this International Standard. If the valve is demonstrably similar to the 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.

5.1.1.2 Test object

The tests described apply to the valve (or valve sections), the valve structure and those parts of the coolant distribution system and firing and monitoring circuits which are contained within the valve structure or connected between the valve structure and platform. Other equipment, such as valve control and protection and valve interface electronics units may be essential for demonstrating the correct function of the valve during the tests but are not in themselves the subject of the valve tests.

Certain type tests may be performed either on a complete valve or on valve sections, as indicated in Table 2. For those type tests on valve sections, the total number of valve sections tested shall be at least as many as the number in a complete valve.

The same valve sections shall be used for all type tests unless otherwise stated.

5.1.2 Sequence of tests

Prior to commencement of type tests, the valve, valve sections and/or the components of them should be demonstrated to have withstood the routine tests to ensure proper manufacture.

The type tests specified can be carried out in any order.

5.1.3 Ambient temperature for testing

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

5.1.4 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 5.3.1.

5.1.5 Test reports

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

5.2 Test conditions for dielectric tests

5.2.1 General

Dielectric tests shall be performed on a completely assembled valve.

The valve shall be assembled with all auxiliary components except for the valve arrester, if used. Unless otherwise specified, the valve electronics shall be energized. The cooling and insulating fluids in particular shall be in a condition that represents service conditions such as conductivity, except for the flow rate and anti-freezing media content, which can be reduced. If any object or device external to the structure is necessary for proper representation of the stresses during the test, it shall also be present or simulated in the test. Metallic parts of the valve structure which are not part of the test shall be shorted together and connected to enclosure earth in a manner appropriate to the test in question.

5.2.2 Treatment of redundancy in dielectric tests

All dielectric tests on a complete valve shall be carried out with redundant thyristor levels short-circuited, except where otherwise indicated.

5.2.3 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 thyristor valve is based on standard rated withstand voltages according to IEC 60071-1, correction factors are only applied for site altitudes a_s exceeding 1 000 m. Hence, if the altitude of the site at which the equipment will be installed is less than 1 000 m, then the standard atmospheric air pressure ($b_0 = 101,3$ kPa) shall be used with no correction for altitude. If $a_s > 1\,000$ m, then the standard procedure according to IEC 60060-1 is used except that the reference atmospheric pressure b_0 is replaced by the atmospheric pressure corresponding to an altitude of 1 000 m ($b_{1\,000m}$).

If the insulation coordination of the tested part of the thyristor 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).

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

5.3 Test conditions for operational tests

5.3.1 General

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

Operational tests may be performed at a power frequency different from the service frequency, e.g. 50 Hz instead of 60 Hz or vice versa. Some operational stresses such as switching losses or I^2t of short-circuit current are affected by the actual power frequency during tests. When this situation occurs, the test conditions shall be reviewed and appropriate changes made to ensure that the valve stresses are at least as severe as they would be if the tests were performed at the service frequency.

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. Anti-freezing media content should, preferably, be equivalent to the service condition; however, where this is not practicable, a correction factor agreed between the supplier and the purchaser shall be applied. Unless otherwise specified, the thyristor junction temperature during operational tests shall not be less than the temperature in service.

5.3.2 Treatment of redundancy in 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 thyristor levels in the test object;

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

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

5.4 Criteria for successful type testing

5.4.1 General

Experience in industry shows that, even with the most careful design of valves, it is not possible to avoid occasional random failures of thyristor 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 thyristor levels to fail during type testing, providing that the failures are rare and do not show any pattern that is indicative of inadequate design.

5.4.2 Criteria applicable to valve levels

The following criteria are applicable to valve levels.

- a) If, following a type test as listed in Clause 6, the number of failed thyristor levels is greater than the value specified in column 2 of Table 1, then the valve shall be deemed to have failed the type tests.
- b) If, following a type test, one thyristor level (or more if still within the limit in column 2 of Table 1) has become short-circuited, then the failed level(s) shall be restored and this type test repeated.
- c) If the cumulative number of short-circuited thyristor levels during all type tests exceeds the number given in column 3 of Table 1, then the valve shall be deemed to have failed the type test programme.
- d) When type tests are performed on valve sections, the criteria for acceptance above also apply since the number of valve sections tested shall be not less than the number of sections in a complete valve (see 5.1.1.2).
- e) The valve or valve sections shall be checked after each type test to determine whether or not any thyristor levels have become short-circuited. Failed thyristors or auxiliary components found during or at the end of a type test may be replaced before further testing.
- f) At the completion of the test programme, the valve or valve sections shall undergo a series of check tests, which shall include the following checks as a minimum:
 - check for voltage withstand of thyristor levels in both forward and reverse directions;
 - check of the gating circuits, where applicable;
 - check of the monitoring circuits;
 - check of the thyristor level protection circuits by application of transient voltages above and below the protection setting(s), where applicable;
 - check of the voltage grading circuits.
- g) Thyristor level short circuits occurring during the check tests shall be counted as part of the criteria for acceptance defined above. In addition to short-circuited levels, the total number of thyristor levels exhibiting faults which do not result in thyristor level short circuit, which are discovered during the type test programme and the subsequent check

tests, shall not exceed the number given in column 4 of Table 1. If the total number of such levels exceeds the number given in column 4 of Table 1, then the nature of the faults and their cause shall be reviewed and additional action, if any, agreed between purchaser and supplier.

- h) When applying the percentage criteria to determine the permitted maximum number of short-circuited thyristor levels and the permitted maximum number of levels with faults which have not resulted in a thyristor level becoming short-circuited, it is usual practice to round off all fractions to the next highest integer, as illustrated in Table 1.

Table 1 – Valve level faults permitted during type tests

Number of thyristor levels in a completed valve minus the number of redundant levels	Number of thyristor levels permitted to become short-circuited in any one type test	Total number of thyristor levels permitted to become short-circuited in all type tests	Additional number of thyristor levels, in all type tests, which have experienced a fault but have not become short-circuited
Up to 33	1	2	2
34 to 67	2	3	3
> 67	2	4	4

The distribution of short-circuited levels and of other thyristor 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.

5.4.3 Criteria applicable to the valve as a whole

No breakdown of or external flashover across common electrical equipment associated with more than one thyristor level of the valve shall occur. There shall be no 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.

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.

6 Summary of tests

Table 2 lists the tests given in this International Standard.

Table 2 – List of tests

Test	Subclause	Test object
Dielectric tests between valve terminals and valve enclosure earth (type tests)		
AC test	7.2	valve
Lightning impulse test	7.3	valve
Dielectric tests between valve terminals (type tests)		
AC test	8.2	valve
Switching impulse test	8.3	valve
Operational tests (type tests)		
Maximum continuous capacitive boost test	9.3.2	valve or valve section
Maximum temporary capacitive boost test	9.3.3	valve or valve section
Minimum capacitive boost test	9.3.4	valve or valve section
Operation at maximum temporary line current bypass mode	9.3.5.1	valve or valve section
Operation at minimum temporary line current bypass mode	9.3.5.2	valve or valve section
Fault current without subsequent blocking	10.3.1	valve or valve section
Fault current with subsequent blocking	10.3.2	valve or valve section
Test for valve insensitivity to electromagnetic disturbance		
Switching impulse test	11.3	valve
Routine tests		
Visual inspection	13.2	each thyristor level ^a
Connection check	13.3	each thyristor level ^a
Voltage grading circuit check	13.4	each thyristor level ^a
Voltage withstand check	13.5	each thyristor level ^a
Partial discharge test	13.6	each thyristor level ^a
Check of auxiliaries	13.7	each thyristor level ^a , and complete valve or valve section
Firing check	13.8	each thyristor level ^a
Cooling system pressure test	13.9	valve or valve section
^a Where tests are specified to be performed on each thyristor level individually, the tests shall be performed with the thyristor levels integrated into the complete valve or valve module such that all interconnections between the adjacent thyristors are adequately tested.		

7 Dielectric tests between valve terminals and valve enclosure

7.1 Purpose of tests

The principal objectives of these tests are to verify that

- sufficient clearances have been provided to prevent flashovers;
- there is no disruptive discharge in the insulation of the valve structure, cooling ducts, light guides and other insulation parts of the pulse transmission and distribution systems;
- partial discharge inception and extinction voltages are above the maximum steady-state operating voltage appearing on the valve structure.

These tests are not applicable for designs in which one terminal of the valve (designated as the low-voltage terminal) is at the same potential as the valve enclosure and the valve support, cooling ducts and light guides are connected to the low-voltage of the valve. In this case, air clearance between the high-voltage terminal of valve and the valve enclosure shall comply with IEC 60071-2 or be agreed between purchaser and supplier.

7.2 Test object

The test object is the valve support which is connected to the high-voltage terminal of the valve. This valve support may be a separate object representing the adjacent parts of the valve. It shall be assembled with all ancillary components in place. The coolant shall be in a condition representative of the most onerous service condition for the purpose of the test.

When a complete valve is presented for testing, attention has to be paid to the proper termination of the low-voltage terminal of the valve during the tests.

7.3 Test requirements

7.3.1 AC test

7.3.1.1 Test values and waveshapes

The following test values and waveshapes shall be used for the AC test:

a) Test voltage U_{ts1} , 1 min

The test is performed with a 1 min test voltage U_{ts1} and a 10 min test voltage U_{ts2} that have sinusoidal waveshapes with a frequency of 50 Hz or 60 Hz, depending on the test facilities. The test voltage, U_{ts1} , shall be calculated according to

$$U_{ts1} = \frac{U_{s1}}{\sqrt{2}} \cdot k_1 \cdot k_t$$

where

U_{s1} is the peak value of the maximum temporary repetitive operating voltage, including extinction overshoot, across the valve support (typically derived from operation with maximum temporary overload in capacitive boost mode operating point B2 in Figure 5);

U_{ts1} is the 1 min test voltage;

k_1 is a test safety factor, $k_1 = 1,30$;

k_t is the atmospheric correction factor according to 5.2.3.

b) Test voltage U_{ts2} , 10 min

$$U_{ts2} = \frac{U_{s2}}{\sqrt{2}} \cdot k_2$$

where

U_{s2} is the peak value of the maximum continuous operating voltage, including extinction overshoot, across the valve support (typically derived from operation with maximum continuous capacitive boost mode operating point A2 in Figure 5);

k_2 is a test safety factor ($k_2 = 1,20$ for the 10 min test);

7.3.1.2 Test procedures

The test consists in applying the specified test voltages U_{ts1} and U_{ts2} for the specified duration between the high-voltage terminal of the valve and the valve enclosure.

a) Raise the voltage from 50 % to 100 % of U_{ts1} in approximately 10 s.

- b) Maintain U_{ts1} for 1 min.
- c) Reduce the voltage to U_{ts2} .
- d) Maintain U_{ts2} for 10 min, record the partial discharge level and then reduce the voltage to zero.
- e) The peak value of the periodic partial discharge recorded during the last minute of step d) shall be less than 200 pC, provided that the components which are sensitive to partial discharge in the valve have been separately tested, or alternatively 50 pC if they have not.
- f) The measurement of inception and extinction voltage shall be performed in accordance with IEC 60270.

7.3.2 Lightning impulse test

A standard 1,2/50 lightning impulse voltage waveshape in accordance with 7.2.1 of IEC 60060-1:2010 shall be used.

The rated TCSC voltage, U_N , is the base voltage to define the lightning impulse voltage and the peak value of the test voltage shall be the standard lightning impulse withstand voltage according to IEC 60071-1.

The test shall comprise three applications of positive polarity and three applications of negative polarity lightning impulse voltages between the high-voltage terminal of valve and valve enclosure.

8 Dielectric tests between valve terminals

8.1 Purpose of tests

The purpose of these tests is to verify the design of the valve with respect to its capability to withstand overvoltages between its terminals. The tests shall demonstrate that

- sufficient internal insulation has been provided to enable the valve to withstand specified voltages;
- partial discharge inception and extinction voltages are above the maximum steady-state operating voltage appearing on the valve;
- the protective overvoltage firing system (if provided) works as intended;
- the thyristors have adequate dv/dt capability for in-service conditions (in most cases the specified tests are sufficient; however in some exceptional cases, additional tests may be required).

8.2 Test object

The test object shall be a complete valve which shall be assembled with all auxiliary components except for the valve surge arrester, if any. The coolant shall be in a condition that represents service conditions, except for flow rate which can be reduced. If any object external to the structure is necessary for proper representation of the stresses during tests, it shall be included or simulated in the test.

The 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 thyristors or other 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.

8.3 Test requirements

8.3.1 AC test

8.3.1.1 Test values and waveshapes

The test is performed with a 1 min test voltage U_{tv1} and a 10 min test voltage U_{tv2} that have sinusoidal waveshapes with a frequency of 50 Hz or 60 Hz, depending on the test facilities.

$$U_{tv1} = \frac{U_{v1}}{\sqrt{2}} \cdot k_3$$

where

U_{v1} is the peak value of the maximum temporary repetitive operating voltage, including extinction overshoot, across the valve (typically derived from operation with maximum temporary overload in capacitive boost mode operating point B2 in Figure 5 or the series capacitor protective level);

k_3 is a test safety factor, $k_3 = 1,10$.

The prescribed test may thermally overstress some valve components unrealistically. Where this is the case, subject to agreement between purchaser and supplier, the 1 min AC voltage withstand test may be replaced by several shorter tests whose minimum duration is determined from the maximum possible duration of the specified overvoltage condition multiplied by 2, but with a total duration of not less than 1 min.

$$U_{tv2} = \frac{U_{v2}}{\sqrt{2}} \cdot k_{tv2}$$

where

U_{v2} is the peak value of the maximum continuous operating voltage, including extinction overshoot, across the valve (typically derived from operation with maximum continuous capacitive boost mode operating point A2 in Figure 5);

k_3 is a test safety factor ($k_3 = 1,10$).

8.3.1.2 Test procedures

The test procedure consists in applying the specified test voltages, for the specified duration, between the two valve terminals with one terminal earthed.

- a) Raise the voltage from 50 % to 100 % U_{tv1} in approximately 10 s.
- b) Maintain U_{tv1} for 1 min.
- c) Reduce the voltage to U_{tv2} .
- d) Maintain U_{tv2} for 10 min, record the partial discharge level and reduce the voltage to zero.
- e) The peak value of the periodic partial discharge recorded during the last minute of step d) shall be less than 200 pC, provided that the components which are sensitive to partial discharge have been separately tested, or alternatively 50 pC if they have not been separately tested.
- f) The measurement of inception and extinction voltage shall be performed in accordance with IEC 60270.

If valve protective firing is provided, it shall not operate during this test.

8.3.2 Switching impulse test

8.3.2.1 Test values and waveshapes

A standard 250/2 500 switching impulse voltage waveshape in accordance with 8.2.1 of IEC 60060-1:2010 shall be used.

- a) For valve with valve arrester protection the valve switching impulse test voltage, U_{tsv} , shall be determined in accordance with the following:

$$U_{tsv} = SIPL_v \cdot k_4$$

where

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

k_4 is a test safety factor, $k_4 = 1,10$.

- b) For valve without valve arrester, the valve switching impulse test voltage, U_{tsv} , shall be determined in accordance with the following:

$$U_{tsv} = U_{valve} \cdot k_5$$

where

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

k_5 is a test safety factor, $k_5 = 1,15$.

If the valve incorporates protective firing against overvoltages, which operates during the test, five additional applications of switching impulses of an agreed amplitude, so that the valve does not fire, shall be made. For the additional tests, the valve electronics shall be energized.

8.3.2.2 Test procedures

For any of these tests, three applications of switching impulse voltages of each polarity shall be applied between the valve terminals, with one terminal earthed. Instead of reversing the polarity of the surge generator, the test may be performed with one polarity of the surge generator and reversing the valve terminals.

9 Periodic firing and extinction tests

9.1 Purpose of tests

The principal objectives of the periodic firing and extinction tests are as follows:

- to check the adequacy of the thyristor levels and associated electrical circuits in a valve with regard to current, voltage and temperature stresses at turn-on and turn-off under the worst repetitive stress conditions;
- to demonstrate correct performance of the valve at minimum capacitive boost operation mode under minimum line current, coincident with minimum firing angle.

9.2 Test object

The test object shall be either a complete valve or valve sections, see 5.3.1. The valve or valve sections under test shall be assembled with auxiliary components which are necessary for the proper operation of the valve under test.

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.

9.3 Test requirements

9.3.1 General

To use an AC current source as test circuit is pertinent but generally infeasible in practice. Alternative suitable test circuits, such as an appropriate synthetic test circuit, shall generate stresses equivalent to the appropriate service conditions.

The valve or valve sections shall be subjected to current and voltage waveshapes as close as possible to those experienced by the valve during firing and extinction, for the most critical operating conditions specified below. The time interval of principal interest for firing is the first 10 µs – 20 µs while, for extinction, the interval of interest is between 0,2 ms before and 1,0 ms after current zero.

In particular, the following conditions shall be no less severe than in service:

- voltage magnitudes at turn-on and turn-off;
- voltage peaks in recovery periods;
- the di/dt at turn-on and at least for 0,2 ms before current zero;
- the thyristor junction temperature.

The following factors shall also be considered:

- the representation of stray capacitance between valve terminals;
- sufficient magnitude and duration of the load current to achieve full area conduction of the thyristor junction.

9.3.2 Maximum continuous capacitive boost test

9.3.2.1 Test values and waveshapes

The test current and test voltage shall be derived from the maximum continuous capacitive boost operation current at maximum capacitive boost factor, operating point A2 in Figure 5, and maximum ambient temperature.

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

The test voltage (voltage at thyristor turn-on instant and turn-off instant without overshoot), U_{test} , shall be determined as follows:

$$U_{\text{test}} = U_{\text{C_N}} \cdot k_n \cdot k_6$$

where

$U_{\text{C_N}}$ the capacitor voltage at TCSC valve thyristor turn-on or turn-off instant at maximum continuous capacitive boost operation according to 4.2.3.1 and operating point A2 in Figure 5;

k_n is a test scaling factor according to 5.3.2;

k_6 is a test safety factor, $k_6 = 1,05$.

The duration of the test shall be not less than 30 min.

9.3.2.2 Test procedures

The tests shall be performed using suitable test circuits, such as an appropriate synthetic test circuit, giving turn-on and turn-off stresses equivalent to the appropriate service conditions.

Ideally, the test would be performed by reproducing the specified time-dependent source current. For practical reasons, a modified test procedure may be adopted as follows:

- a) establish maximum steady-state capacitive boost condition as defined in 9.3.2.1;
- b) maintain operation for at least 30 min starting from the time that thermal equilibrium is reached.

9.3.3 Maximum temporary capacitive boost test

9.3.3.1 Test values and waveshapes

The test current and test voltage shall be based on the temporary overload, see point B2 in Figure 5.

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

The test voltage (voltage at thyristor turn-on instant and turn-off instant without overshoot), $U_{\text{test_max}}$, shall be determined as follows:

$$U_{\text{test_max}} = U_{\text{C_max}} \cdot k_n \cdot k_7$$

where

$U_{\text{C_max}}$ the capacitor voltage at TCSC valve thyristor turn-on or turn-off instant at maximum temporary capacitive boost operation according to 4.2.3.1 and operating point B2 in Figure 5;

k_n is a test scaling factor according to 5.3.2;

k_7 is a test safety factor, $k_7 = 1,05$.

The test duration shall be 1,1 times the specified temporary overload duration.

9.3.3.2 Test procedures

The tests shall be performed using suitable test circuits, such as an appropriate synthetic test circuit, giving turn-on and turn-off stresses equivalent to the appropriate service conditions.

Ideally, the test would be performed by reproducing the specified time-dependent source current. For practical reasons, a modified test procedure may be adopted as follows:

- a) establish maximum steady-state capacitive boost condition as defined in 9.3.2.1 and maintain it until thermal equilibrium is reached;
- b) raise the source current to the test value. Maintain operation for 1,1 times the specified temporary overload duration.

9.3.4 Minimum capacitive boost test

9.3.4.1 General

The purpose of this test is to verify proper operation of the firing system in the TCSC valve at the specified minimum line current and specified minimum capacitive boost operating conditions.

9.3.4.2 Test values and waveshapes

The test current shall be based on the specified minimum continuous line current permissible with capacitive boost operation, point C1 in Figure 5.

The test current shall incorporate a test safety factor of 0,95.

The test voltage (voltage at thyristor turn-on instant and turn-off instant without overshoot), $U_{\text{test_min}}$, shall be determined as follows:

$$U_{\text{test_min}} = U_{\text{C_min}} \cdot \frac{N_{\text{tut}}}{N_{\text{t}}} \cdot k_8$$

where

$U_{\text{C_min}}$ the capacitor voltage at TCSC valve thyristor turn-on or turn-off instant at minimum continuous capacitive boost operation according to 4.2.3.1 and operating point C1 in Figure 5;

N_{tut} is the number of series thyristor levels in the test object;

N_{t} is the total number of series thyristor levels in the valve;

k_8 is a test safety factor, $k_8 = 0,95$.

The test duration shall be 10 min.

For valve electronics energized from AC system, the peak of test voltage shall be controlled too. The voltage peak in test is determined according to 4.2.3.1 with the same principle above.

9.3.4.3 Test procedures

The tests shall be performed using suitable test circuits, such as an appropriate synthetic test circuit, giving turn-on and turn-off stresses equivalent to the test conditions defined in 9.3.4.2.

Ideally, the test would be performed by reproducing the specified time-dependent source current. For practical reasons, a modified test procedure may be adopted as follows:

- a) establish minimum capacitive boost condition for current and voltage as defined in 9.3.4.2;
- b) maintain the operation for 10 min starting from the time that thermal equilibrium is reached.

9.3.5 Operation at bypass

9.3.5.1 Operation at maximum temporary current bypass mode

9.3.5.1.1 General

If calculations indicate that the thyristor losses in bypass mode are greater than the thyristor losses in capacitive boost mode, the following bypass test shall be done to verify the thermal capability of the valve. Otherwise, the bypass test is not necessary since the verification of valve thermal capability has been covered by the maximum capacitive boost tests.

9.3.5.1.2 Test values and waveshapes

The test current and test voltage shall be derived from the maximum temporary bypass operation current according to 4.2.3.2 at operating point B3 in Figure 5 and, maximum ambient temperature.

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

The test duration shall be 2 times the specified temporary overload duration or maximum 2 min after the return coolant temperature has stabilized.

9.3.5.1.3 Test procedures

The tests shall be performed using suitable test circuits. All the auxiliary systems which may influence the behaviour of the valve in the operating conditions specified below shall be in operation:

- a) establish maximum continuous conditions for line current and maintain them until thermal equilibrium is reached;
- b) maintain operation for the specified test duration.

9.3.5.2 Operation at minimum temporary line current bypass mode

9.3.5.2.1 General

This test is not applicable if the valve is not designed to operate at minimum line current bypass operating point C3 in Figure 5.

Subject to the agreement of the purchaser, this test may be omitted in the case where the valve electronics is not energized from the AC system and the thyristor monitoring function at low voltage is demonstrated by other tests.

Depending on the choice of operating point C3 in Figure 5, the valve operation capability at minimum temporary line current bypass mode may be verified by 9.3.4.

9.3.5.2.2 Test values and waveshapes

The test current and test voltage shall be derived from the minimum bypass operation current according to 4.2.3.2 at operating point C3 in Figure 5.

The test current shall incorporate a test safety factor of 0,95.

The test voltage, $U_{\text{test-by_min}}$, shall be determined as follows:

$$U_{\text{test-by_min}} = U_{\text{by_min}} \cdot \frac{N_{\text{tut}}}{N_{\text{t}}} \cdot k_g$$

where

- $U_{\text{by_min}}$ is the capacitor peak voltage at minimum line current and TCSC valve bypass operation according to 4.2.3.2 and operating point C3 in Figure 5;
- N_{tut} is the number of series thyristor levels in the test object;
- N_{t} is the total number of series thyristor levels in the valve;
- k_g is a test safety factor, $k_g = 0,95$.

The test duration shall be 2 times the specified minimum temporary line current duration or maximum 2 min after the return coolant temperature has stabilized.

9.3.5.2.3 Test procedures

The tests shall be performed using suitable test circuits. All the auxiliary systems which may influence the behaviour of the valve in the operating conditions specified below shall be in operation:

- a) establish minimum line current at bypass operation as defined in 9.3.5.2.2;
- b) maintain operation for the specified test duration.

10 Fault current tests

10.1 Purpose of tests

The principal objective of the fault current tests is to demonstrate proper design of the valve to withstand the maximum current, voltage and temperature stresses arising from short-circuit currents.

The tests shall demonstrate that the valve is capable of:

- conducting the maximum fault current through the valve without subsequent blocking at an internal fault at the transmission line section;
- conducting the maximum fault current through the valve with subsequent blocking at an external fault at the transmission line section.

10.2 Test object

See 9.2.

10.3 Test requirements

10.3.1 Fault current without subsequent blocking

10.3.1.1 Test values and waveshapes

When an internal fault occurs, the fault current is high and the line circuit breakers will be tripped to interrupt the fault current and isolate the healthy part of network from the faulted point. Depending on the fault handling procedure, the TCSC protection may order bypass of the series capacitor via both the thyristor valve and the bypass switch. No subsequent blocking voltage appears on the TCSC valve after fault current conduction.

The peak value and conduction duration of the fault current shall be determined from system studies using the maximum AC system short-circuit power.

The waveshape of test current does not need to be identical to the fault current that could occur in service. The current shall have a peak value at least equal to the highest value of overcurrent and also it shall give the thyristor temperature at least equal to the highest value that could occur in service conditions considering the closing time of the bypass switch.

10.3.1.2 Test procedures

The tests shall be performed using suitable test circuits. All the auxiliary systems which may influence the behaviour of the valve in the operating conditions specified below shall be in operation:

- a) establish thyristor junction temperature (in any suitable way) corresponding to the maximum steady state condition as defined in 9.3.2.1;
- b) apply the test current for the specified time.

10.3.2 Fault current with subsequent blocking

10.3.2.1 Test values and waveshapes

This test is applicable if the TCSC is operated in such way that the valve is exposed to fault current followed by a blocking voltage.

The fault current and fault conduction duration as well as subsequent blocking voltage shall be determined from system studies using the worst external fault cases.

The test current and voltage shall influence the TCSC valve/valve section at least as severely as would occur in service. A test safety factor of 1,05 shall be applied to the subsequent blocking voltage. The current shall have a peak value at least equal to the highest value of overcurrent and also it shall give the thyristor temperature at least equal to the highest value at the instant when the voltage is re-applied.

10.3.2.2 Test procedures

The tests shall be performed using suitable test circuits. All the auxiliary systems which may influence the behaviour of the valve in the operating conditions specified below shall be in operation:

- a) establish thyristor junction temperature (in any suitable way) corresponding to the maximum steady state condition as defined in 9.3.2.1;
- b) apply the test current for the specified time;
- c) apply the test voltage.

11 Test for valve insensitivity to electromagnetic disturbance

11.1 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 or imposed on it from the outside. The sensitive elements of the valve are generally electronic circuits used for triggering, protection and monitoring of the thyristor levels.

The tests shall demonstrate that:

- spurious triggering of thyristors does not occur;
- false indication of thyristor level faults or erroneous signals sent to the converter control and protection systems by the valve electronics do not occur.

The valve insensitivity to electromagnetic disturbance shall be checked by monitoring the valve during the valve impulse test (8.3.2).

11.2 Test object

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

11.3 Test requirements

Insensitivity to electromagnetic interference is verified by monitoring the valve during the switching impulse test between terminals. The electronics of the valve under test shall be pre-energized unless otherwise specified. Those parts of the valve interface electronics units that are necessary for the proper exchange of information with the test valve shall be included. The criteria for test acceptance are that no spurious valve firing or false indication from the valve to control or protection system occurs.

12 Testing of special features

12.1 Purpose of tests

These tests are intended to verify the design and performance of any special features of the valve. Special features may include, but are not limited to, those in the following two categories:

- circuits provided to facilitate the proper control, protection and monitoring of the valve;

- features included in the valve to provide fault tolerance (see Annex B).

Generally, those features in the first category can be demonstrated as part of other tests.

Features in the second category may require special tests. Such tests shall be agreed between the purchaser and supplier on a case-by-case basis.

12.2 Test object

Tests may be performed on a complete valve, valve section or relevant parts of either.

12.3 Test requirements

The test procedures and acceptance criteria shall be chosen having regard to the actual design of the valve. It shall be demonstrated that the components or circuits involved behave as intended.

13 Routine tests

13.1 General

The specified tests define the minimum testing required. The supplier shall provide a detailed description of the test procedures to meet the test objectives.

13.2 Visual inspection

The objectives of the test are:

- to check that all materials and components are undamaged and correctly installed;
- to check data of components installed;
- to check air clearances and creepage distances within the valve.

13.3 Connection check

Test objective:

- to check that all the main current-carrying connections have been made correctly;
- to check the clamping force of thyristors;
- to check the point to point wiring.

13.4 Voltage grading circuit check

Test objective: check the grading circuit parameters (resistance and capacitance) and thereby ensure that voltage sharing between series-connected thyristors will be correct.

13.5 Voltage withstand check

Test objective: check that the thyristor levels can withstand the voltage corresponding to the maximum value specified for the valve.

13.6 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.

13.7 Check of auxiliaries

Test objective: check that the auxiliaries (such as monitoring and protection circuits) at each thyristor level and those common to the complete valve (or valve section) function correctly.

13.8 Firing check

Test objective: check that the thyristors in each thyristor level turn on correctly in response to firing signals.

13.9 Cooling system pressure test

Test objective:

- check that there are no leaks;
- check for adequate flow, both in the valve as a whole and in all subcircuits;
- check the differential pressure.

14 Presentation of type test results

The test report is issued in accordance with the general guidelines as given in ISO/IEC 17025. It 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 necessary to identify the test object;
- dates of performance of the tests;
- description of the 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, if applicable.

Annex A (informative)

TCSC valve operating and rating considerations

A.1 Overview

Transmission line series reactance can be compensated by combinations of fixed series capacitors and TCSC banks (see Figure 1 in Clause 4). TCSC banks use one or more controllable modules to achieve the range of performance requirements specified by the purchaser. Annex A discusses requirements of TCSC operating and rating considerations.

The TCSC circuit configuration discussed in Figure 1 has three basic operating modes:

- TCSC valve at blocked operation with thyristors blocked (no current through the thyristor valve);
- TCSC valve at bypass operation with continuous current flow through the valve;
- TCSC valve at capacitive boost operation with reactor being controlled by thyristors.

The definition of control angle (α) with reference to voltage zero crossing is selected to be consistent with other power electronic devices such as the Thyristor Controlled Reactor (TCR). However, it should be noticed that many TCSC control systems use the line current wave form as an important control reference.

When a TCSC is operating in capacitive boost mode, the current in the thyristor valve branch can modify the voltage across the capacitor, resulting in a capacitor apparent reactance larger than the capacitor physical reactance. In a TCSC application, the increased capacitor apparent reactance can result in an increase in line current. The current pulses through the thyristor valve distort the capacitor voltage (U_C). The distorted waveform (see Figure 3 in 4.2.2), means that the capacitor voltage includes non-power frequency components and that the relationship between total RMS and total peak voltage is not $\sqrt{2}$ as in the case for a pure sinusoidal waveform. Table A.1 shows the typical peak and RMS voltage relationship of a TCSC.

Table A.1 – Peak and RMS voltage relationships

Capacitive boost factor (k_B)	Ratio of LC branch natural frequency and power frequency (λ)	Power frequency RMS voltage	Power frequency peak voltage	Total RMS voltage	Total peak voltage
1,0	2,5	1,0	1,41	1,00	1,41
2,0	2,5	2,0	2,83	2,02	2,55
3,0	2,5	3,0	4,24	3,05	3,70
1,0	3,5	1,0	1,41	1,00	1,41
2,0	3,5	2,0	2,83	2,03	2,54
3,0	3,5	3,0	4,24	3,07	3,67

A.2 TCSC characteristics

TCSC characteristics are determined from the series capacitor (C) and reactor (L) circuit parameters shown in Figure 2 in Clause 4. The steady state TCSC power frequency apparent reactance $X(\alpha)$ as a function of thyristor control angle (α) can be calculated from Formula A.1. Typical reactance characteristics are illustrated in Figure A.1.

$$X(\alpha) = \frac{1}{\omega_N \cdot C} \left[1 - \frac{\lambda^2}{(\lambda^2 - 1)} \cdot \frac{2 \cdot \beta + \sin(2 \cdot \beta)}{\pi} + \frac{4\lambda^2}{(\lambda^2 - 1)^2} \cdot \cos^2(\beta) \cdot \frac{\lambda \cdot \tan(\lambda \cdot \beta) - \tan(\beta)}{\pi} \right] \quad (\text{A.1})$$

where

β is half of the conduction angle of TCSC valve at capacitive boost mode in one current direction ($\beta = \pi - \alpha$);

α is control angle counting from capacitor voltage zero;

λ is the ratio of TCSC subsegment LC branch natural frequency and AC system power frequency:

$$\lambda = \frac{1}{\omega_N \cdot \sqrt{L \cdot C}},$$

where

C is the series capacitor capacitance;

L is the TCSC reactor inductance.

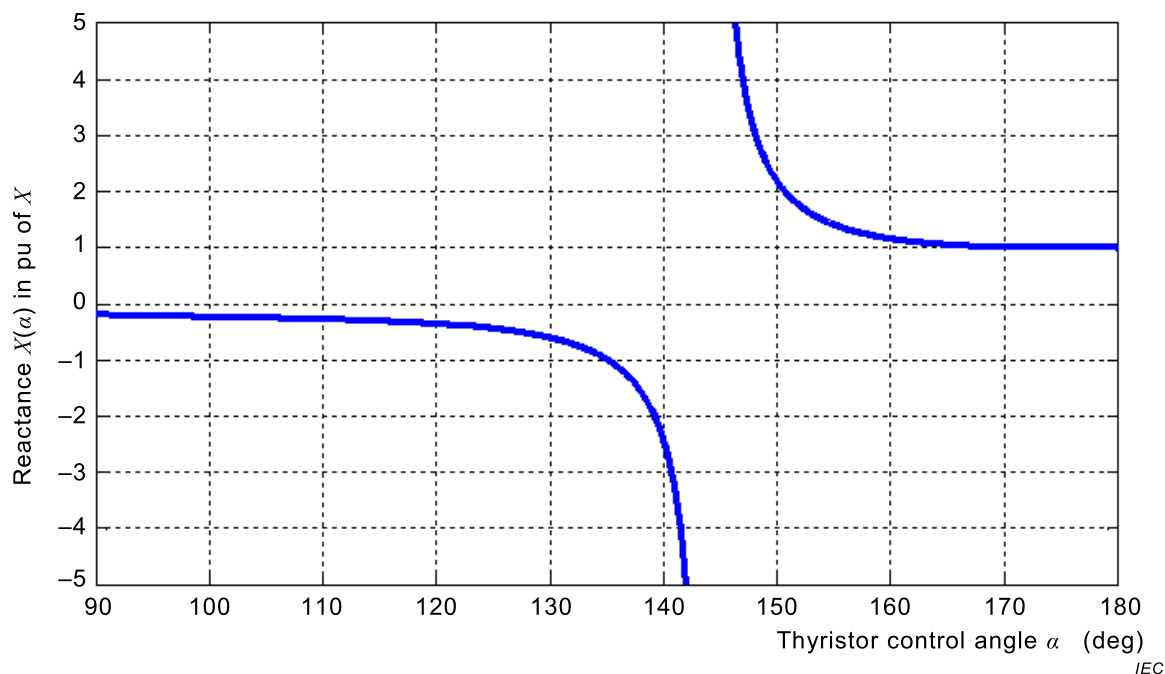


Figure A.1 – TCSC power frequency steady state apparent reactance characteristics according to Formula (A.1) with $\lambda = 2,5$

A.3 Operating range

The operating range is one of the most important factors for rating of a TCSC. It has a major impact on the main circuit components stresses and should therefore be clearly specified by the purchaser. The TCSC shall be designed to withstand operation with the different reactance and line currents within the specified operating range. The required operating range shall be defined by system studies performed by the purchaser and be clearly stated in the specification with a set of curves of the fundamental frequency TCSC apparent reactance or boost factor (k_B) versus the line current as indicated in Figure 5 in 4.3. The required operating range depends on the purpose of the TCSC. Generally a TCSC for power oscillation damping (POD) requires a larger operating range than a TCSC for subsynchronous resonance (SSR) mitigation.

A minimum line current should be considered because steady-state firing of a thyristor valve is not possible at very low thyristor valve voltages and currents. All thyristors and associated firing and monitoring electronics have a minimum voltage below which firing and condition monitoring cannot be guaranteed. In addition, some thyristor valves have power supplies for the firing circuits that may place additional constraints on the firing of the thyristor valve when the line current is low. This results in a minimum line current and boost factor (k_B) below which operation in capacitive boost mode is not feasible. This can have implications on the application and operation of the TCSC. The impact of series compensation is of limited value at low line currents. If SSR is a concern, the TCSC should be bypassed at line current levels below which operation in capacitive boost mode cannot be maintained.

A.4 Reactive power rating

When a TCSC is operating in capacitive boost mode, the reactive power seen by the power system differs from the reactive power of the capacitors. The reactive power output of a TCSC and the reactive power of the capacitors are given by

$$Q_{\text{TCSC}} = 3 \cdot \frac{k_B}{\omega \cdot C} \cdot I_L^2 \quad (\text{A.2})$$

$$Q_{\text{CAP}} = 3 \cdot \frac{k_B^2}{\omega \cdot C} \cdot I_L^2 \quad (\text{A.3})$$

The nominal reactive power rating of the TCSC shall be defined as the reactive power output given by Q_{TCSC} in Formula (A.2) with nominal boost and nominal line current.

A.5 Power oscillation damping (POD)

Power oscillation damping (POD) is a specialized subset of closed loop reactance control which can be realized by modulating the TCSC reactance in response to transmission system conditions to dampen power system oscillations.

A TCSC for POD applications should typically fulfil the following fundamental requirements.

- The POD controller should be able to handle system disturbances that result in power oscillations through zero and be insensitive to the direction of the average power flow.
- The POD controller should be able to handle large system disturbances. This means that the structure of the POD controller should be such that the desired phase shift between the input signal and output signal of the TCSC is maintained independently of the magnitude of the power oscillation.
- The TCSC control system should be able to handle mode switching from capacitive boost mode to bypass mode and bypass to capacitive boost mode during power oscillation damping.

A.6 SSR mitigation

When properly designed and applied, TCSC can provide a degree of SSR mitigation when operated with a boost factor greater than one. The TCSC can help mitigate the resonant SSR series combination that results from fixed series capacitors.

If it is required that SSR concerns be addressed, studies should be performed involving detailed models of the power system, the nearby turbine generators and the TCSC. This recommendation is evident in situations when the power system includes a combination of fixed series capacitors and TCSC and the combined series compensation exceeds 50 %. If

the studies indicate that fixed series capacitors with the desired level of compensation will result in an SSR problem, the SSR studies should have the active involvement of the TCSC supplier.

A TCSC can only provide SSR mitigation if the valves are firing on a continuous basis. As a result, in order that the TCSC meets the SSR mitigation objectives, its operating region should be constrained to a boost factor equal to or greater than the minimum value at which it provides the desired SSR mitigation. The degree of mitigation can be a function of the control angle but it is desirable that the TCSC control system be able to provide a subsynchronous impedance that depends as little as possible on the boost factor.

In an application where SSR mitigation is critical, the operation of the TCSC under low line current condition should be reviewed, see A.3.

A.7 Harmonics

A TCSC operating in capacitive boost mode will produce harmonics. The magnitude of the harmonics depends on the operating point in terms of line current and boost factor.

In an application where TCSC is used for SSR mitigation or power oscillation damping purposes, the TCSC normally operates with the nominal boost factor and only temporarily during system disturbances with a higher boost factor. Therefore harmonic requirements on such a TCSC installation should be given for nominal operation i.e. rated line current and nominal boost factor.

Harmonic requirements for a TCSC should be given in terms of maximum allowed voltage distortion caused by the TCSC at the buses connecting the series compensated line segment. Harmonic studies for a TCSC installation require detailed transmission line data of the series compensated line together with harmonic network equivalents for the line ends to be supplied by the purchaser.

A.8 Control interactions between TCSCs in parallel lines

In a situation where two TCSCs are located on parallel lines, there is a risk of control interactions between the TCSCs during system disturbances. To reduce the risk of harmful interactions between parallel connected TCSCs the following is recommended.

- The POD controllers should use the same input signals, i.e. the sum of the power flow on the parallel circuits.
- The POD controllers should have similar dynamics.
- The reactance controllers should have similar dynamics and respond in similar ways when hitting limits.
- The degree of compensation of a line segment at maximum boost factor should be well below 100 %.

A.9 Operating range, overvoltages and duty cycles

A.9.1 Operating range

The operating range is generally specified by the purchaser.

A.9.2 Transient overvoltages

The TCSC should be suitable for repeated operations at transient overvoltages caused by power system faults, with the highest possible value U_{PL} that is expected to occur across the

TCSC terminals. The transient overvoltage is normally limited by an arrester overvoltage protection.

A.9.3 Duty cycles

The TCSC equipment should be designed to withstand the required sequences of faults, temporary overload, and continuous currents as specified by the purchaser. These sequences form the duty cycles that all of the components of the TCSC shall be designed to withstand. The duty cycle should be consistent with the manner in which the surrounding power system will be operated for both internal and external faults at the line. The purchaser should define duty cycles for faults of normal and extended duration and for faults of different types (three-phase and single phase). Phase-to-phase faults should be considered if specifically defined by the purchaser.

The purchaser should specify a power system equivalent to be used in the studies of external and internal faults at the transmission line for equipment rating.

Although the focus of A.9.3 is duty cycles involving power system faults, the TCSC should be designed to operate for other events such as insertion and reinsertion under the conditions specified by the purchaser.

Annex B

(informative)

Valve component fault tolerance

Fault tolerance capability may be defined as the ability of a TCSC thyristor 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 include, but are not limited to, those given below.

a) Short circuit of a thyristor

Even though a short-circuited thyristor will shunt the other components at the thyristor level, in some designs there may be a danger of overloading gate pulse transformers (if any), of overloading current connections (where parallel thyristors are used), or of changing the clamping load.

b) Continuous operation of protective firing at one thyristor level due to loss of normal firing pulses to that level.

Continuous operation of protective firing can lead to overload of the damping resistor and other components at the affected level.

c) Insulation failure of a damping capacitor, damping resistor, voltage divider or grading capacitor (if any)

Insulation failure of any component in parallel with the thyristors 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 proposed design 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. Such tests should be agreed between the purchaser and supplier on a case-by-case basis.

Bibliography

IEC 60068-1, *Environmental testing– Part 1: General and guidance*

IEC 60143-1, *Series capacitors for power systems – Part 1: General*

IEC 60721-1, *Classification of environmental conditions – Part 1: Environmental parameters and their severities*

IEC TR 61000-1-1, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1: General – Section 1: Application and interpretation of fundamental definitions and terms*

IEC 61000-6-5, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-5: Generic standards – Immunity for equipment used in power station and substation environment*

IEC 61954, *Static var compensators (SVC) – Testing of thyristor valves*

IEEE Std 824, *IEEE Standard for Series Capacitor Banks in Power Systems*

IEEE Std 1031, *IEEE Guide for the Functional Specification of Transmission Static Var Compensators*

IEEE Std 1534, *IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors*

Cigré Technical Brochure No. 123, *Thyristor Controlled Series Compensation*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	43
1 Domaine d'application	45
2 Références normatives	45
3 Termes et définitions	45
4 Valve CSCT et fonctionnement général d'une valve	48
4.1 Installation d'un CSCT et valve CSCT	48
4.2 Courant et tension de valve CSCT en fonctionnement capacitif amplifié.....	50
4.2.1 Généralités	50
4.2.2 Formes d'ondes du courant et de la tension de valve en fonctionnement capacitif amplifié.....	50
4.2.3 Formules pour le calcul des contraintes de courant et de tension d'une valve CSCT	51
4.3 Schéma de fonctionnement type d'une installation de CSCT	53
5 Exigences générales	54
5.1 Lignes directrices relatives à la réalisation des essais de type	54
5.1.1 Preuve de remplacement	54
5.1.2 Séquence des essais	54
5.1.3 Température ambiante pour l'essai	54
5.1.4 Fréquence des essais	54
5.1.5 Rapports d'essai.....	54
5.2 Conditions d'essai des essais diélectriques.....	54
5.2.1 Généralités	54
5.2.2 Traitement de la redondance dans les essais diélectriques.....	55
5.2.3 Facteur de correction atmosphérique.....	55
5.3 Conditions d'essai des essais de fonctionnement.....	55
5.3.1 Généralités	55
5.3.2 Traitement de la redondance dans les essais de fonctionnement.....	56
5.4 Critères de réussite des essais de type.....	56
5.4.1 Généralités	56
5.4.2 Critères applicables aux niveaux de valve	56
5.4.3 Critères applicables à la valve dans son ensemble	58
6 Résumé des essais	58
7 Essais diélectriques entre les bornes des valves et le boîtier de valve.....	59
7.1 Objectif des essais.....	59
7.2 Objet d'essai	59
7.3 Exigences des essais.....	59
7.3.1 Essai en courant alternatif	59
7.3.2 Essai de choc de foudre	60
8 Essais diélectriques entre les bornes des valves	60
8.1 Objectif des essais.....	60
8.2 Objet d'essai.....	61
8.3 Exigences des essais.....	61
8.3.1 Essai en courant alternatif	61
8.3.2 Essai de choc de manœuvre.....	62
9 Essais d'allumage et d'extinction périodiques	63
9.1 Objectifs des essais.....	63

9.2	Objet d'essai	63
9.3	Exigences des essais	63
9.3.1	Généralités	63
9.3.2	Essai capacitif amplifié continu maximal	64
9.3.3	Essai capacitif amplifié temporaire maximal	64
9.3.4	Essai capacitif amplifié minimal	65
9.3.5	Fonctionnement lors du shuntage	66
10	Essais en courant de défaut	67
10.1	Objectif des essais	67
10.2	Objet d'essai	68
10.3	Exigences des essais	68
10.3.1	Courant de défaut sans blocage ultérieur	68
10.3.2	Courant de défaut avec blocage ultérieur	68
11	Essai d'insensibilité des valves aux perturbations électromagnétiques	69
11.1	Objectif des essais	69
11.2	Objet d'essai	69
11.3	Exigences des essais	69
12	Essai des caractéristiques spéciales	69
12.1	Objectif des essais	69
12.2	Objet d'essai	70
12.3	Exigences des essais	70
13	Essais individuels de série	70
13.1	Généralités	70
13.2	Examen visuel	70
13.3	Vérification des connexions	70
13.4	Vérification du circuit de répartition des potentiels	70
13.5	Vérification de la tenue en tension	70
13.6	Essais de décharge partielle	70
13.7	Vérification des auxiliaires	70
13.8	Vérification de l'allumage	71
13.9	Essai de pression du système de refroidissement	71
14	Présentation des résultats des essais de type	71
Annexe A (informative) Considérations relatives au fonctionnement et aux caractéristiques assignées des valves CSCT		72
A.1	Aperçu	72
A.2	Caractéristiques du CSCT	73
A.3	Plage de fonctionnement	73
A.4	Caractéristique assignée de la puissance réactive	74
A.5	Amortissement des oscillations de puissance (AOP)	74
A.6	Réduction de la SSR (résonance hyposynchrone)	75
A.7	Harmoniques	75
A.8	Interactions de contrôle entre des CSCT sur des lignes en parallèle	76
A.9	Plage de fonctionnement, surtensions et cycles de service	76
A.9.1	Plage de fonctionnement	76
A.9.2	Surtensions transitoires	76
A.9.3	Cycles de service	76
Annexe B (informative) Tolérance aux pannes des composants de valve		77
Bibliographie		78

Figure 1 – Connexion et nomenclature classiques d'une installation de CSCT	49
Figure 2 – Sous-segment CSCT.....	49
Figure 3 – Formes d'ondes du CSCT en régime permanent pour l'angle de contrôle α et l'intervalle de conduction σ	50
Figure 4 – Tension de la valve à thyristors dans un CSCT	51
Figure 5 – Exemple de diagramme de plage de fonctionnement pour CSCT.....	53
Figure A.1 – Caractéristiques de la réactance apparente en régime permanent à fréquence industrielle du CSCT selon la Formule (A.1) avec $\lambda = 2,5$	73
Tableau 1 – Défauts de niveaux de valve autorisés pendant les essais de type	57
Tableau 2 – Liste des essais.....	58
Tableau A.1 – Relations entre la tension de crête et la tension efficace	72

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**VALVES À THYRISTORS POUR CONDENSATEURS SÉRIE
COMMANDÉS PAR THYRISTORS (CSCT) – ESSAI ÉLECTRIQUE****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 propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 62823 a été établie par le sous-comité 22F: Électronique de puissance pour les réseaux électriques de transport et de distribution, du comité d'études 22 de l'IEC: Systèmes et équipements électroniques de puissance.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

CDV	Rapport de vote
22F/342/CDV	22F/354A/RVC

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

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

Le comité a décidé que le contenu de cette publication 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. À 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 THYRISTORS POUR CONDENSATEURS SÉRIE COMMANDÉS PAR THYRISTORS (CSCT) – ESSAI ÉLECTRIQUE

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale définit les essais individuels de série et les essais de type sur les valves à thyristors utilisées dans les installations de condensateurs série commandés par thyristors (CSCT) pour transmission de puissance en courant alternatif.

Les essais spécifiés dans la présente Norme internationale sont basés sur des valves isolées par l'air fonctionnant en mode capacitif amplifié ou en mode de shuntage. Pour d'autres types de valves et pour une valve fonctionnant en mode inductif amplifié, les exigences d'essai et les critères d'acceptation font l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fournisseur.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60060-1:2010, *Technique des essais à haute tension – Partie 1: Définitions et exigences générales*

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

IEC 60071-2, *Coordination de l'isolement – Partie 2: Guide d'application*

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

3 Termes et définitions

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

3.1

valve à thyristors

assemblage électrique et mécanique, combiné, de niveaux de thyristors, muni de toutes les connexions, composants auxiliaires et structures mécaniques, qui peut être connecté en série avec chaque phase de la bobine d'inductance d'un CSCT

3.2

section de valve

assemblage électrique comportant un certain nombre de thyristors et d'autres composants et présentant les propriétés électriques préassignées d'une valve complète

Note 1 à l'article: Ce terme est principalement utilisé pour définir un objet d'essai pour les besoins des essais de valve.

3.3

niveau de thyristor

<de valve> partie d'une valve comprenant une paire de thyristors connectés ensemble de manière antiparallèle ainsi que leurs composants auxiliaires et bobines d'inductance associés directement, le cas échéant

3.4

niveaux de thyristors redondants, pl

nombre maximal de niveaux de thyristors dans la valve à thyristors qui peuvent être court-circuités extérieurement ou à l'intérieur de la valve en cours de service sans influencer le fonctionnement sûr de la valve à thyristors comme le démontrent les essais de type et qui s'il était dépassé, et seulement dans ce cas, exigerait le débranchement de la valve à thyristors pour remplacer des thyristors en défaillance ou accepter un risque augmenté de défauts

3.5

parafoudre de valve

parafoudre connecté aux bornes d'une valve

3.6

électronique de valve

VE

circuits électroniques au(x) potentiel(s) de la (des) valve(s) qui remplissent des fonctions de commande

Note 1 à l'article: L'abréviation «VE» est dérivée du terme anglais développé correspondant «valve electronics».

3.7

unité électronique d'interface de valve

unité électronique constituant une interface entre l'équipement de commande, au potentiel de la terre, et l'électronique de valve ou les dispositifs de valve

Note 1 à l'article: Les unités électroniques d'interface de valve, si elles sont utilisées, sont généralement mises au potentiel de la terre à proximité de la ou des valves.

Note 2 à l'article: Le terme «électronique de base de valve» (VBE) a également été utilisé pour cette unité.

3.8

batterie de condensateur série commandé par thyristors

batterie de CSCT

assemblage de valves à thyristors, de bobine(s) d'inductance, de condensateurs et d'équipements auxiliaires associés (structures, isolateurs support, commutateurs et dispositifs de protection), avec les équipements de commande nécessaires à une installation d'exploitation complète

3.9

bobine d'inductance de CSCT

une ou plusieurs bobines d'inductance connectées en série avec la valve à thyristors

VOIR: Figure 1, élément 4.

3.10

boîtier de valve

boîtier monté sur la plate-forme contenant la ou les valves à thyristors avec le matériel électronique et de refroidissement de la valve

3.11

surcharge temporaire

capacité de surcharge de courte durée du CSCT à la fréquence assignée et dans la plage des températures ambiantes

VOIR: Figure 5.

Note 1 à l'article: La surcharge temporaire est généralement d'une durée de quelques secondes, inférieure à 10 s).

3.12**allumage de protection de la valve**

moyen de protéger les thyristors contre une surtension en provoquant un allumage à une tension prédéterminée

3.13**courant de ligne** i_L

courant de ligne à fréquence industrielle

VOIR: Figure 2.

3.14**courant assigné** I_N

courant efficace de ligne (I_L) auquel il convient que le CSCT soit capable de fonctionner en régime continu à la réactance assignée (X_N) et à la tension assignée (U_N)

3.15**courant de la valve** i_V

courant passant par la valve à thyristors

VOIR: Figure 2.

3.16**courant de shuntage**

courant passant par la valve à thyristors parallèlement au condensateur série, si ce dernier a été shunté

3.17**tension du condensateur** U_C

tension aux bornes du CSCT

VOIR: Figure 2.

3.18**réactance nominale** X_N

réactance à fréquence industrielle nominale pour chaque phase du CSCT avec le facteur d'amplification nominale

3.19**tension assignée du CSCT** U_N

tension à fréquence industrielle dans chaque phase du CSCT qu'il est possible de contrôler en permanence à la réactance nominale (X_N), au courant assigné (I_N) et à la fréquence industrielle nominale et dans la plage de températures ambiantes

3.20**réactance apparente** $X(\alpha)$

réactance à fréquence industrielle apparente du CSCT exprimée sous la forme d'une fonction de l'angle de contrôle du thyristor (α)

VOIR: Figure 3, Figure A.1 et Formule A.1.

3.21

capacité assignée

C_N

valeur de la capacité pour laquelle le condensateur de CSCT a été conçu

3.22

réactance physique

X_C

réactance à fréquence industrielle pour chaque phase de la batterie de CSCT avec les thyristors bloqués et à une température interne du diélectrique du condensateur de 20 °C

$$X_C = 1/(\omega_N \cdot C_N)$$

3.23

facteur d'amplification

k_B

rapport entre la réactance apparente $X(\alpha)$ et la réactance physique X_C

$$k_B = X(\alpha) / X_C$$

3.24

intervalle de conduction

σ

partie d'un demi-cycle à fréquence industrielle au cours duquel une valve à thyristors est à l'état de conduction

$$\sigma = 2\beta$$

VOIR: Figure 3.

3.25

angle de contrôle

α

période exprimée sous la forme d'une mesure angulaire électrique entre le croisement nul de la tension du condensateur (U_C) et le début de la conduction du courant par la valve à thyristors

VOIR: Figure 3.

3.26

défaut interne

défaut de ligne survenant dans la partie de ligne protégée contenant le sous-segment CSCT série

3.27

défaut externe

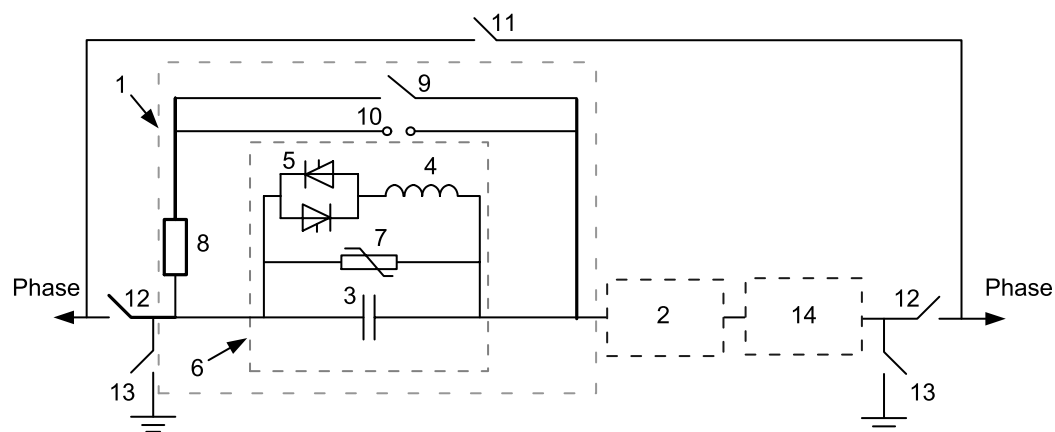
défaut de ligne survenant en dehors de la partie de ligne protégée contenant le sous-segment CSCT série

4 Valve CSCT et fonctionnement général d'une valve

4.1 Installation d'un CSCT et valve CSCT

La réactance série de la ligne de transmission peut être compensée par des combinaisons de condensateurs série fixes (CSF) et de segments CSCT pouvant être commandés, comme le représente la Figure 1. Un sous-segment CSCT utilise une bobine d'inductance commandée par thyristors (TCR) en parallèle avec une batterie de condensateur avec la capacité assignée

C_N , comme le représente la Figure 2. La valve à thyristors utilisée dans ce sous-segment CSCT est une valve CSCT (voir Figure 1, point 5).

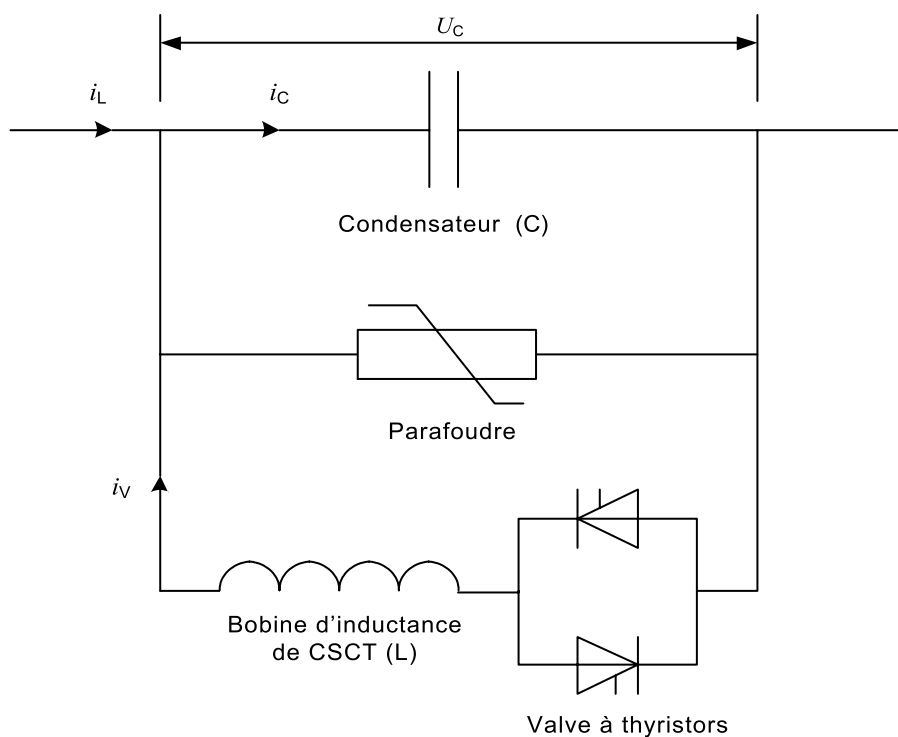


IEC

Légende

1	Unité de CSCT	8	Limiteur de courant de décharge, le cas échéant
2	Unité de CSCT supplémentaire si nécessaire	9	Commutateur de shuntage
3	Condensateur de CSCT	10	Espace de shuntage
4	Bobine d'inductance de CSCT	11	Sectionneur de shuntage externe
5	Valve à thyristors de CSCT	12	Commutateur d'isolation externe
6	Sous-segment CSCT	13	Commutateur de mise à la terre externe
7	Parafoudre à condensateur	14	Unité de FSC supplémentaire si nécessaire

Figure 1 – Connexion et nomenclature classiques d'une installation de CSCT



IEC

Figure 2 – Sous-segment CSCT

4.2 Courant et tension de valve CSCT en fonctionnement capacitif amplifié

4.2.1 Généralités

Même si une valve CSCT peut être utilisée théoriquement en mode inductif amplifié, ce fonctionnement n'est pas utilisé dans la pratique dans une installation de CSCT en raison de la compensation nécessaire du réseau et d'autres limitations. Le mode de fonctionnement capacitif amplifié est un mode de fonctionnement utilisé d'une valve CSCT.

4.2.2 Formes d'ondes du courant et de la tension de valve en fonctionnement capacitif amplifié

Pour un courant et une tension de ligne sinusoïdaux (voir Figure 3 a)), le fonctionnement capacitif amplifié d'une valve CSCT conduit à un courant sinusoïdal déformé traversant la batterie de condensateur, C, et la valve CSCT (voir Figure 3 b)). Ce courant renforce la chute de tension à la fréquence fondamentale aux bornes du sous-segment CSCT.

La forme d'onde de la tension de la valve à thyristors dans un CSCT est représentée à la Figure 4.

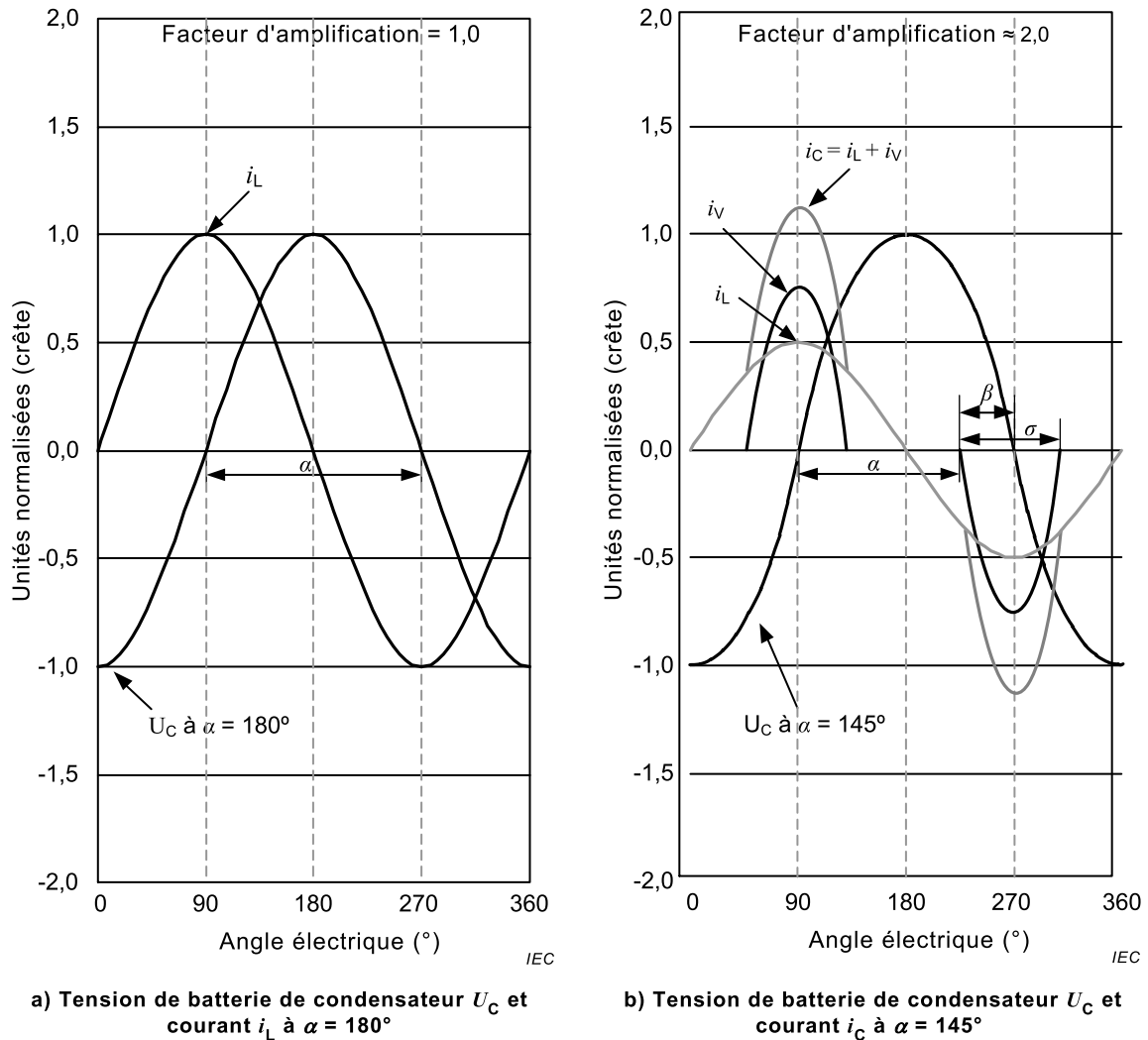
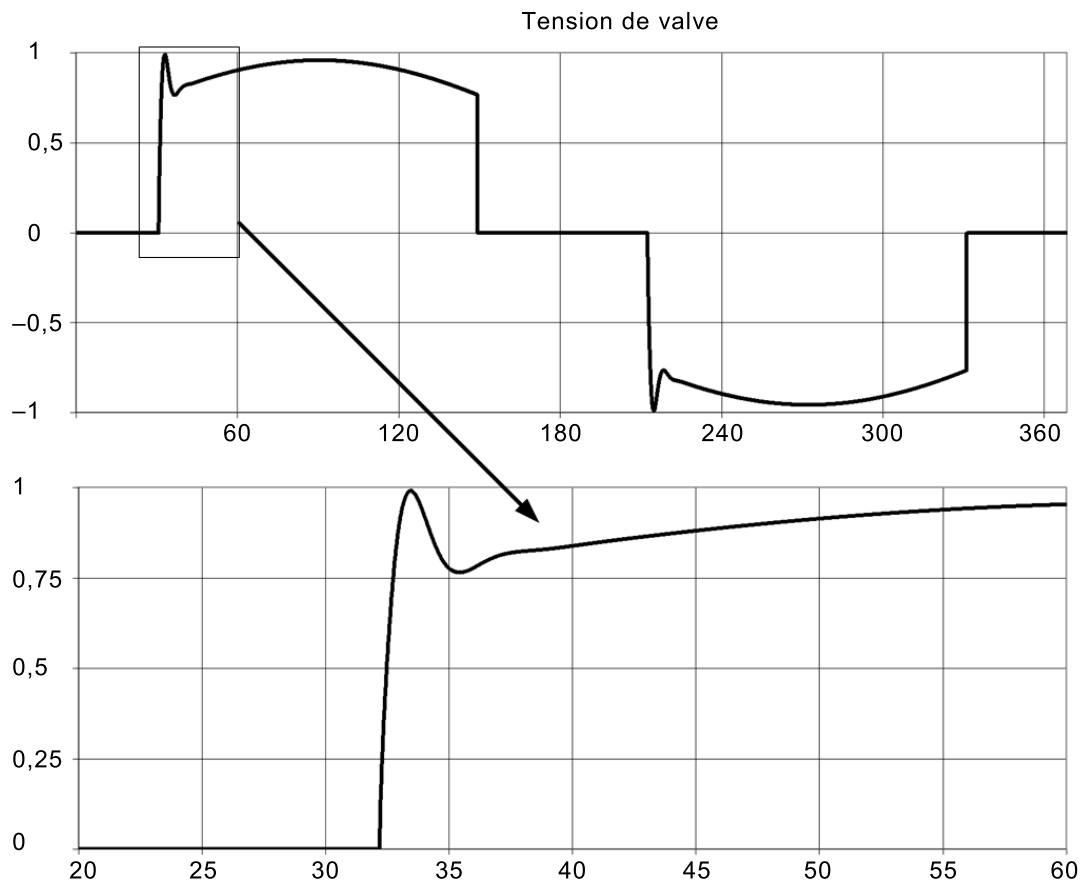


Figure 3 – Formes d'ondes du CSCT en régime permanent pour l'angle de contrôle α et l'intervalle de conduction σ



IEC

Figure 4 – Tension de la valve à thyristors dans un CSCT

4.2.3 Formules pour le calcul des contraintes de courant et de tension d'une valve CSCT

4.2.3.1 Mode de fonctionnement capacitif amplifié

Dans le mode de fonctionnement capacitif amplifié d'un CSCT, le courant de la valve CSCT est conforme à la formulation ci-dessous:

$$i_V = (-1)^n \cdot \frac{\lambda^2 \cdot i_L}{\lambda^2 - 1} \cdot \left(\cos \omega_N \cdot t - \frac{\cos \beta}{\cos \lambda \cdot \beta} \cdot \cos \lambda \cdot \omega_N \cdot t \right), \quad n \cdot \pi - \beta \leq \omega_N \cdot t \leq n \cdot \pi + \beta$$

$$i_V = 0, \quad n \cdot \pi + \beta < \omega_N \cdot t < (n + 1) \cdot \pi - \beta$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

où

λ est le rapport de la fréquence naturelle de la branche LC du sous-segment CSCT et de la fréquence industrielle du réseau en courant alternatif, $\lambda = \frac{1}{\omega_N \cdot \sqrt{L \cdot C}}$;

i_L est le courant de ligne du réseau en courant alternatif;

ω_N est la fréquence angulaire nominale d'un réseau en courant alternatif;

β est égal à la moitié de l'angle de conduction maximal des valves CSCT dans un sens pour mode capacitif amplifié à i_L .

La vitesse de variation du courant, di/dt , à l'allumage et à l'extinction d'un thyristor se détermine comme suit:

$$\left. \frac{di_v}{dt} \right|_{\omega_N \cdot t = \frac{\pi}{2} + \beta} = \frac{\lambda^2 \cdot i_L}{\lambda^2 - 1} \cdot \left[\omega_N \cdot \sin \beta - \omega_N \cdot \frac{\cos \beta}{\cos(\lambda \cdot \beta)} \cdot \sin(\lambda \cdot \beta) \right]$$

Le courant de crête traversant la valve CSCT est égal à:

$$i_{v_peak} = \frac{\lambda^2 \cdot i_L}{\lambda^2 - 1} \cdot \left[1 - \frac{\cos \beta}{\cos(\lambda \cdot \beta)} \right]$$

La tension du condensateur, U_{C_N} , aux instants d'allumage et d'extinction du thyristor est égale à:

$$U_{C_N} = \frac{\lambda \cdot i_L}{\lambda^2 - 1} \cdot X_0 \cdot [\sin \beta - \lambda \cdot \cos \beta \cdot \tan(\lambda \cdot \beta)]$$

où

X_0 est l'impédance de la branche LC du sous-segment CSCT:

$$X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

où

L est l'inductance de la branche LC du sous-segment CSCT (Figure 2);

C est la capacité de la branche LC du sous-segment CSCT (Figure 2).

La crête de tension du condensateur apparaissant sur la valve CSCT est égale à:

$$U_P = \lambda \cdot i_L \cdot X_0 \cdot \left[1 + \frac{\lambda \cdot (\cos \beta \cdot \tan(\lambda \cdot \beta) - \lambda \cdot \sin \beta)}{\lambda^2 - 1} \right]$$

Le facteur d'amplification capacitif du sous-segment CSCT est égal à:

$$k_B = 1 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot \cos^2 \beta}{\lambda^2 - 1} \cdot [\lambda \cdot \tan(\lambda \cdot \beta) - \tan \beta] - \beta - \frac{\sin(2 \cdot \beta)}{\beta} \right\}$$

4.2.3.2 Mode de fonctionnement de shuntage

Dans le mode de fonctionnement de shuntage du CSCT, la valve CSCT est en conduction complète et la valve conduit un courant de shuntage de forme d'onde sinusoïdale à fréquence industrielle égal à:

$$i_{bypass} = \frac{1}{1 - \omega_N^2 \cdot L \cdot C} \cdot i_L$$

La tension du condensateur en fonctionnement de shuntage satisfait à la formule ci-dessous:

$$U_C = \frac{-i_L}{(\lambda^2 - 1) \cdot \omega_N \cdot C}$$

4.3 Schéma de fonctionnement type d'une installation de CSCT

Voir la Figure 5.

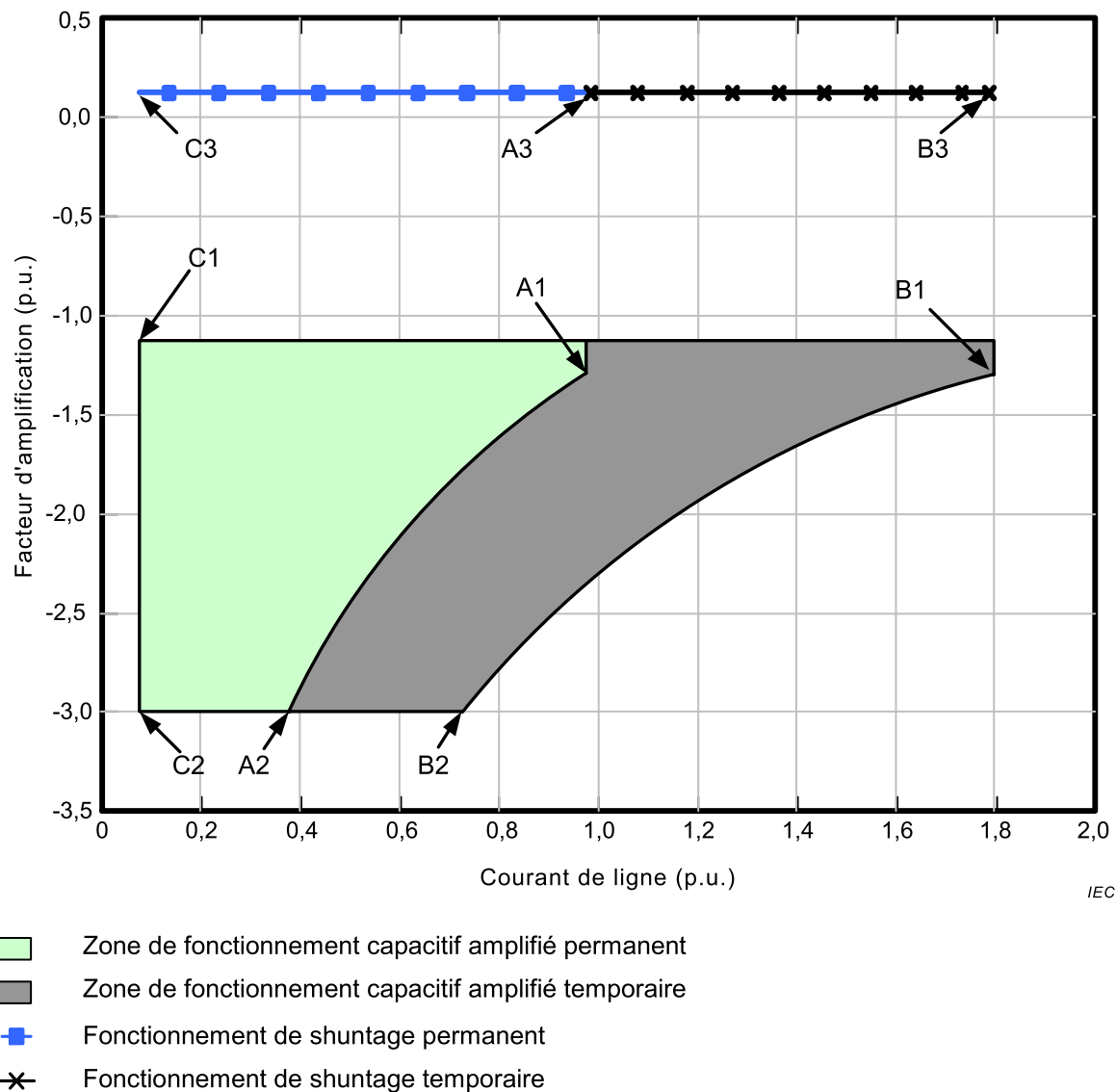


Figure 5 – Exemple de diagramme de plage de fonctionnement pour CSCT

5 Exigences générales

5.1 Lignes directrices relatives à la réalisation des essais de type

5.1.1 Preuve de remplacement

5.1.1.1 Généralités

Chaque conception de valve doit faire l'objet des essais de type spécifiés dans la présente Norme internationale. Si la valve est manifestement similaire à celle qui a fait l'objet de l'essai précédent, au lieu d'effectuer un essai de type, le fournisseur peut soumettre à l'appréciation de l'acheteur un rapport d'essai d'un essai de type précédent.

5.1.1.2 Objet d'essai

Les essais présentés concernent la valve (ou les sections de valve), sa structure et les parties du système de refroidissement et des circuits d'allumage et de surveillance placés à l'intérieur de la structure de la valve ou connectés entre la structure de la valve et la plate-forme. Les autres équipements (tels que le système de commande et de protection de la valve et les unités électroniques d'interface de valve) peuvent s'avérer essentiels pour démontrer le bon fonctionnement de la valve au cours des essais, mais ils ne font pas eux-mêmes l'objet de ces essais.

Certains essais de type peuvent être effectués, soit sur une valve complète, soit sur des sections de valve, comme indiqué dans le Tableau 2. En ce qui concerne les essais de type sur les sections de valve, le nombre total de sections de valve soumises à essai doit être au moins aussi grand que le nombre correspondant à une valve complète.

Sauf indication contraire, les mêmes sections de valve doivent être utilisées pour tous les essais de type.

5.1.2 Séquence des essais

Avant de commencer les essais de type, il convient de démontrer que la valve, les sections de valve et/ou leurs composants ont supporté les essais individuels de série garantissant leur bonne fabrication.

Les essais de type spécifiés peuvent être réalisés dans n'importe quel ordre.

5.1.3 Température ambiante pour l'essai

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

5.1.4 Fréquence des essais

Les essais diélectriques en courant alternatif peuvent être effectués, soit à 50 Hz, soit à 60 Hz. Pour les essais de fonctionnement, des exigences spécifiques concernant la fréquence d'essai sont données en 5.3.1.

5.1.5 Rapports d'essai

À la fin des essais de type, le fournisseur doit proposer des rapports d'essai de type, selon l'Article 14.

5.2 Conditions d'essai des essais diélectriques

5.2.1 Généralités

Les essais diélectriques doivent être effectués sur une valve entièrement assemblée.

La valve doit être montée avec tous les composants auxiliaires, à l'exception du parafoudre de valve, si celui-ci est utilisé. Sauf spécification contraire, l'électronique de la valve doit être mise sous tension. Les liquides de refroidissement et isolants, en particulier, doivent se trouver dans un état proche des conditions de service (tel que pour la conductivité), à l'exception du débit et de la teneur en substance antigel, qui peuvent être réduits. Si un objet ou un dispositif extérieur à la structure est nécessaire à la bonne application des contraintes pendant l'essai, il doit également être représenté ou simulé dans l'essai. Les parties métalliques de la structure de la valve qui ne sont pas concernées par l'essai doivent être court-circuitées ensemble et connectées à la terre de l'enveloppe de manière appropriée pour l'essai en question.

5.2.2 Traitement de la redondance dans les essais diélectriques

Sauf indication contraire, tous les essais diélectriques effectués sur une valve complète doivent être réalisés avec des niveaux de thyristors redondants court-circuités.

5.2.3 Facteur de correction atmosphérique

Lorsque cela est spécifié dans l'article pertinent, la correction atmosphérique doit être appliquée aux tensions d'essai conformément à l'IEC 60060-1. Les conditions de référence auxquelles les corrections doivent être apportées sont les suivantes.

– Pression:

Si la coordination de l'isolement de la partie soumise à essai de la valve à thyristors repose sur des tensions de tenue assignées normalisées conformes à l'IEC 60071-1, les facteurs de correction s'appliquent uniquement aux altitudes de site a_s de plus de 1 000 m. Par conséquent, si l'altitude du site sur lequel est installé l'équipement est inférieure à 1 000 m, la pression atmosphérique normalisée ($b_0 = 101,3$ kPa) doit alors être utilisée sans correction de l'altitude. Si $a_s > 1 000$ m, la procédure normalisée conforme à l'IEC 60060-1 est utilisée, mais la pression atmosphérique de référence b_0 est remplacée par la pression atmosphérique correspondant à une altitude de 1 000 m ($b_{1\,000m}$).

Si la coordination de l'isolement de la partie soumise à essai de la valve à thyristors ne repose pas sur des tensions de tenue assignées normalisées conformes à l'IEC 60071-1, la procédure normalisée conforme à l'IEC 60060-1 est utilisée avec la pression atmosphérique de référence b_0 ($b_0 = 101,3$ kPa).

– Température:

température de l'air maximale de conception de la salle des valves (°C).

– Humidité:

humidité absolue minimale de conception de la salle des valves (g/m³).

Les valeurs à utiliser doivent être spécifiées par le fournisseur.

5.3 Conditions d'essai des essais de fonctionnement

5.3.1 Généralités

Dans la mesure du possible, il convient de soumettre à essai une valve à thyristors complète. Sinon, les essais peuvent être effectués sur des sections de valve à thyristors. Le choix dépend essentiellement de la conception de la valve à thyristors et des équipements d'essai disponibles. Si des essais sur les sections de valve à thyristors sont proposés, ceux spécifiés dans la présente Norme internationale sont valides pour des sections de valve à thyristors contenant au moins cinq niveaux de thyristors connectés en série. Si des essais à réaliser sur des sections de valve à thyristors contenant moins de cinq niveaux de thyristors sont proposés, des facteurs de sécurité d'essai supplémentaires doivent être convenus. En aucun cas le nombre de niveaux de thyristors connectés en série dans une section de valve à thyristors ne doit être inférieur à trois.

Les essais de fonctionnement peuvent être réalisés à une fréquence industrielle différente de la fréquence de service, par exemple 50 Hz au lieu de 60 Hz ou inversement. Certaines contraintes opérationnelles (telles que les pertes de manœuvre ou I^2t du courant de court-circuit) sont affectées par la fréquence industrielle réelle pendant les essais. Dans ce cas, les conditions d'essai doivent être examinées et les modifications appropriées apportées pour s'assurer que les contraintes de la valve sont au moins aussi sévères qu'elles le seraient si les essais étaient réalisés à la fréquence de service.

Le liquide de refroidissement doit être dans un état représentatif des conditions de service. Le débit et la température, en particulier, doivent être établis en fonction des valeurs les plus défavorables correspondant à l'essai en question. Il convient que la teneur en substance antigel soit, de préférence, équivalente à la condition de service; toutefois, si cela n'est pas possible, un facteur de correction convenu entre le fournisseur et l'acheteur doit être appliqué. Sauf spécification contraire, la température de jonction d'un thyristor pendant les essais de fonctionnement ne doit pas être inférieure à la température en service.

5.3.2 Traitement de la redondance dans les essais de fonctionnement

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

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

où

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

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

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

5.4 Critères de réussite des essais de type

5.4.1 Généralités

Même si le plus grand soin est apporté à la conception des valves, l'expérience industrielle montre qu'il est impossible d'éviter les défaillances aléatoires occasionnelles des composants du niveau de thyristor pendant l'exploitation. Même si ces défaillances peuvent être liées à la contrainte, elles sont considérées comme aléatoires dans la mesure où leur cause ou la relation entre le taux de défaillance et la contrainte ne peut être prévue ou quantifiée de manière précise. Les essais de type soumettent, dans un délai très court, les valves ou sections de valve à plusieurs contraintes correspondant généralement aux pires contraintes auxquelles peuvent parfois être soumis les équipements pendant la durée de vie de la valve. Dès lors, les critères de réussite des essais de type définis ci-après n'autorisent qu'un nombre réduit de défaillances des niveaux de thyristors au cours des essais de type, à condition que ces défaillances soient rares et ne soient pas le révélateur d'une conception inappropriée.

5.4.2 Critères applicables aux niveaux de valve

Les critères suivants s'appliquent aux niveaux de valve.

- a) Si, à la suite d'un essai de type répertorié dans l'Article 6, le nombre de niveaux de thyristors défaillants est supérieur à la valeur spécifiée dans la colonne 2 du Tableau 1, la valve doit alors être considérée comme n'ayant pas satisfait aux essais de type.
- b) Si à la suite d'un essai de type, un niveau de thyristor (ou plusieurs, si le chiffre se situe toujours dans la limite de la colonne 2 du Tableau 1) a été court-circuité, le ou les niveaux défaillants doivent alors être rétablis et cet essai de type répété.

- c) Si le nombre cumulé de niveaux de thyristors court-circuités pendant tous les essais de type dépasse le nombre donné dans la colonne 3 du Tableau 1, la valve doit alors être considérée comme n'ayant pas satisfait au programme d'essais de type.
- d) Lorsque les essais de type sont effectués sur des sections de valve, les critères d'acceptation ci-dessus s'appliquent également, car le nombre de sections de valve soumises à essai ne doit pas être inférieur au nombre de sections dans une valve complète (voir 5.1.1.2).
- e) La valve ou les sections de valve doivent être vérifiées après chaque essai de type afin de déterminer si des niveaux de thyristors ont été court-circuités. Avant de poursuivre les essais, les thyristors ou composants auxiliaires qui se sont révélés défectueux au cours ou à la fin d'un essai de type peuvent être remplacés.
- f) À la fin du programme d'essais, la valve ou les sections de valve doivent faire l'objet d'une série d'essais de vérification, qui doivent inclure au minimum les vérifications suivantes:
- la vérification de la tenue en tension des niveaux de thyristors à la fois dans le sens direct et dans le sens inverse;
 - la vérification des circuits de déclenchement, le cas échéant;
 - la vérification des circuits de surveillance;
 - la vérification des circuits de protection des niveaux de thyristors par application de tensions transitoires supérieures et inférieures au(x) réglage(s) de protection, le cas échéant;
 - la vérification des circuits de répartition de tension.
- g) Les courts-circuits des niveaux de thyristors apparaissant pendant les essais de vérification doivent être décomptés en tant que partie des critères d'acceptation définis ci-dessus. Outre les niveaux court-circuités, le nombre total de niveaux de thyristors présentant des défauts ne produisant pas de court-circuit de niveaux de thyristors, qui sont découverts au cours du programme d'essais de type et des essais de vérification ultérieurs, ne doit pas dépasser le nombre indiqué dans la colonne 4 du Tableau 1. Si le nombre total de ces niveaux dépasse le nombre indiqué dans la colonne 4 du Tableau 1, la nature des défauts et leur cause doivent alors être revues et une action supplémentaire, s'il y a lieu, faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fournisseur.
- h) Lorsque les critères de pourcentage sont appliqués pour déterminer le nombre maximal autorisé de niveaux de thyristors court-circuités et le nombre maximal autorisé de niveaux avec des défauts n'ayant pas produit de court-circuit de niveaux de thyristors, il est courant d'arrondir toutes les fractions au nombre entier supérieur, comme représenté dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Défauts de niveaux de valve autorisés pendant les essais de type

Nombre de niveaux de thyristors dans une valve complète moins le nombre de niveaux redondants	Nombre de niveaux de thyristors qu'il est permis de court-circuiter dans un essai de type quelconque	Nombre total de niveaux de thyristors qu'il est permis de court-circuiter dans tous les essais de type	Nombre supplémentaire de niveaux de thyristors, dans tous les essais de type, ayant fait l'objet d'un défaut mais n'ayant pas été court-circuités
Jusqu'à 33	1	2	2
34 à 67	2	3	3
> 67	2	4	4

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

5.4.3 Critères applicables à la valve dans son ensemble

Il ne doit y avoir aucun claquage ou contournement externe sur un matériel électrique commun associé à plusieurs niveaux de thyristors de la valve. Il ne doit y avoir aucune décharge disruptive dans le matériau diélectrique faisant partie de la structure de la valve, des conduits de refroidissement, des conduits de lumière ou d'autres parties isolantes du système de transmission et de répartition des impulsions.

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

6 Résumé des essais

Le Tableau 2 énumère les essais indiqués dans cette Norme internationale.

Tableau 2 – Liste des essais

Essai	Paragraphe	Objet d'essai
Essais diélectriques entre les bornes des valves et la terre du boîtier de valve (essais de type)		
Essai en courant alternatif	7.2	valve
Essai de choc de foudre	7.3	valve
Essais diélectriques entre les bornes des valves (essais de type)		
Essai en courant alternatif	8.2	valve
Essai de choc de manœuvre	8.3	valve
Essais de fonctionnement (essais de type)		
Essai capacitif amplifié continu maximal	9.3.2	valve ou section de valve
Essai capacitif amplifié temporaire maximal	9.3.3	valve ou section de valve
Essai capacitif amplifié minimal	9.3.4	valve ou section de valve
Fonctionnement dans le mode de shuntage de courant de ligne temporaire maximal	9.3.5.1	valve ou section de valve
Fonctionnement dans le mode de shuntage de courant de ligne temporaire minimal	9.3.5.2	valve ou section de valve
Courant de défaut sans blocage ultérieur	10.3.1	valve ou section de valve
Courant de défaut avec blocage ultérieur	10.3.2	valve ou section de valve
Essai d'insensibilité des valves à une perturbation électromagnétique		
Essai de choc de manœuvre	11.3	valve
Essais individuels de série		
Examen visuel	13.2	chaque niveau de thyristor ^a
Vérification des connexions	13.3	chaque niveau de thyristor ^a
Vérification des circuits de répartition de tension	13.4	chaque niveau de thyristor ^a
Vérification de la tenue en tension	13.5	chaque niveau de thyristor ^a
Essai de décharge partielle	13.6	chaque niveau de thyristor ^a
Vérification des équipements auxiliaires	13.7	chaque niveau de thyristor ^a et valve complète ou section de valve
Vérification d'allumage	13.8	chaque niveau de thyristor ^a
Essai de pression du système de refroidissement	13.9	valve ou section de valve
^a Lorsque des essais sont à réaliser individuellement sur chaque niveau de thyristor, les essais doivent être réalisés avec les niveaux de thyristors intégrés dans la valve complète ou le module de valve, de façon que toutes les interconnexions entre les thyristors adjacents soient soumises à essai de manière adéquate.		

7 Essais diélectriques entre les bornes des valves et le boîtier de valve

7.1 Objectif des essais

Les principaux objectifs de ces essais sont de vérifier

- que des distances d'isolement dans l'air suffisantes ont été prévues afin d'éviter les contournements;
- l'absence de décharge disruptive dans l'isolation de la structure de la valve, les conduits de refroidissement, les conduits de lumière et autres composants isolants des systèmes de transmission et de répartition des impulsions;
- que les tensions d'allumage et d'extinction des décharges partielles sont supérieures à la tension maximale de fonctionnement en régime permanent présente sur la structure de la valve.

Ces essais ne sont pas applicables aux conceptions dans lesquelles une borne de la valve (désignée en tant que borne basse tension) est au même potentiel que le boîtier de valve et le support de la valve, les conduits de refroidissement et les conduits de lumière sont connectés à la basse tension de la valve. La distance d'isolement dans l'air entre la borne haute tension de la valve et le boîtier de valve doit dans ce cas être conforme à l'IEC 60071-2 ou faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fournisseur.

7.2 Objet d'essai

L'objet d'essai est le support de valve se terminant sur connecté à la borne haute tension de la valve. Ce support de valve peut être un objet distinct représentant les parties adjacentes de la valve. Il doit être assemblé avec tous les composants auxiliaires en place. Le fluide de refroidissement doit être dans un état représentatif des conditions de service les plus pénalisantes pour les besoins de l'essai.

Lorsqu'une valve complète est présentée à l'essai, il faut prêter attention à la terminaison correcte de la borne basse tension de la valve pendant les essais.

7.3 Exigences des essais

7.3.1 Essai en courant alternatif

7.3.1.1 Valeurs d'essai et formes d'ondes

Les valeurs d'essai et les formes d'ondes suivantes doivent être utilisées pour l'essai en courant alternatif:

a) Tension d'essai U_{ts1} , 1 min

L'essai est réalisé avec une tension d'essai maintenue pendant 1 min, U_{ts1} , et une tension d'essai maintenue pendant 10 min, U_{ts2} , aux formes d'ondes sinusoïdales d'une fréquence de 50 Hz ou 60 Hz, selon les équipements d'essai. La tension d'essai, U_{ts1} , doit être calculée selon

$$U_{ts1} = \frac{U_{s1}}{\sqrt{2}} \cdot k_1 \cdot k_t$$

où

U_{s1} est la valeur de crête de la tension de fonctionnement répétitive temporaire maximale, incluant le dépassement d'extinction, sur le support de valve (généralement déterminée d'après le fonctionnement avec surcharge temporaire maximale en mode capacitif amplifié, point de fonctionnement B2 sur la Figure 5);

U_{ts1} est la tension d'essai maintenue pendant 1 min;

k_1 est un facteur de sécurité d'essai, $k_1 = 1,30$;

k_t est le facteur de correction atmosphérique selon 5.2.3.

b) Tension d'essai U_{ts2} , 10 min

$$U_{ts2} = \frac{U_{s2}}{\sqrt{2}} \cdot k_2$$

où

U_{s2} est la valeur de crête de la tension maximale de fonctionnement permanent, incluant le dépassement d'extinction, sur le support de valve (généralement déterminée d'après le fonctionnement avec mode capacitif amplifié continu maximal, point de fonctionnement A2 sur la Figure 5);

k_2 est un facteur de sécurité d'essai ($k_2 = 1,20$ pour l'essai de 10 min).

7.3.1.2 Procédures d'essai

L'essai consiste à appliquer les tensions d'essai spécifiées U_{ts1} et U_{ts2} pendant la durée spécifiée entre la borne haute tension de la valve et le boîtier de valve.

- Augmenter la tension de 50 % à 100 % de U_{ts1} en 10 s approximativement.
- Maintenir U_{ts1} pendant 1 min.
- Réduire la tension à U_{ts2} .
- Maintenir U_{ts2} pendant 10 min, enregistrer le niveau de décharge partielle, puis réduire la tension à zéro.
- La valeur de crête des décharges partielles périodiques enregistrée pendant la dernière minute de l'étape d) doit être inférieure à 200 pC, à condition que les composants sensibles aux décharges partielles dans la valve aient été soumis à essai séparément, ou à 50 pC si ce n'est pas le cas.
- La tension d'allumage et la tension d'extinction doivent être mesurées conformément à l'IEC 60270.

7.3.2 Essai de choc de foudre

Une forme d'onde normalisée de tension de choc de foudre de 1,2/50 selon 7.2.1 de l'IEC 60060-1:2010 doit être utilisée.

La tension de CSCT assignée, U_N , est la tension de base permettant de définir la tension de choc de foudre et la valeur de crête de la tension d'essai doit être la tension de tenue au choc de foudre normalisée conformément à l'IEC 60071-1.

L'essai doit comprendre trois applications de polarité positive et trois applications de polarité négative de tensions de choc de foudre entre la borne haute tension de la valve et le boîtier de valve.

8 Essais diélectriques entre les bornes des valves

8.1 Objectif des essais

Ces essais ont pour objet de vérifier la conception de la valve en fonction de sa capacité à supporter les surtensions entre ses bornes. Les essais doivent démontrer

- qu'un isolement interne suffisant a été prévu afin de permettre à la valve de supporter les tensions spécifiées;
- que les tensions d'allumage et d'extinction des décharges partielles sont supérieures à la tension maximale de fonctionnement en régime permanent sur la valve;
- que le système d'allumage de surtension de protection (le cas échéant) fonctionne comme prévu;

- que la capacité dv/dt des thyristors est adaptée aux conditions de service (dans la plupart des cas, les essais spécifiés sont suffisants; toutefois, dans certains cas exceptionnels, des essais supplémentaires peuvent s'avérer nécessaires).

8.2 Objet d'essai

L'objet d'essai doit être une valve complète qui doit être assemblée avec tous les composants auxiliaires, à l'exception du parafoudre de valve, s'il y a lieu. Le fluide de refroidissement doit être dans un état représentant les conditions de service, à l'exception du débit qui peut être réduit. Si un objet extérieur à la structure est nécessaire à la bonne application des contraintes pendant les essais, il doit également être inclus ou simulé dans l'essai.

L'objet d'essai utilisé pour les essais diélectriques de valve ne permet normalement pas l'application d'une correction atmosphérique aux tensions d'essai spécifiées sans contrainte excessive sur les thyristors ou autres composants internes. Pour cette raison, aucun facteur de correction atmosphérique n'est appliqué aux essais diélectriques entre les bornes des valves. Le fournisseur doit démontrer que les effets des conditions atmosphériques sur la tenue interne de la valve ont été pris en compte de manière adéquate.

8.3 Exigences des essais

8.3.1 Essai en courant alternatif

8.3.1.1 Valeurs d'essai et formes d'ondes

L'essai est réalisé avec une tension d'essai maintenue pendant 1 min, U_{tv1} , et une tension d'essai maintenue pendant 10 min, U_{tv2} , aux formes d'ondes sinusoïdales d'une fréquence de 50 Hz ou 60 Hz, selon les équipements d'essai.

$$U_{tv1} = \frac{U_{v1}}{\sqrt{2}} \cdot k_3$$

où

U_{v1} est la valeur de crête de la tension de fonctionnement répétitive temporaire maximale, incluant le dépassement d'extinction, sur la valve (généralement déterminée d'après le fonctionnement avec surcharge temporaire maximale en mode capacitif amplifié, point de fonctionnement B2 sur la Figure 5 ou le niveau de protection d'un condensateur série);

k_3 est un facteur de sécurité d'essai, $k_3 = 1,10$.

L'essai exigé peut, d'un point de vue thermique, surcharger certains composants de la valve de manière excessive. Si c'est le cas, en fonction de l'accord entre l'acheteur et le fournisseur, l'essai de tenue en tension alternative de 1 min peut être remplacé par plusieurs essais plus courts dont la durée minimale est déterminée à partir de la durée maximale possible de la condition de surtension spécifiée multipliée par 2, mais avec une durée totale supérieure ou égale à 1 min.

$$U_{tv2} = \frac{U_{v2}}{\sqrt{2}} \cdot k_{tv2}$$

où

U_{v2} est la valeur de crête de la tension maximale de fonctionnement permanent, incluant le dépassement d'extinction, sur la valve (généralement déterminée d'après le fonctionnement avec mode capacitif amplifié continu maximal, point de fonctionnement A2 sur la Figure 5);

k_3 est un facteur de sécurité d'essai ($k_3 = 1,10$).

8.3.1.2 Procédures d'essai

La procédure d'essai consiste à appliquer les tensions d'essai spécifiées, pendant la durée indiquée, entre les deux bornes de la valve, l'une d'elles étant mise à la terre.

- Augmenter la tension de 50 % à 100 % de U_{tv1} en 10 s approximativement.
- Maintenir U_{tv1} pendant 1 min.
- Réduire la tension à U_{tv2} .
- Maintenir U_{tv2} pendant 10 min, enregistrer le niveau de décharge partielle, puis réduire la tension à zéro.
- La valeur de crête des décharges partielles périodiques enregistrée pendant la dernière minute de l'étape d) doit être inférieure à 200 pC, à condition que les composants sensibles aux décharges partielles aient été soumis à essai séparément, ou à 50 pC si ce n'est pas le cas.
- La tension d'allumage et la tension d'extinction doivent être mesurées conformément à l'IEC 60270.

Si un allumage de protection de la valve est fourni, il ne doit pas fonctionner pendant cet essai.

8.3.2 Essai de choc de manœuvre

8.3.2.1 Valeurs d'essai et formes d'ondes

Une forme d'onde normalisée de tension de choc de manœuvre de 250/2 500 selon 8.2.1 de l'IEC 60060-1:2010 doit être utilisée.

- Pour une valve munie d'un parafoudre de valve, la tension d'essai de choc de manœuvre de la valve, U_{tsv} , doit être déterminée selon ce qui suit:

$$U_{tsv} = SIPL_v \cdot k_4$$

où

$SIPL_v$ est le niveau de protection aux surtensions de manœuvre du parafoudre de valve;

k_4 est un facteur de sécurité d'essai, $k_4 = 1,10$.

- Pour une valve sans parafoudre de valve, la tension d'essai de choc de manœuvre de la valve, U_{tsv} , doit être déterminée selon ce qui suit:

$$U_{tsv} = U_{valve} \cdot k_5$$

où

U_{valve} est la tension de choc de manœuvre présumée maximale aux bornes d'une valve conformément aux études de coordination de l'isolement du système;

k_5 est un facteur de sécurité d'essai, $k_5 = 1,15$.

Si la valve comporte un allumage de protection contre les surtensions qui fonctionne pendant l'essai, cinq applications supplémentaires de chocs de manœuvre d'une amplitude convenue pour que la valve ne s'allume pas, doivent être réalisées. Pour les essais supplémentaires, l'électronique de valve doit être activée.

8.3.2.2 Procédures d'essai

Pour tous ces essais, trois applications de tensions de choc de manœuvre de chaque polarité doivent être réalisées entre les bornes de la valve, une borne étant mise à la terre. Au lieu d'inverser la polarité du générateur de choc, l'essai peut être réalisé avec une polarité du générateur de choc et en inversant les bornes de la valve.

9 Essais d'allumage et d'extinction périodiques

9.1 Objectifs des essais

Les principaux objectifs des essais d'allumage et d'extinction périodiques sont les suivants:

- vérifier l'adaptation des niveaux de thyristors et des circuits électriques associés dans une valve en fonction des contraintes de courant, de tension et de température lors de l'amorçage et du désamorçage dans les conditions de contraintes répétitives les plus défavorables;
- démontrer le bon fonctionnement de la valve dans le mode de fonctionnement capacitif amplifié minimal avec un courant de ligne minimal, coïncidant avec l'angle d'allumage minimal.

9.2 Objet d'essai

L'objet d'essai doit être soit une valve complète, soit des sections de valve, voir 5.3.1. La valve ou les sections de valve en essai doivent être assemblées avec des composants auxiliaires, qui sont nécessaires pour le bon fonctionnement de la valve en essai.

Le liquide de refroidissement doit être dans un état représentatif des conditions de service. Le débit et la température, en particulier, doivent être établis en fonction des valeurs les plus défavorables correspondant à l'essai en question.

9.3 Exigences des essais

9.3.1 Généralités

L'utilisation d'un circuit d'essai tel qu'une source de courant alternatif est pertinente mais généralement irréalisable dans la pratique. D'autres circuits d'essai adaptés (tel qu'un circuit d'essai synthétique approprié) doivent générer des contraintes équivalentes aux conditions de service appropriées.

Les formes d'onde de courant et de tension appliquées à la valve ou aux sections de valve doivent être aussi proches que possible de celles dont fait l'objet la valve lors de l'allumage et de l'extinction, dans les conditions de fonctionnement les plus critiques spécifiées ci-après. L'intervalle de temps considéré pour l'allumage est constitué des 10 premières microsecondes aux 20 premières microsecondes alors que, pour l'extinction, l'intervalle considéré est compris entre 0,2 ms avant et 1 ms après un courant nul.

En particulier, les conditions suivantes ne doivent pas être moins sévères que les conditions de service:

- les amplitudes de tension à la mise sous et hors tension;
- les crêtes de tension durant les périodes de rétablissement;
- le di/dt à la mise sous tension et au moins pendant 0,2 ms avant un courant nul;
- la température de jonction du thyristor.

Les facteurs suivants doivent également être considérés:

- la représentation de la capacité parasite entre les bornes de la valve;
- l'amplitude et la durée suffisantes du courant de charge permettant d'obtenir une conduction de zone complète de la jonction du thyristor.

9.3.2 Essai capacitif amplifié continu maximal

9.3.2.1 Valeurs d'essai et formes d'ondes

Le courant d'essai et la tension d'essai doivent être déterminés d'après le courant de fonctionnement capacitif amplifié continu maximal, avec le facteur d'amplification capacitif maximal, point de fonctionnement A2 sur la Figure 5, et à la température ambiante maximale.

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

La tension d'essai (tension à l'amorçage et au désamorçage du thyristor sans dépassement), U_{test} , doit être déterminée comme suit:

$$U_{\text{test}} = U_{\text{C_N}} \cdot k_n \cdot k_6$$

où

$U_{\text{C_N}}$ est la tension du condensateur à l'amorçage ou au désamorçage du thyristor de la valve CSCT pour le fonctionnement capacitif amplifié continu maximal selon 4.2.3.1 et le point de fonctionnement A2 sur la Figure 5;

k_n est un facteur d'échelle d'essai selon 5.3.2;

k_6 est un facteur de sécurité d'essai, $k_6 = 1,05$.

La durée de l'essai ne doit pas être inférieure à 30 min.

9.3.2.2 Procédures d'essai

Les essais doivent être réalisés à l'aide de circuits d'essai adaptés (tel qu'un circuit d'essai synthétique approprié) générant des contraintes de mise sous et hors tension équivalentes aux conditions de service appropriées.

Dans l'idéal, l'essai est réalisé en reproduisant le courant de la source en fonction du temps spécifié. Pour des raisons pratiques, une procédure d'essai modifiée peut être adoptée comme suit:

- déterminer un état capacitif amplifié maximal en régime permanent, comme défini en 9.3.2.1;
- maintenir le fonctionnement pendant au moins 30 min, en partant du moment où l'équilibre thermique est atteint.

9.3.3 Essai capacitif amplifié temporaire maximal

9.3.3.1 Valeurs d'essai et formes d'ondes

Le courant d'essai et la tension d'essai doivent être fonction de la surcharge temporaire, voir point B2 de la Figure 5.

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

La tension d'essai (tension à l'amorçage et au désamorçage du thyristor sans dépassement), $U_{\text{test_max}}$, doit être déterminée comme suit:

$$U_{\text{test_max}} = U_{\text{C_max}} \cdot k_n \cdot k_7$$

où

U_{C_max} est la tension du condensateur à l'amorçage ou au désamorçage du thyristor de la valve CSCT pour le fonctionnement capacitif amplifié temporaire maximal selon 4.2.3.1 et le point de fonctionnement B2 sur la Figure 5;

k_n est un facteur d'échelle d'essai selon 5.3.2;

k_7 est un facteur de sécurité d'essai, $k_7 = 1,05$.

La durée de l'essai doit être 1,1 fois la durée de surcharge temporaire spécifiée.

9.3.3.2 Procédures d'essai

Les essais doivent être effectués en utilisant des circuits d'essai adaptés (tel qu'un circuit d'essai synthétique approprié) générant des contraintes de mise sous et hors tension équivalentes aux conditions de service appropriées.

Dans l'idéal, l'essai est réalisé en reproduisant le courant de la source en fonction du temps spécifié. Pour des raisons pratiques, une procédure d'essai modifiée peut être adoptée comme suit:

- a) déterminer un état capacitif amplifié maximal en régime permanent comme défini en 9.3.2.1 et le maintenir jusqu'à atteindre l'équilibre thermique;
- b) augmenter le courant source à la valeur d'essai. Maintenir le fonctionnement pendant 1,1 fois la durée de surcharge temporaire spécifiée.

9.3.4 Essai capacitif amplifié minimal

9.3.4.1 Généralités

Cet essai a pour objet de vérifier le bon fonctionnement du système d'allumage dans la valve CSCT dans les conditions de fonctionnement à courant de ligne et capacitif amplifié minimaux spécifiés.

9.3.4.2 Valeurs d'essai et formes d'ondes

Le courant d'essai doit être fonction du courant de ligne continu minimal spécifié admis en fonctionnement capacitif amplifié (point C1 de la Figure 5).

Le courant d'essai doit intégrer un facteur de sécurité d'essai de 0,95.

La tension d'essai (tension à l'amorçage et au désamorçage du thyristor sans dépassement, U_{test_min}), doit être déterminée comme suit:

$$U_{test_min} = U_{C_min} \cdot \frac{N_{tut}}{N_t} \cdot k_8$$

où

U_{C_min} est la tension du condensateur à l'amorçage ou au désamorçage du thyristor de la valve CSCT pour le fonctionnement capacitif amplifié continu minimal selon 4.2.3.1 et le point de fonctionnement C1 sur la Figure 5;

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

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

k_8 est un facteur de sécurité d'essai, $k_8 = 0,95$.

L'essai doit durer 10 min.

Pour l'électronique de valve activée à partir d'un réseau en courant alternatif, la crête de la tension d'essai doit être également vérifiée. La crête de tension pendant l'essai est déterminée selon 4.2.3.1 selon le même principe que ci-dessus.

9.3.4.3 Procédures d'essai

Les essais doivent être effectués en utilisant des circuits d'essai adaptés (tel qu'un circuit d'essai synthétique approprié) générant des contraintes de mise sous et hors tension équivalentes aux conditions d'essai définies en 9.3.4.2.

Dans l'idéal, l'essai est réalisé en reproduisant le courant de la source en fonction du temps spécifié. Pour des raisons pratiques, une procédure d'essai modifiée peut être adoptée comme suit:

- a) déterminer un état capacitif amplifié minimal pour le courant et la tension comme défini en 9.3.4.2;
- b) maintenir le fonctionnement pendant 10 min, en partant du moment où l'équilibre thermique est atteint.

9.3.5 Fonctionnement lors du shuntage

9.3.5.1 Fonctionnement en mode de shuntage de courant temporaire maximal

9.3.5.1.1 Généralités

Si les calculs indiquent que les pertes du thyristor en mode de shuntage sont supérieures aux pertes du thyristor en mode capacitif amplifié, les essais de shuntage suivants doivent être réalisés afin de vérifier la capacité thermique de la valve. Sinon, l'essai de shuntage n'est pas nécessaire, étant donné que la capacité thermique de la valve a été vérifiée lors des essais capacitifs amplifiés maximaux.

9.3.5.1.2 Valeurs d'essai et formes d'ondes

Le courant d'essai et la tension d'essai doivent être déterminés d'après le courant de fonctionnement de shuntage temporaire maximal selon 4.2.3.2 au point de fonctionnement B3 de la Figure 5 et à la température ambiante maximale.

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

L'essai doit durer 2 fois la durée de surcharge temporaire spécifiée ou 2 min au maximum après stabilisation de la température du liquide de refroidissement.

9.3.5.1.3 Procédures d'essai

Les essais doivent être réalisés en utilisant des circuits d'essai adaptés. Tous les systèmes auxiliaires susceptibles d'influencer le comportement de la valve dans les conditions de fonctionnement spécifiées ci-dessous doivent fonctionner:

- a) définir les conditions continues maximales du courant de ligne et les maintenir jusqu'à obtention de l'équilibre thermique;
- b) maintenir le fonctionnement pendant la durée spécifiée de l'essai.

9.3.5.2 Fonctionnement en mode de shuntage de courant de ligne temporaire minimal

9.3.5.2.1 Généralités

Cet essai n'est pas applicable si la valve n'est pas conçue pour fonctionner au point de fonctionnement de shuntage de courant de ligne minimal C3 de la Figure 5.

Selon accord de l'acheteur, cet essai peut être omis dans le cas où l'électronique de valve n'est pas activée par le réseau en courant alternatif et si la fonction de surveillance des thyristors à basse tension est démontrée par d'autres essais.

En fonction du choix du point de fonctionnement C3 de la Figure 5, la capacité de fonctionnement de la valve en mode de shuntage de courant de ligne temporaire minimal peut être vérifiée par 9.3.4.

9.3.5.2.2 Valeurs d'essai et formes d'ondes

Le courant d'essai et la tension d'essai doivent être déterminés d'après le courant de fonctionnement de shuntage temporaire minimal selon 4.2.3.2 au point de fonctionnement C3 de la Figure 5.

Le courant d'essai doit intégrer un facteur de sécurité d'essai de 0,95.

La tension d'essai, $U_{\text{test-by_min}}$, doit être déterminée comme suit:

$$U_{\text{test-by_min}} = U_{\text{by_min}} \cdot \frac{N_{\text{tut}}}{N_{\text{t}}} \cdot k_g$$

où

$U_{\text{by_min}}$ est la tension de crête du condensateur pour un courant de ligne minimal et un fonctionnement de shuntage de valve CSCT selon 4.2.3.2 et au point de fonctionnement C3 de la Figure 5;

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

N_{t} est le nombre total des niveaux de thyristors en série dans la valve;

k_g est un facteur de sécurité d'essai, $k_g = 0,95$.

L'essai doit durer 2 fois la durée du courant de ligne temporaire minimal spécifiée ou 2 min au maximum après stabilisation de la température du liquide de refroidissement.

9.3.5.2.3 Procédures d'essai

Les essais doivent être réalisés en utilisant des circuits d'essai adaptés. Tous les systèmes auxiliaires susceptibles d'influencer le comportement de la valve dans les conditions de fonctionnement spécifiées ci-dessous doivent fonctionner:

- déterminer le courant de ligne minimal en fonctionnement de shuntage comme défini en 9.3.5.2.2;
- maintenir le fonctionnement pendant la durée spécifiée de l'essai.

10 Essais en courant de défaut

10.1 Objectif des essais

Les principaux objectifs des essais en courant de défaut consistent à démontrer que la conception correcte de la valve lui permet de supporter les contraintes maximales de courant, de tension et de température résultant de courants de court-circuit.

Les essais doivent démontrer que la valve est capable de:

- conduire le courant de défaut maximal à travers la valve sans blocage ultérieur en cas de défaut interne de la section de ligne de transmission;
- conduire le courant de défaut maximal à travers la valve avec blocage ultérieur en cas de défaut externe de la section de ligne de transmission.

10.2 Objet d'essai

Voir 9.2.

10.3 Exigences des essais

10.3.1 Courant de défaut sans blocage ultérieur

10.3.1.1 Valeurs d'essai et formes d'ondes

Lorsqu'un défaut interne se produit, le courant de défaut est élevé et les disjoncteurs de ligne sont déclenchés afin d'interrompre le courant de défaut et d'isoler la partie saine du réseau à partir du point défectueux. Selon la procédure de gestion des défauts, la protection du CSCT peut ordonner le shuntage du condensateur série par l'intermédiaire de la valve à thyristors et du commutateur de shuntage. Aucune tension de blocage ultérieure n'apparaît sur la valve CSCT après la conduction du courant de défaut.

La valeur de crête et la durée de conduction du courant de défaut doivent être déterminées d'après des études du réseau utilisant la puissance maximale de court-circuit du réseau en courant alternatif.

Il n'est pas nécessaire que la forme d'onde du courant d'essai soit identique au courant de défaut susceptible de se produire en service. La valeur de crête du courant doit être au moins égale à la valeur la plus élevée de la surintensité. De même, la température du thyristor doit être au moins égale à la valeur la plus élevée susceptible de se produire dans les conditions de service, en tenant compte du temps de fermeture du commutateur de shuntage.

10.3.1.2 Procédures d'essai

Les essais doivent être réalisés en utilisant des circuits d'essai adaptés. Tous les systèmes auxiliaires susceptibles d'influencer le comportement de la valve dans les conditions de fonctionnement spécifiées ci-dessous doivent fonctionner:

- a) définir la température de jonction du thyristor (de manière adaptée) correspondant à la condition maximale en régime permanent, comme défini en 9.3.2.1;
- b) appliquer le courant d'essai pendant la durée spécifiée.

10.3.2 Courant de défaut avec blocage ultérieur

10.3.2.1 Valeurs d'essai et formes d'ondes

Cet essai est applicable si le CSCT fonctionne de manière à exposer la valve à un courant de défaut suivi d'une tension de blocage.

Le courant de défaut et la durée de la conduction de défaut, ainsi que la tension de blocage ultérieure doivent être déterminés d'après des études du réseau utilisant les cas les plus défavorables de défaut.

L'influence exercée par le courant d'essai et la tension d'essai sur la valve/section de valve CSCT doit être au moins aussi sévère que celle rencontrée en service. Un facteur de sécurité d'essai de 1,05 doit être appliqué à la tension de blocage qui suit. La valeur de crête du courant doit être au moins égale à la valeur la plus élevée de la surintensité. De même, la température du thyristor doit être au moins égale à la valeur la plus élevée lorsque la tension est de nouveau appliquée.

10.3.2.2 Procédures d'essai

Les essais doivent être réalisés en utilisant des circuits d'essai adaptés. Tous les systèmes auxiliaires susceptibles d'influencer le comportement de la valve dans les conditions de fonctionnement spécifiées ci-dessous doivent fonctionner:

- a) définir la température de jonction du thyristor (de manière adaptée) correspondant à la condition maximale en régime permanent, comme défini en 9.3.2.1;
- b) appliquer le courant d'essai pendant une durée spécifiée;
- c) appliquer la tension d'essai.

11 Essai d'insensibilité des valves aux perturbations électromagnétiques

11.1 Objectif des essais

Le principal objectif est de démontrer l'insensibilité de la valve au brouillage électromagnétique (perturbations électromagnétiques) résultant des transitoires de tension et de courant générés à l'intérieur de la valve ou qui lui sont imposés de l'extérieur. Les éléments sensibles de la valve sont généralement les circuits électroniques utilisés pour le déclenchement, la protection et la surveillance des niveaux de thyristors.

Les essais doivent démontrer:

- que les thyristors ne font l'objet d'aucun déclenchement intempestif;
- que l'électronique de valve n'envoie aucune indication erronée de défauts de niveaux de thyristors ni aucun signal erroné aux systèmes de commande et de protection du convertisseur.

L'insensibilité de la valve aux perturbations électromagnétiques doit être vérifiée en surveillant la valve pendant l'essai de choc de la valve (8.3.2).

11.2 Objet d'essai

L'objet d'essai est généralement la valve ou les sections de valve utilisées pour les autres essais.

11.3 Exigences des essais

L'insensibilité aux interférences électromagnétiques est vérifiée en surveillant la valve pendant l'essai de choc de manœuvre entre les bornes. L'électronique de valve en essai doit être activée au préalable, sauf spécification contraire. Les parties des unités électroniques d'interface de valve indispensables à l'échange correct des informations avec la valve d'essai doivent être incluses. Les critères d'acceptation de l'essai impliquent l'absence d'allumage intempestif de la valve ou d'indication erronée donnée par la valve au système de commande ou de protection.

12 Essai des caractéristiques spéciales

12.1 Objectif des essais

Ces essais sont destinés à vérifier la conception et les caractéristiques de fonctionnement de toutes les caractéristiques spéciales de la valve. Les caractéristiques spéciales peuvent inclure, sans toutefois s'y limiter, les caractéristiques des deux catégories suivantes:

- les circuits prévus pour faciliter la commande, la protection et la surveillance correctes de la valve;
- les caractéristiques incluses dans la valve pour permettre une tolérance aux pannes (voir Annexe B).

Les caractéristiques de la première catégorie peuvent généralement être démontrées dans le cadre des autres essais.

Les caractéristiques de la seconde catégorie peuvent nécessiter des essais particuliers. Ces essais doivent faire l'objet d'un accord au cas par cas entre l'acheteur et le fournisseur.

12.2 Objet d'essai

Les essais peuvent être effectués sur une valve complète, sur une section de valve ou sur des parties pertinentes de l'une ou de l'autre.

12.3 Exigences des essais

Les procédures d'essai et les critères d'acceptation doivent être choisis en tenant compte de la conception réelle de la valve. Il doit être démontré que les composants ou les circuits impliqués se comportent comme prévu.

13 Essais individuels de série

13.1 Généralités

Les essais spécifiés définissent l'essai minimal exigé. Le fournisseur doit proposer une description détaillée des procédures d'essai afin de répondre aux objectifs de l'essai.

13.2 Examen visuel

Les objectifs de l'essai sont les suivants:

- vérifier que tous les matériaux et composants ne sont pas endommagés et sont correctement installés;
- vérifier les données des composants installés;
- vérifier les distances d'isolement dans l'air et les lignes de fuite à l'intérieur de la valve.

13.3 Vérification des connexions

Objectif de l'essai:

- vérifier que toutes les connexions principales conduisant du courant ont été réalisées correctement;
- vérifier la force de serrage des thyristors;
- vérifier le câblage point à point.

13.4 Vérification du circuit de répartition des potentiels

Objectif de l'essai: vérifier les paramètres du circuit de répartition (résistance et capacité) et s'assurer ainsi que la division de tension entre les thyristors connectés en série est correct.

13.5 Vérification de la tenue en tension

Objectif de l'essai: vérifier que les niveaux de thyristors peuvent résister à la tension correspondant à la valeur maximale spécifiée pour la valve.

13.6 Essais de décharge partielle

Pour démontrer que la fabrication est correcte, l'acheteur et le fournisseur doivent convenir des composants et des sous-ensembles critiques pour la conception, et des essais appropriés de décharge partielle doivent être effectués.

13.7 Vérification des auxiliaires

Objectif de l'essai: vérifier que les auxiliaires (tels que les circuits de surveillance et de protection) présents à chaque niveau de thyristor et ceux qui sont communs à la valve complète (ou section de valve) fonctionnent correctement.

13.8 Vérification de l'allumage

Objectif de l'essai: vérifier que les thyristors dans chaque niveau de thyristor s'amorcent correctement en réponse aux signaux d'allumage.

13.9 Essai de pression du système de refroidissement

Objectif de l'essai:

- vérifier qu'il n'y a aucune fuite;
- vérifier l'écoulement adéquat, à la fois dans la valve dans son ensemble et dans tous les sous-circuits;
- vérifier la pression différentielle.

14 Présentation des résultats des essais de type

Le rapport d'essai est émis conformément aux lignes directrices générales données dans l'ISO/IEC 17025. Il doit inclure les informations suivantes:

- le nom et l'adresse du laboratoire et le lieu de réalisation des essais;
- le nom et l'adresse de l'acheteur;
- une identification non ambiguë de l'objet d'essai, incluant le type et les caractéristiques assignées, le numéro de série et toutes les autres informations nécessaires pour identifier l'objet d'essai;
- les dates de réalisation des essais;
- la description des circuits d'essai et des procédures d'essai utilisées pour la réalisation des essais;
- une référence aux documents normatifs et, s'il y a lieu, une description claire des écarts par rapport aux procédures indiquées dans les documents normatifs;
- une description de l'équipement de mesure et une déclaration de l'incertitude de mesure;
- les résultats d'essai sous la forme de tableaux, de graphiques, d'oscillogrammes et de photographies, selon le cas;
- une description des défaillances du matériel ou des composants, s'il y a lieu.

Annexe A (informative)

Considérations relatives au fonctionnement et aux caractéristiques assignées des valves CSCT

A.1 Aperçu

La réactance série de la ligne de transmission peut être compensée par des combinaisons de condensateurs série fixes et de batteries de CSCT (voir Figure 1 dans l'Article 4). Les batteries de CSCT utilisent un ou plusieurs modules contrôlables permettant d'obtenir la plage d'exigences de performances spécifiée par l'acheteur. L'Annexe A présente les exigences liées au fonctionnement et aux caractéristiques assignées du CSCT.

La configuration du circuit CSCT décrite à la Figure 1 comporte trois modes de fonctionnement élémentaires:

- valve CSCT en fonctionnement bloqué avec les thyristors bloqués (absence de courant dans la valve à thyristors);
- valve CSCT en fonctionnement de shuntage avec un courant continu traversant la valve;
- valve CSCT en fonctionnement capacitif amplifié avec une bobine d'inductance commandée par les thyristors.

La définition de l'angle de contrôle (α) avec la référence au passage par zéro de la tension est choisie pour être cohérente avec d'autres dispositifs d'électronique de puissance, tels que la bobine d'inductance commandée par thyristors (TCR, en anglais «Thyristor Controlled Reactor»). Toutefois, il convient de noter que de nombreux systèmes de commande CSCT utilisent la forme d'onde de courant de ligne comme une référence de commande importante.

Lorsqu'un CSCT fonctionne en mode capacitif amplifié, le courant passant par la branche de la valve à thyristors peut modifier la tension dans le condensateur, donnant lieu à une réactance apparente du condensateur supérieure à la réactance physique du condensateur. Dans une application CSCT, la réactance apparente supérieure du condensateur peut produire une augmentation du courant de ligne. Le courant passant par impulsions dans la valve à thyristors modifie la tension du condensateur (U_C). La forme d'onde déformée (voir Figure 3 en 4.2.2), indique que la tension du condensateur contient des composantes autres qu'à la fréquence industrielle et que la relation entre la tension efficace totale et la tension de crête totale n'est pas égale à $\sqrt{2}$ comme cela est le cas pour une forme d'onde sinusoïdale pure. Le Tableau A.1 présente la relation type entre la tension de crête et la tension efficace d'un CSCT.

Tableau A.1 – Relations entre la tension de crête et la tension efficace

Facteur d'amplification capacitif (k_B)	Rapport entre la fréquence naturelle de la branche LC et la fréquence industrielle (λ)	Tension efficace à fréquence industrielle	Tension de crête à fréquence industrielle	Tension efficace totale	Tension de crête totale
1,0	2,5	1,0	1,41	1,00	1,41
2,0	2,5	2,0	2,83	2,02	2,55
3,0	2,5	3,0	4,24	3,05	3,70
1,0	3,5	1,0	1,41	1,00	1,41
2,0	3,5	2,0	2,83	2,03	2,54
3,0	3,5	3,0	4,24	3,07	3,67

A.2 Caractéristiques du CSCT

Les caractéristiques du CSCT sont déterminées en fonction des paramètres de circuit du condensateur série (C) et de la bobine d'inductance (L) représentés à la Figure 2 dans l'Article 4. La réactance apparente en régime permanent à fréquence industrielle du CSCT $X(\alpha)$ en tant que fonction de l'angle de contrôle du thyristor (α) peut être calculée à partir de la Formule A.1. Une caractéristique de réactance type est représentée à la Figure A.1.

$$X(\alpha) = \frac{1}{\omega_N \cdot C} \left[1 - \frac{\lambda^2}{(\lambda^2 - 1)} \cdot \frac{2 \cdot \beta + \sin(2 \cdot \beta)}{\pi} + \frac{4\lambda^2}{(\lambda^2 - 1)^2} \cdot \cos^2(\beta) \cdot \frac{\lambda \cdot \tan(\lambda \cdot \beta) - \tan(\beta)}{\pi} \right] \quad (\text{A.1})$$

où

β est le demi-angle de conduction de la valve CSCT en mode capacitif amplifié dans un sens du courant ($\beta = \pi - \alpha$);

α est l'angle de contrôle compté à partir de la tension zéro du condensateur;

λ est le rapport de la fréquence naturelle de la branche LC du sous-segment CSCT et de la fréquence industrielle du réseau en courant alternatif:

$$\lambda = \frac{1}{\omega_N \cdot \sqrt{L \cdot C}},$$

où

C est la capacité du condensateur série;

L est l'inductance de la bobine d'inductance du CSCT.

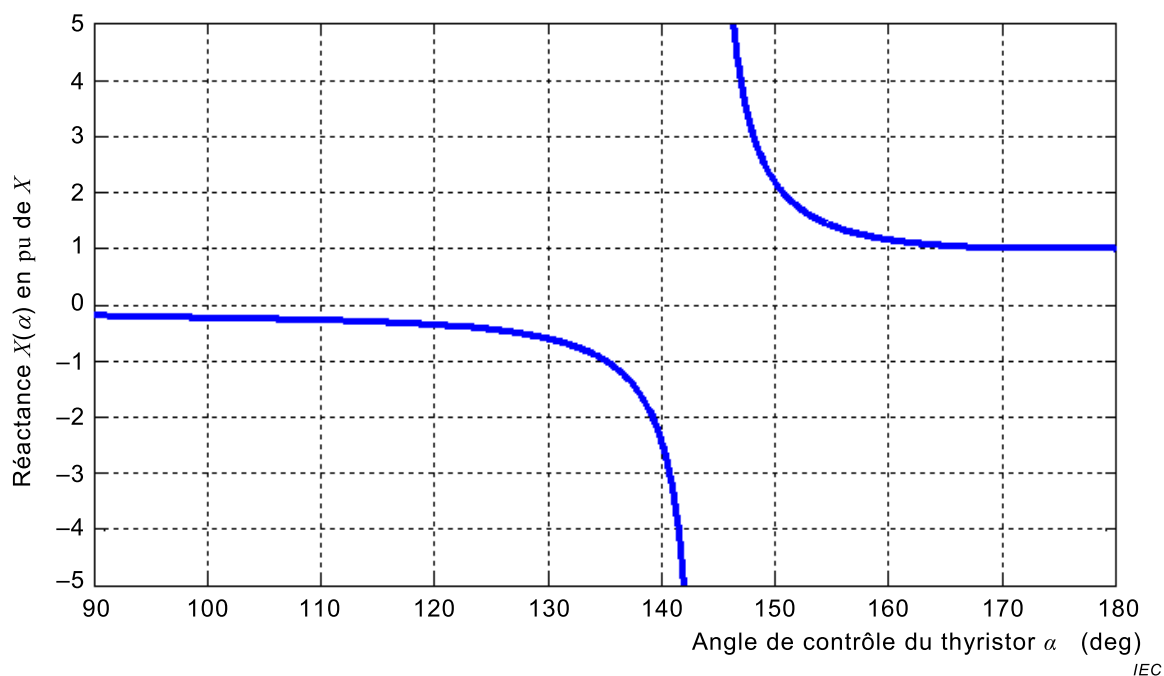


Figure A.1 – Caractéristiques de la réactance apparente en régime permanent à fréquence industrielle du CSCT selon la Formule (A.1) avec $\lambda = 2,5$

A.3 Plage de fonctionnement

La plage de fonctionnement est l'un des facteurs les plus importants pour la caractéristique assignée d'un CSCT. Son impact sur les contraintes des composants du circuit principal est

important et il convient, à ce titre, que cet impact soit clairement spécifié par l'acheteur. Le CSCT doit être conçu pour supporter le fonctionnement avec la réactance différente et les différents courants de ligne dans la plage de fonctionnement spécifiée. La plage de fonctionnement exigée doit être définie par des études de réseaux à l'initiative de l'acheteur et être clairement établie dans la spécification, avec un ensemble de courbes de la réactance apparente du CSCT à fréquence fondamentale ou du facteur d'amplification (k_B) par rapport au courant de ligne comme indiqué à la Figure 5 en 4.3. La plage de fonctionnement exigée dépend de l'objectif du CSCT. En règle générale, un CSCT prévu pour l'amortissement des oscillations de puissance (AOP) exige une plage de fonctionnement plus importante qu'un CSCT prévu pour une réduction de la SSR (subsynchronous resonance – résonance hyposynchrone).

Il convient de tenir compte d'un courant de ligne minimal car l'allumage en régime permanent d'une valve à thyristors n'est pas possible pour des tensions et des courants de valve à thyristors très faibles. Tous les thyristors et équipements électroniques associés d'allumage et de surveillance font l'objet d'une tension minimale au-dessous de laquelle l'allumage et la surveillance ne peuvent pas être garantis. En outre, certaines valves à thyristors disposent d'alimentations pour les circuits d'allumage qui peuvent exercer des contraintes supplémentaires sur l'allumage de la valve à thyristors lorsque le courant de ligne est faible. Cela donne lieu à un courant de ligne et un facteur d'amplification minimaux (k_B) en dessous desquels il est impossible de passer en mode capacitif amplifié. Cela peut avoir des implications pour l'application et le fonctionnement du CSCT. À de faibles courants de ligne, l'impact de la compensation série est limité. Si la SSR est un problème, il convient de shunter le CSCT à des niveaux de courant de ligne en dessous desquels le mode capacitif amplifié ne peut pas être maintenu.

A.4 Caractéristique assignée de la puissance réactive

Lorsqu'un CSCT fonctionne en mode capacitif amplifié, la puissance réactive perçue par le réseau diffère de celle des condensateurs. La puissance réactive d'un CSCT et la puissance réactive des condensateurs sont données par

$$Q_{\text{TCSC}} = 3 \cdot \frac{k_B}{\omega \cdot C} \cdot I_L^2 \quad (\text{A.2})$$

$$Q_{\text{CAP}} = 3 \cdot \frac{k_B^2}{\omega \cdot C} \cdot I_L^2 \quad (\text{A.3})$$

La caractéristique assignée de la puissance réactive nominale du CSCT doit être définie comme la puissance réactive donnée par Q_{TCSC} dans la Formule (A.2) avec le facteur d'amplification nominal et le courant de ligne nominal.

A.5 Amortissement des oscillations de puissance (AOP)

L'amortissement des oscillations de puissance (AOP) est un sous-ensemble spécialisé du contrôle de réactance à boucle fermée qu'il est possible de réaliser en modulant la réactance du CSCT en réponse aux conditions du système de transmission pour amortir les oscillations du réseau.

En règle générale, il convient qu'un CSCT destiné à des applications AOP satisfasse aux exigences fondamentales suivantes.

- Il convient que le contrôleur AOP soit capable de gérer les perturbations du système donnant lieu à des oscillations de puissance passant par zéro et ne soit pas sensible au sens du flux de puissance moyen.

- Il convient que le contrôleur AOP soit capable de gérer les perturbations importantes du système. Cela signifie qu'il convient que la structure du contrôleur AOP permette de maintenir le déphasage souhaité entre le signal d'entrée et le signal de sortie du CSCT, indépendamment de l'amplitude de l'oscillation de puissance.
- Il convient que le système de commande CSCT soit capable de gérer une commutation de mode du mode capacitif amplifié au mode de shuntage et du mode de shuntage au mode capacitif amplifié pendant un amortissement des oscillations de puissance.

A.6 Réduction de la SSR (résonance hyposynchrone)

S'il est correctement conçu et appliqué, le CSCT peut offrir un niveau de réduction de la SSR en fonctionnement selon un facteur d'amplification supérieur à un. Le CSCT peut faciliter la réduction de l'association série de résonances hyposynchrones issue de condensateurs série fixes.

S'il est exigé que les problèmes liés à la SSR soient résolus, il convient de réaliser des études reposant sur des modèles détaillés du réseau, des turboalternateurs à proximité et du CSCT. Cette recommandation est évidente si le réseau contient une association de condensateurs série fixes et de CSCT, et si la compensation série combinée dépasse 50 %. Si les études indiquent que les condensateurs série fixes offrant le niveau souhaité de compensation engendrent des problèmes liés à la SSR, il convient que les études de SSR impliquent une participation active du fournisseur du CSCT.

Un CSCT ne peut réduire la SSR que si les valves s'allument de manière continue. Par conséquent, pour que le CSCT réponde aux objectifs de réduction de la SSR, il convient que sa zone de fonctionnement soit contrainte à un facteur d'amplification supérieur ou égal à la valeur minimale à laquelle il offre la réduction souhaitée de la SSR. Le degré de réduction peut être fonction de l'angle de contrôle. Cependant, il est préférable que le système de commande du CSCT puisse fournir une impédance hyposynchrone qui dépend, le moins possible, du facteur d'amplification.

Dans une application où la réduction de la SSR est critique, il convient d'examiner le fonctionnement du CSCT lorsque le courant de ligne est faible, voir A.3.

A.7 Harmoniques

Un CSCT fonctionnant en mode capacitif amplifié génère des harmoniques. L'amplitude des harmoniques dépend du point de fonctionnement en termes de courant de ligne et de facteur d'amplification.

Dans une application dans laquelle le CSCT est utilisé pour réduire la SSR ou amortir les oscillations de puissance, le CSCT fonctionne généralement avec le facteur d'amplification nominal, et uniquement de manière temporaire lorsque le facteur d'amplification des perturbations du système est plus élevé. Par conséquent, il convient de fournir les exigences en matière d'harmoniques sur ce type d'installation de CSCT dans le cadre d'un fonctionnement nominal, c'est-à-dire le courant de ligne assigné et le facteur d'amplification nominal.

Il convient de spécifier les exigences en matière d'harmoniques d'un CSCT en termes de déformation de tension admise maximale générée par le CSCT au niveau des jeux de barres connectant les segments de ligne compensés en série. Les études d'harmoniques d'une installation de CSCT exigent des données détaillées de la ligne de transmission du réseau compensé en série ainsi qu'un modèle harmonique équivalent du réseau aux extrémités de la ligne à fournir par l'acheteur.

A.8 Interactions de contrôle entre des CSCT sur des lignes en parallèle

Si deux CSCT se trouvent sur des lignes en parallèle, il existe un risque d'interactions de contrôle entre eux en cas de perturbations du système. Pour limiter le risque d'interactions dangereuses entre des CSCT connectés en parallèle, il est recommandé ce qui suit.

- Il convient que les contrôleurs AOP utilisent les mêmes signaux d'entrée, c'est-à-dire la somme des flux de puissance sur les circuits parallèles.
- Il convient que les contrôleurs AOP disposent de dynamiques analogues.
- Il convient que les contrôleurs de réactance disposent de dynamiques analogues et répondent de manière similaire lorsque les limites sont atteintes.
- Il convient que le degré de compensation d'un segment de ligne à facteur d'amplification maximale soit bien inférieur à 100 %.

A.9 Plage de fonctionnement, surtensions et cycles de service

A.9.1 Plage de fonctionnement

En règle générale, la plage de fonctionnement est spécifiée par l'acheteur.

A.9.2 Surtensions transitoires

Il convient que le CSCT puisse supporter des surtensions transitoires en régime répété causées par des défauts du réseau, dont la valeur U_{PL} est la valeur la plus élevée possible susceptible de se produire aux bornes du CSCT. La surtension transitoire est normalement limitée par un parafoudre de protection contre les surtensions.

A.9.3 Cycles de service

Il convient que l'équipement du CSCT soit conçu pour supporter les séquences exigées de défauts, la surcharge temporaire et les courants permanents, tels que spécifiés par l'acheteur. Ces séquences constituent les cycles de service que tous les composants du CSCT doivent être capables de supporter. Il convient que le cycle de service soit cohérent avec les modes de fonctionnement du réseau environnant pour les défauts de ligne internes et externes. Il convient que l'acheteur définisse les cycles de service pour les défauts de durées normales et étendues et pour les défauts de différents types (triphase et monophasé). Il convient de tenir compte des défauts entre phases si cela est explicitement défini par l'acheteur.

Il convient que l'acheteur spécifie un réseau équivalent à utiliser dans les études des défauts de ligne de transmission externes et internes pour la caractéristique assignée de l'équipement.

Bien que l'intérêt principal de A.9.3 porte sur les cycles de service liés aux défauts du réseau, il convient que le CSCT soit conçu pour fonctionner en prenant en compte d'autres événements tels que l'insertion et la réinsertion selon les conditions définies par l'acheteur.

Annexe B **(informative)**

Tolérance aux pannes des composants de valve

La capacité de tolérance aux pannes peut être définie comme l'aptitude d'une valve à thyristors de CSCT à remplir sa fonction prévue, jusqu'à l'arrêt programmé, avec des composants ou sous-systèmes défectueux ou des composants surchargés, sans provoquer de défaillance inacceptable des autres composants ni étendre le dommage en raison de la condition défectueuse. Des caractéristiques spéciales peuvent être exigées dans la conception pour garantir la tolérance aux pannes. Des exemples de défauts pour lesquels la tolérance aux pannes peut être exigée comportent, sans y être limités, ceux qui sont donnés ci-dessous.

a) Court-circuit d'un thyristor

Même si un thyristor court-circuité shunte les autres composants au niveau thyristor, dans certaines conceptions il peut exister un danger de surcharge des transformateurs d'impulsions de porte (le cas échéant), de surcharge des connexions de courant (lorsque des thyristors en parallèle sont utilisés) ou de modification de la charge de serrage.

b) Fonctionnement permanent de l'allumage de protection pour un niveau de thyristor dû à une perte d'impulsions d'allumage normales à ce niveau

Le fonctionnement permanent de l'allumage de protection peut provoquer une surcharge de la résistance d'amortissement et d'autres composants au niveau affecté.

c) Défaut d'isolation d'un condensateur d'amortissement, d'une résistance d'amortissement, d'un diviseur de tension ou d'un condensateur de répartition (le cas échéant)

Un défaut d'isolation d'un composant quelconque en parallèle avec les thyristors peut attirer le courant de charge dans celui-ci, provoquant une situation dangereuse.

d) Fuite de petites quantités de fluide de refroidissement de valve

Si la valve est refroidie par un liquide, de petites fuites peuvent ne pas être facilement détectées. Une fuite de fluide de refroidissement peut contaminer des composants sensibles, provoquant un dysfonctionnement et peut augmenter la probabilité de défaut d'isolation.

Il convient que l'acheteur revoie la conception proposée avec le fournisseur afin de déterminer la probabilité et les conséquences probables de certaines défaillances. Le cas échéant, dans le programme d'essais de type, il convient de tenir compte de l'aptitude des essais spécifiques à vérifier les aspects critiques de la capacité de tolérance aux pannes de la valve. Il convient que ces essais fassent l'objet d'un accord au cas par cas entre l'acheteur et le fournisseur.

Bibliographie

IEC 60068-1, *Essais d'environnement – Partie 1: Généralités et lignes directrices*

IEC 60143-1, *Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux – Partie 1: Généralités*

IEC 60721-1, *Classification des conditions d'environnement – Partie 1: Agents d'environnement et leurs sévérités*

IEC TR 61000-1-1, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 1: Généralités – Section 1: Application et interprétation de définitions et termes fondamentaux*

IEC 61000-6-5, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 6-5: Normes génériques – Immunité pour les équipements utilisés dans les environnements de centrales électriques et de postes*

IEC 61954, *Compensateurs statiques de puissance réactive (SVC) – Essais des valves à thyristors*

IEEE Std 824, *IEEE Standard for Series Capacitor Banks in Power Systems*

IEEE Std 1031, *IEEE Guide for the Functional Specification of Transmission Static Var Compensators*

IEEE Std 1534, *IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors*

Cigré Technical Brochure No. 123, *Thyristor Controlled Series Compensation*

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