

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Series capacitors for power systems –
Part 4: Thyristor controlled series capacitors**

**Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux –
Partie 4: Condensateurs série commandés par thyristors**





THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2010 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: 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.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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 CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00



IEC 60143-4

Edition 1.0 2010-11

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Series capacitors for power systems –
Part 4: Thyristor controlled series capacitors**

**Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux –
Partie 4: Condensateurs série commandés par thyristors**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

XA

ICS 29.240.99; 31.060.70

ISBN 978-2-88912-242-4

CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope.....	6
2 Normative references.....	6
3 Terms, definitions and abbreviations.....	7
3.1 Abbreviations.....	7
3.2 Definitions.....	7
4 Operating and rating considerations	11
4.1 General.....	11
4.2 TCSC characteristics.....	14
4.3 Operating range.....	15
4.4 Reactive power rating.....	16
4.5 Power oscillation damping (POD).....	16
4.6 SSR mitigation.....	16
4.7 Harmonics.....	17
4.8 Control interactions between TCSCs in parallel lines	17
4.9 Operating range, overvoltages and duty cycles	17
4.9.1 Operating range.....	17
4.9.2 Transient overvoltages	17
4.9.3 Duty cycles.....	17
5 Valve control.....	18
5.1 Triggering system	18
5.2 System aspects	19
5.3 Normal operating conditions.....	19
5.4 Valve firing during system faults	20
5.5 Actions at low line current.....	20
5.6 Monitoring	20
6 Ratings.....	20
6.1 Capacitor rating	20
6.2 Reactor rating.....	21
6.3 Thyristor valve rating.....	21
6.3.1 Current capability.....	21
6.3.2 Voltage capability.....	22
6.4 Varistor rating.....	24
6.5 Insulation level and creepage distance	24
7 Tests.....	24
7.1 Test of the capacitor.....	25
7.1.1 Routine tests	25
7.1.2 Type tests	25
7.1.3 Special test (endurance test).....	26
7.2 Tests of the TCSC reactor.....	26
7.2.1 Routine tests	26
7.2.2 Type tests	26
7.2.3 Special tests.....	26
7.3 Tests of thyristor valves.....	27
7.3.1 Guidelines for the performance of type tests	27
7.3.2 Routine tests	29

7.3.3	Type tests	29
7.4	Tests of protection and control system	38
7.4.1	Routine tests	38
7.4.2	Type tests	39
7.4.3	Special tests.....	39
8	Guide for selection of rating and operation	40
8.1	General.....	40
8.2	Thyristor controlled series capacitor.....	41
8.2.1	AC transmission system.....	41
8.2.2	TCSC Operational objectives.....	42
8.2.3	TCSC ratings.....	42
8.3	Thyristor valves	44
8.4	Capacitors and reactors.....	44
8.4.1	Capacitor considerations.....	44
8.4.2	Reactor considerations	45
8.5	Fault duty cycles for varistor rating	45
8.6	Valve cooling system.....	46
8.7	TCSC control and protection	46
8.7.1	Control.....	47
8.7.2	Protection.....	49
8.7.3	Monitoring and recording	50
8.8	Precommissioning and Commissioning Tests.....	50
8.8.1	Introduction	50
8.8.2	Precommissioning Tests	51
8.8.3	Station tests	51
8.8.4	Commissioning (field) tests	51
	Bibliography.....	53
	Figure 1 – Typical nomenclature of a TCSC installation.....	12
	Figure 2 – TCSC subsegment.....	13
	Figure 3 – TCSC steady state waveforms for control angle α and conduction interval σ	14
	Figure 4 – TCSC power frequency steady state reactance characteristics according to Equation (1) with $\lambda = 2,5$	15
	Figure 5 – Example of TCSC operating range for POD (left) and SSR mitigation (right).....	15
	Figure 6 – Valve base electronics (VBE)	18
	Figure 7 – Valve electronics (VE)	19
	Figure 8 – Thyristor valve voltage in a TCSC.....	23
	Figure 9 – Typical block diagram of a real time TCSC protection- and control system simulation environment	40
	Figure 10 – Example of operating range diagram for TCSC.....	43
	Table 1 – Peak and RMS voltage relationships.....	13
	Table 2 – Typical external fault duty cycle with unsuccessful high speed auto-reclosing	45
	Table 3 – Typical duty cycle for internal fault with successful high speed auto-reclosing	45
	Table 4 – Typical duty cycle for internal fault with unsuccessful high speed auto-reclosing	46

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SERIES CAPACITORS FOR POWER SYSTEMS –**Part 4: Thyristor controlled series capacitors**

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 60143-4 has been prepared by IEC technical committee 33: Power capacitors and their applications.

This part of IEC 60143 is to be used in conjunction with the following standards:

- IEC 60143-1:2004, *Series capacitors for power systems – Part 1: General*
- IEC 60143-2:1994, *Series capacitors for power systems – Part 2: Protective equipment for series capacitor banks*
- IEC 60143-3:1998, *Series capacitors for power systems – Part 3: Internal fuses*

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

FDIS	Report on voting
33/472/FDIS	33/478/RVD

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.

A list of all parts of IEC 60143 series, under the general title *Series capacitors for power systems* can be found on the iec website.

NOTE This standard contains excerpts reproduced from IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors. Reprinted with permission from IEEE, 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997 USA, Copyright 2002 IEEE.

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.

SERIES CAPACITORS FOR POWER SYSTEMS –

Part 4: Thyristor controlled series capacitors

1 Scope

This part of IEC 60143 specifies testing of thyristor controlled series capacitor (TCSC) installations used in series with transmission lines. This standard also addresses issues that consider ratings for TCSC thyristor valve assemblies, capacitors, and reactors as well as TCSC control characteristics, protective features, cooling system and system operation.

2 Normative references

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

NOTE If there is a conflict between this part of IEC 60143 and a standard listed below in Clause 2, this standard prevails.

IEC 60050-436, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 436: Power capacitors*

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

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

IEC 60068-2-2, *Basic environmental testing procedures – Part 2-2: Tests – Tests B: Dry heat*

IEC 60068-2-78, *Basic environmental testing procedures – Part 2-78: Tests – Tests C: Damp heat, steady state*

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

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

IEC 60076-1:1993, *Power transformers – Part 1: General*

IEC 60076-6:2007, *Power transformers – Part 6: Reactors*

IEC 60143-1:2004, *Series capacitors for power systems – Part 1: General*

IEC 60143-2:1994, *Series capacitors for power systems – Part 2: Protective equipment for series capacitor banks*

IEC 60143-3:1998, *Series capacitors for power systems – Part 3: Internal fuses*

IEC 60255-5, *Electrical relays – Part 5: Insulation coordination for measuring relays and protection equipment – Requirements and tests*

IEC 60255-21 (all parts), *Electrical relays – Vibration, shock, bump and seismic tests on measuring relays and protection equipment*

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

IEC 61000-4-29, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-29: Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations on d.c. input port immunity tests*

IEC 61954:1999, *Power electronics for electrical transmission and distribution systems – Testing of thyristor valves for static VAR compensators*

NOTE Additional useful references, not explicitly referenced in the text, are listed in the Bibliography .

3 Terms, definitions and abbreviations

For the purposes of this document, the following terms, definitions and abbreviations as well as those given in IEC 60143-1, IEC 60143-2, IEC 60143-3 and some taken from IEC 60050-436 apply.

NOTE In some instances, the IEC definitions may be either too broad or too restrictive. In such a case, an additional definition or note has been included.

3.1 Abbreviations

ETT	Electrically triggered thyristors
FACTS	Flexible ac transmission systems
FSC	Fixed series compensation
LTT	Light-triggered thyristors
MC	Master control
MTBF	Mean time between failure
MTTR	Mean time to repair
POD	Power oscillation damping
RAM	Reliability, availability, and maintainability
RIV	Radio influence voltage
RTU	Remote terminal unit
SCADA	Supervisory control and data acquisition
ER	Events recorder
FR	Fault recorder
RTDS	Real time digital simulation
SSR	Sub synchronous resonance
SVC	Static var compensator
TCR	Thyristor-controlled reactor
RMS	Root mean square

3.2 Terms and definitions

3.2.1 thyristor valve

electrically 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 or capacitor of a TCSC

3.2.2

bypass current

the current flowing through the bypass switch, protective device, thyristor valve, or other devices, in parallel with the series capacitor, when the series capacitor is bypassed

3.2.3

capacitive range

TCSC operation resulting in an effective increase of the power frequency reactance of the series capacitor (See Figure 5)

3.2.4

temporary overload

short duration (typically 30 min) overload capability of the TCSC at rated frequency and ambient temperature range

3.2.5

dynamic overload

short duration (typically 10 s) overload capability of the TCSC at rated frequency and ambient temperature range. (See Figure 5 and Figure 10)

3.2.6

platform-to-ground cooling/air-handling insulator

an insulator that encloses cooling/air handling paths between platform and ground level

3.2.7

thyristor-controlled series capacitor bank

TCSC

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

3.2.8

valve electronics

VE

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

3.2.9

TCSC reactor

one or more reactors connected in series with the thyristor valve (see NOTE This figure contains material reproduced from IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors, Copyright 2002 IEEE. All rights reserved.

Figure 1, item 12)

3.2.10

thyristor valve enclosure

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

3.2.11

valve varistor

an assembly of varistor units that limit overvoltages to a given value. In the context of TCSCs, the valve varistor is typically defined by its ability to limit the voltage across a thyristor valve to a specified protective level while absorbing energy. The valve varistor is designed to withstand the temporary overvoltages and continuous operating voltage across the thyristor valve

3.2.12**valve blocking**

an operation to prevent further firing of a thyristor valve by inhibiting triggering

3.2.13**valve deblocking**

an operation to permit firing of a thyristor valve by removing valve blocking action

3.2.14**valve base electronics****VBE**

an electronic unit, at earth potential, which is the interface between the control system of the TCSC and the thyristor valves

3.2.15**voltage breakover protection****VBO**

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

3.2.16**redundant thyristor levels**

the 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

3.2.17**capacitor current** **I_C**

current through the series capacitor (see Figure 2)

3.2.18**line current** **I_L**

power frequency line current (see Figure 2)

3.2.19**rated current** **I_N**

the 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)

3.2.20**valve current** **I_V**

current through the thyristor valve (see Figure 2)

3.2.21**capacitor voltage** **U_C**

voltage across the TCSC (see Figure 2)

3.2.22**protective level** **U_{PL}**

magnitude of the maximum peak of the power frequency voltage appearing across the overvoltage protector during a power system fault

NOTE The protective level may be expressed in terms of the actual peak voltage across a segment or in terms of the per unit of the peak of the rated voltage across the capacitor.

3.2.23

rated TCSC voltage

U_N

the power frequency voltage across each phase of the TCSC that can be continuously controlled at nominal reactance (X_N), rated current (I_N), frequency, and reference ambient temperature range

3.2.24

apparent reactance

$X(\alpha)$

TCSC apparent power frequency reactance as a function of thyristor control angle (α) (see Figure 4)

3.2.25

rated frequency

f_N

frequency of the system in which the TCSC is intended to be used

3.2.26

rated capacitance

C_N

capacitance value for which the TCSC capacitor has been designed

3.2.27

physical reactance

X_C

the power frequency reactance for each phase of the TCSC bank with thyristors blocked and a capacitor internal dielectric temperature of 20 °C; $X_C = 1/(2\pi f_N \times C_N)$

3.2.28

boostfactor

k_B

the ratio of $X(\alpha)$ divided by X_C ; $k_B = X(\alpha) / X_C$

3.2.29

nominal reactance

X_N

the nominal power frequency reactance for each phase of the TCSC with rated line I_N and nominal boost factor

3.2.30

conduction interval

σ

that part of a cycle during which a thyristor valve is in the conducting state, $\sigma = 2\beta$ (see Figure 3)

3.2.31

control angle

α

the 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)

3.2.32

internal fault

an internal fault is a line fault occurring within the protected line section containing the series capacitor bank

3.2.33

external fault

an external fault is a line fault occurring outside the protected line section containing the series capacitor bank

4 Operating and rating considerations

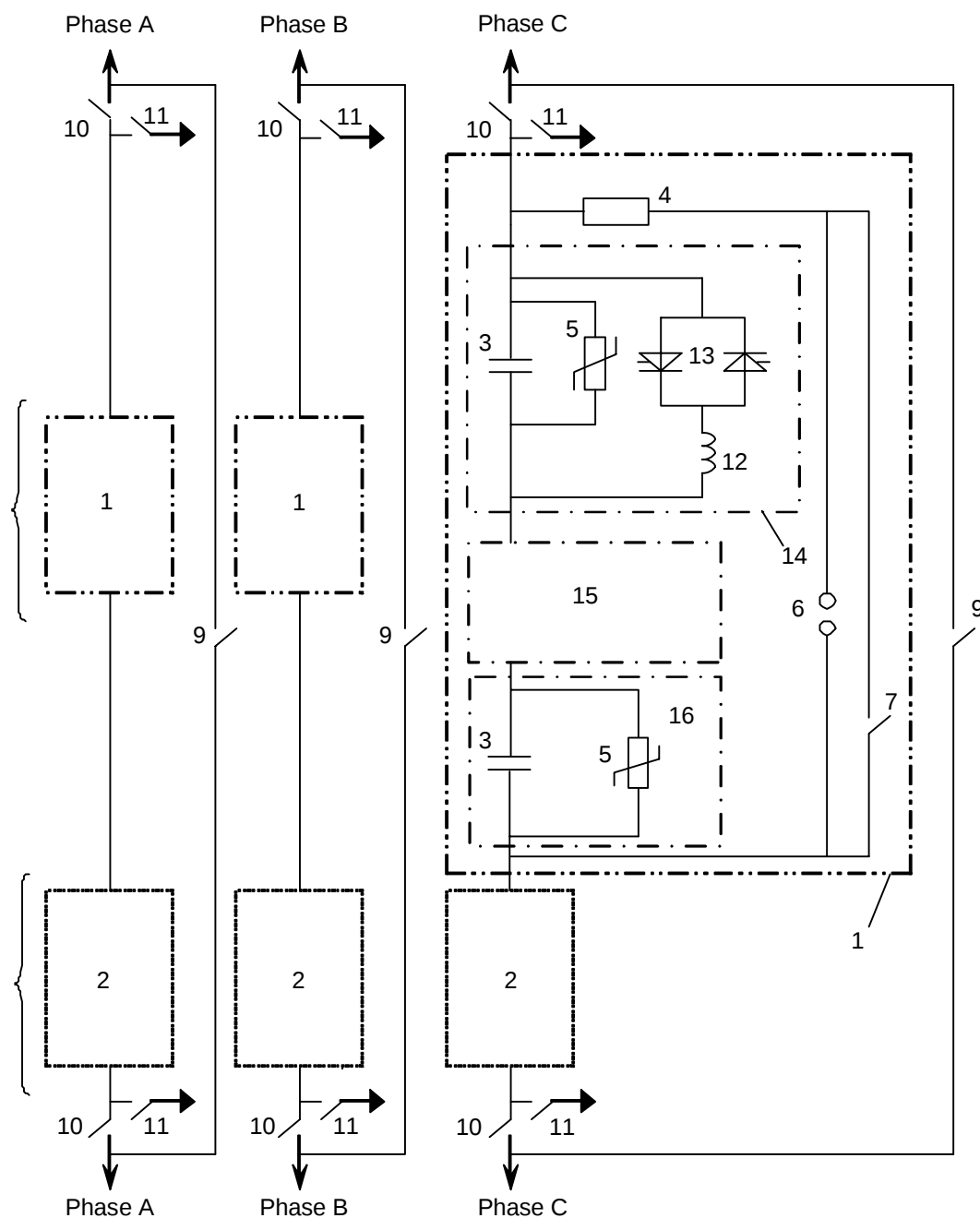
4.1 General

Transmission line series reactance can be compensated by combinations of fixed series capacitors and TCSC capacitors and TCSC banks (see NOTE This figure contains material reproduced from IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors, Copyright 2002 IEEE. All rights reserved.

Figure 1). TCSC banks use one or more controllable modules to achieve the range of performance requirements specified by the purchaser. This clause discusses requirements of TCSC operating and rating considerations.

The TCSC circuit configurations discussed in this standard (see Figure 2) consider three basic operating modes:

- BLK operation with thyristors blocked (no current through the thyristor valve)
- BP operation with continuous thyristor current
- CAP operation in capacitive boost mode.



Key

- | | |
|--|--|
| 1 Segment (-phase) | 9 External bypass disconnect switch |
| 2 Switching step or module (3-phase) | 10 External isolating disconnect switch |
| 3 Capacitor units | 11 External grounding disconnect switch |
| 4 Discharge current limiting and damping equipment | 12 TCSC reactor |
| 5 Varistor | 13 Thyristor valve |
| 6 Bypass gap | 14 Controllable subsegment (1-phase) |
| 7 Bypass switch | 15 Additional controllable subsegments when required |
| 8 Additional switching steps when required | 16 Additional FSC segment when required |

NOTE This figure contains material reproduced from IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors, Copyright 2002 IEEE. All rights reserved.

Figure 1 – Typical nomenclature of a TCSC installation

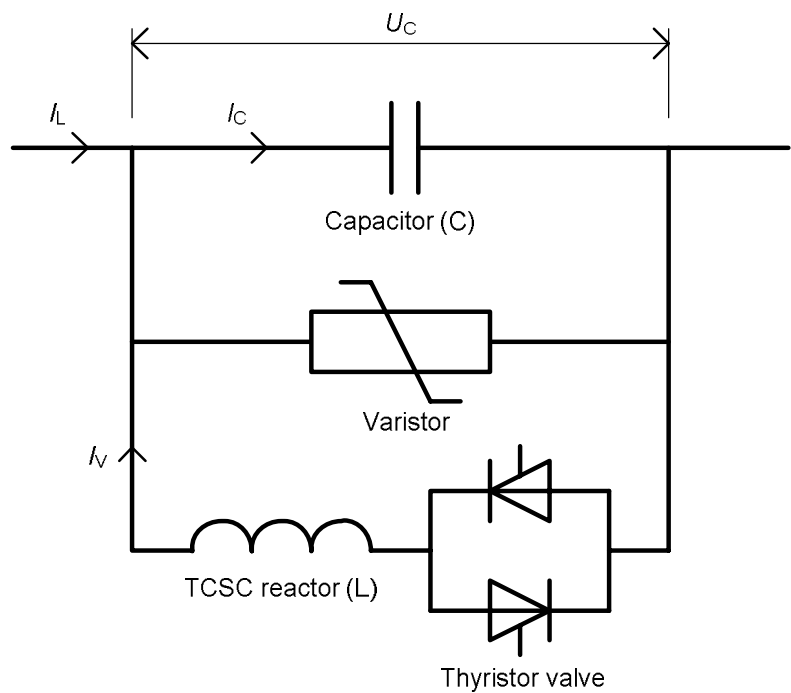


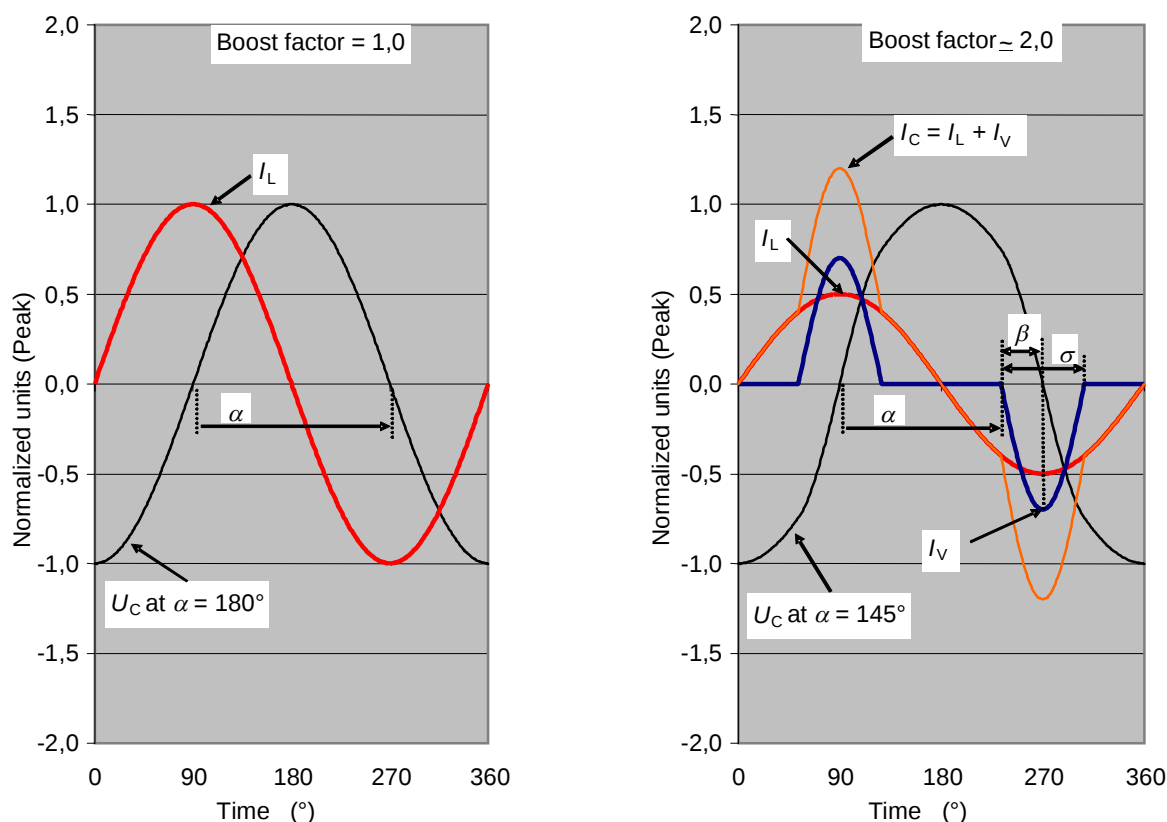
Figure 2 – TCSC subsegment

The definition of control angle (α) with reference to voltage zero crossing is selected to be consistent with other power electronic devices (see Figure 3). 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 CAP mode, the current in the thyristor valve branch can boost the voltage across the capacitor, resulting in an apparent capacitive reactance larger than the physical capacitor reactance, see Figure 4. In a TCSC application, the increased capacitive reactance would increase the line current. The current pulses through the thyristor valve, distorts the capacitor voltage (U_C). The distorted waveform 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, see Table 1.

Table 1 – Peak and RMS voltage relationships

Boost factor k_B	Normalized discharge 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



NOTE This figure contains material reproduced from IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors, Copyright 2002 IEEE. All rights reserved.

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

4.2 TCSC characteristics

NOTE This subclause contains excerpts reproduced from IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors, Copyright 2002 IEEE. All rights reserved.

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

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

where

β is half the conduction interval ($\pi - \alpha$);

α is control angle from capacitor voltage zero;

λ is the normalized discharge frequency $\frac{1}{2\pi f_N \sqrt{LC}}$;

C is the series capacitor capacitance;

L is the TCSC reactor inductance.

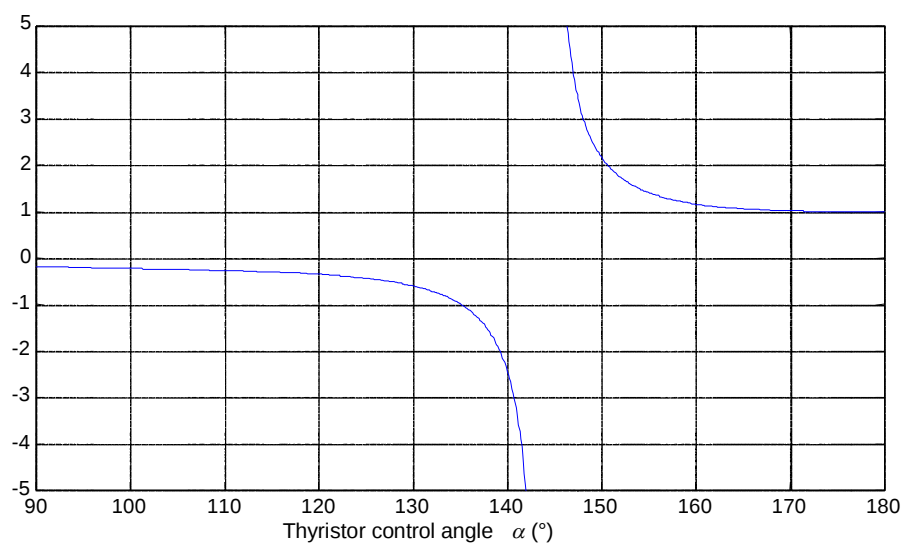


Figure 4 – TCSC power frequency steady state reactance characteristics according to Equation (1), with $\lambda = 2,5$

4.3 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 must therefore be clearly specified by the purchaser. The TCSC shall be designed to withstand operation with the different reactances 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 apparent fundamental frequency TCSC reactance or boost factor (k_B) versus the line current as indicated in Figure 5. 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 SSR-mitigation.

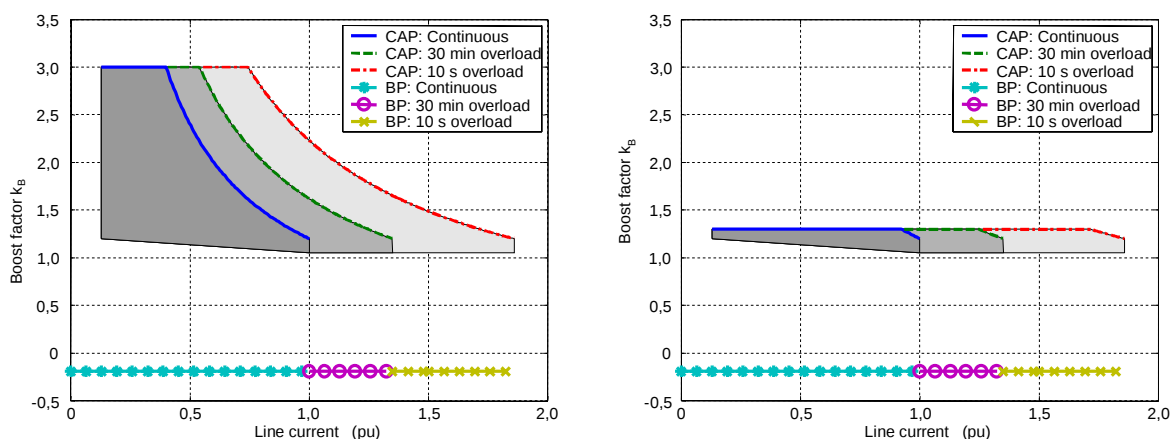


Figure 5 – Example of TCSC operating range for POD (left) and SSR mitigation (right)

The operating range does not extend all the way to zero line current 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 is not possible. 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 CAP 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, it is recommended that the TCSC be bypassed at line current levels below which operation in CAP mode cannot be maintained.

4.4 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

$$Q_{\text{TCSC}} = 3 \times k_B \times \frac{1}{\omega C} \times I_L^2$$

$$Q_{\text{CAP}} = 3 \times k_B^2 \times \frac{1}{\omega C} \times I_L^2$$

The nominal reactive power rating of the TCSC shall be defined as the reactive power output given by Q_{TCSC} in the above expressions with nominal boost and nominal line current.

4.5 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. By using BP mode during power oscillations, the damping performance of a TCSC can be increased significantly since this extends the reactance range of a TCSC to a lower inductive reactance.

A TCSC for POD applications shall fulfil the following fundamental requirements:

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

4.6 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 the TCSC application requires that SSR concerns be addressed, it is recommended that studies be performed involving detailed models of the power system, the nearby turbine generators and the TCSC. This recommendation is heightened 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 TCSC supplier shall be actively involved in the SSR studies.

A TCSC can only provide SSR mitigation if the valves are firing on a continuous basis. The result is that for the TCSC to meet the SSR mitigation objectives its operating region must 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 can provide a sub-synchronous 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 must be reviewed, see 4.3.

4.7 Harmonics

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

In 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 operates with a higher boost factor. Therefore harmonic requirements on such TCSC installation shall be given for nominal operation i.e. rated line current and nominal boost factor.

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

4.8 Control interactions between TCSCs in parallel lines

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

- The POD controllers to use the same input signals, i.e. the sum of the power flow on the parallel circuits.
- The POD controllers to have similar dynamics.
- The reactance controllers to 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 %.

4.9 Operating range, overvoltages and duty cycles

4.9.1 Operating range

The TCSC shall be capable of withstanding the operation within the specified continuous and temporary operating ranges. The operating range is generally specified by the purchaser.

4.9.2 Transient overvoltages

The TCSC shall 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 a varistor overvoltage protector.

4.9.3 Duty cycles

The TCSC equipment shall be designed to withstand the required sequences of faults, dynamic overload, temporary overload, and continuous currents as specified by the purchaser. These sequences form the duty cycles that all of the components of the TCSC bank shall be designed to withstand. The duty cycle shall be consistent with the manner in which the surrounding power system will be operated for both internal and external line faults. The purchaser shall 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 shall be considered if specifically defined by the purchaser. Examples of typical duty cycles are found in 8.5.

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

Although the focus of this subclause is duty cycles involving power system faults, it is understood that the TCSC shall be designed to operate for other events such as insertion and reinsertion under the conditions specified by the purchaser.

5 Valve control

NOTE This clause contains material reproduced from IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors, Copyright 2002 IEEE. All rights reserved.

5.1 Triggering system

The valve base electronics (VBE) subsystem is an interface between the TCSC control system for a subsegment and the platform-mounted valve electronics (VE) subsystem, as shown in Figure 6.

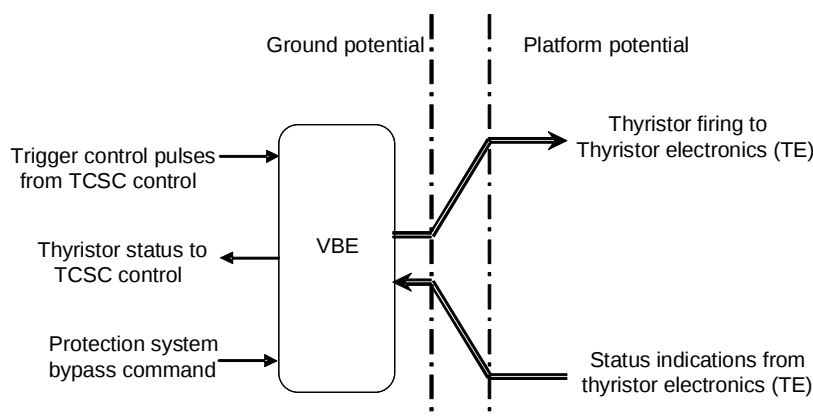


Figure 6 – Valve base electronics (VBE)

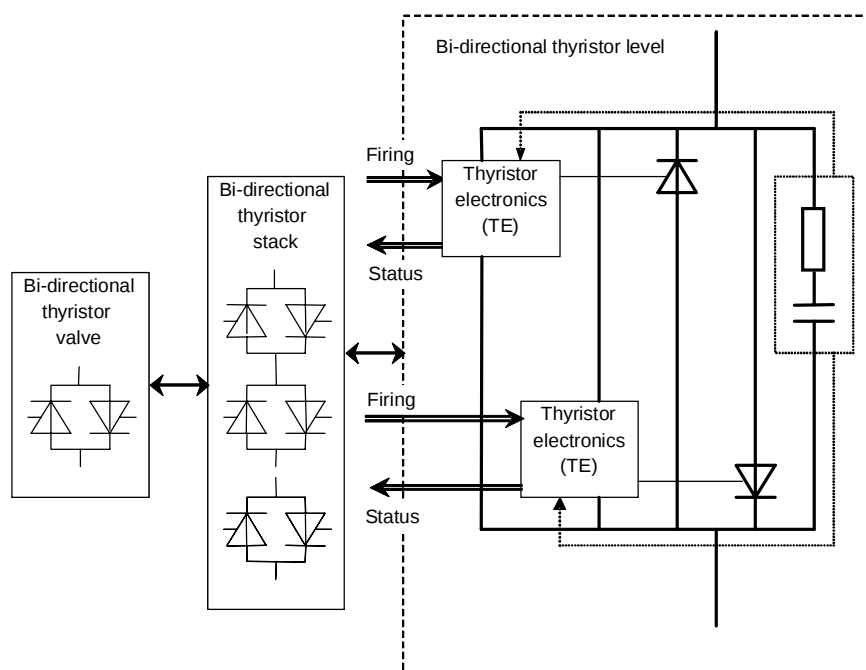


Figure 7 – Valve electronics (VE)

The TCSC control system generates trigger pulses that are transferred to the VBE. The VBE distributes firing pulses to each individual TE via fiber optics. Additionally, status information on each thyristor level is sent from the TE to the VBE which makes diagnostics of the thyristor valve condition. The diagnostics information is sent to the TCSC control system, see Figure 6.

The thyristor valve protection, resistive-capacitive snubbers, and power supply for the TE are located on the platform at the thyristor level where a gate pulse is generated for each thyristor, as shown in Figure 7.

5.2 System aspects

The following requirements apply to the valve control system independently of the type of thyristors. It shall be possible to fire the thyristors during all applicable operating conditions in order to:

- control the valve during normal operating conditions in capacitive boost mode and bypass mode;
- control the valve in order to bypass the series capacitor during system faults;
- ensure that the valve will not be blocked in a situation that would cause dangerous voltage across the valve;
- ensure that the valve will not be blocked in a situation where the thyristors have had no time to recover after previous (fault current) conduction.

5.3 Normal operating conditions

It shall be possible to control the valve in the whole operating range of interest. Valve triggering at low voltage is likely to occur at low line currents, or with low boost factors in capacitive boost mode, see also 4.3 and 5.5.

5.4 Valve firing during system faults

Thyristor valve firing at the capacitor protective level may be required during system faults in order to avoid overloading of the varistor. In this case, a thyristor valve firing results in a total valve current that is the sum of the capacitor discharge current and the fault current through the TCSC. Blocking of the valve during these conditions would lead to thyristor overvoltage. Therefore, the valve should remain conducting. It should be noted that the thyristor valve shall always be designed to handle the fault current independently of fault-handling strategy because a system fault can occur when the thyristor valve is conducting.

In situations with system faults and high current derivatives in the thyristor valve current, it is essential that the thyristor firing system is fast enough to prevent high voltage from building up across the thyristors when the current passes through zero.

5.5 Actions at low line current

The TCSC cannot remain operating in capacitive boost mode when the line current becomes very low, typically in the range of one tenth of the rated line current. There are two reasons for this:

- a) The measuring system has a limited resolution and noise suppression capability. Therefore, the accuracy of the response signals becomes too low for the control system.
- b) The auxiliary power used for thyristor triggering and monitoring is often being picked up from the main circuit. When the line current becomes too low, this power supply fails and the thyristors cannot be fired.

When the line current is low, the corresponding fundamental power frequency component of the inserted capacitor voltage is also low. In this condition, the power flow in the line depends very little on whether or not the series capacitor is inserted or bypassed. However, from a subsynchronous resonance (SSR) point of view, it could be important that the operating mode of the TCSC is well defined, see 4.3.

Normal operation should automatically be started when the low line current condition disappears.

From the equipment protection standpoint, low line current appears to be harmless. When auxiliary firing power is being picked up from the main circuit, it is important that the system is sufficiently fast acting so that the thyristors can be fired in order to prevent an overvoltage in case a sudden voltage rise would occur across the capacitor.

5.6 Monitoring

The valve control system shall have monitoring systems that allow indication of the number of faulty thyristor positions per phase. These indications shall be available at the operator control system (HMI).

6 Ratings

The ratings of the different components, forming part of the TCSC, are derived from the operating requirements as outlined in Clause 4.

6.1 Capacitor rating

Capacitors for the TCSC shall be designed, manufactured, and tested in accordance with applicable requirements of IEC 60143-1. Consideration to operation in capacitive boost mode shall be taken when specifying the rated current and voltage of the capacitor. It shall be noted that the rated current of a TCSC capacitor normally is higher than the rated through current of the TCSC. The actual capacitor current waveforms related to operation in capacitive boost mode shall be included in the equipment specification to the capacitor manufacturer. The

rated voltage of the capacitor shall be taken as the total RMS voltage of the power frequency and harmonic voltage components. The rated current of the capacitor shall be based on the square root sum of the corresponding current components.

6.2 Reactor rating

The TCSC reactors shall be designed, manufactured, and tested in accordance with applicable requirements of 60076-6, Clause 9. The actual reactor current waveforms related to operation in capacitive boost mode shall be included in the equipment specification to the reactor manufacturer. The rated current of the reactor shall be based on the square root sum-of-squares (r.s.s) of the power frequency and the harmonic current components. The insulation level between the reactor terminals shall be based on the protective level of the TCSC bank as outlined in IEC 60143-1.

6.3 Thyristor valve rating

NOTE This subclause contains material reproduced from IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors, Copyright 2002 IEEE. All rights reserved.

The required current and voltage capabilities of the thyristor valve shall be derived from the operating range and duty cycles specified by the purchaser. In the design procedure it is assumed that the line current during non fault conditions remains sinusoidal (undistorted) at the rated power frequency.

6.3.1 Current capability

The current capability requirements shall be considered both for operation in capacitive boost mode and operation in bypass mode. The thyristor junction temperature shall be within acceptable limits for all specified loading and fault duty cycles agreed upon between the purchaser and the supplier.

6.3.1.1 Current capability at internal faults

An internal fault is a line fault occurring within the protected line section containing the series capacitor bank. The thyristor valve shall be designed to carry the fault current passing through the valve for line fault cases specified. Consideration shall be taken to the case that the thyristor valve is initially blocked when the fault occurs and then triggered during the fault resulting in a thyristor current consisting of both a line fault current component and a capacitor discharge current component. If separate reactors are used for the thyristor valve branch and for the bypass circuit breaker branch, means to prevent or to grant sufficient damping of “trapped current” shall be provided. The thyristor valve stresses depends on the design principle.

- a) **The thyristor valve is used to bypass the capacitor at line faults.** In this case, the thyristor valve shall be designed to carry the current until the parallel connected bypass switch closes. It is required that the reliability of the devices that command the thyristor valve to enter and to remain in its bypass mode (i.e. to be continuously conducting during the fault is being secured. As the valve remains in a conducting state until the parallel bypass switch closes, no voltage stress is being imposed on the thyristor valve. This means that the maximum allowed surge current is determined by the maximal temperature in the thyristor junction, which shall not exceed the destructive level considering worst case overload before fault.
- b) **The fault current is commutated into a parallel bypass gap.** In this case the thyristor valve shall be designed to carry the current during a half cycle of the power frequency. In order to trigger the bypass gap, the thyristor valve must be able to block so that the capacitor voltage becomes sufficiently high for successful triggering of the bypass gap. This means that the thyristor valve surge current stress shall be kept below a level that permits reverse blocking voltage to appear across the thyristor valve following the fault current.

6.3.1.2 Current capability at external faults

An external fault is a line fault occurring outside the protected line section containing the series capacitor bank. Often such faults cause line currents to exceed the maximum line current in the operational range of the TCSC. In such cases, it may be permitted to bypass the TCSC via the thyristor valve during the fault duration. It is necessary that the TCSC can be reinserted as soon as the line current drops and enters the normal operational range. The reinsertion can take place under overcurrent conditions (temporary overload or dynamic overload), if specified. Accordingly, the current capability of the thyristor valve shall be sufficient to carry the bypass current during the fault time without causing a temperature rise in the thyristor that is prohibitive with respect to fast reinsertion of the TCSC following fault clearing. Note that the valve shall carry the capacitor discharge current appearing at initiation of the bypass operation, in addition to the fault current from the line.

6.3.2 Voltage capability

The voltage rating of the TCSC valve is derived from the capability curves as depicted in Figure 5. In these curves different thyristor valve voltages have been defined for rated (continuous) operation, for temporary overload and for dynamic overload. Normally, the continuous operation requirement dictates the “protective level” U_{PL} of the varistors that are connected in parallel with the capacitor bank. The protective level is the maximum instantaneous voltage that occurs across the varistor in any fault case. Typically, the protective level is about 2,0 to 2,5 times the peak voltage at continuous rating.

$$U_{PL} = K_1 \hat{U}_N = \sqrt{2} K_1 U_N \quad (2)$$

where

$$K_1 = 2,0 \text{ to } 2,5$$

If the requirements on temporary or dynamical overload are severe, a higher protection factor can be necessary. The varistor limits the voltage across the thyristor valve to the protective voltage level U_{PL} in the off-state.

In designing the voltage capability of the valve, it is also necessary to consider the voltage overshoot, which occurs at turn-off. Figure 8 shows the typical appearance of a thyristor voltage in a TCSC operating capacitive boost mode.

The maximum thyristor voltage depends mainly on the capacitor voltage at turn-off plus an added thyristor turn-off voltage overshoot, which depends on the current derivative at turn-off and the TCSC reactor inductance.

NOTE Independently of the required operating range, the thyristor valve must be designed to withstand at least the protective level voltage of the series capacitor. This is important when a TCSC is designed with a relatively low maximum capacitive boost factor, because then the maximum valve voltage in capacitive boost mode may be lower than the protective level of the series capacitor.

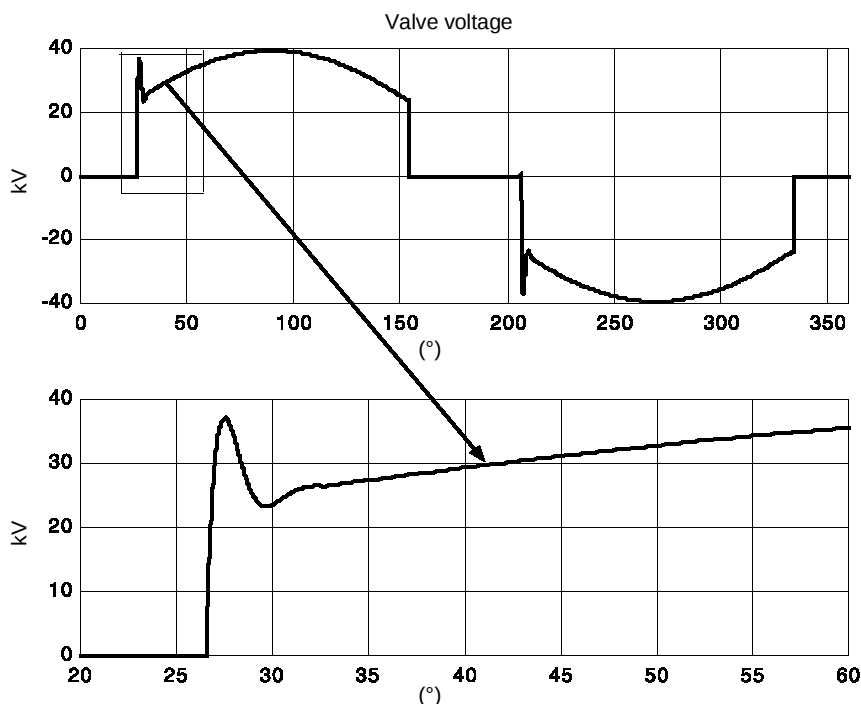


Figure 8 – Thyristor valve voltage in a TCSC

In the voltage/current capability curves in Figure 5, it has been assumed that the continuous, temporary and dynamic overload areas are limited by constant capacitor voltage curves for a range of line currents. Such limits are motivated by consideration of the voltage capability of the capacitor. The reactance varies along this limit, and it increases inversely proportional to the line current. Accordingly, the turn-off voltage and the current derivative increase when the line current decreases along the constant voltage limit. The highest thyristor valve turn-off voltage for a given capacitor voltage thus appears for the highest boost level giving this capacitor voltage. For example, operation in points A2, B2 and C2 of Figure 10 results in the highest thyristor valve turn-off voltages for continuous operation, temporary overload and dynamic overload respectively. Depending on the required operational capability curves and on the main circuit layout, the turn-off voltage can be higher or lower than the maximum protective off-state voltage defined by the varistor.

A maximum turn-off voltage, $U_{\text{max,turn-off}}$, should be determined for the thyristor valve design. This voltage is higher than the turn-off voltage in the steady-state, when the TCSC is operating at any point within the capability diagram. Measures in the control system shall prevent turn-on from occurring, resulting in turn-off voltages exceeding $U_{\text{max,turn-off}}$.

Overvoltage protection at turn-off of the valve may be arranged by different approaches. Some examples are:

- individual protective firing implemented for each thyristor;
- measuring system arranged across the whole valve, generating protective firing at overvoltage;
- measuring system supervising the thyristor branch di/dt , generating protective firing when the current derivative exceeds the design level.

6.3.2.1 Voltage rating of TCSC valve, normal operation

When the maximum thyristor valve voltages with respect to the varistor protective level and the maximum thyristor turn-off voltage have been determined, the valve can be designed. When selecting the number of devices and the voltage rating, the following factors shall be considered:

- maximum valve voltage including turn-off overshoot;
- voltage sharing between the individual thyristor levels connected in series;
- required redundancy in the number of thyristor levels connected in series.

6.3.2.2 Voltage rating of TCSC valve, fault cases

If the protection system utilizes a bypass gap, which requires a high spark-over voltage, the thyristor withstand voltage following a surge current shall be considered.

If the protection system utilizes continuous bypass, no specific voltage capability requirement for fault cases is applicable.

6.4 Varistor rating

A thyristor controlled series capacitor can be bypassed via the thyristor valve almost instantaneously when a fault current is detected, and then reinserted quickly after fault clearing. Due to the fast reinsertion after fault clearing the TCSC can be bypassed during an external fault without causing any significant negative impact on system stability.

Thyristor valve bypass during both external and internal transmission line faults is often used for TCSC. This greatly reduces the required amount of varistor energy compared to a conventional series capacitor since almost no energy injection into the varistor will take place due to system fault currents. For internal faults also the bypass switch is closed.

The TCSC manufacturer shall, via simulations demonstrate that the control and protection system is fast enough to avoid varistor energy injection due to the fault currents that the TCSC may be exposed to. If energy injection does take place during system faults, then this energy injection must be considered in the varistor rating.

Reinsertion of a series capacitor causes a d.c. offset in the capacitor voltage, which may cause energy injection into the varistor. Energy injection due to reinsertion against a swing current must be considered in the varistor rating. The maximum magnitude of the varistor current and energy injection due to reinsertion against swing currents also needs to be considered when setting the varistor overload protections in order to make sure that the TCSC can be reinserted against a swing current.

Examples of external and internal fault duty cycles for TCSC are included in 8.5.

6.5 Insulation level and creepage distance

The insulation voltages, creepage distances and air clearances for the TCSC equipment shall be selected according to the principles defined in Clause 6 of IEC 60143-1. The TCSC voltage to be used in the calculation of creepage distances shall be the maximum continuous total RMS value of the capacitor voltage including the effect of capacitive boost. If the total RMS value of the capacitor voltage during temporary overload (U_{C30}) exceeds 1,35 pu, the creepage distance shall be linearly increased with ($U_{C30}/1,35$).

7 Tests

TCSC equipment shall be subjected to the type tests specified in this standard. For a specific project, these tests shall demonstrate that the equipment to be provided can withstand the required duties. When a type test has previously been successfully performed on equipment of demonstrably similar design at stress or duty levels that are equal to or greater than that for the specific project, then the manufacturer does not have to repeat the test if a written report describing the previously performed test is provided. In this case also a separate report detailing the differences in the design and demonstrating how the referenced type test report satisfies the test objectives for the specific project shall be provided.

New type tests must be performed for a specific project only if the equipment design is new or if a critical manufacturing process is new, or if it is to be applied at a higher stress or duty than previously tested designs, or if specifically contracted by the purchaser. The need for new type tests is assessed on an individual equipment type test basis.

Data obtained during stage fault tests involving a complete TCSC may be used to demonstrate the sufficiency of certain aspects of the design.

TCSC main circuit equipment for which tests are not specified in this standard shall be tested according to IEC 60143-2.

7.1 Test of the capacitor

The routine, type and special tests of the capacitors should be carried out in accordance with relevant parts of the series capacitor standard IEC 60143-1 and IEC 60143-3 taking into account the rated current and voltage determined as mentioned in 6.1 above.

The following tests shall be performed.

7.1.1 Routine tests

The following routine tests shall be carried out:

- a) Capacitance measurement (5.3 of IEC 60143-1)
- b) Capacitor loss measurement (5.4 of IEC 60143-1)
- c) Voltage test between terminals (5.5 of IEC 60143-1)
- d) AC voltage test between terminals and container (5.6 of IEC 60143-1)
- e) Test on internal discharge device (5.7 of IEC 60143-1)
- f) Sealing test (5.8 of IEC 60143-1)
- g) Discharge test of internal fuses (3.1.2 of IEC 60143-3)

NOTE A discharge test should be performed also for fuseless capacitors in order to verify internal connections.

The test sequence is not necessarily that indicated above. The routine test shall be carried out by the manufacturer on every capacitor unit before delivery.

7.1.2 Type tests

The following routine tests shall be carried out:

- a) Thermal stability test (5.9 of IEC 60143-1)
- b) AC voltage test between terminals and container (5.10 of IEC 60143-1)
- c) Lightning impulse test between terminals and container (5.11 of IEC 60143-1)
- d) Cold duty test (5.12 of IEC 60143-1)
- e) Discharge current test (5.13 of IEC 60143-1)
- f) Disconnecting test on internal fuses (3.2.3 of IEC 60143-3)
- g) Voltage test on internal fuse after opening the container (3.2.4 of IEC 60143-3)

The type tests are carried out in order to ensure that the capacitor unit complies with the contractual characteristics and with the operational requirements as specified in the standards.

It is not essential that all type tests are carried out on the same capacitor unit.

The above list of type tests does not indicate any test sequence.

Unless otherwise specified, every capacitor sample to which a type test will be applied shall have first withstood satisfactorily the application of all the routine tests.

7.1.3 Special test (endurance test)

The endurance test will be carried out only after a contractual agreement between the manufacturer and purchaser. This test will be carried out in accordance with 5.14 of IEC 60143-1.

7.2 Tests of the TCSC reactor

The routine, type and optional tests for the TCSC reactor should be carried out in accordance with relevant clauses of the reactor standard IEC 60076-6, Clause 9, taking into account the rated current and voltage determined as mentioned in 6.2 above.

The following tests shall be performed.

7.2.1 Routine tests

The following routine tests shall be carried out.

- a) Measurement of winding resistance (9.10.2 of IEC 60076-6 and IEC 60076-1)
- b) Measurement of inductance (9.10.5 of IEC 60076-6)
- c) Measurement of loss and quality factor (9.10.6 of IEC 60076-6)
- d) Winding overvoltage test (9.10.7 of IEC 60076-6)

7.2.2 Type tests

The following type tests shall be carried out:

- a) Measurement of inductance (9.10.5 of IEC 60076-6)
- b) Measurement of loss and quality factor (9.10.6 of IEC 60076-6)
- c) Temperature rise test (9.10.8 of IEC 60076-6)
- d) Lightning impulse test (9.10.9 of IEC 60076-6)

7.2.3 Special tests

The following special tests shall be performed when specifically requested by the purchaser:

- a) Short-circuit current test (9.10.10 of IEC 60076-6)
- b) Measurement of acoustic sound level (9.10.11 of IEC 60076-6)
- c) Separate source a.c. withstand voltage test (9.10.12 of IEC 60076-6)
- d) Discharge current test (9.10.14 of IEC 60076-6)
- e) Mechanical resonance test (9.10.16 of IEC 60076-6)
- f) Measurement of winding resistance versus harmonic frequency (7.2.3.1)

NOTE If the short-circuit current test is performed, then the discharge current test should only be carried out if the discharge current amplitude is larger than the short-circuit current amplitude.

7.2.3.1 Measurement of winding resistance versus harmonic frequency

Measurement of the winding resistance as a function of frequency shall be carried out with an approved bridge method at reduced voltage. The frequency range shall be the harmonic frequency interval specified by the customer.

7.3 Tests of thyristor valves

7.3.1 Guidelines for the performance of type tests

7.3.1.1 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 base electronics 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.

Dielectric tests shall be performed on completely assembled valves, whereas operational tests may be performed on either complete valves or an appropriate number of valve sections, as specified, to verify that the valve design meets the specified requirements. When type tests are performed on valve sections, the total number of thyristor levels subjected to such type tests shall be at least equal to the number of thyristor levels in a valve.

The same valve (or valve section) shall be used for all type tests unless otherwise specified.

7.3.1.2 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.

7.3.1.3 Test conditions for dielectric tests

The valve shall be assembled with all auxiliary components except for the valve varistor, 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 antifreezing 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 (or other valves in a MVU) 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.

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 altitudes exceeding 1 000 m. Hence if the altitude of the site (a_s) at which the equipment will be installed is $\leq 1\,000$ m, then the standard atmospheric air pressure ($b_0 = 101,3$ kPa) shall be used with no correction for altitude. If $a_s > 1\,000$ m, then the standard procedure according to IEC 60060-1 is used except that the reference atmospheric pressure b_0 is replaced by the atmospheric pressure corresponding to an altitude of 1 000 m ($b_{1\,000m}$).
 - 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 ($^{\circ}\text{C}$);
- Humidity: design minimum and maximum valve hall absolute humidity (g/m³).

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

7.3.1.4 Test conditions for operational tests

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 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 are allowed to be performed at a power frequency different from the service frequency, i.e. 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 or actual waveshape.

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.

7.3.1.5 Criteria for successful type testing

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 and stress cannot be predicated 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.

The valves or valve sections shall be checked before each test, after any preliminary calibration tests, and again after each type test to determine whether or not any thyristors or auxiliary components have failed during the test. Failed thyristors or auxiliary components found at the end of a type test shall be remedied before further testing of a valve.

One thyristor level is permitted to fail due to short-circuiting in any type test. If, following a type test, one thyristor level has become short-circuited, then the failed level shall be restored and this type test repeated. A total of two thyristor levels are permitted to fail due to short-circuiting in all type tests together. If more than two thyristor levels fail during the type testing, the complete set of valve type tests shall be repeated.

The total number of thyristor levels exhibiting faults (short-circuited levels or faults that do not result in thyristor level short circuit), which are discovered during the type test program and the subsequent check, shall not exceed the number of redundant levels.

The location of short-circuited levels and of other thyristor level faults at the end of all type tests shall not show any pattern indicative of inadequate design.

7.3.2 Routine tests

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

- a) Visual inspection (8.1 of IEC 61954)
- b) Connection check (8.2 of IEC 61954)
- c) Voltage-dividing/damping circuit check (8.3 of IEC 61954)
- d) Voltage withstand check (8.4 of IEC 61954)
- e) Check of auxiliaries (8.5 of IEC 61954)
- f) Firing check (8.6 of IEC 61954)
- g) Cooling system pressure test (8.7 of IEC 61954)

7.3.3 Type tests

7.3.3.1 Dielectric tests

All dielectric tests on a complete valve shall be carried out with redundant thyristor levels short-circuited except where otherwise indicated. Tests for the following dielectric stresses are specified:

- a.c. voltage;
- impulse voltages.

In the interest of standardization with other equipment, lightning impulse tests between valve terminals and enclosure are included. For tests between valve terminals, the only impulse test specified is a switching impulse.

7.3.3.1.1 Tests on valve structure

Tests are defined for the voltage withstand requirements between a valve (with its terminals short-circuited) and the thyristor valve enclosure. The tests shall demonstrate 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.

For these tests, each thyristor level shall be short-circuited. It may be necessary to disconnect the connection of low voltage bushing during this test.

7.3.3.1.1.1 Power frequency voltage withstand test between terminal and earth

- a) Test values and waveshapes

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

$$U_{ts} = \frac{U_{ms}}{\sqrt{2}} \times k_{s2} \times k_t$$

where

U_{ms} is the peak value of the maximum repetitive operating voltage, including extinction overshoot, across the valve support. (Typically derived from

operation with maximum dynamic overload in CAP mode or the series capacitor protective level);

U_{ts1} is the 1 min test voltage;

U_{ts2} is the 10 min test voltage;

k_{s2} is equal to 1,30 for the 1 min test;

k_{s2} is equal to 1,10 for the 10 min test;

k_t is the atmospheric correction factor;

k_t is the value according to 7.3.1.3 for the 1 min test;

k_t is equal to 1,0 for the 10 min test.

b) Test procedures

The test consists of applying the specified test voltages U_{ts1} and U_{ts2} for the specified duration between the two interconnected valve terminals and earth.

- 1) Raise the voltage from 50 % to 100 % of U_{ts1} .
- 2) Maintain U_{ts1} for 1 min.
- 3) Reduce the voltage to U_{ts2} .
- 4) Maintain U_{ts2} for 10 min, record the partial discharge level and then reduce the voltage to zero.
- 5) The peak value of the periodic partial discharge recorded during the last minute of step 4) 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.
- 6) The measurement of inception and extinction voltage shall be performed in accordance with IEC 60270.

7.3.3.1.1.2 Lightning impulse test between terminal and earth

A standard 1.2/50 μ s wave shape shall be used. The peak value of the test voltage is the standard lightning impulse withstand voltage according to 6.1.3 of IEC 60143-1.

7.3.3.1.2 Tests between valve terminals

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 du/dt capability for in-service conditions. (In most cases the specified tests are sufficient; however in some exceptional cases additional tests may be required).

7.3.3.1.2.1 Switching impulse test between terminals

a) Test values and waveshape

Wave shape: Standard 250/2500 μ s wave shape.

1) Test 1

This test is applicable for valves with a protective firing system. The test shall comprise three applications of positive polarity and three application of negative polarity switching impulse voltages of specified amplitude with the valve electronics initially energized and de-energized cases, i.e. totally 12 applications.

This test is intended to verify that the protective firing system of the valve will not operate for voltage values up to the test voltages.

The test voltage U_{tsv1} is determined as follows:

$$U_{tsv1} = k_s \times U_1$$

where

U_1 is the maximum instantaneous value of the valve terminal-to-terminal voltage that the valve shall withstand without initiating operation of the protective firing system (if provided) under service conditions. (Typically derived from operation with maximum dynamic overload in CAP mode or the series capacitor protective level);

k_s is a test safety factor ($k_s = 1,05$).

2) Test 2

The test is intended to verify the valve insulation and the proper operation of the protective firing system (if applicable to the valve design).

- Valves protected by thyristor valve varistors:

The prospective test voltage U_{tsv2} is determined as follows:

$$U_{tsv2} = k_s \times U_{apl}$$

where

U_{apl} is the arrester protective level;

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

- Valves protected by VBO:

The prospective test voltage U_{tsv2} is determined as follows:

$$U_{tsv2} = k_s \times U_{VBO}$$

where

U_{VBO} is the maximum VBO protective voltage level with redundant thyristor levels operational;

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

The upper and lower limits of the protective VBO firing threshold, with the redundant thyristor levels operational, shall be stated by the manufacturer and a check made that the observed voltage at firing lies between the two limits.

The test shall be repeated with the valve electronics initially de-energized.

NOTE In valve designs where the regular firing circuits are energized independently of the main power circuit, this additional test is not applicable.

- Valves protected by indirect overvoltage protection via measurement of valve current derivative:

The prospective test voltage U_{tsv2} is determined as follows:

$$U_{tsv2} = k_s \times U_{didt}$$

where

$U_{di/dt}$ is the maximum valve peak voltage defined by the di/dt overvoltage protection;
 k_s is a test safety factor;
 $k_s = 1,1 * k_i$
 k_i is a measurement interpretation factor
 $k_i = 1,05$.

- Valves with neither arresters, VBOs nor di/dt overvoltage protections

This test is intended to verify the valve insulation when neither arresters, VBOs nor di/dt overvoltage protections are used.

$$U_{tsv2} = k_s \times U_{cms}$$

where

U_{cms} is the switching impulse prospective voltage according to IEC 60071, or as determined by insulation coordination studies;
 k_s is a test safety factor ($k_s = 1,3$).

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

b) 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.

Special additional conditions are listed below.

1) Test 1

The valve protective firing system is operational and the test voltage below the firing level, taking into account the presence of a valve varistor if one is included in the design.

The valve shall not be fired by any control or protective system during this test.

2) Test 2

The valve protective firing system is operational and the voltage above the firing level (if applicable).

Where the VBO firing is based on measurements of voltage on individual thyristor levels, the test shall be performed with the redundant thyristor levels operational.

7.3.3.1.2.2 Power frequency voltage withstand test between terminals

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.

$$U_{tv1} = \frac{U_1}{\sqrt{2}} \times k_{s1}$$

where

U_1 is the peak value of maximum repetitive over-voltage, including extinction overshoot, across the valve terminals. (Typically derived from operation with

maximum dynamic overload in CAP mode, point C2 for the example given in Figure 10, or the series capacitor protective level);

k_{s1} is a test safety factor ($k_{s1} = 1,10$).

NOTE 1 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 a.c. 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.

$$U_{tv2} = \frac{U_2}{\sqrt{2}} \times k_{s2}$$

where

U_2 is the peak value of maximum repetitive over-voltage, including extinction overshoot, across the valve terminals for the most severe temporary overload specified. (Typically derived from point B2 for the example given in Figure 10)

k_{s2} is a test safety factor ($k_{s2} = 1,10$).

• Test procedures

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

- Raise the voltage from 50 % to 100 % U_{tv1} .
- Maintain U_{tv1} for 1 min.
- Reduce the voltage to U_{tv2} .
- Maintain U_{tv2} for 10 min, record the partial discharge level and reduce the voltage to zero.
- 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 been separately tested.
- The measurement of inception and extinction voltage shall be performed in accordance with IEC 60270.

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

7.3.3.2 Electromagnetic interference test

7.3.3.2.1 Objectives

The objective of these tests is to demonstrate the insensitivity of the valve to electromagnetic emission imposed by external events.

The tests shall demonstrate that, as a result of electromagnetic emission,

- 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.

7.3.3.2.2 Test procedures

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 energized. Those parts of the valve base electronics 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 occur.

7.3.3.3 Operational tests

The purpose of the operational tests is to verify the valve design for combined voltage and current stresses under normal and abnormal repetitive conditions as well as under transient fault conditions. They shall demonstrate that, under specified conditions:

- the valve functions properly in entire operating area as specified in valve operating pattern;
- the turn-on and turn-off voltage and current stresses are within the capabilities of the thyristors and other internal circuits;
- the cooling provided is adequate and no component is overheated;
- the over-current and over-voltage withstand capability of the valve is adequate.

7.3.3.3.1 Periodic firing test and extinction test

The purpose of the test is to show that the valve can withstand the combined voltage and current stresses resulting from the most severe dynamic overload specified. Therefore, the test conditions shall correspond to the specified worst-case, time-dependent boost mode, taking into account the control and protection characteristics of the scheme. In particular, it shall be demonstrated that the valve can block the highest voltage (including extinction overshoot) combined with the maximum thyristor junction temperature given by the load cycle.

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 10-20 μ s while, for extinction, the interval of interest is between 0,2 ms before and 1 ms after current zero.

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

- a) voltage magnitudes at turn-on and turn-off;
- b) the di/dt at turn-on and at least for 0,2 ms before current zero;
- c) the thyristor junction temperature.

The following factors shall also be considered:

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

7.3.3.3.1.1 Operation with maximum temporary capacitive boost

a) Test values

The test current and test voltage shall be based on the worst temporary overload (see point B2 in Figure 10).

The coolant temperature shall be not less than that which will give the highest temporary overload thyristor junction temperature in service at maximum ambient temperature.

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

The test duration shall be 30 min after the return coolant temperature has stabilized.

The test voltage at valve firing / extinction is

$$U_{f_max} = \frac{\lambda \times X_0 \times i_L}{\lambda^2 - 1} \times \frac{N_t}{N_{tot} - N_{red}} \times [\sin \beta - \lambda \times \cos \beta \times \tan(\lambda \times \beta)] \times k_{s3}$$

where

λ	is the ratio of natural frequency of LC branch and network frequency;
X_0	is the impedance of LC branch;
i_L	is the line current;
N_t	is the number of series connected thyristor levels under test;
N_{tot}	is the total number of series connected thyristor levels in a complete valve, including redundant levels;
N_{red}	is the number of redundant thyristor levels in a complete valve, including redundant levels;
β	is the steady state control angle of TCSC valves;
k_{s3}	is a test safety factor;
k_{s3}	= 1,05.

b) Test procedure

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.

All the auxiliary systems which may influence the behaviour of the valve in the operating conditions specified below (e.g. forced firing) shall be in operation.

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:

- 1) establish maximum steady state conditions for current and voltage and maintain them until thermal equilibrium is reached;
- 2) raise the source current to the test value and adjust the firing angle to reach the test voltage. Maintain operation for 30 min.

7.3.3.3.1.2 Operation with maximum dynamic capacitive boost

a) Test values

The test current and test voltage shall be based on the worst dynamic overload, see point C2 in Figure 10.

The coolant temperature shall be not less than that which will give the highest dynamic overload thyristor junction temperature in service at maximum ambient temperature.

The test current shall incorporate a test safety factor of 1,05. The test voltage is calculated according to the equation in 7.3.3.3.1.1 using values corresponding to dynamic overload.

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

b) Test procedure

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.

All the auxiliary systems which may influence the behaviour of the valve in the operating conditions specified below (e.g. forced firing) shall be in operation.

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:

- 1) establish maximum temporary overload conditions for current and voltage and maintain them until thermal equilibrium is reached;
- 2) raise the source current to the test value and adjust the firing angle to reach the test voltage. Maintain operation for 1.1 times the specified dynamic overload duration.

7.3.3.3.1.3 Operation with minimum capacitive boost

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 capacitive boost.

The test current shall be based on the specified minimum continuous line current permissible with capacitive boost operation, point D1 in Figure 10.

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

The test duration shall be 10 min.

The test voltages U_{f_min} (valve steady-state voltage at firing instant) and U_{p_min} (valve steady-state power frequency peak voltage) shall be determined as follows:

$$U_{f_min} = \frac{\lambda \times X_0 \times i_{L_min}}{\lambda^2 - 1} \times \frac{N_t}{N_{tot}} \times [\sin \beta - \lambda \times \cos \beta \times \tan(\lambda \times \beta)] \times k_{s4}$$

$$U_{p_min} = \lambda \times X_0 \times \sqrt{2} \times i_{L_min} \times \frac{N_t}{N_{tot}} \times \left[1 + \frac{\lambda \times (\cos \beta \times \tan(\lambda \times \beta) - \lambda \times \sin \beta)}{\lambda^2 - 1} \right] \times k_{s4}$$

where

- i_{L_min} is the minimum line current for capacitive boost;
- β_{min} is the minimum conduction angle of TCSC valves for capacitive boost at i_{L_min}
- k_{s4} is a test safety factor;
- $k_{s4} = 0,95$.

7.3.3.3.1.4 Operation at bypass

When a TCSC valve is designed for operation with a relatively low capacitive boost factor, the valve losses in capacitive boost mode could be comparable with that in valve bypass operation mode.

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

$$I_{bypass} = \frac{1}{1 - \omega^2 \times L \times C} \times I_L \times k_{s5}$$

where

- I_L is the maximum temporary overload line current with the TCSC bypassed;
- L is the inductance of TCSC LC branch;
- C is the capacitance of TCSC LC branch;

k_{s5} is a test safety factor;
 $k_{s5} = 1,05$.

The test duration shall be 2 times the specified temporary overload duration or maximum 30 min after the return coolant temperature has stabilized.

- **Test procedure**

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 it until thermal equilibrium is reached;
- b) raise the source current to the test value. Maintain operation for the specified test duration.

7.3.3.3.2 Fault current test

The principle 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 due to a close internal transmission line fault until the parallel bypass switch is closed, commencing from maximum steady state operating temperature. No sub-sequent blocking is required.
- conducting the maximum fault current due to an external fault until the fault is interrupted by opening of the line circuit breakers within the normal fault clearing time, commencing from maximum temperature. Subsequent blocking after fault clearing is required. This is applicable only if the TCSC valve is used for bypassing during external faults.

7.3.3.3.2.1 Fault current without subsequent blocking

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 wave shape 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.

- **Test procedure**

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;
- b) apply the test current for the specified time.

7.3.3.3.2.2 Fault current with subsequent blocking

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 test current and voltage shall stress the TCSC valve / valve section at least as severe as they would meet 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 instance when the voltage is re-applied.

- **Test procedure**

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.

- Establish thyristor junction temperature (in any suitable way) corresponding to the maximum steady state condition.
- Apply the test current for the specified time.
- Apply the test voltage.

7.4 Tests of protection and control system

Testing of the TCSC protection and control system consists of routine, type and special tests. The purpose of the type tests is to verify proper design of the equipment, that it is capable of operating in specified ambient conditions and meet the specified performance and electromagnetic compatibility requirements. The functional tests shall include simulations to demonstrate proper functioning of the control and protection system for all specified operating modes. These simulations can readily be carried out with the control and protection system connected to a real time (digital) network simulator where different system conditions are simulated. The simulation of the performance of the control and protection system should demonstrate the operation of the TCSC during specified operating modes.

Coordination shall be made with IEC 60068-2-2 and IEC 60068-2-78 for environmental conditions, IEC 60255-21 for mechanical tests, IEC 60255-5 for dielectric tests, IEC 61000-4-11 and IEC 61000-4-29 for auxiliary power voltage variations and IEC 61000-4 for electromagnetic compatibility requirements unless otherwise stated.

7.4.1 Routine tests

The following tests shall be carried out as a minimum.

- Visual examination
- Dielectric withstand test (IEC 60255-5)
- 100 h burn-in test
- Operational test

The listed test shall apply to the platform located part of the equipment, to the platform to ground communication equipment and to the ground located part of the equipment.

The objective of the tests is to verify the manufacturing quality of all components and of the complete assembly.

7.4.1.1 Operational test

The procedure consists of injecting signals that simulate conditions requiring protective action into each control input. Each output is monitored during these tests. All hardware and software settings are verified. Software settings may be verified by software techniques.

If optical platform-to-ground communication is used, the output power of the transmitters shall be checked.

An optical loss test shall be performed on each fiber of the platform-to-ground communication insulators.

7.4.2 Type tests

The following type tests shall be carried out as a minimum.

- a) Environmental tests: Dry heat test and Damp heat test (IEC 60068-2-2 and IEC 60068-2-78)
- b) Dielectric test (IEC 60255-5)
- c) Electromagnetic compatibility tests (IEC 61000-4)
- d) Mechanical test (IEC 60255-21)

The listed test shall apply to the platform located part of the equipment, to the platform to ground communication equipment and to the ground located part of the equipment.

NOTE Pre-commissioning tests at site, on relay protection, control equipment and platform to earth communication equipment, are normally specified. These tests are performed before the bank is energised to the high voltage network.

7.4.3 Special tests

7.4.3.1 Real time protection- and control system test with network simulator

The real time protection- and control system test with network simulator is optional.

The use of real time (digital) network simulator is recommended for verifying correct and intended operation of protection- and control system. The test is optional depending on the availability of such a simulation system.

The protection- and control system is connected to a network simulator. All applicable signals are connected between control system and simulator. The network under simulation is designed based on data available of the real network. Protection and control functions are tested based on system requirement and specified features. Recorded network data is injected in the simulation if available and applicable. Figure 9 shows a typical block diagram of such a simulation system.

The network in the simulation can be partly replaced by recorded data of an existing network which is injected into the simulation. In such case it must be taken into account that the operation of TCSC controller is not affecting the part of the network replaced by recorded signals.

The correct dimensioning of HV equipment is verified by monitoring voltage and current values during worst case situation simulations. The verification requires detailed modelling of TCSC HV equipment in the simulation.

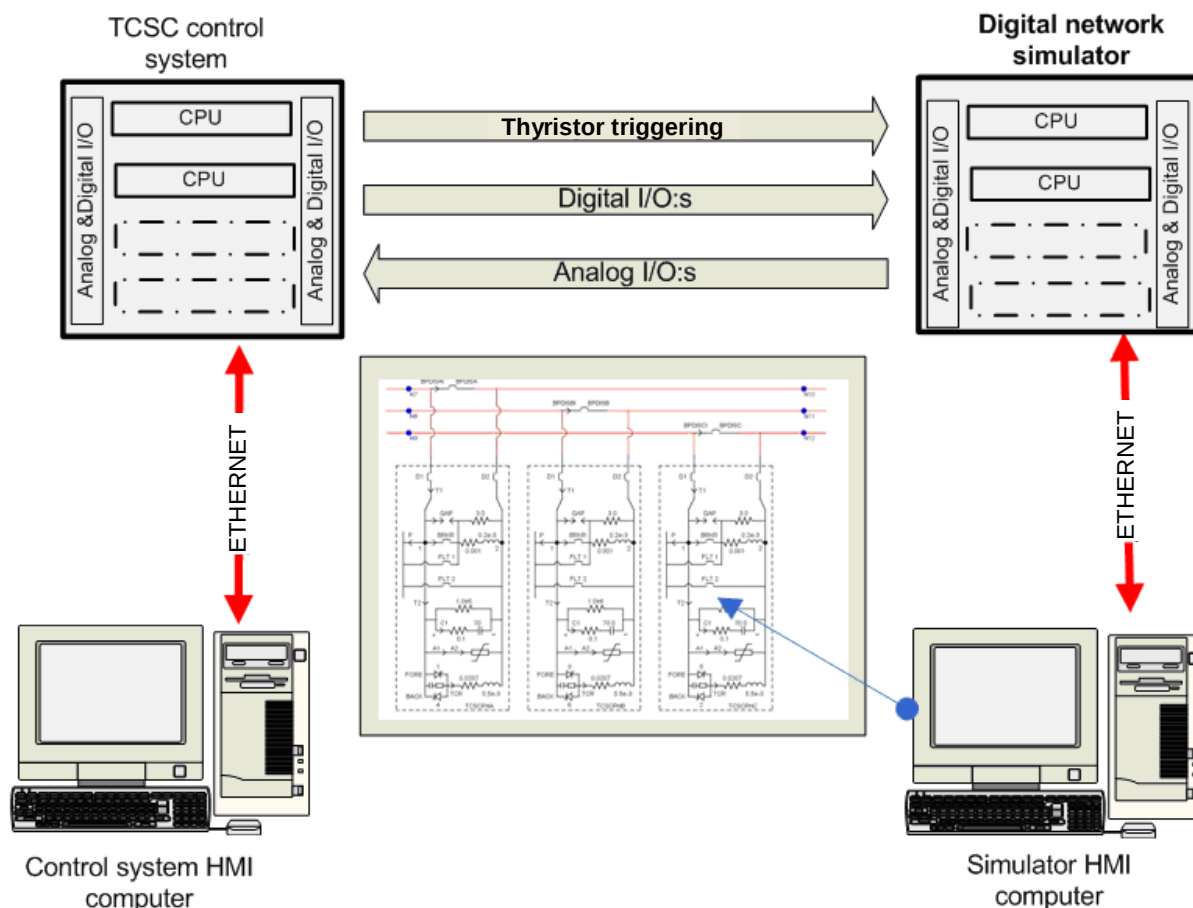


Figure 9 – Typical block diagram of a real time TCSC protection- and control system simulation environment

8 Guidance for selection of rating and operation

8.1 General

The purchaser should specify general conditions and objectives for which the TCSC installation is to be designed and operated including the following:

Project scope: The purchaser should define the scope of supply to be provided by the purchaser and supplier for the overall TCSC project.

Application studies: The purchaser should define the design documentation that shall be completed by the supplier.

Systems design: It is to the purchaser's advantage to allow the supplier to design the overall TCSC installation based on the specification requirements.

The purchaser should:

- specify the desired TCSC system performances requirements;
- provide the yard layout drawings (for existing substation) or define the maximum dimensional areas (for new substation);
- indicate whether the control building will be the responsibility of the purchaser, the supplier or others;

- d) require, from the supplier, to provide an equipment layout drawing of ground control equipment, cooling and power requirements for the control equipment;
- e) specify any internal design habits which may have an impact on the operation and maintenance of the installation: low voltage equipments, colour code used (if any), security rules, tools, IHM symbols, etc.

Supply of equipment: The scope of equipment supply should be clearly defined by the purchaser. Generally, it is to the purchaser's advantage to require the supplier to design and provide the entire system including all platform mounted equipment, controls, communication with ground level controls, thyristor cooling equipment, and bypass switch.

- **Installation**

The purchaser should:

- a) define the area limitations and location of the existing and future overhead lines, utilities, roads;
- b) indicate who will provide required permits and geotechnical studies;
- c) indicate who will provide the site preparation, grounding system, foundation, fence, platform, required yard structure, bus work and switches, control building, and TCSC equipment installed, tested, and commissioned.

- **Testing and commissioning, maintenance, training and documentation**

The purchaser should:

- 1) define the testing and commissioning requirements of the supplier;
- 2) define the required operator training, training and operating manuals, and instruction books;
- 3) require the supplier to provide a recommended maintenance schedule and contract warranty provisions.

- **List of applicable standards**

The purchaser should provide a summary list of standards for which the TCSC installation is to be designed, manufactured, and tested. Each of the listed standards should be referenced, where applicable, in the appropriate clauses of the TCSC specification.

- **Site service conditions**

The purchaser should specify the TCSC installation site service conditions at the specified current, voltage, frequency, and fault sequence ratings, including: altitude, ambient temperature, ice load, wind velocities, seismic conditions, snow depth, exposure to dust, exposure to salt (damaging fumes, or vapours), swarming insects, flocking birds, conditions requiring over insulation or extra leakage distance on insulators, continuous harmonic currents in the power system, unusual transportation or storage conditions, non-transposed lines, etc.

8.2 Thyristor controlled series capacitor

8.2.1 AC transmission system

NOTE This subclause contains excerpts reproduced from IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors, Copyright 2002 IEEE. All rights reserved.

The purchaser should specify the electrical characteristics of the transmission line being compensated and associated ac transmission system including the following:

- a) Rated line-to-line voltage:
 - 1) Continuous
 - 2) Maximum operating voltage and duration
- b) Rated frequency:
 - 1) Continuous power frequency and steady-state variations
 - 2) Transient power frequency variations and duration
- c) Electrical insulation levels (phase-to-ground):
 - 1) Basic impulse level (BIL)
 - 2) Wet switching surge withstand level
 - 3) Power frequency withstand voltage (1 min)
 - 4) Specific creepage distance and pollution level
- d) System data:

The purchaser should provide transmission line data and system information adequate for the supplier to perform specified studies and design of the TCSC equipment.

- Short circuit equivalent for rating purposes.
- Dynamic equivalent for POD studies, if applicable.
- Generator and turbine data for SSR-studies, if applicable.

8.2.2 TCSC operational objectives

NOTE This subclause contains excerpts reproduced from IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors, Copyright 2002 IEEE. All rights reserved.

The purchaser should specify any special operating conditions and system events for which the TCSC components and equipment are to be designed and operated including radio influence voltage level, corona level, and audible noise level.

The principal operational objectives that may be the motivation for a TCSC application are the following:

- a) Sub-synchronous resonance (SSR) considerations:

The TCSC supplier should be involved in the SSR studies, if the studies indicate that fixed capacitors with the desired level of compensation will result in an SSR problems.
- b) Power oscillation damping (POD) Control

The current swings of the system interacting with the modulation of the TCSC reactance by the POD create oscillating voltage across the TCSC. The voltage constraints of the TCSC override an unacceptable reactance order; therefore, it is imperative that the system studies properly account for this limitation.
- c) Transient stability
- d) Current or power control
- e) Voltage control

8.2.3 TCSC ratings

The purchaser should specify the TCSC continuous, bypass, temporary overload, and dynamic overload, and duty cycle operating requirements. It is recommended that these parameters be presented in graphical form as indicated in Figure 5 and Figure 10.

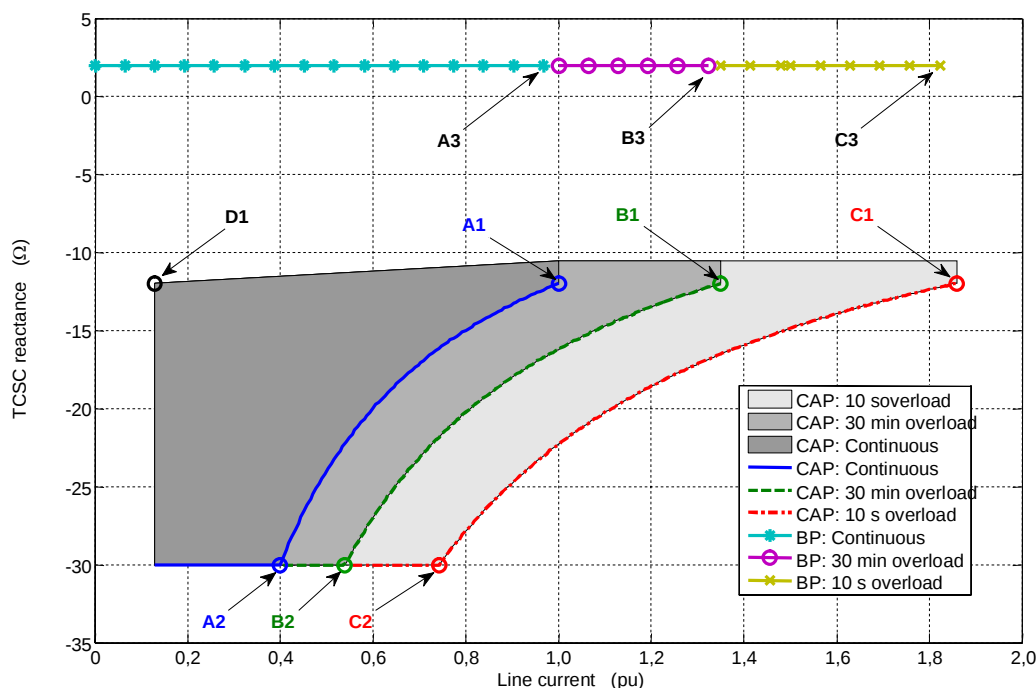


Figure 10 – Example of operating range diagram for TCSC

The following operating parameters should be defined for capacitive reactance and bypass modes of operation, as these can be very different.

- **Continuous operation in CAP mode:**
 - Maximum line current and nominal TCSC reactance (point A1)
 - Maximum reactance or boost factor together with the corresponding line current (point A2)
 - Minimum current for which the thyristor valve remains operational
- **Temporary overload operation in CAP mode (typically 30 min):**
 - Maximum line current and nominal TCSC reactance (point B1)
 - Maximum reactance or boost factor together with the corresponding line current (point B2)
 - Duration of temporary overload
- **Dynamic overload operation in CAP mode (typically 10 s):**
 - Maximum line current and nominal TCSC reactance (point C1)
 - Maximum reactance or boost factor together with the corresponding line current (point C2)
 - Duration and frequency of dynamic overload
- **Continuous operation in BP mode:**
 - Maximum line current (point A3)
- **Temporary overload operation in BP mode (typically 30 min):**
 - Maximum line current (point B3)

- Duration of temporary overload
- **Dynamic overload operation in BP mode (typically 10 s):**
 - Maximum line current (point C3)
 - Duration and frequency of dynamic overload

8.3 Thyristor valves

NOTE This subclause contains excerpts reproduced from IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors, Copyright 2002 IEEE. All rights reserved.

The thyristor valves should be designed by the supplier to meet the operating and rating requirements of the TCSC installation. Design features that the purchaser should consider when specifying the TCSC thyristor valves include the following:

- a) Maintenance
 - 1) Tools, handling, and facilities for maintenance
 - 2) Time between maintenance periods
 - 3) Time to replace an individual thyristor level
- b) Monitoring and diagnostic provisions indicating the number and position of a failed thyristor
- c) Redundancy factors
- d) Control features
- e) Cooling system electrical requirements
- f) Mechanical design features
- g) Type tests
- h) Routine tests

8.4 Capacitors and reactors

NOTE This subclause contains excerpts reproduced from IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors, Copyright 2002 IEEE. All rights reserved.

It is recommended that the purchaser refer to the applicable IEC standards for TCSC capacitor and reactor component design, manufacturing, and testing requirements to the extent possible.

General requirements that the purchaser should consider include:

- a) Capacitor and reactor components furnished by the supplier should be provided with identical interchangeable components, to simplify maintenance and stocking of spare parts.
- b) Components should be equipped with lifting eyes or have similar provisions for lifting individual units for ease of transportation, installation, and maintenance.
- c) Support insulators used for mounting TCSC capacitor and reactor components should be furnished with sufficient creepage and clearance for reliable operation and maintenance of the equipment.
- d) The current rating of the capacitors and reactors should be based on the sum of the squares of the current at the power and harmonic frequencies through the equipment.

8.4.1 Capacitor considerations

Capacitors for the TCSC shall be designed, manufactured, and tested in accordance with applicable requirements of IEC 60143-1.

8.4.2 Reactor considerations

The TCSC thyristor reactors should be designed, manufactured, and tested in accordance with applicable requirements of IEC 60143-2. General requirements that the purchaser should consider include:

- a) Air-core reactors are surrounded by a magnetic field created by the winding ampere-turns. The location of the reactor relative to metallic structures should be considered by the supplier with regard to inductive heating effects during normal operation, or coupled forces during short-circuit loading of the reactor.
- b) Acoustic noise in the human audible range of the sound spectrum can be produced as a result of vibrations in the thyristor reactor due to the presence of harmonic currents. The user, as applicable, should specify the maximum allowable acoustic noise criteria and levels.

8.5 Fault duty cycles for varistor rating

It is essential that the buyer clearly specifies the fault duty cycles for the TCSC. One way to specify the fault duty cycles is to utilize tables as shown in Table 2 through Table 4.

Table 2 – Typical external fault duty cycle with unsuccessful high speed auto-reclosing

Time ms	Power system event	Thyristor controlled series capacitor action
0,0	Fault application	-
0,0 to 100	Fault remains	The TCSC line current supervision detects high line current and bypasses the TCSC via the thyristor valve
100,0	Line circuit breakers clear the fault	
100,0 to 600,0	Power flows through the line	The TCSC is reinserted
600,0	Line circuit breakers reclose into the fault	-
600,0 to 700,0	Fault remains	The TCSC line current supervision detects high line current and bypasses the TCSC via the thyristor valve
700,0	Line circuit breakers clear the fault and lock out	
700,0 to -		The TCSC is reinserted

Table 3 – Typical duty cycle for internal fault with successful high speed auto-reclosing

Time ms	Power system event	Thyristor controlled series capacitor action
0,0	Fault application	-
0,0 to 100	Fault remains	The TCSC line current supervision detects high line current and bypasses the TCSC via the thyristor valve and the bypass switch
100,0	Line circuit breakers clear the fault	Series capacitor remains bypassed
100,0 to 600,0	The line is disconnected	
The fault disappears	The series capacitor remains bypassed	
600,0	Line circuit breakers reclose	-
600,0 to -		The series capacitor is reinserted

Table 4 – Typical duty cycle for internal fault with unsuccessful high speed auto-reclosing

Time ms	Power system event	Thyristor controlled series capacitor action
0,0	Fault application	-
0,0 to 100	Fault remains	The TCSC line current supervision detects high line current and bypasses the TCSC via the thyristor valve and the bypass switch
100,0	Line circuit breakers clear the fault	Series capacitor remains bypassed
100,0 to 600,0	The line is disconnected	The series capacitor remains bypassed
600,0	Line circuit breakers reclose into the fault	-
600,0 to 700,0	Fault remains	Series capacitor reinsertion is inhibited by the series capacitor line current supervision
700,0	Line circuit breakers clear the fault and lock out	

8.6 Valve cooling system

NOTE This subclause contains excerpts reproduced from IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors, Copyright 2002 IEEE. All rights reserved.

The purpose of the thyristor-valve cooling system is to remove the heat produced by the thyristor valve. The cooling system should be completely furnished with all necessary interconnecting piping, ductwork, circulating pumps, make-up reservoirs, heat exchangers, filters, instrumentation, automatic controls, alarms, control power systems, and other necessary equipment. For normal TCSC applications, only liquid cooling is applicable.

The heat transfer from the closed liquid system to the ambient should take place in a water-to-air or water-to-water heat exchanger. Some important requirements for the cooling system are as follows:

- Redundant pumps: one pump is normally operating and a redundant pump is standing by. The cooling system should be designed to permit work on the defective pump unit without shutting down the TCSC.
- Purification system: The purification system should be designed to maintain the resistivity of the water above the required level. Highly purified water is required for the thyristor valve cooling because of the potential difference between ground and valve potential.
- Protection against freezing: If a low ambient outdoor temperature is specified, the water can be mixed with glycol or other chemical agents in order to avoid freezing of the coolant.
- Replacement: Filters and deionizer material should be designed to allow replacements in a relatively short time without shutdown of the cooling unit.
- TCSC isolation: Deionized water is used for thyristor valve cooling due to the potential difference between ground and valve position

8.7 TCSC control and protection

NOTE This subclause contains excerpts reproduced from IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors, Copyright 2002 IEEE. All rights reserved.

The purchaser should specify the TCSC control and protection requirements.

8.7.1 Control

The TCSC control systems should be specified to meet specific control objectives for which the controller needs to respond. The TCSC control system objectives specified by the purchaser should include:

- a) Required control modes
- b) Manual mode for site testing and maintenance
- c) Emergency shut down by operator (local and remote)
- d) Voltage, current, reactance, and reactive power measurements
- e) Synchronization for appropriate generation of firing pulses to the thyristor valves
- f) Startup and shutdown sequencing
- g) Monitoring
- h) Control self-supervision
- i) Capacitor bank protection

8.7.1.1 Control functions

Various hierarchy control levels and strategies are typically required to meet specified performance control functions. Control strategies and settings can vary with ac network configuration and are specific to the project objectives. The effectiveness of any particular TCSC control function should be validated by appropriate studies, simulation, and testing. Typical control functions for TCSC applications include reactance control, current (power) flow control, SSR mitigation, power oscillation damping control, voltage control, and open-loop control.

8.7.1.2 Control structure

More than one TCSC controllable sub-segment can be specified by the purchaser or provided by the supplier depending on the project objectives. To facilitate coordination between controllable sub-segments and to ensure appropriate net reactance, the TCSC control system is typically structured in several levels that can be defined as master control (MC) (high level), sub-segment control (low level), valve base electronics (VBE), and valve electronics (VE).

- **Master control**

The main features are:

- a) Control mode selection: The two most common are reactance control and current (power) control with other control functions available selectively (to the operator).
- b) Set point and transmission order: A reference can be set based on the control mode selected (In the case of power flow control, the regulator will sense the actual flow and adjust the reactance to meet the set point).
- c) Current and voltage signals: Line current and voltage from all sub-segments are measured and sent through a fiber optic interface to the control. It is recommended that all instrumentation, measurements, and cabling are included in the project scope for the supplier for reasons of compatibility with the controls to be supplied.
- d) Sub-segment coordination: Controllable sub-segments shall be coordinated according to their availability to meet the appropriate net reactance and to establish priorities for meeting control objectives.
- e) Set priority: Based on the availability of each sub-segment and status information received, the MC should set priorities for each controllable sub-segment.
- f) Interlocking: Interlocking may be required by the purchaser to prevent certain inadvertent operations (e.g., simultaneous operation between local and remote operation or breaker operations).

- g) Status information: Status of controllable sub-segments received from low-level control should be interfaced with the remote terminal unit (RTU), supervisory control and data acquisition (SCADA) system, and operator interface subsystem.

8.7.1.3 Operating levels

Control of the TCSC installation should be specified for operation at a local and remote (when required) level. Selection of local or remote operation should be selectable by a hardware switch or via the operator interface.

8.7.1.4 Start up procedure

Start up and shutdown procedures are required to ensure safe insertion of TCSC equipment into the transmission system. A typical start up procedure consists of the following steps:

- a) Confirmation of no protection alarms
- b) Open external grounding and close external isolating disconnect switches.
- c) Report from line current supervision (minimal current, platform power active, etc.)
- d) Open external bypass disconnect switch
- e) Selection of control mode (default standby mode or blocking)
- f) Selection of reference
- g) Execute start command that will open the capacitor bank bypass switch for insertion, followed by control enabled.

8.7.1.5 Operator interface

The purchaser should specify the operator interface required to operate the TCSC controller locally as well as the interface with SCADA and RTU subsystems. This would include such features as requirements for a HMI, mosaic panel, or additions to an existing substation's controls. It is recommended that the operator interface should have the following minimum characteristics:

a) Selection and execution:

- Emergency shutdown
- Control mode
- Operating mode
- Set point or reference
- Open/close breakers and disconnect switches

To prevent misoperation, it is recommended that the selection and execution process should involve a two-step operation where confirmation of the selected function shall be received and confirmed before its execution is allowed.

b) Display of information:

- System parameters (control settings and thresholds)
- Set point or transmission order
- Confirmation of selected control mode
- System information (current unbalance ratio, energy, varistor temperature, cooling, etc.)
- Status of the TCSC (position of switching devices, thyristor conduction, trend after overload, time to resume normal operation, etc.)

c) Change of system parameters:

Change of some settings, thresholds, and system conditions (e.g. varistor temperature) should be made possible through this interface and permitted only by qualified personnel.

d) Reset:

The purchaser can choose to have the possibility to reset the control system from the operator interface, in addition to a reset button on the control panel.

e) Diagnostics:

In addition to supervising permanently the status of the TCSC bank, it should be continuously self-monitored. The messages and indications resulting from these diagnoses should identify necessary maintenance work or repair. In addition to information related to the TCSC control system, it should provide status information related to:

- equipment redundancies;
- power supplies (a.c. and d.c.);
- transmission line.

8.7.2 Protection

Some TCSC protection and control functions are similar to those required for a fixed series capacitor bank installation. Protection and control functions that should be considered for a TCSC include the following:

a) Protection of TCSC equipment against overstress from system conditions:

- Capacitor overload
- Varistor overload
- Bypass gap protections
- Thyristor valve overcurrent
- Thyristor valve overvoltage
- Thyristor junction temperature (calculated)
- Thyristor reactor overload

b) Protection functions associated with TCSC equipment failure:

- Capacitor unbalance
- Flashover to platform
- Varistor failure
- Bypass switch failure
- Pole disagreement
- Thyristor failure
- Controllable subsegment failure
- Cooling system
- Bypass gap failure
- Protection and control system failure
- Current and voltage sensor failures

c) TCSC control functions:

- Bypassing
- Insertion (automatic or manual) and reinsertion

- Lockout
- Temporary block insertion
- Operation of disconnect switches

8.7.3 Monitoring and recording

a) Alarms and indications:

The purchaser should specify that sufficient alarms and indications be installed locally on the TCSC control panel. Typically, the annunciation provides the following information:

- control and protection system failure;
- power equipment failure;
- normal power system condition and operation (e.g., overload, bypass, varistor conduction).

b) Archiving:

The purchaser should specify the requirements on the sequence events recorder (SER) and the recording of analog and digital signals during disturbance events.

8.8 Precommissioning and commissioning tests

NOTE This subclause contains excerpts reproduced from IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors, Copyright 2002 IEEE. All rights reserved.

8.8.1 Introduction

Testing and commissioning TCSC installations involves a systematic test program that begins with off-site tests and involve specified design tests, production tests, and factory control system tests. The test program continues with on-site precommissioning tests of equipment, station tests, and commissioning tests.

Precommissioning tests involve on-site localized testing and checkout of individual equipment items and subsystems, after their installation to verify proper installation, adjustment, and local manual operation of an individual piece of equipment or apparatus. Testing of transducers, capacitors, reactors, resistors, disconnect switches, circuit breakers, cooling system, fiber optics, grounding switches, switchgear, motor control centers, thyristor valves, and control and protection panels should be included.

The purpose of subsystem tests is to check independently the necessary functional performance of all TCSC subsystems before starting station testing. The TCSC station testing includes tests to verify that subsystems interact and function according to specified requirements. These tests involve high-voltage energization of equipment and require coordination with system operators.

Commissioning tests includes testing the TCSC installation with transmission system power flows up to the rating of the installation. Various transmission system configurations and power flow levels should be configured to test the TCSC installation operational parameters to confirm that specified performance can be achieved. Commissioning tests can involve a period of trial operation followed by acceptance tests and can include staged fault testing.

Testing and commissioning TCSC installations requires planning of test sequences, procedures, and load schedules. Testing and commissioning responsibilities of the purchaser and supplier should be defined in the specification as well as any on-site testing restrictions due to system operational constraints, transmission line outage periods, or other limitations.

Documentation of commissioning test results should include a report describing each test series together with all relevant test data (sequence of event recorder printouts, transient fault recorder recordings, etc.).

8.8.2 Precommissioning tests

Precommissioning tests should be performed on site to validate that individual equipment items have been properly installed and are functionally operating prior to commissioning tests. Precommissioning tests do not require high-voltage energization, but could require station service power (ac and dc).

Precommissioning objectives typically include tests to verify:

- a) Equipment is installed in accordance with manufacturers instruction books and station design drawings
- b) Wiring, fiber optics, and grounding connections
- c) Capacitance, reactance, and resistance parameters
- d) Turns ratio and signal polarities
- e) Timing checks on circuit breakers and switches
- f) Contact resistance of disconnects and circuit breakers
- g) AC and dc station service power equipment
- h) Cooling system
- i) Control, protection, and monitoring equipment
- j) Communication interface
- k) Remote telecommunications interface and operator interface

8.8.3 Station tests

The TCSC station testing consists of local station tests utilizing many or all of the different subsystems together. Station tests are confined to the local station and do not require scheduling of power transfers on the transmission line, except for station service power needs. Switching and initiation of local sequences shall be from the local and master operator controls. Testing should begin without ac system high voltage connected to the TCSC installation with local operational and emergency trip sequences being tested prior to applying ac system high voltage. These tests give system operators an opportunity to become familiar with switching procedures and operator interfaces before actual equipment energization. When energization tests are performed, the external grounding disconnect switches are opened and the external isolating disconnect switches can be closed.

8.8.4 Commissioning (field) tests

a) Transmission testing:

Transmission tests include testing all performance requirements under normal operating conditions and, as conditions permit, under contingency operating conditions. All specified TCSC installation control modes should be tested. Transmission tests may include:

- Start, insertion, and bypass sequences
- Steady-state operation at minimum line current
- Block and bypass sequences
- Bypass operation
- Reactance range at rated voltage and current
- Temporary and dynamic overload voltage and current
- Power oscillation damping (if specified)

- SSR mitigation (if specified)

b) Trial operation:

Trial operation provides an opportunity for sustained operation of the TCSC installation together with the connected ac system for an extended period of time that should start prior to any warranted operating periods. The purchaser should specify the trial operation period (10-30 days). Trial operation affords the purchaser a first indication of the TCSC installation's availability under real operating conditions. Trial operation should verify that the TCSC installation is capable of reliable operation with the connected ac system for an extended period of time without misoperation. During trial operation, the TCSC installation should be operated under expected operating conditions (e.g. operated by trained purchaser operators and dispatchers without supplier assistance).

During trial operation, the TCSC installation should demonstrate its capability to perform as specified during any disturbances in the ac system or communication system for which the TCSC installation is designed or specified. All disturbances during trial operation should be monitored, recorded, and analyzed to determine the causes and their impact. All alarms should be investigated and proper operation verified. If possible, the TCSC installation and ac network should be operated in various steady-state configurations for extended periods of time.

c) Acceptance tests:

Acceptance tests should include testing of various performance requirements included in the TCSC installation specifications. Acceptance tests verify the overall performance of the TCSC installation and demonstrate that the design is correct and that the as-built installation meets the requirements of the specifications. As staged fault testing involves the introduction of disturbances to the transmission system, the system operator shall typically take responsibility for scheduling, structuring, and performing any such tests.

The supplier should be required to assist in structuring the test plans and have representatives on site to monitor testing procedures. The tests that are performed should be designed jointly between the system operator and the supplier in order to establish that the associated power system and TCSC installation component additions or upgrades meet the minimum specification requirements; can withstand the duty imposed by disturbances; provide a safe working environment; and do not degrade the transmission system stability or reliability. Successful completion and documentation of acceptance tests should result in customer acceptance of the TCSC installation and include the following:

- Steady-state ratings
- Temporary and dynamic overload tests
- Power oscillation damping performance (if specified)
- SSR mitigation performance (if specified)
- Staged fault tests (if specified)
- Harmonic and interference performance (if specified)
- Audible noise performance (if specified)
- Electrical losses performance report
- Cooling system performance

Bibliography

- [1] IEEE Std 824, *IEEE Standard for Series Capacitor Banks in Power Systems*
 - [2] IEEE Std 1534, *IEEE Recommended Practice for specifying Thyristor- Controlled Series Capacitors*
 - [3] IEEE Std 1031, *IEEE Guide for the functional specification of Transmission Static var Compensators*
 - [4] IEC 60068-1, *Environmental testing – Part 1: General and guidance*
 - [5] IEC 60721-1, *Classification of environmental conditions – Part 1: Environmental parameters and their severities*
 - [6] IEC/TS 61000-6-5, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-5: Generic standards – Immunity for power station and substation environments*
 - [7] IEC/TR 61000-1-1, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-1: General – Section 1: Application and interpretation of fundamental definitions and terms*
 - [8] IEC 60068-3-3, *Environmental testing – Part 3: Guidance – Seismic test methods for equipments*
 - [9] IEC 60060-2, *High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems*
 - [10] IEC 61000-4-2, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test*
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	57
1 Domaine d'application.....	59
2 Références normatives.....	59
3 Termes, définitions et abréviations	60
3.1 Abréviations	60
3.2 Définitions	61
4 Considérations relatives au fonctionnement et aux caractéristiques assignées.....	64
4.1 Généralités.....	64
4.2 Caractéristiques du CSCT.....	67
4.3 Plage de fonctionnement	68
4.4 Caractéristique assignée de la puissance réactive.....	69
4.5 Amortissement des oscillations de puissance (AOP)	69
4.6 Réduction de la SSR (résonance hyposynchrone)	69
4.7 Harmoniques	70
4.8 Interactions de contrôle entre des CSCT sur des lignes en parallèle.....	70
4.9 Plage de fonctionnement, surtensions et cycles de service.....	71
4.9.1 Plage de fonctionnement.....	71
4.9.2 Surtensions transitoires	71
4.9.3 Cycles de service.....	71
5 Commande de la valve.....	71
5.1 Système de déclenchement.....	71
5.2 Aspects du système	72
5.3 Conditions de fonctionnement normales	73
5.4 Allumage de la valve lors de défauts du réseau.....	73
5.5 Actions à faible courant de ligne	73
5.6 Surveillance	74
6 Caractéristiques assignées.....	74
6.1 Caractéristique assignée du condensateur.....	74
6.2 Caractéristique assignée de la bobine d'inductance.....	74
6.3 Caractéristique assignée de la valve à thyristors	74
6.3.1 Courant admissible.....	74
6.3.2 Tension admissible.....	75
6.4 Caractéristique assignée de la varistance.....	77
6.5 Niveau d'isolement et ligne de fuite.....	78
7 Essais	78
7.1 Essai du condensateur	78
7.1.1 Essais individuels.....	78
7.1.2 Essais de type	79
7.1.3 Essai spécial (essai d'endurance).....	79
7.2 Essais de la bobine d'inductance du CSCT	79
7.2.1 Essais individuels.....	79
7.2.2 Essais de type	80
7.2.3 Essais spéciaux	80
7.3 Essais des valves à thyristors.....	80
7.3.1 Lignes directrices relatives à la réalisation des essais de type	80
7.3.2 Essais individuels.....	82

7.3.3	Essais de type	83
7.4	Essais du système de protection et de commande.....	92
7.4.1	Essais individuels.....	92
7.4.2	Essais de type	93
7.4.3	Essais spéciaux	93
8	Lignes directrices pour la sélection des caractéristiques assignées et pour l'exploitation	94
8.1	Généralités.....	94
8.2	Condensateur série commandé par thyristors.....	96
8.2.1	Système de transmission d'énergie en courant alternatif	96
8.2.2	Objectifs opérationnels du CSCT	96
8.2.3	Caractéristiques assignées du CSCT	97
8.3	Valves à thyristors.....	98
8.4	Condensateurs et bobines d'inductance	99
8.4.1	Considérations relatives au condensateur.....	99
8.4.2	Considérations relatives à la bobine d'inductance.....	99
8.5	Cycles de service de défaut pour les caractéristiques assignées de la varistance	99
8.6	Système de refroidissement de la valve.....	101
8.7	Commande et protection du CSCT	101
8.7.1	Commande.....	101
8.7.2	Protection.....	104
8.7.3	Surveillance et enregistrement	105
8.8	Essais préalables à la mise en service et essais de mise en service.....	105
8.8.1	Introduction	105
8.8.2	Essais préalables à la mise en service	106
8.8.3	Essais de station.....	106
8.8.4	Essais (sur site) de mise en service	107
	Bibliographie.....	109
	Figure 1 – Nomenclature classique d'une installation CSCT.....	65
	Figure 2 – Sous-segment CSCT	66
	Figure 3 – Formes d'ondes du CSCT en régime stabilisé pour l'angle de contrôle α et l'intervalle de conduction σ	67
	Figure 4 – Caractéristiques de la réactance en régime stabilisé à fréquence industrielle du CSCT conformément à l'Equation 4, avec $\lambda = 2,5$	68
	Figure 5 – Exemple de plage de fonctionnement du CSCT pour le AOP (gauche) et la réduction de la SSR (droite)	68
	Figure 6 – Système de commande électronique de base des valves (VBE).....	72
	Figure 7 – Système de commande électronique des valves (VE)	72
	Figure 8 – Tension de la valve à thyristors dans un CSCT	76
	Figure 9 – Schéma fonctionnel classique de l'environnement de simulation du système de protection et de commande en temps réel du CSCT	94
	Figure 10 – Exemple de diagramme de plage de fonctionnement du CSCT.....	97
	Tableau 1 – Relations entre la tension de crête et la tension efficace	66
	Tableau 2 – Cycle de service de défaut externe classique avec échec de la refermeture automatique à grande vitesse	100

Tableau 3 – Cycle de service classique pour le défaut interne avec succès de la refermeture automatique à grande vitesse	100
Tableau 4 – Cycle de service classique pour le défaut interne avec échec de la refermeture automatique à grande vitesse	100

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CONDENSATEURS SÉRIE DESTINÉS À ÊTRE INSTALLÉS SUR DES RÉSEAUX –

Partie 4: Condensateurs série commandés par thyristors

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI 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, la CEI – 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 la CEI"). 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 la CEI, participent également aux travaux. La CEI 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 la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI 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 la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI 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 la CEI. La CEI 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 la CEI, 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 la CEI, 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 la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, 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 la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI 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 CEI 60143-4 a été établie par le comité d'études 33 de la CEI: Condensateurs de puissance et leurs applications.

La présente partie de la CEI 60143 doit être utilisée conjointement avec les normes suivantes:

- CEI 60143-1:2004, *Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux – Partie 1: Généralités*
- CEI 60143-2:1994, *Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux – Partie 2: Matériel de protection pour les batteries de condensateurs série*
- CEI 60143-3:1998, *Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux – Partie 3: Fusibles internes*

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
33/472/FDIS	33/478/RVD

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/CEI, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 60143, présentées sous le titre général *Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux* peut être consultée sur le site web de la CEI.

NOTE La présente norme contient des extraits tirés de l'IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors (disponible en anglais seulement). Ces extraits ont été réimprimés avec la permission de l'IEEE, 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997 USA, Copyright IEEE 2002.

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 la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

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

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

CONDENSATEURS SÉRIE DESTINÉS À ÊTRE INSTALLÉS SUR DES RÉSEAUX –

Partie 4: Condensateurs série commandés par thyristors

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60143 spécifie la méthode d'essai des installations de condensateurs série commandés par thyristors (CSCT) utilisés avec les lignes de transmission. Cette norme aborde également les questions liées aux caractéristiques assignées des assemblages de valve à thyristors du CSCT, des condensateurs et des bobines d'inductance ainsi que les caractéristiques de commande du CSCT, les fonctions de protection, le système de refroidissement et l'exploitation du système.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

NOTE En cas de conflit entre la présente partie de la CEI 60143 et une autre norme figurant dans l'Article 2 ci-dessous, la présente norme l'emporte.

CEI 60050-436, *Vocabulaire Electrotechnique International – Chapitre 436: Condensateurs de puissance*

CEI 60060-1, *Techniques des essais à haute tension – Partie 1: Définitions et prescriptions générales relatives aux essais*

CEI 60068-1, *Essais d'environnement – Partie 1: Généralités et guide*

CEI 60068-2-2, *Essais d'environnement – Partie 2-2: Essais – Essai B: Chaleur sèche*

CEI 60068-2-78, *Essais d'environnement, Partie 2-78: Essais – Essai C: Essai continu de chaleur humide*

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

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

CEI 60076-6:2007, *Transformateurs de puissance – Partie 6: Bobines d'inductance*

CEI 60143-1:2004, *Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux – Partie 1: Généralités*

CEI 60143-2:1994, *Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux – Partie 2: Matériel de protection pour les batteries de condensateur série*

CEI 60143-3:1998, *Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux – Partie 3: Fusibles internes*

CEI 60255-5, *Relais électriques – Partie 5: Coordination de l'isolement des relais de mesure et des dispositifs de protection – Prescriptions et essais*

CEI 60255-21, (toutes les parties): *Relais électriques – Essais de vibration, de chocs, de secousses et de tenue aux séismes applicables aux relais de mesure et aux dispositifs de protection*

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

CEI 61000-4-11, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-11: Techniques d'essai et de mesure – Essais d'immunité aux creux de tension, coupures brèves et variations de tension*

CEI 61000-4-29, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-29: Techniques d'essai et de mesure – Essais d'immunité aux creux de tension, coupures brèves et variations de tension sur les accès d'alimentation en courant continu*

CEI 61954:1999, *Electronique de puissance pour les réseaux électriques de transport et de distribution – Essais des valves à thyristor pour les compensateurs statiques d'énergie réactive*

NOTE Des références utiles supplémentaires qui ne sont pas explicitement référencées dans le texte figurent dans la Bibliographie.

3 Termes, définitions et abréviations

Pour les besoins du présent document, les termes, définitions et abréviations suivants ainsi que ceux de la CEI 60143-1, de la CEI 60143-2, de la CEI 60143-3 et certains repris de la CEI 60050-436 s'appliquent.

NOTE Dans certains cas, la définition de la CEI peut s'avérer trop large ou trop restrictive. Dans ce cas, une définition ou une note supplémentaire a été intégrée.

3.1 Abréviations

TDE	Thyristors déclenchés électriquement
FACTS	Systèmes flexibles de transport d'énergie en courant alternatif (<i>Flexible ac transmission systems</i>)
FSC	Compensation série fixe (<i>Fixed series compensation</i>)
LTT	Thyristors à déclenchement par la lumière (<i>Light-triggered thyristors</i>)
CC	Commande centrale
MTBF	Intervalle moyen entre les défaillances (<i>Mean time between failure</i>)
MTTR	Délai moyen de réparation (<i>Mean time to repair</i>)
AOP	Amortissement des oscillations de puissance
FDM	Fiabilité, disponibilité et maintenabilité
RIV	Tension d'influence radioélectrique (<i>Radio influence voltage</i>)
UTD	Unité terminale distante
SCADA	Système d'acquisition et de contrôle des données (<i>Supervisory control and data acquisition</i>)
ER	enregistreur d'événements (<i>Events recorder</i>)
FR	Enregistreur de défaillances (<i>Fault recorder</i>)
SNTR	Simulation numérique en temps réel
SSR	Résonance hyposynchrone (<i>Sub synchronous resonance</i>)
SVC	Compensateur statique d'énergie réactive (<i>Static var compensator</i>)
TCR	Bobine d'inductance commandée par thyristors (<i>Thyristor-controlled reactor</i>)
RMS	Moyenne quadratique (<i>Root mean square</i>)

3.2 Termes et définitions

3.2.1

valve à thyristors

assemblage électrique et mécanique d'échelons de thyristors doté de connexions, composants auxiliaires et structures mécaniques, qui peuvent être connectés en série à chaque phase de la bobine d'inductance ou du condensateur d'un CSCT

3.2.2

courant de shuntage

courant passant par le commutateur de shuntage, le dispositif de protection, la valve à thyristors ou d'autres dispositifs, parallèlement au condensateur série, si ce dernier a été shunté

3.2.3

plage capacitive

fonctionnement du CSCT donnant lieu à une augmentation effective de la réactance à fréquence industrielle du condensateur série (Voir Figure 5)

3.2.4

surcharge temporaire

capacité de surcharge de courte durée (en général 30 min) du CSCT, à la fréquence assignée et dans la plage de température ambiante

3.2.5

surcharge dynamique

capacité de surcharge de courte durée (en général 10 s) du CSCT, à la fréquence assignée et dans la plage de températures ambiantes (Voir Figure 5 et Figure 10)

3.2.6

isolateur d'alimentation en air de refroidissement de la plate-forme

isolateur entre la plate-forme et le sol dans lequel circule l'air de refroidissement

3.2.7

batterie de condensateur série commandé par thyristors CSCT

assemblage de valves à thyristors, de bobine(s) d'inductance du CSCT, 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

3.2.8

système de commande électronique des valves (*valve electronics*)

VE

circuits électroniques au(x) potentiel(s) des valves réalisant des fonctions de commande

3.2.9

bobine d'inductance du CSCT

une ou plusieurs bobines de réactance connectées en série avec la valve à thyristors (voir Figure 1, élément 12)

3.2.10

boîtier de valve à thyristors

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

3.2.11**varistance de valve**

assemblage d'unités de varistance permettant de limiter les surtensions à une valeur donnée. Dans le contexte des CSCT, la varistance de valve est en principe définie par son aptitude à limiter la tension sur une valve à thyristors à un niveau de protection spécifié tout en absorbant l'énergie. La varistance de valve est conçue pour tenir les surtensions temporaires et la tension de service en régime continu appliqué à la valve à thyristors

3.2.12**blocage de valve**

opération consistant à empêcher l'allumage ultérieur d'une valve à thyristors par suppression de la commande d'amorçage

3.2.13**déblocage de valve**

opération consistant à permettre l'allumage d'une valve à thyristors par suppression du blocage de valve

3.2.14**système de commande électronique de base des valves**

unité électronique, au potentiel de la terre, assurant l'interface entre le système de commande du CSCT et les valves à thyristors

3.2.15**protection de surtension par amorçage (*voltage breakover protection*)****VBO**

protection de surtension consistant à allumer les thyristors à une tension prédéterminée

3.2.16**échelons de thyristors redondants**

nombre maximal d'échelons de thyristors dans la valve à thyristors qui peuvent faire l'objet d'un court-circuit (en externe ou en interne) en service sans affecter la sécurité de fonctionnement de la valve à thyristors, comme démontré par les essais de type. Ce nombre, s'il est dépassé, nécessiterait l'arrêt de la valve à thyristors pour remplacer les thyristors défectueux ou l'acceptation de risques accrus de défaillance

3.2.17**courant du condensateur** **I_C**

courant passant par le condensateur série (voir Figure 2)

3.2.18**courant de ligne** **I_L**

courant de ligne à fréquence industrielle (voir Figure 2)

3.2.19**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)

3.2.20**courant de la valve** **I_V**

courant passant par la valve à thyristors (voir Figure 2)

3.2.21**tension du condensateur** U_C

tension aux bornes du CSCT (voir Figure 2)

3.2.22**niveau de protection** U_{PL}

amplitude de la valeur crête maximale de la tension à fréquence industrielle apparaissant aux bornes du dispositif de protection contre les surtensions pendant un défaut du réseau

NOTE Le niveau de protection peut être exprimé en fonction de la tension de crête réelle appliquée dans un segment ou en pourcentage de la valeur de crête de la tension assignée du condensateur.

3.2.23**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 (I_N) et à la fréquence assignés et dans la plage de températures ambiantes**3.2.24****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 4)**3.2.25****fréquence assignée** f_N

fréquence du système dans laquelle il est prévu d'utiliser le CSCT

3.2.26**capacité assignée** C_N

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

3.2.27**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;

$$X_C = 1/(2\pi f_N \times C_N)$$

3.2.28**facteur d'amplification** k_B quotient de $X(\alpha)$ sur X_C ; $k_B = X(\alpha) / X_C$ **3.2.29****réactance nominale** X_N réactance à fréquence industrielle pour chaque phase du CSCT avec le courant de ligne assignée I_N et le facteur d'amplification nominale

3.2.30
intervalle de conduction **σ**

partie d'un cycle au cours duquel une valve à thyristors est à l'état de conduction, $\sigma = 2\beta$ (voir Figure 3)

3.2.31
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)

3.2.32
défaut interne

défaut survenant dans la partie de ligne protégée contenant la batterie de condensateur série

3.2.33
défaut externe

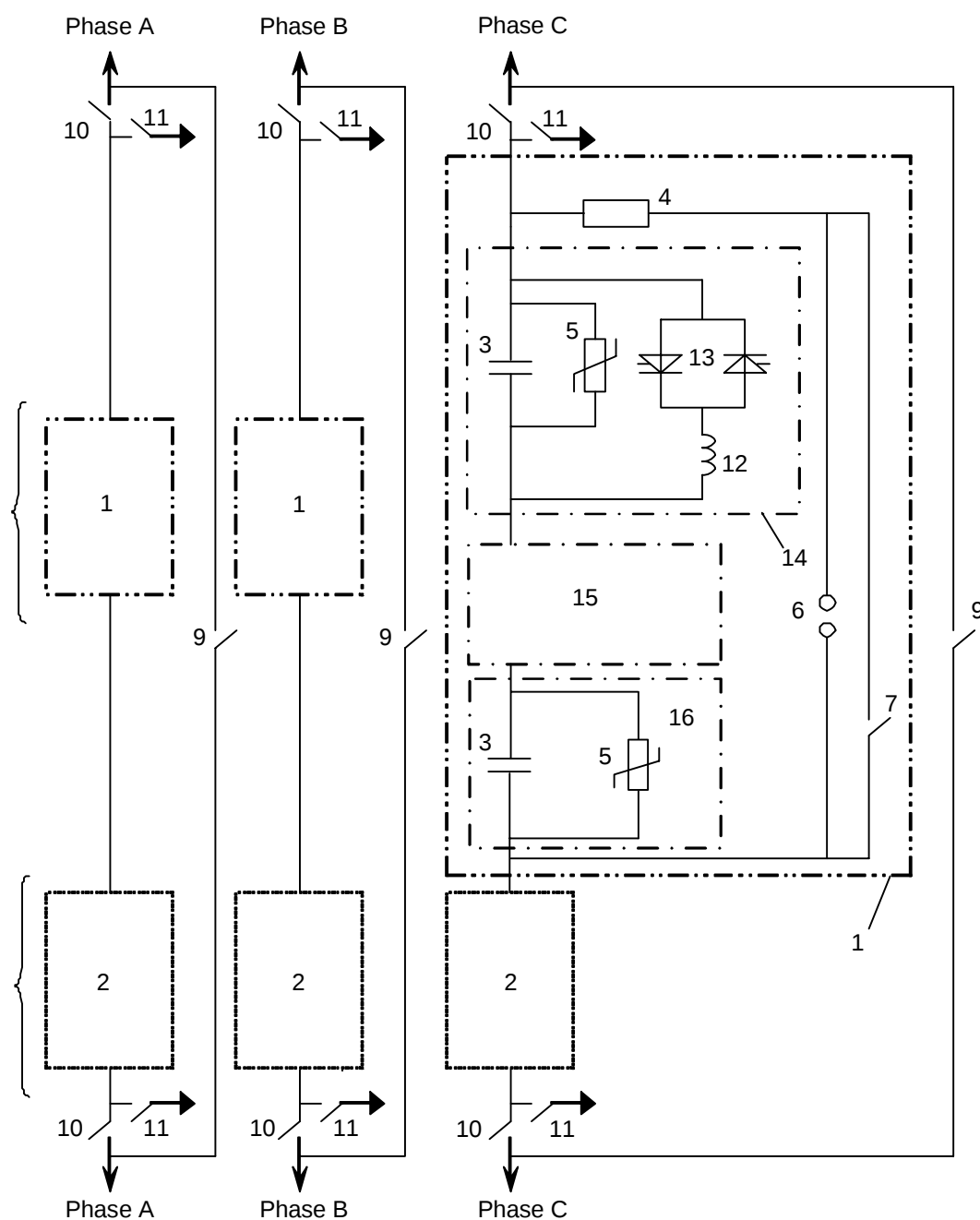
défaut survenant en dehors de la partie de ligne protégée contenant la batterie de condensateur série

4 Considérations relatives au fonctionnement et aux caractéristiques assignées**4.1 Généralités**

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). Les batteries de CSCT utilisent un ou plusieurs modules contrôlables permettant d'obtenir la plage d'exigences de performances spécifiée par l'acheteur. Cet article présente les exigences liées au fonctionnement et aux caractéristiques assignées du CSCT.

Les configurations du circuit CSCT décrites dans la présente norme (voir Figure 2) considèrent trois modes de fonctionnement élémentaires:

- fonctionnement BLK avec les thyristors bloqués (absence de courant dans la valve à thyristors)
- fonctionnement BP avec courant de thyristor permanent
- fonctionnement CAP en mode capacitif amplifié.



Légende

- | | | | |
|---|--|----|--|
| 1 | Segment (-phase) | 9 | Commutateur de shuntage externe |
| 2 | Gradin ou module (triphasé) | 10 | Sectionneur d'isolement externe |
| 3 | Condensateurs unitaires | 11 | Sectionneur de mise à la terre externe |
| 4 | Matériel d'amortissement et de limitation du courant de décharge | 12 | Bobine d'inductance du CSCT |
| 5 | Varistance | 13 | Valve à thyristors |
| 6 | Eclateur shunt | 14 | Sous-segment contrôlable (monophasé) |
| 7 | Commutateur de shuntage | 15 | Sous-segments contrôlables supplémentaires, le cas échéant |
| 8 | Gradins supplémentaires, le cas échéant | 16 | Segment FSC supplémentaire, le cas échéant |

NOTE La présente figure reproduit du contenu extrait de l'IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors (disponible en anglais seulement), Copyright IEEE 2002. Tous droits réservés.

Figure 1 – Nomenclature classique d’une installation CSCT

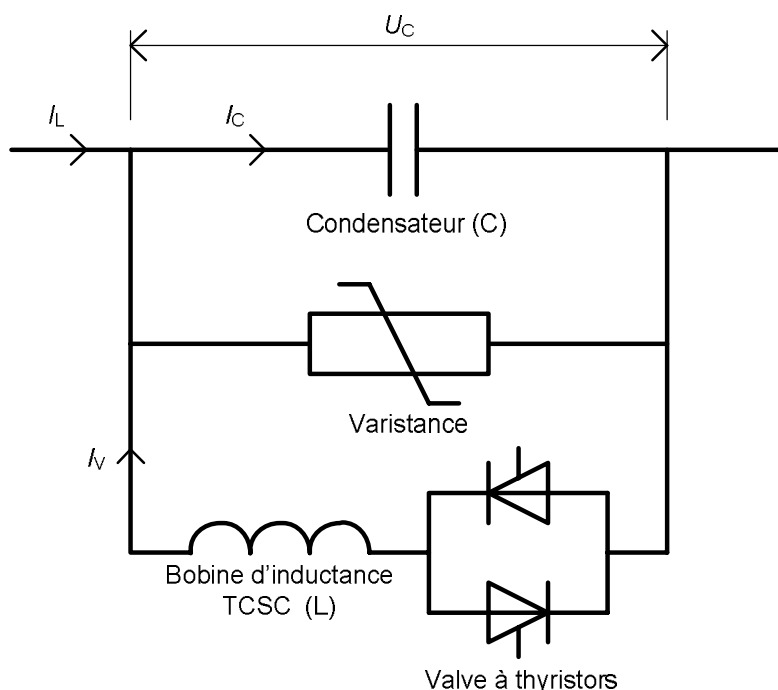


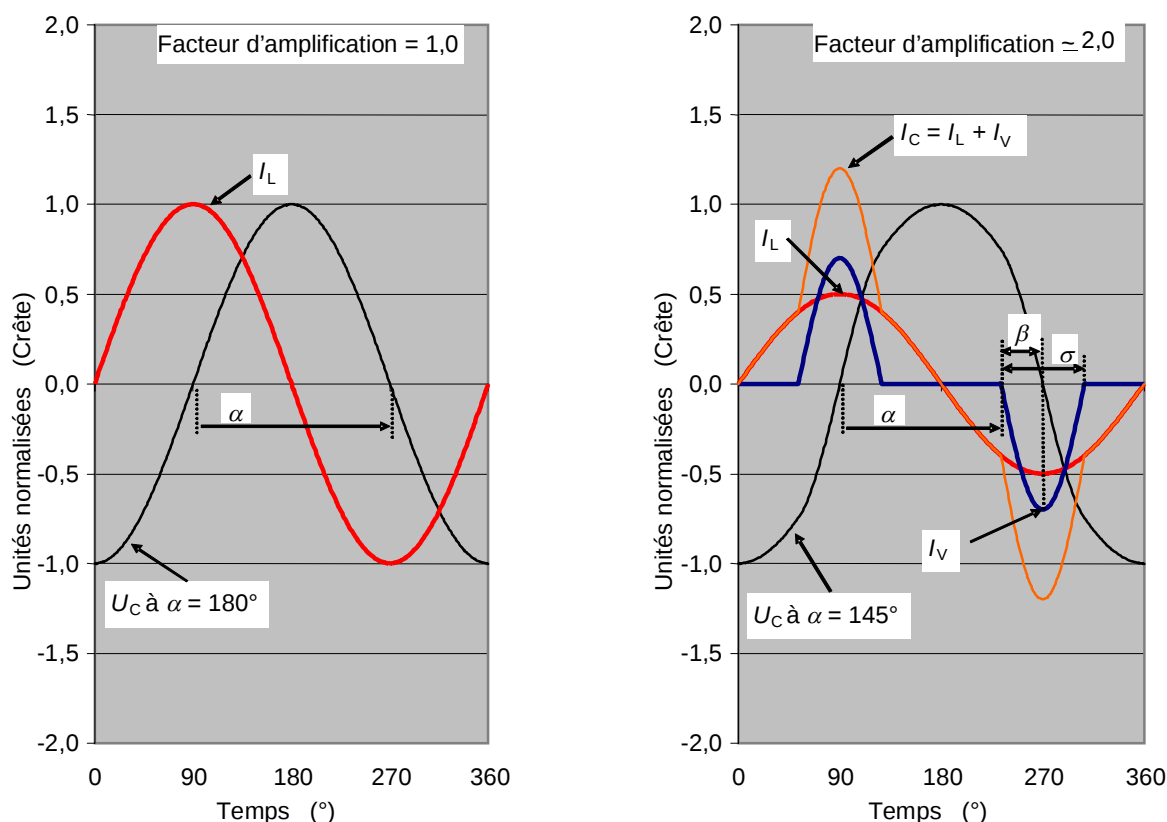
Figure 2 – Sous-segment CSCT

La définition de l'angle de contrôle (α) avec la référence au passage par zéro de la tension est choisie pour être cohérente avec les autres dispositifs d'électronique de puissance. Toutefois, il convient de noter que la plupart des systèmes de commande CSCT utilise l'onde de courant de ligne comme référence de commande importante.

Lorsqu'un CSCT fonctionne en mode CAP, le courant passant par la branche de la valve à thyristors peut augmenter la tension dans le condensateur, donnant lieu à une réactance capacitive apparente supérieure à la réactance physique du condensateur (voir Figure 4). Dans une application CSCT, la réactance capacitive supérieure augmente le courant de ligne. Le courant passant par impulsions dans la valve à thyristors modifie la tension du condensateur (U_C). L'onde déformée 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 onde sinusoïdale pure (voir Tableau 1).

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

Facteur d'amplification k_B	Fréquence de décharge normalisée 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



NOTE La présente figure reproduit du contenu extrait de l'IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors (disponible en anglais seulement), Copyright IEEE 2002. Tous droits réservés.

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

4.2 Caractéristiques du CSCT

NOTE Le présent paragraphe contient des extraits tirés de l'IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors (disponible en anglais seulement), Copyright IEEE 2002. Tous droits réservés.

Les caractéristiques du CSCT sont déterminées en fonction des paramètres de circuit du condensateur série (C) et de la bobine d'inductance (L) présentés dans la Figure 2. La réactance à fréquence industrielle stable du CSCT $X(\alpha)$, en tant que fonction de l'angle de contrôle du thyristor (α), peut être calculée à partir de l'Equation (1).

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

où

β est la moitié de l'intervalle de conduction ($\pi - \alpha$);

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

λ est la fréquence de décharge normalisée $\frac{1}{2\pi f_N \sqrt{LC}}$;

C est la capacité du condensateur série;

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

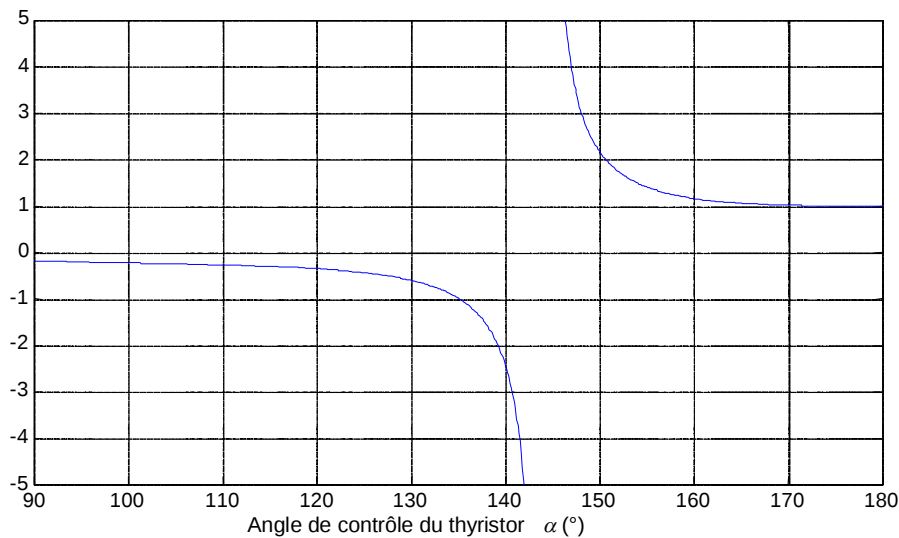


Figure 4 – Caractéristiques de la réactance en régime stabilisé à fréquence industrielle du CSCT conformément à l'Equation (1), avec $\lambda = 2,5$

4.3 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 doit, à ce titre, être clairement spécifié par l'acheteur. Le CSCT doit être conçu pour supporter le fonctionnement avec les différentes réactances et différents courants de ligne dans la plage de fonctionnement spécifiée. La plage de fonctionnement requise 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 dans la Figure 5. La plage de fonctionnement requise dépend de l'objectif du CSCT. En règle générale, un CSCT prévu pour l'amortissement des oscillations de puissance (AOP) requiert une plage de fonctionnement plus importante qu'un CSCT prévu pour une réduction de la SSR.

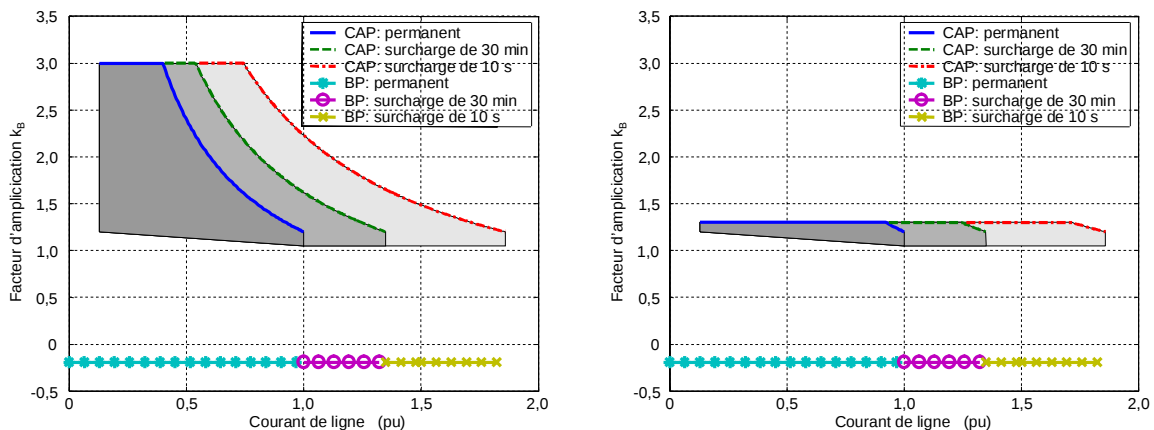


Figure 5 – Exemple de plage de fonctionnement du CSCT pour le AOP (gauche) et la réduction de la SSR (droite)

La plage de fonctionnement ne s'étend pas toujours au courant de ligne zéro, étant donné que l'allumage en régime continu d'une valve à thyristors est impossible lorsque la tension et le courant sont très bas. 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 des conditions sont impossibles. En outre, certaines valves à thyristors disposent de sources de tension pour les circuits d'allumage susceptibles d'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 CAP. Cela peut avoir des implications pour l'application et le fonctionnement du CSCT. A de faibles courants de ligne, l'impact de la compensation série est limité. Si la SSR est un problème, il est recommandé de shunter le CSCT à des niveaux de courant de ligne en dessous desquels le mode CAP ne peut pas être maintenu.

4.4 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

$$Q_{TCSC} = 3 \times k_B \times \frac{1}{\omega C} \times I_L^2$$

$$Q_{CAP} = 3 \times k_B^2 \times \frac{1}{\omega C} \times I_L^2$$

La caractéristique assignée de la puissance réactive nominale du CSCT doit être définie comme la puissance réactive donnée par Q_{CSCT} dans les expressions ci-dessus avec le facteur d'amplification nominal et le courant de ligne nominal.

4.5 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 utilisant le mode BP pendant les oscillations de puissance, il est possible d'améliorer de manière significative les performances de l'amortissement d'un CSCT. En effet, cela permet d'étendre la plage de réactance d'un CSCT d'environ 1,2 fois la réactance physique du condensateur.

Un CSCT destiné à des applications AOP doit satisfaire aux exigences fondamentales ci-dessous:

- Le contrôleur AOP doit être capable de gérer les perturbations du système donnant lieu à des oscillations de puissance passant par zéro et ne pas être sensible au sens du flux de puissance moyen.
- Le contrôleur AOP doit être capable de gérer les perturbations importantes du système. Cela signifie que la structure du contrôleur AOP doit permettre de maintenir le décalage de phase souhaité entre le signal d'entrée et le signal de sortie du CSCT, indépendamment de l'amplitude de l'oscillation de puissance.
- Le système de commande du CSCT doit être capable de gérer le passage du mode CAP au mode BP, et inversement, pendant l'amortissement des oscillations de puissance.

4.6 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.

Si l'application CSCT implique de résoudre les problèmes liés à la résonance hyposynchrone, il est recommandé de réaliser des études reposant sur des modèles détaillés du réseau, des gros turbo-alternateurs et du CSCT. Cette recommandation est d'autant plus valable que le réseau contient une association de condensateurs série fixes et de CSCT, et que 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 résonance hyposynchrone, il convient d'impliquer de manière active le fournisseur du CSCT dans les études de la SSR.

Un CSCT peut uniquement permettre de réduire la SSR si les valves s'allument de manière continue. Par conséquent, pour que le CSCT réponde aux objectifs de réduction de la SSR, sa zone de fonctionnement doit être 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, dans la mesure du possible, du facteur d'amplification.

Dans une application dont la réduction de la SSR est critique, le fonctionnement du CSCT lorsque le courant de ligne est faible doit être examiné (voir 4.3).

4.7 Harmoniques

Un CSCT fonctionnant en mode CAP 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, les exigences en matière d'harmoniques sur ce type d'installation de CSCT doivent être précisées dans le cadre d'un fonctionnement nominal, c'est-à-dire le courant de ligne assigné et le facteur d'amplification nominal.

Les exigences en matière d'harmoniques d'un CSCT doivent être précisées en termes de déformation de tension admise maximale générée par le CSCT au niveau des jeux de barres connectant les segments de lignes compensés en série. Les études d'harmonique d'une installation de CSCT requièrent 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.

4.8 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:

- Les contrôleurs AOP doivent utiliser les mêmes signaux d'entrée, c'est-à-dire la somme des flux de puissance sur les circuits parallèles.
- Les contrôleurs AOP doivent disposer de dynamiques analogues.
- Les contrôleurs de réactance doivent disposer de dynamiques analogues et répondre 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 %.

4.9 Plage de fonctionnement, surtensions et cycles de service

4.9.1 Plage de fonctionnement

Le CSCT doit être capable de supporter le fonctionnement dans les plages de fonctionnement en régime continu et temporaire spécifiées. En règle générale, la plage de fonctionnement est spécifiée par l'acheteur.

4.9.2 Surtensions transitoires

Le CSCT doit pouvoir 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 dispositif de protection contre les surtensions de la varistance.

4.9.3 Cycles de service

L'équipement du CSCT doit être conçu pour supporter les séquences exigées de défauts, la surcharge dynamique, la surcharge temporaire et les courants permanents, tels que spécifiés par l'acheteur. Ces séquences constituent les cycles de service que tous les composants de la batterie de CSCT doivent être capables de supporter. Le cycle de service doit être cohérent avec les modes de fonctionnement du réseau environnant pour les défauts de ligne internes et externes. L'acheteur doit définir les cycles de service pour les défauts de durées normales et étendues, et pour les défauts de différents types (triphasé et monophasé). Les défauts entre phases doivent être considérés si cela est explicitement défini par l'acheteur. Des exemples de cycles de service typiques sont donnés en 8.5.

L'acheteur doit spécifier un réseau équivalent à utiliser dans les études des défauts de ligne de transmission internes et externes pour la caractéristique assignée de l'équipement.

Bien que ce paragraphe s'intéresse principalement aux cycles de service liés aux défauts du réseau, il est sous-entendu que le CSCT doit être conçu pour fonctionner en prenant en compte d'autres événements tels que l'insertion et la réinsertion selon les conditions définies par l'acheteur.

5 Commande de la valve

NOTE Le présent article reproduit du contenu extrait de l'IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors (disponible en anglais seulement), Copyright IEEE 2002. Tous droits réservés.

5.1 Système de déclenchement

Le sous-système de commande électronique de base des valves (*Valve base electronics* – VBE) est une interface entre le système de commande du CSCT d'un sous-segment et le sous-système de commande électronique de valve (*Valve electronics* – VE) monté sur plate-forme (voir la Figure 6).

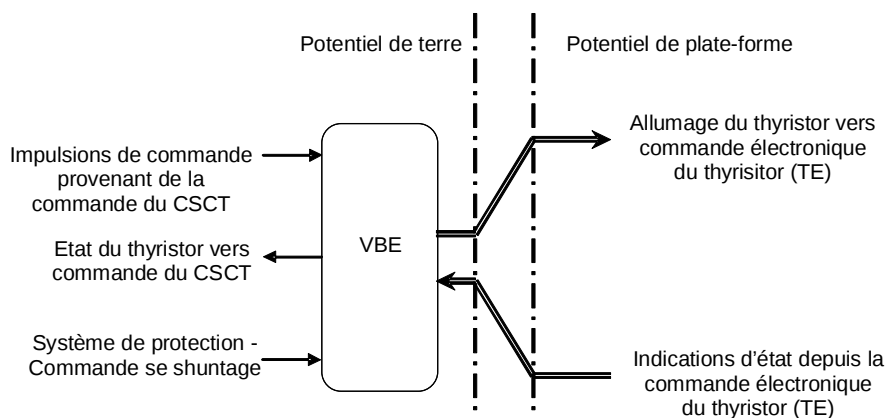


Figure 6 – Système de commande électronique de base des valves (VBE)

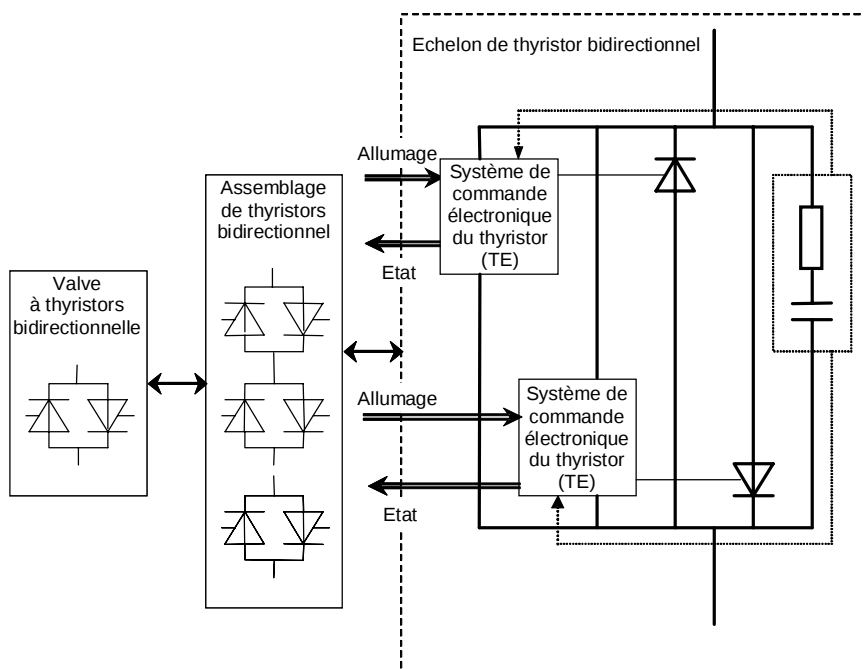


Figure 7 – Système de commande électronique des valves (VE)

Le système de commande du CSCT génère des impulsions de déclenchement qui sont transférées vers le VBE. Le VBE distribue les impulsions d'allumage vers tous les TE grâce à des fibres optiques. En outre, des informations d'état relatives à chaque niveau de thyristor sont envoyées du TE vers le VBE qui procède au diagnostic des conditions de la valve à thyristors. Les informations de diagnostic sont envoyées au système de commande du CSCT (voir Figure 6).

La protection de la valve à thyristors, les circuits de protection résistifs-capacitifs et la source de tension du TE se trouvent sur la plate-forme au niveau du thyristor, où une impulsion de gachette est générée pour chaque thyristor (voir Figure 7).

5.2 Aspects du système

Les exigences ci-dessous s'appliquent au système de commande de la valve, quel que soit le type de thyristor. Il doit être possible d'allumer les thyristors dans toutes les conditions de fonctionnement possibles, afin de:

- commander la valve dans les conditions de fonctionnement normales en mode capacitif amplifié et en mode de shuntage;
- commander la valve afin de shunter le condensateur série pendant les défauts du réseau;
- garantir que la valve ne sera pas bloquée dans une situation susceptible de générer une tension dangereuse dans la valve;
- garantir que la valve ne sera pas bloquée dans une situation dans laquelle le temps de reprise des thyristors ne serait pas suffisant après une conduction (courant de défaut) précédente.

5.3 Conditions de fonctionnement normales

Il doit être possible de commander la valve dans l'ensemble de la plage de fonctionnement considérée. Le déclenchement de la valve à basse tension est susceptible de se produire lorsque le courant de ligne est faible ou lorsque les facteurs d'amplification sont faibles en mode capacitif amplifié (voir également 4.3 et 5.5).

5.4 Allumage de la valve lors de défauts du réseau

En cas de défauts du réseau, il peut s'avérer nécessaire d'allumer la valve à thyristors au niveau de protection du condensateur afin d'éviter la surcharge de la varistance. Dans ce cas, l'allumage de la valve à thyristors peut générer un courant total de la valve égal à la somme du courant de décharge du condensateur et du courant de défaut passant par le CSCT. Le blocage de la valve dans ces conditions provoque la surtension du thyristor. Par conséquent, il convient que la valve reste à l'état conducteur. Il convient de noter que la valve à thyristors doit toujours être conçue pour gérer le courant de défaut, quelle que soit la stratégie de traitement des défauts. En effet, un défaut du réseau peut se produire lorsque la valve à thyristors est à l'état conducteur.

En cas de défauts du réseau et de dérivations à courant élevé dans la valve à thyristors, il est essentiel que le système d'allumage du thyristor soit assez rapide pour éviter qu'une tension élevée ne s'accumule dans les thyristors lorsque le courant passe par zéro.

5.5 Actions à faible courant de ligne

Le CSCT ne peut pas continuer à fonctionner en mode capacitif amplifié lorsque le courant de ligne est très faible (en général, dans la plage de $1/10^{\text{ème}}$ du courant de ligne assigné). Cela s'explique par deux raisons:

- a) Le système de mesure a une résolution et une capacité de réduction de bruit limitées. Par conséquent, l'exactitude des signaux de réponse devient trop faible pour le système de commande.
- b) L'alimentation auxiliaire utilisée pour le déclenchement et la surveillance du thyristor provient souvent du circuit principal. Lorsque le courant de ligne est trop faible, cette alimentation s'arrête et il devient impossible d'allumer les thyristors.

Lorsque le courant de ligne est faible, la composante fondamentale à fréquence industrielle correspondante de la tension du condensateur inséré l'est également. Dans ce cas, le flux de puissance du réseau dépend très peu de l'insertion ou du shuntage du condensateur série. Toutefois, du point de vue de la résonance hyposynchrone (SSR), il peut être important de bien définir le mode de fonctionnement du CSCT (voir 4.3).

Il convient de lancer automatiquement le fonctionnement normal suite à la disparition du faible courant de ligne.

Du point de vue de la protection des équipements, le faible courant de ligne s'avère sans danger. Lorsque la puissance d'allumage auxiliaire provient du circuit principal, il est important que le système puisse agir rapidement de manière à allumer les thyristors afin d'empêcher une surtension en cas de hausse soudaine de la tension dans le condensateur.

5.6 Surveillance

Le système de commande de la valve doit être doté de systèmes de surveillance permettant d'indiquer le nombre de positions de thyristor défectueuses par phase. Ces indications doivent être disponibles au niveau du système de commande de l'opérateur (IHM).

6 Caractéristiques assignées

Les caractéristiques assignées des différents composants, qui font partie intégrante du CSCT, sont déduites des exigences de fonctionnement définies dans l'Article 4.

6.1 Caractéristique assignée du condensateur

Les condensateurs du CSCT doivent être conçus, fabriqués et soumis à essai conformément aux exigences applicables de la CEI 60143-1. Les considérations liées au fonctionnement en mode capacitif amplifié doivent être définies lors de la spécification du courant et de la tension assignés du condensateur. Il doit être noté que le courant assigné d'un condensateur CSCT est en principe supérieur au courant traversant assigné du CSCT. Les formes d'onde réelles du courant du condensateur liées au fonctionnement en mode capacitif amplifié doivent être incluses dans la spécification de l'équipement adressée au fabricant du condensateur. La tension assignée du condensateur doit être considérée comme la tension efficace totale des composantes à fréquence industrielle et harmoniques. Le courant assigné du condensateur doit reposer sur la somme des carrés des composantes du courant correspondantes.

6.2 Caractéristique assignée de la bobine d'inductance

Les bobines d'inductance du CSCT doivent être conçues, fabriquées et soumises à essai conformément aux exigences applicables de la CEI 60076-6, Article 9. Les formes d'onde réelles du courant de la bobine d'inductance liées au fonctionnement en mode capacitif amplifié doivent être incluses dans la spécification de l'équipement adressée au fabricant de la bobine d'inductance. Le courant assigné de la bobine d'inductance doit reposer sur la somme des carrés des composantes à fréquence industrielle et harmoniques. Le niveau d'isolement entre les bornes de la bobine d'inductance doit être fonction du niveau de protection de la batterie de CSCT, comme indiqué dans la CEI 60143-1.

6.3 Caractéristique assignée de la valve à thyristors

NOTE Le présent paragraphe reproduit du contenu extrait de l'IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors (disponible en anglais seulement), Copyright IEEE 2002. Tous droits réservés.

Les courant et tension admissibles requis de la valve à thyristors doivent être déduits de la plage de fonctionnement et des cycles de service spécifiés par l'acheteur. Dans la procédure de conception, il est supposé que le courant de ligne dans les conditions normales reste sinusoïdal (non déformé) à fréquence industrielle assignée.

6.3.1 Courant admissible

Les exigences en matière de courant admissible doivent être considérées pour le fonctionnement en mode capacitif amplifié et en mode de shuntage. La température de jonction du thyristor doit se trouver dans les limites acceptables pour toutes les charges et tous les cycles de service de défaut spécifiés convenus entre l'acheteur et le fournisseur.

6.3.1.1 Courant admissible au niveau des défauts internes

Un défaut interne est un défaut survenant dans la partie de ligne protégée contenant la batterie de condensateur série. La valve à thyristors doit être conçue pour supporter le courant de défaut passant par la valve pour les cas de défaut de ligne spécifiés. Des considérations doivent être définies dans le cas où la valve à thyristors est initialement

bloquée lorsque le défaut se produit, puis déclenchée pendant le défaut donnant lieu à un courant de thyristor avec une composante de courant de défaut de ligne et une composante de courant de décharge du condensateur. Si des bobines d'inductance distinctes sont utilisées pour la branche de la valve à thyristors et la branche du disjoncteur de shuntage, des moyens permettant de prévenir ou d'assurer un amortissement suffisant du « courant piégé » doivent être fournis. Les contraintes de la valve à thyristors dépendent du principe de conception.

- a) **La valve à thyristors permet de shunter le condensateur au niveau des défauts de ligne.** Dans ce cas, elle doit être conçue pour supporter le courant tant que le commutateur de shuntage connecté en parallèle n'est pas fermé. Il faut assurer la fiabilité des dispositifs permettant à la valve à thyristors de passer et rester en mode de shuntage (c'est-à-dire d'être en permanence à l'état conducteur pendant le défaut). Étant donné que la valve reste à l'état conducteur tant que le commutateur de shuntage parallèle n'est pas fermé, aucune contrainte de tension n'est imposée sur la valve à thyristors. Cela signifie que le courant de surcharge admis maximal est déterminé par la température maximale dans la jonction du thyristor, qui ne doit pas dépasser le niveau destructif en tenant compte de la pire éventualité de surcharge avant défaut.
- b) **Le courant de défaut est transmis à l'éclateur shunt parallèle.** Dans ce cas, la valve à thyristors doit être conçue pour porter le courant lors d'un demi-cycle de fréquence industrielle. Pour déclencher l'éclateur shunt, la valve à thyristors doit être en mesure de se bloquer, de manière à élever suffisamment la tension du condensateur. Cela signifie que la contrainte du courant de surcharge de la valve à thyristors doit être maintenue sous un niveau permettant d'inverser la tension de blocage apparaissant dans la valve à thyristors suite au courant de défaut.

6.3.1.2 Courant admissible au niveau des défauts externes

Un défaut externe est un défaut survenant en dehors de la partie de ligne protégée contenant la batterie de condensateur série. Souvent, ces défauts entraînent des courants de ligne dépassant leur valeur maximale dans la plage de fonctionnement du CSCT. Dans ce cas, il peut être admis de shunter le CSCT par l'intermédiaire de la valve à thyristors pendant toute la durée du défaut. Il est nécessaire de pouvoir réinsérer le CSCT dès que le courant de ligne chute et entre dans sa plage de fonctionnement normale. La réinsertion peut avoir lieu dans des conditions de surintensité (surcharge temporaire ou surcharge dynamique), le cas échéant. En conséquence, le courant admissible de la valve à thyristors doit être suffisant pour supporter le courant de shuntage pendant la durée du défaut sans augmenter la température du thyristor, ce qui est préjudiciable à la réinsertion rapide du CSCT suite à la durée d'élimination d'un défaut. Noter que la valve doit supporter le courant de décharge du condensateur au début de l'opération de shuntage, en plus du courant de défaut provenant de la ligne.

6.3.2 Tension admissible

La caractéristique assignée de la tension de la valve CSCT est déduite des courbes de capacité (voir Figure 5). Dans ces courbes, différentes tensions de valve à thyristors ont été définies pour le fonctionnement assigné (en régime continu), pour la surcharge temporaire et la surcharge dynamique. En principe, les exigences de fonctionnement permanent imposent le « niveau de protection » U_{PL} des varistances connectées en parallèle à la batterie de condensateur. Le niveau de protection est la tension instantanée maximale passant par la varistance en cas de défaut. En règle générale, le niveau de protection est d'environ 2 à 2,5 fois la tension de crête à caractéristiques en régime continu.

$$U_{PL} = K_1 \hat{U}_N = \sqrt{2} K_1 U_N \quad (2)$$

où

$$K_1 = 2,0 \text{ to } 2,5$$

Si les exigences en surcharge temporaire ou dynamique sont importantes, un coefficient de protection supérieur peut s'avérer nécessaire. La varistance limite la tension de la valve à thyristors au niveau de la tension de protection U_{PL} à l'état bloqué.

Lors de la conception de la tension admissible de la valve, il est également nécessaire de tenir compte de la tension de dépassement, qui se produit lors du blocage. La Figure 8 illustre l'aspect typique d'une tension de thyristor d'un CSCT fonctionnant en mode capacitif amplifié.

La tension maximale du thyristor dépend essentiellement de la tension du condensateur au moment du blocage, avec en plus une tension de dépassement de blocage du thyristor supplémentaire, qui dépend de la dérivée du courant au moment du blocage et de l'inductance de la bobine d'inductance du CSCT.

NOTE Quelle que soit la plage de fonctionnement requise, il faut que la valve à thyristors soit conçue pour supporter au moins la tension de niveau de protection du condensateur série. Cela est important lorsqu'un CSCT est conçu selon un facteur d'amplification capacitive maximale relativement bas. En effet, la tension maximale de la valve en mode capacitif amplifié peut être inférieure au niveau de protection du condensateur série.

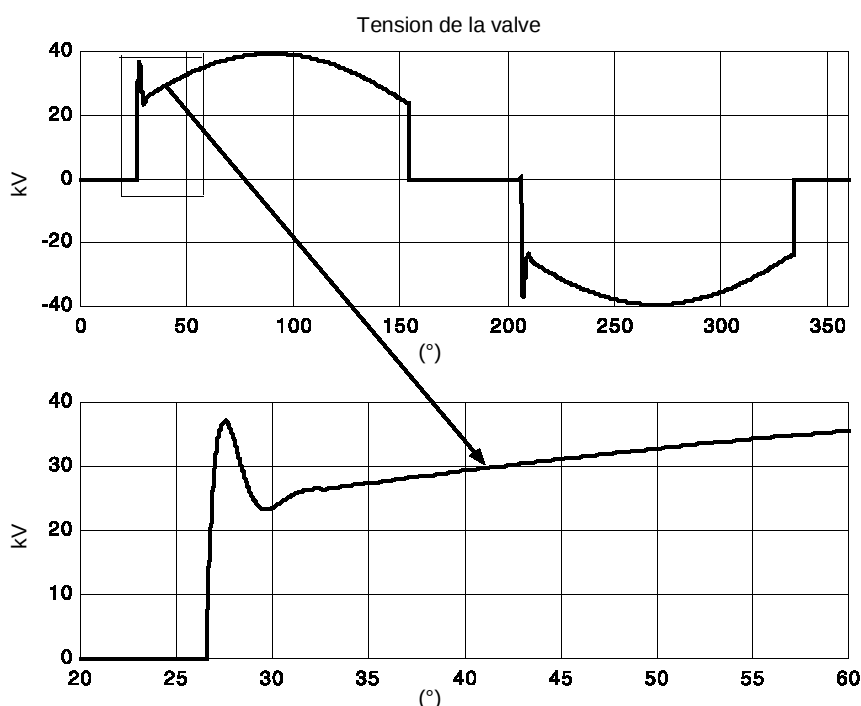


Figure 8 – Tension de la valve à thyristors dans un CSCT

Dans les courbes de tension/courant admissible de la Figure 5, il a été supposé que les domaines de surcharge permanente, temporaire et dynamique sont limités par les courbes de tension constante du condensateur pour une plage donnée de courants de ligne. Ces limites sont justifiées par la prise en compte de la tension admissible du condensateur. La réactance varie avec cette limite et augmente de façon inversement proportionnelle au courant de ligne. En conséquence, la tension de blocage et la dérivée du courant augmentent lorsque le courant de ligne diminue le long de la limite de tension constante. La tension de blocage la plus élevée du thyristor pour une tension donnée du condensateur apparaît donc pour le niveau d'amplification le plus élevé donnant cette tension du condensateur. Par exemple, l'opération aux points A2, B2 et C2 de la Figure 10 donne les tensions de blocage les plus élevées du thyristor en fonctionnement en régime continu, surcharge temporaire et surcharge dynamique, respectivement. Selon les courbes de capacité opérationnelles requises et la topologie du circuit principal, la tension de blocage peut être supérieure ou inférieure à la tension à l'état bloqué de protection maximale définie par la varistance.

Il convient de déterminer une tension de blocage maximale $U_{\text{max,turn-off}}$ pour la conception de la valve à thyristors. Cette tension est supérieure à la tension de blocage à l'état stable, lorsque le CSCT fonctionne en tout point du diagramme de capacité. Des mesures réalisées dans le système de commande doivent empêcher la mise sous tension, les tensions de blocage étant alors supérieures à $U_{\text{max,turn-off}}$.

La protection à maximum de tension à l'arrêt de la valve peut être appréhendée selon différentes approches. Par exemple:

- Allumage de protection individuel mis en place pour chaque thyristor.
- Système de mesure disposé sur l'ensemble de la valve, générant un allumage de protection en cas de surtension.
- Système de mesure supervisant la branche de thyristor di/dt , générant un allumage de protection lorsque la dérivée du courant dépasse le niveau de conception.

6.3.2.1 Caractéristique assignée de la tension de la valve CSCT, fonctionnement normal

Lorsque les tensions maximales de valve à thyristors par rapport au niveau de protection de la varistance et que la tension de blocage maximale du thyristor ont été déterminées, la valve peut être conçue. Lors de la sélection du nombre d'appareils et de la caractéristique assignée de la tension, les facteurs suivants doivent être pris en compte:

- la tension maximale de la valve incluant le dépassement de blocage;
- l'égalisation de tension entre les niveaux de thyristor individuel connectés en série;
- la redondance requise dans le nombre de niveaux de thyristor connectés en série.

6.3.2.2 Caractéristique assignée de la tension de la valve CSCT, cas de défaut

Si le système de protection utilise un éclateur shunt, qui nécessite une tension de contournement élevée, la tension de tenue du thyristor suivant un courant de surcharge doit être prise en compte.

Si le système de protection utilise un shuntage continu, aucune exigence de tension admissible spécifique pour les cas de défaut n'est applicable.

6.4 Caractéristique assignée de la varistance

Un condensateur série commandé par thyristors peut être shunté par l'intermédiaire de la valve à thyristors de manière pratiquement instantanée lorsqu'un courant de défaut est détecté, puis réinséré rapidement après la durée d'élimination d'un défaut. Compte tenu de cette réinsertion rapide après la durée d'élimination d'un défaut, le CSCT peut être shunté en cas de défaut externe sans provoquer d'impact négatif significatif sur la stabilité du système.

En cas de défauts de ligne de transmission externes et internes, le shuntage de la valve à thyristors est souvent utilisé pour le CSCT. Cela permet de réduire de manière significative la quantité d'énergie de varistance requise comparé à un condensateur série conventionnel. En effet, pratiquement aucune injection d'énergie dans la varistance n'aura lieu en raison des courants de défaut du système. Le commutateur de shuntage est fermé pour les défauts internes également.

Le fabricant de CSCT doit démontrer, par des simulations, que le système de commande et de protection est suffisamment rapide pour empêcher l'injection d'énergie de la varistance en raison des courants de défaut auxquels peut être exposé le CSCT. Si l'injection d'énergie a lieu lors de défauts du système, elle doit être prise en compte dans la caractéristique assignée de la varistance.

La réinsertion d'un condensateur série engendre un décalage de courant continu dans la tension du condensateur, ce qui peut provoquer une injection d'énergie dans la varistance.

L'injection d'énergie due à la réinsertion en fonction d'un courant d'oscillation doit être considérée dans la caractéristique assignée de la varistance. L'amplitude maximale du courant de la varistance et de l'injection d'énergie due à la réinsertion en fonction de courants d'oscillation doit également être prise en compte lors de la mise en place de protections de surcharge de la varistance. Il s'agit de s'assurer que le CSCT peut être réinséré en fonction d'un courant d'oscillation.

Des exemples de cycles de service de défaut externe et interne du CSCT sont présentés en 8.5.

6.5 Niveau d'isolement et ligne de fuite

Les tensions d'isolement, les lignes de fuite et les distances dans l'air de l'équipement du CSCT doivent être sélectionnées conformément aux principes définis dans l'Article 6 de la CEI 60143-1. La tension du CSCT à utiliser dans le calcul des lignes de fuite doit être la valeur efficace maximale totale permanente de la tension du condensateur, y compris l'effet de l'intensité capacitive. Si la valeur efficace totale de la tension du condensateur lors de la surcharge temporaire (U_{C30}) dépasse 1,35 pu, la ligne de fuite doit être augmentée de manière linéaire avec ($U_{C30}/1,35$).

7 Essais

L'équipement du CSCT doit faire l'objet des essais de type spécifiés dans la présente norme. Dans le cas d'un projet particulier, ces essais doivent démontrer que l'équipement à fournir peut supporter les services requis. Si un équipement de conception manifestement analogue a fait l'objet d'un essai de type concluant à des niveaux de contrainte ou de service supérieurs ou égaux à ceux du projet particulier, le fabricant n'est pas tenu de répéter l'essai si un rapport écrit le décrivant est fourni. Dans ce cas également, un autre rapport détaillant les différences de conception et démontrant dans quelle mesure le rapport d'essai de type de référence satisfait les objectifs d'essai du projet particulier doit être fourni.

Il faut réaliser de nouveaux essais de type pour un projet particulier uniquement si la conception de l'équipement est nouvelle, si un procédé de fabrication critique est nouveau, s'il doit être appliqué à une contrainte ou un service supérieur que les conceptions d'essai précédentes ou si l'acheteur le demande de manière spécifique. La nécessité de procéder à de nouveaux essais de type est évaluée sur la base d'un essai de type de l'équipement individuel.

Les données obtenues lors des essais de défauts établis réalisés sur un CSCT complet peuvent être utilisées pour démontrer l'exhaustivité de certains aspects de la conception.

L'équipement du circuit principal du CSCT pour lequel les essais ne sont pas spécifiés dans la présente norme doit être soumis à essai conformément à la CEI 60143-2.

7.1 Essai du condensateur

Il convient de réaliser les essais individuels, les essais de type et les essais spéciaux conformément aux parties correspondantes de la CEI 60143-1 et de la CEI 60143-3 sur les condensateurs série, en tenant compte du courant et de la tension assignés déterminés comme indiqué en 6.1 ci-dessus.

Les essais ci-dessous doivent être réalisés.

7.1.1 Essais individuels

Les essais individuels suivants doivent être effectués:

- a) Mesure de la capacité (5.3 de la CEI 60143-1)
- b) Mesure des pertes du condensateur (5.4 de la CEI 60143-1)

- c) Essai de tenue en tension entre bornes (5.5 de la CEI 60143-1)
- d) Essai diélectrique en tension alternative entre bornes et cuve (5.6 de la CEI 60143-1)
- e) Essai du dispositif interne de décharge (5.7 de la CEI 60143-1)
- f) Essai d'étanchéité (5.8 de la CEI 60143-1)
- g) Essai de décharge des fusibles internes (3.1.2 de la CEI 60143-3)

NOTE Il convient qu'un essai de décharge soit également réalisé pour les condensateurs sans coupe-circuit afin de vérifier les connexions internes.

Les essais ne doivent pas être nécessairement effectués dans l'ordre indiqué ci-dessus. Les essais individuels doivent être effectués par le fabricant, avant la livraison, sur chaque condensateur unitaire.

7.1.2 Essais de type

Les essais de type suivants doivent être effectués:

- a) Essai de stabilité thermique (5.9 de la CEI 60143-1)
- b) Essai diélectrique en tension alternative entre bornes et cuve (5.10 de la CEI 60143-1)
- c) Essai de tension de choc de foudre entre bornes et cuve (5.11 de la CEI 60143-1)
- d) Essai de tenue au froid (5.12 de la CEI 60143-1)
- e) Essai de courant de décharge (5.13 de la CEI 60143-1)
- f) Essai de déconnexion des fusibles internes (3.2.3 de la CEI 60143-3)
- g) Essai diélectrique sur le fusible interne après ouverture de l'enveloppe (3.2.4 de la CEI 60143-3)

Les essais de type sont effectués pour s'assurer que le condensateur unitaire est conforme aux caractéristiques contractuelles et aux exigences fonctionnelles spécifiées dans les normes.

Il n'est pas indispensable que tous les essais de type soient effectués sur le même condensateur unitaire.

La liste ci-dessus des essais de type n'indique aucune séquence d'essai.

Sauf spécification contraire, chaque échantillon de condensateur sur lequel un essai de type est effectué doit d'abord avoir supporté de façon satisfaisante tous les essais individuels.

7.1.3 Essai spécial (essai d'endurance)

L'essai d'endurance doit être effectué seulement après accord contractuel entre le fabricant et l'acheteur. Cet essai est réalisé conformément à 5.14 de la CEI 60143-1.

7.2 Essais de la bobine d'inductance du CSCT

Il convient de réaliser les essais individuels, les essais de type et les essais facultatifs de la bobine d'inductance du CSCT conformément aux articles correspondants de la CEI 60076-6, Article 9, en tenant compte du courant et de la tension assignés déterminés comme indiqué en 6.2 ci-dessus.

Les essais ci-dessous doivent être réalisés.

7.2.1 Essais individuels

Les essais individuels suivants doivent être effectués:

- a) Mesure de la résistance à l'enroulement (9.10.2 de la CEI 60076-6 et CEI 60076-1)
- b) Mesure de l'inductance (9.10.5 de la CEI 60076-6)
- c) Mesure du facteur de perte et de qualité (9.10.6 de la CEI 60076-6)
- d) Essai de surtension de l'enroulement (9.10.7 de la CEI 60076-6)

7.2.2 Essais de type

Les essais de type suivants doivent être effectués:

- a) Mesure de l'inductance (9.10.5 de la CEI 60076-6)
- b) Mesure du facteur de perte et de qualité (9.10.6 de la CEI 60076-6)
- c) Essai d'échauffement (9.10.8 de la CEI 60076-6)
- d) Essai de tension de choc de foudre (9.10.9 de la CEI 60076-6)

7.2.3 Essais spéciaux

Les essais spéciaux ci-dessous doivent être réalisés sur demande spécifique de l'acheteur:

- a) Essai de courant de court-circuit (9.10.10 de la CEI 60076-6)
- b) Mesure du niveau acoustique (9.10.11 de la CEI 60076-6)
- c) Essai de tension de tenue alternative de source séparée (9.10.2 de la CEI 60076-6)
- d) Essai de courant de décharge (9.10.14 de la CEI 60076-6)
- e) Essai de résonance mécanique (9.10.16 de la CEI 60076-6)
- f) Mesure de la résistance à l'enroulement en fonction de la fréquence d'harmonique (7.2.3.1)

NOTE Si l'essai de courant de court-circuit est réalisé, il convient de procéder à l'essai de courant de décharge uniquement si l'amplitude du courant de décharge est plus importante que celle du courant de court-circuit.

7.2.3.1 Mesure de la résistance à l'enroulement en fonction de la fréquence d'harmonique

La résistance à l'enroulement en fonction de la fréquence doit être mesurée selon une méthode en pont approuvée à tension réduite. La plage de fréquences doit correspondre à l'intervalle de fréquence harmonique spécifié par le client.

7.3 Essais des valves à thyristors

7.3.1 Lignes directrices relatives à la réalisation des essais de type

7.3.1.1 Objet de l'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 entre la structure de la valve et la plate-forme. Les autres équipements (le système de commande et de protection de la valve et les commandes électroniques de base des valves, par exemple) 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.

Les essais diélectriques doivent être réalisés sur des valves intégralement montées, même si des essais opérationnels peuvent être réalisés sur des valves complètes ou sur un nombre approprié de sections de valve, comme indiqué, afin de vérifier que la conception de la valve satisfait aux exigences spécifiées. Lorsque des essais de type sont réalisés sur des sections de valve, le nombre total de niveaux de thyristor soumis à ces essais doit être au moins égal au nombre de niveaux de thyristor dans une valve.

Sauf indication contraire, la même valve (ou section de valve) doit être utilisée pour tous les essais de type.

7.3.1.2 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 garantissant leur bonne fabrication. Les essais de type spécifiés peuvent être réalisés dans n'importe quel ordre.

7.3.1.3 Conditions d'essai des essais diélectriques

La valve doit être montée avec tous ses composants auxiliaires, à l'exception de la varistance, le cas échéant. Sauf indication contraire, les composants électroniques de la valve doivent être mis sous tension. Les liquides de refroidissement et isolants, en particulier, doivent se trouver dans un état proche des conditions de service (en matière de conductivité, par exemple), 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 (ou d'autres valves d'un MVU) qui ne sont pas concernées par l'essai doivent être raccourcies et raccordées à la terre de l'enveloppe de manière appropriée pour l'essai en question.

Lorsque cela est spécifié dans l'article pertinent, la correction atmosphérique doit être appliquée aux tensions d'essai conformément à la CEI 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 la CEI 60071-1, les facteurs de correction s'appliquent uniquement aux altitudes de plus de 1 000 m. Par conséquent, si l'altitude du site (a_s) sur lequel est installé l'équipement est $\leq 1\,000$ m, la pression atmosphérique normalisée ($b_0 = 101,3$ kPa) doit être utilisée sans correction de l'altitude. Si $a_s > 1\,000$ m, la procédure normalisée conforme à la CEI 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 ($b_{1\,000\text{ m}}$).
 - 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 la CEI 60071-1, la procédure normalisée conforme à la CEI 60060-1 est utilisée avec la pression atmosphérique de référence b_0 ($b_0 = 101,3$ kPa).
- Température: température maximale de conception de la salle des valves (°C);
- Humidité: humidité absolue minimale et maximale de conception de la salle des valves (g/m³).

Les valeurs à utiliser doivent être précisées par le fournisseur.

7.3.1.4 Conditions d'essai des essais opérationnels

Dans la mesure du possible, il convient de soumettre à essai une valve à thyristors complète. Sinon, les essais peuvent être réalisés 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 à réaliser sur les sections de valve à thyristors sont proposés, ceux spécifiés dans la présente norme sont valides pour les sections de valve à thyristors contenant au moins cinq niveaux de thyristor connectés en série. Si des essais à réaliser sur des sections de valve à thyristors contenant moins de cinq niveaux de thyristor sont proposés, des facteurs de sécurité d'essai supplémentaires doivent être convenus. En aucun cas le nombre de niveaux de thyristor connectés en série ne doit être inférieur à trois.

Les essais opérationnels peuvent être réalisés à une fréquence industrielle différente de la fréquence de service, c'est-à-dire 50 Hz au lieu de 60 Hz ou inversement. Certaines contraintes opérationnelles (les pertes de commutation ou I^2t , par exemple) 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. Il s'agit de 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 ou à la forme d'onde réelle.

Le liquide de refroidissement doit être une condition représentative des conditions de service. Les valeurs les plus défavorables appropriées à l'essai en question doivent être attribuées au débit et à la température, en particulier. 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.

7.3.1.5 Critères de réussite de l'essai de type

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 dites aléatoires dans la mesure où leur cause ou la relation qu'elles entretiennent avec la contrainte est imprévisible ou ne peut être quantifiée de manière précise. Les essais de type soumettent, dans un délai très court, les valves ou sections de valve à plusieurs contraintes correspondant généralement aux pires contraintes auxquelles peuvent parfois être soumis les équipements pendant la durée de vie de la valve. Dès lors, les critères de réussite de l'essai de type définis ci-après permettent à un petit nombre de niveaux de thyristor de faire l'objet de défaillance pendant l'essai de type, à condition que les défaillances soient rares et ne soient pas le révélateur d'une conception inappropriée.

Les valves ou sections de valve doivent être vérifiées avant chaque essai, après tous les essais d'étalonnage préliminaires et de nouveau après chaque essai de type. Il s'agit de déterminer si des thyristors ou des composants auxiliaires sont tombés en panne pendant l'essai. Les thyristors ou composants auxiliaires défaillants à l'issue de l'essai de type doivent être réparés avant de soumettre de nouveau la valve à essai.

Un niveau de thyristor peut être défaillant en raison d'une mise en court-circuit dans l'essai de type. Si, à l'issue de l'essai de type, un niveau de thyristor a été mis en court-circuit, le niveau défaillant doit être restauré et cet essai de type répété. Au total, deux niveaux de thyristor peuvent être défaillants suite à un court-circuit dans tous les essais de type. Si plus de deux niveaux de thyristor sont défaillants pendant l'essai de type, l'ensemble des essais de type de la valve doit être répété.

Le nombre total de niveaux de thyristor défaillants (niveaux en court-circuit ou défauts ne se traduisant pas par un court-circuit au niveau du thyristor) observé pendant le programme d'essai de type et les vérifications subséquentes ne doit pas dépasser le nombre de niveaux redondants.

L'emplacement des niveaux en court-circuit et d'autres défaillances au niveau du thyristor à l'issue des essais de type ne doit pas être le révélateur d'une conception inappropriée.

7.3.2 Essais individuels

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

- a) Contrôle visuel (8.1 de la CEI 61954)
- b) Vérification des connexions (8.2 de la CEI 61954)
- c) Vérification du circuit d'égalisation/d'amortissement (8.3 de la CEI 61954)
- d) Vérification de la tension de tenue (8.4 de la CEI 61954)

- e) Vérification des équipements auxiliaires (8.5 de la CEI 61954)
- f) Vérification de l'allumage (8.6 de la CEI 61954)
- g) Essai de pression du système de refroidissement (8.7 de la CEI 61954)

7.3.3 Essais de type

7.3.3.1 Essais diélectriques

Sauf indication contraire, tous les essais diélectriques effectués sur une valve complète doivent être réalisés avec des niveaux de thyristor redondants mis en court-circuit. Les essais de contraintes diélectriques suivants sont spécifiés:

- tension alternative;
- tensions de choc.

Dans l'intérêt d'une normalisation avec d'autres équipements, les essais de tension de choc de foudre entre les bornes de la valve et l'enveloppe sont inclus. Pour les essais entre les bornes de valve, le seul essai de choc spécifié est l'essai en choc de manœuvre.

7.3.3.1.1 Essais réalisés sur la structure de la valve

Les essais sont définis pour les exigences de tenue de tension entre une valve (dont les bornes sont mises en court-circuit) et l'enveloppe de la valve à thyristors. Les essais doivent démontrer:

- que des distances suffisantes ont été prévues afin d'éviter les contournements;
- l'absence de décharge disruptive dans l'isolement de la structure de la valve, les conduites de refroidissement, les conduites de lumière et autres parties d'isolement de la transmission pulsée et des systèmes de distribution;
- les tensions d'allumage et d'extinction des décharges partielles sont supérieures à la tension de fonctionnement maximale à l'état stable sur la structure de la valve.

Pour ces essais, chaque niveau de thyristor doit être mis en court-circuit. Il peut être nécessaire de déconnecter la borne basse tension pendant cet essai.

7.3.3.1.1.1 Essai de tenue de tension à fréquence industrielle entre la borne et la terre

a) Valeurs d'essai et formes d'onde

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'onde sinusoïdales d'une fréquence de 50 Hz ou 60 Hz, selon les équipements d'essai. Les tensions d'essai doivent être calculées conformément à

$$U_{ts} = \frac{U_{ms}}{\sqrt{2}} \times k_{s2} \times k_t$$

où

U_{ms} est la valeur de crête de la tension de service répétitive maximale, y compris le dépassement d'extinction, sur le support de la valve. (En règle générale déduite du fonctionnement à surcharge dynamique maximale en mode CAP ou du niveau de protection du condensateur série);

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

U_{ts2} est la tension d'essai maintenue pendant 10 min;

k_{s2} est égale à 1,30 pour l'essai de 1 min;

k_{s2} est égale à 1,10 pour l'essai de 10 min;

- k_t est le facteur de correction atmosphérique;
 k_t est la valeur conforme à 7.3.1.3 pour l'essai de 1 min;
 k_t est égale à 1,0 pour l'essai de 10 min.

b) Procédures d'essai

L'essai consiste à appliquer les tensions d'essai spécifiées U_{ts1} et U_{ts2} pendant la durée spécifiée entre les deux bornes de valve interconnectées et la terre.

- 1) Augmenter la tension de 50 % à 100 % de U_{ts1} .
- 2) Maintenir U_{ts1} pendant 1 min.
- 3) Réduire la tension à U_{ts2} .
- 4) Maintenir U_{ts2} pendant 10 min, enregistrer le niveau de décharge partielle, puis réduire la tension à zéro.
- 5) La valeur de crête des décharges partielles périodiques enregistrée pendant la dernière minute de l'étape 4) 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 dans le cas contraire.
- 6) La tension d'allumage et la tension d'extinction doivent être mesurées conformément à la CEI 60270.

7.3.3.1.1.2 Essai de tension de choc de foudre entre la borne et la terre

Une forme d'onde de 1,2/50 μ s normalisée doit être utilisée. La valeur de crête de la tension d'essai est la tension de tenue au choc de foudre normalisée conformément à 6.1.3 de la CEI 60143-1.

7.3.3.1.2 Essais entre les bornes de valve

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 de fonctionnement maximale à l'état stable sur la valve;
- que le système d'allumage de surtension de protection (le cas échéant) fonctionne comme prévu;
- que la capacité du/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).

7.3.3.1.2.1 Essai en choc de manœuvre entre les bornes

a) Valeurs d'essai et formes d'onde

Forme d'onde: Forme d'onde normalisée de 250/2500 μ s.

1) Essai 1

Cet essai s'applique aux valves dotées d'un système d'allumage de protection. L'essai doit comporter trois applications à tensions de choc de manœuvre à polarité positive et trois applications à tensions de choc de manœuvre à polarité négative d'amplitude spécifiée, les composants électroniques de la valve étant initialement mis sous tension, puis hors tension, soit 12 applications au total.

Cet essai a pour objet de vérifier que le système d'allumage de protection de la valve ne fonctionne pas pour des valeurs de tension supérieures aux tensions d'essai.

La tension d'essai U_{tsv1} est déterminée comme suit:

$$U_{tsv1} = k_s \times U_1$$

où

U_1 est la valeur instantanée maximale de la tension borne-à-borne que la valve doit supporter sans faire fonctionner le système d'allumage de protection (le cas échéant) dans les conditions de service. (En règle générale déduite du fonctionnement à surcharge dynamique maximale en mode CAP ou du niveau de protection du condensateur série);

k_s est un facteur de sécurité d'essai ($k_s = 1,05$).

2) Essai 2

L'essai a pour objet de vérifier l'isolement de la valve et le bon fonctionnement du système d'allumage de protection (si applicable à la conception de la valve).

- Valves protégées par les varistances de valve à thyristors:

La tension d'essai prospective U_{tsv2} est déterminée comme suit:

$$U_{tsv2} = k_s \times U_{apl}$$

où

U_{apl} est le niveau de protection du parafoudre;

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

- Valves protégées par VBO:

La tension d'essai prospective U_{tsv2} est déterminée comme suit:

$$U_{tsv2} = k_s \times U_{VBO}$$

où

U_{VBO} est le niveau de tension de protection VBO maximal avec les niveaux de thyristor redondants opérationnels;

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

Les limites supérieure et inférieure du seuil d'allumage VBO de protection, les niveaux de thyristor redondants étant opérationnels, doivent être établies par le fabricant. La tension observée à l'allumage doit se trouver entre ces deux limites.

L'essai doit être répété avec les composants électroniques de la valve hors tension.

NOTE Cet essai ne s'applique pas aux conceptions de valve dont les circuits d'allumage normaux sont mis en tension indépendamment du circuit d'alimentation principal.

- Valves protégées par un système de protection à maximum de tension indirect par mesure de la dérivée du courant de la valve:

La tension d'essai prospective U_{tsv2} est déterminée comme suit:

$$U_{tsv2} = k_s \times U_{didt}$$

où

U_{didt} est la tension de crête maximale de la valve définie par la protection à maximum de tension di/dt;

k_s est un facteur de sécurité d'essai;

$$k_s = 1,1 \times k_i$$

k_i est un facteur d'interprétation de mesure

$$k_i = 1,05.$$

- Valves sans parafoudre, VBO ni protection à maximum de tension di/dt

Cet essai a pour objet de vérifier l'isolement de la valve sans parafoudre, VBO ni protection à maximum de tension di/dt .

$$U_{tsv2} = k_s \times U_{cms}$$

où

U_{cms} est la tension prospective de choc de manœuvre conformément à la CEI 60071 ou telle que déterminée par les études de coordination d'isolement;

k_s est un facteur de sécurité d'essai ($k_s = 1,3$).

La valve doit supporter la tension d'essai sans coupure de commutation ou d'isolement.

b) 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.

Des conditions supplémentaires particulières sont indiquées ci-après.

1) Essai 1

Le système d'allumage de protection de la valve est opérationnel et la tension d'essai inférieure au niveau d'allumage, en tenant compte de la présence d'une varistance, si la conception en comporte une.

La valve ne doit pas être allumée par un système de commande ou de protection pendant cet essai.

2) Essai 2

Le système d'allumage de protection de la valve est opérationnel et la tension supérieure au niveau d'allumage (le cas échéant).

Si l'allumage du VBO est fonction des mesures de la tension réalisées sur des niveaux de thyristor individuels, l'essai doit être réalisé avec les niveaux de thyristor redondants opérationnels.

7.3.3.1.2.2 Essai de tenue de tension à fréquence industrielle entre les bornes

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'onde sinusoïdales d'une fréquence de 50 Hz ou 60 Hz, selon les équipements d'essai.

$$U_{tv1} = \frac{U_1}{\sqrt{2}} \times k_{s1}$$

où

U_1 est la valeur de crête de la surtension répétitive maximale, y compris le dépassement d'extinction, sur les bornes de la valve (en règle générale déduite du fonctionnement à surcharge dynamique maximale en mode CAP, point C2 dans l'exemple de la Figure 10, ou du niveau de protection du condensateur série);

k_{s1} est un facteur de sécurité d'essai ($k_{s1} = 1,10$).

NOTE 1 L'essai prescrit 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 de 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 non inférieure à 1 min.

$$U_{tv2} = \frac{U_2}{\sqrt{2}} \times k_{s2}$$

où

U_2 est la valeur de crête de la surtension répétitive maximale, y compris le dépassement d'extinction, sur les bornes de la valve pour la surcharge temporaire la plus sévère spécifiée (en général déduite du point B2 dans l'exemple de la Figure 10)

k_{s2} est un facteur de sécurité d'essai ($k_{s2} = 1,10$).

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 % U_{tv1} .
- 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 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 des décharges partielles doivent être mesurées conformément à la CEI 60270.

Si l'allumage VBO de protection est fourni, il ne doit pas fonctionner pendant cet essai.

7.3.3.2 Essai d'interférence électromagnétique

7.3.3.2.1 Objets

Ces essais ont pour objet de démontrer l'insensibilité de la valve aux émissions électromagnétiques imposées par des événements externes.

Les essais doivent démontrer que, suite à une émission électromagnétique,

- les thyristors ne font l'objet d'aucun déclenchement intempestif;
- les composants électroniques de la valve n'envoient aucune fausse indication de défauts de niveau de thyristor ou de signaux erronés aux systèmes de commande et de protection du convertisseur.

7.3.3.2.2 Procédures d'essai

L'insensibilité aux interférences électromagnétiques est vérifiée en surveillant la valve pendant l'essai en choc de manœuvre entre les bornes. Les composants électroniques de la valve en essai doivent être mis sous tension. Les parties des composants électroniques de base de la valve indispensables à l'échange 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.

7.3.3.3 Essais opérationnels

Les essais opérationnels ont pour objet de vérifier la conception de la valve pour la tension combinée et les contraintes de courant dans des conditions répétitives normales et

anormales, ainsi que dans des conditions de défaut transitoires. Ils doivent démontrer que, dans les conditions spécifiées:

- la valve fonctionne correctement dans la plage de fonctionnement complète, comme indiqué dans la séquence de fonctionnement de la valve;
- la tension de blocage et de déblocage et les contraintes de courant se trouvent dans les limites de capacité des thyristors et des autres circuits internes;
- le refroidissement fourni est adapté et qu'aucun composant ne surchauffe;
- la capacité de tenue de surintensité et de surtension de la valve est adéquate.

7.3.3.3.1 Essai d'allumage périodique

Cet essai a pour objet de montrer que la valve peut supporter la tension combinée et les contraintes de courant résultant de la surcharge dynamique la plus sévère spécifiée. Par conséquent, les conditions d'essai doivent correspondre au pire des cas spécifié, au mode amplifié en fonction du temps, en tenant compte des caractéristiques de commande et de protection du schéma. En particulier, il doit être démontré que la valve peut bloquer la tension la plus élevée (y compris le dépassement d'extinction) combinée à la température de jonction maximale du thyristor donnée par le cycle de service.

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 le premier 10-20 µs alors que, pour l'extinction, l'intervalle considéré est compris entre 0,2 ms avant et 1 ms après le zéro courant.

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

- a) les amplitudes de tension à la mise sous et hors tension;
- b) le di/dt à la mise sous tension et pendant au moins 0,2 ms avant le zéro du courant;
- c) la température de jonction du thyristor.

Les facteurs suivants doivent également être considérés:

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

7.3.3.3.1.1 Fonctionnement à intensité capacitive temporaire maximale amplifiée

a) Valeurs d'essai

Le courant d'essai et la tension d'essai doivent être fonction de la pire surcharge temporaire (voir point B2 de la Figure 10).

La température du liquide de refroidissement ne doit pas être inférieure à celle qui donne la température de jonction du thyristor à surcharge temporaire la plus élevée en service à température ambiante maximale.

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

L'essai doit durer 30 min après stabilisation de la température du liquide de refroidissement.

La tension d'essai à l'allumage/extinction de la valve est de

$$U_{f_max} = \frac{\lambda \times X_0 \times i_L}{\lambda^2 - 1} \times \frac{N_t}{N_{tot} - N_{red}} \times [\sin \beta - \lambda \times \cos \beta \times \tan(\lambda \times \beta)] \times k_{s3}$$

où

λ	est le quotient de la fréquence naturelle de la branche LC sur la fréquence du réseau;
X_0	est l'impédance de la branche LC;
i_L	est le courant de ligne;
N_t	est le nombre de niveaux de thyristor connectés en série soumis à essai;
N_{tot}	est le nombre total de niveaux de thyristor connectés en série dans une valve complète, y compris les niveaux redondants;
N_{red}	est le nombre de niveaux de thyristor redondants dans une valve complète, y compris les niveaux redondants;
β	est l'angle de contrôle en régime stabilisé des valves CSCT;
k_{s3}	est un facteur de sécurité d'essai;
k_{s3}	= 1,05.

b) Procédure d'essai

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

Tous les systèmes auxiliaires susceptibles d'influencer le comportement de la valve dans les conditions de fonctionnement spécifiées ci-dessous (allumage forcé, par exemple) doivent fonctionner.

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:

- 1) définir les conditions maximales en régime stabilisé du courant et de la tension, et les maintenir jusqu'à l'équilibre thermique;
- 2) augmenter le courant de la source à la valeur d'essai et ajuster l'angle d'allumage pour obtenir la tension d'essai. Maintenir le fonctionnement pendant 30 min.

7.3.3.3.1.2 Fonctionnement à intensité capacitive dynamique maximale amplifiée

a) Valeurs d'essai

Le courant d'essai et la tension d'essai doivent être fonction de la pire surcharge dynamique (voir point C2 de la Figure 10).

La température du liquide de refroidissement ne doit pas être inférieure à celle qui donne la température de jonction du thyristor à surcharge dynamique la plus élevée en service à température ambiante maximale.

Le courant d'essai doit intégrer un facteur de sécurité d'essai de 1,05. La tension d'essai est calculée conformément à l'équation de 7.3.3.3.1.1 à l'aide de valeurs correspondant à la surcharge dynamique.

L'essai doit durer 1,1 fois la durée de surcharge dynamique spécifiée.

b) Procédure d'essai

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

Tous les systèmes auxiliaires susceptibles d'influencer le comportement de la valve dans les conditions de fonctionnement spécifiées ci-dessous (allumage forcé, par exemple) doivent fonctionner.

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:

- 1) définir les conditions maximales de surcharge temporaire du courant et de la tension, et les maintenir jusqu'à l'équilibre thermique;
- 2) augmenter le courant de la source à la valeur d'essai et ajuster l'angle d'allumage pour obtenir la tension d'essai. Maintenir le fonctionnement pendant 1,1 fois la durée de surcharge dynamique spécifiée.

7.3.3.3.1.3 Fonctionnement à intensité capacitive minimale amplifiée

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

Le courant d'essai doit être fonction du courant de ligne continu minimal admis en fonctionnement à intensité capacitive amplifiée (point D1 de la Figure 10).

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

L'essai doit durer 10 min.

Les tensions d'essai U_{f_min} (tension en régime continu de la valve au moment de l'allumage) et U_{p_min} (tension de crête à fréquence industrielle en régime continu de la valve) doivent être déterminées comme suit:

$$U_{f_min} = \frac{\lambda \times X_0 \times i_{L_min}}{\lambda^2 - 1} \times \frac{N_t}{N_{tot}} \times [\sin \beta - \lambda \times \cos \beta \times \tan(\lambda \times \beta)] \times k_{s4}$$

$$U_{p_min} = \lambda \times X_0 \times \sqrt{2} \times i_{L_min} \times \frac{N_t}{N_{tot}} \times \left[1 + \frac{\lambda \times (\cos \beta \times \tan(\lambda \times \beta) - \lambda \times \sin \beta)}{\lambda^2 - 1} \right] \times k_{s4}$$

où

- | | |
|---------------|--|
| i_{L_min} | est le courant de ligne minimal de l'intensité capacitive; |
| β_{min} | est l'angle de conduction minimal des valves CSCT de l'intensité capacitive à i_{L_min} ; |
| k_{s4} | est un facteur de sécurité d'essai; |
| k_{s4} | = 0,95. |

7.3.3.3.1.4 Fonctionnement lors du shuntage

Si une valve CSCT est prévue pour fonctionner selon un facteur d'amplification capacitive relativement bas, les pertes de valve en mode capacitif amplifié peuvent être comparables à celles du mode de fonctionnement de shuntage de la valve.

Si les calculs indiquent que les pertes du thyristor en mode de shuntage sont supérieures aux pertes du thyristor en mode capacitif amplifié, il convient de procéder à l'essai de shuntage suivant 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 de l'essai à intensité capacitive maximale.

$$I_{\text{bypass}} = \frac{1}{1 - \omega^2 \times L \times C} \times I_L \times k_{s5}$$

où

- I_L est le courant de ligne à surcharge temporaire maximale, le CSCT étant shunté;
- L est l'inductance de la branche LC du CSCT;
- C est la capacitance de la branche LC du CSCT;
- k_{s5} est un facteur de sécurité d'essai;
- $k_{s5} = 1,05$.

L'essai doit durer 2 fois la durée de surcharge temporaire spécifiée ou 30 min au maximum après stabilisation de la température du liquide de refroidissement.

• Procédure d'essai

Les essais doivent être réalisés à l'aide de 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) augmenter le courant source à la valeur d'essai. Maintenir le fonctionnement pendant la durée spécifiée de l'essai.

7.3.3.3.2 Essai au courant de défaut

Les essais au courant de défaut ont pour principal objet de démontrer la capacité de la valve à supporter les contraintes maximales de courant, de tension et de température générées par des courants de court-circuit.

Les essais doivent démontrer que la valve est capable de:

- conduire le courant de défaut maximal suite à un défaut de ligne de transmission interne tant que le commutateur de shuntage parallèle n'est pas fermé, en commençant par la température de fonctionnement maximale en régime stabilisé. Aucun blocage subséquent n'est requis.
- conduire le courant de défaut maximal suite à un défaut externe tant que le défaut n'est pas corrigé par l'ouverture des disjoncteurs de ligne dans la durée normale d'élimination d'un défaut, en commençant par la température maximale. Un blocage après la durée d'élimination d'un défaut est requis. Cela s'applique uniquement si la valve CSCT est utilisée pour le shuntage en cas de défauts externes.

7.3.3.3.2.1 Courant de défaut sans blocage subséquent

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 isoler la partie saine du réseau à partir du point défaillant. 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 subséquente n'apparaît sur la valve CSCT après la conduction du courant de défaut.

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.

- **Procédure d'essai**

Les essais doivent être réalisés à l'aide de 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 stabilisé;
- b) appliquer le courant d'essai pendant la durée spécifiée.

7.3.3.3.2 Courant de défaut avec blocage subséquent

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 d'essai et la tension d'essai doivent soumettre la valve/section de valve CSCT à une contrainte 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 subséquente. 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 au niveau de l'instance lorsque la tension est de nouveau appliquée.

- **Procédure d'essai**

Les essais doivent être réalisés à l'aide de 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 stabilisé.
- b) Appliquer le courant d'essai pendant la durée spécifiée.
- c) Appliquer la tension d'essai.

7.4 Essais du système de protection et de commande

Le système de protection et de commande du CSCT est soumis à des essais individuels, des essais de type et des essais spéciaux. Les essais de type ont pour objet de vérifier la bonne conception des équipements, ainsi que leur aptitude à fonctionner dans les conditions ambiantes spécifiées et à satisfaire aux exigences spécifiées en matière de performances et de compatibilité électromagnétique. Les essais fonctionnels doivent inclure des simulations permettant de démontrer le bon fonctionnement du système de commande et de protection pour tous les modes de fonctionnement spécifiés. Ces simulations peuvent être aisément réalisées lorsque le système de commande et de protection est connecté à un simulateur de réseau (numérique) en temps réel permettant de simuler différentes conditions du système. Il convient que la simulation des performances du système de commande et de protection démontre le fonctionnement du CSCT au cours des modes de fonctionnement spécifiés.

Sauf indication contraire, la coordination doit être établie avec la CEI 60068-2-2 et la CEI 60068-2-78 pour les conditions d'environnement, la CEI 60255-21 pour les essais mécaniques, la CEI 60255-5 pour les essais diélectriques, la CEI 61000-4-11 et la CEI 61000-4-29 pour les variations de tension de l'alimentation auxiliaire et la CEI 61000-4 pour les exigences de compatibilité électromagnétique.

7.4.1 Essais individuels

Les essais suivants doivent au moins être réalisés.

- a) Contrôle visuel
- b) Essai de tenue diélectrique (CEI 60255-5)
- c) Essai de déverminage de 100 h
- d) Essai opérationnel

L'essai spécifié doit s'appliquer à la partie de l'équipement située sur la plate-forme, aux équipements de communication entre la plate-forme et le sol et à la partie au sol de l'équipement.

Les essais ont pour objet de vérifier la qualité de fabrication de tous les composants et de l'assemblage complet.

7.4.1.1 Essai opérationnel

La procédure consiste à injecter des signaux simulant les conditions devant faire l'objet d'une action de protection dans chaque entrée de commande. Chaque sortie est contrôlée pendant ces essais. Tous les paramètres matériels et logiciels sont vérifiés. Les paramètres logiciels peuvent être vérifiés par des techniques logicielles.

Si une communication optique est utilisée entre la plate-forme et le sol, la puissance de sortie des émetteurs doit être vérifiée.

Un essai de perte optique doit être réalisé sur chaque fibre des isolateurs de communication entre la plate-forme et le sol.

7.4.2 Essais de type

Les essais de type suivants doivent au moins être réalisés.

- a) Essais d'environnement: Essai de chaleur sèche et essai de chaleur humide (CEI 60068-2-2 et la CEI 60068-2-78)
- b) Essai diélectrique (CEI 60255-5)
- c) Essais de compatibilité électromagnétique (CEI 61000-4)
- d) Essai mécanique (CEI 60255-21)

L'essai spécifié doit s'appliquer à la partie de l'équipement située sur la plate-forme, aux équipements de communication entre la plate-forme et le sol et à la partie au sol de l'équipement.

NOTE Les essais préalables à la mise en service sur site, réalisés sur les équipements de protection du relais, les équipements de commande et les équipements de communication entre la plate-forme et la terre, sont en principe spécifiés. Ces essais sont réalisés avant de mettre la batterie sous tension dans le réseau haute tension.

7.4.3 Essais spéciaux

7.4.3.1 Essai en temps réel du système de protection et de commande avec un simulateur de réseau

L'essai en temps réel du système de protection et de commande avec un simulateur de réseau est facultatif.

Il est recommandé d'utiliser un simulateur de réseau (numérique) en temps réel pour vérifier le fonctionnement correct et prévu du système de protection et de commande. L'essai est facultatif, en fonction de la disponibilité de ce type de système de simulation.

Le système de protection et de commande est connecté à un simulateur de réseau. Tous les signaux applicables sont connectés entre le système de commande et le simulateur. La conception du réseau en cours de simulation repose sur les données disponibles du réseau

réel. Les fonctions de protection et de commande sont soumises à essai en fonction des exigences du système et des fonctions spécifiées. Les données de réseau enregistrées sont injectées dans la simulation, si elles sont disponibles et applicables. La Figure 9 illustre un schéma fonctionnel classique de ce type de système de simulation.

Le réseau de la simulation peut être en partie remplacé par les données enregistrées d'un réseau existant injectées dans la simulation. Dans ce cas, il doit être pris en compte que le fonctionnement du contrôleur CSCT n'affecte pas la partie du réseau remplacée par les signaux enregistrés.

Le dimensionnement correct de l'équipement HT est vérifié par contrôle des valeurs de tension et de courant pendant les simulations des pires situations. La vérification implique la modélisation détaillée de l'équipement HT du CSCT dans la simulation.

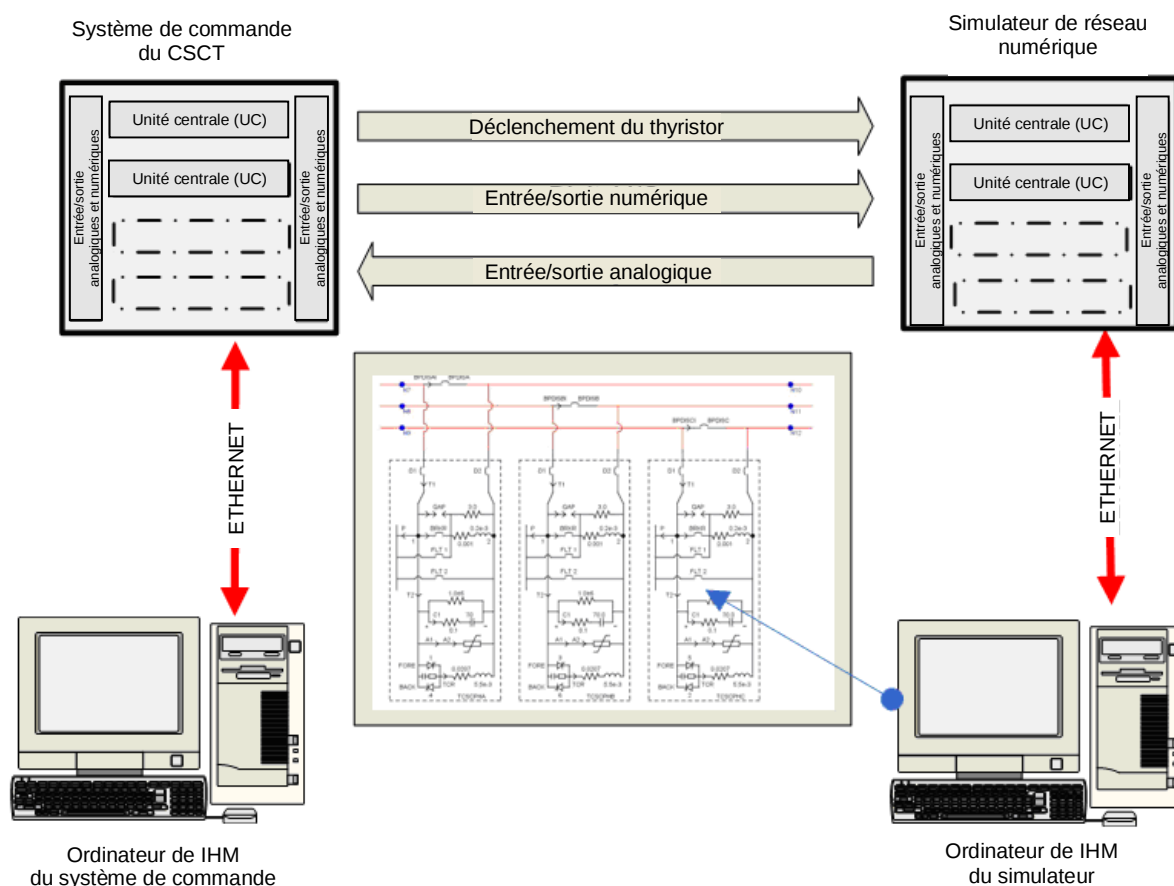


Figure 9 – Schéma fonctionnel classique de l'environnement de simulation du système de protection et de commande en temps réel du CSCT

8 Lignes directrices pour la sélection des caractéristiques assignées et pour l'exploitation

8.1 Généralités

Il convient que l'acheteur indique les conditions générales et les objectifs de la conception et du fonctionnement de l'installation de CSCT, y compris:

Domaine d'application du projet: Il convient que l'acheteur définisse l'étendue de la fourniture à fournir par l'acheteur et le fournisseur pour l'ensemble du projet CSCT.

Etudes d'application: Il convient que l'acheteur définisse la documentation technique sur laquelle doit s'appuyer le fournisseur.

Conception des systèmes: Il est dans l'intérêt de l'acheteur de permettre au fournisseur de concevoir l'ensemble de l'installation de CSCT en fonction des exigences de spécification.

Il convient que l'acheteur:

- a) indique les exigences en matière de performances souhaitées du système CSCT;
- b) fournisse les plans de disposition des éléments (des postes existants) ou définisse les cotes maximales (des nouveaux postes) ;
- c) précise si le bâtiment de commande est placé sous la responsabilité de l'acheteur, du fournisseur ou de tiers ;
- d) demande au fournisseur d'offrir un plan général des équipements de commande au sol, et des exigences de refroidissement et d'alimentation électrique des équipements de commande ;
- e) indique toute habitude interne de conception qui peuvent avoir une influence sur le fonctionnement et la maintenance de l'installation: équipements basse tension, code de couleurs utilisés (le cas échéant), règles de sécurité, outils, symboles IHM, etc.

Fourniture des équipements: Il convient que l'acheteur définisse clairement l'étendue de la fourniture des équipements. En règle générale, il est de l'intérêt de l'acheteur de demander au fournisseur de concevoir et de fournir l'ensemble du système, y compris tous les équipements montés sur la plate-forme, commandes, commandes de communication avec le sol, équipements de refroidissement du thyristor et commutateur de shuntage.

- **Installation**

Il convient que l'acheteur:

- a) définisse les limites de surface et l'emplacement des lignes aériennes, utilitaires et routes existants et à venir;
- b) indique la personne qui délivre les permis obligatoires et les études géotechniques;
- c) indique la personne qui assure la préparation du site et fournit le système de mise à la terre, les fondations, les clôtures, la plate-forme, la structure requise, le jeu de barres et les commutateurs, le bâtiment de commande et les équipements CSCT installés, soumis à essai et mis en service.

- **Essais et mise en service, maintenance, formation et documentation**

Il convient que l'acheteur:

- 1) définisse les exigences en matière d'essai et de mise en service du fournisseur;
- 2) définisse la formation requise de l'opérateur, les manuels de formation et d'exploitation et les manuels d'instruction;
- 3) demande au fournisseur un plan de maintenance recommandé et les dispositions du contrat de garantie.

- **Liste des normes applicables**

Il convient que l'acheteur fournisse une liste récapitulative des normes en fonction desquelles l'installation du CSCT doit être conçue, fabriquée et soumise à essai. Le cas échéant, il convient de référencer chacune des normes répertoriées dans les articles appropriés de la spécification du CSCT.

- **Conditions de service du site**

Il convient que l'acheteur spécifie les conditions de service du site d'installation du CSCT, quant aux caractéristiques assignées de courant, de tension, de fréquence et de séquence de défaut spécifiées, notamment: l'altitude, la température ambiante, la surcharge de glace, la vitesse du vent, les conditions sismiques, l'enneigement, l'exposition à la poussière, l'exposition au sel (fumées ou vapeurs nuisibles), les essais d'insectes, les volées d'oiseaux, les conditions nécessitant un isolement supplémentaire ou une distance de fuite supplémentaire sur les isolateurs, les courants harmoniques continus dans le réseau, les conditions de transport ou de stockage inhabituelles, les lignes non transposées, etc.

8.2 Condensateur série commandé par thyristors

8.2.1 Système de transmission d'énergie en courant alternatif

NOTE Le présent paragraphe contient des extraits tirés de l'IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors (disponible en anglais seulement), Copyright IEEE 2002. Tous droits réservés.

Il convient que l'acheteur précise les caractéristiques électriques de la ligne de transmission compensée et du système de transmission d'énergie en courant alternatif associée, y compris:

- a) Tension entre phases assignée:
 - 1) Permanente
 - 2) Tension et durée de fonctionnement maximale
- b) Fréquence assignée:
 - 1) Puissance industrielle permanente et variations en régime stabilisé
 - 2) Variations et durée de la puissance industrielle transitoire
- c) Niveaux d'isolement électrique (phase-terre):
 - 1) Tension de tenue au choc (TTC)
 - 2) Niveau de tenue de surtension de manœuvre humide
 - 3) Tension de tenue à la puissance industrielle (1 min)
 - 4) Ligne de fuite et niveau de pollution spécifiques
- d) Données du système:

Il convient que l'acheteur fournisse les données de ligne de transmission et les informations relatives au système permettant au fournisseur de procéder aux études spécifiées et de concevoir l'équipement CSCT.

- Court-circuit équivalent pour les caractéristiques assignées.
- Dynamique équivalente pour les études AOP, le cas échéant.
- Données sur le générateur et la turbine pour les études de résonance hyposynchrone, le cas échéant.

8.2.2 Objectifs opérationnels du CSCT

NOTE Le présent paragraphe contient des extraits tirés de l'IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors (disponible en anglais seulement), Copyright IEEE 2002. Tous droits réservés.

Il convient que l'acheteur indique toutes les conditions particulières d'exploitation et les événements système pour lesquels les composants et équipements du CSCT doivent être conçus et exploités, y compris le niveau de tension d'influence radio, les décharges partielles et le niveau de bruit audible.

Les principaux objectifs opérationnels susceptibles de motiver une application CSCT sont les suivants:

a) Considérations liées à la résonance hyposynchrone (SSR):

Il convient d'impliquer le fournisseur du CSCT dans les études de résonance hyposynchrone, si elles indiquent que les condensateurs fixes offrant le niveau de compensation souhaité engendrent des problèmes liés à la SSR.

b) Commande d'amortissement des oscillations de puissance (AOP)

Les oscillations de courant du système accompagnant la modulation de la réactance du CSCT par le AOP créent une oscillation de tension dans le CSCT. Les contraintes de tension du CSCT annulent un ordre de réactance inacceptable. Par conséquent, il est impératif que les études du système tiennent compte de cette limitation.

c) Stabilité transitoire

d) Contrôle du courant ou de la puissance

e) Contrôle de la tension

8.2.3 Caractéristiques assignées du CSCT

Il convient que l'acheteur indique les surcharges permanentes, de shuntage, temporaires et dynamiques du CSCT et les exigences d'exploitation en cycle de service. Il est recommandé de présenter ces paramètres dans un graphique (voir la Figure 5 et la Figure 10).

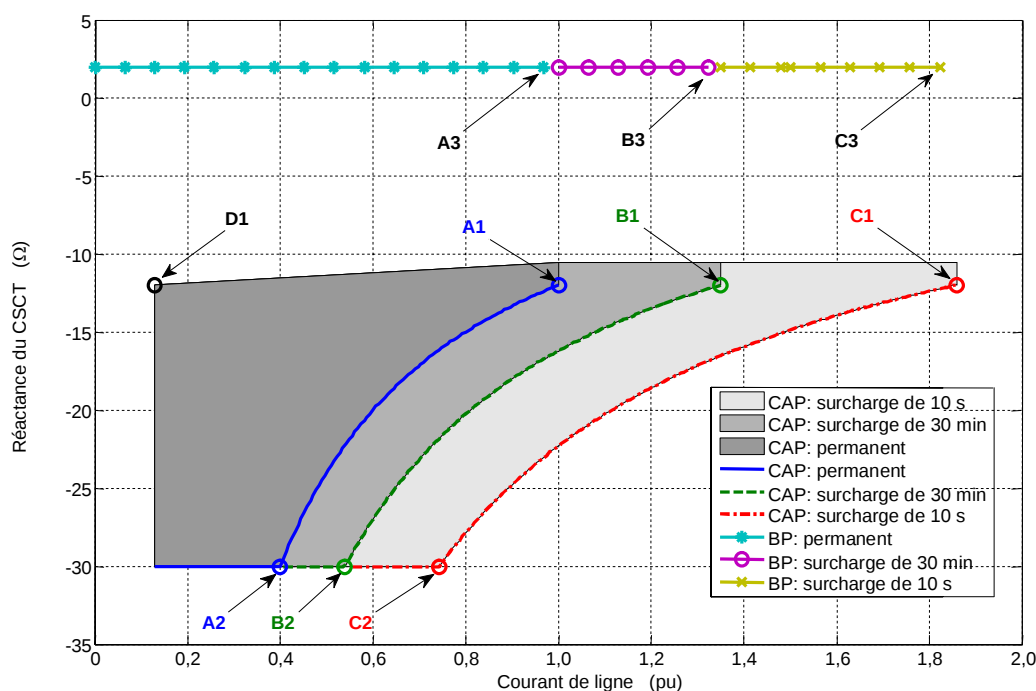


Figure 10 – Exemple de diagramme de plage de fonctionnement du CSCT

Il convient de définir les paramètres de fonctionnement suivants pour la réactance capacitive et les modes de fonctionnement de shuntage, étant donné qu'ils peuvent être très différents.

- **Fonctionnement permanent en mode CAP:**

- Courant de ligne maximal et réactance nominale du CSCT (point A1)

- Réactance maximale ou facteur d'amplification avec courant de ligne correspondant (point A2)
- Courant minimal pour lequel la valve à thyristors reste opérationnelle
- **Fonctionnement en surcharge temporaire en mode CAP (30 min en général):**
 - Courant de ligne maximal et réactance nominale du CSCT (point B1)
 - Réactance maximale ou facteur d'amplification avec courant de ligne correspondant (point B2)
 - Durée de la surcharge temporaire
- **Fonctionnement en surcharge dynamique en mode CAP (10 s en général):**
 - Courant de ligne maximal et réactance nominale du CSCT (point C1)
 - Réactance maximale ou facteur d'amplification avec courant de ligne correspondant (point C2)
 - Durée et fréquence de la surcharge dynamique
- **Fonctionnement permanent en mode BP:**
 - Courant de ligne maximal (point A3)
- **Fonctionnement en surcharge temporaire en mode BP (30 min en général):**
 - Courant de ligne maximal (point B3)
 - Durée de la surcharge temporaire
- **Fonctionnement en surcharge dynamique en mode BP (10 s en général):**
 - Courant de ligne maximal (point C3)
 - Durée et fréquence de la surcharge dynamique

8.3 Valves à thyristors

NOTE Le présent paragraphe contient des extraits tirés de l'IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors (disponible en anglais seulement), Copyright IEEE 2002. Tous droits réservés.

Il convient que le fournisseur conçoive les valves à thyristors de manière à satisfaire aux exigences de fonctionnement et de caractéristiques assignées de l'installation de CSCT. Les éléments de conception dont il convient que l'acheteur tienne compte lors de la spécification des valves à thyristors du CSCT sont les suivants:

- a) Maintenance
 - 1) Outils, manipulation et équipements de maintenance
 - 2) Fréquence des périodes de maintenance
 - 3) Moment de remplacement d'un niveau de thyristor individuel
- b) Dispositions en matière de surveillance et de diagnostic indiquant le nombre et la position d'un thyristor défaillant
- c) Facteurs de redondance
- d) Eléments de commande
- e) Exigences électriques du système de refroidissement
- f) Eléments de conception mécanique
- g) Essais de type
- h) Essais individuels

8.4 Condensateurs et bobines d'inductance

NOTE Le présent paragraphe contient des extraits tirés de l'IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors (disponible en anglais seulement), Copyright IEEE 2002. Tous droits réservés.

Dans la mesure du possible, il est recommandé que l'acheteur se réfère aux normes CEI applicables pour connaître les exigences en matière de conception, de fabrication et d'essais du condensateur CSCT et de la bobine d'inductance.

Il convient que l'acheteur considère les exigences générales suivantes:

- a) Pour simplifier la maintenance et le stockage des pièces détachées, il convient que les composants du condensateur et de la bobine d'inductance fournis par le fournisseur soient dotés de composants interchangeables identiques.
- b) Il convient d'équiper les composants d'œilletons de levage ou de dispositifs analogues permettant de soulever les unités et de faciliter le transport, l'installation et la maintenance.
- c) Il convient de doter les isolateurs support utilisés pour monter les composants du condensateur CSCT et de la bobine d'inductance d'une ligne de fuite et d'une distance d'isolement suffisantes afin d'assurer la fiabilité d'exploitation et de maintenance de l'équipement.
- d) Il convient que les caractéristiques assignées du courant des condensateurs et des bobines d'inductance soient fonction de la somme des carrés du courant aux fréquences industrielles et harmoniques de l'équipement.

8.4.1 Considérations relatives au condensateur

Les condensateurs du CSCT doivent être conçus, fabriqués et soumis à essai conformément aux exigences de la CEI 60143-1.

8.4.2 Considérations relatives à la bobine d'inductance

Il convient que les bobines d'inductance de thyristor CSCT soient conçues, fabriquées et soumises à essai conformément aux exigences de la CEI 60143-2. Il convient que l'acheteur considère les exigences générales suivantes:

- a) Les bobines d'inductance à air sont entourées d'un champ magnétique créé par les ampères-tours de l'enroulement. Il convient que le fournisseur tienne compte de l'emplacement de la bobine d'inductance par rapport aux structures métalliques eu égard aux effets de réchauffement inductif en fonctionnement normal ou aux forces couplées lors du court-circuit de la bobine d'inductance.
- b) Le bruit acoustique dans le champ auditif du spectre acoustique peut être généré suite à des vibrations dans la bobine d'inductance du thyristor en raison de la présence de courants harmoniques. Le cas échéant, il convient que l'utilisateur indique les critères et niveaux maximaux admis de bruit acoustique.

8.5 Cycles de service de défaut pour les caractéristiques assignées de la varistance

Il est essentiel que l'acheteur indique clairement les cycles de service de défaut du CSCT. Une manière consiste à utiliser des tableaux (voir du Tableau 2 au Tableau 4).

Tableau 2 – Cycle de service de défaut externe classique avec échec de la refermeture automatique à grande vitesse

Durée ms	Événement du réseau	Action du condensateur série commandé par thyristors
0,0	Application de défaut	-
0,0 à 100	Le défaut persiste	La supervision du courant de ligne du CSCT détecte un courant de ligne élevé et shunte le CSCT par l'intermédiaire de la valve à thyristors
100,0	Les disjoncteurs de ligne éliminent le défaut	
100,0 à 600,0	Flux de puissance dans la ligne	Le CSCT est réinséré
600,0	Les disjoncteurs de ligne se referment dans le défaut	-
600,0 à 700,0	Le défaut persiste	La supervision du courant de ligne du CSCT détecte un courant de ligne élevé et shunte le CSCT par l'intermédiaire de la valve à thyristors
700,0	Les disjoncteurs de ligne éliminent le défaut et se verrouillent	
700,0 à -		Le CSCT est réinséré

Tableau 3 – Cycle de service classique pour le défaut interne avec succès de la refermeture automatique à grande vitesse

Durée ms	Événement du réseau	Action du condensateur série commandé par thyristors
0,0	Application de défaut	-
0,0 à 100	Le défaut persiste	La supervision du courant de ligne du CSCT détecte un courant de ligne élevé et shunte le CSCT par l'intermédiaire de la valve à thyristors et du commutateur de shuntage
100,0	Les disjoncteurs de ligne éliminent le défaut	Le condensateur série reste shunté
100,0 à 600,0	La ligne est déconnectée	
Le défaut disparaît	Le condensateur série reste shunté	
600,0	Les disjoncteurs de ligne se referment	-
600,0 à -		Le condensateur série est réinséré

Tableau 4 – Cycle de service classique pour le défaut interne avec échec de la refermeture automatique à grande vitesse

Durée ms	Événement du réseau	Action du condensateur série commandé par thyristors
0,0	Application de défaut	-
0,0 à 100	Le défaut persiste	La supervision du courant de ligne du CSCT détecte un courant de ligne élevé et shunte le CSCT par l'intermédiaire de la valve à thyristors et du commutateur de shuntage
100,0	Les disjoncteurs de ligne éliminent	Le condensateur série reste shunté

Durée ms	Événement du réseau	Action du condensateur série commandé par thyristors
	le défaut	
100,0 à 600,0	La ligne est déconnectée	Le condensateur série reste shunté
600,0	Les disjoncteurs de ligne se referment dans le défaut	-
600,0 à 700,0	Le défaut persiste	La réinsertion du condensateur série est interdite par son système de supervision du courant de ligne
700,0	Les disjoncteurs de ligne éliminent le défaut et se verrouillent	

8.6 Système de refroidissement de la valve

NOTE Le présent paragraphe contient des extraits tirés de l'IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors (disponible en anglais seulement), Copyright IEEE 2002. Tous droits réservés.

Le système de refroidissement de la valve à thyristors a pour objet de supprimer la chaleur générée par la valve à thyristors. Il convient que le système de refroidissement soit intégralement équipé de tuyauteries, de canalisations, de pompes de circulation, de réservoirs d'appoint, d'échangeurs thermiques, de filtres, d'instrumentations, de commandes automatiques, d'alarmes, de systèmes d'alimentation de commande et d'autres équipements nécessaires. Pour les applications CSCT normales, seul le refroidissement par liquide est applicable.

Il convient que le transfert thermique du système à fluide fermé vers le système ambiant ait lieu dans un échangeur thermique eau-air ou eau-eau. Certaines exigences importantes du système de refroidissement sont les suivantes:

- Pompes redondantes: une pompe fonctionne normalement et une pompe redondante est en veille. Il convient de concevoir le système de refroidissement de manière à pouvoir travailler sur le bloc-pompe défectueux sans arrêter le CSCT.
- Système d'épuration: il convient de concevoir le système d'épuration de manière à maintenir la résistivité de l'eau au-dessus du niveau requis. De l'eau d'une grande pureté est requise pour la valve à thyristors en raison de la différence de potentiel entre le sol et la position de la valve. Highly purified water is required for the thyristor valve cooling because of the potential difference between ground and valve potential.
- Antigel: en cas de température extérieure basse, l'eau peut être mélangée à du glycol afin d'empêcher le gel du liquide de refroidissement.
- Remplacement: il convient de concevoir les filtres et matériels de désionisation de manière à pouvoir les remplacer dans un temps relativement court sans arrêter le dispositif de refroidissement.
- Isolement du CSCT: l'eau déionisée permet de refroidir la valve à thyristors en raison de la différence de potentiel entre le sol et la position de la valve.

8.7 Commande et protection du CSCT

NOTE Le présent paragraphe contient des extraits tirés de l'IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors (disponible en anglais seulement), Copyright IEEE 2002. Tous droits réservés.

Il convient que l'acheteur précise les exigences en matière de commande et de protection du CSCT.

8.7.1 Commande

Il convient de spécifier les systèmes de commande du CSCT de manière à correspondre aux objectifs de commande spécifiques auxquels doit répondre le contrôleur. Il convient que les objectifs du système de commande du CSCT indiqués par l'acheteur incluent:

- a) Les modes de commande requis
- b) Le mode manuel pour les essais et la maintenance sur site
- c) L'arrêt d'urgence initié par l'opérateur (local et distant)
- d) Les mesures de tension, de courant, de réactance et de puissance réactive
- e) La synchronisation pour la génération appropriée d'impulsions d'allumage vers les valves à thyristors
- f) La séquence de démarrage et d'arrêt
- g) La surveillance
- h) L'auto-supervision de la commande
- i) La protection de la batterie de condensateur

8.7.1.1 Fonctions de commande

En règle générale, différents niveaux et stratégies de commande hiérarchiques sont nécessaires pour répondre aux fonctions spécifiées de commande des performances. Les stratégies et paramètres de commande peuvent varier en fonction de la configuration du réseau à courant alternatif et sont spécifiques aux objectifs du projet. Il convient de valider l'efficacité d'une fonction de commande particulière du CSCT par des études, simulations et essais appropriés. Les fonctions de commande classiques des applications CSCT incluent la commande de la réactance, du débit de courant (de l'énergie), la réduction de la SSR, la commande de l'amortissement des oscillations de puissance, de la tension et la commande en boucle ouverte.

8.7.1.2 Structure de commande

Plusieurs sous-segments contrôlables du CSCT peuvent être spécifiés par l'acheteur ou fournis par le fournisseur en fonction des objectifs du projet. Pour faciliter la coordination entre les sous-segments contrôlables et assurer la réactance nette appropriée, le système de commande du CSCT est en général structuré en plusieurs niveaux qui peuvent être définis de la manière suivante: commande centrale (CC) (niveau supérieur), commande de sous-segment (niveau inférieur), composants électroniques de base (VBE) et composants électroniques (VE).

- **Commande centrale**

Les fonctions principales sont:

- a) Sélection du mode de commande: Les deux principaux modes sont la commande de la réactance et la commande du courant (de l'énergie), d'autres fonctions de commande étant disponibles de manière sélective (pour l'opérateur).
- b) Point de consigne et ordre de transmission: une référence peut reposer sur le mode de commande sélectionné (dans le cas de la commande de circulation de l'énergie, le régulateur capte le flux réel et ajuste la réactance au point de consigne).
- c) Signaux de courant et de tension: Le courant et la tension de ligne provenant de tous les sous-segments sont mesurés et envoyés par interface à fibre optique à la commande. Il est recommandé d'inclure tous les instruments, toutes les mesures et tous les câblages dans le domaine d'application du projet destiné au fournisseur pour des raisons de compatibilité avec les commandes à fournir.
- d) Coordination de sous-segment: Les sous-segments contrôlables doivent être coordonnés en fonction de leur disponibilité afin de correspondre à la réactance nette appropriée et d'établir les priorités afin de répondre aux objectifs de commande.
- e) Définition de la priorité: selon la disponibilité de chaque sous-segment et des informations reçues relatives à l'état, il convient que la commande centrale définisse les priorités de chaque sous-segment contrôlable.

- f) Verrouillage: l'acheteur peut demander un verrouillage afin d'empêcher certaines opérations involontaires (une opération simultanée, locale et à distance ou du disjoncteur, par exemple).
- g) Information relatives à l'état: il convient d'interfacer l'état des sous-segments contrôlables reçu d'une commande de niveau inférieur avec l'unité terminale distante (UTD), le système d'acquisition et de contrôle des données (SCADA) et le sous-système d'interface de l'opérateur.

8.7.1.3 Niveaux de fonctionnement

Il convient de spécifier la commande de l'installation du CSCT pour le fonctionnement au niveau local et distant (le cas échéant). Il convient de pouvoir sélectionner l'opération locale ou à distance à l'aide d'un commutateur matériel ou de l'interface de l'opérateur.

8.7.1.4 Procédure de démarrage

Les procédures de démarrage et d'arrêt sont indispensables pour garantir l'insertion en toute sécurité des équipements du CSCT dans le système de transmission. Une procédure de démarrage classique est composée des étapes suivantes:

- a) Confirmation de l'absence d'alarmes de protection
- b) Ouverture des commutateurs d'isolement de mise à la terre externe et fermeture des commutateurs d'isolement de l'isolation externe.
- c) Rapport de la supervision du courant de ligne (courant minimal, alimentation active de la plate-forme, etc.)
- d) Ouverture du commutateur d'isolement du shuntage externe
- e) Sélection du mode de commande (mode veille par défaut ou blocage)
- f) Sélection de la référence
- g) Exécution de la commande de démarrage permettant d'ouvrir le commutateur de shuntage de la batterie de condensateur pour insertion, puis activation de la commande.

8.7.1.5 Interface de l'opérateur

Il convient que l'acheteur précise l'interface de l'opérateur requise pour faire fonctionner le contrôleur CSCT en local, ainsi que l'interface dotée des sous-systèmes SCADA et UTD. Cette interface doit contenir des fonctions comme les exigences de HMI, le panneau mosaïque ou des ajouts à des commandes de poste existantes. Il est recommandé que l'interface de l'opérateur ait les caractéristiques minimales suivantes:

a) Sélection et exécution:

- Arrêt d'urgence
- Mode de commande
- Mode de fonctionnement
- Point de consigne ou référence
- Ouverture/fermeture des disjoncteurs et des commutateurs d'isolement

Pour empêcher tout mauvais fonctionnement, il est recommandé que le processus de sélection et d'exécution implique une opération en deux étapes, au cours de laquelle la confirmation de la fonction sélectionnée doit être reçue et confirmée avant son exécution.

b) Affichage des informations:

- Paramètres du système (paramètres et seuils de commande)
- Point de consigne ou ordre de transmission
- Confirmation du mode de commande sélectionné

- Informations sur le système (rapport de déséquilibre du courant, énergie, température de la varistance, refroidissement, etc.)
- Etat du CSCT (position des dispositifs de commutation, conduction du thyristor, tendance après surcharge, temps de reprise du fonctionnement normal, etc.)

c) Modification des paramètres du système:

Il convient de pouvoir modifier certains paramètres, seuils et conditions du système (la température de la varistance, par exemple) par l'intermédiaire de cette interface, et par du personnel qualifié uniquement.

d) Réinitialisation:

L'acheteur peut décider d'avoir la possibilité de réinitialiser le système de commande à partir de l'interface de l'opérateur, en complément du bouton prévu à cet effet placé sur le panneau de commande.

e) Diagnostics:

Outre la supervision permanente de l'état de la batterie de CSCT, il convient de l'auto-surveiller en permanence. Il convient que les messages et indications résultant de ces diagnostics identifient le travail de maintenance ou de réparation nécessaire. Outre les informations relatives au système de commande du CSCT, il convient de fournir des informations sur:

- les redondances des équipements;
- les sources de tension (alternatives et continues);
- la ligne de transmission.

8.7.2 Protection

Certaines fonctions de protection et de commande du CSCT sont analogues à celles requises pour l'installation d'une batterie de condensateur série fixe. Les fonctions de protection et de commande qu'il convient de prendre en compte pour un CSCT sont les suivantes:

a) Protection des équipements CSCT contre les surcharges issues des conditions du système:

- Surcharge du condensateur
- Surcharge de la varistance
- Protections de l'éclateur shunt
- Surintensité de la valve à thyristors
- Surtension de la valve à thyristors
- Température de jonction du thyristor (calculée)
- Surcharge de la bobine d'inductance du thyristor

b) Fonctions de protection associées à une défaillance des équipements CSCT:

- Déséquilibre du condensateur
- Contournement de la plate-forme
- Défaillance de la varistance
- Défaillance du commutateur de shuntage
- Désaccord de pôle
- Défaillance du thyristor
- Défaillance du sous-segment contrôlable

- Système de refroidissement
- Défaillance de l'éclateur shunt
- Défaillance du système de protection et de commande
- Défaillances du capteur de courant et de tension

c) Fonctions de commande du CSCT:

- Shuntage
- Insertion (automatique ou manuelle) et réinsertion
- Verrouillage
- Insertion du bloc temporaire
- Fonctionnement des commutateurs d'isolement

8.7.3 Surveillance et enregistrement

a) Alarmes et indications:

Il convient que l'acheteur demande d'installer des alarmes et indications suffisantes en local sur le panneau de commande du CSCT. En règle générale, l'indication fournit les informations suivantes:

- défaillance du système de commande et de protection ;
- défaillance de l'équipement de puissance ;
- condition et fonctionnement normaux du réseau (surcharge, shuntage, conduction de la varistance, par exemple).

b) Archivage:

Il convient que l'acheteur indique les exigences relatives à l'enregistreur d'événements de séquence (SER) et l'enregistrement des signaux analogiques et numériques en cas de perturbations.

8.8 Essais préalables à la mise en service et essais de mise en service

NOTE Le présent paragraphe contient des extraits tirés de l'IEEE Std 1534-2002. IEEE Std 1534-2002 IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors (disponible en anglais seulement), Copyright IEEE 2002. Tous droits réservés.

8.8.1 Introduction

Les essais et la mise en service des installations de CSCT impliquent un programme d'essai systématique commençant par des essais hors site et la réalisation d'essais de conception, d'essais de production et d'essais du système de commande en usine spécifiés. Le programme d'essai se poursuit par des essais préalables à la mise en service sur site des équipements, des essais de station et des essais de mise en service.

Les essais préalables à la mise en service impliquent des essais sur site et le contrôle des équipements individuels et des sous-systèmes, après leur installation, afin de vérifier la bonne installation, le bon réglage et le fonctionnement manuel local d'un équipement ou d'un appareil individuel. Il convient d'inclure les essais réalisés sur des transducteurs, des condensateurs, des bobines d'inductance, des résistances, des commutateurs d'isolement, des disjoncteurs, des systèmes de refroidissement, des fibres optiques, des commutateurs de mise à la terre, des appareillages de connexion, des centres de commande des moteurs, des valves à thyristors et des panneaux de commande et de protection.

Les essais de sous-système ont pour objet de vérifier indépendamment les performances fonctionnelles nécessaires de tous les sous-systèmes CSCT avant de soumettre la station à essai. Les essais de la station CSCT consistent à vérifier que les sous-systèmes interagissent

et fonctionnent conformément aux exigences spécifiées. Ces essais impliquent la mise sous haute tension de l'équipement et requièrent une coordination avec les opérateurs du système.

Les essais de mise en service consistent à soumettre l'installation de CSCT à essai, le flux de puissance du système de transmission atteignant les caractéristiques assignées de l'installation. Il convient de définir différentes configurations du système de transmission et différents niveaux de flux de puissance pour soumettre les paramètres opérationnels de l'installation de CSCT à essai et confirmer que les performances spécifiées ont été atteintes. Les essais de mise en service peuvent impliquer une période d'exploitation à l'essai suivie d'essais d'acceptation, et peuvent inclure des essais de défauts établis.

Les essais et la mise en service des installations de CSCT nécessitent de planifier les séquences, procédures et répartitions des charges d'essai. Il convient de définir les responsabilités de l'acheteur et du fournisseur en matière d'essai et de mise en service dans la spécification, ainsi que toutes les restrictions d'essai sur site dues aux contraintes opérationnelles du système, aux périodes d'indisponibilité de la ligne de transmission ou à d'autres limitations.

Il convient d'intégrer un rapport dans la documentation des résultats d'essai de mise en service, décrivant chaque série d'essais avec toutes les données d'essai pertinentes (séquence des sorties d'imprimante de l'enregistreur d'événements, enregistrements des défauts transitoires par l'enregistreur, etc.).

8.8.2 Essais préalables à la mise en service

Il convient de réaliser les essais préalables à la mise en service sur site afin de vérifier que les équipements individuels ont été correctement installés et fonctionnent avant de procéder aux essais de mise en service. Les essais préalables à la mise en service ne nécessitent pas de mise sous haute tension, mais peuvent nécessiter la mise sous tension de la station de service (alternative et continue).

En règle générale, les objectifs de la mise en service préalable incluent les essais permettant de vérifier:

- a) que l'équipement est installé conformément aux manuels d'instructions du fabricant et aux plan de conception de la station
- b) le câblage, les fibres optiques et les connexions de mise à la terre
- c) la capacitance, la réactance et les paramètres de résistance
- d) le rapport d'enroulements et les polarités du signal
- e) les contrôles de temporisation des disjoncteurs et des commutateurs
- f) la résistance de contact des commutateurs d'isolement et des disjoncteurs
- g) l'équipement de puissance de service de la station alternative et continue
- h) le système de refroidissement
- i) les équipements de commande, de protection et de surveillance
- j) l'interface de communication
- k) l'interface de communications à distance et l'interface de l'opérateur

8.8.3 Essais de station

Les essais de station CSCT consistent à soumettre la station locale à essai à l'aide de la plupart ou de tous les différents sous-systèmes. Les essais sont limités à la station locale et n'impliquent pas de planifier les transferts de puissance sur la ligne de transmission, sauf pour les besoins de puissance de service de la station. La commutation et le lancement de séquences locales doivent provenir des commandes centrales de l'opérateur. Il convient que les essais commencent sans connecter le système haute tension alternative à l'installation de CSCT, les séquences de déclenchement opérationnelles et de sécurité locales étant soumises à essai avant d'appliquer la haute tension alternative du système. Ces essais

permettent aux opérateurs du système de se familiariser avec les procédures de commutation et les interfaces de l'opérateur avant la mise sous tension réelle des équipements. Lorsque les essais de mise sous tension sont réalisés, les commutateurs de mise à la terre externes sont ouverts et les commutateurs d'isolement externes peuvent être fermés.

8.8.4 Essais (sur site) de mise en service

a) Essais de transmission:

Les essais de transmission consistent à soumettre toutes les exigences de performances à essai dans les conditions normales de fonctionnement et, si les conditions le permettent, dans les conditions de fonctionnement de secours. Il convient de soumettre à essai tous les modes de commande de l'installation de CSCT. Les essais de transmission peuvent inclure:

- Séquences de démarrage, d'insertion et de shuntage
- Fonctionnement en régime continu à courant de ligne minimal
- Séquences de blocage et de shuntage
- Opération de shuntage
- Plage de réactance à tension et courant assignés
- Tension et courant de surcharge temporaire et dynamique
- Amortissement des oscillations de puissance (le cas échéant)
- Réduction de la SSR (le cas échéant)

b) Exploitation à l'essai:

L'exploitation à l'essai offre une possibilité de fonctionnement soutenu de l'installation de CSCT avec le système en courant alternatif connecté pendant une période étendue qu'il convient de démarrer avant les périodes d'exploitation garanties. Il convient que l'acheteur indique la période d'exploitation à l'essai (de 10 à 30 jours). L'exploitation à l'essai donne une première indication à l'acheteur de la disponibilité de l'installation de CSCT dans les conditions de fonctionnement réelles. Il convient que l'exploitation à l'essai vérifie que l'installation de CSCT est en mesure de fonctionner en toute fiabilité avec le système en courant alternatif connecté pendant un certain temps sans dysfonctionnement. Pendant l'exploitation à l'essai, il convient que l'installation de CSCT fonctionne dans les conditions de fonctionnement prévues (par des opérateurs et des régulateurs formés, sans l'aide du fournisseur, par exemple).

Pendant l'exploitation à l'essai, il convient que l'installation de CSCT montre son aptitude à fonctionner comme indiqué en cas de perturbations dans le système en courant alternatif ou le système de communication pour lequel elle est conçue ou spécifiée. Il convient de surveiller, d'enregistrer et d'analyser toutes les perturbations se produisant pendant l'exploitation à l'essai afin de déterminer leurs causes et leur impact. Il convient d'examiner toutes les alarmes et de vérifier leur bon fonctionnement. Si possible, il convient de faire fonctionner l'installation de CSCT et le réseau en courant alternatif dans différentes configurations en régime continu pendant un certain temps.

c) Essais d'acceptation:

Il convient que les essais d'acceptation comprennent des essais de différentes exigences de performances incluses dans les spécifications d'installation de CSCT. Les essais d'acceptation vérifient les performances globales de l'installation de CSCT et démontrent que la conception est correcte et que l'installation conforme à l'exécution satisfait aux exigences des spécifications. Étant donné que les essais de défauts établis impliquent l'introduction de perturbations dans le système de transmission, l'opérateur du système doit généralement prendre la responsabilité de la planification, de la structuration et de la réalisation de ces essais.

Il convient de demander au fournisseur d'apporter son aide pour structurer les plans d'essai et de déléguer ses représentants sur site pour surveiller les procédures d'essai. Il convient de concevoir conjointement les essais réalisés entre l'opérateur du système et le fournisseur afin d'établir que les ajouts ou mises à niveau du réseau associé et du composant d'installation de CSCT satisfont aux exigences de spécification minimales, qu'ils peuvent supporter les contraintes imposées par les perturbations, fournir un environnement de travail sûr et ne dégradent pas la stabilité ou la fiabilité du système de transmission. Il convient que la réalisation satisfaisante et la documentation des essais d'acceptation donnent lieu à l'acceptation de l'installation de CSCT par le client, et incluent:

- Les caractéristiques assignées en régime continu
- Les essais de surcharge temporaire et dynamique
- Les performances d'amortissement des oscillations de puissance (le cas échéant)
- Les performances de réduction de la SSR (le cas échéant)
- Les essais de défauts établis (le cas échéant)
- Les performances harmoniques et d'interférence (le cas échéant)
- Les performances du bruit audible (le cas échéant)
- Un rapport des performances de pertes électriques
- Les performances du système de refroidissement

Bibliographie

- [1] IEEE Std 824, *IEEE Standard for Series Capacitor Banks in Power Systems*
 - [2] IEEE Std 1534, *IEEE Recommended Practice for specifying Thyristor- Controlled Series Capacitors*
 - [3] IEEE Std 1031, *IEEE Guide for the functional specification of Transmission Static var Compensators*
 - [4] CEI 60068-1, *Essais d'environnement – Partie 1: Généralités et guide*
 - [5] CEI 60721-1, *Classification des conditions d'environnement – Partie 1: Agents d'environnement et leurs sévérités*
 - [6] CEI/TS 61000-6-5, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 6-5: Normes génériques – Immunité pour les environnements de centrales électriques et de postes*
 - [7] CEI/TR 61000-1-1, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 1-1: Généralités – Section 1: Application et interprétation de définitions et termes fondamentaux*
 - [8] CEI 60068-3-3, *Essais d'environnement – Partie 3: Guide – Méthodes d'essais sismiques applicables aux matériels*
 - [9] CEI 60060-2, *Techniques des essais à haute tension – Partie 2: Systèmes de mesure*
 - [10] CEI 61000-4-2, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-2: Techniques d'essai et de mesure – Essai d'immunité aux décharges électrostatiques*
-

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