

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**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60143-4:2023



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2023 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

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

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

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

ICS 29.240.99, 31.060.70

ISBN 978-2-8322-8029-4

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

CONTENTS

FOREWORD.....	5
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms, definitions and abbreviated terms	8
3.1 Terms and definitions.....	8
3.2 Abbreviated terms.....	11
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	18
4.9.3 Duty cycles.....	18
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 General.....	20
6.2 Capacitor rating	21
6.3 Reactor rating	21
6.4 Thyristor valve rating	21
6.4.1 General	21
6.4.2 Current capability	21
6.4.3 Voltage capability	22
6.5 Varistor rating	24
6.6 Insulation level and creepage distance.....	25
7 Tests	25
7.1 General.....	25
7.2 Test of the capacitor	25
7.2.1 General	25
7.2.2 Routine tests	25
7.2.3 Type tests.....	26
7.2.4 Special test (ageing test)	26
7.3 Tests of the TCSC reactor	26
7.3.1 General	26
7.3.2 Routine tests	26

7.3.3	Type tests.....	27
7.3.4	Special tests.....	27
7.4	Tests of thyristor valves.....	27
7.4.1	General.....	27
7.4.2	Routine tests.....	27
7.4.3	Type tests.....	28
7.5	Tests of protection and control system.....	28
7.5.1	General.....	28
7.5.2	Routine tests.....	28
7.5.3	Type tests.....	29
7.5.4	Special tests – Hardware-in-the-loop (HIL) tests.....	29
8	Guidance for selection of rating and operation.....	30
8.1	General.....	30
8.2	Thyristor controlled series capacitor.....	31
8.2.1	AC transmission system.....	31
8.2.2	TCSC operational objectives.....	32
8.2.3	TCSC ratings.....	32
8.3	Thyristor valves.....	34
8.4	Capacitors and reactors.....	34
8.4.1	General.....	34
8.4.2	Capacitor considerations.....	34
8.4.3	Reactor considerations.....	34
8.5	Fault duty cycles for varistor rating.....	35
8.6	Valve cooling system.....	36
8.7	TCSC control and protection.....	36
8.7.1	General.....	36
8.7.2	Control.....	37
8.7.3	Protection.....	39
8.7.4	Monitoring and recording.....	39
8.8	Precommissioning and commissioning tests.....	40
8.8.1	General.....	40
8.8.2	Pre-commissioning tests.....	40
8.8.3	Station tests.....	41
	Bibliography.....	43
	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 apparent reactance characteristics according to Formula (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.....	30
	Figure 10 – Example of operating range diagram for TCSC.....	33

Table 1 – Peak and RMS voltage relationships	13
Table 2 – Typical external fault duty cycle with unsuccessful high speed auto-reclosing	35
Table 3 – Typical duty cycle for internal fault with successful high speed auto-reclosing	35
Table 4 – Typical duty cycle for internal fault with unsuccessful high speed auto-reclosing	36

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60143-4:2023

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) IEC draws attention to the possibility that the implementation of this document may involve the use of (a) patent(s). IEC takes no position concerning the evidence, validity or applicability of any claimed patent rights in respect thereof. As of the date of publication of this document, IEC had not received notice of (a) patent(s), which may be required to implement this document. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information, which may be obtained from the patent database available at <https://patents.iec.ch>. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 60143-4 has been prepared by IEC technical committee 33: Power capacitors and their applications. It is an International Standard.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 2010. This edition constitutes a technical revision.

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

- a) thyristor valve testing requirements refer to IEC 62823;
- b) Formula (1) in Subclause 4.2 has been corrected;
- c) Hardware-in-the-loop (HIL) tests, Subclause 7.5.4, replaces previously specified real time protection and control system test with network simulator.

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

Draft	Report on voting
33/696/FDIS	33/702/RVD

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

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

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

- IEC 60143-1:2015,
- IEC 60143-2:2012,
- IEC 60143-3:2015.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/publications.

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.

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

- reconfirmed,
- withdrawn, or
- revised.

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

SERIES CAPACITORS FOR POWER SYSTEMS –

Part 4: Thyristor controlled series capacitors

1 Scope

This part of IEC 60143 specifies the testing of thyristor controlled series capacitor (TCSC) installations used in series with transmission lines. This document 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 documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

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

IEC 60050-436, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 436: Power capacitors*

IEC 60068-2-2, *Environmental testing – Part 2-2: Tests – Tests B: Dry heat*

IEC 60068-2-78, *Environmental testing – Part 2-78: Tests – Test Cab: Damp heat, steady state*

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

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

IEC 60143-1:2015, *Series capacitors for power systems – Part 1: General*

IEC 60143-2:2012, *Series capacitors for power systems – Part 2: Protective equipment for series capacitor banks*

IEC 60143-3:2015, *Series capacitors for power systems – Part 3: Internal fuses*

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

IEC 60255-27, *Measuring relays and protection equipment – Part 27: Product safety requirements*

IEC 61000-4 (all parts), *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques*

IEC 61000-4-11, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-11: Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests for equipment with input current up to 16 A per phase*

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 62823:2015, *Thyristor valves for thyristor controlled series capacitors (TCSC) – Electrical testing*

IEC 62823:2015/AMD1:2019

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

3 Terms, definitions and abbreviated terms

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

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

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

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

3.1 Terms and definitions

3.1.1

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

3.1.2

bypass current

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

3.1.3

temporary overload

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

SEE: Figure 5 and Figure 10.

3.1.4

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.

3.1.5

thyristor-controlled series capacitor

TCSC

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

3.1.6**valve electronics****VE**

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

3.1.7**TCSC reactor**

one or more reactors connected in series with the thyristor valve

SEE: Figure 1, item 7.

Note 1 to entry: 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 overvoltage and continuous operating voltage across the thyristor valve.

3.1.8**valve blocking**

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

3.1.9**valve base electronics****VBE**

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

3.1.10**capacitor current**

I_C

current through the series capacitor

SEE: Figure 2.

3.1.11**line current**

I_L

power frequency line current

SEE: Figure 2.

3.1.12**rated current**

I_N

RMS line current (I_L) at which the TCSC should be capable of continuous operation with rated reactance (X_N) and rated voltage (U_N)

3.1.13**valve current**

I_V

current through the thyristor valve

SEE: Figure 2.

3.1.14**capacitor voltage**

U_C

voltage across the TCSC

SEE: Figure 2.

3.1.15

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 1 to entry: The protective level can 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.

3.1.16

rated TCSC voltage

U_N

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

3.1.17

apparent reactance

$X(\alpha)$

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

SEE Figure 4.

3.1.18

nominal frequency

f_N

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

3.1.19

rated capacitance

C_N

capacitance value for which the TCSC capacitor has been designed

3.1.20

physical reactance

X_C

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

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

3.1.21

boost factor

k_B

ratio of $X(\alpha)$ divided by X_C

Note 1 to entry: $k_B = X(\alpha) / X_C$

3.1.22

rated reactance

X_N

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

3.1.23 conduction interval

σ

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

SEE: Figure 3.

3.1.24 control angle

α

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

SEE: Figure 3.

3.1.25 internal fault

line fault occurring within the protected line section containing the series capacitor bank

3.1.26 external fault

line fault occurring outside the protected line section containing the series capacitor bank

3.2 Abbreviated terms

FSC	fixed series capacitors
MC	master control
POD	power oscillation damping
RTU	remote terminal unit
SCADA	supervisory control and data acquisition
SER	sequence events recorder
SSR	sub-synchronous resonance
RMS	root-mean-square
BLK	blocked (mode of operation)
BP	bypass (mode of operation)
CAP	capacitive boost (mode of operation)
HMI	human machine interface

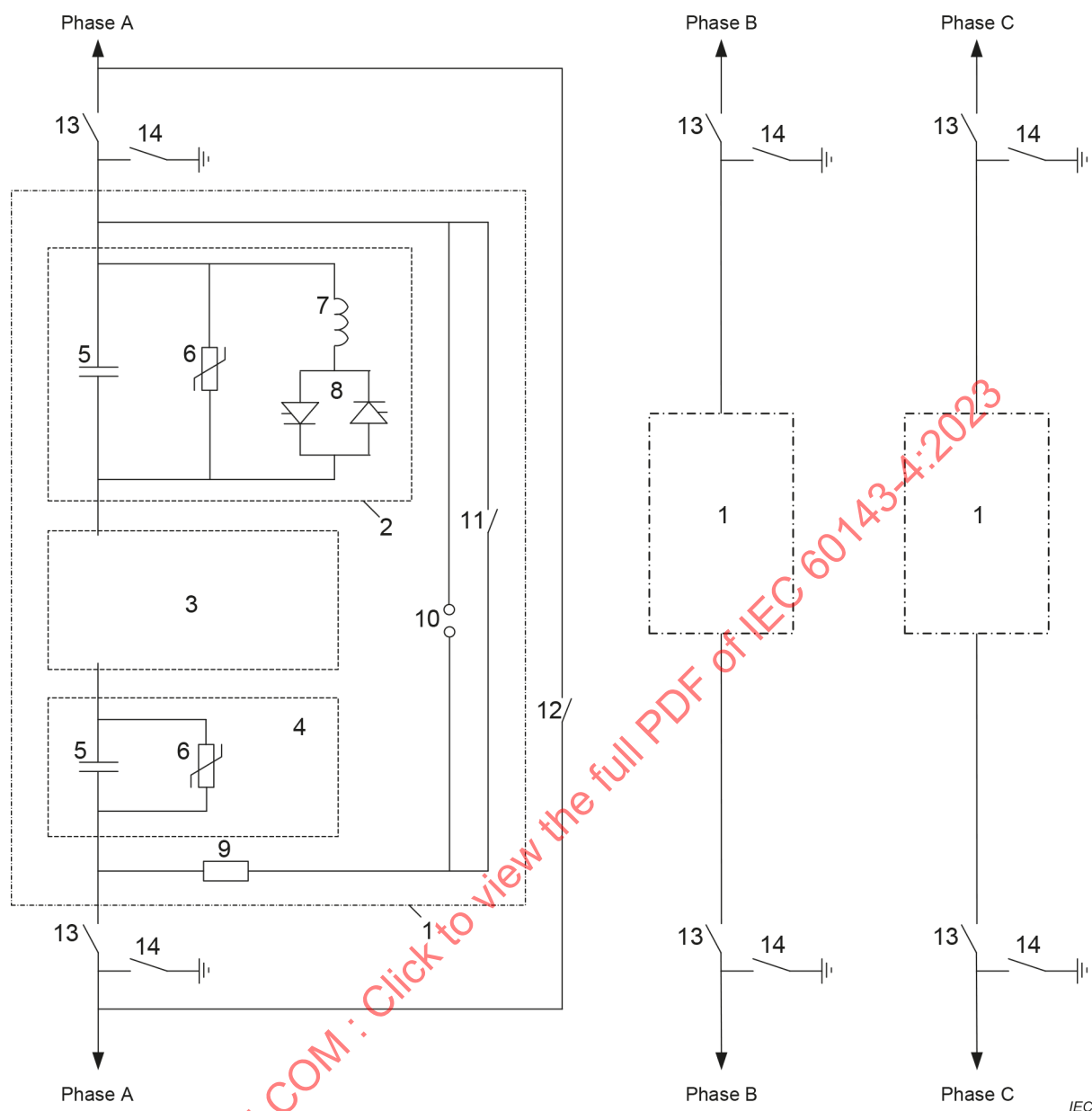
4 Operating and rating considerations

4.1 General

Transmission line series reactance can be compensated by combinations of fixed series capacitors and TCSC banks (see 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 document (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 with a capacitive boost.



Key

- | | |
|---|------------------------------------|
| 1 TCSC bank (1-phase) | 8 thyristor valve |
| 2 controllable subsegment | 9 current limiting damping circuit |
| 3 additional controllable subsegments when required | 10 bypass gap |
| 4 additional FSC segment when required | 11 bypass switch |
| 5 capacitor units | 12 external bypass disconnector |
| 6 varistor | 13 external isolating disconnector |
| 7 TCSC reactor | 14 external grounding switch |

Figure 1 – Typical nomenclature of a TCSC installation

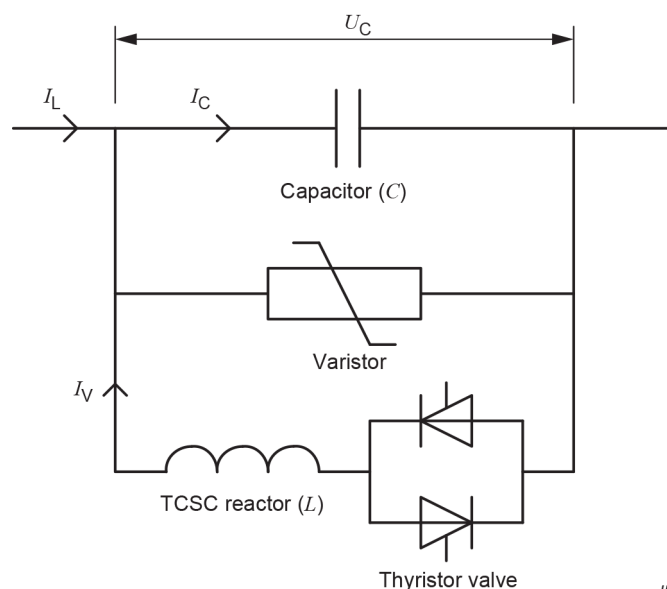


Figure 2 – TCSC subsegment

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 waveform 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 distort 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 p.u.	Power frequency RMS voltage p.u	Power frequency peak voltage p.u	Total RMS voltage p.u	Total peak voltage p.u
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

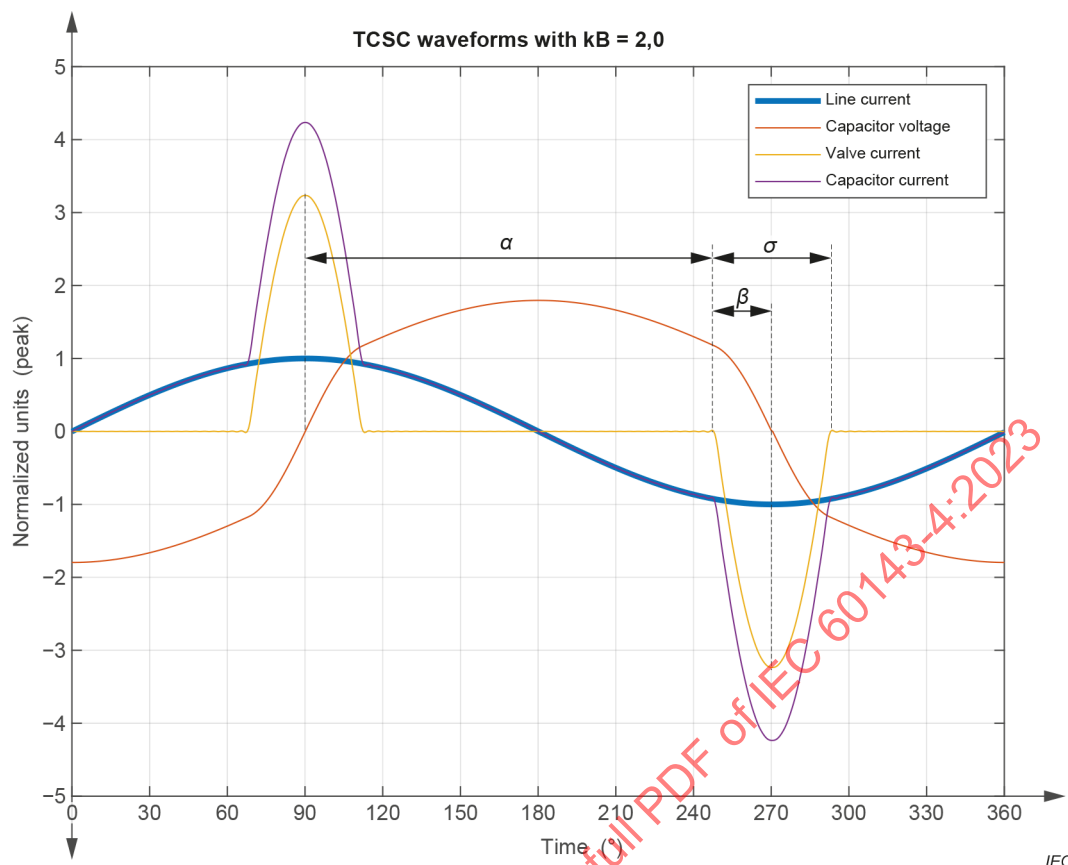


Figure 3 – TCSC steady state waveforms for control angle α and conduction interval σ

4.2 TCSC characteristics

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

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

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.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

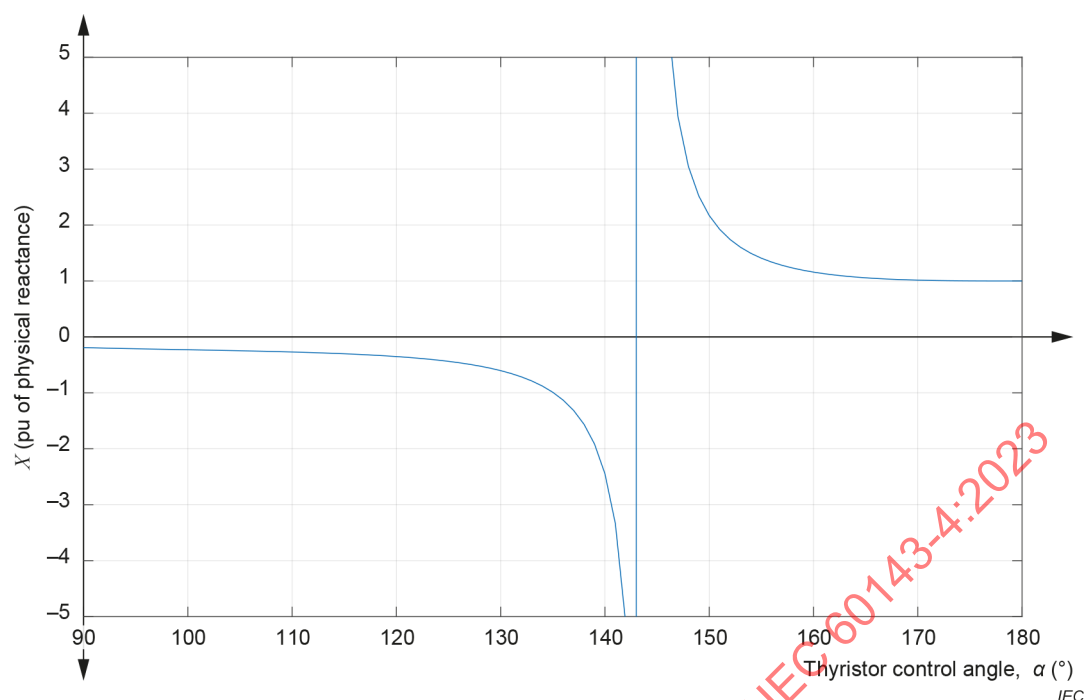
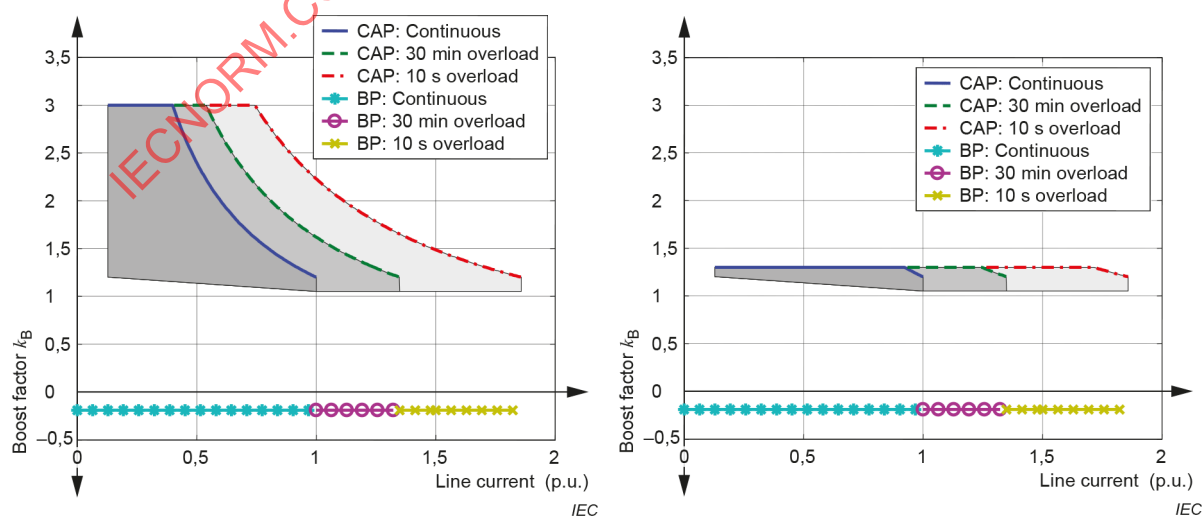


Figure 4 – TCSC apparent reactance characteristics according to Formula (1), with $\lambda = 2,5$

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 shall 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.



a) Example of TCSC operating range for POD

b) Example of TCSC operating range 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 can 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 Formulae (2) and (3):

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

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

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 rated boost (k_B), line current (I_L) equal to the rated line current and $1/\omega C$ equal to the physical reactance.

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 shall 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 shall 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 shall 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 applications where TCSC is used for SSR-mitigation or power oscillation damping purposes, the TCSC normally operates with the nominal boost factor and only temporarily operates during system disturbances 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 are suggested to be performed by using the entire network considering the difficulty of computing correct harmonic network equivalents.

4.8 Control interactions between TCSCs in parallel lines

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

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 (TE) subsystem, as shown in Figure 6.

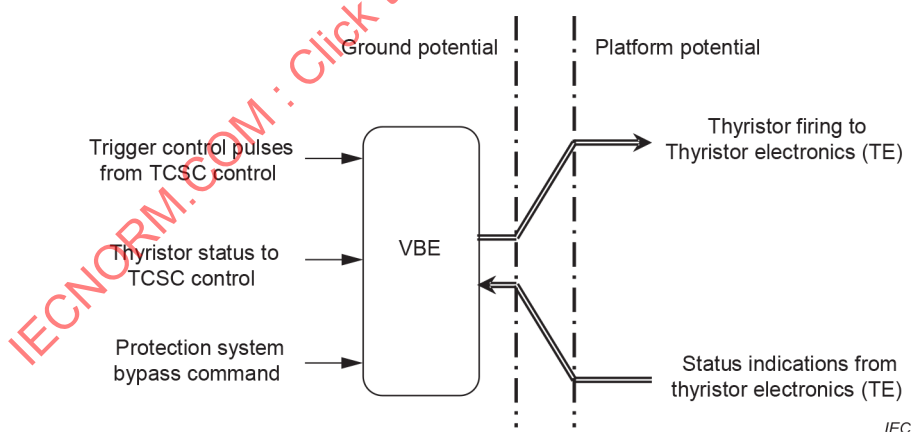


Figure 6 – Valve base electronics (VBE)

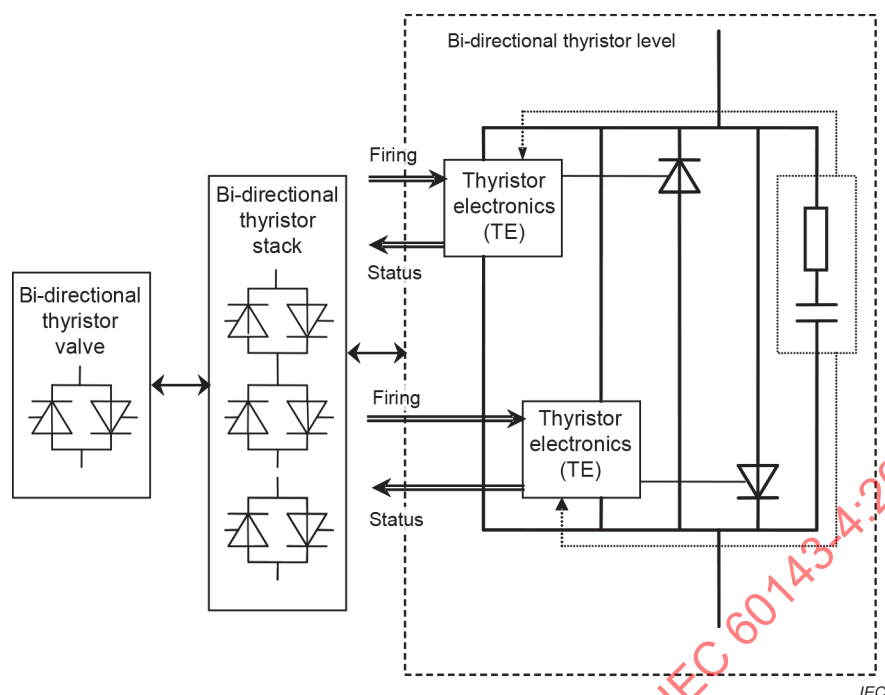


Figure 7 – Valve electronics (VE)

The TCSC control system generates trigger pulses that are transferred to the VBE. The VBE distributes firing pulses to each individual TE via fibre 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 can 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 to have a well-defined TCSC operating mode (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

6.1 General

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

6.2 Capacitor rating

Capacitors for the TCSC shall be designed, manufactured and tested in accordance with the 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 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.

6.3 Reactor rating

The TCSC reactors shall be designed, manufactured and tested in accordance with the applicable requirements of IEC 60076-6:2007, Clause 9. The actual reactor current waveforms related to operation in capacitive boost mode shall be included in the equipment specification for the reactor. The rated current of the reactor shall be based on the higher current between the following operating modes:

- the square root sum-of-squares of the power frequency and the harmonic current components in capacitive mode,
- the current when the TCSC is in bypass mode considering the rated line current of the TCSC.

The insulation level between the reactor terminals shall be based on the protective level of the TCSC bank as outlined in IEC 60143-1.

6.4 Thyristor valve rating

6.4.1 General

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.

6.4.2 Current capability

6.4.2.1 General

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.

6.4.2.2 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 the line fault cases specified. Consideration shall be given to the case where 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 depend 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 the 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 shall 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.

6.4.2.3 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 the initiation of the bypass operation, in addition to the fault current from the line.

6.4.3 Voltage capability

6.4.3.1 General

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, see Formula (4).

$$U_{PL} = K_1 \hat{U}_N = \sqrt{2} K_1 U_N \quad (4)$$

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.

Independently of the required operating range, the thyristor valve shall 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 can be lower than the protective level of the series capacitor.

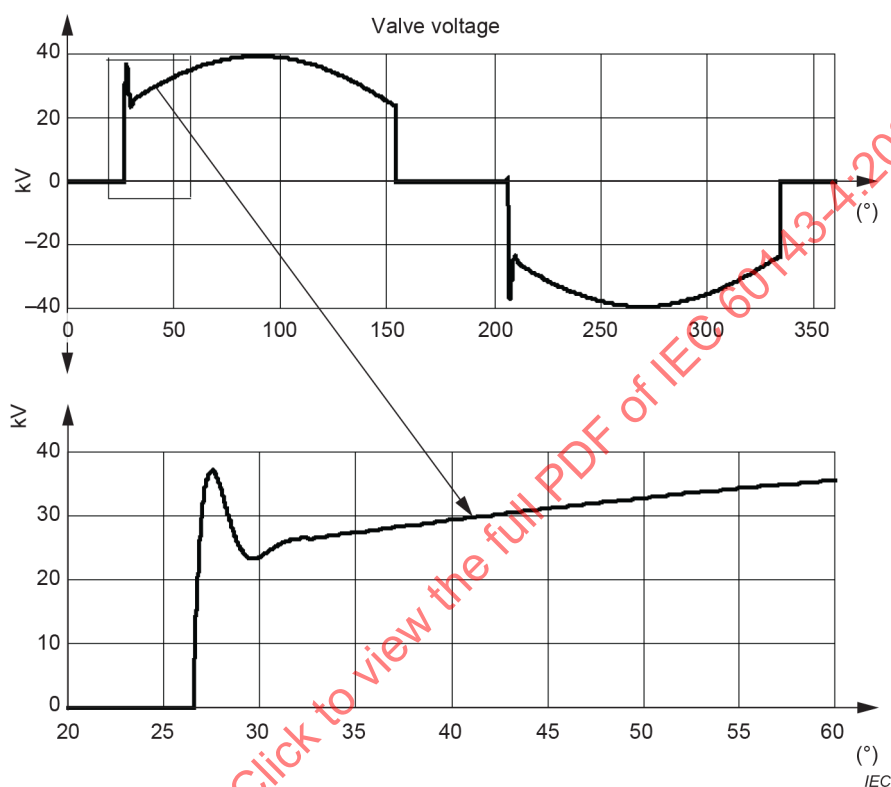


Figure 8 – Thyristor valve voltage in a TCSC

In the operating range curves shown 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 can 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.

6.4.3.2 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;
- safety factors used in the thyristor valve tests (see IEC 62823).

6.4.3.3 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.

6.5 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 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 can be exposed to. If energy injection does take place during system faults, then this energy injection shall be considered in the varistor rating.

Reinsertion of a series capacitor causes a DC offset in the capacitor voltage, which can cause energy injection into the varistor. Energy injection due to reinsertion against a swing current shall 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.

6.6 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 IEC 60143-1:2015, Clause 6. 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 p.u., the creepage distance shall be linearly increased with ($U_{C30}/1,35$).

7 Tests

7.1 General

TCSC equipment shall be subjected to the type tests specified in this document. 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 shall 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 can be used to demonstrate the sufficiency of certain aspects of the design.

Thyristor valves shall be tested according to IEC 62823. All other TCSC main circuit equipment for which tests are not specified in this document shall be tested according to IEC 60143-1, IEC 60143-2 and IEC 60143-3.

7.2 Test of the capacitor

7.2.1 General

The routine, type and special tests of the capacitors should be carried out in accordance with IEC 60143-1 and IEC 60143-3 taking into account the rated current and voltage determined as mentioned in 6.2 above.

The following tests stated in 7.2.2 and 7.2.3 shall be performed.

7.2.2 Routine tests

The following routine tests shall be carried out:

- a) capacitance measurement (IEC 60143-1:2015, 5.3);
- b) capacitor loss measurement (IEC 60143-1:2015, 5.4);
- c) voltage test between terminals (IEC 60143-1:2015, 5.5);
- d) AC voltage test between terminals and container (IEC 60143-1:2015, 5.6);
- e) test on internal discharge device (IEC 60143-1:2015, 5.7);
- f) sealing test (IEC 60143-1:2015, 5.8);
- g) discharge test of internal fuses (IEC 60143-3:2015, 5.1.2).

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.

7.2.3 Type tests

The following type tests shall be carried out:

- a) thermal stability test (IEC 60143-1:2015, 5.9);
- b) AC voltage test between terminals and container (IEC 60143-1:2015, 5.10);
- c) lightning impulse test between terminals and container (IEC 60143-1:2015, 5.11);
- d) cold duty test (IEC 60143-1:2015, 5.12);
- e) discharge current test (IEC 60143-1:2015, 5.13);
- f) disconnecting test on internal fuses (IEC 60143-3:2015, 5.2.3);
- g) voltage test after opening the container (IEC 60143-3:2015, 5.2.4).

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.

7.2.4 Special test (ageing test)

The ageing test will be carried out only after a contractual agreement between the manufacturer and purchaser. This test will be carried out in accordance with IEC 60143-1:2015, 5.2.4.

7.3 Tests of the TCSC reactor

7.3.1 General

The routine, type and optional tests for the TCSC reactor should be carried out in accordance with relevant subclauses of the reactor standard IEC 60076-6:2007, Clause 9, taking into account the rated current and voltage determined as mentioned in 6.3 above.

The following tests stated in 7.3.2 and 7.3.3 shall be performed.

7.3.2 Routine tests

The following routine tests shall be carried out.

- a) measurement of winding resistance (IEC 60076-1);
- b) measurement of inductance (IEC 60076-6:2007, 9.10.5);
- c) measurement of loss and quality factor (IEC 60076-6:2007, 9.10.6);
- d) winding overvoltage test (IEC 60076-6:2007, 9.10.7).

7.3.3 Type tests

The following type tests shall be carried out:

- a) measurement of inductance (IEC 60076-6:2007, 9.10.5);
- b) measurement of loss and quality factor (IEC 60076-6:2007, 9.10.6);
- c) temperature rise test (IEC 60076-6:2007, 9.10.8);
- d) lightning impulse test (IEC 60076-6:2007, 9.10.9).

7.3.4 Special tests

7.3.4.1 General

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

- a) short-circuit current test (IEC 60076-6:2007, 9.10.10);
- b) measurement of acoustic sound level (IEC 60076-6:2007, 9.10.11);
- c) separate source AC withstand voltage test (IEC 60076-6:2007, 9.10.12);
- d) discharge current test (IEC 60076-6:2007, 9.10.14);
- e) mechanical resonance test (IEC 60076-6:2007, 9.10.16);
- f) measurement of winding resistance versus harmonic frequency (7.3.4.2).

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.

7.3.4.2 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.

7.4 Tests of thyristor valves

7.4.1 General

The routine, type and special tests of the thyristor valves shall be carried out in accordance with standard IEC 62823.

7.4.2 Routine tests

The following routine tests shall be carried out:

- a) visual inspection (IEC 62823:2015, 13.2);
- b) connection check (IEC 62823:2015, 13.3);
- c) voltage grading circuit check (IEC 62823:2015, 13.4);
- d) voltage withstand check (IEC 62823:2015, 3.5);
- e) partial discharge test (IEC 62823:2015, 13.6);
- f) check of auxiliaries (IEC 62823:2015, 13.7);
- g) firing check (IEC 62823:2015, 13.8);
- h) cooling system pressure test (IEC 62823:2015, 13.9).

7.4.3 Type tests

The following routine tests shall be carried out:

- a) dielectric tests between valve terminals and valve enclosure earth
 - AC test (IEC 62823:2015, 7.3.1 and IEC 62823:2015/AMD1:2019, 7.3.1.1)
 - lightning impulse test (IEC 62823:2015/AMD1:2019, 7.3.2)
- b) dielectric tests between valve terminals
 - AC test (IEC 62823:2015, 8.3.1 and IEC 62823:2015/AMD1:2019, 8.3.1.1)
 - switching impulse test (IEC 62823:2015, 8.3.2 and IEC 62823:2015/AMD1:2019, 8.3.2.1)
- c) periodic firing and extinction tests
 - maximum continuous capacitive boost test (IEC 62823:2015, 9.3.2)
 - maximum temporary capacitive boost test (IEC 62823:2015, 9.3.3)
 - minimum capacitive boost test (IEC 62823:2015, 9.3.4)
 - operation at maximum temporary line current bypass mode (IEC 62823:2015, 9.3.5.1 and IEC 62823:2015/AMD1:2019, 9.3.5.1.2)
 - operation at minimum temporary line current bypass mode (IEC 62823:2015, 9.3.5.2)
- d) fault current tests
 - fault current without subsequent blocking (IEC 62823:2015, 10.3.1)
 - fault current with subsequent blocking (IEC 62823:2015, 10.3.2)
- e) test for valve insensitivity to electromagnetic disturbance
 - switching impulse test (IEC 62823:2015, 11.3 and IEC 62823:2015/AMD1:2019, 11.3)
- f) testing of special features (IEC 62823:2015, Clause 12)

7.5 Tests of protection and control system

7.5.1 General

Testing of the TCSC protection and control system consists of routine, type and special tests. The purpose of the type tests is to verify the 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, which belong to special 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 series for mechanical tests, IEC 60255-27 for dielectric tests, IEC 61000-4-11 and IEC 61000-4-29 for auxiliary power voltage variations and IEC 61000-4 series for electromagnetic compatibility requirements unless otherwise stated.

7.5.2 Routine tests

7.5.2.1 General

The following tests shall be carried out as a minimum.

- a) visual examination;
- b) dielectric withstand test (IEC 60255-27);

- c) 100 h burn-in test;
- d) 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.

7.5.2.2 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 fibre of the platform-to-ground communication insulators.

7.5.3 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 60255-27);
- c) electromagnetic compatibility tests (IEC 61000-4 series);
- d) mechanical test (IEC 60255-21 series).

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.

7.5.4 Special tests – Hardware-in-the-loop (HIL) tests

Hardware-in-the-loop tests shall be performed to verify the correct operation of the protection and control systems and evaluate the TCSC dynamic performance. An example of test setup is indicated in Figure 9. The scope of the tests shall be agreed between the purchaser and supplier.

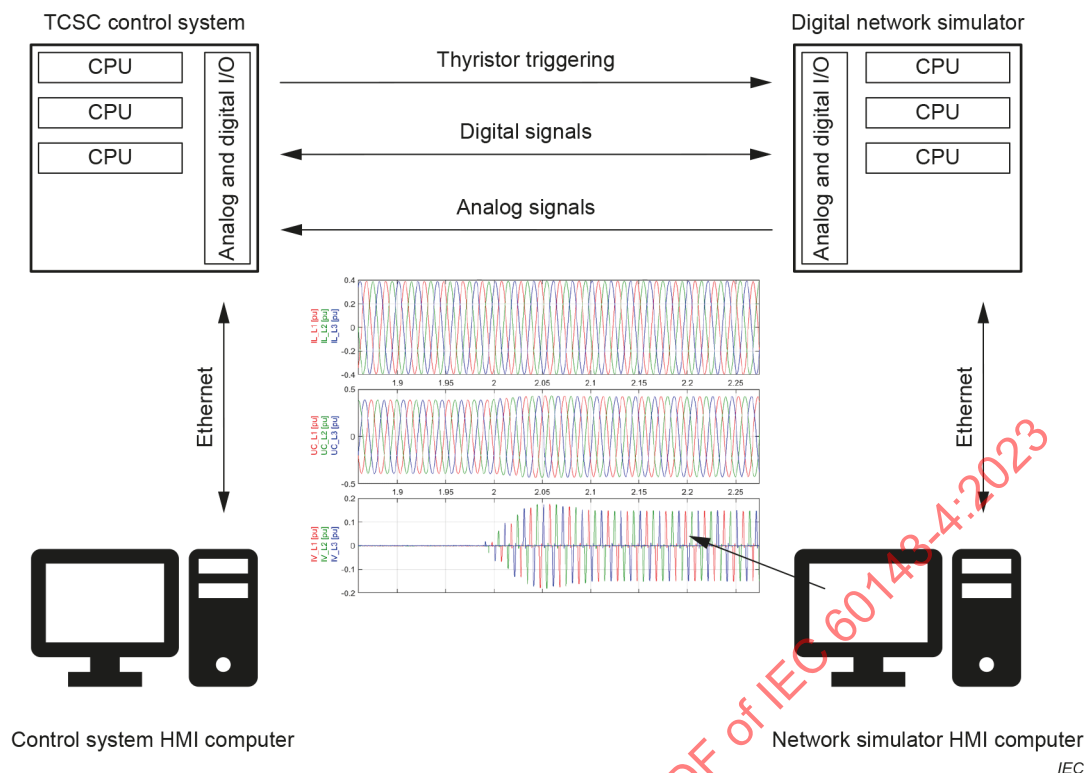


Figure 9 – Typical block diagram of a real time TCSC protection and control system simulation environment

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

- Testing and commissioning, maintenance, training and documentation

Testing and commissioning requirements shall be agreed upon between the purchaser and supplier.

The purchaser should:

- a) define the required operator training, training and operating manuals, and instruction books;
- b) 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

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 operating voltage;
 - 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) lightning impulse withstand level (LIWL);
 - 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:

- 1) short circuit equivalent for rating purposes;
- 2) dynamic equivalent for POD studies, if applicable;
- 3) generator and turbine data for SSR-studies, if applicable.

8.2.2 TCSC operational objectives

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

The principal operational objectives that can 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 can result in SSR problems.

b) Power oscillation damping (POD) control

Large power system disturbances can cause high current through the TCSC such that the TCSC reactance orders shall be limited to keep the voltage across the TCSC within its operating range. The current and voltage limitations of the TCSC shall be considered in the system studies.

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.

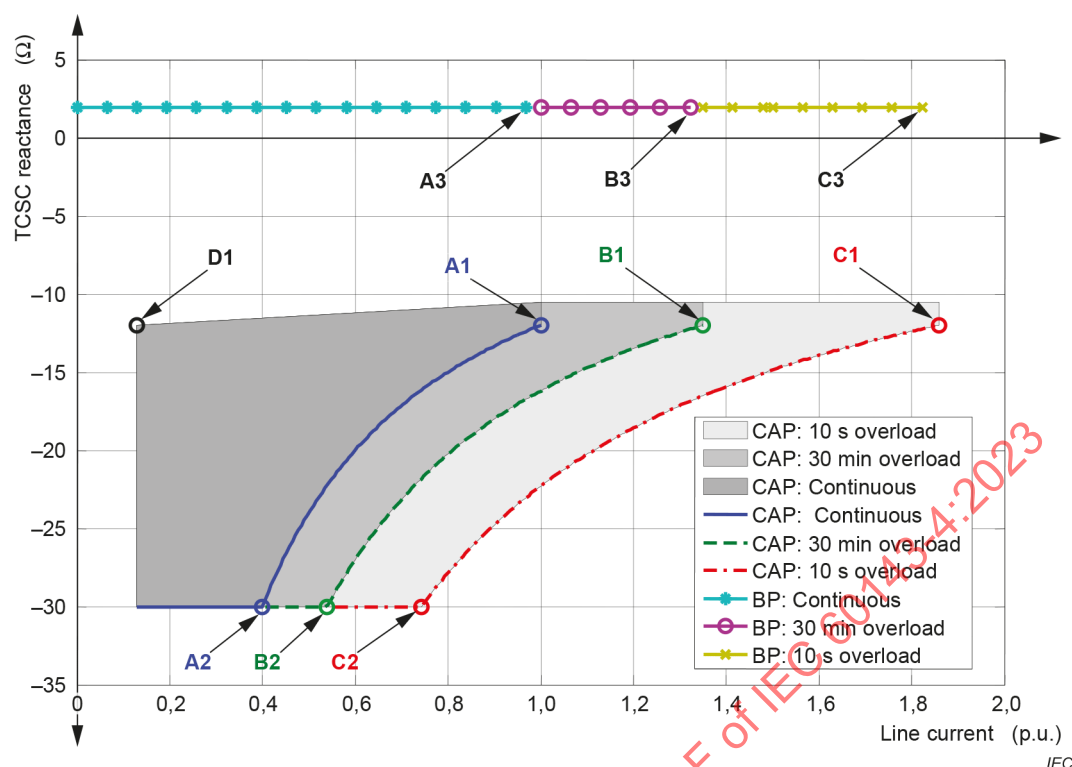


Figure 10 – Example of operating range diagram for TCSC

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);
 - desired minimum current and TCSC reactance for which the thyristor valve remains operational (point D1).
- 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

The supplier should design the thyristor valves to meet the operating and rating requirements of the TCSC installation. The purchaser should consider the following items when specifying the TCSC thyristor valves:

- a) maintenance
 - 1) tools, handling, and facilities for maintenance;
 - 2) maintenance intervals;
 - 3) time to replace individual thyristor levels;
- b) monitoring and supervision indicating the number and position of a failed thyristor;
- c) redundancy;
- d) control features;
- e) cooling system requirements;
- f) mechanical design features;
- g) type tests;
- h) routine tests.

8.4 Capacitors and reactors

8.4.1 General

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) To simplify maintenance and stocking of spare parts, capacitor and reactor components should be provided with identical interchangeable components.
- b) For ease of transportation, installation and maintenance, components should be equipped with lifting eyes or have similar provisions for lifting individual units.
- c) Support insulators used for mounting TCSC capacitor and reactor components should have 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.

8.4.2 Capacitor considerations

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

8.4.3 Reactor considerations

The TCSC reactors should be designed, manufactured and tested in accordance with the 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 because of vibrations in the reactors due to the presence of harmonic currents. Where applicable, the user 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, Table 3 and 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	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

The purpose of the thyristor-valve cooling system is to remove the heat produced by the thyristor valve. The cooling system should be supplied with all necessary interconnecting piping, ductwork, circulating pumps, make-up reservoirs, heat exchangers, filters, instrumentation, automatic controls, alarms, power supply systems, etc. necessary for operation. Only liquid cooling is applicable for normal TCSC applications.

The heat transfer from the cooling 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 while a redundant pump is standing by. The cooling system should be designed to allow work on the defective pump unit without shutting down the TCSC.
- 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.
- If a low ambient outdoor temperature is specified, the water can be mixed with glycol or other chemical agents to avoid freezing of the coolant.
- Filters and deionizer material should be designed to allow replacements in a relatively short time without shutdown of the cooling unit.
- Deionized water is used for thyristor valve cooling due to the potential difference between ground and valve position.

8.7 TCSC control and protection

8.7.1 General

The purchaser should specify applicable TCSC control and protection requirements.

8.7.2 Control

8.7.2.1 General

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

- a) required control modes;
- b) startup and shutdown sequences;
- c) voltage, current and reactance measurements;
- d) manual mode for site testing and maintenance;
- e) emergency shut down by operator (local and remote);
- f) synchronization for appropriate generation of firing pulses to the thyristor valves;
- g) monitoring;
- h) control self-supervision;
- i) capacitor bank protection.

8.7.2.2 Control functions

Control strategies and settings can vary with AC network configuration and are specific to the project objectives. The effectiveness of the TCSC control functions should be validated by suitable studies, simulation, and testing. Typical control functions for TCSC applications include reactance control, current (power) flow control, SSR mitigation, power oscillation damping control and voltage control.

8.7.2.3 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 such as master control (MC) (high level), sub-segment control, valve base electronics, and valve electronics. The master control may include the following features.

- a) Interlocking: Interlocking can be required by the purchaser to prevent certain inadvertent operations.
- b) Coordination of sub-segments: Controllable sub-segments shall be coordinated to meet the applicable total TCSC reactance and control objectives.
- c) Selection of control mode: The two most common are reactance control and current (power) control with other control functions available selectively (to the operator).
- d) Set point order: A reference can be set based on the selected control mode.
- e) Current and voltage signals: Line current and voltage from all sub-segments are measured and sent to the control via fibre optics. For compatibility reasons, it is recommended that all instrumentation, measurements, and cabling be included in the project scope.
- f) Set priority: Based on the availability of each sub-segment and status information received, the MC should set priorities for each controllable sub-segment.
- g) Status information: Status of controllable sub-segments should be interfaced with the remote terminal unit (RTU), SCADA system and operator interface subsystem.

8.7.2.4 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.

8.7.2.5 Start-up procedure

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

- a) confirm that there are no alarms from protections;
- b) open grounding switches and close isolating disconnectors;
- c) confirm line current is within limits;
- d) open the bypass disconnector in the line;
- e) select control mode (default standby mode or blocking);
- f) select control reference;
- g) execute start command that will open the capacitor bank bypass switch for insertion, followed by control enabled.

8.7.2.6 Operator interface

The operator interface required to operate the TCSC controller locally as well as the interface with SCADA and RTU subsystems should be specified by the purchaser. This includes requirements for HMI or additions to the controls of an existing substation. It is recommended that the operator interface has the following minimum characteristics:

a) Selection and execution:

- open/close breakers and disconnect switches;
- control mode;
- operating mode;
- set point or reference;
- emergency shutdown.

It is recommended that the selection and execution process 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;
- selected control mode;
- system information (line current, capacitor unbalance current, valve current, TCSC reactance, varistor temperature, cooling, etc.);
- status of the TCSC (position of switching devices, 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 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 (AC and DC).

8.7.3 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 junction temperature (calculated);
- thyristor reactor overload (optional);
- thyristor valve overcurrent;
- thyristor valve overvoltage;

b) Protection functions associated with TCSC equipment failure:

- varistor failure;
- bypass switch failure;
- capacitor unbalance;
- flashover to platform;
- 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:

- protective bypassing;
- lockout;
- temporary block insertion;
- insertion (automatic or manual) and reinsertion;
- operation of disconnect switches.

8.7.4 Monitoring and recording

a) Indications and alarms:

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

- main circuit equipment failure;
- control and protection system failure;
- power system condition and operation (e.g., line current overload, bypass, etc.).

b) Sequence events recorder:

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

8.8.1 General

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

Pre-commissioning tests involve on-site testing of individual equipment items and subsystems, after their installation to verify proper installation, adjustment, and operation of an individual equipment. This should include testing of transducers, capacitors, reactors, resistors, cooling system, fibre optics, disconnect switches, circuit breakers, grounding switches, switchgear, thyristor valves, and control and protection panels.

Subsystem tests are performed to independently check to verify that subsystems interact and function according to specified requirements before starting station testing. 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 required to test the TCSC installation operational parameters and confirm that specified performance can be achieved. Commissioning tests can involve a period of trial operation followed by acceptance tests and may sometimes include staged fault testing.

Testing and commissioning of 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. Any on-site testing restrictions due to system operational constraints, transmission line outage periods, or other limitations should be stated in the specification.

Commissioning test results should be documented in 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 Pre-commissioning tests

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

Pre-commissioning tests typically verify:

- a) capacitance, reactance, and resistance parameters;
- b) equipment is installed in accordance with manufacturers instruction books and station design drawings;
- c) wiring, fibre optics, and grounding connections;
- d) turns ratio and signal polarities;
- e) timing checks on circuit breakers and switches;
- f) contact resistance of disconnects and circuit breakers;
- g) cooling system;
- h) station auxiliary power equipment;
- 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. 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. Energization tests includes opening of grounding switches and closing of isolating disconnectors.

Commissioning 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;
- SSR mitigation (if specified);
- power oscillation damping (if specified).

b) Trial operation:

Trial operation gives an opportunity for sustained operation of the TCSC installation together with the connected AC system for an extended period of time prior to any warranted operating periods. The purchaser should specify the trial operation period (normally 10 days to 30 days). Trial operation offers the purchaser a first indication of the availability of the TCSC installation under real operating conditions. 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 analysed 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 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.

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

- steady-state ratings;
- temporary and dynamic overload tests;

- cooling system performance;
- electrical losses performance;
- power oscillation damping performance (if specified);
- SSR mitigation performance (if specified);
- harmonic and interference performance (if specified);
- audible noise performance (if specified);
- staged fault tests (if specified).

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60143-4:2023

Bibliography

- [1] ÄNGQUIST, Lennart: *Synchronous Voltage Reversal Control of Thyristor Controlled Series Capacitor*, Doctoral dissertation at the Swedish Royal Institute of Technology, 2002 (code: TRITA-ETS-2002-07, available at <https://kth.diva-portal.org/>) [viewed 2023-04-27]
 - [2] IEC 60060-2, *High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems*
 - [3] IEC 60068-1, *Environmental testing – Part 1: General and guidance*
 - [4] IEC 60068-3-3, *Environmental testing – Part 3-3: Supporting documentation and guidance – Seismic test methods for equipment*
 - [5] IEC 60721-1, *Classification of environmental conditions – Part 1: Environmental parameters and their severities*
 - [6] IEC TR 61000-1-1, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-1: General – Application and interpretation of fundamental definitions and terms*
 - [7] IEC 61000-4-2, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test*
 - [8] IEC TS 61000-6-5, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-5: Generic standards – Immunity for equipment used in power station and substation environment*
 - [9] IEEE Std 824, *IEEE Standard for Series Capacitor Banks in Power Systems*
 - [10] IEEE Std 1031, *IEEE Guide for the Functional Specification of Transmission Static Var Compensators*
 - [11] IEEE Std 1534, *IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors*
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	47
1 Domaine d'application	49
2 Références normatives	49
3 Termes, définitions et abréviations	50
3.1 Termes et définitions	50
3.2 Abréviations	53
4 Facteurs liés au fonctionnement et aux caractéristiques assignées	54
4.1 Généralités	54
4.2 Caractéristiques du CSCT	57
4.3 Plage de fonctionnement	58
4.4 Caractéristique assignée de la puissance réactive	59
4.5 Amortissement des oscillations de puissance (POD)	60
4.6 Réduction de la SSR	60
4.7 Harmoniques	60
4.8 Interactions de commande entre CSCT sur des lignes parallèles	61
4.9 Plage de fonctionnement, surtensions et cycles de service	61
4.9.1 Plage de fonctionnement	61
4.9.2 Surtensions transitoires	61
4.9.3 Cycles de service	61
5 Commande de la valve	62
5.1 Système de déclenchement	62
5.2 Aspects du système	63
5.3 Conditions de fonctionnement normal	63
5.4 Allumage de la valve lors de défauts du réseau	63
5.5 Actions à faible courant de ligne	63
5.6 Surveillance	64
6 Caractéristiques assignées	64
6.1 Généralités	64
6.2 Caractéristique assignée du condensateur	64
6.3 Caractéristique assignée de la bobine d'inductance	64
6.4 Caractéristique assignée de la valve à thyristors	64
6.4.1 Généralités	64
6.4.2 Courant admissible	65
6.4.3 Tension admissible	66
6.5 Caractéristique assignée de la varistance	68
6.6 Niveau d'isolement et ligne de fuite	69
7 Essais	69
7.1 Généralités	69
7.2 Essai du condensateur	69
7.2.1 Généralités	69
7.2.2 Essais individuels	69
7.2.3 Essais de type	70
7.2.4 Essai spécial (essai de vieillissement)	70
7.3 Essais de la bobine d'inductance du CSCT	70
7.3.1 Généralités	70
7.3.2 Essais individuels	70

7.3.3	Essais de type	71
7.3.4	Essais spéciaux	71
7.4	Essais des valves à thyristors	71
7.4.1	Généralités	71
7.4.2	Essais individuels	71
7.4.3	Essais de type	72
7.5	Essais du système de protection et de commande	72
7.5.1	Généralités	72
7.5.2	Essais individuels	73
7.5.3	Essais de type	73
7.5.4	Essais spéciaux – Essais dans la boucle du matériel (HIL)	73
8	Recommandations pour le choix des caractéristiques assignées et pour le fonctionnement	74
8.1	Généralités	74
8.2	Condensateur série commandé par thyristors	76
8.2.1	Système de transmission d'énergie en courant alternatif	76
8.2.2	Objectifs opérationnels du CSCT	76
8.2.3	Caractéristiques assignées du CSCT	77
8.3	Valves à thyristors	78
8.4	Condensateurs et bobines d'inductance	78
8.4.1	Généralités	78
8.4.2	Facteurs à considérer pour les condensateurs	79
8.4.3	Facteurs à considérer pour les bobines d'inductance	79
8.5	Cycles de service de défaut pour les caractéristiques assignées de la varistance	79
8.6	Système de refroidissement de la valve	80
8.7	Commande et protection du CSCT	81
8.7.1	Généralités	81
8.7.2	Commande	81
8.7.3	Protection	84
8.7.4	Surveillance et enregistrement	84
8.8	Essais préalables à la mise en service et essais de mise en service	85
8.8.1	Généralités	85
8.8.2	Essais préalables à la mise en service	85
8.8.3	Essais de station	86
	Bibliographie	88
	Figure 1 – Nomenclature type d'une installation CSCT	55
	Figure 2 – Sous-segment CSCT	56
	Figure 3 – Formes d'ondes du CSCT en régime établi pour l'angle de commande α et l'intervalle de conduction σ	57
	Figure 4 – Caractéristiques de réactance apparente du CSCT conformément à la Formule (1), avec $\lambda = 2,5$	58
	Figure 5 – Exemple de plage de fonctionnement du CSCT pour le POD (à gauche) et la réduction de la SSR (à droite)	59
	Figure 6 – Système de commande électronique de base des valves (VBE)	62
	Figure 7 – Système de commande électronique des valves (VE)	62
	Figure 8 – Tension de la valve à thyristors dans un CSCT	67

Figure 9 – Schéma fonctionnel type de l'environnement de simulation du système de protection et de commande en temps réel du CSCT	74
Figure 10 – Exemple de diagramme de plage de fonctionnement du CSCT	77
Tableau 1 – Relations entre la tension de crête et la tension efficace	56
Tableau 2 – Cycle de service type pour le défaut externe avec échec de la refermeture automatique rapide	79
Tableau 3 – Cycle de service type pour le défaut interne avec réussite de la refermeture automatique rapide	80
Tableau 4 – Cycle de service type pour le défaut interne avec échec de la refermeture automatique rapide	80

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60143-4:2023

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**CONDENSATEURS SÉRIE DESTINÉS À ÊTRE INSTALLÉS
SUR DES RÉSEAUX –****Partie 4: Condensateurs série commandés par thyristors****AVANT-PROPOS**

- 1) La Commission Électrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. À cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses Publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'IEC attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de propriété revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'IEC (avait/n'avait pas) reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence.

L'IEC 60143-4 a été établie par le comité d'études 33 de l'IEC: Condensateurs de puissance et leurs applications. Il s'agit d'une Norme internationale.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2010. Cette édition constitue une révision technique.

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

- a) les exigences d'essai de la valve à thyristors font référence à l'IEC 62823;
- b) la Formule (1) au paragraphe 4.2 a été corrigée;
- c) les essais dans la boucle du matériel (HIL, Hardware-In-the-Loop), paragraphe 7.5.4, remplacent l'essai du système de protection et de commande en temps réel spécifié précédemment, réalisé à l'aide d'un simulateur de réseau.

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

Projet	Rapport de vote
33/696/FDIS	33/702/RVD

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

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

La présente partie de l'IEC 60143 est à utiliser conjointement avec les normes suivantes:

- IEC 60143-1:2015;
- IEC 60143-2:2012;
- IEC 60143-3:2015.

Le présent document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/publications.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60143, publiées sous le titre général *Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux*, se trouve sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site Web de l'IEC sous webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé, ou
- révisé.

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

CONDENSATEURS SÉRIE DESTINÉS À ÊTRE INSTALLÉS SUR DES RÉSEAUX –

Partie 4: Condensateurs série commandés par thyristors

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60143 spécifie les essais à réaliser sur les installations de condensateurs série commandés par thyristors (CSCT) utilisées avec les lignes de transmission. Le présent document aborde également les questions liées aux caractéristiques assignées des assemblages de valve à thyristors pour CSCT, des condensateurs et des bobines d'inductance ainsi que les caractéristiques de commande des CSCT, les fonctions de protection, le système de refroidissement et le fonctionnement du système.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

NOTE S'il y a un conflit entre la présente partie de l'IEC 60143 et une norme énumérée ci-dessous à l'Article 2, le présent document prévaut.

IEC 60050-436, *Vocabulaire Électrotechnique International – Chapitre 436: Condensateurs de puissance*

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

IEC 60068-2-78, *Essais d'environnement – Partie 2-78: Essais – Essai Cab: Chaleur humide, essai continu*

IEC 60076-1, *Transformateurs de puissance – Partie 1: Généralités*

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

IEC 60143-1:2015, *Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux – Partie 1: Généralités*

IEC 60143-2:2012, *Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux – Partie 2: Matériel de protection pour les batteries de condensateurs série*

IEC 60143-3:2015, *Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux – Partie 3: Fusibles internes*

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

IEC 60255-27, *Relais de mesure et dispositifs de protection – Partie 27: Exigences de sécurité des produits*

IEC 61000-4 (toutes les parties), *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4: Techniques d'essai et de mesure*

IEC 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 pour les appareils à courant d'entrée inférieur ou égal à 16 A par phase*

IEC 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*

IEC 62823:2015, *Valves à thyristors pour condensateurs série commandés par thyristors (CSCT) – Essai électrique*
IEC 62823:2015/AMD1:2019

NOTE Des références utiles supplémentaires et non explicitement citées dans le texte sont indiquées dans la Bibliographie.

3 Termes, définitions et abréviations

Pour les besoins du présent document, les termes et les définitions donnés dans l'IEC 60143-1, l'IEC 60143-2, l'IEC 60143-3 et certains de l'IEC 60050-436, ainsi que les suivants, s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>

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

3.1 Termes et définitions

3.1.1

valve à thyristors

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

3.1.2

courant de shunt

courant circulant dans le commutateur de shuntage, le dispositif de protection, la valve à thyristors ou d'autres dispositifs, en parallèle avec le condensateur série si ce dernier a été shunté

3.1.3

surcharge temporaire

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

VOIR: Figure 5 et Figure 10.

3.1.4

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.

3.1.5**condensateur série commandé par thyristors****CSCT**

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

3.1.6**système de commande électronique de valves****VE**

circuits électroniques au(x) potentiel(s) des valves réalisant des fonctions de commande
Note à l'article: L'abréviation "VE" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Valve Electronics".

3.1.7**bobine d'inductance du CSCT**

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

VOIR: Figure 1, élément 7.

Note 1 à l'article: 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 supporter la surtension temporaire et la tension de service en régime continu auxquelles la valve à thyristors est soumise.

3.1.8**blocage de valve**

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

3.1.9**système de commande électronique de base des valves****VBE**

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

Note 1 à l'article: L'abréviation "VBE" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Valve Base Electronics".

3.1.10**courant du condensateur**

I_C

courant circulant dans le condensateur série

VOIR: Figure 2.

3.1.11**courant de ligne**

I_L

courant de ligne à fréquence industrielle

VOIR: Figure 2.

3.1.12**courant assigné**

I_N

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

3.1.13 courant de valve

I_V

courant circulant dans la valve à thyristors

VOIR: Figure 2.

3.1.14 tension de condensateur

U_C

tension aux bornes du CSCT

VOIR: Figure 2.

3.1.15 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 1 à l'article: Le niveau de protection peut être exprimé en fonction de la tension de crête réelle appliquée dans un segment ou en fonction de la valeur de crête par unité de la tension assignée du condensateur.

3.1.16 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 assignée (X_N), au courant assigné (I_N), à la fréquence et dans la plage de températures ambiantes

3.1.17 réactance apparente

$X(\alpha)$

réactance à fréquence industrielle apparente du CSCT exprimée en fonction de l'angle de commande du thyristor (α)

VOIR Figure 4.

3.1.18 fréquence nominale

f_N

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

3.1.19 capacité assignée

C_N

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

3.1.20 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

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

3.1.21**facteur d'amplification** k_B rapport de $X(\alpha)$ sur X_C Note 1 à l'article: $k_B = X(\alpha) / X_C$ **3.1.22****réactance assignée** X_N réactance à fréquence industrielle pour chaque phase du CSCT avec le courant de ligne assigné I_N et le facteur d'amplification assignée**3.1.23****intervalle de conduction** σ partie d'un cycle au cours de laquelle une valve à thyristors est à l'état de conduction, $\sigma = 2\beta$

VOIR: Figure 3.

3.1.24**angle de commande** α période exprimée sous forme de mesure angulaire électrique entre le passage à zéro de la tension du condensateur (U_C) et le début de la conduction du courant par la valve à thyristors

VOIR: Figure 3.

3.1.25**défaut interne**

défaut survenant dans la section de ligne protégée contenant la batterie de condensateurs série

3.1.26**défaut externe**

défaut survenant en dehors de la section de ligne protégée contenant la batterie de condensateurs série

3.2 Abréviations

FSC	Fixed Series Capacitors (condensateurs série fixes)
MC	Master Control (commande centrale)
POD	Power Oscillation Damping (amortissement des oscillations de puissance)
RTU	Remote Terminal Unit (unité terminale distante)
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition (commande de surveillance et acquisition de données)
SER	Sequence Events Recorder (enregistreur de séquence d'événements)
SSR	Sub Synchronous Resonance (résonance subsynchrone)
RMS	Root-Mean-Square (moyenne quadratique)
BLK	BLoCKed (mode de fonctionnement bloqué)
BP	ByPass (mode de fonctionnement en shuntage)
CAP	CAPacitive Boost (mode de fonctionnement capacitif amplifié)
HMI	Human Machine Interface (interface homme-machine)

4 Facteurs liés au fonctionnement et aux caractéristiques assignées

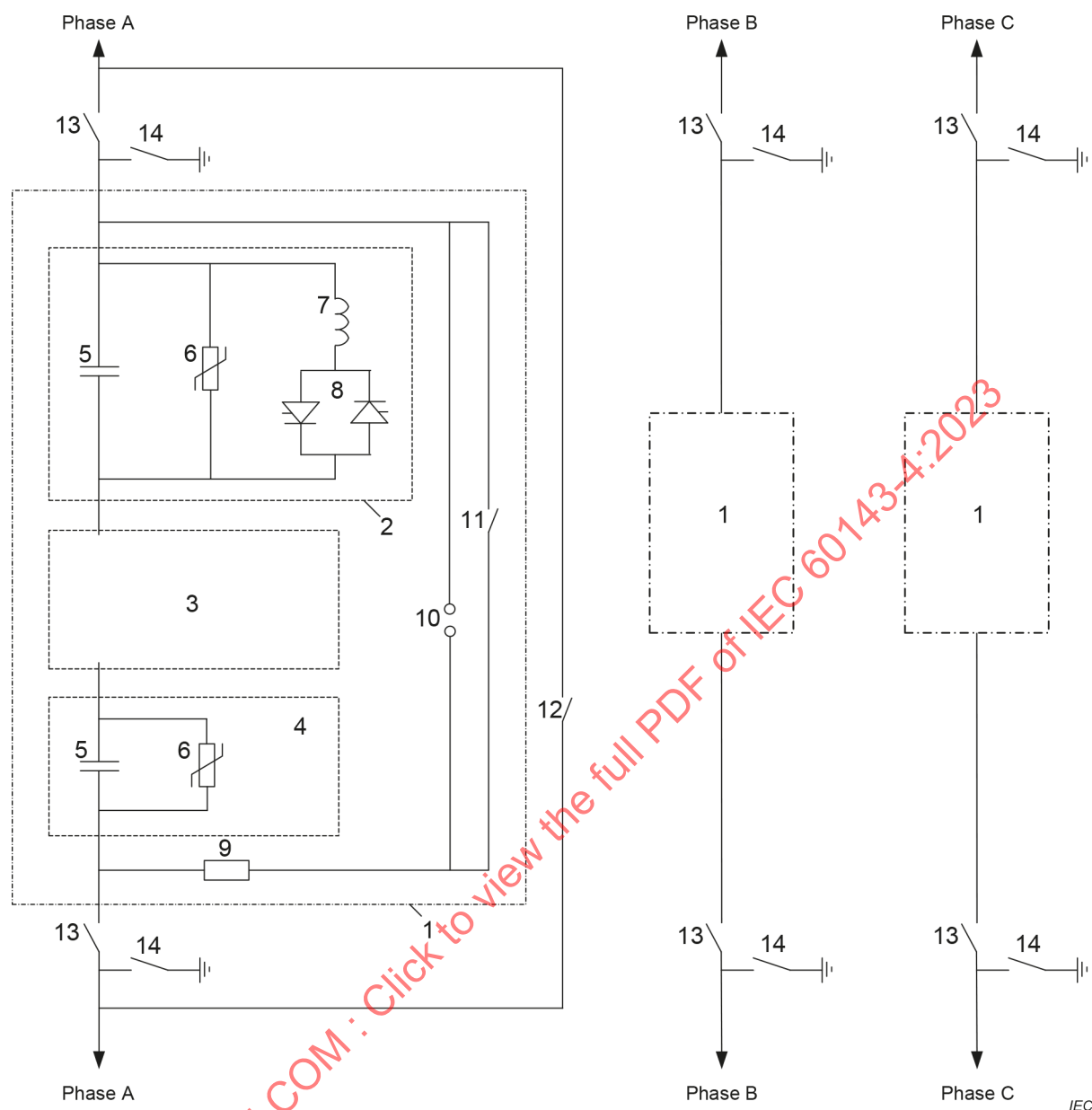
4.1 Généralités

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 commandables permettant d'obtenir l'éventail des exigences de performances spécifiées par l'acheteur. Le présent article décrit les exigences liées au fonctionnement et aux caractéristiques assignées du CSCT.

Les configurations de circuit CSCT décrites dans le présent document (voir Figure 2) prennent en compte trois modes de fonctionnement élémentaires:

- BLK: fonctionnement avec thyristors bloqués (absence de courant dans la valve à thyristors);
- BP: fonctionnement sur courant de thyristor continu;
- CAP: fonctionnement en mode capacitif amplifié.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60143-4:2023



Légende

- | | |
|---|---|
| 1 batterie de CSCT (monophasée) | 8 valve à thyristors |
| 2 sous-segment commandable | 9 circuit d'amortissement et de limitation du courant |
| 3 sous-segments commandables supplémentaires, si cela est exigé | 10 éclateur shunt |
| 4 segment FSC supplémentaire, si cela est exigé | 11 commutateur de shuntage |
| 5 condensateurs unitaires | 12 sectionneur de shuntage externe |
| 6 varistance | 13 sectionneur d'isolement externe |
| 7 Bobine d'inductance du CSCT | 14 sectionneur de mise à la terre externe |

Figure 1 – Nomenclature type d'une installation CSCT

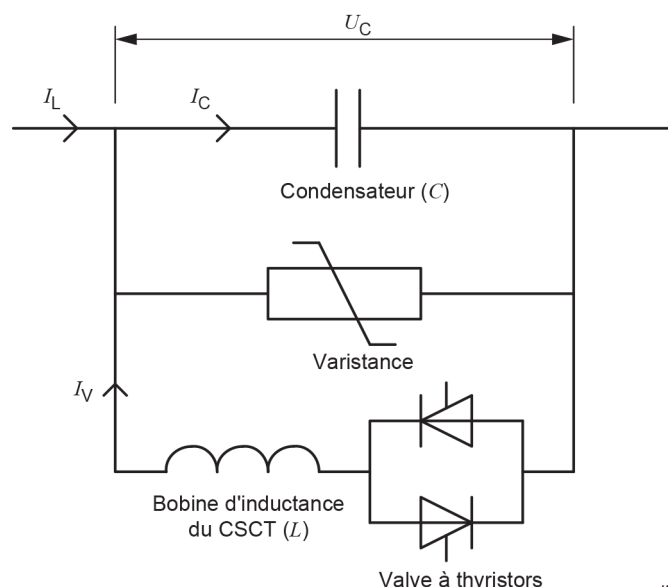


Figure 2 – Sous-segment CSCT

La définition de l'angle de commande (α) par référence au passage à zéro de la tension est choisie pour correspondre à ce qui est défini pour les autres dispositifs d'électronique de puissance (voir Figure 3). Toutefois, il convient de noter que pour la plupart des systèmes de commande CSCT, l'onde de courant de ligne constitue une 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, une réactance capacitive qui augmente va augmenter le courant de ligne. Les impulsions de courant circulant dans la valve à thyristors déforment 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 pu	Tension efficace à fréquence industrielle pu	Tension de crête à fréquence industrielle pu	Tension efficace totale pu	Tension de crête totale pu
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

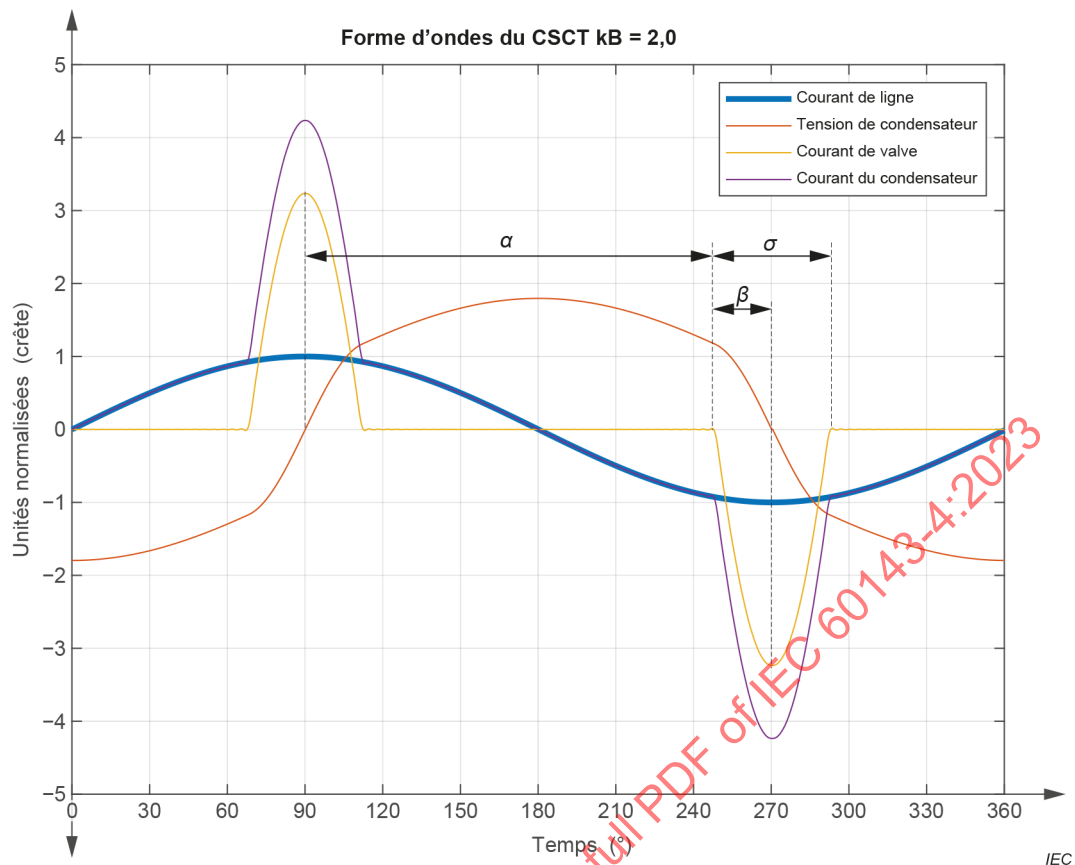


Figure 3 – Formes d'ondes du CSCT en régime établi pour l'angle de commande α et l'intervalle de conduction σ

4.2 Caractéristiques du CSCT

Les caractéristiques du CSCT sont déterminées en fonction des paramètres de circuit du condensateur série (C) et de la bobine d'inductance (L) présentés à la Figure 2. La réactance apparente en régime établi $X(\alpha)$ en fonction de l'angle de commande du thyristor (α) peut être calculée à partir de la Formule (1) (voir [1]).

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

où

β est le demi-intervalle de conduction ($\pi - \alpha$);

α est l'angle de commande 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 du CSCT.

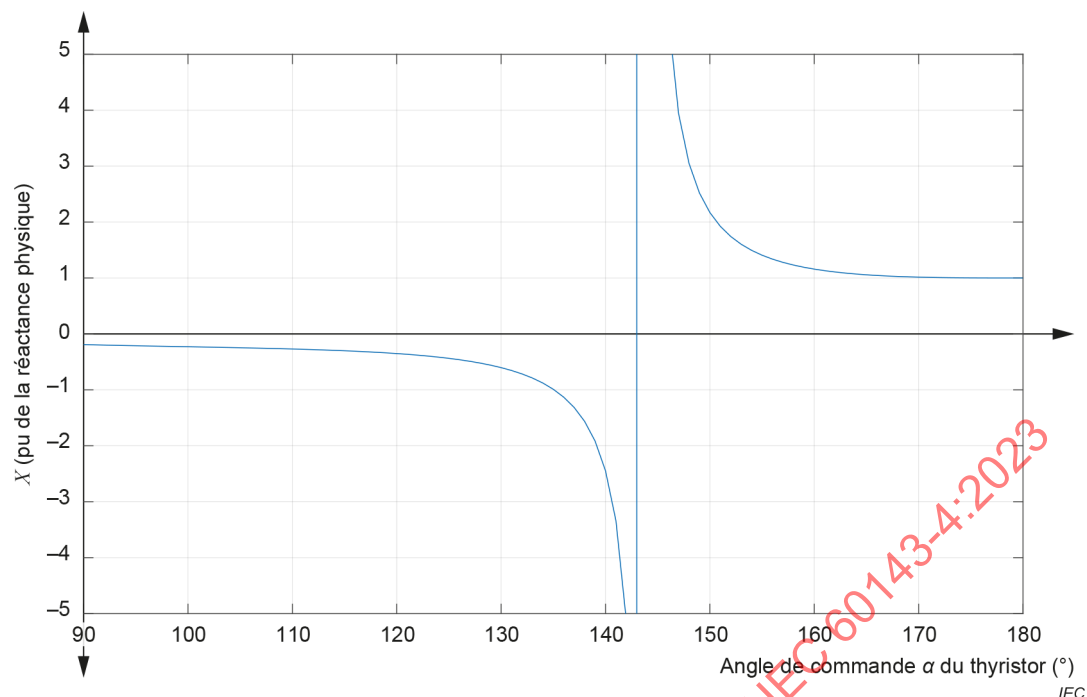


Figure 4 – Caractéristiques de réactance apparente du CSCT conformément à la Formule (1), avec $\lambda = 2,5$

4.3 Plage de fonctionnement

La plage de fonctionnement est l'un des facteurs les plus importants pour la caractéristique assignée d'un CSCT. Elle a un impact majeur sur les contraintes des composants du circuit principal et doit donc être clairement spécifiée par l'acheteur. Le CSCT doit être conçu pour supporter le fonctionnement avec les différentes réactances et les différents courants de ligne dans la plage de fonctionnement spécifiée. La plage de fonctionnement exigée doit être définie par des études de réseaux à l'initiative de l'acheteur et être clairement établie dans la spécification, avec un ensemble de courbes de la réactance apparente du CSCT à fréquence fondamentale ou du facteur d'amplification (k_B) en fonction du courant de ligne, comme indiqué à la Figure 5. La plage de fonctionnement exigée dépend de l'objectif du CSCT. En général, un CSCT prévu pour l'amortissement des oscillations de puissance (POD) exige une plage de fonctionnement plus étendue qu'un CSCT destiné à une réduction de la SSR.

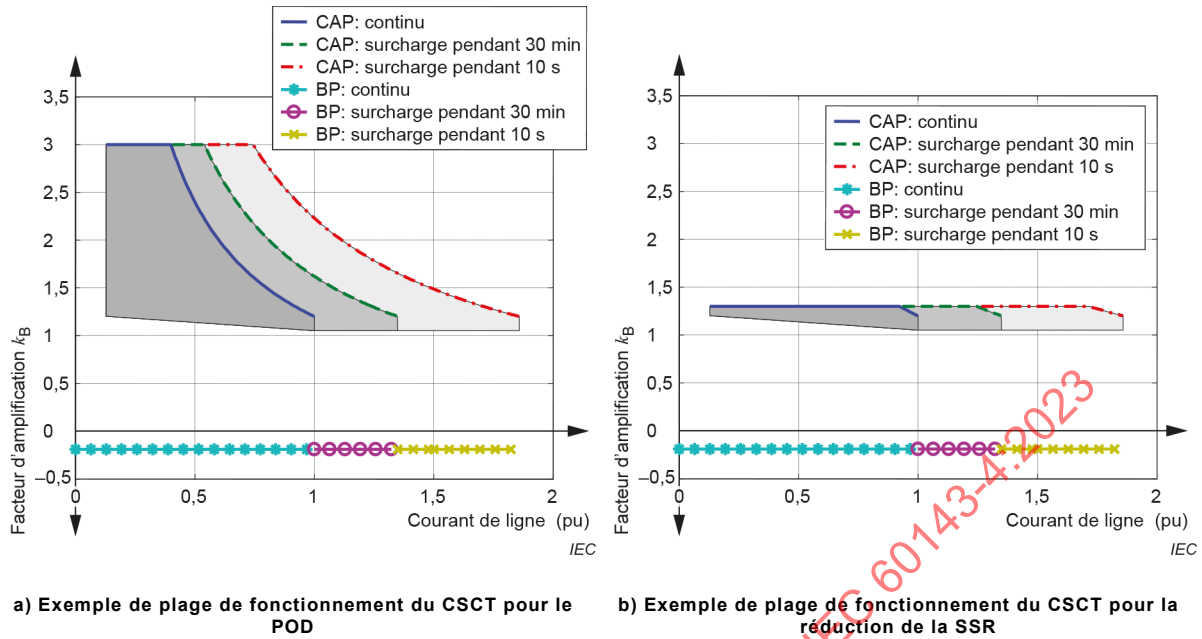


Figure 5 – Exemple de plage de fonctionnement du CSCT pour le POD (à gauche) et la réduction de la SSR (à droite)

La plage de fonctionnement ne s'étend pas toujours jusqu'au courant de ligne nul car l'allumage en régime établi d'une valve à thyristors est impossible lorsque la tension et le courant sont très bas. Tous les thyristors et équipements électroniques d'allumage et de surveillance associés 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 qui peuvent exercer des contraintes supplémentaires sur l'allumage de la valve à thyristors lorsque le courant de ligne est faible. Cela donne lieu à un courant de ligne et un facteur d'amplification minimaux (k_B) en dessous desquels il est impossible de passer en mode CAP. Cela peut avoir des implications pour l'application et le fonctionnement du CSCT. À de faibles courants de ligne, l'influence de la compensation série est limitée. 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 les Formules (2) et (3):

$$Q_{CSCT} = 3 \times k_B \times \frac{1}{\omega C} \times I_L^2 \quad (2)$$

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

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 assignée (k_B), le courant de ligne (I_L) étant égal au courant de ligne assigné et $1/\omega C$ étant égal à la réactance physique.

4.5 Amortissement des oscillations de puissance (POD)

L'amortissement des oscillations de puissance (POD) est un sous-ensemble spécialisé de la commande de réactance en 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, les performances de l'amortissement d'un CSCT peuvent être grandement améliorées car cela permet d'étendre la plage de réactances d'un CSCT jusqu'à une réactance inductive plus faible.

Un CSCT destiné à des applications POD doit satisfaire aux exigences fondamentales suivantes:

- le contrôleur POD 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 POD doit être capable de gérer les perturbations importantes du système. Cela signifie que la structure du contrôleur POD 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

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

Si l'application CSCT exige la résolution des problèmes liés à la SSR, il est recommandé de réaliser des études reposant sur des modèles détaillés du réseau, des gros turboalternateurs 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 SSR, le fournisseur du CSCT doit être impliqué de manière active 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 commande. Cependant, il est souhaitable que le système de commande du CSCT soit en mesure de fournir une impédance subsynchrone dépendant le moins possible du facteur d'amplification.

Dans une application dans laquelle la réduction de la SSR est critique, le fonctionnement du CSCT à faible courant de ligne 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 matière de courant de ligne et de facteur d'amplification.

Dans les applications dans lesquelles le CSCT est utilisé pour réduire la SSR ou amortir les oscillations de puissance, le CSCT fonctionne généralement avec le facteur d'amplification nominale, et ne fonctionne que de manière temporaire avec un facteur d'amplification plus élevé, en cas de perturbations du système. 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 nominale.

Les exigences en matière d'harmoniques d'un CSCT doivent être précisées en ce qui concerne la déformation de tension admise maximale générée par le CSCT au niveau des jeux de barres connectant les segments de lignes compensés en série. Pour la détermination des harmoniques dans une installation de CSCT, il est recommandé d'étudier la totalité du réseau étant donné la difficulté de calculer des équivalents de réseau corrects pour les harmoniques.

4.8 Interactions de commande entre CSCT sur des lignes parallèles

Si deux CSCT se trouvent sur des lignes parallèles, il existe un risque d'interactions de commande 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 POD ont à utiliser les mêmes signaux d'entrée, c'est-à-dire la somme des flux de puissance sur les circuits parallèles;
- les contrôleurs POD ont à présenter des dynamiques analogues;
- les contrôleurs de réactance ont à présenter des 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 spécifiées de fonctionnement en régime continu et temporaire. En général, 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 dues à des défauts du réseau, dont la valeur U_{PL} est la plus grande valeur possible susceptible d'apparaître 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 continus, 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 internes et externes. L'acheteur doit définir les cycles de service pour les défauts de durées normales et étendues, ainsi que pour les différents types de défauts (triphase et monophasé). Les défauts entre phases doivent être pris en compte si cela est explicitement défini par l'acheteur. Des exemples de cycles de service types sont donnés en 8.5.

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

Bien que le présent 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 dans les conditions définies par l'acheteur.

5 Commande de la valve

5.1 Système de déclenchement

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

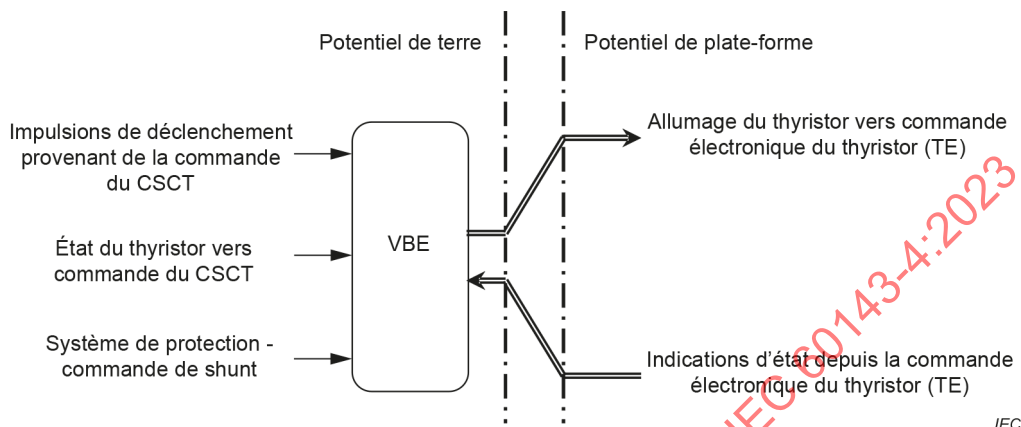


Figure 6 – Système de commande électronique de base des valves (VBE)

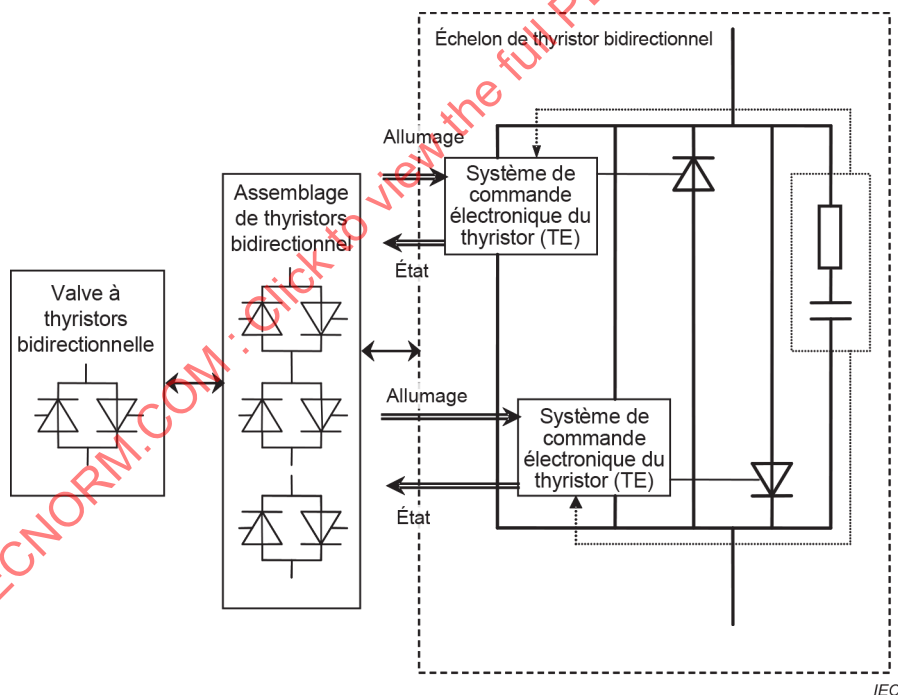


Figure 7 – Système de commande électronique des valves (VE)

Le système de commande du CSCT génère des impulsions de déclenchement qui sont transférées vers le VBE. Le VBE distribue les impulsions d'allumage à tous les TE par l'intermédiaire de 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 de l'échelon de thyristor pour lequel une impulsion de gâchette 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 normal en mode capacitif amplifié et en mode de shuntage;
- commander la valve pour shunter le condensateur série pendant les défauts du réseau;
- s'assurer que la valve n'est pas bloquée dans une situation susceptible de générer une tension dangereuse dans la valve;
- s'assurer que la valve n'est 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 normal

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 être exigé 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, car 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 aux bornes des 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 $1/10^e$ 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, la précision 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 subsynchrone (SSR), il peut être important de disposer d'un mode de fonctionnement du CSCT bien défini (voir 4.3).

Il convient de lancer automatiquement le fonctionnement normal lorsque l'état de courant de ligne faible a disparu.

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 (HMI).

6 Caractéristiques assignées

6.1 Généralités

Les caractéristiques assignées des différents composants, qui constituent des parties du CSCT, sont déduites des exigences de fonctionnement définies à l'Article 4.

6.2 Caractéristique assignée du condensateur

Les condensateurs du CSCT doivent être conçus, fabriqués et soumis à essai conformément aux exigences applicables de l'IEC 60143-1. Les facteurs liés au fonctionnement en mode capacitif amplifié doivent être définis 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 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.

6.3 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 l'IEC 60076-6:2007, 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 destinée à la bobine d'inductance. Le courant assigné de la bobine d'inductance doit être fonction de la valeur de courant la plus élevée parmi les modes de fonctionnement suivants:

- la racine carrée de la somme des carrés des composantes de courant à fréquence industrielle et harmoniques en mode capacitif;
- le courant lorsque le CSCT est en mode de shuntage, en tenant compte du courant de ligne assigné du CSCT.

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 l'IEC 60143-1.

6.4 Caractéristique assignée de la valve à thyristors

6.4.1 Généralités

Les courant et tension admissibles exigés pour 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 présumé que le courant de ligne dans les conditions normales reste sinusoïdal (non déformé) à la fréquence industrielle assignée.

6.4.2 Courant admissible

6.4.2.1 Généralités

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

6.4.2.2 Courant admissible au niveau des défauts internes

Un défaut interne est un défaut survenant dans la partie de ligne protégée contenant la batterie de condensateurs série. La valve à thyristors doit être conçue pour supporter le courant de défaut circulant dans la valve pour les cas de défaut de ligne spécifiés. Le cas suivant doit être considéré, dans lequel la valve à thyristors est initialement bloquée lorsque le défaut se produit, puis déclenchée pendant le défaut, ce qui produit 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, la valve à thyristors doit être conçue pour supporter le courant tant que le commutateur de shuntage connecté en parallèle n'est pas fermé. Il est exigé d'assurer la fiabilité des dispositifs permettant à la valve à thyristors de passer et de 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 à 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 du cas de surcharge le plus défavorable 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 pendant 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.

6.4.2.3 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 condensateurs 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 shunt pendant la durée du défaut sans augmenter la température du thyristor, ce qui est préjudiciable à la réinsertion rapide du CSCT après l'élimination d'un défaut. Il est à 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.

6.4.3 Tension admissible

6.4.3.1 Généralités

La caractéristique assignée de la tension de la valve CSCT est déduite des courbes de capacité (voir Figure 5). Sur ces courbes, différentes tensions de valve à thyristors ont été définies pour le fonctionnement assigné (continu), la surcharge temporaire et la surcharge dynamique. En principe, les exigences de fonctionnement continu imposent le "niveau de protection" U_{PL} des varistances connectées en parallèle avec la batterie de condensateurs. Le niveau de protection est la tension instantanée maximale qui apparaît aux bornes de la varistance en cas de défaut. En général, le niveau de protection est d'environ 2,0 à 2,5 fois la tension de crête à caractéristiques en régime continu, voir la Formule (4).

$$U_{PL} = K_1 \hat{U}_N = \sqrt{2} K_1 U_N \quad (4)$$

où

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

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

Lors de l'étude 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 montre l'aspect type 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.

Quelle que soit la plage de fonctionnement exigée, la valve à thyristors doit être conçue pour supporter au moins la tension du niveau de protection du condensateur série. Cela est important lorsqu'un CSCT est conçu avec un facteur d'amplification capacitive maximale relativement faible, car la tension maximale de la valve en mode capacitif amplifié peut être inférieure au niveau de protection du condensateur série.

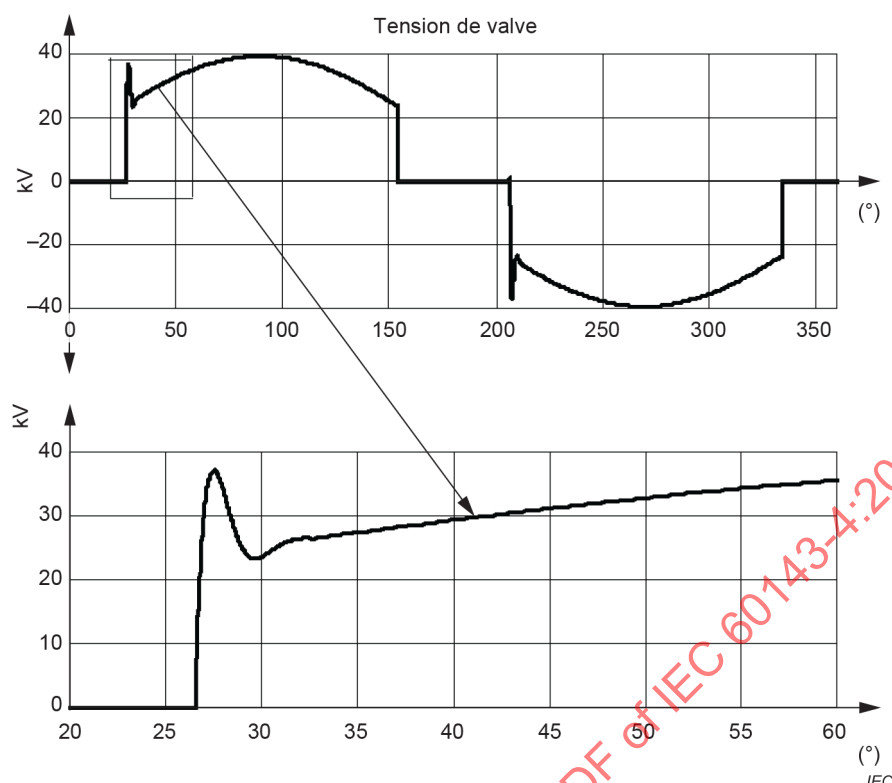


Figure 8 – Tension de la valve à thyristors dans un CSCT

Sur les courbes de plage de fonctionnement représentées à la Figure 5, il a été présumé que les zones de surcharge continue, temporaire et dynamique sont délimitées 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 de la valve à thyristors pour une tension donnée du condensateur apparaît donc pour le niveau d'amplification le plus élevé donnant cette tension du condensateur. Par exemple, le fonctionnement aux points A2, B2 et C2 de la Figure 10 donne les tensions de blocage les plus élevées de la valve à thyristors en fonctionnement continu, en surcharge temporaire et en surcharge dynamique, respectivement. Selon les courbes de capacité opérationnelle exigées 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 $U_{\text{max,blocage}}$ pour la conception de la valve à thyristors. Cette tension est supérieure à la tension de blocage en régime établi, 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 $U_{\text{max,blocage}}$.

La protection contre les surtensions au moment du blocage de la valve peut être obtenue par différentes approches. Par exemple:

- allumage de protection individuel mis en place pour chaque thyristor;
- système de mesure prévu 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.

6.4.3.2 Caractéristique assignée de la tension de la valve CSCT en 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 différents échelons de thyristor connectés en série;
- la redondance exigée pour le nombre d'échelons de thyristor connectés en série;
- les facteurs de sécurité utilisés dans les essais de la valve à thyristors (voir IEC 62823).

6.4.3.3 Caractéristique assignée de la tension de la valve CSCT en cas de défaut

Si le système de protection utilise un éclateur shunt qui exige 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 en cas de défaut n'est applicable.

6.5 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 l'élimination du défaut. Compte tenu de cette réinsertion rapide après l'élimination du défaut, le CSCT peut être shunté en cas de défaut externe sans avoir d'impact négatif significatif sur la stabilité du système.

En cas de défauts externes et internes, le shuntage de la valve à thyristors est souvent utilisé pour le CSCT. Cela permet de réduire nettement la quantité d'énergie de varistance exigée par rapport à un condensateur série conventionnel car pratiquement aucune injection d'énergie due aux courants de défaut du système n'a lieu dans la varistance. Le commutateur de shuntage est également fermé pour les défauts internes.

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 dans 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 nécessite également d'être prise en compte lors de la mise en place de protections de surcharge de la varistance, afin de s'assurer que le CSCT peut être réinséré malgré un courant d'oscillation.

Des exemples de cycles de fonctionnement avec des défauts externes et internes du CSCT sont présentés en 8.5.

6.6 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 choisies conformément aux principes définis dans l'IEC 60143-1:2015, Article 6. La tension du CSCT à utiliser dans le calcul des lignes de fuite doit être la valeur efficace maximale totale continue de la tension du condensateur, y compris l'effet de l'amplification 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

7.1 Généralités

L'équipement du CSCT doit être soumis aux essais de type spécifiés dans le présent document. Dans le cadre d'un projet particulier, ces essais doivent démontrer que l'équipement peut supporter les tâches exigées. 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, un second rapport détaillant les différences de conception et démontrant dans quelle mesure le rapport d'essai de type de référence atteint les objectifs d'essai du projet particulier, doit également être fourni.

De nouveaux essais de type doivent être réalisés 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 un niveau de contrainte ou de service plus élevé 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.

Les valves à thyristors doivent être soumises à essai conformément à l'IEC 62823. Tout autre équipement du circuit principal du CSCT pour lequel aucun essai n'est spécifié dans le présent document doit être soumis à essai conformément à l'IEC 60143-1, l'IEC 60143-2 et l'IEC 60143-3.

7.2 Essai du condensateur

7.2.1 Généralités

Il convient de réaliser les essais individuels, les essais de type et les essais spéciaux des condensateurs conformément à l'IEC 60143-1 et l'IEC 60143-3, en tenant compte du courant et de la tension assignés déterminés comme indiqué en 6.2 ci-dessus.

Les essais indiqués en 7.2.2 et 7.2.3 ci-après doivent être réalisés.

7.2.2 Essais individuels

Les essais individuels suivants doivent être réalisés:

- a) mesurage de la capacité (IEC 60143-1:2015, 5.3);
- b) mesurage des pertes du condensateur (IEC 60143-1:2015, 5.4);
- c) essai de tenue en tension entre bornes (IEC 60143-1:2015, 5.5);
- d) essai diélectrique en tension alternative entre bornes et cuve (IEC 60143-1:2015, 5.6);
- e) essai du dispositif interne de décharge (IEC 60143-1:2015, 5.7);
- f) essai d'étanchéité (IEC 60143-1:2015, 5.8);
- g) essai de décharge des fusibles internes (IEC 60143-3:2015, 5.1.2).

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

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

7.2.3 Essais de type

Les essais de type suivants doivent être réalisés:

- a) essai de stabilité thermique (IEC 60143-1:2015, 5.9);
- b) essai diélectrique en tension alternative entre bornes et cuve (IEC 60143-1:2015, 5.10);
- c) essai de tension de choc de foudre entre bornes et cuve (IEC 60143-1:2015, 5.11);
- d) essai de tenue au froid (IEC 60143-1:2015, 5.12);
- e) essai de courant de décharge (IEC 60143-1:2015, 5.13);
- f) essai de déconnexion des fusibles internes (IEC 60143-3:2015, 5.2.3);
- g) essai de tension après ouverture de l'enveloppe (IEC 60143-3:2015, 5.2.4).

Les essais de type sont réalisés 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 franchi avec succès tous les essais individuels.

7.2.4 Essai spécial (essai de vieillissement)

L'essai de vieillissement n'est à réaliser qu'après accord contractuel entre le fabricant et l'acheteur. Cet essai est réalisé conformément à l'IEC 60143-1:2015, 5.2.4.

7.3 Essais de la bobine d'inductance du CSCT

7.3.1 Généralités

Il convient de réaliser les essais individuels, les essais de type et les essais facultatifs de la bobine d'inductance du CSCT conformément aux paragraphes correspondants de l'IEC 60076-6:2007, Article 9, en tenant compte du courant et de la tension assignés déterminés comme indiqué en 6.3 ci-dessus.

Les essais indiqués en 7.3.2 et 7.3.3 ci-après doivent être réalisés.

7.3.2 Essais individuels

Les essais individuels suivants doivent être réalisés:

- a) mesure de la résistance des enroulements (IEC 60076-1);
- b) mesure de l'inductance (IEC 60076-6:2007, 9.10.5);
- c) mesure des pertes et facteur de qualité (IEC 60076-6:2007, 9.10.6);
- d) essai de surtension d'enroulement (IEC 60076-6:2007, 9.10.7).

7.3.3 Essais de type

Les essais de type suivants doivent être réalisés:

- a) mesure de l'inductance (IEC 60076-6:2007, 9.10.5);
- b) mesure des pertes et facteur de qualité (IEC 60076-6:2007, 9.10.6);
- c) essai d'échauffement (IEC 60076-6:2007, 9.10.8);
- d) essai au choc de foudre (IEC 60076-6:2007, 9.10.9).

7.3.4 Essais spéciaux

7.3.4.1 Généralités

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

- a) essai au courant de court-circuit (IEC 60076-6:2007, 9.10.10);
- b) mesure du niveau de bruit (IEC 60076-6:2007, 9.10.11);
- c) essai de tension de tenue alternative par source séparée (IEC 60076-6:2007, 9.10.12);
- d) essai au courant de décharge (IEC 60076-6:2007, 9.10.14);
- e) essai de résonance mécanique (IEC 60076-6:2007, 9.10.16);
- f) mesure de la résistance des enroulements en fonction de la fréquence harmonique (7.3.4.2).

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

7.3.4.2 Mesure de la résistance des enroulements en fonction de la fréquence harmonique

La résistance des enroulements 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.

7.4 Essais des valves à thyristors

7.4.1 Généralités

Les essais individuels, les essais de type et les essais spéciaux des valves à thyristors doivent être réalisés conformément à la norme IEC 62823.

7.4.2 Essais individuels

Les essais individuels suivants doivent être réalisés:

- a) examen visuel (IEC 62823:2015, 13.2);
- b) vérification des connexions (IEC 62823:2015, 13.3);
- c) vérification du circuit de répartition des potentiels (IEC 62823:2015, 13.4);
- d) vérification de la tenue en tension (IEC 62823:2015, 3.5);
- e) essai de décharge partielle (IEC 62823:2015, 13.6);
- f) vérification des auxiliaires (IEC 62823:2015, 13.7);
- g) vérification de l'allumage (IEC 62823:2015, 13.8);
- h) essai de pression du système de refroidissement (IEC 62823:2015, 13.9).