

	DIN IEC 60143-4 (VDE 0560-41)	DIN
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE
ICS 31.060.70		
Einsprüche bis 2008-09-30		
Entwurf		
Reihenkondensatoren für Starkstromanlagen – Teil 4: Thyristorgesteuerte Reihenkondensatoren (IEC 33/437/CD:2008)		
Series capacitors for power systems – Part 4: Thyristor controlled series capacitors (IEC 33/437/CD:2008)		
Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux – Partie 4: Condensateurs série contrôlés au thyristor (CEI 33/437/CD:2008)		
Anwendungswarnvermerk		
Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2008-07-14 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.		
Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.		
Stellungnahmen werden erbeten		
– vorzugsweise als Datei per E-Mail an dke@vde.com in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden – oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.		
Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevante Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.		
Gesamtumfang 108 Seiten		
DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE		

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 33/437/CD:2008 „Series capacitors for power systems – Part 4: Thyristor controlled series capacitors“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 33 „Power capacitors“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für diesen Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium K 341 „Leistungskondensatoren“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist in Tabelle NA.1 wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC 60050-436	–	–
EN 60061-1 + A1 bis A 7 + A 21 bis A 39	IEC 60061-1 + Ergänzungen A bis V + A 21 bis A 39, mod.	DIN EN 60061-1	–
EN 60061-2 + A1 bis A 7 + A 18 bis A 36	IEC 60061-2 + Ergänzungen A bis S + A 18 bis A 36, mod.	DIN EN 60061-2	–
EN 60068-1	IEC 60068-1 + Corrigendum + A1	DIN EN 60068-1	–
EN 60068-2-2 + A1	IEC 60068-2-2 + IEC 68-2-2A + A1	DIN EN 60068-2-2	–
–	IEC 60068-2-3	–	–
EN 60071-1	IEC 60071-1	DIN EN 60071-1 (VDE 0111-1)	VDE 0111-1
EN 60071-2	IEC 60071-2	DIN EN 60071-2 (VDE 0111-2)	VDE 0111-2
prEN 60076-6	IEC 14/538/CDV	DIN EN 60076-6 (VDE 0532-76-6)	VDE 0532-76-6
EN 60143-1	IEC 60143-1	DIN EN 60143-1 (VDE 0560-42)	VDE 0560-42
EN 60143-2	IEC 60143-2	DIN EN 60143-2 (VDE 0560-43)	VDE 0560-43
EN 60143-3	IEC 60143-3	DIN EN 60143-3 (VDE 0560-44)	VDE 0560-44
EN 60255-5	IEC 60255-5	DIN EN 60255-5 (VDE 0435-130)	VDE 0435-130
EN 60255-21-1	IEC 60255-21-1	DIN EN 60255-21-1	–
EN 60270	IEC 60270	DIN EN 60270 (VDE 0434)	VDE 0434
EN 61000-4-2 + A1 + A2	IEC 61000-4-2 + A1 + A2	DIN EN 61000-4-2 (VDE 0847-4-2)	VDE 0847-4-2
EN 61000-4-11	IEC 61000-4-11	DIN EN 61000-4-11 (VDE 0847-4-11)	VDE 0847-4-11
EN 61000-4-29	IEC 61000-4-29	DIN EN 61000-4-29 (VDE 0847-4-29)	VDE 0847-4-29
EN 61954 + A1	IEC 61954 + Corrigendum + A1	DIN EN 61954 (VDE 0553-100)	VDE 0553-100

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60061-1, *Lampensockel und -fassungen sowie Lehren zur Kontrolle der Austauschbarkeit und Sicherheit – Teil 1: Lampensockel*

DIN EN 60061-2, *Lampensockel und -fassungen sowie Lehren zur Kontrolle der Austauschbarkeit und Sicherheit – Teil 2: Lampenfassungen*

DIN EN 60068-1, *Umweltprüfungen – Teil 1: Allgemeines und Leitfaden*

DIN EN 60068-2-2, *Umweltprüfungen – Teil 2: Prüfungen; Prüfgruppe B: Trockene Wärme*

DIN EN 60071-1 (VDE 0111-1), *Isolationskoordination – Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen*

DIN EN 60071-2 (VDE 0111-2), *Isolationskoordination – Teil 2: Anwendungsrichtlinie*

DIN EN 60076-6 (VDE 0532-76-6); *Leistungstransformatoren – Teil 6: Drosselspulen*

DIN EN 60143-1 (VDE 0560-42), *Reihenkontensatoren für Starkstromanlagen – Teil 1: Allgemeines*

DIN EN 60143-2 (VDE 0560-43), *Reihenkontensatoren für Starkstromanlagen – Teil 2: Schutzeinrichtungen für Reihenkontensatorbatterien*

DIN EN 60143-3 (VDE 0560-44), *Reihenkontensatoren für Starkstromanlagen – Teil 3: Eingebaute Sicherungen*

DIN EN 60255-5 (VDE 0435-130), *Elektrische Relais – Teil 5: Isolationskoordination für Messrelais und Schutzeinrichtungen; Anforderungen und Prüfungen*

DIN EN 60255-21-1, *Elektrische Relais – Teil 21: Schwing-, Schock-, Dauerschock- und Erdbebenprüfungen an Messrelais und Schutzeinrichtungen; Hauptabschnitt 1: Schwingprüfungen (sinusförmig)*

DIN EN 60270 (VDE 0434), *Hochspannungs-Prüftechnik – Teilentladungsmessungen*

DIN EN 61000-4-2 (VDE 0847-4-2), *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-2: Prüf- und Messverfahren; Prüfung der Störfestigkeit gegen die Entladung statischer Elektrizität*

DIN EN 61000-4-11 (VDE 0847-4-11), *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-11: Prüf- und Messverfahren – Prüfungen der Störfestigkeit gegen Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen*

DIN EN 61000-4-29 (VDE 0847-4-29), *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-29: Prüf- und Messverfahren; Prüfungen der Störfestigkeit gegen Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen an Gleichstrom-Netzeingängen*

DIN EN 61954 (VDE 0553-100), *Leistungselektronik für Übertragungs- und Verteilungsnetze – Prüfung von Thyristorventilen für statische Blindleistungskompensatoren*

Reihenkondensatoren für Starkstromanlagen
Teil 4: Thyristorgesteuerte Reihenkondensatoren

Inhalt

	Seite
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	8
4 Betrachtungen zu Betrieb und Bemessung	12
4.1 Einleitung	12
4.2 TCSC-Kennwerte	15
4.3 Betriebsbereich	15
4.4 Bemessung der Blindleistung	16
4.5 Netzschwingungsdämpfung (POD)	16
4.6 SSR-Abschwächung	17
4.7 Oberschwingungen	17
4.8 Steuerwechselwirkungen zwischen TCSC in parallelen Leitungen	17
4.9 Betriebsbereich, Überspannungen und Arbeitszyklen	18
5 Ventilsteuerung	18
5.1 Zündansteuerung	18
5.2 Systemaspekte	19
5.3 Bestimmungsgemäße Betriebsbedingungen	19
5.4 Ventilzündung bei Netzfehlern	19
5.5 Maßnahmen bei niedrigem Leitungsstrom	20
5.6 Überwachung	20
6 Bemessungswerte	20
6.1 Bemessung des Kondensators	20
6.2 Bemessung der Drosselspule	20
6.3 Bemessung des Thyristorventils	21
6.4 Bemessung des Varistors	24
6.5 Isolationspegel und Kriechstrecken	24
7 Prüfungen	24
7.1 Prüfung des Kondensators	25
7.2 Prüfungen der TCSC-Drosselspule	26
7.3 Prüfung von Thyristorventilen	27
7.4 Prüfung des Schutz- und Steuerungssystems	38
8 Richtlinie für die Auswahl von Bemessung und Betrieb	40
8.1 Allgemeines	40
8.2 Thyristorgesteuerter Reihenkondensator	42
8.3 Thyristorventile	44
8.4 Kondensatoren und Drosselspulen	44

	Seite
8.5 Fehlerarbeitszyklen für die Varistorbemessung	45
8.6 Kühlsystem des Ventils.....	46
8.7 TCSC-Steuerung und -Schutz	47
8.8 Prüfungen vor der Inbetriebnahme und Inbetriebnahmeprüfungen	51
Anhang A Literaturhinweise	54
Bild 1 – Typische Nomenklatur einer TCSC-Anlage	13
Bild 2 – TCSC-Teilsegment.....	13
Bild 3 – TCSC-Wellenformen im eingeschwungenen Zustand für Steuerwinkel α und Stromflussdauer σ	14
Bild 4 – Kennwerte des betriebsfrequenten Blindwiderstandes des TCSC im eingeschwungenen Zustand nach Gleichung (4-1) mit $\lambda = 2,5$	15
Bild 5 – Beispiel des TCSC-Betriebsbereiches für POD (links) und SSR-Abschwächung (rechts)	16
Bild 6 – Fußpunktelektronik (VBE)	18
Bild 7 – Thyristorelektronik.....	19
Bild 8 – Thyristorventilspannung in einem TCSC	23
Bild 9 – Typisches Blockschaltbild einer Umgebung für die Echtzeit-Simulation eines TCSC- Schutz- und Steuerungssystems	40
Bild 10 – Beispiel eines Diagramms für den Betriebsbereich für TCSC	43
Tabelle 1 – Verhältnisse von Scheitelwert und Effektivwert der Spannung	14
Tabelle 2 – Typischer Arbeitszyklus für äußeren Fehler mit erfolglosem schnellen automatischen Wiedereinschalten	45
Tabelle 3 – Typischer Arbeitszyklus für internen Fehler mit erfolgreichem schnellen automatischen Wiedereinschalten	46
Tabelle 4 – Typischer Arbeitszyklus für inneren Fehler mit erfolglosem schnellen automatischen Wiedereinschalten	46

1 Anwendungsbereich

Das vorliegende Schriftstück ist eine Norm, die gemeinsam mit IEC 60143-1, IEC 60143-2 und IEC 60143-3 angewendet werden sollte, in der die Prüfung von Anlagen mit thyristorgesteuerten Reihenkondensatoren (en: thyristor controlled series capacitors – TCSC) festgelegt wird, die in Reihe mit Übertragungsleitungen angewendet werden. Dieses Schriftstück behandelt auch Fragen der Bemessung von TCSC-Thyristorventilbaugruppen, Kondensatoren und Drosselspulen sowie TCSC-Steuerkennlinien, Schutzmerkmale, Kühlsysteme und Anlagenbetrieb.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

Wenn es einen Widerspruch zwischen dieser Internationalen Norm und einer nachfolgend aufgeführten Norm gibt, dann hat der Text der vorliegenden Internationalen Norm Vorrang.

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

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

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

IEC 60068-2-3, *Basic environmental testing procedures – Part 2: Tests – Tests C: Damp heat, steady state*

IEC 61000-4-2, *Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test*

IEC 60143-1, *Series capacitors for power systems – Part 1: General – Performance, testing and rating – Safety requirements – Guide for installation and operation*

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

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

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

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

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

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

IEC 61400-4-11, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-11: Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage immunity tests*

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

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

IEC 60061-1, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*

ANMERKUNG In Anhang A sind weitere nützliche Verweisungen aufgeführt, auf die im Text nicht ausdrücklich verwiesen wird.

3 Begriffe

Einige Begriffe, die in dieser Norm verwendet werden, können im „Internationalen Elektrotechnischen Wörterbuch“ IEC 60050-436 nachgeschlagen werden. Der Begriff im IEV kann in einigen Fällen entweder zu weit gefasst oder zu einschränkend sein. In einem derartigen Fall wurde für die Begriffe, die in dieser Norm verwendet werden, eine zusätzliche Definition oder Anmerkung aufgenommen, die gemeinsam mit den Begriffen aus IEC 60143-1, IEC 60143-2 und IEC 60143-3 angewendet werden sollte.

3.1

Thyristorventil

elektrisch und mechanisch zusammengefasste Baugruppe aus Thyristorplätzen, vollständig mit allen Verbindungen, Hilfsbauelementen und mechanischen Aufbauten, die mit jeder Phase der Drosselspule oder des Kondensators eines TCSC in Reihe geschaltet werden kann

3.2

Überbrückungsstrom

Strom durch Umgehungsschalter, Schutzeinrichtung, Thyristorventil oder andere Bauelemente, die parallel zum Reihenkondensator liegen, wenn der Reihenkondensator überbrückt wird

3.3

kapazitiver Bereich

TCSC-Betrieb, der zu einem wirksamen Anstieg des betriebsfrequenten Blindwiderstandes des Reihenkondensators führt (siehe Bild 5)

3.4

zeitweilige Überlastung

Kurzzeit-Überlastbarkeit (üblicherweise 30 min) des TCSC bei Bemessungsfrequenz und im Umgebungstemperaturbereich

3.5

dynamische Überlastung

Kurzzeit-Überlastbarkeit (üblicherweise 10 s) des TCSC bei Bemessungsfrequenz und im Umgebungstemperaturbereich (siehe Bild 5 und Bild 10)

3.6

Bühnen-Reglerstromversorgung

Energiequelle(n), die auf dem Potential der Bühne für die Ausführung von Zünd-, Schutz- und Steuerfunktionen des Thyristorventils verfügbar ist (sind)

3.7

Bühnen-Kühlluftisolator

ein Isolator, der die Kühlluftwege zwischen Bühnen- und Erdniveau einschließt

3.8

thyristorgesteuerte Reihenkondensator-(TCSC-)Bank

Baugruppe aus Thyristorventilen, TCSC-Drosselspule(n), Kondensatoren und zugehörigen Hilfseinrichtungen, wie Gerüste, Stützisolatoren, Schalter und Schutzvorrichtungen sowie mit der Steuereinrichtung, die für eine vollständige Betriebsanlage erforderlich ist

3.9

Thyristorelektronik (TE)

Elektronikstromkreise auf Potential(en) des Thyristorventils, die Steuerfunktionen ausführen

3.10

TCSC-Drosselspule

eine oder mehr Drosselspule(n), die in Reihe an das Thyristorventil angeschlossen ist (sind) (siehe Bild 1, Nr. 12)

3.11

Thyristorventilbehälter

auf der Bühne montierter Behälter, welches das (die) Thyristorventil(e) und die zugehörige Ventilkühlung und Ventilelektronik aufnimmt

3.12

Thyristorvaristor

eine Baugruppe aus Varistoreinheiten, die Überspannungen auf einen bestimmten Wert begrenzt. Im Zusammenhang mit TCSCs wird der Thyristorvaristor üblicherweise durch seine Eignung zur Begrenzung der Spannung über einem Thyristorventil auf einen festgelegten Schutzpegel charakterisiert, wobei er Energie aufnimmt. Der Thyristorvaristor ist so ausgelegt, dass er für die zeitweiligen Überspannungen und die ununterbrochene Betriebsspannung über dem Thyristorventil spannungsfest ist

3.13

Ventilspernung

ein Vorgang, bei dem durch Sperren der Zündansteuerung das weitere Zünden eines Thyristors verhindert wird

3.14

Entsperren des Ventils

ein Vorgang, bei dem durch Aufhebung der Ventilspernung das Zünden eines Thyristor erlaubt wird

3.15

Elektronik der Ventilbasis (VBE – Valve Base Electronics)

Elektronikbaueinheit auf Erdpotential, die die Schnittstelle zwischen dem Steuerungssystem des TCSC und den Thyristorventilen ist

3.16

Schutz gegen Spannungsdurchbruch (VBO – Voltage Breakover)

Mittel zum Schutz der Thyristoren vor zu hoher Spannung, indem sie bei einer vorbestimmten Spannung gezündet werden

3.17

redundante Thyristorplätze

maximale Anzahl der Thyristorplätze in dem Thyristorventil, die von außen oder intern während des Betriebs kurzgeschlossen werden können, ohne den mit Typprüfungen nachgewiesenen sicheren Betrieb des Thyristorventils zu beeinflussen, und die, wenn und wann sie überschritten werden, entweder die Abschaltung des Thyristorventils erfordern würden, um die ausgefallenen Thyristoren auszuwechseln, oder die Akzeptanz eines erhöhten Ausfallrisikos bedeutet

3.18

Kondensatorstrom

I_C

Strom durch den Reihenkondensator (siehe Bild 2)

3.19

Leitungsstrom

I_L

betriebsfrequenter Leitungsstrom (siehe Bild 2)

3.20

Bemessungsstrom

I_N

der Effektivwert des Leitungsstroms (I_N), bei dem der TCSC den Dauerbetrieb mit Bemessungsblindwiderstand (X_N) und Bemessungsspannung (U_N) ausführen sollte

3.21

Ventilstrom

I_V

Strom durch das Thyristorventil (siehe Bild 2)

3.22

Kondensatorspannung

U_C

Spannung über dem TCSC (siehe Bild 2)

3.23

Schutzpegel

U_{PL}

Größe der betriebsfrequenten Scheitelspannung, die bei einer Netzstörung über der Überspannungsschutzeinrichtung anliegt

ANMERKUNG Der Schutzpegel kann als tatsächliche Scheitelspannung über einem Segment oder als auf den Scheitelwert der Bemessungsspannung über dem Kondensator bezogener Wert angegeben werden.

3.24

TCSC-Bemessungsspannung

U_N

betriebsfrequente Spannung über jedem Außenleiter des TCSC, die bei Nenn-Blindwiderstand (X_N), Bemessungsstrom (I_N) und -frequenz im Umgebungstemperaturbereich ununterbrochen gesteuert werden kann

3.25

scheinbarer Blindwiderstand

$X(\alpha)$

betriebsfrequenter scheinbarer Blindwiderstand des TCSC als Funktion des Thyristorsteuerwinkels (α) (siehe Bild 4)

3.26

Bemessungsfrequenz

f_N

Frequenz des Netzes, in dem der TCSC eingesetzt werden soll

3.27

Bemessungskapazität

C_N

Kapazitätswert, für den der TCSC-Kondensator bemessen wurde

3.28

physikalischer Blindwiderstand

X_C

betriebsfrequenter Blindwiderstand für jeden Außenleiter der TCSC-Bank bei gesperrter Zündansteuerung des Thyristors und bei einer Innentemperatur des Kondensatordielektrikums von 20 °C; $X_C = 1/(2\pi f_N \times C_N)$

3.29

Anhebungsfaktor

k_B

das Verhältnis von $X(\alpha)$ dividiert durch X_C ; $k_B = X(\alpha)/X_C$

3.30

Nennblindwiderstand

X_N

Nennwert des betriebsfrequenten Blindwiderstandes für jeden Außenleiter des TCSC bei Bemessungsstrom I_N und Nennanhebungsfaktor

3.31

Stromflussdauer

σ

der Teil einer Periode, in dem sich das Thyristorventil im leitenden Zustand befindet, $\sigma = 2\beta$ (siehe Bild 3)

3.32

Steuerwinkel

α

im elektrischen Winkelmaß angegebene Zeit vom Nulldurchgang der Kondensatorspannung (U_C) bis zum Beginn des Stromflusses durch das Thyristorventil (siehe Bild 3)

3.33

innerer Fehler

ein Leitungsfehler, der innerhalb des geschützten Leitungsabschnitts auftritt, in dem sich die Reihenkondensatorbank befindet

3.34

äußerer Fehler

ein Leitungsfehler, der außerhalb des geschützten Leitungsabschnitts auftritt, in dem sich die Reihenkondensatorbank befindet

3.35 Abkürzungen

ETT	elektrisch gesteuerte Thyristoren (en: electrically triggered thyristors)
FACTS	flexible Wechselspannungs-Übertragungssysteme (en: flexible AC transmission systems)
FSC	ortsfeste Reihenkompensation (en: fixed series compensation)
LTT	lichtgesteuerte Thyristoren (en: light-triggered thyristors)
MC	übergeordnete Steuerung (en: master control)
MTBF	mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen (en: mean time between failure)
MTTR	mittlere Dauer bis zur Wiederherstellung (en: mean time to repair)
POD	Netzschwingungsdämpfung (en: power oscillation damping)
RAM	Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Instandhaltbarkeit (en: reliability, availability and maintainability)
RIV	Funkstörspannung (en: radio influence voltage)
RTU	Datenerfassungsstation (en: remote terminal unit)
SCADA	Überwachungssteuerung und Datenerfassung (en: supervisory control and data acquisition)

E DIN IEC 60143-4 (VDE 0560-41):2008-07

ER	Ereignis-Rekorder (en: events recorder)
FR	Fehler-Rekorder (en: faults recorder)
RTDS	digitale Simulation in Echtzeit (en: real time digital simulation)
SSR	untersynchrone Resonanz (en: sub synchronous resonance)
SVC	statischer Blindleistungskompensator (en: static var compensator)
TCR	thyristorgesteuerte Drosselspule (en: thyristor-controlled reactor)
RMS	Effektivwert (en: root mean square)

4 Betrachtungen zu Betrieb und Bemessung

4.1 Einleitung

Der Reihenblindwiderstand einer Übertragungsleitung kann durch Kombinationen von Reihen-Festkondensatoren und TCSC-Bänken kompensiert werden (siehe Bild 1). In TCSC-Bänken werden ein oder mehr steuerbare Module eingesetzt, um den vom Käufer festgelegten Umfang der Leistungsanforderungen zu erfüllen. In diesem Abschnitt werden Anforderungen zur Betrachtung des TCSC-Betriebs und der TCSC-Bemessung diskutiert.

Die in dieser Norm diskutierten TCSC-Schaltungskonfigurationen (siehe Bild 2) berücksichtigen drei grundlegende Betriebsarten:

- BLK-Betrieb mit gesperrten Thyristoren (kein Stromfluss durch das Thyristorventil);
- BP-Betrieb mit ununterbrochenem Thyristorstrom;
- CAP-Betrieb mit kapazitiver Anhebung.

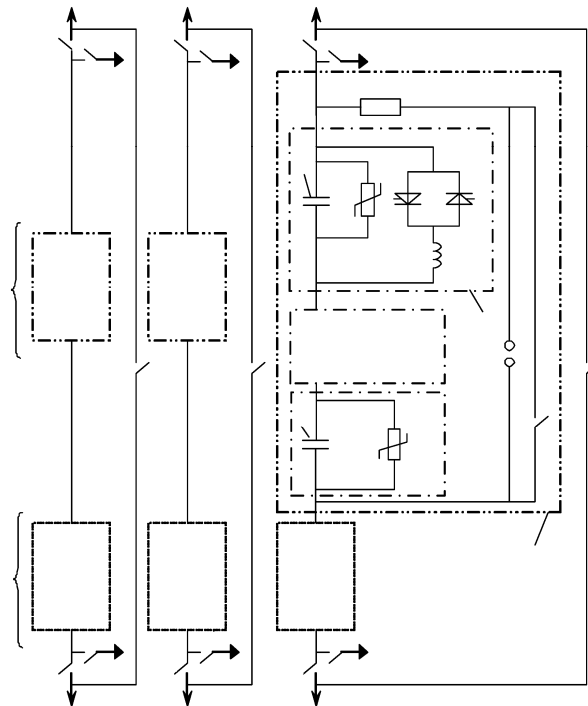


Bild 1 – Typische Nomenklatur einer TCSC-Anlage

Legende

- | | |
|--|--|
| 1 – Segment (Phase) | 9 – Äußerer Überbrückungstrennschalter |
| 2 – Schaltstufe oder -modul (dreiphasig) | 10 – Äußerer Trennschalter |
| 3 – Kondensatoreinheiten | 11 – Äußerer Erdungstrennschalter |
| 4 – Entladestrombegrenzungs- und -dämpfungselement | 12 – TCSC-Drosselspule |
| 5 – Varistor | 13 – Thyristorventil |
| 6 – Überbrückungsfunkenstrecke | 14 – Steuerbares Teilsegment (einphasig) |
| 7 – Überbrückungsschalter | 15 – Zusätzliche steuerbare Teilsegmente, falls erforderlich |
| 8 – Zusätzliche Schaltstufen, falls erforderlich | 16 – Zusätzliches FSC-Segment, falls erforderlich |

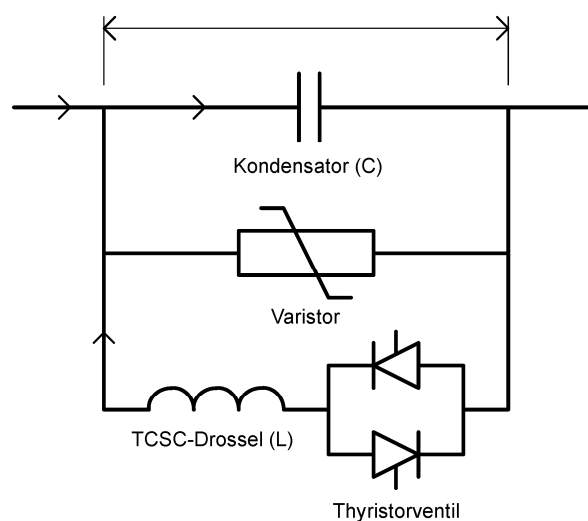


Bild 2 – TCSC-Teilsegment

Die Definition des Steuerwinkels (α) wurde in Übereinstimmung mit anderen Bauelementen der Leistungselektronik mit Bezug auf den Spannungsnulldurchgang ausgewählt. Es sollte jedoch beachtet werden, dass in vielen TCSC-Steuersystemen die Wellenform des Leitungsstroms als ein wichtiger Bezugswert der Steuerung herangezogen wird.

Wenn ein TCSC in der CAP-Betriebsart arbeitet, kann der Strom im Thyristorventilzweig die Spannung über dem Kondensator anheben und führt dadurch zu einem scheinbaren kapazitiven Blindwiderstand, der größer als der physikalische Blindwiderstand des Kondensators ist, siehe Bild 4. In einer TCSC-Anwendung würde der ansteigende kapazitive Blindwiderstand den Leitungsstrom erhöhen. Die Stromimpulse durch das Thyristorventil verzerren die Kondensatorspannung (U_C). Die verzerrte Wellenform bedeutet, dass die Kondensatorspannung Teilschwingungen enthält, die nicht betriebsfrequent sind, und dass das Verhältnis zwischen dem Gesamt-Effektivwert und der Gesamt-Scheitelspannung nicht mehr $\sqrt{2}$ beträgt, wie es bei einer rein sinusförmigen Wellenform der Fall ist, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1 – Verhältnisse von Scheitelwert und Effektivwert der Spannung

Anhebungsfaktor k_B	Normierte Entladefrequenz λ	Effektivwert der betriebsfrequenten Spannung	Scheitelwert der betriebsfrequenten Spannung	Gesamt- Effektivwert der Spannung	Gesamt- Scheitelwert der Spannung
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

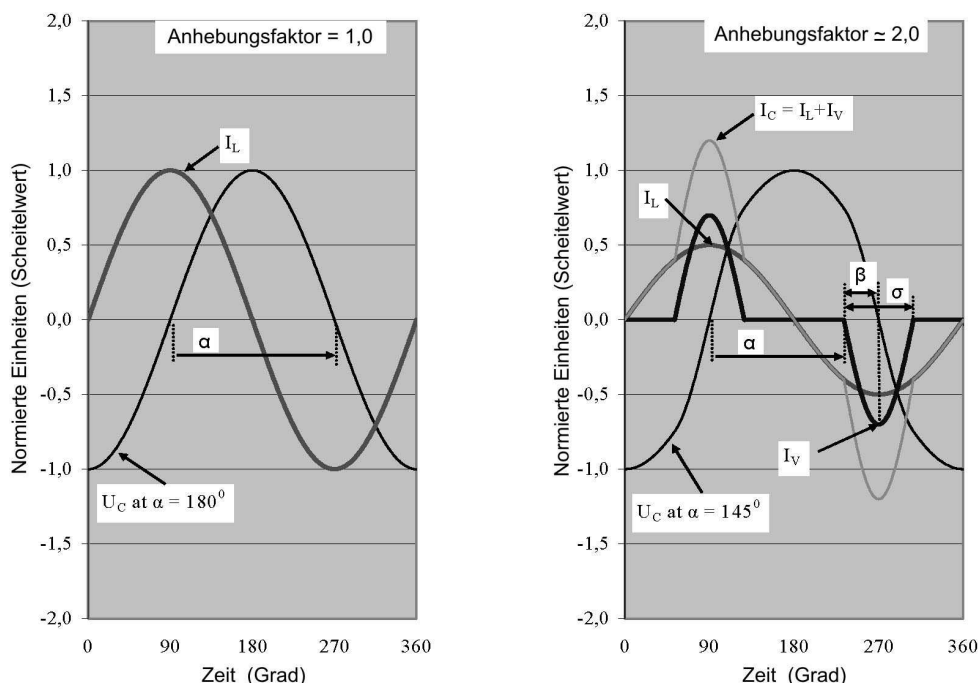


Bild 3 – TCSC-Wellenformen im eingeschwungenen Zustand für Steuerwinkel α und Stromflussdauer σ

4.2 TCSC-Kennwerte

Die TCSC-Kennwerte werden aus den Schaltungsparametern von Reihenkapazitor (C) und Drosselspe (L) bestimmt, siehe Bild 2. Der betriebsfrequente Blindwiderstand des TCSC im eingeschwungenen Zustand $X(\alpha)$ in Abhängigkeit vom Steuerwinkel des Thyristors kann mit Gleichung (4-1) berechnet werden.

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

Dabei ist

β die Hälfte der Stromflussdauer ($\pi - \alpha$);

α der Steuerwinkel ab der Kondensatorspannung null;

λ die normierte Entladefrequenz $\frac{1}{2\pi f_N \sqrt{LC}}$;

C die Kapazität des Reihenkapazitors;

L die Induktivität der TCSC-Drosselspe.

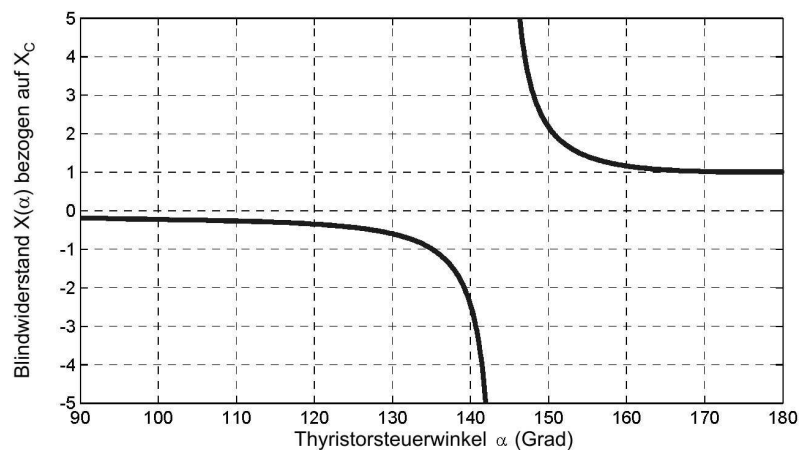


Bild 4 – Kennwerte des betriebsfrequenten Blindwiderstandes des TCSC im eingeschwungenen Zustand nach Gleichung (4-1) mit $\lambda = 2,5$

4.3 Betriebsbereich

Einer der wichtigsten Faktoren für die Bemessung eines TCSC ist der Betriebsbereich. Er hat großen Einfluss auf die Beanspruchungen der Bauelemente des Hauptstromkreises und muss deshalb vom Käufer eindeutig festgelegt werden. Der TCSC muss so ausgelegt werden, dass er dem Betrieb mit den unterschiedlichen Blindwiderständen und Leitungsströmen innerhalb des festgelegten Betriebsbereiches standhält. Der geforderte Betriebsbereich muss durch Netzuntersuchungen, die vom Käufer durchgeführt werden, definiert und in der Spezifikation eindeutig mit einer Reihe von Kurven des scheinbaren grundfrequenten Blindwiderstandes des TCSC oder des Anhebungsfaktors in Abhängigkeit vom Leitungsstrom angegeben werden, siehe Bild 5. Der geforderte Betriebsbereich ist abhängig vom Verwendungszweck des TCSC. Im Allgemeinen ist für ein TCSC für die Netzschwingungsdämpfung (POD) ein größerer Betriebsbereich als für ein TCSC zur Abschwächung der untersynchronen Resonanz erforderlich.

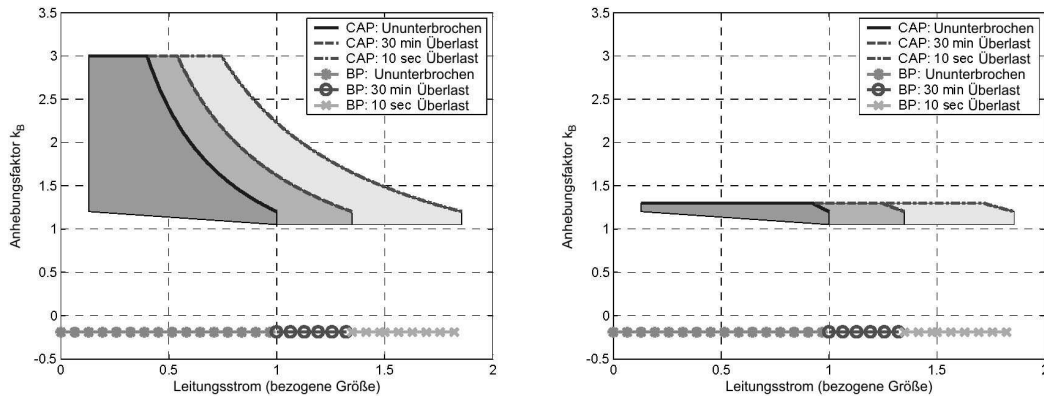


Bild 5 – Beispiel des TCSC-Betriebsbereiches für POD (links) und SSR-Abschwächung (rechts)

Der Betriebsbereich erstreckt sich nicht über die gesamte Strecke bis zur Nulllinie des Stroms, weil stationäres Zünden eines Thyristorventils bei sehr kleinen Thyristorspannungen und -strömen nicht möglich ist. Bei allen Thyristoren gibt es eine Mindestspannung, unterhalb der ein Zünden oder die Zustandsüberwachung nicht möglich ist. Außerdem besitzen einige Thyristorventile Stromversorgungen für die Zündkreise, die bei niedrigem Leitungsstrom zusätzliche Einschränkungen beim Zünden des Thyristorventils verursachen. Daraus ergibt sich ein Kleinstwert von Leitungsstrom und Anhebungsfaktor, bei deren Unterschreitung ein Betrieb in der CAP-Betriebsart nicht ausführbar ist. Dies kann Konsequenzen für die Anwendung und den Betrieb des TCSC nach sich ziehen. Bei niedrigen Leitungsströmen besitzt die Reihenkompensation nur einen eingeschränkten Wert. Deshalb wird empfohlen, den TCSC bei Werten des Leitungsstroms zu überbrücken, bei denen ein Betrieb in der CAP-Betriebsart aufrechterhalten werden kann, und wenn SSR von Belang ist.

4.4 Bemessung der Blindleistung

Wird ein TCSC mit kapazitiver Anhebung betrieben, unterscheidet sich die vom Leistungsnetz gesehene Blindleistung von der Blindleistung der Kondensatoren. Die Blindleistungsabgabe eines TCSC und die Blindleistung der Kondensatoren können berechnet werden mit:

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

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

Die Bemessung der Nennblindleistung des TCSC muss als die Blindleistungsabgabe, wie sie durch Q_{TCSC} in den vorstehenden Gleichungen bei Nennanhebung und Nennleitungsstrom gegeben ist, definiert werden.

4.5 Netzschwingungsdämpfung (POD)

Die Netzschwingungsdämpfung (POD) ist ein spezieller Teilbereich der Blindleistungsregelung, die durch Modulation der TCSC-Blindleistung als Antwort auf die Bedingungen des Übertragungsnetzes realisiert werden kann, um Netzschwingungen zu dämpfen. Mit der Anwendung der BP-Betriebsart während der Netzschwingungen kann das Dämpfungsverhalten eines TCSC wesentlich gesteigert werden, weil der Blindleistungsbereich eines TCSC um etwa das 1,2fache gegenüber der physikalischen Blindleistung des Kondensators vergrößert werden kann.

Ein TCSC für POD-Anwendungen muss die folgenden Grundanforderungen erfüllen:

- Die POD-Steuerung muss Netzstörungen behandeln können, die zu Netzschwingungen durch null führen und muss unempfindlich für die Richtung des mittleren Leistungsflusses sein.

- Die POD muss ausgedehnte Netzstörungen behandeln können. Das bedeutet, dass die Struktur der POD-Steuerung derart sein muss, dass die gewünschte Phasenverschiebung zwischen dem Eingangs- und dem Ausgangssignal des TCSC unabhängig von der Größe der Netzschwingung aufrechterhalten wird.
- Das TCSC-Steuersystem muss während der Netzschwingungsdämpfung die Betriebsarten von CAP auf BP und von BP auf CAP umschalten können.

4.6 SSR-Abschwächung

Bei richtiger Auslegung und Anwendung kann der TCSC eine bestimmte SSR-Abschwächung leisten, wenn er mit einem Anhebungsfaktor größer als eins betrieben wird. Der TCSC kann dabei helfen, die resonante SSR-Reihenkombination abzuschwächen, deren Ursache in den festen Reihencondensatoren liegt.

Wenn für die TCSC-Anwendung die Beachtung von SSR-Themen erforderlich ist, wird empfohlen, Untersuchungen mit detaillierten Modellen von Netzsystem, nahegelegenen Turbinen-Generatoren und dem TCSC durchzuführen. Diese Empfehlung wird umso dringlicher für Situationen, in denen das Netzsystem eine Kombination aus festen Reihencondensatoren und TCSC einschließt und die kombinierte Reihenkompensation 50 % überschreitet. Wenn sich bei den Untersuchungen zeigt, dass die festen Reihencondensatoren mit dem gewünschten Kompensationsgrad zu einem SSR-Problem führen, sollten die SSR-Untersuchungen unter aktiver Beteiligung des TCSC-Lieferanten durchgeführt werden.

Ein TCSC kann nur eine SSR-Abschwächung leisten, wenn die Ventile ununterbrochen zünden. Damit der TCSC die Zielstellungen der SSR-Abschwächung erfüllen kann, muss dessen Arbeitsbereich auf einen Anhebungsfaktor gezwungen werden, der gleich oder größer als der Kleinstwert ist, bei der er die gewünschte SSR-Abschwächung leisten kann. Der Grad der Abschwächung kann eine Funktion des Steuerwinkels sein, jedoch ist es vorteilhaft, dass das TCSC-Steuersystem einen untersynchronen Scheinwiderstand bereitstellt, der so wenig wie möglich vom Anhebungsfaktor abhängt.

In einer Anwendung mit kritischer SSR-Abschwächung muss der Betrieb des TCSC unter der Bedingung eines niedrigen Leitungsstroms überprüft werden, siehe 4.3.

4.7 Oberschwingungen

Ein TCSC in der Betriebsart CAP wird Oberschwingungen erzeugen. Die Größe dieser Oberschwingungen hängen vom Arbeitspunkt in Bezug auf den Leitungsstrom und den Anhebungsfaktor ab.

In Anwendungen, in denen der TCSC für Zwecke der SSR-Abschwächung oder Netzschwingungsdämpfung eingesetzt wird, arbeitet der TCSC üblicherweise mit dem Nenn-Anhebungsfaktor und während der Dauer von Netzstörungen arbeitet er zeitweilig mit einem höheren Anhebungsfaktor. Deshalb müssen die Anforderungen hinsichtlich Oberschwingungen bei einer derartigen TCSC-Anlage für den Nennbetrieb, d. h. bei Bemessungsleitungsstrom und Nenn-Anhebungsfaktor, angegeben werden.

Die Oberschwingungsanforderungen an einen TCSC müssen in Bezug auf die maximal zulässige Spannungsverzerrung angegeben werden, die der TCSC an den Sammelschienen, welche das reihen-kompensierte Leitungssegment verbinden, verursacht. Die Untersuchung der Oberschwingungen an einer TCSC-Anlage erfordert genaue Daten der Übertragungsleitung der reihen-kompensierten Leitung gemeinsam mit den Oberschwingungsersatzgrößen der Leitungsenden, die vom Käufer bereitzustellen sind.

4.8 Steuerwechselwirkungen zwischen TCSC in parallelen Leitungen

In Fällen, in denen zwei TCSC in parallelen Leitungen eingebaut sind, besteht bei Netzstörungen ein Risiko von Steuerwechselwirkungen zwischen den TCSC. Zur Vermeidung des Risikos schädlicher Wechselwirkungen zwischen parallel angeschlossenen TCSC wird Folgendes empfohlen:

- Die POD-Steuerungen verwenden dieselben Eingangssignale, d. h. die Summe des Leistungsflusses an den parallelen Kreisen.
- Die POD-Steuerungen haben eine vergleichbare Dynamik.
- Die Blindwiderstandsregler haben eine vergleichbare Dynamik und reagieren in ähnlicher Weise, wenn sie an Grenzwerte stoßen.
- Der Kompensationsgrad eines Leitungssegmentes bei maximalem Anhebungsfaktor sollte gut unter 100 % liegen.

4.9 Betriebsbereich, Überspannungen und Arbeitszyklen

4.9.1 Betriebsbereich

Der TCSC muss für den Betrieb innerhalb der festgelegten ununterbrochenen und zeitweiligen Betriebsbereiche geeignet sein. Der Betriebsbereich wird im Regelfall vom Käufer festgelegt.

4.9.2 Transiente Überspannungen

Der TCSC muss für wiederholte Vorgänge bei transienten Überspannungen, die durch Störungen des Starkstromnetzes verursacht werden, für den höchstzulässigen Wert von U_{PL} geeignet sein, die zwischen den TCSC-Anschlussklemmen zu erwarten ist. Die transiente Überspannung wird üblicherweise mit einem Varistor-Überspannungsschutz begrenzt.

4.9.3 Arbeitszyklen

Die TCSC-Anlage muss so ausgelegt sein, dass sie den geforderten Folgen von Störungen, dynamischer Überlastung, zeitweiliger Überlastung und Dauerströmen standhält, die der Käufer festlegt. Diese Folgen bilden die Arbeitszyklen, für die die Bauteile der TCSC-Bank bemessen sein müssen. Der Arbeitszyklus muss im Einklang mit dem Betrieb des umgebenden Starkstromnetzes bei inneren und äußeren Leitungsstörungen stehen. Der Käufer muss die Arbeitszyklen bei Störungen mit üblicher und längerer Dauer und für Störungen unterschiedlicher Arten (dreiphasig oder einphasig) festlegen. Störungen Außenleiter-Außenleiter sind zu berücksichtigen, wenn sie besonders vom Käufer festgelegt wurden. Beispiele für typische Arbeitszyklen sind in 8.5 angegeben.

Der Käufer muss ein Starkstromnetz festlegen, dass gleichwertig zu demjenigen ist, welches für die Untersuchungen von Störungen der äußeren und inneren Übertragungsleitungen zur Bemessung der Anlagenteile zu verwenden ist.

Obwohl der Schwerpunkt dieses Abschnitts die Arbeitszyklen mit Störungen des Starkstromnetzes umfassen, ist es verständlich, dass der TCSC so ausgelegt sein muss, dass er bei allen anderen Ereignissen, wie Einschalten und Wiedereinschalten unter den vom Käufer definierten Bedingungen, betrieben werden kann.

5 Ventilsteuerung

5.1 Zündansteuerung

Das Teilsystem der Fußpunktelektronik (en: valve base electronic – VBE) ist eine Schnittstelle zwischen der TCSC-Steuerung für ein Teilsegment und dem Teilsystem der bühnenmontierten Thyristorelektronik (en: thyristor electronics – TE), siehe Bild 6.

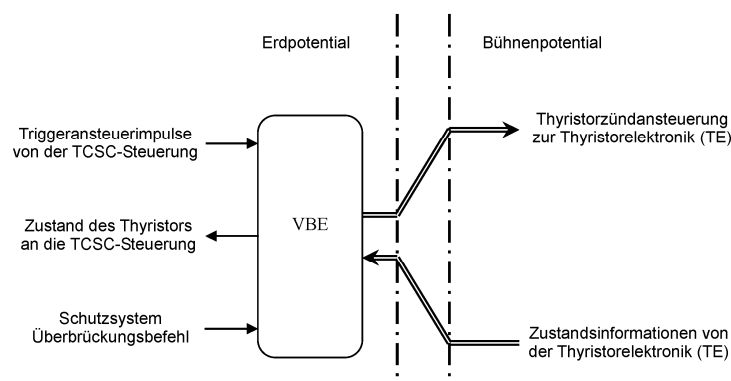


Bild 6 – Fußpunktelektronik (VBE)

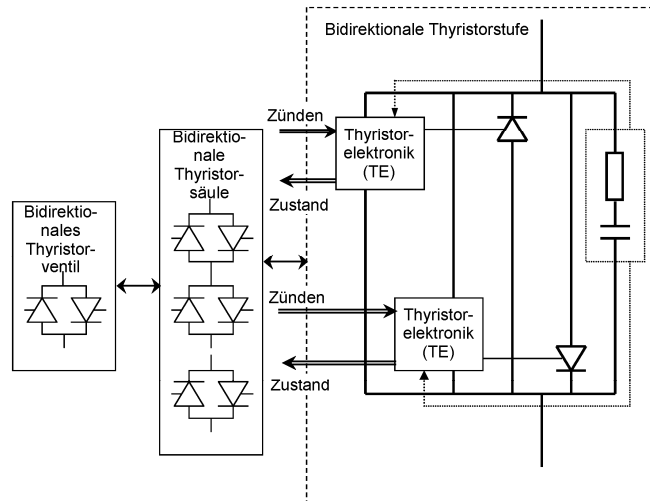


Bild 7 – Thyristorelektronik

Die TCSC-Steuerung erzeugt Zündansteuerimpulse, die an die VBE übertragen werden. In der VBE erfolgt eine Verteilung der Zündansteuerimpulse über Lichtwellenleiter an jede einzelne TE. Außerdem werden Zustandsinformationen von jedem Thyristorplatz von der TE an die VBE gesendet, in der eine Diagnose des Zustands des Thyristorventils vorgenommen wird. Die Diagnoseinformationen werden an die TCSC-Steuerung gesendet, siehe Bild 6.

Der Thyristorventilschutz, Widerstands-Kondensator-TSE-Beschaltung, und die Stromversorgung für die TE sind auf der Bühne an jedem Thyristorplatz untergebracht, wo die Gate-Impulse für jeden Thyristor erzeugt werden, wie in Bild 7 dargestellt.

5.2 Systemaspekte

Für das Ventilsteuersystem gelten die folgenden Anforderungen unabhängig von der Art der Thyristoren. Es muss möglich sein, die Thyristoren während sämtlicher anwendbarer Betriebsbedingungen zu zünden für:

- Steuerung des Ventils unter normalen Betriebsbedingungen in der kapazitiven Anhebungsbetriebsart und Überbrückungsbetriebsart;
- Steuerung des Ventils zur Überbrückung des Reihenkondensators bei Netzstörungen;
- Sicherstellung, dass das Ventil nicht in einem Zustand gesperrt wird, der zu einer gefährlichen Spannung über dem Ventil führen würde;
- Sicherstellung, dass das Ventil nicht in einem Zustand gesperrt wird, in der die Thyristoren keine Erholungszeit nach vorangegangener Leitung (Fehlerstrom) haben.

5.3 Bestimmungsgemäße Betriebsbedingungen

Es muss möglich sein, dass Ventil im gesamten interessierenden Betriebsbereich zu steuern. Die Zündansteuerung des Ventils bei niedriger Spannung eignet sich wahrscheinlich nur bei niedrigen Leitungsströmen oder bei niedrigen Anhebungsfaktoren in der kapazitiven Anhebungsbetriebsart, siehe auch 4.3 und 5.5.

5.4 Ventilzündung bei Netzfehlern

Das Zünden des Thyristorventils bei Kondensatorschutzpegel kann bei Netzstörungen erforderlich sein, um die Überlastung des Varistors zu vermeiden. In diesem Fall führt das Zünden des Thyristorventils zu einem Gesamtventilstrom, der die Summe aus Kondensatorentladestrom und Fehlerstrom durch den TCSC ist. Während dieser Bedingungen würde das Sperren des Ventils zu einer Thyristorüberspannung führen. Deshalb sollte das Ventil leitend bleiben. Es sollte beachtet werden, dass das Thyristorventil immer so ausgelegt sein muss, dass es den Fehlerstrom unabhängig von der Strategie zur Störungsbehandlung führen kann, weil eine Netzstörung dann auftreten kann, wenn das Thyristorventil im leitenden Zustand ist.

In Zuständen mit Netzstörungen und hohen Stromanstiegen im Thyristorventil ist es von entscheidender Bedeutung, dass das Zündsystem des Thyristors schnell genug ist, um den Aufbau einer hohen Spannung über den Thyristoren zu verhindern, wenn der Stromverlauf durch null geht.

5.5 Maßnahmen bei niedrigem Leitungsstrom

Der TCSC kann nicht weiter in der kapazitiven Anhebungsbetriebsart betrieben werden, wenn der Leitungsstrom sehr klein wird, typischerweise im Bereich von einem Zehntel des Bemessungswertes des Leitungsstroms. Dafür gibt es zwei Gründe:

- a) Das Messsystem hat eine begrenzte Auflösung und ein begrenztes Rauschunterdrückungsvermögen. Deshalb werden die Antwortsignale für das Steuersystem zu ungenau.
- b) Die Hilfsstromversorgung für die Thyristorzündansteuerung wird häufig aus dem Hauptstromkreis abgegriffen. Wenn der Leitungsstrom zu klein wird, fällt diese Stromversorgung aus und die Thyristoren können nicht gezündet werden.

Bei einem niedrigen Leitungsstrom ist der entsprechende betriebsfrequente Grundswingungsanteil der eingeschalteten Kondensatorspannung auch klein. Unter dieser Bedingung hängt der Leistungsfluss in der Leitung nur geringfügig davon ab, ob der Reihenkondensator eingeschaltet oder überbrückt ist. Aus Sicht der untersynchronen Resonanz (SSR) könnte es jedoch von Bedeutung sein, dass die Betriebsart des TCSC ausreichend bestimmt ist, siehe 4.3.

Der bestimmungsgemäße Betrieb sollte automatisch aufgenommen werden, wenn der Zustand des niedrigen Leitungsstroms vorüber ist.

Vom Standpunkt des Betriebsmittelschutzes scheinen niedrige Leitungsströme eher harmlos zu sein. Wenn die Zünd-Hilfsstromversorgung vom Hauptstromkreis abgegriffen wird, ist es wichtig, dass das System ausreichend schnell arbeiten kann, um die Thyristoren zu zünden und dadurch eine mögliche Überspannung im Falle eines plötzlichen Spannungsanstiegs über dem Kondensator zu verhindern.

5.6 Überwachung

Das Ventilsteuersystem muss über Überwachungssysteme verfügen, die eine Anzeige der Anzahl ausgefallener Thyristorpositionen je Phase gestattet. Diese Anzeigen müssen am Bediener-Steuersystem (HMI) zur Verfügung stehen.

6 Bemessungswerte

Die Bemessungswerte der verschiedenen Bauteile, aus denen ein TCSC aufgebaut ist, werden aus den Betriebsanforderungen abgeleitet, die in Abschnitt 4 „Betrachtungen zu Betrieb und Bemessung“ beschrieben sind.

6.1 Bemessung des Kondensators

Die Kondensatoren für den TCSC müssen nach den anwendbaren Anforderungen in IEC 60143-1 ausgelegt, hergestellt und geprüft werden. Bei der Festlegung von Bemessungsstrom und -spannung des Kondensators ist der Betrieb in der kapazitiven Anhebungsbetriebsart zu berücksichtigen. Es ist zu beachten, dass der Bemessungsstrom eines TCSC-Kondensators üblicherweise höher als der Bemessungsdurchgangsstrom des TCSC ist. Die tatsächlichen Wellenformen des Kondensatorstroms hinsichtlich des Betriebs in der kapazitiven Anhebungsbetriebsart müssen in der Betriebsmittelspezifikation für den Kondensatorhersteller enthalten sein. Die Bemessungsspannung des Kondensators ist als Gesamteffektivwert der Spannung der betriebsfrequenten Anteile und der Oberschwingungsanteile anzusetzen. Der Bemessungsstrom muss auf der Quadratwurzelsumme der entsprechenden Stromanteile beruhen.

6.2 Bemessung der Drosselspule

Die TCSC-Drosselspulen müssen nach den anwendbaren Anforderungen in IEC 60076-6, Abschnitt 9, ausgelegt, hergestellt und geprüft werden. Die tatsächlichen Wellenformen des Drosselspulenstroms hinsichtlich des Betriebs in der kapazitiven Anhebungsbetriebsart müssen in der Betriebsmittelspezifikation

für den Kondensatorhersteller enthalten sein. Der Bemessungsstrom muss auf der Quadratwurzelsumme der der betriebsfrequenten Anteile und Oberschwingungsanteile des Stroms beruhen. Der Isolationspegel zwischen den Anschlussklemmen der Drosselspule muss auf dem Schutzgrad der TCSC-Bank beruhen, der in IEC 60143-1 beschrieben ist.

6.3 Bemessung des Thyristorventils

Die erforderliche Strom- und Spannungsbelastbarkeit des Thyristorventils ist aus dem Betriebsbereich und den Arbeitszyklen abzuleiten, die vom Käufer festgelegt werden. Für das Konstruktionsverfahren ist anzunehmen, dass der Leitungsstrom während störungsfreier Bedingungen sinusförmig (unverzerrt) mit der Bemessungsbetriebsfrequenz bleibt.

6.3.1 Strombelastbarkeit

Die Anforderungen an die Strombelastbarkeit müssen sowohl für den Betrieb in der kapazitiven Anhebungsbetriebsart als auch den Betrieb in der Überbrückungsbetriebsart in Betracht gezogen werden. Bei allen festgelegten Last- und Störungsarbeitszyklen, die zwischen Käufer und Lieferant vereinbart sind, muss die Sperrschichttemperatur des Thyristors innerhalb annehmbarer Grenzwerte liegen.

6.3.1.1 Strombelastbarkeit bei internen Störungen

Eine interne Störung ist eine Leitungsstörung, der innerhalb eines geschützten Leitungsabschnitts auftritt, in dem sich die Reihenkondensatorbank befindet. Das Thyristorventil muss so ausgelegt sein, dass es den Fehlerstrom für einen entsprechend festgelegten Leitungsfehler durch das Ventil führen kann. Zu berücksichtigen ist der Fall, dass das Thyristorventil anfänglich gesperrt ist, wenn die Störung auftritt, und anschließend während einer Störung angesteuert wird und sich daraus ein Thyristorstrom ergibt, der sich aus einer Komponente des Fehlerstroms der Leitung und einer Komponente des Kondensatorentladestroms zusammensetzt. Werden für das Thyristorventil und für den Überbrückungsleistungsschalter verschiedene Drosselspulen verwendet, müssen Mittel vorgesehen werden, um einen „eingefangenen Strom“ zu verhindern oder ausreichend zu dämpfen. Die Beanspruchungen des Thyristorventils hängen vom Auslegungsprinzip ab.

- a) **Der Thyristor wird zur Überbrückung des Kondensators bei Leitungsstörungen eingesetzt.** In diesem Fall muss das Thyristorventil so ausgelegt sein, dass es Strom führt, bis der parallel angeschlossene Überbrückungsschalter schließt. Es ist erforderlich, dass die Zuverlässigkeit der Bauelemente sichergestellt wird, die das Thyristorventil zum Einnehmen und Beibehalten der Überbrückungsbetriebsart veranlassen (d. h., während der Störung ununterbrochen leitend zu sein). Da das Ventil im leitenden Zustand bleibt, bis der parallele Überbrückungsschalter schließt, wird das Thyristorventil keiner Spannungsbeanspruchung ausgesetzt. Das bedeutet, dass der maximal zulässige Stoßstrom durch die Maximaltemperatur der Thyristorsperrschicht bestimmt wird, die unter Berücksichtigung des ungünstigsten Überlastungsfalls vor der Störung den zerstörenden Wert nicht überschreiten darf.
- b) **Der Fehlerstrom wird in eine parallele Überbrückungsfunkenstrecke kommutiert.** In diesem Fall muss das Thyristorventil so ausgelegt sein, dass es den Strom während einer Halbperiode der Betriebsfrequenz führt. Für das Triggern der Überbrückungsfunkenstrecke muss das Thyristorventil sperren können, damit die Kondensatorspannung für ein erfolgreiches Triggern der Überbrückungsfunkenstrecke ausreichend hoch wird. Das bedeutet, dass die Beanspruchung mit dem Thyristorstoßstrom unterhalb eines Wertes zu halten ist, der eine Rückwärts-Sperrspannung zulässt, die nach dem Fehlerstrom über dem Thyristorventil auftritt.

6.3.1.2 Strombelastbarkeit bei externen Störungen

Eine externe Störung ist eine Leitungsstörung, die außerhalb des geschützten Leitungsabschnitts auftritt, in dem sich die Reihenkondensatorbank befindet. Derartige Störungen verursachen häufig Leitungsströme, die den maximalen Leitungsstrom im Betriebsbereich des TCSC überschreiten. In derartigen Fällen kann es zulässig sein, den TCSC während der Störungsdauer mit einem Thyristorventil zu überbrücken. Es ist notwendig, dass der TCSC wieder eingeschaltet wird, sobald der Leitungsstrom kleiner wird und wieder den Wert des üblichen Betriebsbereichs annimmt. Das Wiedereinschalten kann unter Überstrombedingungen erfolgen (zeitweilige Überlastung oder dynamische Überlastung), falls festgelegt. Die Strombelastbarkeit des Thyristorventils muss dementsprechend ausreichend sein, um den Überbrückungsstrom während der Störungsdauer zu führen, ohne dass es dabei zu einer Erwärmung im Thyristor kommt, die hinsichtlich des

schnellen Wiedereinschaltens des TCSC nach der Störungsbeseitigung verbotend ist. Es ist zu beachten, dass das Ventil zusätzlich zum Fehlerstrom aus der Leitung auch den Kondensatorentladestrom führen muss, der zu Beginn des Überbrückungsvorgangs auftritt.

6.3.2 Spannungsbelastbarkeit

Die Spannungsbemessung des TCSC-Ventils wird aus den Belastbarkeitskurvenverläufen abgeleitet, die in Bild 5 dargestellt sind. In diesen Kurvenverläufen sind verschiedene Spannungen des Thyristorventils für Bemessungsbetrieb (ununterbrochenen), für zeitweilige Überlastung und für dynamische Überlastung definiert. Üblicherweise bestimmen die Anforderungen an den ununterbrochenen Betrieb den „Schutzpegel“ U_{PL} des Varistors, der parallel zur Kondensatorbank angeschlossen ist. Der Schutzpegel ist der Höchstwert der Momentanspannung, die bei einer beliebigen Störung über dem Varistor anstehen kann. Üblicherweise beträgt der Schutzpegel das 2,0 bis 2,5fache der Scheitelspannung für Dauerbemessung.

$$U_{PL} = K_1 \hat{U}_N = \sqrt{2} K_1 U_N \quad (5-1)$$

Dabei ist

$K_1 = 2,0$ bis $2,5$.

Wenn die Anforderungen an die zeitweilige oder dynamische Überlastung strenger sind, kann ein höherer Schutzfaktor notwendig sein. Der Varistor begrenzt die Spannung über dem Thyristorventil auf den Schutzspannungspegel U_{PL} im Sperrzustand.

Bei der Auslegung der Spannungsbelastbarkeit des Ventils ist es auch notwendig, das beim Ausschalten auftretende Spannungsüberschwingen zu berücksichtigen. Bild 8 zeigt die typischen Formen der Thyristorspannung in einem TCSC in der kapazitiven Anhebungsbetriebsart.

Der Höchstwert der Thyristorspannung hängt hauptsächlich von der Kondensatorspannung beim Ausschalten zuzüglich einem Überschwingen der Thyristorausschaltspannung ab, die ihrerseits vom Stromanstieg beim Ausschalten und der Induktivität der TCSC-Drosselspule abhängt.

ANMERKUNG Das Thyristorventil muss unabhängig vom geforderten Betriebsbereich so ausgelegt werden, dass es mindestens die Schutzpegelspannung des Reihenkondensators aushält. Dies ist wichtig, wenn ein TCSC mit einem relativ kleinen maximalen kapazitiven Anhebungsfaktor ausgelegt ist, weil ansonsten der Höchstwert der Ventilspannung in der kapazitiven Anhebungsbetriebsart unter dem Schutzpegel des Reihenkondensators liegen kann.

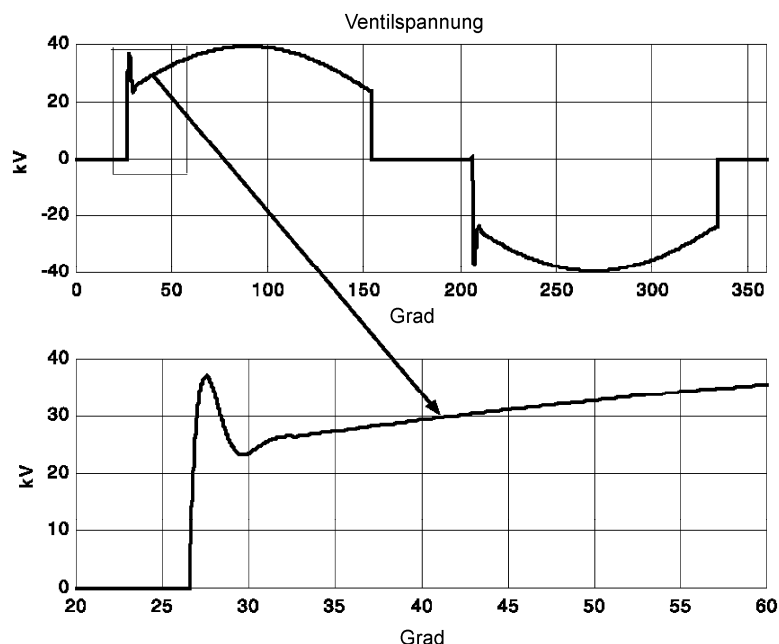


Bild 8 – Thyristorventilspannung in einem TCSC

In den Kurvenverläufen der Spannung-/Strombelastbarkeit in Bild 5 wurde angenommen, dass die Bereiche für ununterbrochenen Betrieb, zeitweilige und dynamische Überlastung für einen Bereich der Leitungsströme durch konstante Kondensatorspannungsverläufe begrenzt werden. Derartige Grenzwerte werden durch die Berücksichtigung der Spannungsbelastbarkeit des Kondensators begründet. Der Blindwiderstand verändert sich entlang dieses Grenzwertes und steigt indirekt proportional zum Leitungsstrom. Entsprechend erhöhen sich Ausschaltspannung und Stromanstieg, wenn der Leitungsstrom entlang des konstanten Spannungsgrenzwertes abnimmt. Die höchste Ausschaltspannung des Thyristorventils bei einer bestimmten Kondensatorspannung tritt deshalb beim höchsten Anhebungspegel auf, der diese Kondensatorspannung liefert. Als Beispiel führt der Betrieb in den Punkten A2, B2 und C2 in Bild 10 zu den höchsten Ausschaltspannungen des Thyristorventils für Dauerbetrieb, zeitweilige Überlastung bzw. dynamische Überlastung. Die Ausschaltspannung kann abhängig von den geforderten Belastbarkeitsverläufen und der Auslegung des Hauptstromkreises höher oder niedriger als die durch den Varistor bestimmte maximale Schutz Ausschaltspannung sein.

Der Höchstwert der Ausschaltspannung $U_{\max, \text{turn-off}}$ sollte für die Konstruktion des Thyristorventils bestimmt werden. Diese Spannung ist höher als die Ausschaltspannung im eingeschwungenen Zustand, wenn der TCSC bei einem beliebigen Punkt innerhalb des Belastbarkeitsdiagramms arbeitet. Im Steuersystem müssen Maßnahmen ein Einschalten verhindern, die höhere Ausschaltspannungen als $U_{\max, \text{turn-off}}$ verursachen.

Der Überspannungsschutz beim Ausschalten des Ventils kann nach verschiedenen Herangehensweisen bearbeitet werden. Einige Beispiele sind:

- Individuelles Schutzzünden, das für jeden Thyristor realisiert wird.
- Über dem gesamten Ventil angeordnetes Messsystem, dass bei Überspannung ein Schutzzünden erzeugt.
- Ein Messsystem überwacht di/dr des Thyristorzweiges und erzeugt ein Schutzzünden, wenn der Stromanstieg den Auslegungswert überschreitet.

6.3.2.1 Spannungsbemessung des TCSC-Ventils, bestimmungsgemäßer Betrieb

Das Ventil kann konstruiert werden, wenn die Höchstwerte der Thyristorventilspannungen hinsichtlich des Varistorschutzpegels und der Höchstwert der Ausschaltspannung des Thyristors bestimmt sind. Bei der Auswahl der Anzahl der Bauelemente und der Spannungsbemessung müssen die folgenden Faktoren in Betracht gezogen werden:

- Maximale Ventilspannung einschließlich Ausschalt-Überschwingen.

E DIN IEC 60143-4 (VDE 0560-41):2008-07

- Spannungsaufteilung zwischen den einzelnen, in Reihe geschalteten Halbleiterbauelementen.
- Geforderte Redundanz in der Anzahl der in Reihe geschalteten Halbleiterbauelemente.

6.3.2.2 Spannungsbemessung des TCSC-Ventils, gestörter Betrieb

Wenn das Schutzsystem eine Überbrückungsfunkenstrecke benutzt, die eine hohe Überschlagnspannung erfordert, muss die Stehspannung des Thyristors nach einem Stoßstrom berücksichtigt werden.

Wenn für das Schutzsystem eine ununterbrochene Überbrückung angewendet wird, ist für den gestörten Betrieb keine spezifische Anforderung an die Spannungsbelastbarkeit anwendbar.

6.4 Bemessung des Varistors

Ein thyristorgesteuerter Reihenkondensator kann mit einem Thyristorventil fast unmittelbar an dem Zeitpunkt überbrückt werden, an dem ein Fehlerstrom festgestellt wird, und kann nach der Störungsbeseitigung sehr schnell wieder eingeschaltet werden. Aufgrund des sehr schnellen Wiedereinschaltens nach der Störungsbeseitigung kann der TCSC während einer externen Störung überbrückt werden, ohne dabei eine wesentliche negativen Einwirkung auf die Netzstabilität auszuüben.

Für TCSC werden oftmals Thyristorventilüberbrückungen bei externen und internen Störungen der Übertragungsleitungen verwendet. Damit wird der erforderliche Betrag der Varistorenergie stark verringert, wenn man es mit einem herkömmlichen Reihenkondensator vergleicht, weil es nahezu keine Energieeinspeisung in den Varistor aufgrund von Netzfehlerströmen gibt. Bei internen Störungen wird auch der Überbrückungsschalter geschlossen.

Der TCSC-Hersteller muss mit Simulationen nachweisen, dass das Steuer- und Schutzsystem schnell genug ist, um eine Energieeinspeisung in den Varistor aufgrund von Fehlerströmen, denen der TCSC ausgesetzt sein kann, zu vermeiden. Kommt es während der Netzstörungen doch zu einer Energieeinspeisung, dann muss diese Energieeinspeisung bei der Bemessung des Varistors berücksichtigt werden.

Das Wiedereinschalten eines Reihenkondensators verursacht einen Gleichspannungsversatz in der Kondensatorspannung, durch die Energie in den Varistor eingespeist werden kann. Die Energieeinspeisung durch Wiedereinschalten gegen einen Schwingstrom muss bei der Bemessung des Varistors in Betracht gezogen werden. Die maximale Größe des Varistorstroms und der Energieeinspeisung durch Wiedereinschalten gegen Schwingströme ist ebenfalls zu berücksichtigen, wenn der Überlaststrom des Varistors eingestellt wird, um sicherzustellen, dass der TCSC gegen einen Schwingstrom wieder eingeschaltet werden kann.

Beispiele für Arbeitszyklen von TCSC bei externen und internen Störungen sind in 8.5 enthalten.

6.5 Isolationspegel und Kriechstrecken

Die Isolationsspannungen, Kriech- und Luftstrecken für TCSC-Anlagen sind nach den in IEC 60143-1, Abschnitt 6, definierten Grundsätzen auszuwählen. Für die Berechnung der Kriechstrecken ist als Spannung der Höchstwert des Effektivwerts der Kondensatorspannung einschließlich der Auswirkung von kapazitiver Anhebung zu verwenden. Wenn der relative Gesamteffektivwert der Kondensatorspannung während zeitweiliger Überlastung (U_{C30}) einen Wert von 1,35 überschreitet, muss die Kriechstrecke linear um ($U_{C30}/1,35$) vergrößert werden.

7 Prüfungen

TCSC-Anlagen sind den in dieser Norm festgelegten Typprüfungen zu unterziehen. Diese Prüfungen müssen für ein bestimmtes Projekt nachweisen, dass die bereitzustellende Anlage den geforderten Belastungen widerstehen kann. Wenn eine Typprüfung vorher zufriedenstellend an einer Anlage mit gleichen oder größeren Beanspruchungen oder Belastungspegeln durchgeführt wurde, wie die für die spezielle Anwendung geforderten, dann braucht der Hersteller die Prüfung nicht zu wiederholen, wenn ein schriftlicher Bericht vorliegt, der die vorangegangene Prüfung beschreibt. In diesem Fall muss auch ein gesonderter Bericht zur Verfügung gestellt werden, in dem die Unterschiede in der Konstruktion aufgezeigt werden und der Nachweis

erbracht wird, wie der in Bezug genommene Bericht der Typprüfung die Prüfziele für das spezifische Projekt erfüllt.

Für ein spezifisches Projekt müssen neue Typprüfungen nur dann durchgeführt werden, wenn die Konstruktion der Anlage neu ist, ein neues kritisches Fertigungsverfahren angewendet wurde oder der Einsatz bei höheren Beanspruchungen oder Belastungspegeln erfolgt, als die vorher geprüften Ausführungen, oder wenn es vom Käufer vertraglich speziell gefordert wird. Die Notwendigkeit für neue Typprüfungen wird auf der Grundlage der Typprüfung an einer einzelnen Anlage bewertet.

Daten, die bei Prüfungen mit erzwungener Störung unter Einbeziehung eines vollständigen TCSC gewonnen wurden, dürfen zum Nachweis der Hinlänglichkeit bestimmter Aspekte der Konstruktion verwendet werden.

Die TCSC-Hauptkreisanlage, für die in diesem Schriftstück keine Prüfungen festgelegt sind, muss nach IEC 60143-2 geprüft werden.

7.1 Prüfung des Kondensators

Die Stück-, Typ- und Sonderprüfungen des Kondensators sollten entsprechend den zutreffenden Teilen der Norm für Reihenkondensatoren IEC 60143-1 und IEC 60143-3 unter Berücksichtigung mit dem bzw. der nach 6.1 bestimmten Bemessungsstrom und -spannung durchgeführt werden.

Die folgenden Prüfungen müssen durchgeführt werden.

7.1.1 Stückprüfungen

- a) Kapazitätsmessung (IEC 60143-1, 5.3)
- b) Kondensatorverlustmessung (IEC 60143-1, 5.4)
- c) Spannungsprüfung zwischen Anschlussklemmen (IEC 60143-1, 5.5)
- d) Wechselspannungsprüfung zwischen Anschlussklemmen und Behälter (IEC 60143-1, 5.6)
- e) Prüfung der internen Entladungseinrichtung (IEC 60143-1, 5.7)
- f) Dichtheitsprüfung (IEC 60143-1, 5.8)
- g) Entladungsprüfung der internen Sicherungen (IEC 60143-3, 3.1.2)

ANMERKUNG Eine Entladungsprüfung muss auch für Kondensatoren ohne Sicherungen durchgeführt werden, um die inneren Verbindungen zu überprüfen.

Die Prüffolge muss nicht unbedingt die vorstehend angegebene sein. Die Stückprüfung muss vor der Lieferung vom Hersteller an jeder Kondensatoreinheit durchgeführt werden.

7.1.2 Typprüfungen

- a) Wärmebeständigkeitsprüfung (IEC 60143-1, 5.9)
- b) Wechselspannungsprüfung zwischen Anschlussklemmen und Behälter (IEC 60143-1, 5.10)
- c) Blitzstoßspannungsprüfung zwischen Anschlussklemmen und Gehäuse (IEC 60143-1, 5.11)
- d) Kaltbetriebsprüfung (IEC 60143-1, 5.12)
- e) Entladestromprüfung (IEC 60143-1, 5.13)
- f) Unterbrechungsprüfung der internen Sicherungen (IEC 60143-3, 3.2.3)
- g) Spannungsprüfung an internen Sicherungen nach dem Öffnen des Behälters (IEC 60143-3, 3.2.4)

Die Typprüfungen werden durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Kondensatoreinheit den vertraglich vereinbarten Eigenschaften sowie den Betriebsanforderungen entspricht, die in dieser Norm festgelegt sind.

Es ist nicht wichtig, dass alle Typprüfungen an derselben Kondensatoreinheit durchgeführt werden.

Die vorstehende Liste der Typprüfungen gibt keine Prüffolge an.

E DIN IEC 60143-4 (VDE 0560-41):2008-07

Sofern nicht anders festgelegt, muss jeder Kondensatorprüfling, an dem eine Typprüfung vorzunehmen ist, zuvor alle Stückprüfungen zufriedenstellend bestanden haben.

7.1.3 Sonderprüfung (Dauerprüfung)

Die Dauerprüfung wird nur nach vertraglicher Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer durchgeführt. Diese Prüfung wird nach IEC 60143-1, 5.14, durchgeführt.

7.2 Prüfungen der TCSC-Drosselspule

Die Stück-, Typ- und Wahlprüfungen der TCSC-Drosselspule sollten nach den entsprechenden Abschnitten in IEC 60076-6, Abschnitt 9 „Filterkreisdrosselspulen, Dämpfungsdrosselspulen und Entladedrosselspulen in Verbindung mit Kondensatoren“, unter Berücksichtigung mit dem (der) nach 6.2 bestimmten Bemessungsstrom und -spannung vorgenommen werden.

Die folgenden Prüfung sind durchzuführen.

7.2.1 Stückprüfungen

- a) Messung des Wicklungswiderstandes (IEC 60076-6, 9.10.2, und IEC 60076-1)
- b) Messung der Induktivität (IEC 60076-6, 9.10.5)
- c) Messung der Verluste und des Gütefaktors (IEC 60076-6, 9.10.6)
- d) Überspannungsprüfung der Wicklung (IEC 60076-6, 9.10.7)

7.2.2 Typprüfungen

- a) Messung der Induktivität (IEC 60076-6, 9.10.5)
- b) Messung der Verluste und des Gütefaktors (IEC 60076-6, 9.10.6)
- c) Erwärmungsprüfung (IEC 60076-6, 9.10.8)
- d) Blitzstoßspannungsprüfung (IEC 60076-6, 9.10.9)

7.2.3 Sonderprüfungen

Die folgenden Sonderprüfungen sind auf besondere Nachfrage des Käufers durchzuführen:

- a) Kurzschlussstromprüfung (IEC 60076-6, 9.10.10)
- b) Messung des Schallpegels (IEC 60076-6, 9.10.11)
- c) Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung (IEC 60076-6, 9.10.12)
- d) Entladestromprüfung (IEC 60076-6, 9.10.14)
- e) Mechanische Resonanzprüfung (IEC 60076-6, 9.10.16)
- f) Messung des Wicklungswiderstandes in Abhängigkeit von Oberschwingungsfrequenzen (7.2.3.1)

ANMERKUNG Wenn die Kurzschlussstromprüfung durchgeführt wird, dann sollte die Entladestromprüfung nur durchgeführt werden, wenn die Amplitude des Entladestroms größer ist als die Amplitude des Kurzschlussstroms.

7.2.3.1 Messung des Wicklungswiderstandes in Abhängigkeit von Oberschwingungsfrequenzen

Die Messung des Wicklungswiderstandes als eine Funktion der Frequenz muss mit einem zugelassenen Brückenverfahren bei verringerter Spannung durchgeführt werden. Der Frequenzbereich ist das vom Käufer festgelegte Oberschwingungsfrequenzintervall.

7.3 Prüfung von Thyristorventilen

7.3.1 Richtlinien für die Durchführung von Typprüfungen

7.3.1.1 Prüfling

Die beschriebenen Prüfungen gelten für das Ventil (oder Ventilabschnitte), den Ventilaufbau und diejenigen Teile des Kühlsystems sowie der Zünd- und Überwachungskreise, die sich innerhalb des Ventilaufbaus befinden oder die zwischen dem Ventilaufbau und der Bühne angeschlossen sind. Weitere Anlagenteile, wie Ventilsteuerung und -schutz und die Fußpunktelektronik können für den Nachweis der korrekten Funktion des Ventils während der Prüfungen von Bedeutung sein, werden den Prüfungen des Ventils jedoch nicht selbst unterzogen.

Isolationsprüfungen sind an vollständig zusammengebauten Ventilen durchzuführen, während einige Betriebsprüfungen je nach Festlegung entweder an vollständigen Ventilen oder an einer entsprechenden Anzahl von Ventilabschnitten durchgeführt werden dürfen, um die Einhaltung der festgelegten Anforderungen an die Ventilkonstruktion zu überprüfen.

Für alle Typprüfungen ist dasselbe Ventil (oder derselbe Ventilabschnitt) zu verwenden, sofern nicht anders festgelegt.

7.3.1.2 Reihenfolge der Prüfungen

Vor dem Beginn der Typprüfungen sollte gezeigt werden, dass das Ventil, die Ventilabschnitte und/oder deren Bauteile zur Sicherung der ordnungsgemäßen Fertigung die Stückprüfungen durchlaufen haben. Die festgelegten Typprüfungen dürfen in jeder beliebigen Reihenfolge durchgeführt werden.

7.3.1.3 Prüfbedingungen für die Isolationsprüfungen

Das Ventil muss mit allen Hilfselementen versehen sein, mit Ausnahme des Überspannungsableiters, sofern dieser verwendet wird. Falls nicht anders festgelegt, muss die Ventilelektronik gespeist werden. Besonders die Kühl- und Isolierflüssigkeiten müssen in einem Zustand sein, der Betriebsbedingungen darstellt, wie z. B. die Leitfähigkeit, ausgenommen für die Durchflussgeschwindigkeit und den Frostschutzmittelgehalt, die verringert werden können. Falls ein beliebiger Gegenstand oder eine beliebige Einrichtung außerhalb des Aufbaus für die richtige Darstellung der Beanspruchungen während der Prüfung erforderlich ist, muss er (sie) bei der Prüfung vorhanden sein oder nachgebildet werden. Metallische Teile des Ventilaufbaus (oder weitere Ventile in einer MVU), die nicht geprüft werden, müssen miteinander kurzgeschlossen und so mit dem Erdpotential des Behälters verbunden werden, wie es für die in Frage kommende Prüfung geeignet ist.

Wenn es im betreffenden Abschnitt festgelegt ist, müssen für die Prüfspannungen nach IEC 60060-1 Atmosphären-Korrekturfaktoren angewendet werden. Die Bezugsbedingungen, auf die sich die Korrektur bezieht, sind die folgenden:

Druck:

- Wenn die Isolationskoordination des geprüften Teils des Thyristorventils auf den genormten Bemessungsstehspannungen nach IEC 60071-1 beruht, gelten die Korrekturfaktoren nur für Höhenlagen über 1 000 m. Deshalb ist bei einer Höhenlage eines Standortes (a_s) $\leq 1\,000$ m, an der eine Anlage installiert werden soll, ein Luftdruck des Normalklimas ($b_0 = 101,3$ kPa) ohne Korrektur für die Höhenlage zu verwenden. Bei $a_s > 1\,000$ m ist das Standardverfahren nach IEC 60060-1 zu verwenden, mit der Ausnahme, dass der Bezugsluftdruck b_0 durch den Luftdruck ersetzt wird, die einer Höhenlage von 1 000 m entspricht (b_{1000m}).
- Wenn die Isolationskoordination des geprüften Teils des Thyristorventils nicht auf einer der genormten Bemessungsstehspannungen nach IEC 60071-1 beruht, dann ist das Standardverfahren nach IEC 60060-1 mit dem Bezugsluftdruck b_0 ($b_0 = 101,3$ kPa) anzuwenden.

Temperatur: Höchstwert der Lufttemperatur in der Ventilhalle (°C)

Luftfeuchte: Kleinst- und Größtwert der absoluten Luftfeuchte in der Ventilhalle (g/m^3);

Die anzuwendenden Werte sind vom Lieferanten festzulegen.

7.3.1.4 Prüfbedingungen für Funktionsprüfungen

Die Prüfungen sollten möglichst an einem vollständigen Thyristorventil durchgeführt werden. Anderenfalls dürfen die Prüfungen an Thyristorventilabschnitten durchgeführt werden. Die Auswahl ist hauptsächlich abhängig von der Auswahl des Thyristorventils und den zur Verfügung stehenden Prüfeinrichtungen. Wenn Prüfungen an Thyristorventilabschnitten empfohlen werden, dann sind die in dieser Norm festgelegten Prüfungen gültig für Thyristorventilabschnitte, die fünf oder mehr in Reihe geschaltete Thyristorplätze besitzen. Wenn Prüfungen an Thyristorventilabschnitten mit weniger als fünf Thyristorplätzen empfohlen werden, müssen zusätzliche Sicherheitsfaktoren vereinbart werden. Die Anzahl der in einem Thyristorventilabschnitt in Reihe geschalteten Thyristorplätze darf in keinem Fall kleiner als drei sein.

Es ist zulässig, Funktionsprüfungen bei einer Netzfrequenz durchzuführen, die von der Betriebsfrequenz abweicht, d. h. 50 Hz anstelle von 60 Hz oder umgekehrt. Einige Betriebsbeanspruchungen, wie z. B. Schaltverluste oder das Stromintegral I^2t eines Kurzschlussstroms, werden während der Prüfung durch die tatsächliche Netzfrequenz beeinflusst. Wenn dies der Fall ist, müssen die Prüfbedingungen überprüft und entsprechende Änderungen vorgenommen werden, um sicherzustellen, dass die Ventilbeanspruchungen mindestens so groß wie diejenigen sind, die bei der Prüfung mit Betriebsfrequenz oder der tatsächlichen Wellenform auftreten würden.

Das Kühlmittel muss in einem Zustand sein, der für die Betriebsbedingungen repräsentativ ist. Besonders der Durchfluss und die Temperatur müssen auf die ungünstigsten Werte eingestellt werden, die für die in Frage kommende Prüfung zutreffen. Der Frostschutzmittelgehalt sollte vorzugsweise den Betriebsbedingungen entsprechen; wo dies praktisch nicht möglich ist, muss ein zwischen Lieferant und Käufer vereinbarter Korrekturfaktor angewendet werden.

7.3.1.5 Kriterien für eine erfolgreiche Typprüfung

Erfahrungen in der Industrie zeigen, dass es selbst bei den sorgfältigsten Ventilkonstruktionen nicht möglich ist, gelegentliche zufällige Ausfälle von Thyristorplatzbauteilen während des Betriebes zu vermeiden. Obwohl diese Ausfälle beanspruchungsbezogen sein können, werden sie bis zu dem Ausmaß als zufällig betrachtet, wie der Grund des Ausfalls oder die Beziehung zwischen Ausfall und Beanspruchung nicht vorhergesagt werden kann oder für keine genaue quantitative Definition zugänglich ist. Mit den Typprüfungen werden die Ventile oder Ventilabschnitte innerhalb einer kurzen Dauer Vielfachbeanspruchungen ausgesetzt, die im Allgemeinen den stärksten Beanspruchungen entsprechen, denen eine Anlage nicht mehr als einige Male während der gesamten Lebensdauer des Ventils ausgesetzt sein wird. Unter Berücksichtigung des vorstehend aufgeführten, lassen es die nachfolgend beschriebenen Kriterien für die erfolgreiche Typprüfung zu, dass eine kleine Anzahl von Thyristorplätzen unter der Voraussetzung bei der Typprüfung ausfallen darf, dass die Ausfälle selten auftreten und kein bestimmtes Muster zeigen, welches auf eine unzulängliche Konstruktion hindeutet.

Die Ventile oder Ventilabschnitte müssen vor jeder Prüfung, nach jeder vorangegangenen Kalibrierprüfung und wieder nach jeder Typprüfung überprüft werden, um zu bestimmen, ob ein Thyristor oder ein Hilfsbauelement während der Prüfung ausgefallen ist. Am Ende einer Typprüfung ausgefallene Thyristoren oder Hilfsbauelemente müssen vor der weiteren Prüfung eines Ventils ausgetauscht werden.

Es ist zulässig, dass ein Thyristorplatz bei einer beliebigen Typprüfung ausfällt. Wenn ein Thyristorplatz nach einer Typprüfung kurzgeschlossen ist, muss der ausgefallene Thyristorplatz repariert und diese Typprüfung wiederholt werden. Bei allen Typprüfungen zusammen dürfen insgesamt zwei Thyristorplätze durch Kurzschluss ausfallen. Wenn mehr als zwei Thyristorplätze während der Typprüfung ausfallen, muss sie vollständige Reihe der Ventiltypprüfungen wiederholt werden.

Die Gesamtanzahl der Thyristorplätze, die Ausfälle aufweisen (kurzgeschlossene Plätze oder Ausfälle, die nicht zu einem Kurzschluss eines Thyristorplatzes führen) und die während eines Typprüfprogramms und nachfolgender Überprüfung erkannt werden, darf nicht die Anzahl der redundanten Plätze überschreiten.

Die Lage von kurzgeschlossenen Plätzen und weiterer Thyristorplatzausfälle am Ende aller Typprüfungen darf kein Muster aufweisen, dass auf eine unzulängliche Konstruktion hinweist.

7.3.2 Stückprüfungen

Die festgelegten Prüfungen bestimmen den erforderlichen Mindestumfang der Prüfungen. Der Lieferant muss eine genaue Beschreibung der Prüfverfahren bereitstellen, die den Prüfzielen entspricht.

- a) Sichtprüfung (IEC 61954, 8.1)
- b) Prüfung der Anschlüsse und Verbindungen (IEC 61954, 8.2)
- c) Prüfung der Spannungsteiler-/Dämpfungsstromkreise (IEC 61954, 8.3)
- d) Prüfung der Spannungsfestigkeit (IEC 61954, 8.4)
- e) Prüfung der Hilfseinrichtungen (IEC 61954, 8.5)
- f) Zündprüfung (IEC 61954, 8.6)
- g) Prüfung des Kühlsystemdrucks (IEC 61954, 8.7)

7.3.3 Typprüfungen

7.3.3.1 Isolationsprüfungen

Alle Isolationsprüfungen an einem vollständigen Ventil müssen mit kurzgeschlossenen redundanten Thyristorplätzen, falls nicht anders angegeben. Die Prüfungen sind für die folgenden Spannungsbeanspruchungen festgelegt:

- Wechselspannung;
- Stoßspannungen.

Im Interesse der Normung mit anderen Ausrüstungen gehören Blitzstoßspannungsprüfungen zwischen Ventilanschlüssen und dem Behälter dazu. Für Prüfungen zwischen den Ventilanschlüssen ist als Stoßspannungsprüfung nur eine Schaltstoßspannungsprüfung festgelegt.

7.3.3.1.1 Prüfungen am Ventilaufbau

Die Prüfungen sind für die Anforderungen an die Spannungsfestigkeit zwischen einem Ventil (mit kurzgeschlossenen Anschlüssen) und dem Behälter angegeben. Mit diesen Prüfungen muss nachgewiesen werden, dass:

- ausreichend bemessene Luftstrecken vorgesehen wurden, um einen Überschlag zu verhindern;
- keine zerstörende Entladung in der Isolierung des Ventilaufbaus, in den Kühlkanälen, Lichtwellenleitern und anderen Isolierteilen der Impulsübertragungs- und -verteilungssysteme auftritt;
- Teilentladungseinsetz- und -löschspannungen liegen oberhalb der höchsten Dauerbetriebsspannung, die am Ventilaufbau auftritt.

Bei diesen Prüfungen muss jeder Thyristorplatz kurzgeschlossen werden. Für die Dauer der Prüfung kann es erforderlich sein, die Verbindung zur Niederspannungsdurchführung zu trennen.

7.3.3.1.1.1 Prüfung der betriebsfrequenten Spannungsfestigkeit zwischen Anschlüssen und Erdpotential

A. Prüfwerte und Wellenformen

Die Prüfung wird mit einer 1-min-Prüfspannung U_{ts1} und der 10-min-Prüfspannung U_{ts2} , die sinusförmige Wellenformen mit einer Frequenz von 50 Hz oder 60 Hz haben, je nach Prüfmöglichkeit, durchgeführt. Die Prüfspannungen müssen berechnet werden mit

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

Dabei ist

U_{ms} der Scheitelwert der höchsten wiederkehrenden Betriebsspannung, einschließlich Löschüberschwingen, über der Ventilhalterung (Üblicherweise abgeleitet aus dem Betrieb mit höchster dynamischer Überlastung in der CAP-Betriebsart oder dem Reihenkondensatorschutzpegel.);

U_{ts1} die 1-min-Prüfspannung;

U_{ts2} die 10-min-Prüfspannung;

$k_{s2} = 1,30$ für die 1-min-Prüfung;

$k_{s2} = 1,10$ für die 10-min-Prüfung;

k_t der atmosphärische Korrekturfaktor;

k_t der Wert nach 7.3.1.3 für die 1-min-Prüfung;

$k_t = 1,0$ für die 10-min-Prüfung.

B. Prüfverfahren

Die Prüfung besteht aus dem Anlegen der festgelegten Prüfspannungen U_{ts1} und U_{ts2} für die festgelegte Dauer zwischen den beiden miteinander verbundenen Ventilanschlüssen und Erdpotential.

- Die Spannung ist von 50 % auf 100 % von U_{ts1} zu erhöhen.
- U_{ts1} ist 1 min beizubehalten.
- Die Spannung ist auf U_{ts2} zu verringern.
- U_{ts2} ist 10 min beizubehalten, der Teilentladungspegel ist aufzuzeichnen und anschließend ist die Spannung auf null zu verringern.
- Der Spitzenwert der periodischen Teilentladung, der während der letzten Minute von Schritt d) aufgezeichnet wurde, muss kleiner als 200 pC sein, vorausgesetzt, dass die Bauelemente im Ventil, die für die Teilentladung empfindlich sind, getrennt geprüft wurden oder er muss kleiner als 50 pC sein, wenn sie nicht geprüft wurden.
- Die Messung der Einsetz- und Löschspannung muss nach IEC 60270 durchgeführt werden.

7.3.3.1.1.2 Blitzstoßspannungsprüfung zwischen Anschluss und Erdpotential

Die genormte 1,2/50-µs-Wellenform ist anzuwenden. Der Scheitelwert der Prüfspannung ist die genormte Blitz-Stehstoßspannung nach IEC 60143-1, 6.1.3.

7.3.3.1.2 Prüfung zwischen den Ventilanschlüssen

Der Zweck dieser Prüfungen ist die Überprüfung der Bauart des Ventils, Überspannungen zwischen den Anschlüssen zu widerstehen. Die Prüfungen müssen nachweisen, dass:

- eine ausreichende innere Isolierung vorgesehen wurde, so dass das Ventil festgelegten Spannungen widerstehen kann;
- Teilentladungseinsetz- und -löschspannungen oberhalb der höchsten Dauerbetriebsspannung liegen, die am Ventil auftritt;
- das Schutzsystem der Überspannungszündung (sofern vorhanden) wie vorgesehen arbeitet;
- die Thyristoren ein entsprechenden du/dt -Verhalten für die Betriebsbedingungen aufweisen. (In den meisten Fällen sind die festgelegten Prüfungen ausreichend, in manchen Ausnahmefällen können jedoch zusätzliche Prüfungen erforderlich sein.)

7.3.3.1.2.1 Schaltstoßspannungsprüfung zwischen den Anschlüssen

A. Prüfwerte und Wellenform

Wellenform: genormte 250/2500-µs-Wellenform

a) Prüfung 1

Diese Prüfung gilt für Ventile mit einem Schutzzündsystem. Diese Prüfung umfasst drei Anwendungen der Schaltstoßspannungen mit der festgelegten Amplitude mit positiver Polarität und drei Anwendungen mit negativer Polarität, wobei die Ventilelektronik anfänglich gespeist wird und anschließend abgeschaltet wird, d. h. insgesamt 12 Anwendungen.

Diese Prüfung ist vorgesehen, um nachzuweisen, dass das Schutzzündsystem des Ventils bei Spannungswerten bis zu den Prüfspannungen nicht anspricht.

Die Prüfspannung U_{tsv1} wird wie folgt bestimmt:

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

Dabei ist

U_1 der höchste Momentanwert der Spannung zwischen den Anschlüssen des Ventils, die das Ventil ohne Auslösen des Betriebs des Schutzzündsystems (falls vorhanden) unter Betriebsbedingungen aushalten muss. (Üblicherweise abgeleitet aus dem Betrieb mit maximaler dynamischer Überlastung in der CAP-Betriebsart oder aus dem Reihenkondensatorschutzpegel);

k_s ein Prüfsicherheitsfaktor;

$$k_s = 1,05.$$

b) Prüfung 2

Diese Prüfung ist vorgesehen, um die Ventilisolierung und die sichere Arbeitsweise des Schutzzündsystems nachzuweisen (wenn für die Ventilbauart zutreffend).

Durch Überspannungsableiter geschützte Ventile:

Die unbeeinflusste Prüfspannung U_{tsv2} wird wie folgt bestimmt:

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

Dabei ist

U_{apl} der Schutzpegel des Überspannungsableiters;

k_s ein Prüfsicherheitsfaktor;

$$k_s = 1,1.$$

Durch VBO geschützte Ventile:

Die unbeeinflusste Prüfspannung U_{tsv2} wird wie folgt bestimmt:

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

Dabei ist

U_{VBO} der höchste VBO-Schutzspannungspegel mit betriebsfähigen redundanten Thyristorplätzen;

k_s ein Prüfsicherheitsfaktor;

$$k_s = 1,1.$$

Die oberen und unteren Grenzwerte des Schwellenwertes der VBO-Schutzzündung mit betriebsfähigen redundanten Thyristorplätzen müssen vom Hersteller angegeben werden und es muss überprüft werden, dass die beobachtete Spannung beim Zünden zwischen diesen beiden Grenzwerten liegt.

Die Prüfung muss wiederholt werden, wobei die Ventilelektronik anfangs nicht gespeist wird.

ANMERKUNG Diese zusätzliche Prüfung ist nicht für Ventilausführungen anwendbar, in denen die regulären Zündstromkreise unabhängig von der Hauptstromversorgung gespeist werden.

E DIN IEC 60143-4 (VDE 0560-41):2008-07

Durch indirekten Überspannungsschutz mit Messung des Ventilstromanstiegs:

Die unbeeinflusste Prüfspannung U_{tsv2} wird wie folgt bestimmt:

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

Dabei ist

U_{didt} die höchste Scheitelspannung des Ventils, die durch den di/dt-Überspannungsschutz bestimmt ist;

k_s ein Prüfsicherheitsfaktor;

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

k_i ein Interpretationsfaktor der Messung;

$$k_i = 1,05.$$

Ventile, die weder durch Überspannungsableiter, VBOs noch di/dt-Überspannungsschutz geschützt sind:

Diese Prüfung ist vorgesehen, um die Ventilisolierung zu überprüfen, wenn weder Überspannungsableiter, VBOs noch di/dt-Überspannungsschutz eingesetzt werden.

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

Dabei ist

U_{cms} die unbeeinflusste Schaltstoßspannung nach IEC 60071 oder durch Untersuchungen der Isolationskoordination bestimmt;

k_s ein Prüfsicherheitsfaktor;

$$k_s = 1,3.$$

Das Ventil muss der Prüfspannung ohne Schalten oder Isolationsdurchbruch widerstehen.

B. Prüfverfahren

Jede dieser Prüfungen muss aus drei Anwendungen der Schaltstoßspannung mit jeder Polarität zwischen den Ventilanschlüssen bestehen, wobei ein Anschluss geerdet ist. Anstelle der Umkehr der Polarität des Stoßspannungsgenerators darf die Prüfung mit einer Polarität des Stoßspannungsgenerators und Vertauschen der Ventilanschlüsse durchgeführt werden.

Nachfolgend sind spezielle zusätzliche Bedingungen angegeben.

a) Prüfung 1

Das Zündschutzsystem des Ventils wird betrieben und eine Prüfspannung unterhalb des Zündpegels angelegt, wobei je nach Bauart des Ventils die Existenz eines Überspannungsableiters am Ventil zu berücksichtigen ist.

Das Ventil darf während dieser Prüfung nicht durch ein Steuerungs- oder Schutzsystem zünden.

b) Prüfung 2

Das Zündschutzsystem des Ventils wird betrieben und eine Prüfspannung oberhalb des Zündpegels angelegt (sofern anwendbar).

Wenn die VBO-Zündung auf Messungen an den einzelnen Thyristorplätzen beruht, muss die Prüfung mit betriebsfähigen redundanten Thyristorplätzen durchgeführt werden.

7.3.3.1.2.2 Prüfung der betriebsfrequenten Stehspannung zwischen den Anschlüssen

Diese Prüfung wird mit einer 1-min-Prüfspannung U_{tv1} und einer 10-min-Prüfspannung U_{tv2} durchgeführt, die eine sinusförmige Wellenform mit einer Frequenz von 50 Hz oder 60 Hz haben, die von den Prüfmöglichkeiten abhängt.

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

Dabei ist

U_1 der Scheitelwert der höchsten wiederkehrenden Überspannung, einschließlich Löschüberschwingen, über den Ventilanschlüssen (Üblicherweise abgeleitet aus dem Betrieb mit maximaler dynamischer Überlastung in der CAP-Betriebsart, Punkt C2 für das Beispiel in Bild 10 oder Reihenkondensator-Schutzpegel);

k_{s1} ein Prüfsicherheitsfaktor;

$$k_{s1} = 1,10.$$

ANMERKUNG 1 Die vorgeschriebene Prüfung kann einige Ventilbauelemente thermisch unrealistisch überbeanspruchen. In diesem Fall darf, nach Vereinbarung zwischen Käufer und Lieferant, die Stehwechselspannungsprüfung über 1 min durch mehrere kürzere Prüfungen ersetzt werden, deren Mindestdauer aus der höchstmöglichen Dauer des festgelegten Überspannungszustandes multipliziert mit 2 ist, wobei aber die Gesamtdauer nicht kleiner als 1 min sein darf.

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

Dabei ist

U_2 der Scheitelwert der höchsten wiederkehrenden Überspannung, einschließlich Löschüberschwingen, über den Ventilanschlüssen für die festgelegten strengsten zeitweiligen Überbelastungen (Üblicherweise abgeleitet aus Punkt B2 für das Beispiel in Bild 10);

k_{s2} ein Prüfsicherheitsfaktor;

$$k_{s2} = 1,10.$$

Prüfverfahren

Das Prüfverfahren besteht aus dem Anlegen der festgelegten Prüfspannungen zwischen den beiden Ventilanschlüssen für die festgelegte Dauer. Ein Anschluss des Ventils darf geerdet sein.

- Die Spannung ist von 50 % auf 100 % von U_{tv1} zu erhöhen.
- U_{tv1} ist 1 min beizubehalten.
- Die Spannung ist auf U_{tv2} zu verringern.
- U_{tv2} ist 10 min beizubehalten, der Teilentladungspegel ist aufzuzeichnen und anschließend ist die Spannung auf null zu verringern.
- Der Spitzenwert der periodischen Teilentladung, der während der letzten Minute von Schritt d) aufgezeichnet wurde, muss kleiner als 200 pC sein, vorausgesetzt, dass die Bauelemente im Ventil, die für die Teilentladung empfindlich sind, getrennt geprüft wurden oder er muss kleiner als 50 pC sein, wenn sie nicht geprüft wurden.
- Die Messung der Einsetz- und Löschspannung muss nach IEC 60270 durchgeführt werden.

Falls VBO-Schutzzündung vorgesehen ist, darf sie während der Prüfung nicht ansprechen.

7.3.3.2 Prüfung mit elektromagnetischen Störungen

7.3.3.2.1 Zielstellungen

Das Ziel dieser Prüfungen besteht im Nachweis der Unempfindlichkeit des Ventils gegen elektromagnetische Strahlung, die durch äußere Ereignisse verursacht wird.