



	DIN EN 62501 (VDE 0553-501)	
	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.	
<p>ICS 17.220.20; 29.130.10</p> <p>Spannungsgeführte Stromrichterventile (VSC-Ventile) für die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) – Elektrische Prüfung (IEC 62501:2009); Deutsche Fassung EN 62501:2009</p> <p>Voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) power transmission – Electrical testing (IEC 62501:2009); German version EN 62501:2009</p> <p>Valves à convertisseur de source de tension (VSC) pour le transport d'énergie en courant continu à haute tension (CCHT) – Essais électriques (CEI 62501:2009); Version allemande EN 62501:2009</p> <p style="text-align: right;">Gesamtumfang 46 Seiten</p> <p style="text-align: center;">DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE</p>		

Beginn der Gültigkeit

Die von CENELEC am 2009-07-01 angenommene EN 62501 gilt als DIN-Norm ab 2010-04-01.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN IEC 62501 (VDE 0553-501):2008-01.

Für diese Norm ist das nationale Arbeitsgremium K 331 „Leistungselektronik“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom SC 22F „Power electronics for electrical transmission and distribution systems“ erarbeitet.

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zu dem Datum (maintenance result date) unverändert bleiben soll, das auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ zu dieser Publikation angegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

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
Normen der Reihe EN 60060	Normen der Reihe IEC 60060	Normen der Reihe DIN EN 60060 (VDE 0432)	Normen der Reihe VDE 0432
HD 588.1 S1:1991	IEC 60060-1:1989	DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1):1994-06	VDE 0432-1
–	IEC 60070-1	–	–
EN 60071-1:2006	IEC 60071-1:2006	DIN EN 60071-1 (VDE 0111-1):2006-11	VDE 0111-1
EN 60146-2:2000	IEC 60146-2:1999	DIN EN 60146-2 (VDE 0558-2):2001-02	VDE 0558-2

Tabelle NA.1 (fortgesetzt)

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 60700-1:1998 + A1:2003 + A2:2008	IEC 60700-1:1998 + A1:2003 + A2:2008	DIN EN 60700-1 (VDE 0553-1):2009-07	VDE 0553-1
EN ISO/IEC 17025	ISO/IEC 17025	DIN EN ISO/IEC 17025	–

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

Normen der Reihe DIN EN 60060 (Normen der Reihe VDE 0432), *Hochspannungs-Prüftechnik*

DIN EN 60071-1 (VDE 0111-1):2006-11, *Isolationskoordination – Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen (IEC 60071-1:2006)*; Deutsche Fassung EN 60071-1:2006

DIN EN 60146-2 (VDE 0558-2):2001-02, *Halbleiter-Stromrichter – Teil 2: Selbstgeführte Halbleiter-Stromrichter einschließlich Gleichstrom-Direktumrichter (IEC 60146-2:1999)*; Deutsche Fassung EN 60146-2:2000

DIN EN 60700-1 (VDE 0553-1):2009-07, *Hyristorventile für Hochspannungsgleichstrom-Energieübertragung (HGÜ) – Teil 1: Elektrische Prüfung (IEC 60700-1:1998 + A1:2003 + A2:2008)*; Deutsche Fassung EN 60700-1:1998 + A1:2003 + A2:2008

DIN EN ISO/IEC 17025, *Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien*

DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1):1994-06, *Hochspannungs-Prüftechnik – Teil 1: Allgemeine Festlegungen und Prüfbedingungen (IEC 60060-1:1989 + Corrigendum März 1990)*; Deutsche Fassung HD 588.1 S1:1991

– Leerseite –

**Spannungsgeführte Stromrichterventile (VSC-Ventile) für die
Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) –
Elektrische Prüfung**
(IEC 62501:2009)

Voltage sourced converter (VSC) valves for
high-voltage direct current (HVDC) power
transmission –
Electrical testing
(IEC 62501:2009)

Valves à convertisseur de source de tension
(VSC) pour le transport d'énergie en courant
continu à haute tension (CCHT) –
Essais électriques
(CEI 62501:2009)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2009-07-01 angenommen. Die CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Zentralsekretariat oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.

CENELEC

Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

Zentralsekretariat: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

Vorwort

Der Text des Schriftstücks 22F/185/FDIS, zukünftige 1. Ausgabe von IEC 62501, ausgearbeitet von dem SC 22F „Power electronics for electrical transmission and distribution systems“ des IEC TC 22 „Power electronic systems and equipment“, wurde der IEC-CENELEC Parallelen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 2009-07-01 als EN 62501 angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2010-04-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2012-07-01

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der internationalen Norm IEC 62501:2009 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

In der offiziellen Fassung ist unter „Literaturhinweise“ zu der aufgelisteten Norm die nachstehende Anmerkung einzutragen:

IEC 60146-2 ANMERKUNG Harmonisiert als EN 60146-2:2000 (nicht modifiziert).

Inhalt

	Seite
Vorwort	2
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen.....	6
3 Begriffe.....	6
3.1 Begriffe der Isolationskoordination	6
3.2 Begriffe für Leistungshalbleiter	7
3.3 Begriffe für Betriebszustände.....	7
3.3.1 Betriebszustände eines IGBT-Dioden-Paares.....	7
3.3.2 Betriebszustände eines Stromrichters	7
3.4 Begriffe zum Aufbau des VSC	8
3.5 Begriffe des Ventilaufbaus	8
4 Allgemeine Anforderungen	9
4.1 Leitlinien für die Durchführung von Typprüfungen.....	9
4.1.1 Ersatznachweis.....	9
4.1.2 Prüfobjekt.....	9
4.1.3 Reihenfolge der Prüfungen.....	10
4.1.4 Prüfverfahren	10
4.1.5 Umgebungstemperatur für die Prüfungen	10
4.1.6 Prüffrequenz	10
4.1.7 Prüfberichte.....	10
4.2 Atmosphärischer Korrekturfaktor	10
4.3 Behandlung der Redundanz	11
4.3.1 Betriebsprüfungen.....	11
4.3.2 Isolationsprüfungen.....	11
4.4 Kriterien für eine erfolgreiche Typprüfung	12
4.4.1 Allgemeines	12
4.4.2 Für Ventilplätze geltende Kriterien.....	12
4.4.3 Für das Ventil als Ganzes geltende Kriterien	13
5 Liste der Typprüfungen	13
6 Betriebsprüfungen.....	14
6.1 Zweck der Prüfungen	14
6.2 Prüfobjekt.....	14
6.3 Prüfschaltung	14
6.4 Arbeitsprüfung des längsten Dauerbetriebs	15
6.5 Arbeitsprüfung der längsten zeitweiligen Überlastung	15
6.6 Prüfung mit der kleinsten Gleichspannung.....	16

	Seite
7	Spannungsprüfungen an der Ventilbasis 16
7.1	Zweck der Prüfungen 16
7.2	Prüfobjekt 17
7.3	Prüfanforderungen 17
7.3.1	Gleichspannungsprüfung der Ventilbasis 17
7.3.2	Wechselspannungsprüfung der Ventilbasis 18
7.3.3	Schaltstoßspannungsprüfung der Ventilbasis 18
7.3.4	Blitzstoßspannungsprüfung der Ventilbasis 18
8	Spannungsprüfungen an Mehrfachventileinheiten 19
8.1	Zweck der Prüfungen 19
8.2	Prüfobjekt 19
8.3	Prüfanforderungen 19
8.3.1	Gleichspannungsprüfung des MVU gegen Erde 19
8.3.2	Wechselspannungsprüfung der MVU 20
8.3.3	Schaltstoßspannungsprüfung des MVU 21
8.3.4	Blitzstoßspannungsprüfung des MVU 21
9	Spannungsprüfungen zwischen Ventilanschlüssen 22
9.1	Zweck der Prüfungen 22
9.2	Prüfobjekt 22
9.3	Prüfanforderungen 23
9.3.1	Wechselspannungs-/Gleichspannungsprüfung des Ventils 23
9.3.2	Stoßspannungsprüfungen des Ventils (allgemein) 24
9.3.3	Schaltstoßspannungsprüfung des Ventils 25
9.3.4	Blitzstoßspannungsprüfung des Ventils 25
10	IGBT-Überstromausschaltprüfung 26
10.1	Zweck der Prüfungen 26
10.2	Prüfobjekt 27
10.3	Prüfanforderungen 27
11	Kurzschlussstromprüfung 27
11.1	Zweck der Prüfungen 27
11.2	Prüfobjekt 27
11.3	Prüfanforderungen 27
12	Prüfung der Unempfindlichkeit des Ventils gegen elektromagnetische Störgrößen 28
12.1	Zweck der Prüfungen 28
12.2	Prüfobjekt 28
12.3	Prüfanforderungen 28
12.3.1	Allgemeines 28
12.3.2	Verfahren Eins 29
12.3.3	Verfahren Zwei 29

	Seite
12.3.4 Annahmekriterium.....	29
13 Fertigungsprüfungen.....	29
13.1 Zweck der Prüfungen.....	29
13.2 Prüfobjekt.....	30
13.3 Prüfanforderungen.....	30
13.4 Ziele von Fertigungsprüfungen.....	30
13.4.1 Sichtprüfung.....	30
13.4.2 Verbindungsprüfung.....	30
13.4.3 Prüfung der Spannungsteilerkreise.....	30
13.4.4 Prüfungen der Steuer-, Schutz- und Überwachungskreise.....	30
13.4.5 Stehspannungsprüfung.....	30
13.4.6 Teilentladungsprüfungen.....	31
13.4.7 Schaltprüfung.....	31
13.4.8 Druckprüfung.....	31
14 Darstellung der Ergebnisse der Typprüfungen.....	31
Anhang A (informativ) Übersicht über die VSC-Topologie.....	32
Anhang B (informativ) Eigenschaft der Fehlzustandstoleranz.....	40
Literaturhinweise.....	41
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen.....	42
Bild A.1 – Eine einzelne VSC-Phaseneinheit und ihre idealisierte Ausgangsspannung.....	33
Bild A.2 – Ausgangsspannung einer VSC-Phaseneinheit eines Zwei-Stufen-Stromrichters.....	33
Bild A.3 – Ausgangsspannung einer VSC-Phaseneinheit eines 15-Stufen-Stromrichters ohne Pulsbreitenmodulation.....	34
Bild A.4 – Grundschtaltung einer Phaseneinheit eines 2-Stufen-Stromrichters.....	35
Bild A.5 – Grundschtaltung einer Phaseneinheit eines 3-Stufen-Stromrichters mit Diodenklemmung.....	36
Bild A.6 – Grundschtaltung einer Phaseneinheit eines 5-Stufen-Stromrichters mit Diodenklemmung.....	36
Bild A.7 – Grundschtaltung einer Phaseneinheit eines Dreistufen-Flying-Capacitor-Stromrichters.....	37
Bild A.8 – Eine einzelne VSC-Phaseneinheit mit Ventilen vom Typ der „steuerbaren Spannungsquelle“.....	37
Bild A.9 – Eine mögliche Ausführung eines Mehrstufen-„Spannungsquellen“-VSC-Ventils.....	38
Tabelle 1 – Mindestanzahl von zu prüfenden Ventilplätzen als Funktion der Anzahl der Ventilplätze je Ventil.....	10
Tabelle 2 – Fehler von Ventilplätzen, die bei Typprüfungen zulässig sind.....	13
Tabelle 3 – Liste der Typprüfungen.....	13

1 Anwendungsbereich

Die vorliegende Internationale Norm gilt für selbstgeführte Stromrichterventile zum Einsatz in einer spannungsgeführten (VSC) Drehstrom-Stromrichterbrücke für die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) oder als Teil einer Kurzschlusskupplung. Sie ist auf elektrische Typprüfungen und Fertigungsprüfungen beschränkt.

Die in der vorliegenden Norm beschriebenen Prüfungen gelten für luftisolierte Ventile. Die Prüfanforderungen und Annahmekriterien für andere Ventiltypen müssen vereinbart werden.

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).

IEC 60060 (alle Teile), *High-voltage test techniques*

IEC 60060-1:1989, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*

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

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

Amendment 1 (2003)

Amendment 2 (2008)

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

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1 Begriffe der Isolationskoordination

3.1.1

Prüf-Stehspannung

Wert der Prüfspannung einer Normkurvenform, bei der ein neues unversehrtes Ventil keinen Durchschlag zeigt und sämtliche anderen Annahmekriterien erfüllt, die für die bestimmte Prüfung festgelegt sind, wenn das Ventil einer festgelegten Anzahl von Anwendungen oder einer festgelegten Dauer der Prüfspannung unter festgelegten Bedingungen ausgesetzt wird

3.1.2

innere Isolierung

die umhüllende Luft der Bauteile und Isolierstoffe des Ventils, die sich aber innerhalb des Profils des Ventils oder des Mehrfachventils befindet

3.1.3

äußere Isolierung

die Luft zwischen der äußeren Oberfläche des Ventils oder des Mehrfachventils und seiner Umgebung

¹⁾ Es gibt eine konsolidierte Ausgabe 1.2 (2008), die aus IEC 60700-1, Amendment 1 und Amendment 2 besteht.

3.2 Begriffe für Leistungshalbleiter

Es stehen viele Arten von steuerbaren Halbleiterschaltern zur Verfügung, die in VSC-Stromrichtern für HGÜ eingesetzt werden können. Der Einfachheit halber wird in der vorliegenden Norm der Begriff IGBT benutzt und damit auf den wichtigsten steuerbaren Halbleiterschalter verwiesen. Die Norm gilt jedoch genauso für andere Arten von steuerbaren Halbleiterschaltern.

3.2.1

Bipolartransistor mit isolierter Steuerelektrode IGBT

ein steuerbarer Schalter mit der Fähigkeit, einen Laststrom ein- und auszuschalten

Ein IGBT besitzt drei Anschlüsse: einen Steueranschluss (G) und die beiden Lastanschlüsse Emitter (E) und Kollektor (C).

Durch Anlegen einer entsprechenden Spannung zwischen Steueranschluss und Emitter kann der Strom in der Richtung des Laststromes gesteuert, d. h. ein- und ausgeschaltet werden.

3.2.2

Freilaufdiode FWD

Halbleiterbauelement mit Diodenkennlinie

Eine Freilaufdiode besitzt zwei Anschlüsse: eine Anode (A) und eine Kathode (K). Der Strom durch FWDs fließt in entgegengesetzter Richtung zum IGBT-Strom.

FWDs sind durch die Fähigkeit gekennzeichnet, dass sie große Stromabfallgeschwindigkeiten verarbeiten können, die durch das Schaltverhalten des IGBT verursacht werden.

3.2.3

IGBT-Dioden-Paar

Anordnung von IGBT und FWD in Gegenparallelschaltung

3.3 Begriffe für Betriebszustände

3.3.1 Betriebszustände eines IGBT-Dioden-Paares

3.3.1.1

Sperrzustand

Zustand, in dem das IGBT-Dioden-Paar ausgeschaltet ist

In diesem Zustand fließt kein Laststrom durch den IGBT. Jedoch kann ein Laststrom durch die Diode fließen, weil die Diode nicht steuerbar ist.

3.3.1.2

Entsperrzustand

Zustand, bei dem der Laststrom in Abhängigkeit von der Richtung des Laststromes entweder durch den IGBT oder die Diode eines IGBT-Dioden-Paares fließt

3.3.2 Betriebszustände eines Stromrichters

3.3.2.1

Sperrzustand

ein Zustand des Stromrichters, bei dem ein Ausschaltsignal an allen IGBTs des Stromrichters anliegt

Typischerweise ist der Stromrichter nach der Erregung im Sperrzustand.

3.3.2.2

Entsperrzustand

ein Zustand des Stromrichters, bei dem an die IGBTs des Stromrichters Einschaltssignale angelegt werden

3.3.2.3

Schutzsperrung des Ventils

Mittel zum Schutz des Ventils oder Stromrichters gegen zu hohe elektrische Beanspruchung durch Notabschaltung aller IGBTs in einem oder mehr Ventil(en)

3.4 Begriffe zum Aufbau des VSC

3.4.1

VSC-Phaseneinheit

Einrichtung zum Anschluss der beiden Gleichstromsammelschienen an einen Wechselstromanschluss

3.4.2

VSC-Ventil

vollständige steuerbare Gerätebaugruppe, die eine Funktionseinheit als Teil einer VSC-Phaseneinheit darstellt und durch Schaltaktionen der elektronischen Leistungsbau-elemente infolge von Steuersignalen der Grundelektronik des Stromrichters gekennzeichnet ist

ANMERKUNG Abhängig von der Topologie des Stromrichters kann ein Ventil entweder als steuerbarer Schalter oder als steuerbare Spannungsquelle wirken.

3.4.3

Diodenventil

ein Halbleiterventil, welches nur Dioden als die Haupt-Halbleiterbauelemente besitzt, die in bestimmten VSC-Topologien eingesetzt werden können

3.4.4

Ventil

abhängig vom Zusammenhang VSC-Ventil oder Diodenventil

3.4.5

VSC-Ventilplatz

Teil eines VSC-Ventils, das aus einem steuerbaren Schalter und einer zugehörigen Diode oder parallel geschalteten steuerbaren Schaltern und Dioden oder steuerbaren Schaltern und Dioden in einer Halbbrückenschaltung zusammen mit ihren unmittelbaren Hilfseinrichtungen und gegebenenfalls dem Speicherkondensator besteht

3.4.6

Diodenventilplatz

Teil eines Diodenventils, das sich aus einer Diode und gegebenenfalls zugehörigen Schaltungen und Bauteilen zusammensetzt

3.4.7

redundante Plätze

Höchstzahl von VSC-Ventilplätzen oder Diodenventilplätzen in einem Ventil, die beim Betrieb von außen oder von innen ohne Beeinflussung des sicheren Betriebs des Ventils kurzgeschlossen werden kann, was durch Typprüfungen nachzuweisen ist, und die bei einer Überschreitung zu einer Abschaltung des Ventils führen würden, damit die ausgefallenen Plätze ersetzt werden können, oder zu einer Akzeptanz einer erhöhten Ausfallgefahr

3.5 Begriffe des Ventilaufbaus

3.5.1

Ventilgerüst

mechanisches Gerüst, das die Plätze eines Ventils trägt und das für die erforderliche Spannung gegen Erde isoliert ist

3.5.2

Ventilbasis

der Teil eines Ventils, der den aktiven Teil des Ventils mechanisch trägt und elektrisch gegen Erde isoliert

ANMERKUNG Nicht in allen Ventilausführungen existiert ein Ventilteil, das in diskreter Form eindeutig als Ventilbasis gekennzeichnet werden kann.

3.5.3

Mehrfachventil

MVU

mechanische Anordnung von zwei oder mehr Ventilen oder einer oder mehr VSC-Phaseneinheiten auf einer gemeinsamen Ventilbasis

ANMERKUNG Nicht in allen Topologien und physikalischen Anordnungen von Stromrichtern existiert ein MVU.

3.5.4

Ventilabschnitt

für Prüfwzwecke definierte elektrische Baueinheit, die aus einer Anzahl von VSC- oder Diodenventilplätzen und weiteren Bauelementen besteht und die die proportionalen elektrischen Eigenschaften eines vollständigen Ventils hat

Die Mindestanzahl der in einem Ventilabschnitt zulässigen VSC- oder Diodenventilplätze ist entsprechend den Anforderungen jeder Prüfung festgelegt.

3.5.5

Ventilfußpunktelektronik

Elektronikeinheit auf Erdpotential, die die Schnittstelle zwischen dem Steuersystem des Stromrichters und den VSC-Ventilen darstellt

4 Allgemeine Anforderungen

4.1 Leitlinien für die Durchführung von Typprüfungen

4.1.1 Ersatznachweis

Jede Ventilausführung muss den in dieser Norm festgelegten Typprüfungen unterzogen werden. Wenn das Ventil nachweislich einem vorher geprüften Ventil gleicht, darf der Lieferant dem Kunden anstelle der Durchführung einer Typprüfung zur Begutachtung den Prüfbericht einer vorausgegangenen Typprüfung vorlegen. Dieser Bericht sollte von einem gesonderten Bericht begleitet werden, in dem genau die Unterschiede in der Ausführung angegeben sind und in dem nachgewiesen wird, in welcher Art und Weise die angegebene Typprüfung die Prüfvorgaben für die vorgeschlagene Ausführung erfüllt.

4.1.2 Prüfobjekt

Dieser Abschnitt gilt nicht für Prüfungen am Ventilgerüst und an Mehrfachventilen. Das Prüfobjekt für diese Prüfungen wird in 7.2 und 8.2 definiert.

- a) Typprüfungen dürfen entweder an einem vollständigen Ventil oder unter bestimmten Umständen an Ventilabschnitten nach den Angaben in [Tabelle 3](#) durchgeführt werden.
- b) Die zu prüfende Mindestanzahl von Ventilabschnitten hängt, wie in [Tabelle 1](#) angegeben, von den Ventilabschnitten in einem einzelnen Ventil ab.

Tabelle 1 – Mindestanzahl von zu prüfenden Ventilplätzen als Funktion der Anzahl der Ventilplätze je Ventil

Anzahl der Ventilplätze je Ventil	Gesamtanzahl der zu prüfenden Ventilplätze
1 bis 50	Anzahl der Ventilplätze in einem Ventil
51 bis 250	50
251	20 %

- c) Es wird im Allgemeinen empfohlen, für alle Typprüfungen die gleichen Ventilabschnitte zu benutzen. Es dürfen jedoch nach einer Vereinbarung zwischen Hersteller und Kunde unterschiedliche Prüfungen an unterschiedlichen Ventilabschnitten gleichzeitig durchgeführt werden, um die Durchführung der Prüfungen zu beschleunigen.
- d) Vor dem Beginn der Typprüfungen sollte nachgewiesen werden, dass das Ventil, die Ventilabschnitte und/oder dessen Bauteile die Fertigungsprüfungen, die eine ordnungsgemäße Herstellung gewährleisten, bestanden haben.

4.1.3 Reihenfolge der Prüfungen

Im Anschluss an die Betriebsprüfungen sollte die Wechselspannungs-/Gleichspannungsprüfung des Ventils mit Teilentladungsmessung durchgeführt werden, um zu bestätigen, dass durch die schnellen periodischen Schaltbeanspruchungen, die beim Betrieb des Stromrichters auftreten, die Isolierung zwischen den Ventilan schlüssen nicht in ihrer Funktion beeinträchtigt worden ist. Die festgelegten Typprüfungen können in beliebiger Reihenfolge durchgeführt werden.

ANMERKUNG Für Ventile des Typs „steuerbare Spannungsquelle“ (siehe [A.5](#)) kann eine Prüfreihenfolge, bei der die Wechselspannungs-/Gleichspannungsprüfung vor der Betriebsprüfung durchgeführt wird, nach Vereinbarung zwischen Käufer und Lieferant annehmbar sein.

4.1.4 Prüfverfahren

Die Prüfungen müssen, soweit zutreffend, nach IEC 60060 durchgeführt werden.

4.1.5 Umgebungstemperatur für die Prüfungen

Die Prüfungen müssen, soweit zutreffend, nach IEC 60060 durchgeführt werden.

4.1.6 Prüffrequenz

Wechselspannungsprüfungen können entweder mit 50 Hz oder mit 60 Hz durchgeführt werden. Die besonderen Anforderungen an die Prüffrequenz bei Betriebsprüfungen sind in den entsprechenden Abschnitten angegeben.

4.1.7 Prüfberichte

Nach der Durchführung der Typprüfungen muss der Lieferant Typprüfberichte nach [Abschnitt 14](#) erstellen.

4.2 Atmosphärischer Korrekturfaktor

Wenn es im zutreffenden Abschnitt angegeben ist, müssen die Prüfspannungen mit einem atmosphärischen Korrekturfaktor nach [IEC 60060-1](#) korrigiert werden. Die Referenzbedingungen für die Korrektur sind folgende:

- Druck:
 - Wenn die Isolationskoordination des geprüften Teils des Ventils auf den genormten Bemessungstehspannungen nach IEC 60071-1 beruht, werden die Korrekturfaktoren nur bei Höhen über 1 000 m angewendet. D. h., wenn die Höhe des Standortes a_s , in der das Betriebsmittel errichtet wird, $\leq 1\,000$ m beträgt, muss der atmosphärische Normaldruck ($b_0 = 101,3$ kPa) ohne Höhenkorrekturfaktor angewendet werden. Wenn $a_s > 1\,000$ m, dann ist das Normverfahren nach IEC 60060-1 anzuwenden, mit der Ausnahme, dass der atmosphärische Druck b_0 durch den atmosphärischen Druck bei einer Höhe von 1 000 m (b_{1000m}) zu ersetzen ist.
 - Wenn die Isolationskoordination des geprüften Teils des Ventils nicht auf den genormten Bemessungstehspannungen nach IEC 60071-1 beruht, dann wird das Standardverfahren nach IEC 60070-1 mit dem atmosphärischen Bezugsdruck b_0 ($b_0 = 101,3$ kPa) angewendet.
- Temperatur: höchster Auslegungswert der Lufttemperatur der Stromrichterhalle ($^{\circ}\text{C}$);
- Feuchtigkeit: kleinster Auslegungswert der absoluten Luftfeuchte der Stromrichterhalle (g/m^3).

Die anzuwendenden Werte sind vom Lieferanten festzulegen.

4.3 Behandlung der Redundanz

4.3.1 Betriebsprüfungen

Bei Betriebsprüfungen dürfen redundante Ventilplätze nicht kurzgeschlossen werden. Die angelegten Prüfspannungen müssen mit einem Skalierungsfaktor k_n angepasst werden:

$$k_n = \frac{N_{\text{tut}}}{N_{\text{t}} - N_{\text{r}}}$$

Dabei ist

- N_{tut} die Anzahl der in Reihe geschalteten Ventilplätze im Prüfobjekt;
- N_{t} die Gesamtzahl der in Reihe geschalteten Ventilplätze im Ventil;
- N_{r} die Gesamtzahl der redundanten, in Reihe geschalteten Ventilplätze.

4.3.2 Isolationsprüfungen

Bei allen Isolationsprüfungen zwischen Ventilanschlüssen müssen die redundanten Ventilplätze kurzgeschlossen werden. Die kurzzuschließenden Ventilplätze sind zwischen Kunde und Lieferant zu vereinbaren.

ANMERKUNG Abhängig von der Ausführung können Beschränkungen hinsichtlich der Verteilung der kurzgeschlossenen Ventilplätze bestehen. Beispielsweise kann es eine Obergrenze für die Anzahl der kurzgeschlossenen Ventilplätze in einem Ventilabschnitt geben.

Bei allen Isolationsprüfungen am Ventilabschnitt müssen die angelegten Spannungen mit einem Skalierungsfaktor k_o angepasst werden:

$$k_o = \frac{N_{\text{tu}}}{N_{\text{t}} - N_{\text{r}}}$$

Dabei ist

- N_{tu} die Anzahl der in Reihe geschalteten, nicht kurzgeschlossenen Ventilplätze im Prüfobjekt;
- N_{t} die Gesamtzahl der in Reihe geschalteten Ventilplätze im Ventil;
- N_{r} die Gesamtzahl der redundanten, in Reihe geschalteten Ventilplätze.

4.4 Kriterien für eine erfolgreiche Typprüfung

4.4.1 Allgemeines

Erfahrungen bei Halbleiteranwendungen zeigen, dass es selbst bei der sorgfältigsten Auslegung der Ventile nicht möglich ist, während des Betriebs gelegentlich auftretende zufällige Ausfälle der Bauteile der Ventilplätze zu vermeiden. Obwohl diese Ausfälle von der Beanspruchung abhängig sein können, werden sie als zufällig betrachtet, da die Ausfallursache oder die Beziehung zwischen Ausfallrate und Beanspruchung nicht vorhergesagt werden kann oder einer genauen quantitativen Festlegung genügt. Bei Typprüfungen werden Ventile oder Ventilabschnitte innerhalb einer kurzen Zeit mehreren Beanspruchungen unterworfen, die im Allgemeinen den ungünstigsten Beanspruchungen entsprechen, denen das Betriebsmittel während der Lebensdauer des Ventils nur wenige Male standhalten kann. Unter Berücksichtigung der genannten Faktoren erlauben die nachfolgend festgesetzten Kriterien für erfolgreiche Typprüfungen den Ausfall einer geringen Anzahl von Ventilplätzen bei der Typprüfung, sofern die Ausfälle selten auftreten und kein Muster zeigen, das auf eine unzureichende Auslegung hinweist.

4.4.2 Für Ventilplätze geltende Kriterien

Für Ventilplätze gelten die folgenden Kriterien:

- a) Wenn nach einer Typprüfung nach [Abschnitt 5](#) mehr als ein Ventilplatz (alternativ mehr als 1 % der in Reihe geschalteten Ventilplätze in einem vollständigen Ventil, falls dieser Wert höher ist) kurzgeschlossen wurde, hat das Ventil die Typprüfungen nicht bestanden.
- b) Wenn nach einer Typprüfung ein Ventilplatz (oder mehr, wenn der Grenzwert von 1 % noch eingehalten wird) kurzgeschlossen wurde, muss der ausgefallene Platz (müssen die ausgefallenen Plätze) wiederhergestellt und diese Typprüfung wiederholt werden.
- c) Beträgt die Summe der kurzgeschlossenen Ventilplätze bei allen Typprüfungen mehr als 3 % der geprüften Ventilplätze, hat das Ventil die Typprüfung nicht bestanden.
- d) Das Ventil oder die Ventilabschnitte müssen nach jeder Typprüfung überprüft werden, um festzustellen, ob Ventilplätze kurzgeschlossen wurden oder nicht. Ausgefallene IGBT/Dioden oder Hilfseinrichtungen, die während oder am Ende der Typprüfung festgestellt werden, dürfen vor weiteren Prüfungen ersetzt werden.
- e) Am Ende des Prüfablaufs müssen das Ventil oder die Ventilabschnitte einer Reihe von Nachweisprüfungen unterzogen werden, die mindestens umfassen müssen:
 - Stehspannungsprüfung der Ventilplätze;
 - Prüfung der Ansteuerschaltungen;
 - Prüfung der Überwachungsschaltungen;
 - Prüfung der Schutzschaltungen, die Bestandteil des Ventils bilden;
 - Prüfung der Spannungsteilerkreise.
- f) Kurzschlüsse von Ventilplätzen, die während der Nachweisprüfungen auftreten, müssen zu den in den vorangegangenen Abschnitten festgelegten Annahmekriterien gezählt werden. Zusätzlich zu den kurzgeschlossenen Plätzen darf die Gesamtzahl der Ventilplätze, die Fehler aufweisen, die nicht zum Kurzschluss eines Ventilplatzes führen und die während des Typprüfprogramms und der darauf folgenden Nachweisprüfungen ermittelt wurden, 3 % der unteren Anzahl von Ventilplätzen bei Spannungs- und Betriebs-Typprüfungen nicht übersteigen. Wenn die Gesamtzahl dieser Plätze 3 % übersteigt, müssen die Eigenschaften der Fehler und deren Ursache untersucht und gegebenenfalls weitere Handlungen zwischen Kunde und Lieferant vereinbart werden.
- g) Bei der Anwendung der prozentualen Kriterien zur Bestimmung der zulässigen Höchstzahl von kurzgeschlossenen Ventilplätzen und der zulässigen Höchstzahl von Plätzen mit Fehlern, die nicht zum Kurzschluss eines Ventilplatzes geführt haben, ist es üblich, alle Bruchzahlen auf die nächste höhere ganze Zahl zu runden, wie in [Tabelle 2](#) angegeben.

Tabelle 2 – Fehler von Ventilplätzen, die bei Typprüfungen zulässig sind

Anzahl der geprüften Ventilplätze	Anzahl der Ventilplätze, die bei einer beliebigen Typprüfung kurzgeschlossen werden dürfen	Gesamtanzahl der Ventilplätze, die bei allen Typprüfungen kurzgeschlossen werden dürfen	Zusätzliche Anzahl der Ventilplätze bei allen Typprüfungen, die einen Fehler aufweisen, aber nicht kurzgeschlossen wurden
bis zu 33	1	1	1
34 bis 67	1	2	2
68 bis 100	1	3	3
usw.			

Die Verteilung der kurzgeschlossenen Plätze und anderer Fehler von Ventilplätzen am Ende aller Typprüfungen muss im Wesentlichen zufällig sein und darf kein Muster zeigen, das auf eine unzureichende Auslegung hinweist.

4.4.3 Für das Ventil als Ganzes geltende Kriterien

Ein Durchschlag oder ein äußerer Überschlag über das gesamte elektrische Betriebsmittel im Zusammenhang mit mehr als einem Ventilplatz des Ventils oder ein Lichtbogendurchschlag in dielektrischen Werkstoffen, die Bestandteil des Ventilaufbaus, von Kühlkanälen, Lichtleitern oder anderen Isolierteilen des Impulsübertragungs- und -verteilungssystems sind, ist nicht zulässig.

Die Oberflächentemperaturen von Bauteilen und Leitern, die zu Strom führenden Verbindungsstellen gehören, sowie die Temperatur angrenzender Montageflächen müssen jederzeit innerhalb der durch die Auslegung festgelegten Grenzwerte bleiben.

5 Liste der Typprüfungen

In der nachfolgenden Tabelle sind die Typprüfungen aufgeführt, die in den [Abschnitten 6 bis 11](#) erläutert sind.

Tabelle 3 – Liste der Typprüfungen

Typprüfung	Abschnitt	Prüfobjekt
Arbeitsprüfung des längsten Dauerbetriebs	6.4	Ventil oder Ventilabschnitt
Arbeitsprüfung der längsten zeitweiligen Überlastung	6.5	Ventil oder Ventilabschnitt
Prüfung mit der kleinsten Gleichspannung	6.6	Ventil oder Ventilabschnitt
Gleichspannungsprüfung der Ventilbasis	7.3.1	Ventilbasis
Wechselspannungsprüfung der Ventilbasis	7.3.2	Ventilbasis
Schaltstoßspannungsprüfung der Ventilbasis	7.3.3	Ventilbasis
Blitzstoßspannungsprüfung der Ventilbasis	7.3.4	Ventilbasis
Gleichspannungsprüfung der MVU gegen Erde	8.3.1	MVU
Wechselspannungsprüfung der MVU	8.3.2	MVU
Schaltstoßspannungsprüfung der MVU	8.3.3	MVU

Tabelle 3 (fortgesetzt)

Typprüfung	Abschnitt	Prüfobjekt
Blitzstoßspannungsprüfung der MVU	8.3.4	MVU
Wechselspannungs-/Gleichspannungsprüfung des Ventils	9.3.1	Ventil (oder Ventilabschnitt, wenn zwischen Lieferant und Käufer vereinbart)
Schaltstoßspannungsprüfung des Ventils	9.3.3	
Blitzstoßspannungsprüfung des Ventils	9.3.4	
IGBT-Überstromausschaltprüfung	10	Ventil oder Ventilabschnitt
Kurzschlussstromprüfung	11	Ventil oder Ventilabschnitt
Prüfung der Unempfindlichkeit des Ventils gegen elektromagnetische Störgrößen	12	Ventil (oder Ventilabschnitt, wenn zwischen Lieferant und Käufer vereinbart)

6 Betriebsprüfungen

6.1 Zweck der Prüfungen

Die Hauptziele der Betriebsprüfungen sind:

- die Überprüfung der Angemessenheit der VSC-/Dioden-Plätze und der zugehörigen elektrischen Schaltungen in einem Ventil hinsichtlich der Strom-, Spannungs- und Temperaturbeanspruchungen im leitenden Zustand sowie beim Ein- und Ausschalten unter den ungünstigsten wiederkehrenden Beanspruchungsbedingungen;
- der Nachweis der ordnungsgemäßen Wechselwirkung zwischen der Ventilelektronik und den Leistungskreisen der VSC-Ventile.

6.2 Prüfobjekt

Die Prüfungen dürfen entweder am vollständigen Ventil oder an Ventilabschnitten durchgeführt werden. Die Auswahl hängt hauptsächlich von der Ventilauslegung und der verfügbaren Prüfeinrichtung ab. Die in dieser Norm festgelegten Prüfungen gelten für Ventilabschnitte mit fünf oder mehr in Reihe geschalteten VSC-/Dioden-Plätzen. Wenn Prüfungen mit weniger als fünf Plätzen durchgeführt werden sollen, müssen zusätzliche Sicherheitsfaktoren vereinbart werden. Die Anzahl der in Reihe geschalteten Plätze darf bei den Prüfungen keinesfalls weniger als drei betragen.

Das zu prüfende Ventil oder die prüfenden Ventilabschnitte müssen mit sämtlichen Hilfseinrichtungen ausgerüstet sein. Wenn es gefordert ist, muss ein proportional skaliertes Ventilableiter einbezogen werden. Der Ableiter muss auf die Anzahl der zu prüfenden, in Reihe geschalteten Plätze skaliert werden, damit sich ein Schutzpegel ergibt, der mindestens den höchsten Kennwerten des eingesetzten Ableiters entspricht.

Das Kühlmittel muss sich in einem Zustand befinden, der die Betriebsbedingungen nachbildet. Besonders Durchfluss und Temperatur müssen auf die ungünstigsten Werte gesetzt werden, die für die betreffende Prüfung angemessen sind, so dass die entsprechenden Bauelementetemperaturen den für den Betrieb gelten Werten gleichen.

6.3 Prüfschaltung

Für Ventilausführungen, die als steuerbare Gleichspannungsquelle arbeiten und die eine eingebaute Gleichspannungskapazität enthalten, sind die Gleichspannungskapazität und ihre Verbindungen zu den Halbleiterbauelementen Bestandteil des Prüfobjektes.

Für Ventilausführungen, die als Schalter arbeiten, bei denen der Gleichspannungskondensator vom Ventil getrennt ist, braucht der Gleichspannungskondensator in der Prüfschaltung nicht ordnungsgemäß vorhanden zu sein. Die Reihen-Streuinduktivität in den Verbindungen zwischen dem Gleichspannungskondensator und

dem Ventil sowie die Streukapazität über dem Ventilabschnitt müssen ordnungsgemäß vorhanden und der Größe des zu prüfenden Ventilabschnitts angepasst sein. Die Zwischenverbindungen der Prüfschaltung müssen so ausgeführt sein, dass sie für die im Stromrichter verwendete Bauart repräsentativ sind, damit keine unrealistischen Dämpfungspegel aufgrund des Skin-Effektes eingeführt werden.

6.4 Arbeitsprüfung des längsten Dauerbetriebs

Die Prüfung muss die folgenden Parameter nachbilden, die auf den ungünstigsten Betriebsbedingungen des Stromrichters beruhen. Für die Nachbildung aller Parameter mit ihren Höchstwerten kann mehr als eine Prüfung erforderlich sein.

Für VSC-Ventile:

- die höchsten Dauertemperaturen der IGBT-Sperrschicht;
- die höchsten Dauertemperaturen der FWD-Sperrschicht;
- die höchsten Dauertemperaturen der Überspannungsschutzelemente;
- die höchste Dauereinschalt- und Dauerausschaltspannung und der höchste Dauereinschalt- und Dauerausschaltstrom.

Für Diodenventile:

- die höchste Dauertemperatur der Diodensperrschicht;
- die höchsten Dauertemperaturen der Überspannungsschutzelemente
- die höchste Dauerausschaltspannung und der höchste Dauerausschaltstrom der Diode.

Alle diese Parameter müssen während der Arbeitsprüfung des längsten Dauerbetriebs nachgebildet werden. Diese Nachbildung darf entweder in gesonderten Prüfungen oder als Prüfkombination erfolgen.

Die Prüfspannung muss auf der höchsten Dauergleichspannung und die Prüfschaltfrequenz auf der höchsten Dauerschaltfrequenz beruhen und das Modulationsmuster muss für das Muster beim Betrieb repräsentativ sein. Die Kühlmitteltemperatur darf nicht geringer sein als die Temperatur, die zu den höchsten stationären IGBT-Sperrschicht- und/oder Diodensperrschichttemperaturen beim Betrieb führt.

In den Effektivwert des Prüfstromes muss ein Prüfsicherheitsfaktor von 1,05 einbezogen werden.

Die Prüfspannung U_{tpv1} , die der höchsten Dauerbetriebsgleichspannung entspricht, muss nach folgender Gleichung festgelegt werden:

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

Dabei ist

U_{dmax} die höchste Dauerbetriebsgleichspannung einschließlich Restwelligkeit;

k_n ein Prüfskalierungsfaktor nach 4.3.1;

k_1 ein Prüfsicherheitsfaktor;

$k_1 = 1,05$.

Nachdem sich die Kühlmitteltemperatur stabilisiert hat, darf die Dauer der Prüfung nicht weniger als 30 min betragen.

6.5 Arbeitsprüfung der längsten zeitweiligen Überlastung

Wenn das Ventil für einen zeitweiligen Überlastbetrieb ausgelegt ist, muss eine Arbeitsprüfung der längsten zeitweiligen Überlastung durchgeführt werden.

Die Prüfbedingungen, soweit gefordert, müssen mit der gleichen Methode wie in 6.4 bestimmt werden.

Vor der Prüfung muss das Ventil oder der Ventilabschnitt unter den Bedingungen von 6.4 in das thermische Gleichgewicht gebracht werden. Von dieser Anfangsbedingung aus wird dann die zeitweilige Arbeitsprüfung begonnen und für eine Dauer fortgesetzt, die der Dauer der zeitweiligen Überlastung multipliziert mit 1,2 entspricht.

Im Anschluss an die Arbeitsprüfung der zeitweiligen Überlastung muss die Arbeitsprüfung des längsten Dauerbetriebs für 10 min durchgeführt werden.

6.6 Prüfung mit der kleinsten Gleichspannung

Diese Prüfung dient dem Nachweis der richtigen Leistung derjenigen Ventilauslegungen, in denen Energie für die elektronischen Ventilschaltungen von der Spannung abgegriffen wird, die zwischen den Ventilanschlüssen anliegt.

Bei der Prüfung wird eine Gleichspannung zwischen den Anschlüssen des Ventils oder des Ventilabschnittes angelegt. Bei dieser Prüfung ist nur die Spannung und nicht der Strom von Bedeutung.

Der ordnungsgemäße Betrieb der elektronischen Ventilschaltungen kann entweder durch das Entsperren des Ventils oder des Ventilabschnittes nachgewiesen werden oder durch Beibehaltung des Sperrzustandes und Überwachung des von der Ventilelektronik zurückgesendeten Signals.

Die Prüfspannung U_{\min} ist wie folgt definiert:

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

Dabei ist

- U_{W} die niedrigste Gleichspannung über einem betriebenen Ventil, bei der die ordnungsgemäße Funktion der Ventilelektronik gefordert wird;
- N_{tut} die Gesamtzahl der in Reihe geschalteten, geprüften VSC-Plätze;
- N_{t} die Gesamtzahl der in Reihe geschalteten VSC-Plätze in einem einzigen Ventil einschließlich Redundanz;
- k_2 ein Prüfsicherheitsfaktor;
- $k_2 = 0,95$.

Die Dauer der Prüfung darf nicht weniger als 10 min betragen.

7 Spannungsprüfungen an der Ventilbasis

7.1 Zweck der Prüfungen

Die Hauptziele dieser Prüfungen sind:

- der Nachweis des Spannungsstehvermögens der Isolierung von Ventilbasis, Kühlkanälen, Lichtleitern und anderer Isolierteile an der Ventilbasis. Wenn außer der Ventilbasis eine weitere Isolierung gegen Erde besteht, können zusätzliche Prüfungen erforderlich sein;
- der Nachweis, dass die Teilentladungs-Einsatz- und -Aussetzspannungen oberhalb der größten Betriebsspannung an der Ventilbasis liegen.

ANMERKUNG Nach einer Vereinbarung zwischen Kunde und Lieferant und abhängig von der Anwendung können einige Prüfungen an der Ventilbasis ausgeschlossen werden.

7.2 Prüfobjekt

Die Ventilbasis, die der Prüfung unterzogen wird, darf ein repräsentatives Einzelteil mit einer Verkörperung der angrenzenden Teile des Ventils oder Bestandteil der Baugruppe sein, die für die Prüfungen eines Einzelventils oder von Mehrfachventileinheiten benutzt wird. Sie muss mit allen Hilfseinrichtungen ausgerüstet sein und die angrenzenden Flächen mit Erdpotential müssen ordnungsgemäß vorhanden sein. Das Kühlmittel muss sich in einem Zustand befinden, der für die strengste Betriebsbedingung für Prüfzwecke repräsentativ ist.

Wenn ein Einzelventil mehr als ein Gerüst umfasst, so dass es je Ventil mehrere Ventilbasen gibt, muss nachgewiesen werden, dass die vorgeschlagenen Prüfungen die ungünstigsten Beanspruchungen umfassen, denen die Ventilbasen ausgesetzt sind.

7.3 Prüfanforderungen

Die nachfolgenden Prüfstufen werden, wie in 4.2 beschrieben, einer atmosphärischen Korrektur unterzogen.

7.3.1 Gleichspannungsprüfung der Ventilbasis

Die beiden Hauptanschlüsse des Ventils müssen miteinander verbunden werden und die Gleichspannung wird dann zwischen den beiden verbundenen Hauptanschlüssen und Erde angelegt. Beginnend mit einer Spannung von höchstens 50 % der höchsten Prüfspannung muss die Spannung in etwa 10 s auf die für 1 min festgelegte Prüfspannung erhöht und 1 min konstant gehalten werden, dann auf die für 3 h festgelegte Prüfspannung gesenkt und für 3 h konstant gehalten werden und dann wird die Spannung auf null gesenkt. Während der letzten Stunde der festgelegten 3-h-Prüfung muss die Anzahl der Teilentladungen über 300 pC nach der Beschreibung in IEC 60700-1, Anhang B, aufgezeichnet werden.

Die Anzahl der Spannungsstöße über 300 pC darf den mittleren Wert von 15 Spannungsstößen je Minute über der Aufzeichnungsperiode nicht überschreiten. Von diesen dürfen höchstens 7 Spannungsstöße je Minute 500 pC überschreiten, höchstens 3 Spannungsstöße je Minute dürfen 1 000 pC überschreiten und höchstens 1 Spannungsstoß je Minute darf 2 000 pC überschreiten.

ANMERKUNG Wenn der Betrag oder die Rate der Teilentladungen eine ansteigende Tendenz zeigt, darf die Prüfdauer nach einer gegenseitigen Vereinbarung zwischen Kunde und Lieferant verlängert werden.

Die Prüfung muss dann mit der Spannung entgegengesetzter Polarität wiederholt werden.

Vor der Prüfung muss die Ventilbasis für mindestens 2 h kurzgeschlossen und geerdet werden.

Die Prüfgleichspannung für die Ventilbasis U_{tds} muss nach folgender Gleichung bestimmt werden:

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

Dabei ist

U_{dmS} der Höchstwert der Gleichspannungskomponente der stationären Betriebsspannung über der Ventilbasis;

k_3 ein Prüfsicherheitsfaktor;

$k_3 = 1,6$ für die 1-min-Prüfung;

$k_3 = 1,3$ für die 3-h-Prüfung;

k_t der atmosphärische Korrekturfaktor;

k_t für die 1-min-Prüfung der Wert nach 4.2;

$k_t = 1,0$ für die 3-h-Prüfung.

7.3.2 Wechselfspannungsprüfung der Ventilbasis

Zur Durchführung der Prüfung müssen die beiden Hauptanschlüsse des Ventils miteinander verbunden werden und die Wechselfspannung wird dann zwischen den beiden verbundenen Hauptanschlüssen und Erde angelegt. Beginnend mit einer Spannung von höchstens 50 % der höchsten Prüfspannung muss die Spannung in etwa 10 s auf die für 1 min festgelegte Prüfspannung U_{tas1} erhöht und 1 min konstant gehalten werden, dann auf die für 30 min festgelegte Prüfspannung U_{tas2} gesenkt und für 30 min konstant gehalten werden und dann wird die Spannung auf null gesenkt. Während der letzten 1 min der festgelegten 30-min-Prüfung muss der Pegel der Teilentladung überwacht und aufgezeichnet werden. Liegt der Wert der Teilentladung unter 200 pC, muss die Auslegung bedingungslos angenommen werden. Wenn der Wert der Teilentladung 200 pC überschreitet, müssen die Prüfergebnisse ausgewertet werden.

Der Effektivwert der Prüfwechselfspannung für die Ventilbasis U_{tas} muss nach folgender Gleichung bestimmt werden:

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

Dabei ist

- U_{mS} der Scheitelwert der höchsten wiederkehrenden Betriebsspannung über der Ventilbasis beim stationären Betrieb mit Überspringen durch Schalten;
- U_{tas1} die Prüfspannung für 1 min;
- U_{tas2} die Prüfspannung für 30 min;
- k_4 ein Prüfsicherheitsfaktor;
- k_4 = 1,3 für die 1-min-Prüfung;
- k_4 = 1,15 für die 30-min-Prüfung;
- k_t der atmosphärische Korrekturfaktor;
- k_t für die 1-min-Prüfung der Wert nach 4.2;
- k_t = 1,0 für die 30-min-Prüfung;
- k_r der zeitweilige Überspannungsfaktor;
- k_r der bei Systemuntersuchungen für die 1-min-Prüfung ermittelte Wert;
- k_r = 1,0 für die 30-min-Prüfung.

7.3.3 Schaltstoßspannungsprüfung der Ventilbasis

Bei dieser Prüfung werden zwischen den (miteinander verbundenen) Hauptanschlüssen des Ventils und Erde drei Schaltstoßspannungen mit positiver Polarität und drei Schaltstoßspannungen mit negativer Polarität angelegt.

Es muss eine Normkurvenform der Schaltstoßspannung nach IEC 60060 angewendet werden.

Die Prüfspannung muss nach der Isolationskoordination der VSC-Station ausgewählt werden.

7.3.4 Blitzstoßspannungsprüfung der Ventilbasis

Bei dieser Prüfung werden zwischen den (miteinander verbundenen) Hauptanschlüssen des Ventils und Erde drei Blitzstoßspannungen mit positiver Polarität und drei Blitzstoßspannungen mit negativer Polarität angelegt.

Es muss eine Normkurvenform der Blitzstoßspannung nach IEC 60060 angewendet werden.

Die Prüfspannung muss nach der Isolationskoordination der VSC-Station ausgewählt werden.

8 Spannungsprüfungen an Mehrfachventileinheiten

Dieser Abschnitt gilt nur, wenn in einem gemeinsamen Ventilgerüst mehr als ein Stromrichterventil enthalten ist (Mehrfachventil). Wenn jedes einzelne Stromrichterventil in einem dafür vorgesehenen Ventilgerüst montiert ist, ist dieser Abschnitt nicht anwendbar.

8.1 Zweck der Prüfungen

Die Hauptziele dieser Prüfungen sind:

- a) der Nachweis des Spannungstehvermögens der äußeren Isolierung des MVU in Bezug auf dessen Umgebung besonders für ein Ventil (Ventile), das (die) an einen Potentialpol angeschlossen ist (sind);
- b) der Nachweis des Spannungstehvermögens zwischen einzelnen Ventilen in einem MVU-Gerüst;
- c) der Nachweis, dass die Teilentladungspegel innerhalb der festgelegten Grenzwerte liegen.

8.2 Prüfobjekt

Es gibt viele verschiedene Anordnungen von Ventilen und Mehrfachventilen. Das (die) Prüfobjekt(e) muss (müssen) so ausgewählt werden, dass die Betriebskonfiguration der Ventile möglichst genau und insoweit, wie es für die betreffende Prüfung notwendig ist, wiedergespiegelt wird. Das Prüfobjekt muss vollständig ausgerüstet sein, wenn nicht nachgewiesen werden kann, dass bestimmte Bauteile ohne Herabsetzung der Aussagefähigkeit der Ergebnisse nachgebildet oder weggelassen werden können.

Abhängig vom Aufbau des MVU und der Prüfziele sind einzelne Ventile kurzzuschließen.

Wenn der Niederspannungsanschluss des MVU nicht mit dem Erdpotential verbunden ist, ist darauf zu achten, dass dieser während der Prüfungen entsprechend abgeschlossen wird, um die an diesem Anschluss auftretende Spannung richtig nachzubilden. Es sind Masseebenen zu verwenden, deren Trenneigenschaften durch die Nähe anderer Ventile und von Erdpotentialflächen bestimmt werden.

8.3 Prüfanforderungen

8.3.1 Gleichspannungsprüfung des MVU gegen Erde

Die Prüfgleichspannung muss zwischen dem Gleichspannungsanschluss des MVU mit dem höchsten Potential und Erde angelegt werden.

Beginnend mit einer Spannung von höchstens 50 % der höchsten Prüfspannung muss die Spannung in etwa 10 s auf die für 1 min festgelegte Prüfspannung erhöht und 1 min konstant gehalten werden, dann auf die für 3 h festgelegte Prüfspannung gesenkt und für 3 h konstant gehalten werden und dann wird die Spannung auf null gesenkt.

Während der letzten Stunde der festgelegten 3-h-Prüfung muss die Anzahl der Teilentladungen über 300 pC aufgezeichnet werden.

Die Anzahl der Spannungsstöße über 300 pC darf den mittleren Wert von 15 Spannungsstößen je Minute über der Aufzeichnungsperiode nicht überschreiten. Von diesen dürfen höchstens 7 Spannungsstöße je Minute 500 pC überschreiten, höchstens 3 Spannungsstöße je Minute dürfen 1 000 pC überschreiten und höchstens 1 Spannungsstoß je Minute darf 2 000 pC überschreiten.

ANMERKUNG Wenn der Betrag oder die Rate der Teilentladungen eine ansteigende Tendenz zeigt, darf die Prüfdauer nach einer gegenseitigen Vereinbarung zwischen Kunde und Lieferant verlängert werden.

Die Prüfung muss dann mit der Spannung entgegengesetzter Polarität wiederholt werden.

Vor der Prüfung müssen die MVU-Anschlüsse für mindestens 2 h kurzgeschlossen und geerdet werden.

Die MVU-Prüfgleichspannung U_{tdm} muss nach folgender Gleichung bestimmt werden:

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

Dabei ist

U_{dmm} der Höchstwert der Gleichspannungskomponente der stationären Betriebsspannung zwischen dem Hochspannungsanschluss des MVU und Erde;

k_5 ein Prüfsicherheitsfaktor;

$k_5 = 1,6$ für die 1-min-Prüfung;

$k_5 = 1,1$ für die 3-h-Prüfung;

k_t der atmosphärische Korrekturfaktor;

k_t für die 1-min-Prüfung der Wert nach 4.2;

$k_t = 1,0$ für die 3-h-Prüfung.

8.3.2 Wechselfspannungsprüfung der MVU

Wenn eine MVU Wechselfspannungsbeanspruchungen oder zusammengesetzten Wechsel- und Gleichspannungsbeanspruchungen zwischen zwei Anschlüssen ausgesetzt ist, deren Stehvermögen nicht durch andere Prüfungen ausreichend nachgewiesen wurde, besteht die Notwendigkeit der Durchführung einer Wechselfspannungsprüfung zwischen diesen Anschlüssen der MVU.

Zur Durchführung der Prüfung muss die Prüfspannungsquelle mit dem Paar der betreffenden MVU-Anschlüsse verbunden werden. Der Erdanschlusspunkt hängt vom Aufbau der Prüfschaltung ab.

Beginnend mit einer Spannung von höchstens 50 % der für 1 min festgelegten Prüfspannung muss die Spannung auf die für 1 min festgelegte Prüfspannung erhöht und 1 min konstant gehalten werden, dann auf den für 30 min festgelegten Wert gesenkt und für 30 min konstant gehalten werden und dann wird die Spannung auf null gesenkt.

Während der festgelegten 30-min-Prüfung muss der Pegel der Teilentladung überwacht und aufgezeichnet werden. Liegt der Wert der Teilentladung unter 200 pC, darf die Auslegung bedingungslos angenommen werden. Wenn der Wert der Teilentladung 200 pC überschreitet, müssen die Prüfergebnisse ausgewertet werden.

Der Effektivwert der MVU-Prüfwechselfspannung U_{tam} muss nach folgender Gleichung bestimmt werden:

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

Dabei ist

U_{mm} der Scheitelwert der höchsten wiederkehrenden Betriebsspannung zwischen den Anschlüssen der MVU beim stationären Betrieb mit Überspringen durch Kommutierung;

k_6 ein Prüfsicherheitsfaktor;

$k_6 = 1,3$ für die 1-min-Prüfung;

$k_6 = 1,15$ für die 30-min-Prüfung;

- k_r der zeitweilige Überspannungsfaktor;
 k_r der bei Systemuntersuchungen für die 1-min-Prüfung ermittelte Wert;
 $k_r = 1,0$ für die 30-min-Prüfung;
 k_t der atmosphärische Korrekturfaktor;
 k_t für die 1-min-Prüfung der Wert nach 4.2;
 $k_t = 1,0$ für die 30-min-Prüfung.

8.3.3 Schaltstoßspannungsprüfung des MVU

Es muss eine Normkurvenform der Schaltstoßspannung nach IEC 60060 angewendet werden.

Die MVU-Schaltstoßprüfspannung muss zwischen dem Hochspannungsanschluss des MVU und Erde angelegt werden.

Bei dieser Prüfung werden drei Schaltstoßspannungen mit positiver Polarität und drei Schaltstoßspannungen mit negativer Polarität mit einer festgelegten Amplitude angelegt.

Die MVU-Schaltstoßprüfspannung U_{tsm} muss nach folgender Gleichung festgelegt werden:

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

Dabei ist

- $SIPL_m$ der Schaltstoßspannungs-Schutzpegel, der durch die Isolationskoordination unter Berücksichtigung von Ableitern festgelegt wird, die zwischen MVU-Hochspannungsanschluss und Erde geschaltet sind;
 k_7 ein Prüfsicherheitsfaktor;
 $k_7 = 1,10$;
 k_t der atmosphärische Korrekturfaktor;
 k_t der Wert nach 4.2.

Wenn mit der festgelegten Prüfung das Schaltstoßspannungs-Stehvermögen nicht zwischen allen Anschlüssen der MVU ausreichend geprüft wird, sollte zur Überprüfung der Isolierung die Durchführung zusätzlicher Prüfungen in Betracht gezogen werden.

ANMERKUNG Nach einer Vereinbarung zwischen Kunde und Lieferant braucht die MVU-Schaltstoßspannungsprüfung nicht durchgeführt werden, wenn:

- mit anderen Mitteln nachgewiesen werden kann, dass die äußeren Luftstrecken zu anderen Ventilen und gegen Erde für den geforderten Schaltstoßspannungs-Stehpegel ausreichen;
- das Schaltstoßspannungs-Stehvermögen zwischen zwei Anschlüssen des MVU ausreichend durch andere Prüfungen nachgewiesen wurde.

8.3.4 Blitzstoßspannungsprüfung des MVU

Es muss eine Normkurvenform der Blitzstoßspannung nach IEC 60060 angewendet werden.

Die MVU-Blitzstoßprüfspannung muss zwischen dem Hochspannungsanschluss des MVU und Erde angelegt werden.

Bei dieser Prüfung werden drei Blitzstoßspannungen mit positiver Polarität und drei Blitzstoßspannungen mit negativer Polarität mit einer festgelegten Amplitude angelegt.

Die MVU-Blitzstoßprüfspannung U_{tlm} muss nach folgender Gleichung festgelegt werden:

$$U_{\text{tlm}} = \pm LIPL_m \cdot k_8 \cdot k_t$$

Dabei ist

- $LIPL_m$ der Blitzstoßspannungs-Schutzpegel, der durch die Isolationskoordination unter Berücksichtigung von Ableitern festgelegt wird, die zwischen MVU-Hochspannungsanschluss und Erde geschaltet sind;
- k_8 ein Prüfsicherheitsfaktor;
- $k_8 = 1,10$;
- k_t der atmosphärische Korrekturfaktor;
- k_t der Wert nach 4.2.

Wenn mit der festgelegten Prüfung die Blitzstoßstehspannung nicht zwischen allen Anschlüssen des MVU ausreichend geprüft wird, sollte zur Überprüfung der Isolierung die Durchführung zusätzlicher Prüfungen in Betracht gezogen werden.

ANMERKUNG 1 Nach einer Vereinbarung zwischen Kunde und Lieferant braucht die MVU-Blitzstoßspannungsprüfung nicht durchgeführt werden, wenn:

- mit anderen Mitteln nachgewiesen werden kann, dass die äußeren Luftstrecken zu anderen Ventilen und gegen Erde für den geforderten Blitzstoßspannungs-Stehpegel ausreichen, und
- die Blitzstoßstehspannung zwischen zwei Anschlüssen des MVU ausreichend durch andere Prüfungen nachgewiesen wurde.

9 Spannungsprüfungen zwischen Ventilanschlüssen

9.1 Zweck der Prüfungen

Diese Prüfungen dienen dem Nachweis der Auslegung des Ventils hinsichtlich der spannungsbezogenen Kennwerte für verschiedene Arten von Überspannungen (Überspannungen durch Gleichspannung, Wechselspannung, Schaltstoßspannungen und Blitzstoßspannungen). Die Prüfungen sollten zeigen, dass

- das Ventil den festgelegten Überspannungen standhält,
- die Teilentladungen bei festgelegten Prüfbedingungen innerhalb festgelegter Grenzwerte liegen,
- die inneren Spannungsteilerkreise ausreichende Leistungsbemessungsdaten besitzen,
- sich die elektronischen Schaltungen des Ventils wie erwartet verhalten.

Es ist anzumerken, dass die in diesem Abschnitt beschriebenen Prüfungen auf Normkurvenformen und Normprüfverfahren beruhen, die für die Prüfung von Hochspannungs-Wechselstromsystemen und -bauteilen entwickelt wurden. Diese Herangehensweise bietet große Vorteile für die Industrie, weil dadurch in großem Umfang die vorhandene Technik der Hochspannungsprüfungen auf die Qualifizierung von HVDC-Ventilen übertragen werden kann. Andererseits muss berücksichtigt werden, dass bestimmte HVDC-Anwendungen zu Kurvenformen führen können, die sich von den Normkurvenformen unterscheiden, und in diesem Fall die Prüfungen so modifiziert werden müssen, dass sie die erwarteten Bedingungen realistisch widerspiegeln.

9.2 Prüfobjekt

Das Prüfobjekt sollte im Allgemeinen ein vollständiges Ventil sein. Prüfungen an einzelnen Ventilabschnitten sind annehmbar, wenn der Lieferant nachweisen kann, dass unter Prüfbedingungen die Spannungsaufteilung zwischen den Ventilabschnitten repräsentativ für die Spannungsaufteilung innerhalb eines vollständigen Ventils im Betrieb ist. Das Prüfventil oder der Prüfventilabschnitt muss mit allen Hilfseinrichtungen ausgerüstet sein mit Ausnahme des Überspannungsableiters des Ventils. Das Ventil darf Teil eines Mehrfachventils sein.

Wenn es nicht anders angegeben ist, muss die Ventilelektronik bei allen Stoßspannungsprüfungen unter Spannung stehen.

Wenn als Prüfobjekt ein Ventilabschnitt benutzt wird, sollte mit dem Kunden die Mindestanzahl der Ventilplätze im Prüfabschnitt vereinbart werden. In diesen Fällen können zum Nachweis der Isolierung zwischen unterschiedlichen Teilen des vollständigen Ventils zusätzliche Prüfungen erforderlich sein, die zwischen Kunde und Hersteller vereinbart werden müssen.

Das Kühlmittel muss sich in einem Zustand befinden, der die Betriebsbedingungen nachbildet, mit Ausnahme der Durchflussrate, die geringer sein kann. Wenn für die richtige Darstellung der Beanspruchungen während der Prüfung ein Objekt außerhalb des Gerüsts notwendig ist, muss dieses in die Prüfung einbezogen oder bei dieser nachgebildet werden. Es sind Masseebenen zu verwenden, deren Trenneigenschaften durch die Nähe anderer Ventile und von Erdpotentialflächen bestimmt werden.

Mit dem für die Spannungsprüfungen des Ventils verwendeten Prüfobjekt ist ohne Überlastung der inneren Bauteile gewöhnlich keine atmosphärische Korrektur auf die festgelegten Prüfspannungen möglich. Aus diesem Grund wird für die Spannungsprüfungen zwischen den Ventilanschlüssen kein atmosphärischer Korrekturfaktor angewendet. Der Lieferant muss nachweisen, dass die Auswirkungen der atmosphärischen Bedingungen auf das innere Stehvermögen des Ventils hinreichend zulässig sind.

9.3 Prüfanforderungen

9.3.1 Wechselspannungs-/Gleichspannungsprüfung des Ventils

Diese Prüfung besteht aus einer Kurzzeit- und einer Langzeitprüfung. Bei der Kurzzeitprüfung wird die zusammengesetzte Wechsel- und Gleichspannung nachgebildet, die sich bei bestimmten Stromrichter- oder Netzfehlern ergibt.

Der ungünstigste Fall hängt von der Ventilauslegung ab. Die zu betrachtenden Fälle umfassen unter anderem:

- einen Kurzschluss des Wechselspannungsanschlusses mit Erde;
- einen Kurzschluss des Wechselspannungsanschlusses zwischen Phasen;
- einen Leerlauf des Wechselspannungsanschlusses;
- einen Lastabwurf des Wechselspannungssystems;
- einen Kurzschluss oder einen Zündaussetzer eines anderen Ventils in derselben Phaseneinheit;
- einen Erdschluss des Gleichspannungspols mit Erde.

Bei dieser Prüfung kann ein Kondensator in Verbindung mit einer Prüfwechselspannungsquelle zur Erzeugung einer zusammengesetzten Wechselspannungs-/Gleichspannungs-Kurvenform verwendet werden. Dieser Kondensator könnte, je nach Aufbau des Stromrichters, ein Bestandteil des Ventils oder ein gesondertes Teil sein (Teil des Prüfkreises, kein Teil des Prüfobjektes).

Alternativ könnte eine gesonderte Gleichspannungsquelle als Ersatz für den Kondensator benutzt werden.

Beginnend mit einer Spannung von höchstens 50 % der höchsten Prüfspannung muss die Spannung in etwa 10 s auf die für 1 s festgelegte Prüfspannung erhöht werden, dann auf die für 30 min festgelegte Prüfspannung gesenkt und für 30 min konstant gehalten werden und dann wird die Spannung auf null gesenkt.

Der Spitzenwert der periodischen Teilentladung, die während der letzten Minute der 30-min-Prüfung aufgezeichnet wurde, muss geringer als 200 pC sein, sofern die Bauteile, die im Ventil anfällig für Teilentladungen sind, gesondert geprüft wurden. Die Anzahl der Spannungsstöße über 300 pC darf den mittleren Wert von 15 Spannungsstößen je Minute über der Aufzeichnungsperiode nicht überschreiten. Von diesen dürfen höchstens 7 Spannungsstöße je Minute 500 pC überschreiten, höchstens 3 Spannungsstöße je Minute dürfen 1 000 pC überschreiten und höchstens 1 Spannungsstoß je Minute darf 2 000 pC überschreiten.

ANMERKUNG 1 Wenn der Betrag oder die Rate der Teilentladungen eine ansteigende Tendenz zeigt, darf die Prüfdauer nach einer gegenseitigen Vereinbarung zwischen Kunde und Lieferant verlängert werden.

DIN EN 62501 (VDE 0553-501):2010-04
EN 62501:2009

ANMERKUNG 2 Es kann notwendig sein, die Stromkreise für die Steuerelektroden oder die anderer Hilfskreise für diese Prüfung abzuschalten, um Beeinflussungen der Teilentladungsmessung, beispielsweise von den Stromversorgungskreisen der Steuerelektrodeneinheiten, zu verhindern.

Die Ventilprüfspannungen haben eine Sinuskurvenform, die von einem Gleichspannungspegel überlagert wird.

Die für 10 s festgelegte Ventilprüfspannung U_{tv1} muss nach folgender Gleichung bestimmt werden:

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

Dabei ist

- U_{ac1} der Spitzenwert der höchsten Wechsellspannungskomponente der transienten Überspannung über dem Ventil. Die Begrenzungswirkung des Ventileleiters oder des Polableiters kann in Betracht gezogen werden, um die Überspannung unter Betriebsbedingungen abzuleiten;
- U_{dc1} die höchste Gleichspannungskomponente der transienten Überspannung über dem Ventil. Die Begrenzungswirkung des Ventileleiters oder des Polableiters kann in Betracht gezogen werden, um die Überspannung unter Betriebsbedingungen anzuleiten;
- k_o ein Prüfskalierungsfaktor nach 4.3.2;
- k_g ein Prüfsicherheitsfaktor;
- $k_g = 1,10$;
- f die Prüffrequenz (abhängig von der Prüfeinrichtung 50 Hz oder 60 Hz).

Die für 30 min festgelegte Ventilprüfspannung U_{tv2} muss nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$U_{tv2} = U_{tac2} + U_{tdc2}$$
$$U_{tac2} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\max\text{-cont}} \cdot \sin(2\pi f_t)}{\sqrt{3}} \cdot k_o \cdot k_{10}$$
$$U_{tdc2} = U_{d\max} \cdot k_o \cdot k_{10}$$

Dabei ist

- $U_{\max\text{-cont}}$ die höchste stationäre Phase-Phase-Spannung im Wechselspannungsnetz oder auf der Ventilseite des Transformators, wenn zwischen Wechselspannungsnetz und Stromrichtern ein Stromrichtertransformator verwendet wird;
- $U_{d\max}$ der Höchstwert der Gleichspannungskomponente der stationären Betriebsspannung des Gleichspannungsnetzes;
- k_o ein Prüfskalierungsfaktor;
- k_{10} ein Prüfsicherheitsfaktor;
- $k_{10} = 1,10$;
- f die Prüffrequenz (abhängig von der Prüfeinrichtung 50 Hz oder 60 Hz).

ANMERKUNG 3 Wenn die Prüfspannung höher als der tatsächliche Wert ist, sollte zwischen Hersteller und Kunde der Einsatz eines Kondensators anstelle einer Gleichspannungsquelle in der Prüfschaltung vereinbart werden.

9.3.2 Stoßspannungsprüfungen des Ventils (allgemein)

Bei den Stoßspannungsprüfungen des Ventils sollte Folgendes berücksichtigt werden:

- a) Bei einigen Anwendungen, wenn z. B. auf der Gleichspannungsseite keine Freileitung vorhanden ist und die Sammelschiene zwischen Strangdrossel und Ventilen vollständig gegen direkten Blitzschlag auf der Wechselspannungsseite geschützt ist, oder bei Anordnungen, in denen das Ventil als steuerbare Spannungsquelle mit seiner eigenen eingebauten Gleichspannungskapazität wirkt, sind Ventilstoßspannungsprüfungen weniger von Bedeutung, weil die Ventile keinen Stoßspannungen mit Amplituden ausgesetzt sind, die für die elektrische Leistung der Ventile ausschlaggebend sein können. Stoßspannungsprüfungen können in solchen Anwendungen unterlassen werden.
- b) Die Stoßspannungsprüfung wird nur in einer Polarität ausgeführt, die der Polarität der Ventilstehspannung entspricht.
- c) Wenn die Stoßspannungs-Stehpegel des Ventils gleich oder kleiner dem Wechselspannungs-/Gleichspannungsprüfpegel des Ventils sind, kann angenommen werden, dass die Wechselspannungs-/Gleichspannungsprüfung die Stoßspannungsprüfungen abdeckt.

9.3.3 Schaltstoßspannungsprüfung des Ventils

Es muss eine Normkurvenform der Schaltstoßspannung nach IEC 60060 angewendet werden.

Bei dieser Prüfung müssen an das Ventil drei Schaltstoßspannungen mit der festgelegten Amplitude angelegt werden.

Die Schaltstoß-Prüfstehtspannung U_{tsv} des Ventils muss nach folgenden Gleichungen festgelegt werden:

- Ventil mit Schutz durch Ventilableiter:

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

Dabei ist

$SIPL_v$ der Schaltstoßspannungs-Schutzpegel des Ventilableiters;

k_o ein Prüfskalierungsfaktor nach 4.3.2;

k_{11} ein Prüfsicherheitsfaktor;

$k_{11} = 1,10$.

- Ventil ohne Schutz durch Ventilableiter:

Mit dieser Prüfung wird die Ventilisolierung geprüft, wenn das Ventil nicht direkt durch Überspannungsableiter geschützt ist.

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

Dabei ist

U_{cms} die unbeeinflusste Schaltstoßspannung über den Ventilanschlüssen nach Untersuchungen der Isolationskoordination des Systems;

k_o ein Prüfskalierungsfaktor nach 4.3.2;

k_{12} ein Prüfsicherheitsfaktor;

$k_{12} = 1,3$.

Das Ventil muss der Prüfspannung ohne Schalt- oder Isolationsdurchschlag standhalten.

9.3.4 Blitzstoßspannungsprüfung des Ventils

Es muss eine Normkurvenform der Blitzstoßspannung nach IEC 60060 angewendet werden.

Bei dieser Prüfung müssen an das Ventil drei Schaltstoßspannungen mit der festgelegten Amplitude angelegt werden.

Die Blitzstoßstehspannung U_{tlv} des Ventils muss nach folgenden Gleichungen festgelegt werden:

- Ventil mit Schutz durch Überspannungsableiter:

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

Dabei ist

$LIPL_V$ der Blitzstoßspannungs-Schutzpegel des Ventilableiters;

k_o ein Prüfskalierungsfaktor nach 4.3.2;

k_{13} ein Prüfsicherheitsfaktor;

$k_{13} = 1,10$.

- Ventil ohne Schutz durch Überspannungsableiter:

Mit dieser Prüfung wird die Ventilisolierung geprüft, wenn das Ventil nicht direkt durch Überspannungsableiter geschützt ist.

$$U_{\text{tlv}} = U_{\text{cmi}} \cdot k_o \cdot k_{14}$$

Dabei ist

U_{cmi} die unbeeinflusste Blitzstoßspannung über den Ventilanschlüssen nach Untersuchungen der Isolationskoordination des Systems;

k_o ein Prüfskalierungsfaktor nach 4.3.2;

k_{14} ein Prüfsicherheitsfaktor;

$k_{14} = 1,3$.

Das Ventil muss der Prüfspannung ohne Schalt- oder Isolationsdurchschlag standhalten.

10 IGBT-Überstromausschaltprüfung

10.1 Zweck der Prüfungen

Das Hauptziel ist die Prüfung der Angemessenheit der Auslegung des VSC-Ventils, besonders des IGBT, und der zugehörigen elektrischen Schaltungen hinsichtlich der Strom- und Spannungsbeanspruchungen beim Ausschalten bei bestimmten Kurzschlussfehlern oder Zündaussetzereignissen.

Bei der Prüfung muss die ungünstigste Kombination aus Spannungsbeanspruchung und Momentanwert der Sperrschichttemperatur nachgebildet werden, und zwar beruhend auf den Einstellungen, die die ungünstigsten Toleranzeinstellungen der Überwachungs-/Schutzschaltungen darstellen.

Die allgemeinen Anforderungen hinsichtlich des Prüfkreises und der Darstellung von Gleichspannungskondensator, Schleifenstreinduktivität usw. entsprechen den Angaben in 6.3.

Der ungünstigste Fall hängt von der Ventilauslegung ab, aber die zu betrachtenden Fälle sind unter anderem:

- Kurzschluss des Wechselspannungsanschlusses mit Erde;
- Kurzschluss des Wechselspannungsanschlusses zwischen Phasen;
- Kurzschluss oder Zündaussetzer eines anderen Ventils in derselben Phaseneinheit.

10.2 Prüfobjekt

Wie in 6.2 beschrieben. Es kann auch erforderlich sein, bestimmte Schutz- oder Überwachungskreise nachzubilden, wenn diese für das Erkennen eines Überstromereignisses wesentlich sind.

10.3 Prüfanforderungen

Bei der Prüfung wird das Prüfobjekt unter den Bedingungen bis zum thermischen Gleichgewicht betrieben, die zur höchsten stationären Sperrschichttemperatur des entsprechenden IGBT führen (siehe 6.4) und dann wird ein Überstromereignis ausgelöst. Das Steuer- und Schutzsystem erkennt dann den Überstrom und unterdrückt diesen durch Ausschalten des IGBT bei einem Strom unterhalb der höchsten sicheren Ausschaltgrenze.

Diese Prüfspannung U_{tpv2} entsprechend der längsten zeitweiligen Übergleichspannung muss wie folgt bestimmt werden.

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

Dabei ist

U_{dtemp} die längste zeitweilige Übergleichspannung, einschließlich Restwelligkeit;

k_n ein Prüfskalierungsfaktor nach 4.3.1;

k_{15} ein Prüfsicherheitsfaktor;

$k_{15} = 1,05$.

Die Kurvenform des Prüfstromes im Zeitintervall zwischen Erkennen des Überstromes und dem Zeitpunkt der Abschaltung des IGBT sollte für die Betriebsbedingungen repräsentativ sein, besonders hinsichtlich der Stromanstiegsgeschwindigkeit di/dr .

11 Kurzschlussstromprüfung

11.1 Zweck der Prüfungen

Das Hauptziel ist die Prüfung der Angemessenheit der Einrichtungen, besonders der Dioden, und der zugehörigen elektrischen Schaltungen hinsichtlich der Strombeanspruchungen bei festgelegten Kurzschlussbedingungen wie Kurzschlussfehler auf der Gleichspannungsseite, bis die Steuer- und Schutzschaltung den Fehlerstrom unterbricht. Die Einschaltung des Stromrichterventils sollte auch in Betracht gezogen werden.

11.2 Prüfobjekt

Wie in 6.2 beschrieben.

11.3 Prüfanforderungen

Bei der Prüfung wird das Prüfobjekt unter den Bedingungen bis zum thermischen Gleichgewicht betrieben, die zur höchsten stationären Sperrschichttemperatur des entsprechenden Halbleiterbauelementes führen (siehe 6.4), und dann wird ein Fehlerstromereignis ausgelöst.

Die Amplitude, die Dauer und die Anzahl der Zyklen des Fehlerstromes sollten den Höchstwerten entsprechen, die beim tatsächlichen Feldbetrieb zu erwarten sind. Für den Strom wird kein Prüfsicherheitsfaktor angewendet.

Wenn das Prüfobjekt zwischen den Zyklen des Fehlerstromes einer wiederkehrenden Spannung ausgesetzt ist, muss bei der Prüfung auch diese wiederkehrende Spannung einschließlich des Überschwingers durch

Kommutierung, soweit zutreffend, reproduziert werden. Für die wiederkehrende Spannung wird ein Prüfsicherheitsfaktor von 1,05 angewendet.

12 Prüfung der Unempfindlichkeit des Ventils gegen elektromagnetische Störgrößen

12.1 Zweck der Prüfungen

Das Hauptziel ist der Nachweis der Unempfindlichkeit des Ventils gegen elektromagnetische Störgrößen (elektromagnetische Beeinflussung), deren Ursachen in Spannungs- und Stromtransienten liegen und die innerhalb des Ventils erzeugt werden und die von außen auf das Ventil einwirken. Die empfindlichen Elemente des Ventils sind im Allgemeinen die elektronischen Kreise, die für Steuerung, Schutz und Überwachung der Ventilplätze eingesetzt werden.

Die Unempfindlichkeit des Ventils gegen elektromagnetische Beeinflussung kann im Allgemeinen durch Überwachung des Ventils während anderer Typprüfungen kontrolliert werden. Am aussagekräftigsten sind von diesen die Ventilprüfung und die Arbeitsprüfung des längsten Dauerbetriebs und die Arbeitsprüfung der längsten zeitweiligen Überlastung (siehe 6.4 und 6.5), die Stoßspannungsprüfungen des Ventils (siehe 9.3.3 und 9.3.4) sowie die IGBT-Überstromausschaltprüfung (siehe Abschnitt 10).

Die Prüfungen müssen zeigen, dass:

- a) der IGBT nicht reihenfolgefremd oder unerwünscht schaltet;
- b) die in das Ventil eingebauten elektronischen Schutzschaltungen wie vorgesehen arbeiten;
- c) keine falsche Anzeige von Ventilplatzfehlern oder kein Senden fehlerhafter Signale an die Stromrichtersteuerung und die Schutzsysteme durch die Ventilfußpunktelektronik, die ihre Ursache im Empfang falscher Daten von den Ventilüberwachungsschaltungen haben.

ANMERKUNG Für die Anwendung dieser Norm gelten die Prüfungen für den Nachweis der Unempfindlichkeit des Ventils gegen elektromagnetische Störgrößen nur für das VSC-Ventil und den Teil des Signalübertragungssystems, der das Ventil mit Erde verbindet. Der Nachweis der Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Störgrößen des Betriebsmittels, welches auf Erdpotential angeordnet ist, und die Charakterisierung des Ventils als eine Quelle von elektromagnetischen Störgrößen für andere Betriebsmittel liegen nicht im Anwendungsbereich dieser Norm.

12.2 Prüfobjekt

Das Prüfobjekt sind im Allgemeinen das Ventil oder die Ventilabschnitte, wie sie bei den anderen Prüfungen verwendet werden.

Wenn die Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Störungen nachzuweisen ist, die aus der Kopplung zwischen angrenzenden Ventilen in einem MVU entstehen, sind die in 12.3 definierten beiden Verfahren annehmbar. Je nach ausgewähltem Verfahren wird das Prüfobjekt in diesem Fall ein gesondertes Ventil oder ein gesonderter Ventilabschnitt sein.

12.3 Prüfanforderungen

12.3.1 Allgemeines

Die Prüfanforderungen für den Nachweis der Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Störungen, die aus der Kopplung zwischen angrenzenden Ventilen in einem MVU entstehen, sind von der Auswahl der beiden empfohlenen Verfahren abhängig.

ANMERKUNG Die anzuwendende spezielle geometrische Anordnung und der Wert der Vorwärtsspannung für die Prüfung der elektromagnetischen Störgrößen sollte beruhend auf der Auslegung des MVU vereinbart werden.

12.3.2 Verfahren Eins

Das Verfahren Eins ist die Nachbildung der direkten Quelle der elektromagnetischen Störgrößen als Teil eines Prüfaufbaus. Für einen derartigen Prüfaufbau sind mehr als ein Ventil oder Ventilabschnitt erforderlich, um die Wechselwirkung zwischen ihnen zu überprüfen. Die geometrischen Anordnungen der Quelle der elektromagnetischen Störung in Bezug auf das zu prüfende Ventil müssen der Anordnung im Betrieb möglichst genau entsprechen (oder aus Sicht der elektromagnetischen Störgröße so ungünstig wie möglich sein). Die Elektronik des Prüfobjektes für die elektromagnetischen Störgrößen muss eingeschaltet sein. Dabei sind diejenigen Teile der Ventilfußpunktelektronik eingeschlossen, die für den ordnungsgemäßen Informationsaustausch mit dem Prüfobjekt erforderlich sind.

12.3.3 Verfahren Zwei

Das Verfahren Zwei ist die Bestimmung der Intensität von elektromagnetischen Feldern unter den ungünstigsten Betriebsbedingungen, und zwar entweder aus theoretischen Betrachtungen oder durch Messungen. In einem zweiten Schritt werden diese Felder mit einer Prüfschaltung nachgebildet, mit der die richtige (oder ungünstige) elektromagnetische Strahlung bei den betreffenden Frequenzen erzeugt wird. Anschließend wird ein Ventilabschnitt den von der Prüfquelle erzeugten Feldern ausgesetzt.

Eine wesentliche Vorbedingung für das Verfahren zwei ist die Bestimmung der dynamischen Feldstärke und der Richtung in den Hauptstellungen im Ventil. Diese können im Allgemeinen mit Suchspulenmessungen während der Zündprüfungen an einem einzelnen Ventil ermittelt werden. Alternativ kann das Feld mit Modellierungsprogrammen für dreidimensionale Felder vorausgesagt werden. Anschließend muss ein Ventilabschnitt mit einer gesonderten Feldspule geprüft werden, um die Intensität des Feldes, den Frequenzgehalt und die Richtung zu erzeugen, die mindestens so groß wie die vorhergesagten Werte sind.

Für den zu prüfenden Ventilabschnitt müssen die folgenden Bedingungen eingehalten werden:

- Zum Zeitpunkt des Einschaltens der Feldspule muss zwischen den Anschlüssen des vorwärts vorgespannten Ventilabschnitts die Betriebsspannung (proportional skaliert) anstehen;
- die Elektronik des zu prüfenden Ventilabschnitts muss eingeschaltet sein;
- darin sind diejenigen Teile der Ventilfußpunktelektronik eingeschlossen, die für den ordnungsgemäßen Informationsaustausch mit dem Ventilabschnitt erforderlich sind.

12.3.4 Annahmekriterium

Das Annahmekriterium für die beiden Verfahren Eins und Zwei muss den Festlegungen in [12.1](#) entsprechen.

13 Fertigungsprüfungen

Dieser Abschnitt behandelt Prüfungen von Baugruppen, die Bestandteil von Ventilen, Ventilabschnitten oder Hilfsschaltungen für deren Schutz, Steuerung und Überwachung sind. Es werden keine Prüfungen von Einzelbauteilen behandelt, die im Ventil, in der Ventilbasis oder im Ventilgerüst verwendet werden.

13.1 Zweck der Prüfungen

Der Zweck der Fertigungsprüfungen ist die Bestätigung einer ordnungsgemäßen Herstellung, indem nachgewiesen wird, dass

- alle im Ventil verwendeten Bauteile und Unterbaugruppen ordnungsgemäß und nach der Auslegung installiert worden sind,
- alle vorgesehenen Funktionen der Ventilbetriebsmittel und alle vordefinierten Parameter innerhalb der vorgeschriebenen Annahmegrenzwerte liegen,
- die Ventilabschnitte und die Plätze der IGBT-Dioden-Paare (soweit zutreffend) ein ausreichendes Spannungsstehvermögen besitzen,
- eine beständige und einheitliche Fertigung erreicht wird.

13.2 Prüfobjekt

Sämtliche Ventilabschnitte und deren Teile, die für das Projekt hergestellt wurden, müssen Fertigungs-Stückprüfungen unterzogen werden. Die Prüfungen dürfen wie für die Auslegung und die verfügbare Prüfeinrichtung geeignet an Ventilabschnitten oder einzelnen Plätzen durchgeführt werden.

13.3 Prüfanforderungen

Es werden keine einheitlichen Fertigungsprüfungen von unterschiedlichen Herstellern gefordert. Bei den Fertigungsprüfungen müssen die besonderen Kennwerte der Auslegung des Ventils und von dessen Bauteilen, der Umfang, in dem die Bauteile vor der Montage geprüft wurden, und die besonderen Herstellungsabläufe und -verfahren berücksichtigt werden. Im vorliegenden Abschnitt sind nur die Ziele der Fertigungsprüfungen angegeben.

Der Lieferant muss dem Kunden unter allen Umständen eine genaue Beschreibung der zum Erreichen der Fertigungsprüfziele vorgeschlagenen Prüfverfahren vorlegen und deren Zustimmung einholen.

Die Mindestanforderungen für Fertigungs-Stückprüfungen sind in 13.4 angegeben. Die Reihenfolge, in der die Prüfungen angegeben sind, deuten weder auf eine Rangordnung noch auf eine Folge hin, in der die Prüfungen durchgeführt werden sollten.

ANMERKUNG In einigen Fällen kann bei der Fertigung zusätzlich zu den Stückprüfungen die Durchführung von Stichprobenprüfungen an vollständigen Baugruppen notwendig sein, z. B. wenn im Verlauf der Fertigung Modifikationen vorgenommen wurden. Die Eigenschaften und der Umfang dieser zusätzlichen Prüfungen sollten von Fall zu Fall vereinbart werden.

13.4 Ziele von Fertigungsprüfungen

13.4.1 Sichtprüfung

Zum Nachweis, dass sämtliche Werkstoffe und Bauteile unbeschädigt und entsprechend der neuesten bestätigten Überarbeitung der Fertigungsdokumentation ordnungsgemäß installiert sind.

13.4.2 Verbindungsprüfung

Zum Nachweis, dass die wichtigsten Strom führenden Verbindungen ordnungsgemäß ausgeführt wurden.

13.4.3 Prüfung der Spannungsteilerkreise

Zum Nachweis der Parameter der Spannungsteilerkreise und damit zur Gewährleistung, dass die Spannungsteilung zwischen in Reihe geschalteten Plätzen für die angelegten Spannungen von Gleichspannung bis zu Stoßspannungen, soweit zutreffend, geeignet sind.

13.4.4 Prüfungen der Steuer-, Schutz- und Überwachungskreise

Zum Nachweis der Funktion von Steuer-, Schutz- oder Überwachungskreisen, die Bestandteil des Ventils sind, wie IGBT-Steuerkreise und örtliche Schutz- oder Überwachungskreise.

Wenn Typprüfungen und Prüfungen der Wirksamkeit des Sicherungsschutzes als notwendig erachtet werden, müssen diese zusammen mit den Prüfbedingungen gesondert festgelegt werden.

13.4.5 Stehspannungsprüfung

Zum Nachweis, dass die Ventilbauteile der Spannung standhalten können, die dem für das Ventil festgelegten Höchstwert entspricht. Diese Prüfungen müssen, soweit zutreffend, Wechselfspannungs-/Gleichspannungsprüfungen und Schaltstoßspannungsprüfungen umfassen.

13.4.6 Teilentladungsprüfungen

Zum Nachweis der ordnungsgemäßen Herstellung müssen Kunde und Lieferant vereinbaren, welche Bauteile und Unterbaugruppen für die Auslegung kritisch sind und dass geeignete Teilentladungsprüfungen durchgeführt werden müssen.

13.4.7 Schaltprüfung

Zum Nachweis, dass der IGBT (die IGBTs) in jedem Ventilplatz auf Schaltsignale hin ordnungsgemäß ein- und ausschaltet (ausschalten).

13.4.8 Druckprüfung

Zum Nachweis, dass kein Kühlmittel austritt.

14 Darstellung der Ergebnisse der Typprüfungen

Der Prüfbericht muss in Übereinstimmung mit den allgemeinen Richtlinien nach ISO/IEC 17025 erstellt werden und folgende Informationen enthalten:

- Name und Anschrift des Labors und der Stelle, die die Prüfungen durchgeführt haben;
- Name und Anschrift des Kunden;
- eindeutige Kennzeichnung des Prüfobjektes mit Typ und Bemessungsdaten, Seriennummer und sonstigen Informationen zur Identifizierung des Prüfobjektes;
- Datum der Durchführung der Prüfungen;
- Beschreibung der Prüfschaltungen und Prüfverfahren zur Durchführung der Prüfungen;
- Verweisung auf normative Dokumente und gegebenenfalls eindeutige Beschreibung der Abweichungen von den in den normativen Dokumenten angegebenen Verfahren;
- Beschreibung der Messeinrichtung und Angabe der Messunsicherheit;
- Prüfergebnisse in Form von Tabellen, Kurven, Oszillogrammen und Fotografien, wie geeignet;
- Beschreibung der Ausfälle von Einrichtungen und Bauteilen.

Anhang A (informativ)

Übersicht über die VSC-Topologie

A.1 Allgemeines

Spannungsgeführte Stromrichterventile (VSC-Ventile) sind eine aufkommende Technik, für die verschiedene Hersteller sich stark unterscheidende technologische Ansätze haben können und wo es in der Zukunft neue Schaltungstopologien geben kann, die bis jetzt noch nicht beschrieben worden sind.

Spannungsgeführte Stromrichter für HGÜ unterscheiden sich grundlegend von den konventionellen HGÜ-Stromrichtern (die stromgeführte Stromrichter sind) dadurch, dass sie die Richtung des Leistungsflusses umkehren, d. h., es ist die Richtung des Gleichstroms und nicht die Polarität der Gleichspannung, die umgekehrt wird. Die Glättung der Gleichspannung wird mit einem großen Gleichspannungskondensator vorgenommen, der eine analoge Rolle spielt wie beim Gleichstrominduktor (die teilweise durch die Induktivität des Gleichstromübertragungssystems und die Streuinduktivität der Stromrichtertransformatoren erfüllt werden kann) in einem konventionellen HGÜ-Projekt.

Tatsächlich ist die Rolle der Spannung in einem VSC-Ventil in vielerlei Hinsicht dem des Stromes in einem konventionellen HGÜ-Thyristorventil gleichwertig und umgekehrt.

Eine ausführliche Behandlung aller möglichen Techniken der VSC-Ventile liegt weit außerhalb des Anwendungsbereiches dieser Norm. Der Zweck dieses Anhangs ist es, eine kurze Übersicht über die Hauptunterschiede zwischen VSC- und konventionellen HVDC-Thyristorventilen und über die Haupttypen der VSC-Ventile zu geben, sofern sie die Kriterien für die Prüfung derartiger Ventile betreffen.

Dieser Anhang liefert eine Übersicht über die hauptsächlichsten Stromrichtertechniken, die zum Zeitpunkt der Erarbeitung bekannt waren. Es ist jedoch nicht beabsichtigt, die Arten der anwendbaren Techniken zu begrenzen oder einzuschränken.

A.2 VSC-Grundlagen

Alle spannungsgeführten Stromrichter sollen aus der Gleichspannung eines Kondensators eine angenähert sinusförmige Spannung an den Wechselstromanschlüssen synthetisieren. Die Ausgangsspannung des VSC kann in der Praxis jedoch nicht perfekt sinusförmig sein, sondern sie besteht stattdessen aus einer Anzahl diskreter Spannungsstufen oder „Ausgangspegel“. Die Benennung „Pegel“ bezieht sich hier auf einen diskreten Ausgangsspannungspegel und sollte nicht mit der Benennung „VSC-Ventilplatz“ verwechselt werden, die sich auf einen einzelnen IGBT und zugehörige Bauteile bezieht.

Für Stromversorgungsnetze werden fast immer Dreiphasen-Stromrichter angewendet, jedoch bei der Betrachtung der Ausgangspegel eines Stromrichters wird jede „Phaseneinheit“ des Stromrichters üblicherweise unabhängig betrachtet. Die Anzahl der Ausgangspegel bezieht sich auf die Anzahl diskreter Zustände, die die Leiter-Neutralleiter-Ausgangsspannung einer Phaseneinheit annehmen kann (Bild A.1). Es ist wichtig zu beachten, dass ein n -stufiger Stromrichter $(2n - 1)$ mögliche Werte der Leiter-Leiter-Spannung haben kann.

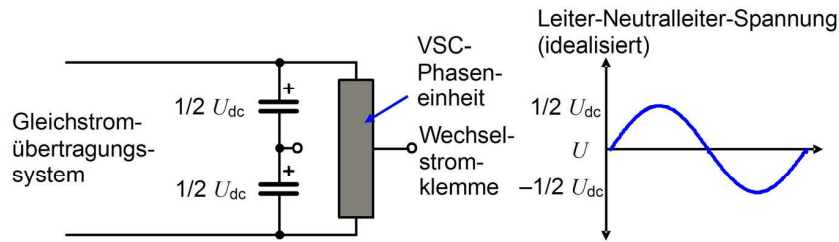


Bild A.1 – Eine einzelne VSC-Phaseneinheit und ihre idealisierte Ausgangsspannung

In der möglichen einfachsten VSC-Topologie, dem „Zweistufen-Stromrichter“, hat die Ausgangswechselspannung jedes Phasenweiges (bezogen auf den üblicherweise geerdeten Mittelpunkt des Gleichspannungskondensators) nur zwei mögliche Zustände: $+1/2 U_{dc}$ und $-1/2 U_{dc}$.

Wenn die VSC-Ventile in diesem Phasenweig nur mit der Grundfrequenz geschaltet werden, dann ist die sich ergebende Wellenform der Ausgangswechselspannung eine sehr schlechte Annäherung an die Sinusschwingung. Eine derartige Wellenform wäre in einem Stromversorgungsnetz absolut unannehmbar.

Werden die Ventile jedoch mehr als einmal je Periode der Grundfrequenz ein- und ausgeschaltet und eine Pulsbreitenmodulation (PWM) angewendet, dann ist es möglich, eine Ausgangsspannung zu erhalten, die nach der Filterung ziemlich sinusförmig ist. Beide Fälle sind in Bild A.2 dargestellt.

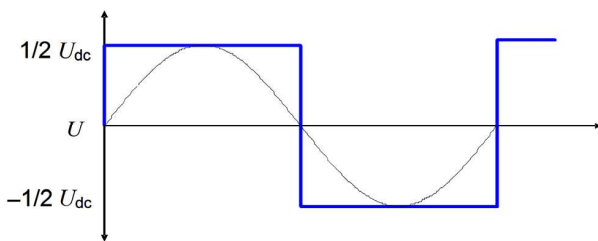


Bild A.2a – Ohne Pulsbreitenmodulation

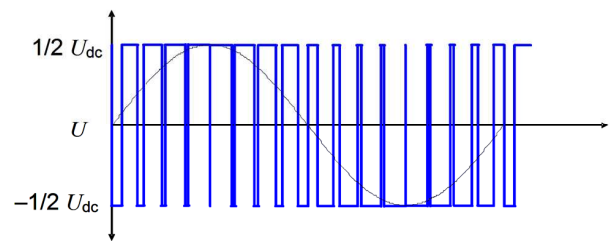


Bild A.2b – Mit Pulsbreitenmodulation

Bild A.2 – Ausgangsspannung einer VSC-Phaseneinheit eines Zwei-Stufen-Stromrichters

Die Pulsbreitenmodulation ist eine eingeführte Technik in Stromrichtern für Motorantriebe, ist aber mit dem Nachteil stark ansteigender Schaltverluste behaftet.

Eine Alternative zur Pulsbreitenmodulation ist die Anwendung eines komplexeren Stromrichters, der eine viel größere Anzahl von Ausgangsstufen erzeugen kann – ein „Mehrstufen-Stromrichter“. Zur Verfügung stehen Topologien von Stromrichtern mit drei oder fünf Stufen, aber in Versorgungsnetzanswendungen sind dafür auch noch Pulsbreitenmodulationen anzuwenden, um ausreichend niedrige Oberschwingungen zu erhalten.

Es gibt noch weitere Stromrichtertopologien, mit denen eine höhere Anzahl von Ausgangsstufen erzeugt werden kann, so dass sogar ohne Anwendung der Pulsbreitenmodulation die Wellenform der Ausgangsspannung nahezu sinusförmig ist und der Aufwand für die Filterung klein oder keine Filterung erforderlich ist. Die Ausgangsspannung eines 15-Stufen-Stromrichters ist in Bild A.3 dargestellt, die schon als einigermaßen sinusförmig anzusehen ist. Für HGÜ-Anwendungen würde in der Praxis üblicherweise eine höhere Anzahl als 15 Stufen angewendet werden.

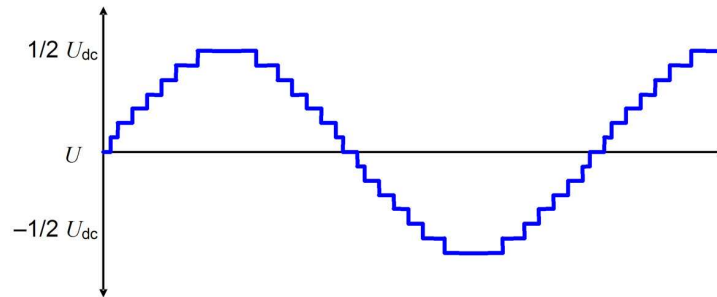


Bild A.3 – Ausgangsspannung einer VSC-Phaseneinheit eines 15-Stufen-Stromrichters ohne Pulsbreitenmodulation

A.3 Übersicht über die Haupttypen der VSC-Ventile

Anders als herkömmliche HGÜ-Thyristorventile, die in Richtung einer größtenteils einheitlichen Bauart entwickelt wurden, befinden sich die VSC-Ventile in einer frühen Phase ihrer technologischen Entwicklung und es gibt sie in einer Reihe von Formen.

Zum Zeitpunkt der Erarbeitung der vorliegenden Norm fallen die kommerziell erhältlichen oder die in der Literatur beschriebenen VSC-Ventile in zwei grundlegende Kategorien.

- VSC-Ventile des „Schalter“-Typs. Diese Ventile funktionieren wie ihre Thyristor-Entsprechungen nur als ein steuerbarer Schalter mit nur zwei festen Zuständen: Ein und Aus. In Stromrichtern, die auf dieser Topologie beruhen, sind die Gleichspannungskondensatoren vollständig von den Ventilen getrennt und können isoliert geprüft werden.
- VSC-Ventile vom Typ der „steuerbaren Spannungsquelle“. In Ventilen dieses Typs sind die Gleichspannungskondensatoren Bestandteil des Ventils und können für Prüfzwecke nicht vom Ventil getrennt werden.

Bestimmte Typprüfungen sind in einer anderen Art durchzuführen, die sich nach den vorstehend genannten Ventil-Kategorien richtet.

A.4 VSC-Ventile des „Schalter“-Typs

A.4.1 Allgemeines

VSC-Ventile dieses Typs haben insofern eine scheinbar große Ähnlichkeit mit konventionellen Thyristorventilen, dass sie aus einer großen Anzahl in Reihe geschalteter IGBT-Bauelemente bestehen, die gleichzeitig geschaltet werden. Wie bei den konventionellen Thyristorventilen ist das gleichzeitige Schalten der in Reihe verbundenen IGBTs entscheidend. Ventile dieses Typs werden im Regelfall in Verbindung mit Stromrichtern mit einer relativ geringen Anzahl der Ausgangsstufen eingesetzt.

Zur Kompensation der geringen Anzahl der Ausgangsstufen wird bei derartigen Stromrichtern häufig die Pulsbreitenmodulation angewendet, um eine gute Annäherung an eine sinusförmige Ausgangsspannung zu erreichen.

Im Nachfolgenden werden einige der gebräuchlicheren Stromrichter-Topologien beschrieben, die im Zusammenhang mit diesem VSC-Ventiltyp angewendet werden können.

A.4.2 Zweistufen-Stromrichter

Hierbei, dem einfachsten VSC-Typ, umfasst jede VSC-Phaseneinheit genau zwei VSC-Ventile, die in Reihe geschaltet sind und an einem Wechselstromanschluss liegen. Die beiden Ventile werden abwechselnd so geschaltet, dass zu jedem bestimmten Zeitpunkt entweder das eine oder das andere Ventil leitet, aber nie beide gleichzeitig. (In der Praxis existiert üblicherweise eine kleine Totzeit oder Impulsverzögerungsdauer zwischen den beiden Ventilen.)

Die Schaltung dieses Stromrichters ist sehr einfach (siehe Bild A.4) und macht nur wenige Erklärungen notwendig. Wenn V1 leitet, dann ist der Wechselstromanschluss mit dem oberen Gleichstromanschluss verbunden und liefert deshalb eine Ausgangsspannung von $+1/2 U_{dc}$. Wenn V2 leitet, dann ist der Wechselstromanschluss mit dem unteren Gleichstromanschluss verbunden und liefert deshalb eine Ausgangsspannung von $-1/2 U_{dc}$.

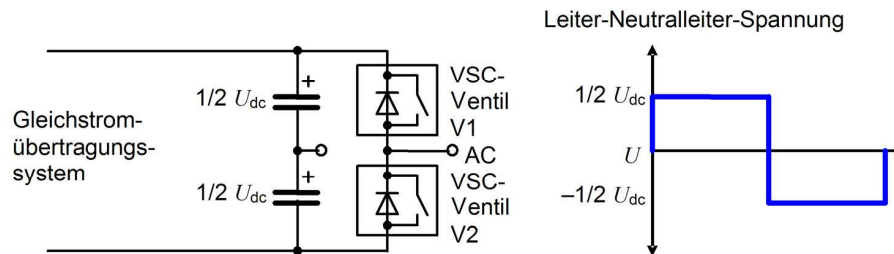


Bild A.4 – Grundsaltung einer Phaseinheit eines 2-Stufen-Stromrichters

A.4.3 Mehrstufen-Stromrichter mit Diodenklemmung

In dieser Familie der Stromrichter ist der Gleichspannungskondensator in eine Anzahl in Reihe geschalteter einzelner Stufen unterteilt und je Phaseinheit sind mehr als zwei IGBT-Ventile vorgesehen und die Diodenventile werden zur Verbindung zwischen verschiedenen Zwischenpunkten im Gleichspannungskondensator und in der Phaseinheit verwendet.

In der einfachsten Ausführung dieser Schaltung (siehe Bild A.5), dem Dreistufen-Stromrichter, enthält jede Phaseinheit vier unabhängige und in Reihe geschaltete VSC-Ventile. Der Gleichspannungskondensator ist in zwei in Reihe geschaltete Einheiten unterteilt (wie es häufig bei einem Zweistufen-Stromrichter ist). Der Wechselstromanschluss ist mit dem Anschluss zwischen V2 und V3 verbunden, und die 1/4- und 3/4-Punkte (zwischen den Ventilen V1/V2 und V3/V4) sind über Diodenventile mit dem Gleichspannungsmittelpunkt verbunden.

Bei diesem Stromrichter sind von einer Phaseinheit drei Ausgangszustände möglich. Wenn die Ventile V1 und V2 leiten, dann ist der Wechselstromanschluss mit dem oberen Gleichstromanschluss verbunden und liefert deshalb die Ausgangsspannung $+1/2 U_{dc}$. Wenn die Ventile V3 und V4 leiten, dann ist der Wechselstromanschluss mit dem unteren Gleichstromanschluss verbunden und liefert deshalb eine Ausgangsspannung von $-1/2 U_{dc}$. Wenn die Ventile V2 und V3 leiten, wird die Ausgangsspannung durch die Diodenventile am Gleichspannungsmittelpunkt „geklemmt“.

Das gleiche Prinzip kann auf eine höhere Stufenanzahl erweitert werden, indem der Gleichspannungskondensator noch weiter unterteilt wird und mehr VSC- und Diodenventile eingesetzt werden. In einem 5-Stufen-Stromrichter ist der Gleichspannungskondensator in vier einzelne Stufen unterteilt und es sind acht VSC-Ventile und sechs Diodenventile vorhanden (siehe Bild A.6). In dieser Schaltung werden die Ventile in nebeneinander liegenden Gruppen von jeweils vier Ventilen geschaltet, z. B. V1+V2+V3+V4 liefert eine Ausgangsspannung von $+1/2 U_{dc}$, V2+V3+V4+V5 liefert eine Ausgangsspannung von $+1/4 U_{dc}$ usw.

Es ist ersichtlich, dass mit ansteigender Anzahl der Ausgangsstufen die Komplexität der Schaltung unverhältnismäßig zunimmt. Dies wird durch die Tatsache noch ungünstiger, dass nicht nur die Anzahl, sondern auch die Spannungsbemessung der Diodenventile mit der Anzahl der Ausgangsstufen schnell ansteigt.

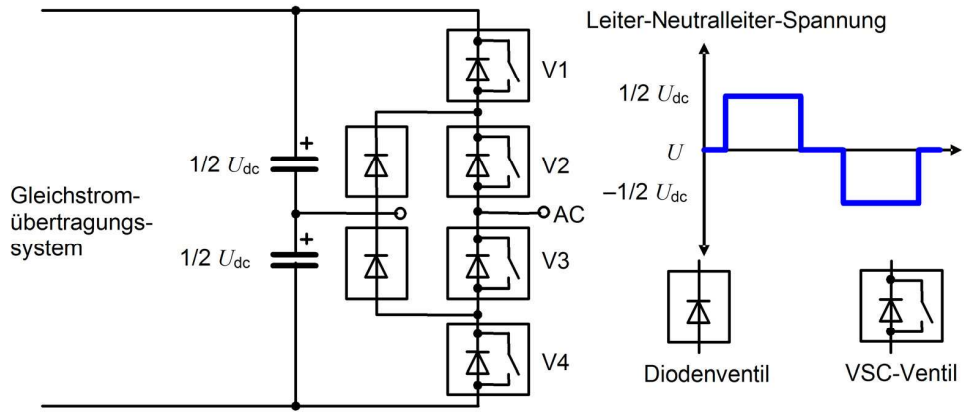


Bild A.5 – Grundsaltung einer Phaseinheit eines 3-Stufen-Stromrichters mit Diodenklemmung

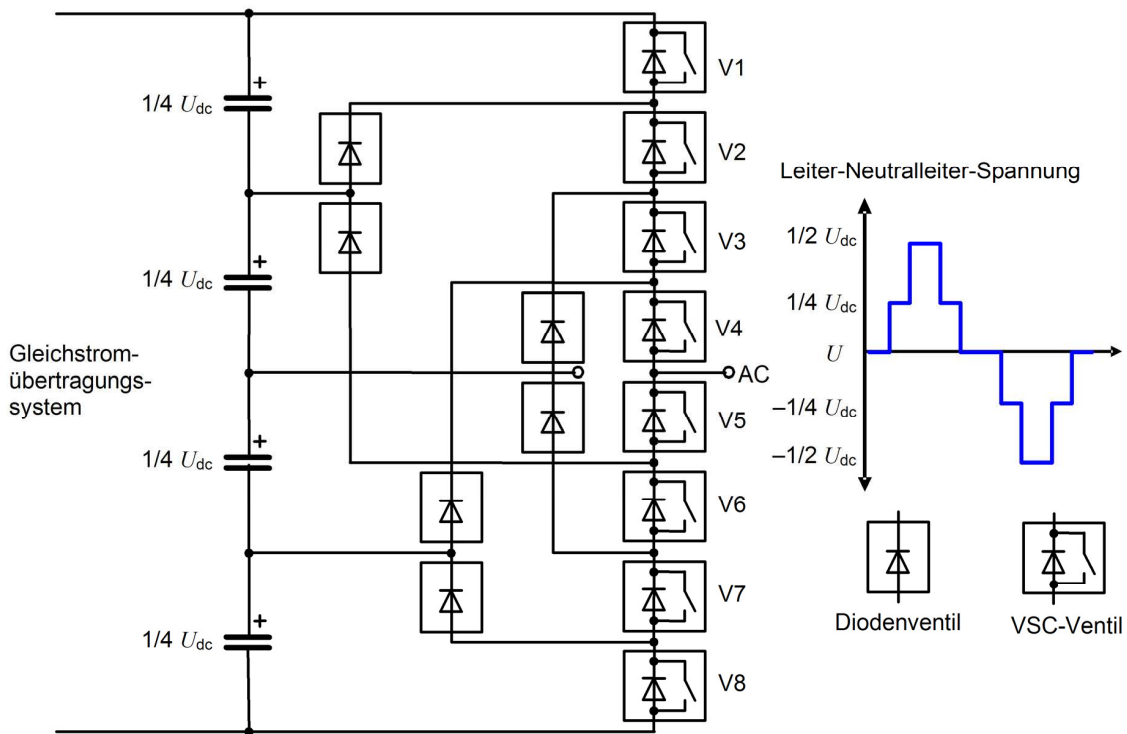


Bild A.6 – Grundsaltung einer Phaseinheit eines 5-Stufen-Stromrichters mit Diodenklemmung

A.4.4 Mehrstufen-Flying-Capacitor-Stromrichter

Diese Schaltung erzielt das gleiche Ergebnis wie der Stromrichter mit Diodenklemmung, jedoch nach einem anderen Verfahren. Anstelle der Verwendung von Dioden zum Klemmen der Ausgangsspannung auf eine der Zwischenstufen des Gleichspannungskondensators werden ein oder mehrere zusätzliche Gleichspannungskondensatoren verwendet, die von den Gleichstromanschlüssen isoliert und somit potentialfrei „schwimmend“ oder „fliegend“ sind, um die gleiche Wirkung zu erzielen. Diese Schaltung wird manchmal nach ihren Erfindern als „Foch-Meynard“-Schaltung bezeichnet.

Der Dreistufen-Flying-Capacitor-Stromrichter (siehe Bild A.7) hat einen potentialfreien (en: flying) Kondensator mit einer Nennspannung von $1/2 U_{dc}$. Dieser Kondensator ist zwischen den Anschlüssen geschaltet, die sich V1/V2 und V3/V4 teilen. Die Ventile werden wie bei dem Dreistufen-Stromrichter mit Diodenklemmung in

Paaren geschaltet, jedoch ist das Muster für das Erzielen einer Ausgangsspannung von null ein anderes. Für einen Ausgangszustand von null werden entweder die Ventile V1+V3 oder die Ventile V2+V4 eingeschaltet. V2+V3 ist eine nicht zulässige Kombination, weil damit der potentialfreie Kondensator kurzgeschlossen wird.

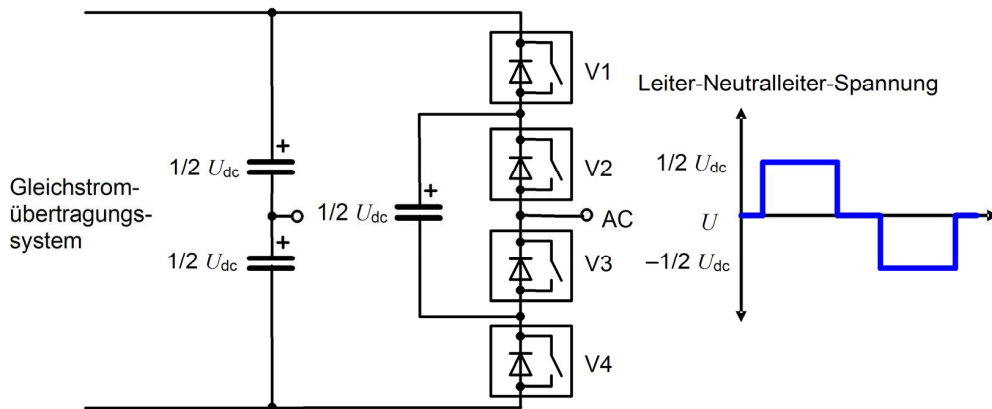


Bild A.7 – Grundsaltung einer Phaseneinheit eines Dreistufen-Flying-Capacitor-Stromrichters

Die Anzahl der VSC-Ventile je Phaseneinheit ist bei diesem Stromrichter die gleiche wie beim Stromrichter mit Diodenklemmung mit der gleichen Anzahl der Ausgangsstufen. Wie beim Stromrichter mit Diodenklemmung ist auch hier auf Kosten der unverhältnismäßig ansteigenden Komplexität eine höhere Anzahl der Ausgangsstufen möglich.

A.5 VSC-Ventile vom Typ der „steuerbaren Spannungsquelle“

In einem Zweistufen-Stromrichter sind Ventile und Gleichspannungskondensator klar getrennte Teile des Betriebsmittels und können getrennt voneinander ausgelegt und geprüft werden. Wenn jedoch die Anzahl der Ausgangsstufen zunimmt, ist nach A.4.3 und A.4.4 zu sehen, dass der (die) Gleichspannungskondensator(en) immer weiter unterteilt wird (werden) und die Ventile und der Gleichspannungskondensator zunehmend voneinander abhängig werden.

Da der Stromrichter beginnt, die Idealform anzunähern, bei der die Anzahl der Ausgangsstufen ausreichend ist, um eine gute Annäherung an die sinusförmige Wellenform ohne Anwendung der Pulsweitenmodulation zu erhalten, kann die Unterteilung des Gleichspannungskondensators und der Verbindungen zwischen den Kondensatoren und IGBTs so komplex werden, dass es keinen weiteren praktischen Wert hat, eine klare Unterscheidung zwischen diesen beiden vorzunehmen. In diesen Fällen kann es zweckmäßiger sein, das „VSC-Ventil“ nicht einfach als die IGBT-Elemente zu betrachten, die das Schalten ausführen, sondern auch die aufgeteilten Gleichspannungskondensatoren. Ein derartiges Ventil ist in der Tat nicht mehr nur ein einfacher Schalter, sondern ist jetzt eine steuerbare Spannungsquelle, die zwischen einem Wechselstromanschluss der entsprechenden Phaseneinheit und einem der Gleichstromanschlüsse angeschlossen ist (siehe Bild A.8).

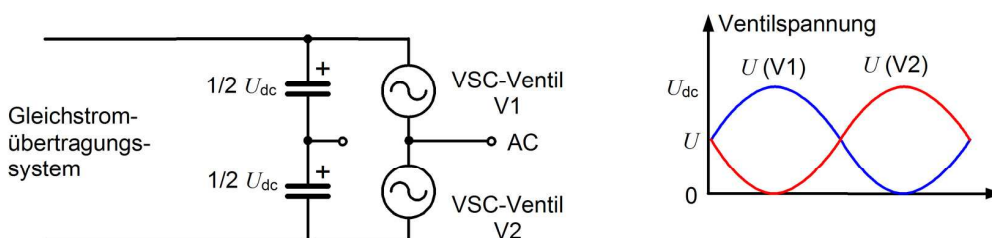


Bild A.8 – Eine einzelne VSC-Phaseneinheit mit Ventilen vom Typ der „steuerbaren Spannungsquelle“

Jedes der Ventile V1 und V2 in der Phaseneinheit erzeugt eine unipolare Ausgangsspannung, die angenähert einer vollständig verlagerten sinusförmigen Wellenform mit den Extremwerten $U = 0$ und $U = U_{dc}$ entspricht. Die Ausgangsspannungen der zwei Ventile werden so verändert, dass sich zu jedem Zeitpunkt $U(V1) + U(V2) = U_{dc}$ ergibt.

Grundsätzlich gibt es viele verschiedene Verfahren für die Realisierung eines derartigen Ventils, von denen eine Ausführung in Bild A.9 dargestellt ist. Diese Schaltung ist modular und jedes Modul enthält einen isolierten Gleichspannungskondensator und zwei IGBT-Schalter. Diese Schaltung ist tatsächlich der Grundschaltung des Zweistufen-Stromrichters (siehe Bild A.4) sehr ähnlich, mit der Ausnahme, dass die Verbindungen zwischen den Modulen vom Wechselstromanschluss (zwischen IGBT1 und IGBT2) des einen Moduls zu einem der Gleichstromanschlüsse des benachbarten Moduls geführt sind. Mit dieser Schaltung kann jedes Modul zwei unterschiedliche Ausgangszustände erzeugen: $U = 0$ (erhalten durch Einschalten von IGBT2) oder $U = U_{dc_module}$ (erhalten durch Einschalten von IGBT1). U_{dc_module} ist die Zwischenkreis-Gleichspannung eines einzelnen Moduls, die viel kleiner ist als U_{dc} , die Gleichspannung des vollständigen Systems.

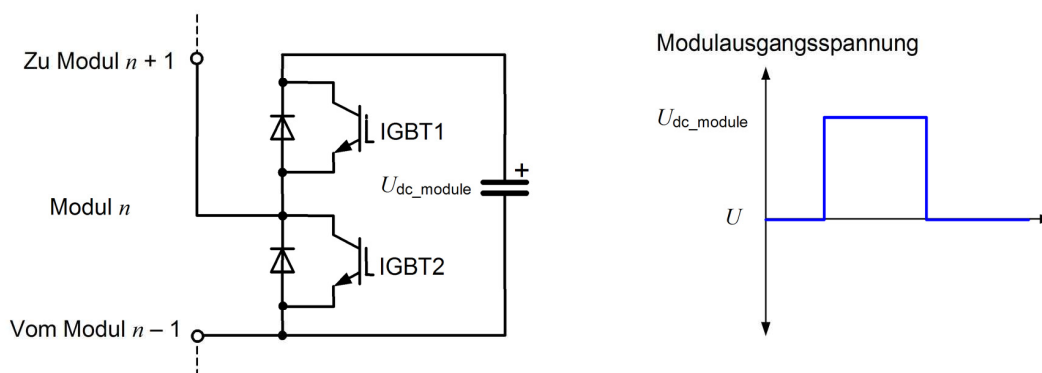


Bild A.9 – Eine mögliche Ausführung eines Mehrstufen-„Spannungsquellen“-VSC-Ventils

Da die Schaltung von sich aus modular ist, ist es relativ einfach, eine hohe Anzahl von Ausgangsstufen zu erhalten, ohne Notwendigkeit einer Pulsweitenmodulation (die zu höheren Schaltverlusten führt und Filterung erfordert) oder von in Reihe geschalteten IGBTs (die zu Problemen bei der Sicherstellung der Spannungsverteilung führen). Andererseits kann die Anzahl und Größe der erforderlichen Gleichspannungskondensatoren beträchtlich sein und es kann Schwierigkeiten dabei geben, dass alle Spannungen der Gleichspannungskondensatoren ausgeglichen bleiben. Im Vergleich zu Zwei- oder Dreistufen-Stromrichtern gestattet diese Topologie eine einfachere Ventilauslegung und niedrigere Verluste, allerdings auf Kosten einer aufwändigeren Steuerarchitektur und größeren Raumbedarfs.

A.6 Hauptunterschiede zwischen VSC-Ventilen und gebräuchlichen HGÜ-Ventilen

Die VSC-Ventile unterscheiden sich von den gebräuchlichen HGÜ-Ventilen auf Thyristorbasis in vielerlei Hinsicht. Es ist wichtig, diese Unterschiede zu kennen, um dadurch die Unterschiede in der Herangehensweise zu verstehen, die bei der Prüfung derartiger Ventile notwendig sind.

Während es eine Reihe vielfältiger Unterschiede gibt, so sind die wichtigsten mit Einfluss auf die Ventilprüfung die folgenden:

- VSC-Ventile können durch Steuervorgang eingeschaltet und ausgeschaltet werden. Im Gegensatz dazu können konventionelle HGÜ-Thyristorventile nur durch einen Steuervorgang eingeschaltet werden, und um das Ausschalten zu bewirken, ist ein äußerer Stromkreis erforderlich, um den Strom auf null zu bringen und eine Periode der Rückwärtsspannung anzulegen. Die Prüfungen für den Nachweis des kleinsten Löschwinkels oder von positiven Spannungstransienten während der Erholungszeit (die für Thyristorventile sehr wichtig ist) haben für VSC-Ventile keine Bedeutung.
- In VSC-Ventilen kann das Ventil die Rückwärtsspannung nicht tragen (weil es eingebaute Freilaufdioden enthält), kann jedoch den Rückwärtsstrom führen. In konventionellen HGÜ-Thyristorventilen kann das Ventil der Rückwärtsspannung standhalten, aber den Rückwärtsstrom nicht führen.

- In VSC-Ventilen wird das Schutzeinschalten üblicherweise nicht angewendet, weil ein Risiko besteht, einen Kurzschluss über dem Gleichspannungskondensator zu erzeugen; stattdessen wird ein Schutzausschalten zur Unterdrückung von Überströmen angewendet. Im Gegensatz dazu wird in gebräuchlichen HGÜ-Thyristorventilen das Schutzeinschalten verbreitet angewendet und ein Schutzausschalten ist nicht möglich.
- Die große gleichspannungsseitige Kapazität hat zur Folge, dass es einige Umstände gibt, bei denen eine VSC-Phaseneinheit schnellen Spannungstransienten zwischen den Anschlüssen ausgesetzt sein kann. In Ventilen vom Typ der „steuerbaren Spannungsquelle“ (wo ein Teil der Gleichspannungskapazität innerhalb des Ventils eingeschlossen ist) gilt auch das gleiche für die Spannungen zwischen den Anschlüssen des Ventils.

Anhang B (informativ)

Eigenschaft der Fehlzustandstoleranz

Die Eigenschaft der Fehlzustandstoleranz kann als das Verhalten eines HGÜ-VSC-Ventils definiert werden, seine vorgesehene Funktion zu erfüllen, bis eine geplante Abschaltung mit fehlerhaften Bauteilen oder Teilsystemen oder überlasteten Bauteilen erfolgt, und keine inakzeptablen Ausfälle weiterer Bauelemente oder die Ausdehnung des Schadens aufgrund der Ausfallbedingung zu verursachen. Bei der Auslegung zur Sicherstellung der Fehlzustandstoleranz können besondere Eigenschaften erforderlich sein. Nachfolgend werden einige Beispiele für Fehlzustände angegeben, für die die Fehlzustandstoleranz erforderlich sein kann:

a) Kurzschluss eines IGBT oder einer Diode

Obwohl ein kurzgeschlossener IGBT oder eine kurzgeschlossene Diode weitere Bauelemente am Ventilplatz überbrücken kann, kann es bei einigen Ausführungen eine Gefahr der Überlastung der Steuerelektroden-Ansteuerschaltungen, Überlastung der Stromverbindungen (wo parallel geschaltete IGBT oder Dioden angewendet werden) oder Veränderungen der Klemmenlast geben.

b) Ausbleibendes Steuerelektroden-Einschaltsignal an einem Ventilplatz aufgrund des Ausfalls der normalen Steuerelektrodenimpulse für diesen Platz

Ausbleibende Steuerelektroden-Einschaltsignale führen zur parallelen Überspannung der Bauteile an dem betreffenden Platz.

c) Isolationsfehler an einem Beschaltungskondensator, Beschaltungswiderstand oder an anderen Bauteilen, wenn anwendbar

Isolationsfehler an einem parallel zu den IGBTs oder den Dioden liegenden Bauteil können einen Stromfluss im Bauteil zur Folge haben, der zu einem gefährlichen Zustand führt.

d) Auslaufen von geringen Mengen des Ventilkühlmittels

Kleine Undichtheiten können an flüssigkeitsgekühlten Ventilen nicht ohne weiteres festgestellt werden. Ausgelaufenes Kühlmittel kann empfindliche Bauteile verunreinigen und zu Funktionsstörungen führen und kann die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Isolationsfehlers erhöhen.

Der Käufer sollte die angebotene Ausführung gemeinsam mit dem Lieferanten prüfen, um die Wahrscheinlichkeiten und die möglichen Folgen bestimmter Ausfälle zu bestimmen. Dabei sollte im Typprüfprogramm gegebenenfalls die Durchführung von Sonderprüfungen in Betracht gezogen werden, um kritische Aspekte der Fehlzustandstoleranz des Ventils zu prüfen. Die Einzelheiten derartiger Prüfungen sind im Einzelfall zu vereinbaren.

Literaturhinweise

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

ANMERKUNG Harmonisiert als EN 60146-2:2000 (nicht modifiziert).

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

CIGRE B4-WG37 technical report, *VSC Transmission*

Anhang ZA (normativ)

Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen

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).

ANMERKUNG Wenn internationale Publikationen durch gemeinsame Abänderungen geändert wurden, durch (mod) angegeben, gelten die entsprechenden EN/HD.

<u>Publikation</u>	<u>Jahr</u>	<u>Titel</u>	<u>EN/HD</u>	<u>Jahr</u>
IEC 60060	Reihe	High-voltage test techniques	EN 60060	Reihe
IEC 60060-1	1989	High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements	HD 588.1 S1	1991
IEC 60071-1	2006	Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules	EN 60071-1	2006
IEC 60700-1	1998	Thyristor valves for high voltage direct current	EN 60700-1	1998
A1	2003	(HVDC) power transmission –	A1	2003
A2	2008	Part 1: Electrical testing	A2	2008
ISO/IEC 17025	– ¹⁾	General requirements for the competence of testing and calibration laboratories	EN ISO/ IEC 17025	2005 ²⁾

¹⁾ Undatierte Verweisung.

²⁾ Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Norm gültige Ausgabe.