

**DIN EN 62751-2
(VDE 0553-751-2)****DIN**

Diese Norm ist zugleich eine **VDE-Bestimmung** im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.

VDE

ICS 29.200

Ersatz für
DIN EN 62751-2
(VDE 0553-751-2):2015-08
Siehe Anwendungsbeginn

**Bestimmung der Leistungsverluste in Spannungswischenkreis-
Stromrichtern (VSC) für Hochspannungsgleichstrom(HGÜ)-Systeme –
Teil 2: Modulare Mehrpunkt-Stromrichter
(IEC 62751-2:2014 + A1:2019);
Deutsche Fassung EN 62751-2:2014 + A1:2019**

Power losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems –

Part 2: Modular multilevel converters

(IEC 62751-2:2014 + A1:2019);

German version EN 62751-2:2014 + A1:2019

Pertes de puissance dans les valves à convertisseur de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT) –

Partie 2: Convertisseurs multiniveaux modulaires

(IEC 62751-2:2014 + A1:2019);

Version allemande EN 62751-2:2014 + A1:2019

Gesamtumfang 62 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn für die von CENELEC am 2014-10-01 angenommene Europäische Norm und die am 2019-09-27 angenommene Änderung A1 als DIN-Norm ist 2020-12-01.

Für **DIN EN 62751-2 (VDE 0553-751-2):2015-08** besteht eine Übergangsfrist bis 2022-09-27.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN EN 62751-2/A1 (VDE 0553-751-2/A1):2017-10.

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

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom IEC/SC 22F „Power electronics for electrical transmission and distribution systems“ erarbeitet und unterliegt dem Copyright der IEC .

A1 Die Änderung A1 wurde eingearbeitet und mit einer senkrechten Linie und A1 am linken Textrand gekennzeichnet.

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

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

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DKE (www.dke.de) und DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber **DIN EN 62751-2 (VDE 0553-751-2):2015-08** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Anpassungen der Normativen Verweisungen;
- b) Redaktionelle Anpassungen;
- c) ergänzende Erläuterungen der „Grundsätze der Verlustbestimmungen“;
- d) modifizierte Beschreibung der Berechnung der Stromrichterventile und der Verluste bei den „Eingabedaten für numerische Simulation“;
- e) Neuaufnahme des Unterabschnittes „Inhalt und Aufbau des Berichts zur Ventilverlustbestimmung“;
- f) editorielle Anpassungen im Abschnitt Leistungsverluste;
- g) Anpassung von Formelzeichen/Indizes;
- h) neu aufgenommen „Anlage B Empfohlene Daten, die dem Verlustberechnungsbericht beizufügen sind“;
- i) die Deutsche Fassung wurde in **Abschnitt 3** an die aktuellen Standardtexte angepasst.

Frühere Ausgaben

DIN EN 62751-2 (VDE 0553-751-2): 2015-08

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit europäischen und internationalen Dokumenten

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

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

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ist nachstehend wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäisches Dokument	Internationales Dokument	Deutsches Dokument	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 60633:1999 + A1:2009	IEC 60633:1998 + A1: 2009	DIN EN 60633:2010-11	—
EN 61803:1999 + A1:2010	IEC 61803:1999 + A1:2010	DIN EN 61803:2011-09	—
EN 62747:2014	IEC 62747:2014	DIN EN 62747:2015-03	—
EN 62751-1:2014	IEC 62751-1:2014	DIN EN 62571-1	—
	ISO/IEC Guide 98-3 Supplement 2	ISO/IEC Guide 98-3 Supplement 2:2011-11	—

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60633:2010-11, *Terminologie für Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)* (IEC 60633:1998 + A1:2009); Deutsche Fassung EN 60633:1999 + A1:2009

DIN EN 61803:2011-09, *Bestimmung der Leistungsverluste in Hochspannungsgleichstrom-(HGÜ-)Stromrichterstationen mit netzgeführten Stromrichtern* (IEC 61803:1999 + A1:2010); Deutsche Fassung EN 61803:1999 + A1:2010

DIN EN 62747:2015-03, *Terminologie für Spannungszwischenkreis-Stromrichter (VSC) für Hochspannungsgleichstrom(HGÜ)-Systeme* (IEC 62747:2014); Deutsche Fassung EN 62747:2014

DIN EN 62751-1, *Bestimmung der Leistungsverluste in Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC) für Hochspannungsgleichstrom(HGÜ)-Systeme – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*

ISO/IEC Guide 98-3 Supplement 2:2011-11, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995); Supplement 2: Extension to any number of output quantities*

**Bestimmung der Leistungsverluste in Spannungszwischenkreis-Stromrichtern
(VSC) für Hochspannungsgleichstrom(HGÜ)-Systeme –
Teil 2: Modulare Mehrpunkt-Stromrichter
(IEC 62751-2:2014 + A1:2019)**

Power losses in voltage sourced converter (VSC)
valves for high-voltage direct current (HVDC)
systems –
Part 2: Modular multilevel converters
(IEC 62751-2:2014 + A1:2019)

Pertes de puissance dans les valves à
convertisseur de source de tension (VSC) des
systèmes en courant continu à haute tension
(CCHT) –
Partie 2: Convertisseurs multiniveaux
modulaires
(IEC 62751-2:2014 + A1:2019)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2014-10-01 und die A1 am 2019-09-27 angenommen. 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 CEN-CENELEC Management Centre 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 CEN-CENELEC Management Centre 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, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, der Republik Nordmazedonien, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



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

CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel

© 2019 CENELEC – Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren, sind weltweit den Mitgliedern von CENELEC vorbehalten.

Ref. Nr. EN 62751-2:2014 + A1:2019 D

Vorwort

Der Text des Dokuments 22F/303/CDV, zukünftige 1. Ausgabe der IEC 62751-2, erarbeitet vom SC 22F „Power electronics for electrical transmission and distribution systems“ des IEC/TC 22 „Power electronic systems and equipment“, wurde zur parallelen IEC-CENELEC-Abstimmung vorgelegt und von CENELEC als **EN 62751-2:2014** angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem dieses Dokument auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2015-07-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die diesem Dokument entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2017-10-01

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CENELEC [und/oder CEN] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm **IEC 62751-2:2014** wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

In der offiziellen Fassung sind unter „Literaturhinweise“ zu den aufgelisteten Normen die nachstehenden Anmerkungen einzutragen:

IEC 61803:1999 ANMERKUNG Harmonisiert als EN 61803:1999.

Europäisches Vorwort zu A1

Der Text des Dokuments 22F/479/CDV, zukünftige IEC 62751-2/A1, erarbeitet vom SC 22F „Power electronics for electrical transmission and distribution systems“ des IEC/TC 22 „Power electronic systems and equipment“ wurde zur parallelen IEC-CENELEC-Abstimmung vorgelegt und von CENELEC als EN 62751-2:2014/A1:2019 angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem dieses Dokument auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2020-06-27
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die diesem Dokument entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2022-09-27

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CENELEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 62751-2:2014/A1:2019 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

Anhang ZA (normativ)

Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, 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 1 Ist eine internationale Publikation durch gemeinsame Abänderungen modifiziert worden, gekennzeichnet durch (mod.), dann gilt die entsprechende EN oder das HD.

ANMERKUNG 2 Die aktuellsten Informationen über die letzten Fassungen der Europäischen Normen, die im vorliegenden Anhang aufgelistet wurden, sind verfügbar unter <www.cenelec.eu>.

A1	<u>Publikation</u>	<u>Jahr</u>	<u>Titel</u>	<u>EN/HD</u>	<u>Jahr</u>
	IEC 61803	–	Determination of power losses in high-voltage direct current (HVDC) converter stations	EN 61803	–

Inhalt

Seite

Vorwort	2
Europäisches Vorwort zu A1	3
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	4
1 Anwendungsbereich.....	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen	8
3.1 Begriffe	9
3.2 Symbole und Abkürzungen	11
3.2.1 Ventil- und Simulationsdaten	11
3.2.2 Kennwerte von Halbleiterbauelementen	11
3.2.3 Kennwerte weiterer Bauteile	11
3.2.4 Betriebsparameter	12
3.2.5 Verlustparameter	12
4 Allgemeine Bedingungen	13
4.1 Allgemeines	13
4.2 Grundsätze der Verlustbestimmung	13
4.3 Kategorien der Ventilverluste	14
4.4 Methoden der Verlustberechnung	14
4.5 Eingabeparameter	15
4.5.1 Allgemeines	15
4.5.2 Eingabedaten für numerische Simulationen	15
4.5.3 Eingabedaten aus numerischen Simulationen	15
4.5.4 Daten der Stromrichterstation	16
4.5.5 Betriebsbedingungen	16
4.6 Inhalt und Aufbau des Berichts zur Ventilverlustbestimmung	17
5 Leitungsverluste	17
5.1 Allgemeines	17
5.2 IGBT-Leitungsverluste	19
5.3 Dioden-Leitungsverluste	19
5.4 Weitere Leitungsverluste	21
6 Gleichspannungsabhängige Verluste	21
7 Verluste in den Gleichstromkondensatoren des Ventils	22
8 Schaltverluste	22
8.1 Allgemeines	22
8.2 IGBT-Schaltverluste	23
8.3 Dioden-Schaltverluste	23
9 Weitere Verluste	24

	Seite
9.1 Verluste des Beschaltungskreises	24
9.2 Leistungsaufnahme der Ventilelektronik	24
9.2.1 Allgemeines	24
9.2.2 Stromversorgung aus der Sperrspannung über jedem IGBT	25
9.2.3 Stromversorgung aus dem Gleichstromkondensator	26
10 Ventilgesamtverluste je HGÜ-Station	26
Anhang A (informativ) Beschreibung von Leistungsverlustmechanismen in MMC-Ventilen	28
A.1 Einführung in die MMC-Stromrichtertopologie	28
A.2 Beanspruchungen durch Ventilspannung und -strom	30
A.2.1 Vereinfachte Analyse mit Spannung und Strom in gleicher Phasenlage	30
A.2.2 Verallgemeinerte Analyse mit einer Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom	31
A.2.3 Effekte der Injektion der dritten Oberschwingung	32
A.3 Leitungsverluste in MMC-Bausteinen	33
A.3.1 Beschreibung der Leitpfade	33
A.3.2 Leitungsverluste in Halbleitern	38
A.3.2.1 Analytische Näherungslösung	38
A.3.2.2 Verbesserte analytische Lösung	40
A.3.3 Verluste des Gleichstromkondensators des MMC-Bausteins	42
A.3.4 Weitere Leitungsverluste	42
A.4 Schaltverluste	42
A.4.1 Beschreibung von Zustandsänderungen	42
A.4.1.1 Allgemeines	42
A.4.1.2 Harte Schaltereignisse	42
A.4.1.3 Weiche Schaltereignisse	44
A.4.2 Analyse von Zustandsänderungen während einer Periode	44
A.4.3 Arbeitsbeispiel für Schaltverluste	44
A.5 Weitere Verluste	47
A.5.1 Verluste an der Beschaltung	47
A.5.2 Gleichspannungsabhängige Verluste	47
A.5.2.1 Allgemeines	47
A.5.2.2 Gleichspannungsabhängige Verluste im MMC-Baustein – Analytische Methode	47
A.5.2.3 Gleichspannungsabhängige Verluste über dem gesamten Ventil – Analytische Methode	49
A.5.3 Leistungsaufnahme der Ventilelektronik	49
A.5.3.1 Allgemeines	49
A.5.3.2 Topologie des Stromversorgungskreises	50
A.6 Anwendung weiterer Ventilvarianten	52
A.6.1 Allgemeines	52
A.6.2 Zweipunkt-MMC-Baustein in Vollbrückenordnung	52
A.6.3 Mehrpunkt-MMC-Bausteine	53

Anhang B (informativ) Empfohlene Daten, die dem Verlustberechnungsbericht beizufügen sind	55
Literaturhinweise	58

Bilder

Bild 1 – Zwei grundlegende Varianten von MMC-Bausteinen.....	17
Bild 2 – Leitpfade in MMC-Bausteinen	18
Bild A.1 – Phaseneinheit des modularen Mehrpunkt-Stromrichters (MMC) in einer grundlegenden Zweipunkt-Halbbrückenordnung mit Teilmodulen.....	28
Bild A.2 – Phaseneinheit des kaskadierten Zweipunkt-Stromrichters (CTL) in einer Halbbrückenordnung	29
Bild A.3 – Grundlegende Funktion von MMC-Stromrichtern	30
Bild A.4 – MMC-Stromrichter mit der Darstellung der Zusammensetzung des Ventilstroms	31
Bild A.5 – Zeigerdiagramm mit einer Darstellung von Netzwechselspannung, Stromrichterwechselspannung und Stromrichterwechselstrom	32
Bild A.6 – Effekt der Injektion einer Oberschwingung der 3. Ordnung auf Stromrichterspannung und -strom	33
Bild A.7 – Zwei funktional gleichwertige Varianten eines Zweipunkt-MMC-Bausteins in Halbbrückenordnung.....	34
Bild A.8 – Leitende Zustände in einem Zweipunkt-MMC-Baustein in Halbbrückenordnung	35
Bild A.9 – Typische Leitungsmuster für den Wechselrichterbetrieb (links) und den Gleichrichterbetrieb (rechts), basierend auf der Teilmodulkonfiguration aus Bild A.7 a).....	36
Bild A.10 – Beispiel eines Stromrichters mit nur einem MMC-Baustein je Ventil für die Darstellung des Schaltverhaltens	36
Bild A.11 – Beispiel für Schaltereignisse im Wechselrichterbetrieb	37
Bild A.12 – Beispiel für Schaltereignisse im Gleichrichterbetrieb.....	37
Bild A.13 – Ventilstrom und mittlerer gleichgerichteter Ventilstrom	39
Bild A.14 – IGBT- und Dioden-Schaltenergie als Funktion des Kollektorstroms	43
Bild A.15 – Ventilspannung, Ventilstrom und Schaltverhalten für ein hypothetisches MMC-Ventil, das aus fünf Teilmodulen besteht	45
Bild A.16 – Stromversorgung aus den IGBT-Anschlüssen	50
Bild A.17 – Stromversorgung aus den IGBT-Anschlüssen in einer Zelle.....	51
Bild A.18 – Stromversorgung aus dem Gleichstromkondensator im Teilmodul.....	51
Bild A.19 – Zweipunkt-MMC-Baustein in Vollbrückenordnung.....	52
Bild A.20 – Vier mögliche Varianten eines Dreipunkt-MMC-Bausteins.....	53

Tabellen

Tabelle 1 – Beiträge zu den Ventilverlusten in verschiedenen Betriebsarten.....	27
Tabelle A.1 – Harte Schaltereignisse	43
Tabelle A.2 – Weiche Schaltereignisse.....	44
Tabelle A.3 – Zusammenfassung der Schaltereignisse aus Bild A.15	46
Tabelle B.1 – Daten zum Ventilverlust	55
Tabelle B.2 – Weitere Daten	57

1 Anwendungsbereich

Der vorliegende Teil von IEC 62751 enthält das genaue Verfahren für die Berechnung der Leistungsverluste in den Ventilen eines Hochspannungs-Gleichstrom-Systems (HGÜ-Systems) auf der Basis des „modularen Mehrpunkt-Stromrichters“, bei dem jedes Ventil im Stromrichter aus einer Anzahl unabhängiger, über zwei Anschlüsse steuerbarer Spannungsquellen in Reihenschaltung besteht. Dieser Teil gilt sowohl für Fälle, in denen jede modulare Zelle nur aus einem einzelnen abschaltbaren Halbleiterbauelement je Schalterstufe besteht, als auch für Fälle, in denen jede Schalterstufe aus mehreren abschaltbaren Halbleiterbauelementen in Reihenschaltung besteht (diese Topologie wird auch als „kaskadierter Zweipunkt-Stromrichter“ bezeichnet). Die wichtigsten Gleichungen sind für die Zweipunkt-Halbbrückenkonfiguration angegeben, aber [Anhang A](#) enthält auch einen Leitfaden, wie sich die Ergebnisse auf bestimmte andere Konfigurationsarten von modularen Mehrpunkt-Stromrichtern (MMC)-Bausteinen erweitern lassen.

Diese Norm wurde in erster Linie für Bipolartransistoren mit isolierter Steuerelektrode (IGBT) erstellt, sie gilt aber auch als Leitfaden, wenn andere Typen von abschaltbaren Halbleiterbauelementen benutzt werden.

Die Leistungsverluste in anderen Teilen der Betriebsmittel in der HGÜ-Station, ausgenommen Stromrichter-ventile, sind vom Anwendungsbereich dieser Norm ausgeschlossen.

Diese Norm gilt nicht für Stromrichterventile von netzgeführten Stromrichtern in HGÜ-Systemen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, 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 60633, *Terminology for high-voltage direct-current (HVDC) transmission*

⚡ IEC 61803, *Determination of power losses in high-voltage direct current (HVDC) converter stations*

IEC 62747, *Terminology for voltage-sourced converters (VSC) for high-voltage direct current (HVDC) systems*

IEC 62751-1:2014, *Power losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems – Part 1: General requirements*

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM:1995)

3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60633, IEC 62747 und **IEC 62751-1** sowie die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>

3.1 Begriffe

3.1.1

modularer Mehrpunkt-Stromrichter

MMC

(en: modular multi-level converter)

Mehrpunkt-Stromrichter, in dem jedes VSC-Ventil aus einer Anzahl von MMC-Bausteinen in Reihenschaltung besteht

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Anmerkung gilt nur für die französische Sprachfassung.

3.1.2

MMC-Baustein

unabhängige, über zwei Anschlüsse steuerbare Spannungsquelle zusammen mit einem oder mehreren Gleichstromkondensatoren und unmittelbaren Hilfseinrichtungen, die Bestandteil eines MCC sind

3.1.3

IGBT-Dioden-Paar

Anordnung eines IGBT und einer Freilaufdiode in Antiparallelschaltung

3.1.4

Schalterstufe

Halbleiterfunktion, die sich wie ein einzelner, unteilbarer Schalter verhält

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine Schalterstufe kann aus einem einzelnen IGBT-Dioden-Paar oder, wie beim kaskadierten Zweipunkt-Stromrichter, aus einer Reihenschaltung mehrerer IGBT-Dioden-Paare bestehen.

3.1.5

kaskadierter Zweipunkt-Stromrichter

CTL

(en: cascaded two-level converter (CTL))

modularer Mehrpunkt-Stromrichter, in dem jede Schalterstufe aus der Reihenschaltung von mehr als einem IGBT-Dioden-Paar besteht

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Anmerkung gilt nur für die französische Sprachfassung.

3.1.6

Teilmodul

MMC-Baustein, in dem jede Schalterstufe aus nur einem IGBT-Dioden-Paar besteht

3.1.7

Zelle

MMC-Baustein, in dem jede Schalterstufe aus der Reihenschaltung von mehr als einem IGBT-Dioden-Paar besteht

3.1.8

abschaltbares Halbleiterbauelement

steuerbares Halbleiterbauelement, welches von einem Steuersignal ein- und ausgeschaltet werden kann, wie z. B. ein IGBT

3.1.9

Bipolartransistor mit isolierter Steuerelektrode

IGBT

(en: insulated gate bipolar transistor (IGBT))

abschaltbares Halbleiterbauelement mit drei Anschlüssen: ein Gate-Anschluss (G) und die beiden Lastanschlüsse Emitter (E) und Kollektor (C)

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Anmerkung gilt nur für die französische Sprachfassung.

3.1.10

Betriebszustand

Bedingung, bei der die HGÜ-Station eingeschaltet ist und die Stromrichter entsperrt sind

Anmerkung 1 zum Begriff: Anders als ein netzgeführter Stromrichter kann ein VSC ohne Wirk-/Blindlast arbeiten.

3.1.11

Bereitschaftszustand

Bedingung, in der die VSC-Station eingeschaltet ist, aber die IGBTs gesperrt sind, wobei alle Betriebslasten der Station und Hilfseinrichtungen angeschlossen sind

Anmerkung 1 zum Begriff: Im Bereitschaftszustand sollte grundsätzlich kein Schaltvorgang auftreten, weil das Ventil gesperrt ist. In bestimmten Ausführungen kann es jedoch notwendig sein, gelegentliche Schaltvorgänge zum Spannungsabgleich zwischen den verschiedenen Teilen des Stromrichters auszuführen. Dabei können geringe Verluste entstehen, die zu berücksichtigen sind.

3.1.12

Leerlaufzustand

Bedingung, bei der die HGÜ-Station eingeschaltet ist und die IGBTs entsperrt sind, aber am gemeinsamen Verbindungspunkt zum Wechselstromnetz keine Wirk- oder Blindlast vorhanden ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Leerlauf- und der Bereitschafts-Zustand sind ähnlich, aber aus dem Bereitschaftszustand heraus können einige Sekunden bis zur Übertragung des Stroms notwendig sein, während aus dem Leerlaufzustand die Übertragung des Stroms nahezu unmittelbar (weniger als drei Perioden der Netzfrequenz) begonnen werden kann.

Anmerkung 2 zum Begriff: Im Leerlaufzustand kann der Stromrichter die Gleichspannung aktiv steuern, im Gegensatz zum Bereitschaftszustand, in dem das Verhalten des Stromrichters im Wesentlichen „passiv“ ist.

Anmerkung 3 zum Begriff: Im Bereitschaftszustand sind die Verluste im Allgemeinen etwas niedriger als im Leerlaufzustand, und deshalb ist dieser Betriebszustand zu bevorzugen, sofern die Anordnung des VSC-Systems dies zulässt.

3.1.13

Modulationsindex von PWM-Stromrichtern

M

Verhältnis des Spitzenwerts der Leiter-Erde-Wechselspannung des Stromrichters zum halben Spannungswert zwischen den Gleichspannungsanschlüssen des Stromrichters

$$M = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{c1}}{\sqrt{3} \cdot \frac{U_{dc}}{2}}$$

Dabei ist

U_{c1} der Effektivwert der Grundfrequenz der Leiter-Leiter-Spannung U_c ;

U_c die Ausgangsspannung einer VSC-Phaseneinheit an deren Wechselspannungsanschlüssen;

U_{dc} die Ausgangsspannung einer VSC-Phaseneinheit an deren Gleichspannungsanschlüssen.

Anmerkung 1 zum Begriff: In einigen Quellen ist der Modulationsindex so definiert, dass sich ein Modulationsindex von 1 auf ein Rechteckausgangssignal bezieht, was bedeutet, dass der Modulationsindex nie größer als 1 werden kann. Der Modulationsindex nach dieser Definition wird einfach angegeben mit $M \cdot (\pi/4)$. Diese Definition gilt jedoch in erster Linie für Zweipunkt-Stromrichter mit PWM.

3.2 Symbole und Abkürzungen

3.2.1 Ventil- und Simulationsdaten

N_{tc}	Anzahl der MMC-Bausteine je Ventil
N_c	Anzahl der in Reihe geschalteten Halbleiterbauelemente je Schalterstufe
N_{sr}	Gesamtanzahl der Serienwiderstandselemente, die zu den Leitungsverlusten im Ventil beitragen, außer in den IGBTs und Dioden
N_{cv}	Anzahl der Gleichstromkondensatoren im Ventil
N_s	Anzahl der Schaltzyklen (ein oder aus), mit der jede VSC-Ventilstufe während der Integrationszeit t_i beansprucht wird
N_{pr}	Gesamtanzahl der Parallelwiderstandselemente, die zu den gleichspannungsabhängigen Verlusten im Ventil beitragen
N_{sn}	Anzahl der Beschaltungskreise je Ventil
t_i	Integrationszeit bei der Simulation

3.2.2 Kennwerte von Halbleiterbauelementen

V_{0T}	mittlere IGBT-Schwellenspannung für die zutreffenden Betriebsbedingungen
R_{0T}	mittlerer IGBT-Anstiegswiderstand für die zutreffenden Betriebsbedingungen an den Bauelementeanschlüssen
V_{0D}	mittlere Dioden-Schwellenspannung für die zutreffenden Betriebsbedingungen
R_{0D}	mittlerer Dioden-Anstiegswiderstand für die zutreffenden Betriebsbedingungen an den Bauelementeanschlüssen
E_{on}	mittlere Einschalt-Verlustleistung im IGBT für die zutreffenden Betriebsbedingungen
E_{off}	mittlere Ausschalt-Verlustleistung im (in den) IGBT(s) für die zutreffenden Betriebsbedingungen
$E_{on,T1_j,k}$	Einschalt-Verlustleistung in IGBT T1 im j -ten MMC-Baustein für das k -te Einschaltereignis für die zutreffenden Betriebsbedingungen (Spannung, Strom und Sperrschichttemperatur)
$E_{on,T2_j,k}$	Einschalt-Verlustleistung in IGBT T2 im j -ten MMC-Baustein für das k -te Einschaltereignis für die zutreffenden Betriebsbedingungen (Spannung, Strom und Sperrschichttemperatur)
$E_{off,T1_j,k}$	Ausschalt-Verlustleistung in IGBT T1 im j -ten MMC-Baustein für das k -te Ausschaltereignis für die zutreffenden Betriebsbedingungen (Spannung, Strom und Sperrschichttemperatur)
$E_{off,T2_j,k}$	Ausschalt-Verlustleistung in IGBT T2 im j -ten MMC-Baustein für das k -te Ausschaltereignis für die zutreffenden Betriebsbedingungen (Spannung, Strom und Sperrschichttemperatur)
$E_{rec,D1_j,k}$	Dioden-Sperrverzögerungsverlust in Diode D1 im j -ten MMC-Baustein für das k -te Dioden-Ausschaltereignis für die zutreffenden Betriebsbedingungen (Spannung, Strom und Sperrschichttemperatur)
$E_{rec,D2_j,k}$	Dioden-Sperrverzögerungsverlust in Diode D2 im j -ten MMC-Baustein für das k -te Dioden-Ausschaltereignis für die zutreffenden Betriebsbedingungen (Spannung, Strom und Sperrschichttemperatur)

3.2.3 Kennwerte weiterer Bauteile

R_{s_k}	Gesamtstand der k Serienwiderstandselemente im Ventil, die zu weiteren Leitungsverlusten beitragen
R_{dc_k}	Widerstand der k -ten Parallelwiderstandskomponente im Ventil

R_{ESR_j}	mittlerer Serienerersatzwiderstand des j -ten Gleichstromkondensators
$E_{\text{sn,on}_j,k}$	Verlust im Beschaltungswiderstand des j -ten Beschaltungskreises für das k -te Einschaltereignis für die zutreffenden Betriebsbedingungen (Spannung und Strom, wenn für die Bauart der Beschaltung zutreffend)
$E_{\text{sn,off}_j,k}$	Verlust im Beschaltungswiderstand des j -ten Beschaltungskreises für das k -te Ausschaltereignis für die zutreffenden Betriebsbedingungen (Spannung und Strom, wenn für die Bauart der Beschaltung zutreffend)

3.2.4 Betriebsparameter

I_{T1av_j}	mittlerer Strom von IGBT T1 im j -ten MMC-Baustein, gemittelt über eine Integrationszeit t_i
I_{T2av_j}	mittlerer Strom von IGBT T2 im j -ten MMC-Baustein, gemittelt über eine Integrationszeit t_i
I_{T1rms_j}	Effektivwert des Stroms von IGBT T1 im j -ten MMC-Baustein, gemittelt über eine Integrationszeit t_i
I_{T2rms_j}	Effektivwert des Stroms von IGBT T2 im j -ten MMC-Baustein, gemittelt über eine Integrationszeit t_i
I_{D1av_j}	mittlerer Strom der Diode D1 im j -ten MMC-Baustein, gemittelt über eine Integrationszeit t_i
I_{D2av_j}	mittlerer Strom der Diode D2 im j -ten MMC-Baustein, gemittelt über eine Integrationszeit t_i
I_{D1rms_j}	Effektivwert des Stroms der Diode D1 im j -ten MMC-Baustein, gemittelt über eine Integrationszeit t_i
I_{D2rms_j}	Effektivwert des Stroms der Diode D2 im j -ten MMC-Baustein, gemittelt über eine Integrationszeit t_i
I_{rms_k}	Effektivwert des im k -ten Serienwiderstandselement fließenden Stroms für die entsprechenden Betriebsbedingungen
U_{rms_k}	Effektivwert (einschließlich Gleichspannungsanteil) der Spannung über der k -ten Parallelwiderstandskomponente im Ventil
I_{crms_j}	Effektivwert des im j -ten Gleichstromkondensator des Ventils fließenden Stroms
$P_{\text{GU}_j,k}$	mittlere Eingangsleistung der Stromversorgung des k -ten IGBT im j -ten MMC-Baustein
$p_{\text{GU}_j,k}(t)$	Momentanwert der Eingangsleistung der Stromversorgung des k -ten IGBT im j -ten MMC-Baustein
$u_{\text{GU}_j,k}(t)$	Momentanwert der Eingangsspannung der Stromversorgung des k -ten IGBT im j -ten MMC-Baustein
$i_{\text{GU}_j,k}(t)$	Momentanwert des Eingangsstroms der Stromversorgung des k -ten IGBT im j -ten MMC-Baustein
P_{GU_j}	mittlere Eingangsleistung der Stromversorgung im j -ten MMC-Baustein
$p_{\text{GU}_j}(t)$	Momentanwert der Eingangsleistung der Stromversorgung im j -ten MMC-Baustein
$u_{\text{GU}_j}(t)$	Momentanwert der Eingangsspannung der Stromversorgung im j -ten MMC-Baustein
$i_{\text{GU}_j}(t)$	Momentanwert des Eingangsstroms der Stromversorgung im j -ten MMC-Baustein

3.2.5 Verlustparameter

P_{V1}	IGBT-Leitungsverluste
P_{V2}	Dioden-Leitungsverluste
P_{V3}	weitere Ventil-Leitungsverluste
P_{V4}	gleichspannungsabhängige Verluste

P_{V5}	Gleichstromkondensatorverluste
P_{V6}	IGBT-Schaltverluste
P_{V7}	Dioden-Ausschaltverluste
P_{V8}	Verluste an der Beschaltung
P_{V9}	Stromverbrauch der Ventilelektronik
P_{Vt}	Ventilgesamtverluste

4 Allgemeine Bedingungen

4.1 Allgemeines

A1 | Modulare Mehrpunkt-Stromrichter (MMCs) gehören zu einer Baureihe von Stromrichtern, bei der jedes Ventil eine steuerbare Spannungsquelle bildet. Die Stromrichter-Wechselspannung wird durch das Schalten einer großen Anzahl von relativ kleinen, unabhängigen, über zwei Anschlüsse steuerbaren Spannungsquellen zu verschiedenen Zeitpunkten aufgebaut, wodurch eine qualitativ hochwertige Wellenform des Stromrichters mit geringen Schaltverlusten und damit ein hoher Gesamtwirkungsgrad erzielt wird. Die MMC-Bausteine, aus denen der gesamte Stromrichter zusammengesetzt ist, können aus mehreren IGBT-Dioden-Paaren in Reihenschaltung (in diesem Fall wird der Stromrichter als „kaskadierter Zweipunkt-Stromrichter“ (CTL) bezeichnet) oder aus nur einem einzelnen IGBT-Dioden-Paar je Schalterstufe bestehen. Eine genaue Beschreibung dieser Stromrichtertypen gehört nicht zum Anwendungsbereich der vorliegenden Norm, [Anhang A](#) enthält jedoch eine allgemeine Beschreibung der Wirkungsweise des MMC (siehe auch IEC TR 62543).

4.2 Grundsätze der Verlustbestimmung

A1 | Theoretisch können die Verluste einer Stromrichterstation entweder durch direkte Messungen der Eingangs- und Ausgangsleistungen oder durch die Kennwerte der Komponenten unter Anwendung geeigneter mathematischer Modelle der einzelnen Komponenten eines Stromrichters bestimmt werden. Bei der Auswahl der Grundsätze für die Verlustbestimmung müssen die Unsicherheiten berücksichtigt werden. Der Hersteller muss im Verlustberechnungsbericht darlegen, wie die Unsicherheiten berücksichtigt wurden.

Die Gesamtunsicherheit des Verlustwerts ist ein wichtiger Parameter für einen Stromrichter und eine Stromrichterstation, weil anhand dieses Werts die Investitionskosten mit den aktivierten Kosten über die Lebensdauer der Stromrichterstation verglichen werden. Um sicherzustellen, dass die Schätzungen unstrittig sind, ist die Einhaltung der Bestimmungen der vorliegenden Norm und der Bestimmungen von ISO/IEC-Richtlinie 98-3 unerlässlich. Alle Messungen müssen darüber hinaus auf nationale und/oder internationale Messnormen rückführbar sein.

A1 | Wie bereits erwähnt, können die Verluste einer Stromrichterstation im Grunde durch eine direkte Leistungsmessung der Wechselstrom- und der Gleichstromseite bestimmt werden. Die Differenz zwischen diesen beiden Leistungswerten ist jedoch gering, und es ist schwierig, eine hohe Genauigkeit zu erzielen. In der Praxis würde diese Messung den Einsatz von modernsten Messeinrichtungen erfordern, die ähnlich genau sind wie die besten in den nationalen Messinstituten verfügbaren Messeinrichtungen. Obwohl in einigen Partnerschaftsprojekten zwischen Industrie und Wissenschaft Prototypen mit ausreichender Genauigkeit gezeigt wurden, gibt es in der Industrie wenige Erfahrungen mit dem Einsatz derartiger Messeinrichtungen für Vor-Ort-Messungen. Die Durchführbarkeit von Labormessungen an VSC-Ventilen zur Unterstützung einer genaueren Bestimmung der Ventilverluste wird derzeit in CIGRÉ WG B4-75 untersucht.

In seltenen Fällen mit zwei Stromrichtern in einer Station besteht die Möglichkeit einer Verbindung der beiden Stromrichter über eine zeitweilige Kurzkupplung, bei der die Gleichstromleistung zwischen beiden zirkuliert und der Gesamtverlust vom Wechselstromnetz geliefert wird. Dieser Verlust kann mit normalen Leistungszählern und Spannungswandlern gemessen werden, aber unter Verwendung spezieller Stromwandler mit einem Bemessungsstrom in der Größenordnung von 5 % bis 10 % des normalen Betriebsstroms der Stromrichter, um eine ausreichende Genauigkeit bei den zu messenden Leistungspegeln zu erreichen. Um

Messungen über eine Kurzkupplung zu ermöglichen, können weitere Einrichtungen und/oder Steuer- und Schutzeinrichtungen erforderlich sein, die die Investitionskosten der Stromrichterstation erhöhen.

In den meisten Fällen sind die Verluste jedoch aus den Kennwerten der Komponenten unter Anwendung geeigneter mathematischer Stromrichtermodelle nach den Erläuterungen in der vorliegenden Norm zu bestimmen. Es ist jedoch maßgeblich, dass alle diese Schätzungen auf tatsächlichen Messungen mit einer ausreichend geringen Unsicherheit basieren. Es sollte außerdem darauf geachtet werden, dass die Fortpflanzung der Messunsicherheiten dargestellt wird und wie sie sich auf das Modell auswirkt. Ferner sollten Schätzwerte der Unsicherheitsbeiträge durch Mängel in den Modellen selbst berücksichtigt werden.

4.3 Kategorien der Ventilverluste

Die verschiedenen Komponenten der Ventilverluste werden in Kategorien eingeteilt, die mit P_{V1} bis P_{V9} bezeichnet werden:

P_{V1}	IGBT-Leitungsverluste;
P_{V2}	Dioden-Leitungsverluste;
P_{V3}	weitere Ventil-Leitungsverluste;
P_{V4}	gleichspannungsabhängige Verluste;
P_{V5}	Gleichstromkondensatorverluste;
P_{V6}	IGBT-Schaltverluste;
P_{V7}	Dioden-Ausschaltverluste;
P_{V8}	Verluste an der Beschaltung;
P_{V9}	Stromverbrauch der Ventilelektronik.

Bei der MMC-Topologie stellen die größten Beiträge zu den Ventilverlusten aufgrund der gewöhnlich niedrigen Schalzhäufigkeit (weniger als 200 Hz) in der Regel die IGBT- und die Dioden-Leitungsverluste P_{V1} und P_{V2} dar. Bei Halbbrückenstromrichtern ist im Wechselrichterbetrieb P_{V1} und im Gleichrichterbetrieb P_{V2} vorherrschend, während es bei Vollbrückenstromrichtern keinen großen Unterschied zwischen Gleichrichter- und Wechselrichterbetrieb gibt. Außerdem stellen die IGBT-Schaltverluste P_{V6} und die Dioden-Ausschaltverluste P_{V7} einen erheblichen (aber nicht vorherrschenden) Beitrag dar. Die anderen Komponenten der Ventilverluste sind im Allgemeinen unbedeutend.

4.4 Methoden der Verlustberechnung

Die vorgeschlagene Methode für die Bestimmung von Ventilverlusten beruht auf einer analytischen Gleichung für die Betriebsbedingungen. Einige der erforderlichen Eingabeparameter sind jedoch rein analytisch nur schwer zu ermitteln. Zur Ableitung solcher Eingabeparameter, z. B. Ventilströme und Schaltenergien, müssen rechnerische Lösungen unter Anwendung von Echtzeit- oder Nicht-Echtzeit-Simulationen angewendet werden. Dafür sind die in 4.5 beschriebenen Eingabeparameter erforderlich.

⚠ Eine wichtige Anforderung für derartige Simulationen ist eine genaue Modellierung des zu untersuchenden Systems. Mehrpunkt-Stromrichter bieten einen hohen Freiheitsgrad im Hinblick auf Regelungsstrategien. Damit hängen die resultierenden Ventilströme stark von der Umsetzung und von den Algorithmen der Regelung selbst ab.

In Übereinstimmung mit den Aussagen in 4.2 müssen Unsicherheiten numerischer Simulationen vom Hersteller eindeutig angegeben und begründet werden.

4.5 Eingabeparameter

4.5.1 Allgemeines

Dieser Unterabschnitt beschreibt die für die Berechnung der Leistungsverluste in den Ventilen eines MMC erforderlichen Eingabeparameter. Diese Eingabeparameter beziehen sich auf die für die Durchführung der numerischen Simulationen erforderlichen Daten sowie auf die für die Berechnung der Verluste erforderlichen Stromrichter- und Komponentendaten. Gleichzeitig werden Stromrichter- und Komponentendaten in zwei Kategorien unterteilt: Daten der Stromrichterstation wie die Anzahl der MMC-Bausteine je Ventil sowie die Durchlasskennwerte des IGBT und der Freilaufdiode und die Betriebsparameter wie Stromrichter-Wechsel- und Gleichströme, Stromrichterspannung (Amplitude und Wellenform, einschließlich der Injektion der 3. Oberschwingung, soweit zutreffend), Frequenz des Wechselstromsystems und mittlere Schalzhäufigkeit der MMC-Bausteine.

4.5.2 Eingabedaten für numerische Simulationen

Für numerische Simulationen sind die folgenden Anforderungen zu berücksichtigen:

- Das Simulationsmodell muss einen Steuerungsblock einbeziehen, der das reale Regelungsverhalten und das realistische Verhalten hinsichtlich von Messungen, Tot- und Umschaltzeiten, Verriegelungszeiten usw. wiedergibt.
- Die Berechnungen müssen für eine Zeitspanne mit stabilen Bedingungen in Bezug auf die Wirk- und Blindleistungsübertragung auf der Wechselstromseite und die Wirkleistung auf der Gleichstromseite durchgeführt werden.
- Nachdem sich bei der Simulation ein stationärer Zustand eingestellt hat, muss für die Verluste im Betriebszustand eine Integrationszeit t_i von mindestens 1 s angewendet werden, in Abhängigkeit von den angewendeten Schaltstrategien kann für den Bereitschafts- und den Leerlaufzustand aber eine längere Zeit erforderlich sein.
- Die Simulationsmodelle müssen reale Bedingungen der Stromrichterstation in Bezug auf die Anzahl der MMC-Bausteine, die Hauptkomponenten, parasitäre Elemente, ursprüngliche Steuerungsalgorithmen, Spannungs- und Stromfühler wiedergeben. Bei der Berechnung der Ventilverluste ist anzunehmen, dass alle redundanten VSC-Ventilstufen in Betrieb sind.
- Eine Vereinfachung des Simulationsmodells mit einer verringerten Anzahl von MMC-Bausteinen ist möglich, wenn nachgewiesen werden kann, dass die resultierenden Ventilströme durch die Vereinfachung nicht beeinflusst werden.
- Für die Berechnung der Stromrichterventilströme und der Kondensatorströme des MMC-Bausteins, die die Grundlage für die Berechnung der entsprechenden Verluste bilden, ist es ausreichend, ein vereinfachtes Modell zu verwenden, in dem die Durchlass- und Schaltkennwerte der IGBTs und Dioden durch die ungünstigsten Kennwerte dargestellt werden, die für ihre höchste Bemessungssperrschichttemperatur anwendbar sind.
- Für die genaue Berechnung der Verluste muss die Simulation auch die von der Sperrschichttemperatur abhängigen Halbleitereigenschaften berücksichtigen, zum Beispiel die Durchlassspannungen sowie die Schalt- und Sperrverzögerungsverluste. Diese Eigenschaften beruhen auf den Kennwertbestimmungsprüfungen nach IEC 62751-1:2014, 4.4.2. Die stationären Sperrschichttemperaturen der Halbleiter werden iterativ für den entsprechenden Arbeitspunkt berechnet, um die Halbleiterverluste zu ermitteln.

4.5.3 Eingabedaten aus numerischen Simulationen

Mit den numerischen Simulationen werden die Ströme durch die Ventilbauelemente, die als Eingabewerte für die Verlustberechnung erforderlich sind, ermittelt. Die Liste der abzuleitenden Parameter umfasst:

- mittlerer Strom und Effektivwert des Stroms durch die Dioden;
- mittlerer Strom und Effektivwert des Stroms durch die IGBTs;
- Effektivwert des Stroms durch die Serienwiderstandselemente;
- Effektivwert des Stroms durch die Parallelwiderstandselemente;
- Effektivwert des in den Gleichstromkondensatoren des Ventils fließenden Stroms;