

DIN EN IEC 61803



ICS 29.200

EntwurfEinsprüche bis 2019-08-28
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 61803:2017-04

**Bestimmung der Leistungsverluste in
Hochspannungsgleichstrom (HGÜ)-Stromrichterstationen mit
netzgeführten Stromrichtern
(IEC 22F/514/CD:2018);
Text Deutsch und Englisch**

Determination of power losses in high-voltage direct current (HVDC) converter stations with line-commutated converters
(IEC 22F/514/CD:2018);
Text in German and English

Détermination des pertes en puissance dans les postes de conversion en courant continu à haute tension (CCHT) munis de convertisseurs commutés par le réseau
(IEC 22F/514/CD:2018);
Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2019-06-28 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 68 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 22F/514/CD:2018 „Determination of power losses in high-voltage direct current (HVDC) converter stations with line-commutated converters“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

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

Das internationale Dokument wurde vom SC 22F „Power electronics for electrical transmission and distribution systems“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

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

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf FprEN nur 6 Wochen beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

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

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.

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

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

Änderungen

Gegenüber DIN EN 61803:2017-04 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Es wird berücksichtigt, dass die heutige Herstellungstechnologie für Thyristoren eine wesentlich geringere Streuung der Thyristorparameter gegenüber der Situation im Jahr 1999, als die Norm erarbeitet wurde, aufweist und somit für die Berechnung der Leistungsverluste die Herstellungsaufzeichnungen der Thyristoren herangezogen werden können (5.1.7 und 5.8).
- Die Korrektur betrifft die Berechnung der Gesamt-Lastverluste der Station (Fall D in Anhang C).
- Die logische Reihenfolge der Abschnitte, Unterabschnitte und Anhänge der Norm wird eingehalten.
- Die deutsche Übersetzung wurde in Abschnitt 2 an die aktuellen Standardsätze angepasst.

Inhalt

	Seite
1 Anwendungsbereich.....	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe und Symbole.....	5
3.1 Begriffe	5
3.2 Buchstabensymbole	6
4 Allgemeines.....	7
4.1 Einleitung.....	7
4.2 Umgebungsbedingungen	8
4.2.1 Referenz-Normalaußentemperatur	8
4.2.2 Referenz-Normaltemperatur des Kühlmittels.....	8
4.2.3 Referenz-Normalluftdruck	8
4.3 Betriebsparameter.....	8
5 Bestimmung der Geräteverluste	9
5.1 Verluste der Thyristorventile	9
5.1.1 Thyristordurchlassverluste je Ventil	10
5.1.2 Thyristorstromausbreitungsverluste je Ventil	10
5.1.3 Weitere Stromleitungsverluste je Ventil	11
5.1.4 Gleichspannungsabhängige Verluste je Ventil	11
5.1.5 Dämpfungsverluste je Ventil (widerstandsabhängiger Anteil)	12
5.1.6 Dämpfungsverluste je Ventil (Anteil durch Änderung der Kondensatorenergie)	13
5.1.7 Abschaltverluste je Ventil	13
5.1.8 Drosselverluste je Ventil.....	14
5.1.9 Gesamtverluste des Ventils	14
5.1.10 Temperatureinflüsse	15
5.1.11 Leerlaufverluste je Ventil.....	15
5.2 Verluste des Stromrichtertransformators	15
5.2.1 Allgemeines.....	15
5.2.2 Leerlaufverluste.....	16
5.2.3 Betriebsverluste	16
5.2.4 Leistungsverluste durch Hilfsbetriebe	17
5.3 Verluste in Wechselstromfiltern.....	17
5.3.1 Allgemeines.....	17
5.3.2 Kondensatorverluste in Wechselstromfiltern.....	18
5.3.3 Drosselverluste in Wechselstromfiltern.....	18
5.3.4 Widerstandsverluste in Wechselstromfiltern	18
5.3.5 Gesamtverluste durch Wechselstromfilter	18
5.4 Verluste durch Kompensationskondensatorbatterien	19
5.5 Verluste durch Kompensationsdrosseln	19

	Seite
5.6 Verluste der Gleichstromglättungsdrossel.....	19
5.7 Verluste durch Gleichstromfilter	20
5.7.1 Allgemeines	20
5.7.2 Verluste durch Gleichstromfilterkondensatoren	20
5.7.3 Drosselverluste in Gleichstromfiltern.....	21
5.7.4 Verluste durch Gleichstromfilterwiderstände.....	21
5.7.5 Gesamtverluste des Gleichstromfilters	21
5.8 Verluste durch Stationshilfsbetriebe.....	21
5.9 Verluste von Reihenfiltern	22
5.10 Weitere Verluste	23
Anhang A (normativ) Berechnung der Oberschwingungsströme und -spannungen.....	29
A.1 Oberschwingungsströme in Stromrichtertransformatoren.....	29
A.2 Oberschwingungsströme in den Wechselstromfiltern	29
A.3 Oberschwingungsspannungen auf der Gleichstromseite.....	30
A.4 Gleichstromseitige Oberschwingungsströme in der Glättungsdrossel.....	30
Anhang B (informativ) Typische Stationsverluste.....	31
Anhang C (informativ) Bewertung von HGÜ-Stationsverlusten – Eine Erläuterung.....	32
Anhang D (informativ) Literaturhinweise	35
Bilder	
Bild 1 – Typische HGÜ-Geräte für einen Pol (Hilfsbetriebe nicht dargestellt).....	24
Bild 2 – Vereinfachtes Dreiphasenschaltbild eines 12-pulsigen HGÜ-Stromrichters	25
Bild 3 – Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines typischen Thyristorventils	25
Bild 4 – Kurvenverläufe von Strom und Spannung an einem Ventil im 12-pulsigen Stromrichter (Kommutierungsüberschwingen nicht dargestellt)	26
Bild 5 – Thyristor-Durchlasskennlinie	27
Bild 6 – Leitungsstrom und entsprechender Spannungsabfall	27
Bild 7 – Aufteilung der Kommutierungsimpedanz zwischen L_1 und L_2	28
Bild 8 – Thyristorstrom während der Sperrerrholzeit	28
Tabellen	
Tabelle D.1 – Bedingungen für die Berechnung von Verlusten im Fall D	34

Bestimmung der Leistungsverluste in Hochspannungsgleichstrom (HGÜ)-Stromrichterstationen mit netzgeführten Stromrichtern

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm gilt für alle netzkommutierten Hochspannungsgleichstrom-(HGÜ)-Stromrichterstationen, die für den Leistungsaustausch in Netzen von Energieversorgungsunternehmen verwendet werden. Die Norm setzt die Anwendung von 12-pulsigen Thyristorstromrichtern voraus, kann aber auch bei besonderer Beachtung von abweichenden Bedingungen für 6-pulsige Thyristorstromrichter verwendet werden.

In einigen Anwendungsfällen können Synchron- oder statische Blindleistungskompensatoren an die Wechselstromsammelschiene der HGÜ-Stromrichterstation angeschlossen sein. Die Verfahren zur Bestimmung der Verluste solcher Einrichtungen sind in dieser Norm nicht enthalten.

Diese Norm stellt eine Reihe von genormten Verfahren zur Bestimmung der Gesamtverluste von HGÜ-Stromrichterstationen vor. Typische HGÜ-Geräte sind im Bild 1 dargestellt. Die Verfahren schließen alle Teile, außer den vorstehend genannten, ein und behandeln Leerlauf- und Betriebsverluste in Verbindung mit ihren Berechnungsverfahren, die, wo immer möglich, gemessene Parameter verwenden.

Bauarten von Stromrichterstationen, die gegenüber der in dieser Norm zugrunde gelegten typischen Bauart neuartige Bauelemente oder Schaltungsanordnungen enthalten, oder mit unüblichen, die Verluste beeinflussenden Hilfsschaltungen ausgerüstete Bauarten müssen nach ihren eigenen Eigenschaften bewertet werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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 60076-1, *Power transformers – Part 1: General*

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

IEC 60633, *Terminology for high-voltage direct current (HVDC) transmission*

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

IEC 60747-6, *Semiconductor devices Part 6: Thyristors*

IEC 60871-1, *Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1 000 V – Part 1: General*

3 Begriffe und Symbole

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1 Begriffe

3.1.1

Verluste durch Hilfsbetriebe

zur Speisung von Hilfsbetrieben der Stromrichterstation erforderliche elektrische Leistung

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Verluste durch Hilfsbetriebe sind abhängig von der Anzahl verwendeter Stromrichter-einheiten und davon, ob die Station im Leerlauf betrieben oder belastet wird; im Lastfall sind die Verluste durch Hilfsbetriebe von der Höhe der Belastung abhängig.

3.1.2

Geräte-Leerlaufverluste

in einem Gerät verursachte Verluste, wobei die Stromrichterstation bei blockierten Stromrichtern zugeschaltet ist und alle Gebrauchslasten der Station und Hilfsbetriebe für die sofortige Lastaufnahme mit der kleinsten Bemessungslast angeschlossen sind

3.1.3

Betriebspunkt

dieser Begriff legt den Gleichstrom, die Gleichspannung, den Zündwinkel, die Wechselspannung und die Stellung des Stufenschalters des Stromrichtertransformators fest, bei denen die Stromrichterstation betrieben wird

3.1.4

Geräte-Betriebsverluste

von einem Gerät bei einem vorgegebenen Betriebspunkt verursachte Verluste bei eingeschalteter Stromrichterstation und mit Stromrichtern in Betrieb

3.1.5

Bemessungslast

auf den Betrieb bei Nennwerten von Gleichstrom, Gleichspannung, Wechselspannung und Zündwinkel des Stromrichters bezogene Last

Anmerkung 1 zum Begriff: Vom Wechselstromnetz muss angenommen werden, dass es die Nennfrequenz aufweist und die Spannungen der drei Phasen den Nennwert besitzen sowie symmetrisch sind. Die Stellung des Stufenschalters des Stromrichtertransformators und die Anzahl der angeschlossenen Wechselstromfilter und Blindleistungskompensations-elemente müssen mit dem Betrieb bei Bemessungslast übereinstimmen, welcher Nennbedingungen entspricht.

3.1.6

Gesamt-Leerlaufverluste der Station

Summe aller Geräte-Leerlaufverluste (3.1.2) und der entsprechenden Verluste durch Hilfsbetriebe (3.1.1)

3.1.7

Gesamt-Leerlaufverluste der Station

Summe aller Geräte-Betriebsverluste (3.1.4) und der entsprechenden Verluste durch Hilfsbetriebe (3.1.1) bei einer bestimmten Höhe der Belastung

Anmerkung 1 zum Begriff: Es ist bekannt, dass einige Käufer die „Gesamt-Leerlaufverluste der Station“ (Begriff 3.1.8) und die Gesamt-Lastverluste der Station anstelle der „Gesamt-Betriebsverluste der Station“ (Begriff 3.1.6) einzeln bewerten.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die „Betriebsverluste“ minus der „Leerlaufverluste“ dürfen als quantitativ gleichwertig zu den „Lastverlusten“ wie in der Praxis herkömmlicher Wechselstromstationen betrachtet werden.

Anmerkung 3 zum Begriff: Ein erklärendes Beispiel für die Ableitung der „Lastverluste“, der „Ersatz-Lastverluste“ und der entsprechenden „Lastbewertung“ wird in Anhang D gegeben.

3.1.8

Lasten der erforderlichen Stationshilfsbetriebe

Lasten, deren Ausfall die Leistungsübertragungsfähigkeit der HGÜ-Station beeinflusst (z. B. Ventilkühlung), sowie die Lasten, die bei einem vollständigen Ausfall der Wechselstromversorgung in Betrieb bleiben müssen (z. B. Batterieladegeräte, Antriebe)

3.2 Buchstabensymbole

α (Steuer/Zünd)-Winkel, in rad

μ Überlappungswinkel (Kommutierungswinkel), in rad

- f Frequenz des Wechselstromnetzes, in Hz
- I_d Gleichstrom, in A
- I_n Effektivwert des Oberschwingungsstromes n -ter Ordnung, in A
- L_1 auf die Ventilwicklung bezogene Induktivität, in H, zwischen der Kommutierungsspannungsquelle und dem Punkt der gemeinsamen Kopplung zwischen im Stern und Dreieck geschalteten Wicklungen. L_1 muss alle äußeren Induktivitäten zwischen den Netzwicklungsanschlüssen des Transformators und dem Anschlusspunkt des Wechselstromoberschwingungsfilters enthalten.
- L_2 auf die Ventilwicklung bezogene Induktivität, in H, zwischen dem Punkt der gemeinsamen Kopplung zwischen im Stern und Dreieck geschalteten Wicklungen und dem Ventil. L_2 muss die gesättigte Induktivität der Ventildrosseln enthalten.
- m elektromagnetischer Kommutierungseinbruch-Kopplungsfaktor, $m = L_1/(L_1 + L_2)$
- n Ordnungszahl der Oberschwingung
- N_t Anzahl der in Reihe geschalteten Thyristoren je Ventil
- P Leistungsverlust eines Betriebsmittels der Einrichtung, in W
- Q_n Qualitätsfaktor (Q-Faktor) bei der Oberschwingungszahl n
- R Widerstandswert, in Ω
- U_d Gleichspannung, in V
- U_n Effektivwert der Oberschwingungsspannung n -ter Ordnung, in V
- U_{vo} Effektivwert der ventileitigen Leerlaufspannung zwischen den Phasen des Stromrichtertransformators ohne Oberschwingungen, in V
- X_n induktiver Blindwiderstand bei der Oberschwingung n -ter Ordnung, in Ω

4 Allgemeines

4.1 Einleitung

Lieferanten müssen im Detail wissen, wie und wo Verluste entstehen, da diese die Bemessungswerte der Bauelemente und Geräte beeinflussen. Käufer sind an einer nachweisbaren Verlustgröße interessiert, die einen unvoreingenommenen Angebotsvergleich zulässt, und an einem Verfahren, mit dem nach der Lieferung die vom Lieferanten garantierten Anforderungen an das Betriebsverhalten objektiv bewertet werden können.

Als allgemeines Prinzip wäre es wünschenswert, den Wirkungsgrad einer HGÜ-Stromrichterstation durch direkte Messung ihrer Leistungsverluste zu bestimmen. Versuche, die Stationsverluste durch Subtraktion der gemessenen Ausgangsleistung von der gemessenen Eingangsleistung zu bestimmen, sollten jedoch erkennen lassen, dass solche Messungen mit einer systemimmanenten Ungenauigkeit behaftet sind, besonders wenn sie bei Hochspannung durchgeführt werden. Die Verluste einer HGÜ-Stromrichterstation sind bei voller Last im Allgemeinen kleiner als 1 % der übertragenen Leistung. Daher ergeben die Verluste, die als kleine Differenz zweier großer Werte gemessen werden, wahrscheinlich keine ausreichend genaue Aussage zu den wirklichen Verlusten.

Es kann unter besonderen Umständen möglich sein, eine zeitweilige Prüfschaltung einzurichten, bei der zwei Stromrichter aus derselben Wechselstromquelle betrieben werden und in der auch ihre Gleichstromanschlüsse miteinander verbunden sind. In dieser Schaltung ist die Leistung, die aus der Wechselspannungsquelle aufgenommen wird, gleich den Verlusten. Die Wechselspannungsquelle muss jedoch auch die Blindleistungsstützung und die Kommutierungsspannung an die beiden Stromrichter liefern. Auch hier gibt es wieder praktische Schwierigkeiten bei der Messung.

Um die vorstehend beschriebenen Probleme zu vermeiden, normt diese Norm ein Verfahren zur Berechnung der Verluste der HGÜ-Stromrichterstation durch Summierung der Verluste, die für jedes Gerät berechnet

wurden. Das genormte Berechnungsverfahren hilft dem Käufer, die vorliegenden Angebote sinnvoll zu vergleichen. Es lässt außerdem eine einfache Erstellung von Kennlinien des Betriebsverhaltens für den breiten Bereich der Betriebsbedingungen zu, in dem das Betriebsverhalten bekannt sein muss. Da ein kostengünstiges experimentelles Verfahren, das für eine objektive Bewertung der Verluste während der Typprüfungen verwendet werden kann, nicht vorliegt, ist das Berechnungsverfahren die nächstbeste Alternative, da sie, wo immer möglich, experimentelle Werte verwendet, die aus Messungen an einzelnen Einrichtungen oder Bauelementen unter Bedingungen erhalten wurden, die den im tatsächlichen Betrieb auftretenden äquivalent sind.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Leistungsverluste jedes Gerätes sowohl von den Umgebungsbedingungen abhängen, unter denen es betrieben wird, als auch von den Betriebsbedingungen oder den Lastspielen, denen es unterworfen ist. Die Umgebungs- und Betriebsbedingungen müssen daher für jedes Gerät auf der Grundlage der Umgebungs- und Betriebsbedingungen der vollständigen HGÜ-Stromrichterstation festgelegt werden.

4.2 Umgebungsbedingungen

Für die Bestimmung der Leistungsverluste in HGÜ-Stromrichterstationen muss eine Reihe von genormten Referenz-Umgebungsbedingungen verwendet werden.

4.2.1 Referenz-Normalaußentemperatur

Als Referenz-Normaltemperatur für die Bestimmung der Gesamtverluste der Stromrichterstation muss eine Trockenthermometer-Temperatur der äußeren Umgebung von 20 °C verwendet werden. Die entsprechende Temperatur der Ventilhalle darf gegebenenfalls vom Lieferanten festgelegt werden. Die äquivalente Feuchtlufttemperatur muss (soweit erforderlich) vom Käufer festgelegt werden.

ANMERKUNG Wenn nicht festgelegt, wird eine Feuchtlufttemperatur von 14 °C empfohlen, was näherungsweise einer Trockenlufttemperatur von 20 °C bei 50 % relativer Luftfeuchte entspricht.

4.2.2 Referenz-Normaltemperatur des Kühlmittels

Wo für Geräte Zwangskühlung verwendet wird, können die Durchflussgeschwindigkeit und Temperatur des Kühlmittels die Erwärmung und die damit verbundenen Verluste dieser Geräte beeinflussen. Die vom Käufer und Lieferanten vereinbarten Temperaturen und Durchflussgeschwindigkeiten des Kühlmittels müssen deshalb bei der Bestimmung der Verluste verwendet werden.

4.2.3 Referenz-Normalluftdruck

Bei der Bewertung der Gesamtverluste der Stromrichterstation muss als Referenz-Luftdruck der auf die Aufstellungshöhe der in Frage kommenden Anlage korrigierte Normalluftdruck (101,3 kPa) verwendet werden.

4.3 Betriebsparameter

Die Verluste einer HGÜ-Stromrichterstation sind von ihren Betriebsparametern abhängig.

Die Verluste von HGÜ-Stromrichterstationen werden in zwei Kategorien eingeteilt, die als Betriebsverluste (3.1.4 und 3.1.7) und Leerlaufverluste (3.1.2 und 3.1.6) bezeichnet werden.

Die Betriebsverluste und die Verluste durch Hilfsbetriebe werden vom Betriebspunkt der Station beeinflusst, weil die Anzahl bestimmter Arten von eingeschalteten Geräten (beispielsweise Oberschwingungsfilter und Kühleinrichtungen) vom Betriebspunkt abhängen können und weil sich die Verluste einzelner Geräte selbst mit dem Betriebspunkt ändern.

Verluste von HGÜ-Stromrichterstationen müssen bei (symmetrischer) Nennspannung und Nennfrequenz des Wechselstromnetzes, symmetrischen Impedanzen des Stromrichtertransformators und symmetrischen Zündwinkeln bestimmt werden. Es muss davon ausgegangen werden, dass sich der Stufenschalter des

Transformators in der Stellung befindet, die der Nennspannung des Wechselstromnetzes entspricht oder die durch die Anlagensteuerung entsprechend der Betriebsbedingung vorgegeben wird.

Die Betriebsverluste müssen für die vom Käufer festgelegten Betriebspunkte ermittelt werden oder, wenn keine solchen Bedingungen festgelegt sind, bei der Bemessungslast. Für jeden Betriebspunkt müssen die Wechselspannung der Ventilwicklung, der Gleichstrom, der Zündwinkel des Stromrichters, die Blindleistungskompensation und die zugeschalteten Oberschwingungsfilter mit dem entsprechenden Betriebspunkt und anderen festgelegten Anforderungen an das Betriebsverhalten, beispielsweise bezogen auf die Oberschwingungsverzerrungen und Blindleistung, übereinstimmen. Bezüglich Kühl- und anderen Hilfseinrichtungen muss davon ausgegangen werden, dass sie, soweit es für die Referenz-Normaltemperatur (siehe 4.2.1 und 4.2.2) erforderlich ist, zum Betrieb bei der entsprechenden Last angeschlossen sind.

In der Leerlaufbetriebsart müssen die Transformatoren zugeschaltet und die Stromrichter blockiert sein. Alle Filter und Blindleistungskompensationseinrichtungen müssen abgeschaltet sein, außer jenen, die zur Aufrechterhaltung des Betriebes im Leerlauf erforderlich sind, zum Beispiel, um die festgelegten Anforderungen an die Blindleistung zu erfüllen. Von Gebrauchslasten der Station und Hilfseinrichtungen (z. B. Kühlwasserpumpen) muss angenommen werden, dass sie entsprechend den Erfordernissen für die unverzügliche Lastaufnahme mit der festgelegten Mindestleistung der Stromrichterstation angeschlossen sind (ohne die Bewegung des Stufenschalters abzuwarten).

5 Bestimmung der Geräteverluste

5.1 Verluste der Thyristorventile

Der Mechanismus der Entstehung von Verlusten bei blockierten Ventilen (Leerlaufverluste) unterscheidet sich von denen, die für den bestimmungsgemäßen Betrieb gelten (Betriebsverluste). Betriebsverluste werden in 5.1.1 bis 5.1.10 und Leerlaufverluste in 5.1.11 behandelt. Verluste durch Hilfsbetriebe sind Gegenstand von 5.8.

Ein vereinfachtes Dreiphasenschaltbild eines 12-pulsigen HGÜ-Stromrichters ist in Bild 2 dargestellt. Die einzelnen Ventile sind in der Reihenfolge gekennzeichnet, in der sie leitend sind.

In Bild 3 ist ein vereinfachtes Ersatzschaltbild eines typischen Ventils dargestellt. Das Symbol th fasst die Wirkungen von N_f -Thyristoren zusammen, die in dem Ventil in Reihe geschaltet sind. C_{AC} und R_{AC} sind die entsprechenden zusammengefassten Werte der RC-Dämpfungsstromkreise, die für die Spannungsaufteilung und Überspannungsunterdrückung verwendet werden. R_{DC} entspricht den Gleichspannungsaufteilungswiderständen und weiteren ohmschen Anteilen, die Verluste bewirken, wenn das Ventil die Spannung blockiert. Diese Größe schließt auch die Wirkungen des Thyristorsperrstromes ein (siehe 5.1.4 und 5.1.11). C_s enthält sowohl Streukapazitäten als auch Kondensatoren zum Aufteilen von Stoßspannungen (falls verwendet). L_s stellt sättigbare Drosseln dar, die für die Begrenzung der Stromanstiegsbeanspruchung (di/dt) auf sichere Werte und die Verbesserung der Aufteilung rasch ansteigender Spannungen verwendet werden. R_s enthält die Widerstände der stromleitenden Bauteile des Ventils, wie z. B. Sammelschienen, Kontaktwiderstände, Wicklungswiderstand der sättigbaren Drosseln usw. Leistungsverluste in den Ventil-Überspannungsableitern (nicht dargestellt) müssen vernachlässigt werden.

In Bild 4 sind als Beispiel Strom- und Spannungskurvenverläufe am Ventil 1 (nach Bild 2) dargestellt, wenn es in der Gleichrichter- und Wechselrichterbetriebsart betrieben wird. Im Beispiel ist gezeigt, dass die Zündzeitpunkte der Ventile des oberen Brückenteils um 30° gegenüber den Ventilen des unteren Brückenteils verschoben sind, verursacht durch die Phasenverschiebung der beiden Sekundärwicklungen. Die Länge der Stromflusszeiten beträgt für jedes Ventil $130^\circ (2\pi/3 + \mu)$. Im Sinne dieser Norm wird der Ventilstrom während der Kommutierungen als sich linear ändernd angenommen, während in Wirklichkeit die Ventilströme dem Verlauf der Sinuswellen folgen. Diese Vereinfachung hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf die sich ergebenden Verluste, während die trapezförmige Kurvenform die Berechnungen bedeutend vereinfacht. Die durch das Ventil blockierte Spannung zeigt Kommutierungseinbrüche, die durch Kommutierungen zwischen einzelnen Ventilen hervorgerufen werden.

5.1.1 Thyristordurchlassverluste je Ventil

Diese Verlustkomponente ist das Produkt aus dem Durchlassstrom $i(t)$ und der entsprechenden idealen Durchlassspannung, wie es in den Bildern 5 und 6 dargestellt ist. Unter der Voraussetzung, dass der Brückengleichstrom gut geglättet ist, muss die Gleichung für P_{V1a} verwendet werden. Für den Fall, dass der Effektivwert der nach A.4 bestimmten Oberschwingungsströme auf der Gleichstromseite 5 % der Gleichstromkomponente überschreitet, muss stattdessen die Gleichung für P_{V1b} verwendet werden.

$$P_{V1a} = \frac{N_t \times I_d}{3} \left[U_0 + R_0 \times I_d \times \left(\frac{2\pi - \mu}{2\pi} \right) \right]$$

$$P_{V1b} = \frac{N_t \cdot I_d \times U_0}{3} + \frac{N_t \times R_0}{3} \left(I_d^2 + \sum_{n=12}^{n=48} I_n^2 \right) \left(\frac{2\pi - \mu}{2\pi} \right)$$

Dabei ist

U_0 die stromunabhängige Komponente der Durchlassspannung des durchschnittlichen Thyristors (siehe Anmerkung), in V;

R_0 der Anstieg der Durchlasskennlinie des durchschnittlichen Thyristors (siehe Anmerkung), in Ω ;

I_n der berechnete Effektivwert des Oberschwingungsstromes n -ter Ordnung im Gleichstrombrückenanschluss nach A.4, in A.

ANMERKUNG U_0 und R_0 (siehe Bild 5) werden aus der Messung der Durchlassspannung im voll durchgeschalteten Zustand bei geeignetem Strom und entsprechender Sperrschichttemperatur bestimmt. Der Mittelwert von U_0 und R_0 wird aus den Herstellungsaufzeichnungen der Thyristoren ermittelt. Die Temperaturabhängigkeit von U_0 und R_0 wird mit Typ- oder Stückprüfungen an einer statistisch signifikanten Anzahl von entsprechenden Thyristoren bestimmt und, wo erforderlich, verwendet, um U_0 und R_0 auf die entsprechende Betriebssperrschichttemperatur zu korrigieren. Falls eine Parallelschaltung von p Thyristoren vorgesehen ist, ist der angemessene 100-%-Wert des Stromes der Brücken-nengleichstrom dividiert durch p . Das berechnete Ergebnis wird dann mit p multipliziert.

5.1.2 Thyristorstromausbreitungsverluste je Ventil

Diese Verlustkomponente enthält zusätzliche Durchlassverluste der Thyristoren, die durch die Verzögerung bis zur Erreichung der vollen Stromleitung im Silizium nach dem Einschalten des Thyristors entstehen. Die zusätzlichen Verluste sind das Produkt aus dem Strom und derjenigen Spannung, um die die Thyristorspannung den Durchlassspannungsfall des idealen Thyristors überschreitet (siehe schraffierte Fläche in Bild 6).

$$P_{V2} = N_t \times f \times \int_0^{t_1} [u_B(t) - u_A(t)] \times i(t) dt$$

Dabei ist

t_1 die Dauer des Stromführungsintervalls, in s, die gegeben ist durch:

$$t_1 = \frac{\frac{2}{3}\pi + \mu}{2\pi f};$$

$u_B(t)$ der Momentanwert der Durchlassspannung, in V, eines Thyristors, dessen Durchlassspannung im voll durchgeschalteten Zustand für die verwendeten Thyristoren typisch ist. Der Momentanwert der Durchlassspannung muss für die zutreffende Sperrschichttemperatur bestimmt und mit einem trapezförmigen Stromimpuls gemessen werden, der die richtige Amplitude und Kommutierungsüberlappungszeiten aufweist (siehe Bilder 5 und 6);

$u_A(t)$ der berechnete Momentanwert der Durchlassspannung des durchschnittlichen Thyristors bei derselben Sperrschichttemperatur für denselben Stromimpuls, aber mit während der Stromleitung vollständig durchgeschalteter Leitungsfläche, ermittelt aus der nur durch U_0 und R_0 dargestellten Durchlasskennlinie (siehe Bild 6);

$i(t)$ der Momentanwert des Stromes im Thyristor, in A.

ANMERKUNG Die Momentanwerte der Durchlassspannung, einschließlich der Auswirkung der Stromausbreitung, können üblicherweise nicht den Herstellungsaufzeichnungen entnommen werden. Messungen der typischen Thyristordurchlassspannung, einschließlich der Stromausbreitung, sollten daher während der Typprüfungen des periodischen Zünd- und Löschverhaltens (siehe IEC 60700-1) oder alternativ mit einer getrennten Prüfung an einer statistisch signifikanten Anzahl von Thyristoren im Prüflaboratorium ermittelt werden.

5.1.3 Weitere Stromleitungsverluste je Ventil

Hierunter sind Stromleitungsverluste im Hauptstromkreis des Ventils zu verstehen, die von anderen Bauelementen als den Thyristoren verursacht werden.

$$P_{V3} = \frac{R_s \cdot I_d^2}{3} \left(\frac{2\pi - \mu}{2\pi} \right)$$

Dabei ist

R_s der Gleichstromwiderstand des Ventilstromkreises zwischen den Anschlussklemmen, ausschließlich der Thyristoren, in Ω (siehe Bild 3).

Der Wert von R_s wird durch direkte Messung eines repräsentativen Ventilabschnitts bestimmt, der alle Elemente des Hauptstromkreises eines Ventils im richtigen Verhältnis enthält, in dem aber die Thyristoren durch Kupferblöcke mit den entsprechenden Maßen und mit Kontakten, die in der gleichen Art wie bei den wirklichen Thyristoren bearbeitet sind, ersetzt wurden. Alternativ darf der Widerstand berechnet werden, wobei die Berechnungsverfahren dokumentiert werden müssen.

5.1.4 Gleichspannungsabhängige Verluste je Ventil

Diese Verlustkomponente enthält die Verluste im Parallelwiderstand R_{DC} des Ventils (siehe Bild 3), die durch die während der Sperrzeit zwischen den Ventilanschlüssen anliegende Spannung entstehen (siehe Bild 4). Sie enthält Verluste durch Thyristorsperrströme in Blockier- und Sperrrichtung, Verluste in Gleichspannungsaufteilungswiderständen, in anderen ohmschen Stromkreisen und Elementen, die dem Thyristor parallel geschaltet sind, dem Widerstand des Kühlmittels in den Kühlmittelrohren, Ersatzwiderständen des Aufbaus, der Lichtwellenleiter usw.

$$P_{V4} = \frac{U_{v0}^2}{2\pi R_{DC}} \left\{ \frac{4}{3} \pi + \frac{\sqrt{3}}{4} [\cos(2\alpha) + \cos(2\alpha + 2\mu)] + \frac{6m^2 - 12m - 7}{8} [\sin(2\alpha) - \sin(2\alpha + 2\mu) + 2\mu] \right\}$$

Dabei ist

R_{DC} der wirksame Gleichstromwiderstand, in Ω , eines vollständigen Ventils im gesperrten Zustand, der durch Messung des Stromes ermittelt wird, der während der Typprüfung mit Gleichspannung zwischen den Anschlüssen des Ventils fließt (siehe IEC 60700), in Ω . Falls keine Typprüfung an dem Thyristorventil durchgeführt wird, muss R_{DC} durch Bezug auf eine vorhergehende Typprüfung bestimmt werden (siehe auch Anmerkung 2);

$m = L_1 / (L_1 + L_2)$;

L_1 die auf die Ventilwicklung bezogene Induktivität, in H, zwischen der Kommutierungsspannungsquelle und dem Punkt der gemeinsamen Kopplung zwischen im Stern und Dreieck geschalteten Wicklungen. L_1 muss alle äußeren Induktivitäten zwischen den Netzwicklungsanschlüssen des Transformators und dem Anschlusspunkt der Wechselstromoberschwingungfilter enthalten (siehe Bild 7);

L_2 die auf die Ventilwicklung bezogene Induktivität, in H, zwischen dem Punkt der gemeinsamen Kopplung zwischen im Stern und Dreieck geschalteten Wicklungen und dem Ventil. L_2 muss die gesättigte Induktivität der Ventildrosseln enthalten (siehe Bild 7).

Der Wert von L_2 muss für beide Sekundärwicklungen gleich sein ($L_{2d} = L_{2y}$) (siehe Anmerkungen 3 und 4).

ANMERKUNG 1 Die Gleichung für P_{V4} gilt nur für $\mu < \pi/6$ (30°).

ANMERKUNG 2 Da der ohmsche Thyristorsperrstrom bei Betriebstemperaturen gewöhnlich viel höher ist als bei der vorhandenen Umgebungstemperatur, ist es erforderlich, entweder die Thyristoren des Ventils vor der Durchführung der Messung von R_{DC} auf die richtige Betriebstemperatur zu erwärmen oder später die gemessenen Werte unter Anwendung der getrennt ermittelten durchschnittlichen Thyristorwerte zu korrigieren, um die genannte Temperaturwirkung einzuschließen (siehe auch 5.1.10). Dasselbe trifft auch für flüssige Kühlmittel zu.

ANMERKUNG 3 Der Wert m quantifiziert die Wirkung der induktiven Kopplung der beiden Sekundärwicklungen des Stromrichtertransformators. Er bestimmt die Höhe der Kommutierungseinbrüche, die durch die Kommutierung in der anderen Brücke hervorgerufen werden (Einbrüche 1' bis 3' und 4' bis 6' in Bild 4). Wenn $m = 0$ ist, gibt es keine Kopplung zwischen den beiden Brücken und die Kommutierungseinbrüche 1' bis 3' und 4' bis 6' verschwinden alle. Die Kommutierungseinbrüche in Bild 4 entsprechen $m = 0,2$.

ANMERKUNG 4 Die Werte L_1 und L_2 werden aus den Messungen der Kurzschlussimpedanz an den Stromrichtertransformatoren und durch Hinzufügen aller erforderlicher äußerer Induktivitäten ermittelt. Der Wert von L_1 enthält alle äußeren gemeinsamen Induktivitäten (wie z. B. Informationsträgerfilter auf Starkstromleitungen) zwischen dem gemeinsamen Kopplungspunkt und der Kommutierungsspannungsquelle. Falls keine Wechselstromoberschwingungsfilter angeschlossen sind, enthält L_1 auch die Impedanz des Wechselstromnetzes. Wenn die Stern- und Dreieckbrücken aus getrennten Transformatoren gespeist werden und keine zusätzliche netzseitige Induktivität vorhanden ist, wird $L_1 = 0$, damit auch $m = 0$. Wenn eine Transformatorbauform mit drei Wicklungen verwendet wird, ergeben eine gemeinsame Wicklungsimpedanz und gegenseitige Kopplungseffekte der beiden Sekundärwicklungen von null verschiedene Werte für L_1 , die entweder positiv oder negativ sein können. Bei komplizierteren Transformatoranordnungen, wie z. B. an eine Tertiärwicklung angeschlossene Filter, müssen die Werte von L_1 und L_2 sorgfältig bestimmt werden.

5.1.5 Dämpfungsverluste je Ventil (widerstandsabhängiger Anteil)

Diese Verlustkomponente ist abhängig vom Wert der ohmschen Elemente der Stromkreise, die über reihengeschaltete Kondensatoren wechselstrommäßig angekoppelt sind, und von der Spannung, die zwischen den Ventilanschlüssen während der Sperrphase ansteht.

$$R_{V5} = 2\pi f^2 U_{V0}^2 C_{AC}^2 R_{AC} \left\{ \begin{aligned} & \frac{4\pi}{3} - \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{3\sqrt{3}m^2}{8} + (6m^2 - 12m - 7) \frac{\mu}{4} + \left(\frac{7}{8} + \frac{9m}{4} - \right) \sin 2\alpha + \\ & \left(\frac{7}{8} + \frac{3m}{4} + \frac{3m^2}{32} \right) \sin(2\alpha + 2\mu) - \left(\frac{\sqrt{3}m}{16} + \frac{3\sqrt{3}m^2}{8} \right) \cos 2\alpha + \frac{\sqrt{3}m}{16} \cos(2\alpha + 2\mu) \end{aligned} \right\}$$

Dabei ist

C_{AC} der Wert der wirksamen Dämpfungskapazität zwischen den Anschlüssen des Ventils, in F (siehe Bild 3);

R_{AC} der Wert des wirksamen in Reihe geschalteten zugehörigen Dämpfungswiderstandes zwischen den Anschlüssen, in Ω (siehe Bild 3);

C_{AC} muss der Auslegungswert der Dämpfungskapazität je Thyristorplatz sein, dividiert durch die Anzahl der Thyristorplätze in einem Ventil;

R_{AC} muss der Auslegungswert des Dämpfungswiderstandes je Thyristorplatz sein, multipliziert mit der Anzahl der Thyristorplätze in einem Ventil.

Falls das Ventil mehr als ein Dämpfungs- oder Spannungsaufteilungsnetzwerk enthält, das in Reihe geschaltete RC-Zweige beinhaltet, muss jeder Zweig getrennt bewertet werden, und die Ergebnisse müssen addiert werden.

Falls aus dem RC-Aufteilungsnetzwerk Energie für die Speisung der Thyristorzünd- und/oder -überwachungsstromkreise entnommen wird, muss entweder nachgewiesen werden, dass zusätzliche Verluste vernachlässigbar sind, oder die zusätzlichen Verluste müssen getrennt berechnet und zu dem Wert addiert werden, der nach der Gleichung für P_{V5} ermittelt wurde.

ANMERKUNG Die Anmerkungen 1, 3 und 4 von 5.1.4 gelten auch für P_{V5} .

5.1.6 Dämpfungsverluste je Ventil (Anteil durch Änderung der Kondensatorenergie)

Diese Verlustkomponente entsteht durch die Änderung der gespeicherten Energie in den Ventilkapazitäten infolge sprungförmiger Änderungen (ΔU) der Ventilsperrespannung. Jede sprungförmige Änderung hat einen Energieverlust von $\frac{1}{2} C \times \Delta U^2$ zur Folge. Die folgende Gleichung ist abgeleitet aus der Summe der Energieverluste der zwölf Spannungssprünge, die während einer Periode der Sperrspannung auftreten (Bild 4), multipliziert mit der Netzfrequenz.

$$P_{V6} = \frac{U_{V0}^2 \times f \times C_{HF} \times (7 + 6m^2)}{4} \left[\sin^2(\alpha) + \sin^2(\alpha + \mu) \right]$$

Dabei ist

C_{HF} die Summe der zwischen den Anschlüssen wirksamen Kapazität aus allen kapazitiven Zweigen des Dämpfungsnetzwerks innerhalb des Ventils (unabhängig vom Vorhandensein von Serienwiderständen) plus die wirksame Gesamtstreukapazität zwischen den Ventilanschlüssen, die durch außen angeschlossene Einrichtungen und durch die Nähe des Ventils zum Erdpotential und/oder benachbarten Objekten entsteht (siehe Anmerkung 3). $C_{HF} = C_{AC} + C_S$ (siehe Bild 3).

ANMERKUNG 1 Die Anmerkungen 1, 3 und 4 von 5.1.4 gelten auch für P_{V6} .

ANMERKUNG 2 Die Gleichung für P_{V6} ergibt übermäßig pessimistische Ergebnisse für Kommutierungsüberlappungen, die kürzer als 3 Zeitkonstanten des RC-Dämpfungsnetzwerks sind.

ANMERKUNG 3 Die äußere Streukapazität entsteht überwiegend aus der Wicklung und den Durchführungen des Stromrichtertransformators (plus, falls vorhanden, separaten Wanddurchführungen), die alle bei der Herstellung gemessen werden können. Abhängig von der Ausführung kann es nötig sein, auch eine Streukapazität zwischen dem Ventil und Erde einzuschließen. Überspannungsableiter, Sammelschienen und Ventilgerüste tragen zur Streukapazität bei, wobei diese Anteile aber klein sind und vernachlässigt werden dürfen. Da die wirksame Streukapazität für jedes Ventilpotential unterschiedlich ist, wird für die Verlustberechnung der Mittelwert verwendet.

5.1.7 Abschaltverluste je Ventil

Dies sind zusätzliche Verluste aufgrund des Fließens von Rückwärtsstrom in den Thyristoren beim Abschalten (siehe Bild 8).

$$P_{V7} = Q_{rr} \times f \times \sqrt{2} \times U_{V0} \times \sin(\alpha + \mu + 2\pi \times f \times t_0)$$

Dabei ist

Q_{rr} der Mittelwert der im Thyristor gespeicherten Ladung, in C;

t_0 die nach folgender Beziehung ermittelte Zeit:

$$t_0 = \sqrt{\frac{Q_{rr}}{(di/dt)_{i=0}}}$$

Dabei ist

$(di/dt)_i=0$ die beim Strom null gemessene zeitliche Veränderung des Kommutierungsstromes di/dt , in A/s.

ANMERKUNG 1 Der verwendete Wert von Q_{rr} ist das vollständige Integral des Rückwärtsstromes (siehe Bild 8) und nicht eine Dreiecksannäherung, wie sie in IEC 60747-6 vorgeschlagen wird. Q_{rr} wird aus Fertigungsmessungen an einer statistisch signifikanten Anzahl von Thyristoren bestimmt oder alternativ als Mittelwert von Q_{rr} , der zu verwenden ist, wenn die Thyristoren aus einem vordefinierten Q_{rr} -Bereich ausgewählt werden, und, falls erforderlich, wird der Wert auf die Sperrschichttemperatur, $(di/dt)_i=0$ und Sperrerholspannung korrigiert, die den Betriebsbedingungen entsprechen, für die die Verluste bestimmt werden müssen. Es ist wichtig, dass die Amplitude und die Dauer des Leitungsstromes groß genug sind, dass die Thyristorsperrschicht vollständig stromführend ist.

ANMERKUNG 2 Der größte Teil der Thyristor-Abschaltverluste, der sich bei diesem Vorgang ergibt, wird innerhalb des Thyristors selbst abgeführt, auch wenn ein Teil dieser Verluste in weiteren Bauteilen, wie dem Dämpfungswiderstand und der Ventildrossel, abgeführt werden können.

5.1.8 Drosselverluste je Ventil

Drosselverluste bestehen aus drei Komponenten: ohmscher Verlust in der Wicklung plus Wirbelstrom- und Hystereseverluste im Magnetkern. Falls ein zusätzlicher Dämpfungsstromkreis über der Wicklung verwendet wird, verursacht er ebenfalls Verluste.

Die Wicklungsverluste der Drossel und die Wirbelstromverluste des Drosselkerns (und/oder die Verluste des Drosseldämpfungswiderstandes) sind bereits in den Gleichungen für P_{V3} und P_{V6} berücksichtigt.

Die Hystereseverluste müssen folgendermaßen berechnet werden. Für die Erregungsschleife, der eine HGÜ-Ventildrossel üblicherweise ausgesetzt ist, muss eine Gleichstrommagnetisierungskurve des (der) Kernwerkstoffe(s) bestimmt werden. Diese Kurve muss mit einer Magnetisierungskraft ermittelt werden, die von mindestens dem 1,5fachen Spitzenwert des Sperrstromes I_{rr} beim Abschalten (siehe Bild 8) in einer Polarität bis weit in den Sättigungsbereich in der anderen Polarität und wieder zurück verursacht wird. Aus der von dieser Schleife umschlossenen Fläche muss ein charakteristischer Hystereseverlust in J/kg bestimmt und auf die Ausführung der in Frage kommenden Drossel angewendet werden, d. h.

$$P_{V8} = n_L \times M \times k \times f$$

Dabei ist

n_L die Anzahl der Drosselkerne in einem Ventil;

M die Masse jedes Kerns, in kg;

k der charakteristische Verlust, in J/kg.

ANMERKUNG Falls der Sättigungsstrompegel der Drossel groß ist im Vergleich zum Bemessungsstrom der Brücke und die normale Änderung des Kommutierungsstromes di/dt ebenfalls groß ist (entspricht kleinen Überlappungswinkeln bei Bemessungsbedingungen), dann werden während der Kommutierungszeiten zusätzliche Wirbelstromverluste im Drosselkern erzeugt. Wenn das der Fall ist, sollte nachgewiesen werden, dass diese zusätzlichen Verluste entweder vernachlässigbar sind oder ansonsten innerhalb der Toleranz der Aussage zu den Verlusten liegen.

5.1.9 Gesamtverluste des Ventils

Die Gesamt-Betriebsverluste je Ventil entsprechen der Summe der acht vorstehend festgelegten einzelnen Anteile.

$$P_{VT} = \sum_{i=1}^{i=8} P_{Vi}$$

Die Gesamt-Betriebsverluste des Stromrichters sind gleich den Verlusten je Ventil multipliziert mit der Anzahl der Ventile im Stromrichter.

5.1.10 Temperatureinflüsse

Alle Ventilbauteile haben temperaturabhängige elektrische Kennwerte. Erfahrungsgemäß ist jedoch das einzige Bauelement mit temperaturabhängigen Kennwerten, das die Ventilverluste erheblich beeinflussen kann, der Thyristor selbst.

Die Thyristorsperrschichttemperatur T_j wird bestimmt aus

$$T_j = T_C + P_j \times R_{\theta JC}$$

Dabei ist

T_C die Temperatur des Kühlmittels, berechnet als Mittelwert aus der Ventileinlass- und -auslasstemperatur;

P_j die Gesamtverlustleistung je Thyristor, berechnet als Summe der Einzelanteile bei Stromleitung, Stromausbreitung, Blockierung und Abschaltung;

$R_{\theta JC}$ der Wärmewiderstand zwischen der Thyristorsperrschicht und dem Kühlmittel.

5.1.11 Leerlaufverluste je Ventil

Die Leerlaufverluste je Ventil entsprechen der Summe der Verluste, welche von den Strömen verursacht werden, die aufgrund der am blockierten Ventil anliegenden Spannung durch die Widerstände des Ventils fließen. Sie bestehen aus zwei Anteilen. Der erste erfasst die Verluste in den parallel zu den blockierten Thyristoren geschalteten Widerständen und der zweite bestimmt die Verluste in den Widerständen, die kapazitiv gekoppelt sind. In der Leerlaufbetriebsart blockiert das Ventil den sinusförmigen Kurvenverlauf der Phasenspannung. Folglich ist:

$$P_{VSB} = \frac{U_{V0}^2}{3} \left(\frac{1}{R_{DC}} + \frac{R_{AC}}{Z_{AC}^2} \right)$$

Dabei ist

$$Z_{AC} = \sqrt{R_{AC}^2 + \left(\frac{1}{2\pi \times f \times C_{AC}} \right)^2}$$

Falls das Ventil eine Beschaltung mit mehr als einem Zweig enthält, der aus der Reihenschaltung von Widerständen und Kondensatoren besteht, muss jeder Zweig getrennt berechnet werden, und die Ergebnisse müssen addiert werden.

Falls aus dem RC-Aufteilungsnetzwerk Energie für die Speisung der Thyristorzünd- und/oder -überwachungsstromkreise entnommen wird, muss entweder nachgewiesen werden, dass zusätzliche Verluste vernachlässigbar sind, oder die zusätzlichen Verluste müssen getrennt berechnet und zu dem Wert addiert werden, der nach der Gleichung für P_{VSB} ermittelt wurde.

Die Gesamt-Leerlaufverluste des Stromrichters sind die Leerlaufverluste je Ventil multipliziert mit der Anzahl der Ventile je Stromrichter.

5.2 Verluste des Stromrichtertransformators

5.2.1 Allgemeines

Der durch die Wicklungen des Stromrichtertransformators fließende Strom enthält Oberschwingungen, deren Amplituden von den Betriebsparametern der Stromrichterstation abhängen. Die stromabhängigen Lastverluste im Transformator durch diese nichtsinusförmigen Kurvenverläufe des Stromes sind größer als die, die bei sinusförmigem Strom mit gleichem Effektivwert bei Grundschwingungsfrequenz auftreten würden.

5.2.2 Leerlaufverluste

In der Leerlaufbetriebsart, d. h. bei zugeschaltetem Transformator und blockierten Ventilen, sind die Transformatorverluste die Leerlaufverluste. Die Leerlaufverluste (Kernverluste) müssen nach IEC 60076-1 bestimmt werden.

Die Stellung des Transformator-Stufenschalters muss der Festlegung in 4.3 entsprechen.

5.2.3 Betriebsverluste

Unter Last müssen die Betriebsverluste des Transformators als Summe der Magnetisierungsverluste (Kernverluste) und der stromabhängigen Verluste (Lastverluste) bestimmt werden.

Unter Lastbedingungen wird der Transformator Oberschwingungsspannungen ausgesetzt. Die Kernverluste unter Last müssen gleich den Leerlaufverlusten bei derjenigen Stellung des Stufenschalters angesetzt werden, die dem betrachteten Betriebspunkt bei Anliegen der Nennwechselspannung des Netzes entspricht. Die Wirkung der Oberschwingungsspannungen auf den Magnetisierungsstrom des Transformators, bezogen auf die Wirkung der Grundschriftungskomponente der Spannung, ist vernachlässigbar.

Die Lastverluste des Transformators müssen sowohl die Stromkomponenten der Grundschriftungsfrequenz als auch der Oberschwingungen berücksichtigen und nach folgendem Verfahren bestimmt werden:

- Messung der Lastverluste P_1 bei der Grundfrequenz f_1 (50 Hz oder 60 Hz) nach IEC 60076-1;
- Berechnung von $P_{WE1} + P_{SE1} = P_1 - P_R$;
- Messung der Lastverluste P_m bei einer höheren Frequenz f_m , die gleich oder größer als 150 Hz ist.

ANMERKUNG Es steht üblicherweise eine Spannungsquelle zur Verfügung, die für Prüfungen mit induzierter Spannung verwendet wird. Für Ströme bis herunter zu 10 % bis 20 % des Bemessungsstromes wird eine annehmbare Genauigkeit erreicht, wenn die Streuflussverteilung zwischen metallischen Teilen bei der Transformatorauslegung berücksichtigt wurde. Falls ein verringerter Strom verwendet wird und der Strom weniger als 10 % beträgt, muss P_m auf den Bemessungsstrom umgerechnet werden.

- Berechnung von P_{WE1} und P_{SE1} auf der Grundlage der Messungen bei der Grundschriftungsfrequenz und der höheren Frequenz mit

$$P_1 = P_R + P_{WE1} + P_{SE1}$$

$$P_m = P_R + P_{WE1} \times (f_m/f_1)^2 + P_{SE1} \times (f_m/f_1)^{0,8};$$

- Die Gesamtverluste bei Betriebslast müssen für jede Ventilwicklung wie folgt berechnet werden:

$$P = P_R + P_{WE1} \cdot \sum_{n=1}^{n=49} \left(\frac{I_n}{I_N} \right)^2 \times \left(\frac{f_n}{f_1} \right)^2 + P_{SE1} \times \sum_{n=1}^{n=49} \left(\frac{I_n}{I_N} \right)^2 \times \left(\frac{f_n}{f_1} \right)^{0,8}$$

Dabei ist

- P_1 der Repräsentant der Gesamt-Lastverluste bei der Grundschriftungsfrequenz (50 Hz oder 60 Hz);
- I_N der Bemessungsstrom;
- I_n der Effektivwert des Stromes der Oberschwingung n -ter Ordnung;
- P_R der Repräsentant der ohmschen Verluste bei Bemessungsstrom;
- P_{SE1} der Repräsentant der Streuverluste im Aufbau (außer Wicklungen) bei der Grundschriftungsfrequenz;
- P_{WE1} der Repräsentant der Wirbelstromverluste in Wicklungen bei der Grundschriftungsfrequenz;
- P_m der Repräsentant der Gesamt-Lastverluste bei der Frequenz m ;
- n die Ordnungszahl der Oberschwingung.

- f) Berechnung der Betriebsverluste als Summe der Leerlaufverluste (siehe 5.2.2) und der vorstehend festgelegten Gesamt-Betriebslastverluste.

ANMERKUNG 1 Die Gleichung für die Gesamt-Betriebslastverluste gilt für alle Oberschwingungsordnungen. Verglichen mit den charakteristischen Oberschwingungen, sind die nichtcharakteristischen Oberschwingungen klein und sollten bei der Bestimmung der Verluste vernachlässigt werden.

ANMERKUNG 2 Das oben genannte Verfahren gilt mit dem in A.1 festgelegten Oberschwingungsstromspektrum für Zweiwicklungstransformatoren oder für Transformatoren mit drei Wicklungen, deren Aufbau so ist, dass die Kopplung zwischen Ventilwicklungen vernachlässigbar ist (z. B. wo die Netzwicklung in zwei Hälften aufgeteilt ist, von denen je eine in der Nähe einer Ventilwicklung liegt). Für andere Transformatoranordnungen darf bei entsprechender Sorgfalt ein ähnliches Verfahren verwendet werden, wobei jedoch das Oberschwingungsstromspektrum in der Netzwicklung von dem in A.1 angegebenen abweichen kann.

ANMERKUNG 3 Die Messwerte für P_R , P_{SE1} und P_{WE1} werden auf die in IEC 60076-1 angegebene Referenztemperatur bezogen. Die Werte sollten auf die Betriebstemperatur des Transformators korrigiert werden.

5.2.4 Leistungsverluste durch Hilfsbetriebe

Die Leistungsverluste durch Hilfsbetriebe des Stromrichtertransformators müssen im Energieverbrauch der Hilfsbetriebe der gesamten Stromrichterstation enthalten sein (siehe 5.8). Sie müssen während der Werkprüfung getrennt gemessen werden.

5.3 Verluste in Wechselstromfiltern

5.3.1 Allgemeines

Wechselstromfilter in einer HGÜ-Stromrichterstation bilden einen niederimpedanten Nebenschluss für die vom Stromrichter erzeugten Oberschwingungsströme. Die Wechselstromfilter dürfen aktive Filter, passive Filter oder eine Kombination davon enthalten.

Die nachfolgend beschriebenen Verfahren gehen von der Annahme aus, dass die Wechselstromfilter direkt an die Sammelschiene des Wechselstromnetzes auf der Netzseite des Stromrichtertransformators angeschlossen sind. Wo dies nicht der Fall ist, wie z. B. bei Filtern, die mit einer Tertiärwicklung eines Stromrichtertransformators verbunden sind, gilt das Verfahren auch, aber die Oberschwingungsströme in den Filtern müssen, wie es für den Wechselstromfilter-Anschlusspunkt erforderlich ist, umgerechnet werden.

Der Stromrichter muss für die Verlustbestimmung als Oberschwingungsgenerator und das Wechselstromnetz als abgetrennt angesehen werden, so dass angenommen werden kann, dass alle Oberschwingungsströme des HGÜ-Stromrichters in die Wechselstromfilter fließen.

Der Oberschwingungsstromfluss in jedem Filterzweig muss aus dem Gesamtoberschwingungsstrom des Stromrichters berechnet und als Grundlage für die Bestimmung der Verluste in jedem Filterbauelement verwendet werden. Bei Verwendung von aktiven Filtern müssen die durch diese verursachten Verluste einbezogen und das Berechnungsverfahren vom Lieferanten dokumentiert werden.

Wenn der Stromrichter belastet wird, müssen die Wechselstromfilterverluste auf der Grundlage der charakteristischen Oberschwingungsströme des Stromrichters bestimmt werden; diese müssen für jeden Betriebspunkt und mit den entsprechenden Betriebsparametern (siehe 4.3) berechnet werden. Für die Berechnung der Oberschwingungsströme des Stromrichters muss die in A.2 angegebene Gleichung verwendet werden.

In der Leerlaufbetriebsart sind Wechselstromfilter üblicherweise nicht mit dem Wechselstromnetz verbunden und erzeugen daher auch keine Verluste. Für den Fall, dass die Wechselstromfilter während des Leerlaufs des Stromrichters zugeschaltet sind, dürfen nur die Verluste bei der Grundschiebungsfrequenz berücksichtigt werden.

Für die Berechnung muss angenommen werden, dass das Wechselstromnetz bei Nennfrequenz arbeitet und die Filterkomponenten ihre Nennwerte aufweisen.

5.3.2 Kondensatorverluste in Wechselstromfiltern

Die Verluste in den Filterkondensatoren bei Grundswingungsfrequenz müssen nach IEC 60871-1 bestimmt werden. Die Dreiphasen-Bemessungsblindleistung der Kondensatorbatterie (Mvar) muss aus dem Kapazitätswert und der Spannung über der Kondensatorbatterie bei der Grundswingungsfrequenz bestimmt werden. Die Verluste durch Oberschwingungsströme sind sehr klein und müssen vernachlässigt werden.

Verluste in Niederspannungskondensatoren (für Filter mit 2 oder mehr Abstimmfrequenzen) sind sehr klein und können vernachlässigt werden.

5.3.3 Drosselverluste in Wechselstromfiltern

Es müssen die Grund- und Oberschwingungsströme in den Filterdrosseln berücksichtigt werden. Die Impedanz der Drossel bei der Grundswingungsfrequenz und die Q-Faktoren bei den Grund- und Oberschwingungsfrequenzen müssen im Werk gemessen und auf die Betriebstemperatur der Wicklung korrigiert werden. Die Drosselverluste müssen dann nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$P = \sum_{n=1}^{n=49} \frac{I_n^2 \cdot X_n}{Q_n}$$

Dabei ist

n die Ordnungszahl der Oberschwingung;

I_n der berechnete Effektivwert des Stromes durch die Drossel bei der Oberschwingung n -ter Ordnung, in A;

X_n der Blindwiderstand der Drossel bei der Oberschwingung n -ter Ordnung, $X_n = n \times 2\pi f \times L$, in Ω ;

L die Induktivität der Drossel, in H;

f die Grundswingungsfrequenz des Wechselstromnetzes;

Q_n bei der n -ten Oberschwingung gemessener durchschnittlicher Q-Faktor für alle Drosseln desselben Betriebsmittels.

5.3.4 Widerstandsverluste in Wechselstromfiltern

Die Verluste in den Filterwiderständen müssen gemeinsam für die Grund- und Oberschwingungsströme bestimmt werden. Der Wert des Widerstandes muss durch Werksmessungen ermittelt und auf die Betriebstemperatur des Widerstands korrigiert werden. Der Strom durch den Filterwiderstand muss bei jeder Oberschwingung berechnet werden. Die Verluste in jedem Widerstand erhält man durch folgende Gleichung:

$$P = R \times \sum_{n=1}^{n=49} I_n^2$$

Dabei ist

R der Widerstandswert, in Ω ;

I_n der Effektivwert des Stromes durch den Widerstand bei der Oberschwingung n -ter Ordnung, in A.

5.3.5 Gesamtverluste durch Wechselstromfilter

Die Gesamtverluste der Wechselstromfilter müssen durch Addition der Verluste aller Kondensatoren, Drosseln und Widerstände derjenigen Filter bestimmt werden, die bei dem jeweiligen Betriebspunkt des Stromrichters zugeschaltet sind.

5.4 Verluste durch Kompensationskondensatorbatterien

Kompensationskondensatoren werden manchmal zusätzlich zu Oberschwingungsfiltern verwendet, um eine Blindleistungsstützung des Wechselstromnetzes herbeizuführen. Die Leistungsverluste in Kompensationskondensatorbatterien müssen für jene Betriebspunkte der Stromrichterstation bestimmt werden, bei denen solche Batterien mit den Wechselstromsammelschienen verbunden sind.

Die Grundschwingungsverluste in der Kompensationskondensatorbatterie müssen nach IEC 60871-1 bestimmt werden. Die Dreiphasen-Bemessungsblindleistung der Kondensatorbatterie (Mvar) muss aus dem Kapazitätswert und der Spannung über der Kondensatorbatterie bei der Grundschwingungsfrequenz bestimmt werden. Die Verluste durch Oberschwingungsströme sind sehr klein und müssen vernachlässigt werden.

5.5 Verluste durch Kompensationsdrosseln

Kompensationsdrosseln dürfen mit der Wechselstromsammelschiene einer HGÜ-Stromrichterstation verbunden sein, um kapazitive Ströme von Wechselstromoberschwingungsfiltern, besonders bei geringer Last, zu kompensieren. Ihre Aufgabe weicht nicht von konventionellen Anwendungen im Wechselstromübertragungsnetz ab. Verluste durch Kompensationsdrosseln in HGÜ-Stromrichterstationen müssen daher während der Werksprüfung nach IEC 60076-6 gemessen und auf die für die Normalumgebungsbedingungen berechnete höchste Wicklungstemperatur, mit Ausnahme von Hot Spots, korrigiert werden (siehe 4.3). Für Öl-Drosseln muss die Normal-Wicklungstemperatur von 75 °C verwendet werden.

Verluste durch Kompensationsdrosseln müssen für diejenigen Betriebspunkte in die Gesamtverluste der Stromrichterstation einbezogen werden, bei denen die Kompensationsdrosseln mit der Wechselstromsammelschiene verbunden werden sollen.

Falls Zwangskühlung verwendet wird, muss die Leistungsaufnahme der Kühleinrichtung in die Leistungsaufnahme der Hilfsbetriebe der gesamten Stromrichterstation einbezogen werden (siehe 5.8).

5.6 Verluste der Gleichstromglättungsdrossel

Der Strom durch die Glättungsdrossel ist ein Gleichstrom mit überlagerten Oberschwingungen.

Bei Leerlaufbedingungen ist der Strom in der Glättungsdrossel gleich null. Verluste treten daher nicht auf.

Die Gleichstromkomponente der Verluste der Glättungsdrossel muss mit Werksprüfungen nach IEC 60076-1 und IEC 60076-6 ermittelt werden.

Die von Oberschwingungsströmen verursachten Wicklungsverluste müssen durch Berechnung bestimmt werden. Die Berechnung muss die für den jeweiligen Betriebspunkt und den entsprechenden Oberschwingungswiderstand geltenden Amplituden der Oberschwingungsströme verwenden. Die Oberschwingungsströme müssen nach A.4 berechnet werden. Der Oberschwingungswiderstand muss gemessen werden.

Wenn eine geschlossene Bauweise mit Eisenkern verwendet wird, müssen die Magnetisierungsverluste berechnet werden nach:

$$P_m = (0,125 \cdot k_h + 0,125 \times k_e) \times P_d$$

Dabei ist

P_m der Repräsentant der Magnetisierungsverluste, in W;

P_d der Repräsentant der Gleichstromverluste, in W;

$k_h = \sum_{n=12}^{n=48} k_{hn}$ die Komponente der Hystereseverluste;

$$k_e = \sum_{n=12}^{n=48} k_{en} \quad \text{die Komponente der Wirbelstromverluste;}$$

$$k_{nn} = (I_n/I_d) \times n;$$

$$k_{en} = (I_n/I_d)^2 \times n^{0,5}.$$

Die Gesamt-Betriebsverluste müssen durch Bildung der Summe aus den vom Gleichstrom verursachten Verlusten, den Verlusten durch Oberschwingungsströme und, falls anwendbar, den Kernmagnetisierungsverlusten ermittelt werden.

Leistungsverluste durch Hilfsbetriebe der Glättungsdrossel, falls vorhanden, müssen in die Leistungsaufnahme der Hilfsbetriebe der gesamten Stromrichterstation einbezogen werden (siehe 5.8). Sie müssen während der Werksprüfung getrennt gemessen werden.

5.7 Verluste durch Gleichstromfilter

5.7.1 Allgemeines

Die Hauptfunktion der Gleichstromfilter in Verbindung mit der Gleichstromglättungsdrossel ist es, einen niederimpedanten Nebenschluss für die vom Stromrichter erzeugten Oberschwingungsströme zu bilden, dadurch die Oberschwingungsströme auf der Gleichstromleitung zu verringern und die Störsignalerzeugung in benachbarten Kommunikationsfreileitungen zu verhindern. Das Gleichstromfilter darf je nach Systemanforderungen entweder als Einzelzweig oder durch mehrere Filterzweige gebildet werden. Die Gleichstromfilter dürfen aktive Filter, passive Filter oder eine Kombination von beiden enthalten.

Gleichstromfilter werden zwischen die Hoch- und Niederspannungsanschlüsse des Stromrichters geschaltet. Unter Leerlaufbedingungen sind sowohl der Filtergleichstrom als auch die Filterspannung gleich null, und es treten keine Verluste auf.

Wenn der Stromrichter in Betrieb ist, müssen die Verluste des Gleichstromfilters für normale Betriebsbedingungen bei dem jeweiligen Betriebspunkt ermittelt werden, wobei werksseitige Verlustmessungen und berechnete Oberschwingungsströme verwendet werden. Die Oberschwingungsströme durch die Filter müssen unter der Annahme, dass der Stromrichter eine impedanzbehaftete Spannungsquelle ist, berechnet werden. Zur Berechnung der Oberschwingungsspannungen des Stromrichters muss die Gleichung nach A.3 benutzt werden. Die Glättungsdrosseln und Gleichstromkabel und -leitungen müssen mit ihren wirklichen Impedanzen dargestellt werden. Bei der Berechnung muss vorausgesetzt werden, dass das Wechselstromnetz bei der Nennfrequenz betrieben wird und die Filterkomponenten ihre Nennwerte besitzen. Bei Verwendung von aktiven Filtern müssen deren Verluste eingeschlossen und das angewendete Berechnungsverfahren vom Lieferanten dokumentiert werden.

5.7.2 Verluste durch Gleichstromfilterkondensatoren

Die Verluste durch die Gleichstromfilterkondensatoren enthalten die Verluste in den Gleichspannungsaufteilungswiderständen und die Oberschwingungsverluste in den Kondensatoren. Die Verluste aufgrund von Oberschwingungsströmen in der Kondensatorbatterie sind wegen des niedrigen Leistungsfaktors sehr klein und müssen vernachlässigt werden.

Die Verluste in den Spannungsaufteilungswiderständen müssen unter Verwendung des Gesamtwiderstandes der Kondensatorbatterie berechnet werden, der aus dem bei den Fertigungsprüfungen erhaltenen Mittelwert aller Spannungsaufteilungswiderstände je Kondensatoreinheit und dem Aufbau der Kondensatorbatterie ermittelt wird mit

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Dabei ist

U die Betriebsgleichspannung der Kondensatorbatterie, in V;
 R der Gesamtwiderstand der Batterie, in Ω .

5.7.3 Drosselverluste in Gleichstromfiltern

Die Drosselverluste müssen durch Berechnung der Oberschwingungsströme in der Drossel für den jeweiligen Betriebspunkt und der entsprechenden Betriebsparameter (siehe 4.3) sowie durch Messung des Blindwiderstandes und Q-Faktors der Drossel bei den verschiedenen Oberschwingungsfrequenzen während der Werksprüfungen ermittelt und auf die Betriebstemperatur der Wicklung korrigiert werden. Die Drosselverluste sind durch folgende Gleichung gegeben:

$$P = \sum_{n=12}^{n=48} \frac{I_n^2 \times X_n}{Q_n}$$

Dabei ist

n die Ordnungszahl der Oberschwingung;
 I_n der berechnete Effektivwert des Stromes durch die Drossel bei der Oberschwingung n -ter Ordnung, in A;
 X_n der Blindwiderstand der Drossel bei der Oberschwingung n -ter Ordnung, in Ω ;
 Q_n der bei der Oberschwingung n -ter Ordnung gemessene Q-Faktor.

5.7.4 Verluste durch Gleichstromfilterwiderstände

Die Widerstandsverluste müssen unter Berücksichtigung aller Oberschwingungsströme berechnet werden. Der Wert des Widerstandes R muss durch Werksprüfungen ermittelt werden.

Der Effektivwert des Stromes jeder Oberschwingung durch den Widerstand muss für den jeweiligen Betriebspunkt der Stromrichterstation und die entsprechenden Betriebsparameter (siehe 4.3) berechnet werden. Die Verluste in jedem Widerstand sind durch folgende Gleichung gegeben:

$$P_R = R \times \sum_{n=12}^{n=48} I_n^2$$

Dabei ist

R der Widerstandswert, in Ω ;
 I_n der berechnete Effektivwert des Stromes durch den Widerstand bei der Oberschwingung n -ter Ordnung, in A;

5.7.5 Gesamtverluste des Gleichstromfilters

Die Gesamtverluste des Gleichstromfilters müssen durch Addition der Verluste durch alle Kondensatoren, Drosseln, Widerstände und, soweit anwendbar, aktiven Baugruppen, aus denen das Gleichstromfilter aufgebaut ist, ermittelt werden.

5.8 Verluste durch Stationshilfsbetriebe

Die in der HGÜ-Stromrichterstation von Hilfseinrichtungen aufgenommene Leistung hängt von der Art der Stationshilfsbetriebe, den Betriebsanforderungen und den Umgebungsbedingungen ab. Darüber hinaus unterliegt sie der zeitlichen Änderung durch diskontinuierliche Lasten wie Heizung, Kühlung, Beleuchtung und Wartungseinrichtungen. Der Käufer muss den Umfang der Hilfsbetriebe, die in die Verlustbewertung einbezogen werden müssen, festlegen, wenn andere Verluste als die Lasten erforderliche Stationshilfsbetriebe zu betrachten sind.