

	DIN EN 61378-1 (VDE 0532-41)	DIN
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE
ICS 29.180	Einsprüche bis 2010-02-28 Vorgesehen als Ersatz für DIN EN 61378-1 (VDE 0532-41):1999-09 Entwurf Stromrichtertransformatoren – Teil 1: Transformatoren für industrielle Anwendungen (IEC 14/610/CDV:2009); Deutsche Fassung FprEN 61378-1:2009 Convertor transformers – Part 1: Transformers for industrial applications (IEC 14/610/CDV:2009); German version FprEN 61378-1:2009 Transformateurs de conversion – Partie 1: Transformateurs pour applications industrielles (CEI 14/610/CDV:2009); Version allemande FprEN 61378-1:2009 Anwendungswarnvermerk Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungstermin 2009-12-21 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt. Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren. Stellungnahmen werden erbeten – vorzugsweise als Datei per E-Mail an dke@vde.com in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden – oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main. Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevante Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen. Gesamtumfang 172 Seiten DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE	

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

Nationales Vorwort

Die Deutsche Fassung des europäischen Dokuments FprEN 61378-1:2009 „Stromrichtertransformatoren – Teil 1: Transformatoren für industrielle Anwendungen“ (Entwurf in der Umfrage) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden.

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. Dem entsprechend ist das internationale Dokument IEC 14/610/CDV:2009 „Convertor transformers – Part 1: Transformers for industrial applications“ unverändert in den Entwurf FprEN 61378-1:2009 übernommen worden.

Da die Deutsche Fassung noch nicht endgültig mit der Englischen und Französischen Fassung abgeglichen ist, ist die englische Originalfassung des IEC-CDV entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 14 „Power transformers“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet.

Bei der Abstimmung zu dem Europäischen Schluss-Entwurf bei CENELEC und dem Internationalen Schluss-Entwurf bei IEC [Final Draft International Standard (FDIS)] sind jeweils nur „JA/NEIN“-Entscheidungen möglich, wobei „NEIN“-Entscheidungen fundiert begründet werden müssen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Für diesen Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium K 321 „Transformatoren“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 61378-1 (VDE 0532-41):1999-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) vollständige redaktionelle Überarbeitung der Norm;
- b) Erläuterungen für die wichtigsten Schaltungen der Stromrichteranwendungen;
- c) Beispielrechnungen für verschiedene Anwendungsfälle ergänzt;
- d) neue Abschnitte eingefügt zu den Themen Zickzackschaltung, Phasenverschiebung, Transduktoren, Stromaufteilung, Verluste und Heißpunkte in Hochstromwicklungen, Streufelder;
- e) sieben informative Abhänge ergänzt zu Stromaufteilungsmessung, Betriebsarten, Auslegungsüberprüfung, Ermittlung von Feldverlusten, Kurzschlussmessungen, Phasenverschiebung;
- f) ein normativer Anhang zur Beziehung zwischen den Bemessungsdaten nach IEC 60146-1-1 und IEC 61378-1 ergänzt;
- g) zahlreiche Bildergänzungen zur Verdeutlichung der Zusammenhänge.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

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

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

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

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC 60050-421:1990	–	–
EN 60076 (Reihe)	IEC 60076 (Reihe)	DIN EN 60076 (VDE 0532-76) (Reihe)	VDE 0532-76 (Reihe)
EN 60076-1:1997 + A1:2000 + A12:2002	IEC 60076-1:2000 entspricht: IEC 60076-1:1997 + A1:1999	DIN EN 60076-1 (VDE 0532-76-1):2003-01	VDE 0532-76-1
EN 60076-2:1997	IEC 60076-2:1993 mod. + Cor.:1997	DIN EN 60076-2 (VDE 0532-102):1997-12	VDE 0532-102
EN 60076-3:2001	IEC 60076-3:2000 + Cor.:2000	DIN EN 60076-3 (VDE 0532-3):2001-11 + DIN EN 60076-3 Ber. 1 (VDE 0532-3 Ber. 1):2002-04	VDE 0532-3 VDE 0532-3 Ber. 1
EN 60076-4:2002	IEC 60076-4:2002	DIN EN 60076-4 (VDE 0532-76-4):2003-06	VDE 0532-76-4
EN 60076-5:2006	IEC 60076-5:2006	DIN EN 60076-5 (VDE 0532-76-5):2007-01	VDE 0532-76-5
EN 60076-6:2008	IEC 60076-6:2007	DIN EN 60076-6 (VDE 0532-76-6):2009-02	VDE 0532-76-6
–	IEC 60076-7:2005	DIN IEC 60076-7 (VDE 0532-76-7):2008-02	VDE 0532-76-7
–	IEC 60076-8:1997	–	–
–	IEC 60076-10:2005	–	–
EN 60076-11:2004	IEC 60076-11:2004	DIN EN 60076-11 (VDE 0532-76-11):2005-04	VDE 0532-76-11
–	IEC/TS 60076-14:2004 (zurückgezogen)	–	–
–	ersetzt durch: IEC/TS 60076-14:2009	–	–

Tabelle NA.1 (fortgesetzt)

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 60146 (Reihe)	IEC 60146 (Reihe)	DIN EN 60146 (VDE 0558) (Reihe)	VDE 0558 (Reihe)
EN 60146-1-1:1993 + A1:1997 –	IEC 60146-1-1:1991 + Cor.:1993 + A1:1996 (zurückgezogen) ersetzt durch: IEC 60146-1-1:2009	DIN EN 60146-1-1 (VDE 0558-11):1994-03 DIN EN 60146-1-1/A1 (VDE 0558-11/A1):1998 –	VDE 0558-11 VDE 0558-11/A1 –
–	IEC/TR 60146-1-2:1991	–	–
EN 60146-1-3:1993	IEC/TR 60146-1-3:1991	DIN EN 60146-1-3 (VDE 0558-8):1994-03	VDE 0558-8
–	IEC/TR 60616	–	–
–	IEC 60905:1987 (zurückgezogen) ersetzt durch: IEC 60076-12:2008	–	–
EN 61378-2	IEC 61378-2	DIN EN 61378-2 (VDE 0532-42)	VDE 0532-42
EN 61378-3	IEC 61378-3	DIN EN 61378-3 (VDE 0532-43)	VDE 0532-43

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60076 (VDE 0532-76) (Reihe), *Leistungstransformatoren*

DIN EN 60076-1 (VDE 0532-76-1):2003-01, *Leistungstransformatoren – Teil 1: Allgemeines*
(IEC 60076-1:1993, modifiziert + A1:1999); Deutsche Fassung EN 60076-1:1997 + A1:2000 + A12:2002

DIN EN 60076-2 (VDE 0532-102):1997-12, *Leistungstransformatoren – Teil 2: Übertemperaturen*
(IEC 60076-2:1993, modifiziert); Deutsche Fassung EN 60076-2:1997

DIN EN 60076-3 (VDE 0532-3):2001-11, *Leistungstransformatoren – Teil 3: Isolationspegel, Spannungsprüfungen und äußere Abstände in Luft* (IEC 60076-3:2000 + Corrigendum:2000); Deutsche Fassung EN 60076-3:2001

DIN EN 60076-3 Berichtigung 1 (VDE 0532-3 Berichtigung 1):2002-04, *Berichtigungen zu DIN EN 60076-3*
(VDE 0532 Teil 3):2001-11

DIN EN 60076-4 (VDE 0532-76-4):2003-06, *Leistungstransformatoren – Teil 4: Leitfadens zur Blitz- und Schaltstoßspannungsprüfung von Leistungstransformatoren und Drosselspulen* (IEC 60076-4:2002); Deutsche Fassung EN 60076-4:2002

DIN EN 60076-5 (VDE 0532-76-5):2007-01, *Leistungstransformatoren – Teil 5: Kurzschlussfestigkeit (IEC 60076-5:2006); Deutsche Fassung EN 60076-5:2006*

DIN EN 60076-6 (VDE 0532-76-6):2009-02, *Leistungstransformatoren – Teil 6: Drosselspulen (IEC 60076-6:2007); Deutsche Fassung EN 60076-6:2008*

DIN EN 60076-11 (VDE 0532-76-11):2005-04, *Leistungstransformatoren – Teil 11: Trockentransformatoren (IEC 60076-11:2004); Deutsche Fassung EN 60076-11:2004*

DIN EN 60146 (VDE 0558) (Reihe), *Halbleiter-Stromrichter; Allgemeine Anforderungen und netzgeführte Stromrichter*

DIN EN 60146-1-3 (VDE 0558-8):1994-03, *Halbleiter-Stromrichter; Allgemeine Anforderungen und netzgeführte Stromrichter – Teil 1-3: Transformatoren und Drosselspulen (IEC 60146-1-3:1991); Deutsche Fassung EN 60146-1-3:1993*

DIN EN 60146-1-1 (VDE 0558-11):1994-03, *Halbleiter-Stromrichter; Allgemeine Anforderungen und netzgeführte Stromrichter – Teil 1-1: Festlegung der Grundanforderungen (IEC 60146-1-1:1991); Deutsche Fassung EN 60146-1-1:1993*

DIN EN 60146-1-1/A1 (VDE 0558-11/A1):1998-06, *Halbleiter-Stromrichter; Allgemeine Anforderungen und netzgeführte Stromrichter – Teil 1-1: Festlegung der Grundanforderungen; Änderung A1; (IEC 60146-1-1:1991/A1:1996); Deutsche Fassung EN 60146-1-1:1993/A1:1997*

DIN EN 61378-2 (VDE 0532-42), *Stromrichtertransformatoren – Teil 2: Transformatoren für HGÜ-Anwendungen*

DIN EN 61378-3 (VDE 0532-43), *Stromrichtertransformatoren – Teil 3: Anwendungsrichtlinie*

DIN IEC 60076-7 (VDE 0532-76-7):2008-02, *Leistungstransformatoren – Teil 7: Leitfaden für die Belastung von ölgefüllten Leistungstransformatoren (IEC 60076-7:2005)*

— **Entwurf** —

E DIN EN 61378-1 (VDE 0532-41):2009-12

– Leerseite –

Deutsche Fassung

**Stromrichtertransformatoren –
Teil 1: Transformatoren für industrielle Anwendungen**

	Inhalt	Seite
1	Allgemeines.....	3
1.1	Anwendungsbereich	3
1.2	Klassifizierung	4
1.3	Übliche Betriebsbedingungen	4
1.4	Bestimmungen über ungewöhnliche Betriebsbedingungen	4
2	Normative Verweisungen.....	4
3	Begriffe.....	5
3.1	Begriffe.....	6
3.2	Abkürzungen	7
4	Bemessungsdaten	7
4.1	Bemessungsleistung bei Bemessungsfrequenz und Belastbarkeit	8
4.2	Bemessungsspannung und Betriebsspannung	8
4.3	Bemessungsstrom	8
4.4	Phasenverschiebung und Anschlusskennzeichnung für Dreiphasentransformatoren	9
4.5	Leistungsschild	9
4.6	Anlagen mit Tertiärwicklungen, belastet mit Filter und Kompensation	10
4.7	Lastumschalter.....	10
5	Lastverluste und Spannungsfall in Transformatoren und Drosselspulen	10
5.1	Ermittlung der Lastverluste des Transformators bei Belastung mit überschwingungsbehaftetem Strom	11
5.2	Stromaufteilung, Verluste und Heißpunkt in Hochstromwicklungen.....	15
5.3	Wirkung der magnetischen Kopplung der Wicklungen auf deren Wirbelstromverluste infolge der Oberschwingungen in Transformatoren mit drei oder mehr Wicklungen auf demselben Kernschenkel	15
5.4	Verluste in Saugdrosseln, stromausgleichenden Drosselspulen, Reihenglättungs-drosseln und Transduktoren.....	20
5.5	Spannungsfall in Transformatoren und Drosselspulen.....	22
6	Prüfungen für Stromrichtertransformatoren	24
6.1	Messung der Kommutierungsreaktanz und Bestimmung des induktiven Spannungsfalls	24
6.2	Messung von Übersetzungsverhältnis und Phasenverschiebung	25
6.3	Dielektrische Prüfungen.....	26
6.4	Prüfung der Lastverluste.....	26
6.5	Erwärmungsprüfungen.....	27
7	Lastgeräuschpegel mit Transduktoren und/oder Saugdrosseln	30

Anhang A (informativ) Ermittlung der Lastverluste des Transformators im Betrieb bei nichtsinsusförmigem Bemessungsstrom des Stromrichters aus Messungen mit dem Bemessungsstrom des Transformators bei Grundfrequenz	34
Anhang B (informativ) Kurzschluss-Prüfströme und Lastverluste in Transformatoren für Einwegstromrichter (Gesamtverlusteinspeisung)	52
Anhang C (informativ) Stromaufteilungsmessung in Hochstromventilwicklungen	53
Anhang D (informativ) Beispiele für Betriebsarten	59
Anhang E (informativ) Leitfaden für die Überprüfung der Auslegung	60
Anhang F (informativ) Ermittlung von Feldverlusten im Transformatorkessel 3D-Simulation und Leitfaden für die Bewertung von Kesselverlusten und für die Berechnung von Kesselheißpunkten.....	63
Anhang G (informativ) Kurzschlussmessungen bei Gleichrichtertransformatoren mit eingebauten Transduktoren	64
Anhang H (informativ) Ermittlung des Transformatorspannungsverhältnisses und der Phasenverschiebung durch Messungen des Windungsverhältnisses	66
Anhang I (informativ) Schaltungen der Phasenverschiebung und Anschlussbezeichnungen von Stromrichtertransformatoren	70
Anhang J (normativ) Beziehung zwischen Bemessungsdaten 61378-1 und 60146-1-1	75

Bilder

Bild 1 – Streufelder eines Transformators mit drei Wicklungen mit eng gekoppelten Ventilwicklungen.....	17
Bild 2 – Streufelder eines Transformators mit drei Wicklungen mit entkoppelten Ventilwicklungen.....	18
Bild 3 – Streufelder eines Transformators mit drei Wicklungen mit lose gekoppelten doppelkonzentrischen Ventilwicklungen	19
Bild 4 – Streufelder eines Transformators mit drei Wicklungen mit lose gekoppelten Doppelstock- Ventilwicklungen.....	20
Bild 5 – Typische Transduktorregelkurve und Toleranzbereich (mit maximalem Spannungsfall beim Steuerstrom null)	23
Bild A.1 – Querschnitt eines Wicklungsdrahtes	36
Bild A.2 – Kennzeichnung der Wicklungsanschlüsse Y y0y6	38
Bild A.3 – Kennzeichnung der Wicklungsanschlüsse D d0y1	40
Bild C.1 – Beispiel einer Hochstromventilwicklung und der Messgeräteaufstellung.....	54
Bild H.1 – Yd1-Schaltung	66
Bild H.2 – Yd11-Schaltung	67
Bild H.3 – Pd0+7,5-Schaltung	67
Bild H.4 – Oszilloskopschaltung	68
Bild I.1 – Phasenverschiebung gegen den Uhrzeigersinn	70
Bild I.2 – Yd11-Schaltung	70
Bild I.3 – Yd1-Schaltung	70

Tabellen

Tabelle 1 – Schaltungen und Berechnungsfaktoren	31
---	----

1 Allgemeines

1.1 Anwendungsbereich

Diese Norm behandelt die Festlegung, Auslegung und Prüfung von Leistungstransformatoren und Drosselspulen, die als Teil einer Halbleiterstromrichteranlage vorgesehen sind. Sie ist nicht anwendbar für Transformatoren, die für die industrielle oder öffentliche Wechselspannungsversorgung ausgelegt sind.

Die Norm ist auf Leistungsstromrichter jeder Bemessungsleistung beschränkt, die typisch sind für Anwendungen wie beispielsweise Thyristorgleichrichter und Diodengleichrichter für die Elektrolyse, Thyristorgleichrichter für große Antriebe, Thyristorgleichrichter für Altschmelzöfen und Diodengleichrichter zur Einspeisung in Wechselrichter für Antriebe mit variabler Geschwindigkeit. Die Norm behandelt auch die Regelreinrichtung, die in einer solchen Anwendung als Abwärtssteuertransformator oder Spartransformator verwendet wird. Die höchste Spannung für Betriebsmittel der Ventilwicklung ist auf 36 kV begrenzt.

Diese Norm gilt nicht für Transformatoren für Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ). Diese sind Hochspannungstransformatoren und werden Gleichspannungsprüfungen unterzogen.

Normen für die gesamte Stromrichteranlage (wie IEC 60146 oder andere, die für besondere Anwendungsgebiete gelten) dürfen Anforderungen an Garantiewerte und Prüfungen (z. B. Isolation, Leistungsverluste) für die gesamte Anlage, einschließlich Stromrichtertransformator und eventuell vorhandene Zusatztransformatoren und Drosselspulen, enthalten. Das befreit nicht von der Einhaltung der Anforderungen dieser Norm bezüglich der Garantiewerte und Prüfungen die auf den Stromrichtertransformator selbst, als Einzelkomponente vor dem Einbau in die restliche Stromrichteranlage, anzuwenden sind.

Die Garantiewerte, Betriebs- und Typprüfungen, die in dieser Norm festgelegt sind, gelten in gleichem Maße für Transformatoren, die als Teil einer gesamten Stromrichteranlage geliefert werden, oder für solche Transformatoren, die getrennt, aber für die Verwendung in einer Stromrichteranlage bestellt werden. Jeder zusätzliche Garantiewert oder besondere Nachweis ist gesondert im Transformatorvertrag zu vereinbaren.

Stromrichtertransformatoren nach dieser Norm können Öltransformatoren oder Trockentransformatoren sein. Wenn nicht besondere Ausnahmen in dieser Norm angegeben werden, müssen die Transformatoren den Anforderungen nach IEC 60076 für Öltransformatoren und nach IEC 60076-11 für Trockentransformatoren entsprechen.

ANMERKUNG Für einige Stromrichteranwendungen ist es möglich, übliche Verteiltransformatoren in Standardausführung zu verwenden. Die Verwendung solcher Standardtransformatoren für besondere Stromrichteranwendungen kann eine Herabsetzung der Bemessung erforderlich machen. Dieser Punkt wird in dieser Norm, die die Anforderungen für besonders ausgelegte Baueinheiten enthält, nicht gesondert behandelt. Es ist möglich, dieser Herabsetzung mit den in 5.1 und auch in Abschnitt 9 von IEC 60076-8 angegebenen Gleichungen abzuschätzen.

Die Norm behandelt Transformatoren mit einem oder mehreren Aktivteilen, die in denselben Kessel eingebaut sind, wie Steuer-(Spar-)Transformatoren und ein oder zwei Gleichrichtertransformatoren. Sie behandelt auch Transformatoren mit Transduktoren und/oder einer oder mehreren Saugdrosseln.

Für jede Kombinationen, die vorstehend nicht genannt wird, ist bezüglich der Ermittlung und Messung der Gesamtverluste eine Vereinbarung zwischen Käufer und Hersteller erforderlich.

Diese Norm behandelt Transformatoren in Stern- (Y), Dreieck- (D) und jeder anderen Schaltung der Phasenverschiebung (wie Zickzack, erweitertes Dreieck, Polygon, etc.). Phasenverschiebungswicklungen können sowohl auf dem Steuer- als auch auf dem Gleichrichtertransformator platziert werden.

1.2 Klassifizierung

Die Klassifizierung von Stromrichtern und Stromrichteranwendungen ist in 1.3 von IEC 60146-1-1 und 1.2 von IEC 60146-1-2 angegeben. Vom Standpunkt der Transformatorenbemessung ist es wichtig, zu unterscheiden zwischen:

- Anwendungen mit im Wesentlichen sinusförmiger Spannung an den Transformatorenklemmen; und
- Anwendungen mit nicht sinusförmiger Spannung, wobei die Primarseite des Transformators aus einer Stromrichterschaltung zur Wechselstromregelung oder zur Frequenzumrichtung gespeist wird.

Außerdem ist es wichtig, zu unterscheiden zwischen:

- Anwendungen mit einer gleichbleibenden Belastung, wie z. B. Elektrolyse, Gleichstrom-Lichtbogenofen usw.; und
- Anwendungen mit kurzzeitigen zyklischen oder unregelmäßigen Belastungsänderungen, wie z. B. umsteuerbare Walzwerkantriebe usw.

Es ist erforderlich, dass Informationen über die Stromrichteranwendung bei der Ausschreibung der Transformatoren mitgeliefert werden. Dies wird in späteren Abschnitten dieser Norm ausführlicher behandelt.

1.3 Übliche Betriebsbedingungen

Die üblichen Betriebsbedingungen für die Transformatoren müssen IEC 60076-1, IEC 60076-2, IEC 60076-11 und IEC 60146-1-1.

Es ist erforderlich, dass jede Abweichung der Wechselspannung von dem Wert der Bemessungsspannung oder der Anzapfungsspannung, der sinusförmigen Kurvenform oder der Dreiphasensymmetrie innerhalb der Grenzwerte der „Störfestigkeitsklasse B“ nach 2.5 von IEC 60146-1-1 bleibt. Wird ein Stromrichtertransformator mit nicht-sinusförmiger Spannung, Wechselrichter- oder Frequenzumformeranwendung betrieben, ist in der Ausschreibung über den Bereich der Änderung der Betriebsspannungsform und Frequenzschwankungen zu informieren. Außerdem ist es wichtig, dass bezüglich der Gleichstromkomponente des anliegenden Schaltkreises Angaben gemacht werden.

1.4 Bestimmungen über ungewöhnliche Betriebsbedingungen

Zusätzlich zu den ungewöhnlichen Betriebsbedingungen, die für Leistungstransformatoren festgelegt werden, muss bei Transformatoren mit mehr als zwei Wicklungen jede Lastkombination der Wicklungen genau angegeben werden. Jede Lastkombination muss die entsprechenden Oberschwingungsströme enthalten.

Beispiele für diese Art unüblicher Betriebsbedingungen sind Leerlauf oder verringerte Last an tertiären Ausgleichswicklungen oder an einer Ventilwicklung.

2 Normative Verweisungen

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

IEC 60050-421:1990, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 421: Power transformers and reactors*

IEC 60076-1: konsolidierte Ausgabe 2.1 (2000-04), *Power transformers – Part 1: General*

IEC 60076-2: Ausgabe 2.0 (1993-04), *Power transformers – Part 2: Temperature rise*

IEC 60076-3: Ausgabe 2.0 (2000-03), *Power transformers – Part 3: Insulation levels and dielectric tests*

IEC 60076-4: Ausgabe 1.0 (2002-06), *Power transformers – Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors*

IEC 60076-5: Ausgabe 3.0 (2006-02), *Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit*

IEC 60076-6: Ausgabe 1.0 (2007-12), *Power transformers – Part 6: Reactors*

IEC 60076-7: Ausgabe 1.0 (2005-12), *Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers*

IEC 60076-8: Ausgabe 1.0 (1997-11), *Power transformers – Part 8: Application guide*

IEC 60076-10: Ausgabe 1.0 (2005-07-2), *Power transformers – Part 10: Determination of sound levels*

IEC 60076-11: Ausgabe 1.0 (2004-11), *Power transformers – Part 11: Dry-type transformers*

IEC/TS 60076-14: Ausgabe 1.0 (2004-11), *Power transformers – Part 14: Design and application of liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials*

IEC 60146-1-1: Ausgabe 3.0 (1991-03), *Semiconductor convertors – General requirements and line commutated convertors – Part 1-1: Specifications of basic requirements*

IEC 60146-1-1-am1: Ausgabe 3.0 (1996-07)

IEC/TR 60146-1-2: Ausgabe 3.0 (1991-03), *Semiconductor convertors – General requirements and line commutated convertors – Part 1-2: Application guide*

IEC 60146-1-3: Ausgabe 3.0 (1991-03), *Semiconductor convertors – General requirements and line commutated convertors – Part 1-3: Transformers and reactors*

IEC 60905: Ausgabe 1.0 (1987-12), *Loading guide for dry-type power transformers*

ANMERKUNG

IEC 60050-421 befindet sich in der Überarbeitung. Fertigstellung 2011

IEC 60076-1 befindet sich in der Überarbeitung. Fertigstellung 2009

IEC 60076-2 befindet sich in der Überarbeitung. Fertigstellung 2009

IEC 60076-3 befindet sich in der Überarbeitung. Fertigstellung 2008

IEC 60076-4 befindet sich in der Überarbeitung. Fertigstellung 2009

IEC 60076-5 befindet sich in der Überarbeitung. Fertigstellung 2008

IEC 60076-7 befindet sich in der Überarbeitung. Fertigstellung 2008

IEC 60076-8 befindet sich in der Überarbeitung. Fertigstellung 2009

IEC 60076-10 befindet sich in der Überarbeitung. Fertigstellung 2008

IEC 60076-11 befindet sich in der Überarbeitung. Fertigstellung 2006

IEC 60076-14: Edition 2.0 befindet sich in der Erarbeitung. Zieldatum für DTS: 2007-11

IEC 60146-1-1 befindet sich in der Überarbeitung. Fertigstellung 2006

IEC 60146-1-2 befindet sich in der Überarbeitung. Fertigstellung 2007

IEC 60146-1-3 befindet sich in der Überarbeitung. Fertigstellung 2007

IEC 60076-6 befindet sich in der Überarbeitung. Fertigstellung 2004

IEC 60905 befindet sich in der Überarbeitung. Fertigstellung 2007

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60050-421 (IEV). Weitere Begriffsfestlegungen zu speziellen Transformator- und Stromrichterbegriffen sind in IEC 60076-1 bzw. in IEC 60146-1-1 angegeben. Wenn einige dieser Begriffe von früheren allgemeinen Begriffsfestlegungen derselben Begriffe, die im IEV enthalten sind, abweichen, gelten die Begriffe nach IEC 60076-1 und IEC 60146-1-1. Besondere Aufmerksamkeit wird den in 1.5.17, 1.5.18, 1.5.19 und 1.5.22 bis einschließlich 1.5.26 von IEC 60146-1-1 festgelegten Begriffen gewidmet.

3.1 Begriffe

3.1.1

Polygonschaltung

P

Wicklungsschaltung, in der jede Phasenwicklung aus zwei Teilen besteht, in denen phasenverschobene Spannungen induziert werden. Ein Teil jeder Phase ist in Reihe mit dem anderen Teil einer anderen Phase geschaltet und wird dann zu einem Dreieck geschlossen (siehe Anhang I).

3.1.2

erweiterte Dreieckschaltung

E

Wicklungsschaltung, in der jede Phasenwicklung aus zwei Teilen besteht, in denen phasenverschobene Spannungen induziert werden. Ein Teil jeder Phase ist eine Dreieckschaltung, die dann an den entsprechenden Netzanschluss durch den anderen Teil geschaltet wird (siehe Anhang I).

3.1.3

Phasenverschiebungswinkel

I'

ist der Winkel mit Zeiger, der, ausgedrückt in Grad und Dezimalstellen, der nächsten Vektorgruppe angefügt werden muss, um die Phasenverschiebung zu erreichen

3.1.4

Transduktor

Gerät, das aus einem oder mehreren ferromagnetischen Kernen mit Wicklungen besteht, mit dem ein(e) Gleich- oder Wechselstrom oder -spannung durch eine(n) unabhängige(n) Spannung oder Strom, unter Ausnutzung von Sättigungsphänomenen im magnetischen Stromkreis, variiert werden kann [IEV 431-01-01]

ANMERKUNG Der französische Ausdruck transducteur magnétique (Transduktor) sollte nicht mit dem allgemeineren französischen Ausdruck transducteur (Transducer) verwechselt werden. Die Benutzung des Ausdrucks transducteur im Sinne von transducteur magnétique ist nur zulässig, wenn keine Verwechslung möglich ist.

3.1.5

Saugdrossel

ein elektromagnetisches Gerät, welches den parallelen Betrieb von zwei oder mehr phasenverschobenen Kommutierungsgruppen durch induktive Kopplung zwischen Wicklungen, die auf demselben Kern angebracht wurden, ermöglicht [IEV 431-01-01]

3.1.6

Netzseite

bezieht sich auf die Transformatorwicklung, die an das Wechselstromnetz geschaltet ist

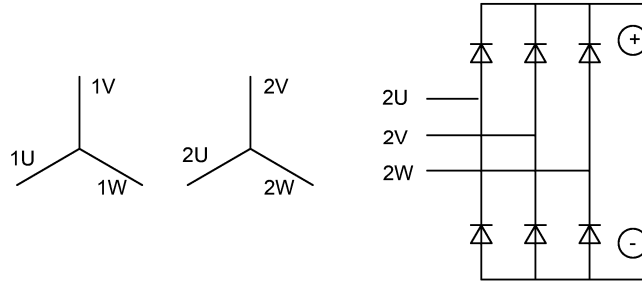
3.1.7

Ventilseite

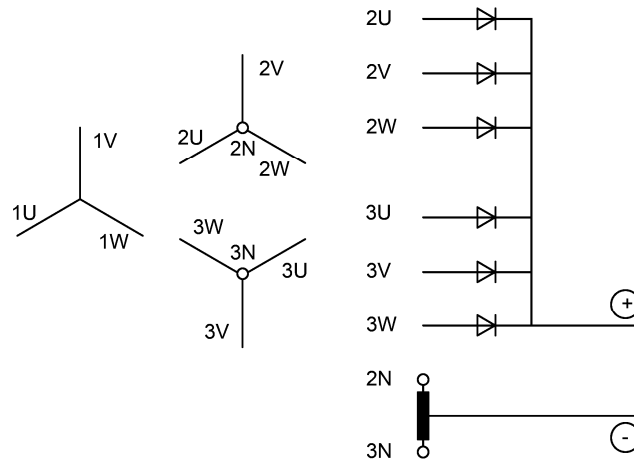
bezieht sich auf die Transformatorwicklung, die an den Stromrichter geschaltet ist

3.2 Abkürzungen

B6U (Brücke). Auf Transformatorseite können dies Wicklungen in Stern- oder Dreieckschaltung sein.



DSS (Doppelstern mit Saugdrossel).



IPT siehe Begriff Saugdrossel (Interphase Transformer)

SR siehe Begriff Transduktoren

FFT schnelle Fourier Transformation (Fast Fourier Transformation)

4 Bemessungsdaten

Es gilt IEC 60076-1 mit den folgenden Ergänzungen und Erläuterungen.

Transformatoren für Stromrichteranwendungen werden mit nichtsinusförmigem Strom belastet und manchmal mit nichtsinusförmiger Spannung betrieben. Sogar die Frequenz darf sich bei bestimmten Anwendungen erheblich verändern.

Die Bemessungsdaten der Transformatoren, an denen die Prüfungen durchgeführt werden und auf die sich die entsprechenden Gewährleistungen beziehen, werden als sinusförmige Größen bei Grundfrequenz im Dauerbetrieb angegeben.

Die folgenden Abschnitte stellen einen Leitfaden dar, wie die Bemessungsdaten des Transformators ermittelt werden, wenn die Einzelheiten des Stromrichters und andere Angaben zur Belastung verfügbar sind.

4.1 Bemessungsleistung bei Bemessungsfrequenz und Belastbarkeit

Die Bemessungsleistung des Stromrichtertransformators wird aus den Grundschwingungsanteilen von Spannung und Strom ermittelt, so dass für die Bemessungsleistung eines Drehstromtransformators gilt:

$$S_R = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \quad (1)$$

Dabei ist

U_1 der Effektivwert des Grundschwingungsanteils der verketteten Spannung;

I_1 der Effektivwert des Grundschwingungsanteils des Bemessungsnetzstroms.

Die Bemessungsleistung S_R und der Netzstrom I_1 werden für die garantierten Lastverluste und Kurzschlussimpedanz benutzt.

Die Bemessungsleistung der Ventilwicklung S_V ist gleich der Bemessungsspannung der Netzwicklung multipliziert mit einem Faktor, der eine Funktion der Anzahl der Ventilwicklungen und des Gleichrichtertyps (Einweg oder Zweiweg) ist. Der Faktor ist in Tabelle 1 angegeben.

Der thermische Auslegung und das Kühlsystem des Transformators sollen erst festgelegt werden, nachdem die erhöhten Verluste aufgrund von Oberschwingungen (inkl. Gleichstromanteile) durch einen äquivalenten thermischen Strom, der in der Erwärmungsprüfung benutzt werden soll (siehe Abschnitt 5), berücksichtigt wurden.

Bei Lastzyklen muss der Lastschwankungsverlauf vom Käufer in die Transformatorausschreibung eingefügt werden.

4.2 Bemessungsspannung und Betriebsspannung

4.2.1 Transformator, gespeist von einem Wechselstromnetz

Für einen Stromrichtertransformator, der an ein Wechselstromnetz angeschlossen ist, muss die Bemessungsspannung den Festlegungen in 4.4 von IEC 60076-1 und in IEC 60076-8 entsprechen.

4.2.2 Transformator, gespeist von einem Stromrichter/Wechselrichter mit oder ohne Frequenzänderung

Für eine Stromrichteranwendung mit einer erheblich verzerrten Spannung am Transformator muss die Bemessungsspannung gleich dem Effektivwert der sinusförmigen Grundschwingung sein, die aus dem Fourier-Spektrum der maximalen Dauerbetriebsspannung abgeleitet wurde.

Für die Anwendungen mit einer solch verzerrten Transformatorspannung oder mit veränderlicher Frequenz sind in der Ausschreibung Informationen zur angelegten Spannung bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen zu geben.

ANMERKUNG Für die oben genannten Anwendungen ist die Amplitude der Flussdichte in dem Magnetkreis der bestimmende Parameter und nicht die Amplitude einer nichtsinusförmigen Spannung. Der Scheitelwert des Flusses wird durch das Spannungs-Zeit-Integral über eine Halbperiode bestimmt. Dieser Wert ist bei Dauerbetrieb der Höchstwert. Falls kurzfristig höhere Werte des Spannungs-Zeit-Integrals existieren, so sollten sie ebenfalls in der Ausschreibung ausgeführt werden, um die Überprüfung auf eventuelle Übererregung zu ermöglichen.

4.3 Bemessungsstrom

Der Bemessungsstrom des Transformators ist der Effektivwert der Grundschwingung des Stroms, der der Bemessungsleistung nach 4.1 entspricht.

4.4 Phasenverschiebung und Anschlusskennzeichnung für Dreiphasentransformatoren

Der Begriff für Phasenverschiebung ist in 3.10.6 der IEC 60076-1 beschrieben.

Wenn die Stundenzahl-Schreibweise, wie in Abschnitt 6 der IEC 60076-1 beschrieben, nicht ausreicht, um die Phasenverschiebung zu beschreiben, wird die nächste Stundenzahl benutzt, gefolgt vom Wert mit Zeiger auf den Winkel, der angefügt werden muss, um die exakte Phasenverschiebung zu erhalten. Der Angabe des Zeigers auf Γ muss die Festlegung der Voreil- und Nacheilverschiebung gemäß 3.10.6 der IEC 60076-1 folgen (siehe Anlage I).

Die Anschlusskennzeichnung eines Stromrichtertransformators soll außerdem Informationen bezüglich der Reihenfolge des Umschaltventils beinhalten. Deshalb werden die Anschlüsse durch einen Code aus drei Symbolen, wie nachstehend beschrieben, gekennzeichnet.

Erstes Symbol: Nummer, die sich auf die verschiedenen Wicklungssysteme bezieht (1 für Netzseitenwicklung);

Zweites Symbol: Buchstabe, der sich gemäß der IEC 60616 auf die Phasensequenz bezieht;

Drittes Symbol (optional): „+“ oder „-“, die sich auf die Polarität des Gleichrichters beziehen, an den der Anschluss geschaltet ist.

Beispiele der verschiedenen Typen von Schaltungen, Phasenverschiebung und Anschlusskennzeichnung sind in Anhang I zu finden.

Falls sich die Phasenverschiebung mit der Schalterstellung ändert, ist die der Nennstellung anzugeben und die Abweichung über den Regelbereich ist während der Angebotsphase zu vereinbaren.

4.5 Leistungsschild

Zusätzlich zu den Informationen, die normalerweise für Leistungstransformatoren aufgeführt werden, sind folgende Daten auf dem Leistungsschild anzugeben:

- Schaltung und Zeigerdiagramm mit Angabe der Winkelverschiebung (gemäß 4.4);
- Wirbelstromverlusterhöhungsfaktor;
- Effektivwert des Laststroms (inkl. Grund- und Oberschwingung).

ANMERKUNG Bei Leistungstransformatoren ist der Wirbelstromverlusterhöhungsfaktor 1 und der effektive Laststrom gleich dem Bemessungsstrom.

- Typ des Gleichrichters, an den der Transformator angeschlossen wird (Ein-/Zweiweg, Dioden, Thyristor);
- Kühleigenschaften, wenn wassergekühlt, Wasserdurchfluss, Einlaufdruck und Druckabfall bei der Kühlung;
- Falls (Spar-)Transformatoren und Gleichrichtertransformatoren im gleichen Kessel untergebracht sind: Primärspannung des Gleichrichtertransformators.

Wenn Transduktoren verwendet werden, sind folgende Informationen anzugeben:

- Anzahl der Windungen der Vorlast-, Steuer- und Prüfwicklungen (wenn vorhanden);
- Bemessungsstrom der Vorlast-, Steuer- und Prüfwicklungen (wenn vorhanden);
- Gleichspannungsabfall;
- Schaltungsdiagramm der Vorlast-, Steuer- und Prüfwicklungen (wenn vorhanden) mit Anschlusskennzeichnung.

4.6 Anlagen mit Tertiärwicklungen, belastet mit Filter und Kompensation

Zur Leistungsfaktorkompensation und Oberschwingungsfilterung kann eine zusätzliche Tertiärwicklung im Transformator gefordert werden.

Zusätzlich zur Angabe von Bemessungsleistung und -spannung der Tertiärwicklung obliegt es der Verantwortung des Käufers, die vollständigen Nutzungsbedingungen der Tertiärwicklung anzugeben:

- primäre Versorgungsspannung;
- Sekundärbelastungen: Leistungsfaktor, Spannung und Strom (Grund- und Oberschwingung);
- Tertiärbelastungen: Leistungsfaktor (allgemein: $\cos \varphi = 0$, $\sin \varphi = 1$), Spannung und Strom (Grund- und Oberschwingung).

Der Bemessungsstrom wird definiert als Effektivwert (in Ampere) der Grundschiwingung des Stroms bei tertiärer Bemessungsspannung ($I_{\text{Nenn}} = \text{Grundschiwingung von } I = U_{\text{Nenn}}/Z$, wobei Z die Impedanz der Kompensations-/Filterungsdrosselspulenbank ist).

ANMERKUNG Oberschwingungsströme, die durch Netzspannungsoberschwingungen hervorgerufen werden, fließen zu den Filtern. Eine Resonanz kann am Transformator, an der Netzreaktanz und am Kompensationskondensator auftreten. In diesem Fall fließt ein hoher Oberschwingungsstrom zum Kondensator. Der Käufer hat die Netzbedingungen zu berücksichtigen und die Oberschwingungen entsprechend anzugeben.

Die folgenden Bedingungen sind, wenn vom Käufer angegeben, bei der Konstruktion des Transformators zu berücksichtigen:

- falls Übererregung auftritt, weicht der von der Tertiärwicklung kommende Strom vom Effektivwert der Spannung ab.
- Die Leistungsfaktorkompensation hat den Effekt, dass die primäre Versorgungsleistung verringert wird. Deshalb ist es notwendig anzugeben, ob die primäre Transformatorwicklung auch für Leerlauf der Tertiärwicklung ausgelegt werden soll.
- Kernübererregung bei verringerter Last oder Leerlauf an der Sekundärwicklung, während die Tertiärwicklung an den Filter geschaltet bleibt.

4.7 Lastumschalter

Falls die Zeitableitung des Stroms durch die Schalterkontakte erfragt wird, können alternativ folgende Informationen an den Schalterhersteller übergeben werden, um eine angemessene Konstruktion des Lastschalters zu ermöglichen:

- 1 Impedanz von Gleichrichtertransformatorkurzschlüssen (an Schlüsselstellen) (wird in Bezug auf die Schaltbilder festgelegt),
- 2 Transformatorschaltbilder,
- 3 Stromrichterschaltbilder, vollständig mit Schaltung an den Transformator.

5 Lastverluste und Spannungsfall in Transformatoren und Drosselspulen

Die Messung des Lastverlustes ist bei Bemessungsstrom durchzuführen. Die Gewährleistung des Lastverlustes muss auf dieser Messung beruhen.

Die tatsächlichen Lastverluste im Betrieb beinhalten zusätzliche Verluste in Abhängigkeit von ober-schwingungsbehaftetem Strom. Dieser Wert ist entsprechend dem Verfahren in 5.1 zu ermitteln. Er wird nicht garantiert, muss aber vom Transformatorhersteller dem Abnehmer zur Verfügung gestellt werden.

Der tatsächliche Wert der Lastverluste, wie oben berechnet, ist als Grundlage für die Bestimmung der Öl- und Wicklungserwärmung zu verwenden und um sicherzustellen, dass die Werte nicht überschritten werden, die in IEC 60076-2 für Öltransformatoren und in IEC 60076-11 für Trockentransformatoren zugelassen sind.

Die Übertemperatur-Typprüfung für Transformatoren ist, falls festgelegt, unter Berücksichtigung der tatsächlichen Verluste im Betrieb durchzuführen (siehe 5.1 und 6.5).

5.1 Ermittlung der Lastverluste des Transformators bei Belastung mit überschwingungsbehaftetem Strom

Die Lastverluste des Transformators werden üblicherweise unterteilt in Verluste, die mit Gleichstrom gemessen werden (I^2R -Verluste), und zusätzlich in Wirbelstromverluste in Wicklungen und Wicklungsverbindungen sowie in Zusatzverluste in leitfähigen Bauteilen des Transformators.

Bei Transformatoren mit Niederspannungs-Hochstrom-Wicklungen im Bereich von einigen Kiloampere erfordern die inneren Hochstromverbindungen eine gesonderte Analyse der zusätzlichen Wirbelstromverluste. Folgende Festlegungen liegen dieser Norm zugrunde:

- a) Wicklungsverbindungen und leitfähige Abschirmungen hoher Leitfähigkeit wie aus Kupfer oder Aluminium sind lineare Elemente. Ihre Wirbelverluste ändern sich proportional zum Quadrat des Stromes:

$$P(I) = \text{Konstante} \cdot I^2 \quad (2)$$

- b) Eine ähnliche Beziehung gilt für magnetische Abschirmungen aus Kernblechen, sofern im nicht gesättigten Bereich betrieben:

$$P(B) = \text{Konstante} \cdot B^2 \quad (3)$$

Dabei ist B die Flussdichte in der magnetischen Abschirmung.

- c) Für Zusatzverluste in Stahlbauteilen darf ebenfalls die quadratische Beziehung mit ausreichender Genauigkeit verwendet werden:

$$P(B) = \text{Konstante} \cdot B^2 \quad (4)$$

Dabei ist $B^2 = \text{Konstante} \cdot I^2$.

Im Normalbetrieb ist der Laststrom des Stromrichtertransformators nicht sinusförmig. Wenn er in eine Fourier-Reihe transformiert wird, weist er eine Anzahl von Oberschwingungsströmen beträchtlicher Größe auf. Diese Oberschwingungsströme verursachen Wirbelstromverluste und Streuflussverluste, und erhöhen den mit rein sinusförmigem Strom errechneten oder gemessenen Gesamtverlust deutlich.

Eine Korrektur auf den höheren Verlustwert bei nichtsinusförmiger Stromrichterbemessungsbelastung ist erforderlich für die thermische Dimensionierung des Transformators und für die richtige Verlust- und Wirkungsgradberechnung der gesamten Stromrichteranlage. Die Oberschwingungen sind vom Käufer vor Bestellung anzugeben. Die Angabe muss den Effektivwert in Ampere und die Phase in Grad jeder Oberschwingung für jede der Transformatorwicklungen, die an Anschlüsse geschaltet sind, ausweisen.

Der Transformatorhersteller verfügt nicht über notwendige Informationen und das Wissen, den Oberschwingungsstrom, der vom den Stromrichter erzeugt wird, vorauszusagen. Der Käufer trägt die Verantwortung, die Oberschwingungen, für die der Transformator auszulegen ist, anzugeben, während der Transformatorhersteller für die Konstruktion des Transformators unter Berücksichtigung der spezifizierten Oberschwingungen verantwortlich ist.

Es ist notwendig, dass die Oberschwingungen des Stroms bei Bemessungsbelastung vom Käufer vor Bestellung angegeben oder bestätigt werden. In der Vergangenheit konnten, wenn spezifische Informationen nicht verfügbar waren, Oberschwingungen gemäß 3.6.2 und/oder 3.6.4 der IEC 60146-1-2 hergeleitet werden. Gegenwärtige Entwicklungen in der Elektronik ermöglichen die Anwendung von Echtzeit-Steuertechniken, die das Verhalten des Stromrichters bedeutend verändern. Das resultiert darin, dass ein eindeutiges Verhältnis zwischen der Leistungsschaltungskonfiguration des Stromrichters und ihrer Impulszahl, und damit der Wert der Oberschwingungsströme, ungewiss ist und die tatsächlichen Oberschwingungsströme von den gemäß 3.6.2 und/oder 3.6.4 der IEC 60146-1-2 errechneten stark abweichen können.

In jedem Falle müssen die in der Konstruktion des Transformators zu verwendenden Oberschwingungsstromkomponenten eindeutig definiert und dem Transformatorhersteller vor Bestellung vom Käufer mitgeteilt werden. Es liegt in der Verantwortung des Käufers zu entscheiden, ob Oberschwingungen, die gemäß 3.6.2 und/oder 3.6.4 der IEC 60146-1-2 spezifiziert wurden, oder vom Transformatorhersteller vorgeschlagene Oberschwingungen akzeptabel sind.

Die folgenden Regeln werden für die Berechnung der Verlustwerte unter der festgelegten Stromrichterbelastung aus den während der Prüfung gemessenen Verlusten angegeben.

Liste der Variablen und ihrer Beziehungen zueinander:

I_L	Effektivwert des nichtsinusförmigen Klemmenstroms eines Transformators
I_{LN}	I_L bei Bemessungslast des Stromrichters
I_{PN}	Effektivwert des nichtsinusförmigen Primärphasenstroms bei Bemessungsbelastung
I_{SN}	Effektivwert des nichtsinusförmigen Sekundärphasenstroms bei Bemessungsbelastung
I_{PT}	Effektivwert des primärseitigen Phasenstroms während der Messung der Lastverluste (erste Näherung für die Einspeisung der Gesamtverluste)
I_{ST}	Effektivwert des sekundärseitigen Phasenstroms (6 Phasen) während der Messung der Lastverluste
I_{WN}	Effektivwert des Bemessungsstroms in der zu prüfenden Wicklung
I_h	Effektivwert des Oberschwingungsstroms mit der Ordnungszahl h
I_P	Sinusförmiger Primärphasenstrom mit einem Effektivwert gleich I_{PN}
I_S	Sinusförmiger Sekundärphasenstrom mit einem Effektivwert I_{SN}
I_1	Effektivwert des Grundschwingungsstroms bei Bemessungsbelastung (d. h. gleich dem Bemessungsstrom des Transformators)
I_{1P}	Effektivwert des primärseitigen Grundschwingungs-Phasenstroms des Transformators
I_{1S}	Effektivwert des sekundärseitigen Grundschwingungs-Phasenstroms des Transformators
I_{eq}	Effektivwert des äquivalenten sinusförmigen Prüfstroms zur Bestimmung der Wicklungserwärmung
I_{dN}	Bemessungswert des Gleichstroms
I_{1v}	Effektivwert der Grundschwungung des Ventilstroms
I_{0v}	Wert des Gleichstroms des Ventilstroms
U_{d0}	Vereinbarte Gleichspannung im Leerlauf
U_{di}	Idealgleichspannung im Leerlauf
U_{v0}	Außenleiterspannung des Stromrichters, netzseitig, oder des Transformators, ventileitig, im Leerlauf
h	Oberschwingungs-Ordnungszahl
P_0	Leerlaufverluste bei Bemessungsspannung
P_N	Belastungsverluste des Transformators bei I_{LN}
P_1	Belastungsverluste des Transformators bei I_1
P_W	Wicklungsverluste bei I_L
P_{Wh}	Wicklungsverluste bei I_h
P_{W1}	Wicklungsverluste bei I_1
P_{WP}	Primärwicklungsverluste bei I_{LN}

P_{WS}	Gesamte Sekundärwicklungs- und zugehörige Sammelschienenverluste bei I_{LN}
P_{WE}	Wicklungswirbelstromverluste bei I_L
P_{WEh}	Wicklungswirbelstromverluste bei I_h
P_{WE1}	Wicklungswirbelstromverluste bei I_1
P_{WE1h}	Wicklungswirbelstromverluste bei I_1 , Grundschiwingung und Form des Streufeldes identisch mit dem durch I_h erzeugten
P_C	Verluste in den Verbindungen bei I_L
P_{Ch}	Verluste in den Verbindungen bei I_h
P_{C1}	Verluste in den Verbindungen bei I_1
P_{CE}	Wirbelstromverluste in den Verbindungen bei I_L
P_{CEh}	Wirbelstromverluste in den Verbindungen bei I_h
P_{CE1}	Wirbelstromverluste in den Verbindungen bei I_1
P_{SE}	Zusatzverluste in den Bauteilen bei I_L
P_{SE1}	Zusatzverluste in den Bauteilen bei I_1
$P_A, P_{A1}, P_{A2}, P_B, P_{B1}, P_{B2}, P_C$	sind die unter Kurzschlussbedingungen der ventileitigen Anschlüsse A, A1, A2, B, B1, B2 und C, siehe Tabelle 1, gemessenen Kurzschlussverluste.
$e_{XA}, e_{XA1}, e_{XA2}, e_{XB}, e_{XB1}, e_{XB2}, e_{XC}$	sind die unter Kurzschlussbedingungen der ventileitigen Anschlüsse A, A1, A2, B, B1, B2 und C, siehe Tabelle 1, gemessenen Kurzschlussimpedanzen.
R_W	Gleichstromwiderstand der Wicklungen
R_C	Gleichstromwiderstand der Verbindungen
F_{WE}	Wirbelstromverlust-Erhöpfungsfaktor für Wicklungen (siehe Anhang A)
F_{CE}	Wirbelstromverlust-Erhöpfungsfaktor für Anschlüsse (siehe Anhang A)
F_{SE}	Zusatzverlust-Erhöpfungsfaktor für Bauteile (siehe Anhang A)
K_{WE}	Wirbelstromverlust-Erhöpfungsfaktor für Wicklungen bei Grundfrequenz (siehe Anhang A)
S_V	Bemessungsleistung der Ventilwicklungen. Ihr Wert ist das Produkt von S_R und dem Leistungsquotienten aus Tabelle 1.
S_R	Bemessungsleistung der netzseitigen Wicklung des Stromrichtertransformators. Sie beruht auf den Grundschiwingungen von Spannung und Strom.
x	Exponent, der bei der Berechnung von Wirbelstrom- und Zusatzverlust-Erhöpfungen auf die Oberschiwingungs-Ordnungszahl anzuwenden ist.

$$I_L^2 = \sum_1^n I_h^2 \quad (6)$$

$$P_{WE} = \sum_1^n P_{WEh} = F_{WE} \cdot P_{WE1} = P_W - R_W \cdot I_L^2 \quad (7)$$

R_W ist dabei netzseitig betrachtet.

$$P_{WE1} = P_{W1} - R_W \cdot I_1^2 \quad (8)$$

$$P_{WEh} = P_{WE1} \cdot \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^2 \cdot \left(\frac{P_{WE1h}}{P_{WE1}} \right) \quad (9)$$

Dabei ist $\left(\frac{P_{WE1h}}{P_{WE1}} \right)$ gleich 1, wenn I_h ein magnetisches Streufeld der gleichen Form wie das von I_1 erzeugte generiert.

$$F_{WE} = \sum_1^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^2 \cdot \left(\frac{P_{WE1h}}{P_{WE1}} \right) \quad (10)$$

$$P_{CE} = \sum_1^n P_{CEh} = F_{CE} \cdot P_{CE1} = P_C - R_C \cdot I_L^2 \quad (11)$$

R_C ist dabei netzseitig betrachtet.

$$P_{CE1} = P_{C1} - R_C \cdot I_1^2 \quad (12)$$

$$F_{CE} = \sum_1^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^{0,8} \quad (13)$$

$$F_{SE} = F_{CE} \quad (14)$$

$$K_{WE} = \frac{P_{WE1}}{R_W \cdot I_1^2} \text{ (je Einheit)} \quad (15)$$

Der Lastverlust bei Bemessungsstrom I_1 des Transformators wird unterteilt in die folgenden Anteile:

- i) $I_1^2 R$ -Gleichstromverluste in Wicklungen und Verbindungen R_W und R_C (gemessen);
- ii) Wirbelstromverluste in Wicklungen P_{WE1} (berechnet);
- iii) Wirbelstromverluste in Hochstrom-Sammelschienen, falls vorhanden P_{CE1} (abgeleitet);
- iv) Zusatzverluste induziert in Stahlbauteilen P_{SE1} (abgeleitet).

Die Summe $P_{CE1} + P_{SE1}$ ist der Wert, der sich nach dem Subtrahieren der Werte nach i) und ii) vom gemessenen Gesamtverlust ergibt.

Es gelten die folgenden Beziehungen:

$$\begin{aligned} P_1 &= I_1^2 (R_W + R_C) + P_{WE1} + P_{CE1} + P_{SE1} \\ P_N &= I_{LN}^2 (R_W + R_C) + P_{WE} + P_{CE} + P_{SE} \\ &= I_{LN}^2 (R_W + R_C) + F_{WE} + P_{WE1} + F_{CE} \times P_{CE1} + F_{SE} + P_{SE1} \end{aligned} \quad (16)$$

ANMERKUNG 1 Die Summe von P_{CE1} und P_{SE1} wird mit dem gleichen Faktor $F_{CE} = F_{SE}$ erhöht, um die Verluste bei nichtsinusförmiger Bemessungsbelastung des Stromrichters zu errechnen.

ANMERKUNG 2 Verschiedene Wicklungen eines Stromrichtertransformators dürfen unterschiedliche Werte für die Bemessungsleistung und ein unterschiedliches Verhältnis zwischen $I^2 \cdot R$ und den Wirbelstromverlusten aufweisen. Die

entsprechenden Komponenten der o. g. Gleichung sollten deshalb als die Summe der Werte, die für jede Wicklung einzeln berechnet werden, angesehen werden.

ANMERKUNG 3 Widerstandsmessungen, besonders wenn die Sekundärspannung niedrig und der Sekundärstrom hoch ist, können aus folgenden Gründen zu Ungenauigkeiten führen:

- a) Schwierigkeiten beim Messen von kleinen Widerständen;
- b) Einfluss der Kurzschlussvorrichtung.

Im Falle mehrerer Aktivteile im selben Kessel, sind oben genannte Mengen für jeden einzelnen Aktivteil mit dem ihm eigenen Oberschwingungsstrom zu berechnen.

5.2 Stromaufteilung, Verluste und Heißpunkt in Hochstromwicklungen

Ventilwicklungen in Stromrichtertransformatoren für Industrieanwendungen haben charakteristischerweise oft eine geringe Anzahl von Windungen und große Bemessungsströme (von mehreren kA und darüber). Oftmals ist die Konsequenz daraus, dass die Ventilwicklung aus verschiedenen parallelgeschalteten Spulen hergestellt werden muss.

Immer wenn eine Wicklung aus parallelgeschalteten Spulen besteht, wird die Aufteilung des gesamten Wicklungsstroms auf die Spulen von der Selbst- und der wechselseitig bedingten Reaktanz jeder Spule und durch die Aufladung anderer Wicklungen beeinflusst. Generell weisen Spulen, die radialem Streufluss ausgesetzt sind, einen höheren Strom auf als Spulen, die lediglich axialem Streufluss ausgesetzt sind.

Typische Stromwerte für Spulen, die an den Enden einer Ventilwicklung angeordnet sind, können den 1,2- bis 1,7-fachen Stromwert im Vergleich zu einer vollkommen gleichen Aufteilung unter den Spulen haben. Außerdem ist zu beachten, dass die Stromaufteilung unter den Wicklungsdrähten, die die Windungen dieser überlasteten Spulen sind, auch ungleich ist (sofern nicht gleiche Stromaufteilung unter den Wicklungsdrähten durch Verwendung von Drillleitern erreicht wird).

Das bedeutet, dass diese Wicklungen eine Differenz zwischen dem Heißpunkt- und dem mittleren Temperaturanstieg aufweisen, der bedeutend höher sein kann als der anderer Wicklungen.

Daher kann ein einfacher Heißpunkt-Faktor nicht angesetzt werden, und Lastverluste müssen genau berechnet werden. Insbesondere ist vom Hersteller zu berechnen:

- 1) die durch ungleiche Stromaufteilung unter den Spulen, die die Hochstromwicklungen ausmachen, verursachte I^2R -Verluste.
- 2) die durch ungleiche Stromaufteilung unter den Wicklungsdrähten, die die Windungen jeder Spule ausmachen, verursachte I^2R -Verluste.
- 3) Wirbelstromverluste in jedem einzelnen Wicklungsdraht, der die Windungen jeder Spule ausmacht.

Diese Berechnungen können mittels Magnetfeldsimulationen, die sowohl die Schaltungen zwischen den verschiedenen Spulen und Wicklungen im Transformator als auch die sinusförmige Änderung des Stroms gegen Zeit betrachten, durchgeführt werden.

Es besteht die Notwendigkeit einer Simulation pro Streufeldmuster (siehe folgender Abschnitt).

5.3 Wirkung der magnetischen Kopplung der Wicklungen auf deren Wirbelstromverluste infolge der Oberschwingungen in Transformatoren mit drei oder mehr Wicklungen auf demselben Kernschenkel

Bei Transformatoren mit zwei Wicklungen sind die Amperewindungen ausgeglichen, wenn man den magnetisierten Strom vernachlässigt. Die Oberschwingungsströme der Ventilwicklung werden durch Oberschwingungsströme (mit derselben Stärke je Einheit) der Netzwicklung ausgeglichen; deshalb ist der Erhöhungsfaktor des Wirbelstromverlustes bei Netz- und Ventilwicklungen gleich.

Bei Transformatoren mit drei Wicklungen ist bekannt, dass die Summe der Amperewindungen aller Wicklungen null ergibt und es deshalb notwendig ist, genau zu bedenken, wie der Erhöhungsfaktor der Wirbelstromverluste jeder Wicklung zu berechnen ist.

Es können folgende Strukturen von Transformatoren mit drei Wicklungen festgestellt werden, unterschieden durch ihre Kopplung zwischen den Ventilwicklungen:

- 1) enge Kopplung – zwei verschachtelte Ventilwicklungen und eine Netzwicklung;
- 2) keine Kopplung – zwei Paar Wicklungen (Netz – Ventil), getrennt durch ein Zwischenjoch oder zu zwei separaten Kernen gehörig;
- 3) lose Kopplung –
 - i) Doppelkonzentrischer Transformator mit einer radial zwischen zwei Ventilwicklungen befindlichen Netzwicklung;
 - ii) zwei parallel geschaltete Netzwicklungen, eine über der anderen, jede Netzwicklung einer Ventilwicklung gegenüber.

Nach Messung der Oberschwingungsströme aller drei Transformatoranschlüsse ist es möglich zu beobachten, dass einige Oberschwingungen, die in die Ventilwicklung eingespeist werden, als identischer Wert je Einheit im Netz erscheinen, andere Oberschwingungen jedoch nicht auf der Netzseite auftreten.

Deshalb ist es möglich, die in die Ventilwicklungen eingespeisten Oberschwingungen in zwei Gruppen zu unterteilen:

- 1) gleichphasige Oberschwingungen – keine Phasenverschiebung tritt zwischen diesen in den Ventilwicklungen fließenden Oberschwingungen auf; sie summieren sich und erscheinen auf Netzseite;
- 2) gegenphasige Oberschwingungen – eine Phasenverschiebung von 180° tritt zwischen diesen in den Ventilwicklungen fließenden Oberschwingungen auf; sie kürzen sich und erscheinen nicht auf Netzseite¹⁾

Gleichphasige Oberschwingungsströme tragen immer zum Gesamtwert der Wirbelstromverluste bei.

Für gegenphasige Oberschwingungsströme gilt folgendes:

enge Kopplung – gegenphasige Oberschwingungen werden zwischen den verschachtelten Ventilwicklungen ausgeglichen; sie produzieren einen vernachlässigbaren Streufluss, sodass sie nur I^2R -Verluste in den Ventilwicklungen hervorrufen (siehe Bild 1);

keine Kopplung – das Zwischenjoch trennt die Magnetkreise der beiden Ventil-Netz-Wicklungspaare voneinander; gegenphasige Oberschwingungen werden zwischen jedem Ventil-Netz-Wicklungspaar ausgeglichen, sodass sie I^2R - und Wirbelstromverluste sowohl in der Netz- als auch in der Ventilwicklung (siehe Bild 2) und Streuverluste in Bauteilen und der Netzwicklung produzieren;

lose Kopplung durch doppelkonzentrische Ventilwicklungen – gegenphasige Oberschwingungen fließen nicht in der Netzwicklung, da sie zwischen den Ventilwicklungen ausgeglichen werden, wo sie sowohl I^2R - und Wirbelstromverluste (siehe Bild 3) als auch Streuverluste in Bauteilen und der Netzwicklung produzieren;

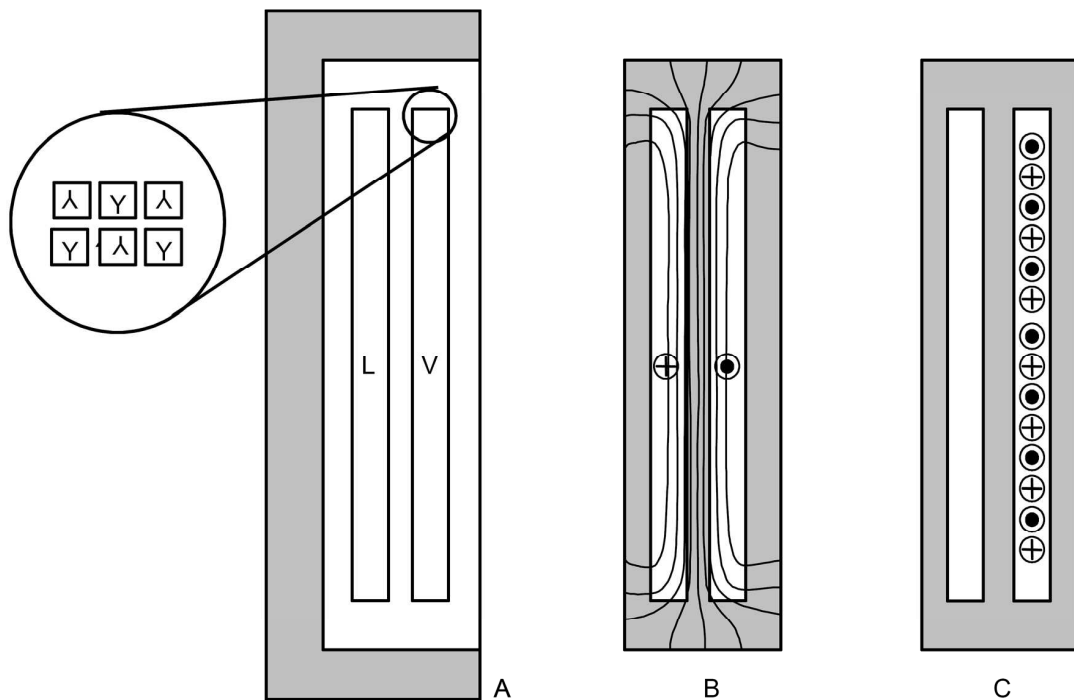
lose Kopplung durch zwei axial phasenverschobene und parallel geschaltete Netzwicklungen – gegenphasige Oberschwingungen werden fast vollständig zwischen jedem Ventil-Netz-Wicklungspaar ausgeglichen, sodass dieselben Überlegungen wie für „keine Kopplung“ (siehe Bild 4) für die Berechnung von K_{WE} gelten. Die lokale Verlustverteilung kann jedoch grundlegend verschieden sein (siehe nachstehender Abschnitt).

Wenn Gleichrichter gegenphasige Oberschwingungen in die Ventilwicklungen des Transformators einspeisen und die Wicklungen, in die sie fließen, lose gekoppelt sind, so können die daraus resultierenden

¹⁾ Als ausgeglichene Oberschwingungen in einem Doppelstern-Einwegdiodengleichrichter oder Oberschwingungen mit $h = 6 \times K \pm 1$ (wobei K eine ungerade Ganzzahl gleich 1, 3, ..., n ist) in einem Y und Δ Zweiweg-12-Impuls-Gleichrichter.

magnetischen Streufelder (mit signifikanter Radialkomponente) unbeherrschbare lokale Verluste hervorrufen (z. B. auf Grund von Wirbelströmen in Wicklungsleitern und/oder ungleichmäßige Verteilung zwischen den parallel geschalteten Spulen, die die Hochstromwicklungen darstellen). Diese Betriebsbedingungen können nicht während des Erwärmungstests reproduziert werden. Deshalb sind, wenn vom Käufer gefordert, die Effekte der gegenphasigen Oberschwingungen in diesen Situationen mittels einer angemessenen Magnetfeldsimulation zu analysieren, um die vorgesehene Lösung zu bestätigen.

Ähnliche Überlegungen, basierend auf der gemeinsamen Kopplung der Wicklungen, sind anwendbar, wenn mehr als drei Wicklungen oder Manteltransformatoren betrachtet werden.



Legende

A – Wicklungsanordnung im Kernfenster

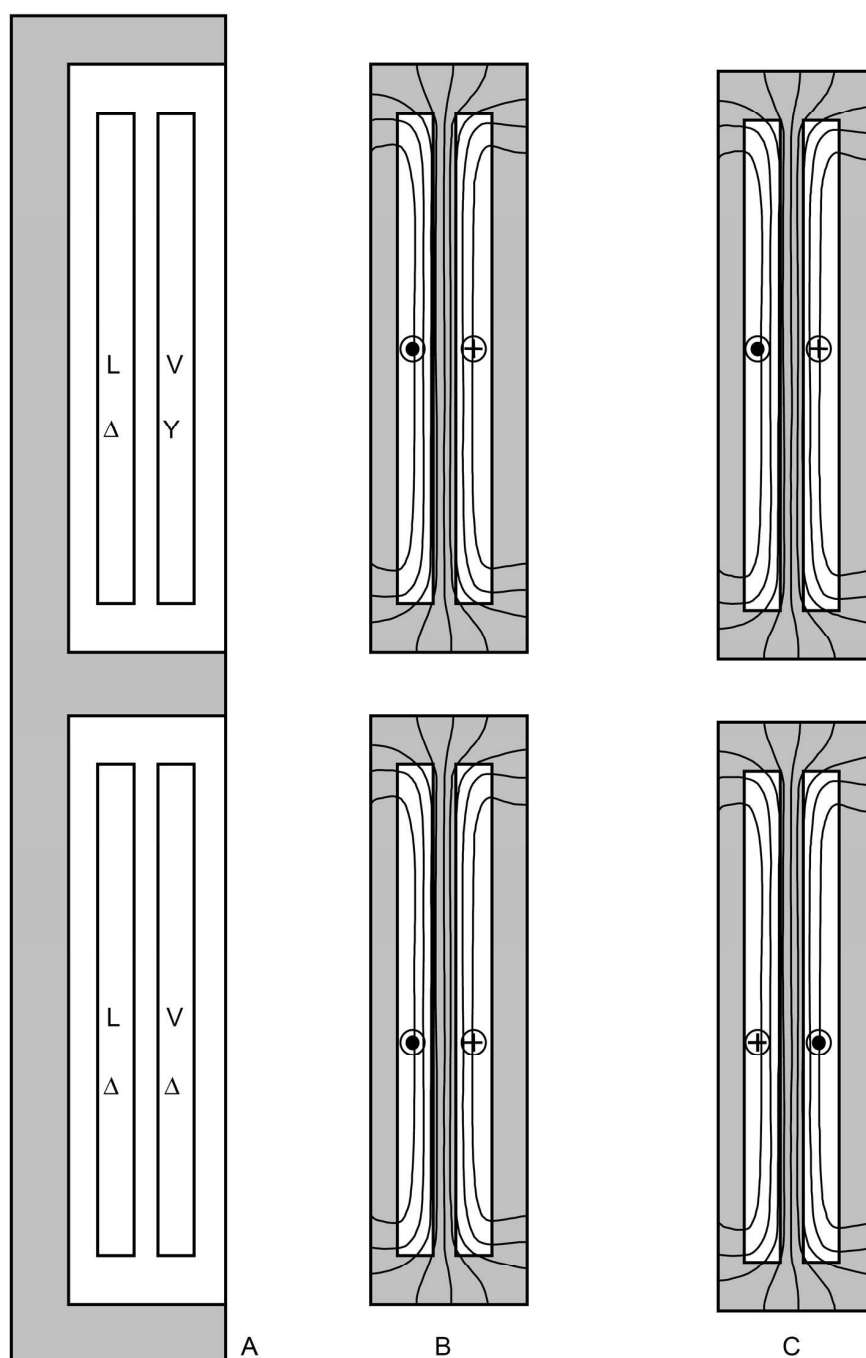
B – durch gleichphasige Oberschwingung produzierter Streufluss

C – durch Oberschwingung mit einer Phasenverschiebung von 180° produzierter Streufluss

L – Netzwicklung

V – verschachtelte Ventilwicklungen

Bild 1 – Streufelder eines Transformators mit drei Wicklungen mit eng gekoppelten Ventilwicklungen



Legende

A – Wicklungsanordnung im Kernfenster

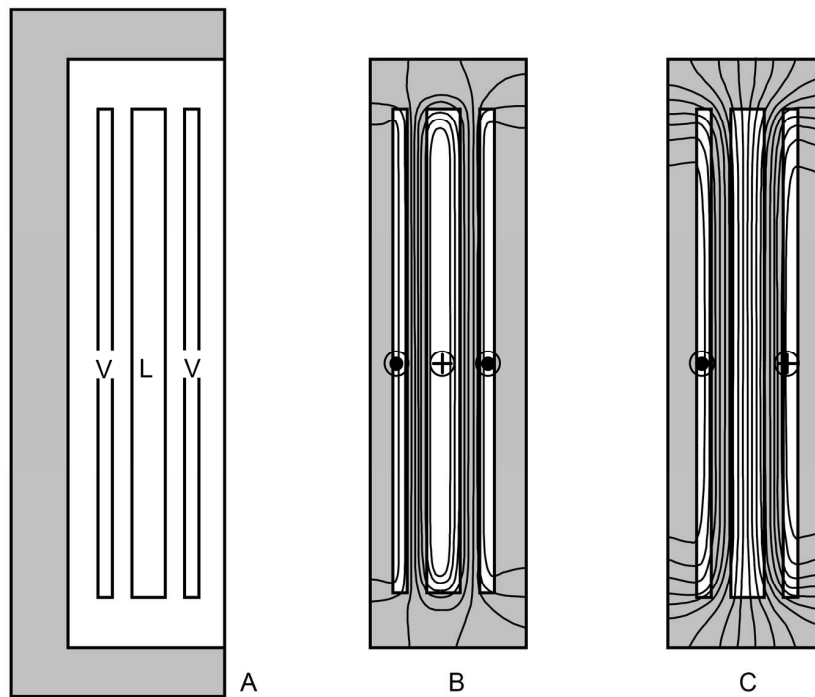
B – durch gleichphasige Oberschwingung produzierter Streufluss

C – durch Oberschwingung mit einer Phasenverschiebung von 180° produzierter Streufluss

L – Netzwicklung

V – Ventilwicklungen

Bild 2 – Streufelder eines Transformators mit drei Wicklungen mit entkoppelten Ventilwicklungen



Legende

A – Wicklungsanordnung im Kernfenster

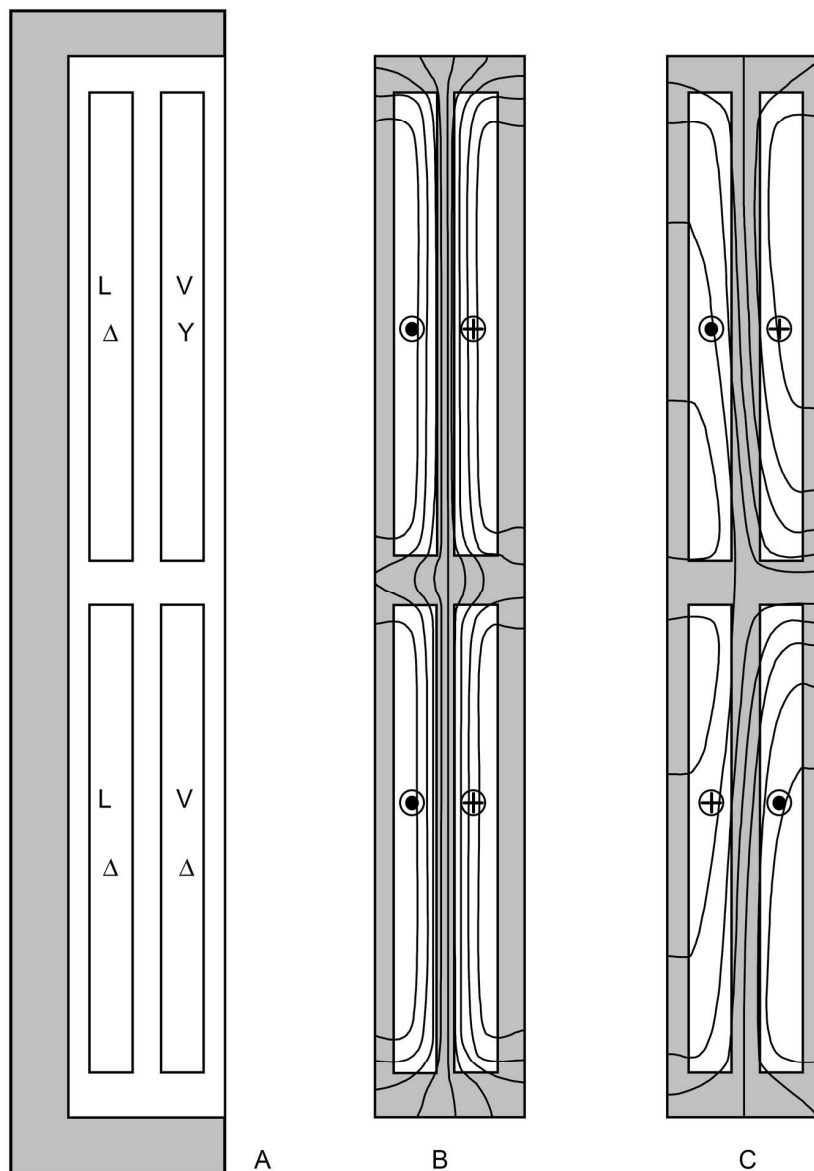
B – durch gleichphasige Oberschwingung produzierter Streufluss

C – durch Oberschwingung mit einer Phasenverschiebung von 180° produzierter Streufluss

L – Netzwicklung

V – Ventilwicklungen

Bild 3 – Streufelder eines Transformators mit drei Wicklungen mit lose gekoppelten doppelkonzentrischen Ventilwicklungen



Legende

A – Wicklungsanordnung im Kernfenster

B – durch gleichphasige Oberschwingung produzierter Streufluss

C – durch Oberschwingung mit einer Phasenverschiebung von 180° produzierter Streufluss

L – Netzwicklung

V – Ventilwicklungen

Bild 4 – Streufelder eines Transformators mit drei Wicklungen mit lose gekoppelten Doppelstock-Ventilwicklungen

5.4 Verluste in Saugdrosseln, stromausgleichenden Drosselspulen, Reihenglättungsdrosseln und Transduktoren

Wenn Saugdrosseln, stromausgleichende Drosselspulen, Reihenglättungsdrosseln und Transduktoren Bestandteile eines Transformators zum Anschluss an einen statischen Stromrichter sind, sind die Verluste dieser Komponenten wie nachfolgend festgelegt abzuleiten.

ANMERKUNG Die in diesem Abschnitt festgelegten Regeln enthalten nicht Festlegungen für einzelne Betriebsmittelkomponenten im Sinne einer Norm.

5.4.1 Saugdrosseln

Die Eisenverluste sind bei einer Frequenz gleich der üblichen Betriebsfrequenz der Saugdrossel vom Hersteller zu messen sowie bei einer Spannung, die so berechnet wird, dass der Magnetfluss sichergestellt ist, der dem Betrieb des Stromrichters bei Bemessungsstrom und -spannung und bei festgelegter Anschnittsteuerung entspricht. Wenn die Betriebsfrequenz nicht erreicht werden kann, darf der rechnerische Verlustwert verwendet werden.

Die Verluste in der Wicklung sind als Produkt des Gleichstromwiderstands und des Quadrats des Gleichstroms in der Wicklung zu berechnen.

5.4.2 Stromausgleichende Drosselspulen

Die Eisenverluste in stromausgleichenden Drosselspulen sind gering und dürfen ignoriert werden.

ANMERKUNG Die Verluste in der Wicklung sind entweder Teil der Stromrichterverlustmessung oder sind als Produkt des gemessenen Gleichstromwiderstands und des Quadrats des Effektivwerts des Wicklungsstroms berechnet.

5.4.3 Reihenglättungs-drosseln

Generell ist auf IEC 60076-6 zu verweisen.

Die Eisenverluste, die durch Oberschwingungs-Wechselstromanteil verursacht werden, sind gering und dürfen vernachlässigt werden.

ANMERKUNG Die Verluste in der Wicklung sind entweder Teil der Stromrichterverlustmessung oder werden als Produkt des Gleichstromwiderstands und des Quadrats des Gleichstroms in der Wicklung berechnet.

5.4.4 Transduktoren

Transduktoren sind Bauteile die eine stufenlose Regelung der vom Gleichrichter erzeugten Spannung innerhalb eines bestimmten Bereichs ermöglichen. Sie werden für gewöhnlich in Verbindung mit auf Wechselstrom-Gleichstromdioden basierenden Stromrichtern benutzt.

Die Spannungsregulierung wird durch Steuerung des Sättigungszustands in Gruppen magnetischer Kerne mittels Überlagerung des Laststroms und der polarisierenden Gleichstromamperewindungen erreicht. Diese polarisierenden Gleichstromamperewindungen werden mittels eines Steuerkreises mit oder ohne zusätzlichen Vorspannungskreis erreicht. Die Regulierung wird durch Variieren des „Steuer“-stroms durchgeführt. Die Wahl zwischen nur Steuerkreis oder Steuerkreis und Vorspannungskreis hängt von der Konstruktion des Stromrichtersteuersystems ab.

Zwei verschiedene Bauarten von Transduktoren finden in Stromrichtertransformatoren Verwendung:

- Kerngewickelt: Transduktoren dieses Typs sind auf der Hochspannungsseite des Stromrichtertransformators angebracht und in Reihe zu den Hochspannungswicklungen geschaltet.
- Durchgangsschiene: Transduktoren dieses Typs sind in dem Unterspannungsverbindungs-schienen-system des Stromrichtertransformators angebracht, und zwar so, dass jeder Transduktor zu jedem Stromrichterventilarm direkt in Reihe geschaltet ist. Sie basieren allgemein auf gewickelten Kernen.

Kerngewickelte Transduktoren haben folgende Verluste:

- Kernverluste: Die Verluste, die in dem Kernmaterial durch den kombinierten Effekt des Hauptwechselstroms und der Vorspannungs- und Steuergleichströme generiert werden. Zurzeit gibt es keine bestätigte Methode, die Kernverluste in Transduktorkernen direkt zu messen. Eine

Vereinbarung, wie diese abzuschätzen oder zu berechnen sind, ist vor Bestellung zwischen Käufer und Hersteller zu treffen.

- Lastverluste in den Wechselstromwicklungen des Transduktors: Diese sind bei Bemessungslast basierend auf dem Wicklungsgleichstromwiderstand bei Referenztemperatur und der Wicklungswirbelstromverluste bei Grundschiwingung zu berechnen und um den entsprechenden Faktor F_{WE} für Lastbetrieb mit Oberschwingungsbehaftetem Strom zu erhöhen.
- Streuverluste in Bauteilen des Transduktors: Diese sind bei Bemessungslast und Grundschiwingung basierend auf durch Erfahrung bestätigte Gleichungen zu berechnen und um den entsprechenden Faktor F_{SE} für Lastbetrieb mit Oberschwingungsbehaftetem Strom zu erhöhen.
- Verluste in den Vorspannungswicklungen: Diese sind bei Referenztemperatur auf Grundlage des gemessenen Gleichstromwiderstands und der Vorspannungsgleichströme zu berechnen.

Transduktoren des Durchgangsschienentyps haben folgende Verluste:

- Kernverluste: Die in den gewickelten Kernen durch den kombinierten Effekt des periodischen Einweg-Hauptstroms und der Vorspannungs- und Steuergleichströme hervorgerufenen Verluste. Zurzeit gibt es keine bestätigte Methode der direkten Messung der Kernverluste in Transduktorkernen. Eine Vereinbarung, wie diese abzuschätzen oder zu berechnen sind, ist vor Bestellung zwischen Käufer und Hersteller zu treffen.
- Lastverluste in Transduktorschienen: Diese sind bei Bemessungslast auf Grundlage des Schienengleichstromwiderstands bei Referenztemperatur und der errechneten Schienenwirbelstromverlustes bei Grundschiwingung zu berechnen und um den entsprechenden Faktor F_{CE} für Lastbetrieb mit Oberschwingungsbehaftetem Strom zu erhöhen.

Diese Verluste werden für gewöhnlich zusammen mit den Transformatorlastverlusten bewertet.

ANMERKUNG Bei DB-Stromrichtern unterscheidet sich das Oberschwingungsspektrum der Niederspannungsseite vom Stromspektrum der Transduktorschienen. Tatsächlich unterliegen Transduktoren, die zu Stromrichterventilen in Reihe geschaltet sind, einem Oberschwingungsspektrum, das ungerade und gerade Oberschwingungen einschließt. Deshalb ist bei der Bewertung des Sammelschienen-Erhöpfungsfaktors F_{CE} auf Grundlage des angemessenen Oberschwingungsspektrums Vorsicht walten zu lassen (siehe Beispiel A.4 im Anhang für Details).

- Streuverluste in Bauteilen des Transduktors: Diese sind in diesem Transduktortyp im Allgemeinen vernachlässigbar, da die Konstruktion die Anwesenheit metallischer Bauteile minimiert.
- Verluste in den Vorspannungs- und Steuerwicklungen: Diese sind bei Referenztemperatur auf Grundlage des gemessenen Gleichstromwiderstands und der Vorspannungs- und Steuergleichströme zu berechnen.

ANMERKUNG Bei Durchgangsschienentransduktoren sind diese Verluste im Allgemeinen im Vergleich zu anderen Größen gering, aber die Vorspannungs- und Steuerkreiswiderstandsmessung ist wichtig, um als Referenzwert für eine regelmäßige Überprüfung während der Lebensdauer des Transformators zu dienen.

5.5 Spannungsfall in Transformatoren und Drosselspulen

Der Gleichspannungsfall in Stromrichtertransformatoren oder Drosselspulen hängt von der entsprechenden Blind- und Wirkkomponente der Kurzschlussspannung ab:

- ohmsche Gleichspannungsänderung: Muss aus den Verlustmessungen mittels der in 3.5 der IEC 60146-1-1 gegebenen Gleichungen berechnet werden.
- induktive Gleichspannungsänderung: Muss aus den Impedanzmessungen mittels der in 3.5 der IEC 60146-1-1 gegebenen Gleichungen berechnet werden.

5.5.1 Transduktoren

Der Regelbereich des Transduktors kann mit Hilfe einer Kurve beschrieben werden, die mit der Bemessungsgleichstromlast des Stromrichters und dem variablen Steuerstrom nachvollzogen werden kann (siehe Bild 5). Transduktoren werden durch folgende Parameter bestimmt:

- maximaler Spannungsfall: Der Maximalwert des Gleichspannungsfalls, der vom Transduktor bei Bemessungsgleichstromlast des Stromrichters und dem festgelegten Wert des Steuerstroms hervorgerufen wurde. Der Wert hängt von den physischen und geometrischen Eigenschaften des Transduktorkerns ab.
- zugewiesene Spannungsänderung: Der lineare Teil der Transduktorregelkurve bei Bemessungsgleichstromlast des Stromrichters und den variablen Bemessungsströmen. Dies ist der Teil der Regelkurve, der innerhalb eines festgelegten Toleranzbereichs liegt.
- Restspannungsänderung: Der nicht-lineare Teil der Transduktorregelkurve bei Bemessungsgleichstromlast des Stromrichters und den variablen Bemessungsströmen. Dies ist die Differenz zwischen maximalem Spannungsfall und zugewiesener Spannung.

Alle oben beschriebenen Spannungsfälle stehen im Zusammenhang mit einem festgelegten Wert des Steuerstroms, der dokumentiert werden muss.

Der Käufer muss vor Bestellung anzugeben, welche oben genannten Größen garantiert werden müssen (normalerweise ist nur die zugewiesene Spannungsänderung garantiert). Dementsprechende Toleranzen der Messwerte garantierter Größen sind zwischen Käufer und Hersteller zu vereinbaren.

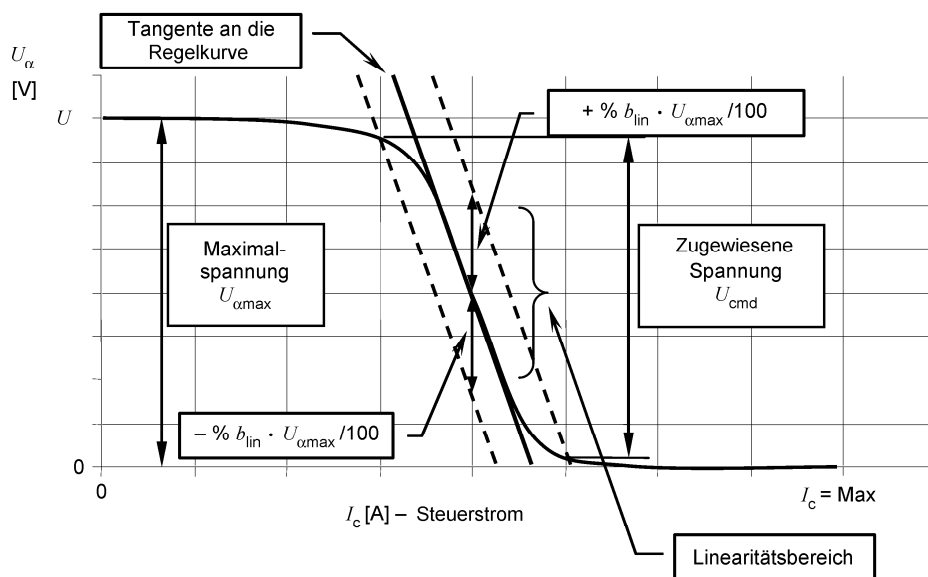


Bild 5 – Typische Transduktorregelkurve und Toleranzbereich
(mit maximalem Spannungsfall beim Steuerstrom null)

Das Verfahren zur Ermittlung der Regelkurve (für gewöhnlich „S-Kurve“ genannt), ist zwischen Hersteller und Käufer zu vereinbaren.

Wenn der Wert U_{cmd} garantiert ist, dann ist dieser gemäß dem folgenden Verfahren zur Festlegung des linearen Regelbereichs zu prüfen:

- Aus den Prüfdaten ist die Regelkurve zu zeichnen (für gewöhnlich „S-Kurve“ genannt).
- Die Tangente an die Kurve im Wendepunkt der „S-Kurve“ einzeichnen.
- Die beiden Linien, die parallel zur Tangente verlaufen und die den gewünschten Linearitätsbereich begrenzen, einzeichnen:

$$band_{lin} = \pm \% b_{lin} \cdot U_{\alpha} / 100$$

- Die beiden Schnittpunkte des Linearitätsbereichs mit der „S-Kurve“ ergeben den Wert der zugewiesenen Spannung U_{cmd} .

Der Prozentwert des Linearitätsbereichs % b_{lin} muss zwischen Hersteller und Käufer vereinbart werden. Ein allgemein akzeptierter Wert für diesen Parameter ist:

$$\% b_{lin} = 15 \%$$

Ein allgemein anerkanntes Verfahren zur Berechnung des Spannungsfalls des Transduktors basiert auf den folgenden Gleichungen:

$$U_{\alpha} = 6 \cdot f \cdot S_r \cdot B \quad \text{für Doppelsterngleichrichter}$$

oder

$$U_{\alpha} = 12 \cdot f \cdot S_r \cdot B \quad \text{für Doppelbrückengleichrichter.}$$

Dabei ist

B der Induktionswert (Tesla);

U_{α} die vom Transduktor in die Gleichspannungsseite eingebrachter Spannungsfall (V);

f die Frequenz (Hz);

S_r der Nettowert der Querschnittsfläche des Transduktorkerns (m²);

$U_{\alpha max}$ bezieht sich auf die Induktion des Sättigungswerts B_s .

Die S-Kurve und der entsprechende Wert von U_{cmd} werden unter Zuhilfenahme der B-H-Kennlinie des Transduktorkernmaterials ermittelt.

ANMERKUNG Der Wert U_{cmd} , wenn garantiert, muss spätestens bei der Werksabnahmeprüfung festgelegt werden (entweder durch Berechnungen oder spezielle Prüfungen).

6 Prüfungen für Stromrichtertransformatoren

Wenn in diesem Abschnitt nicht anders festgelegt, sind alle Prüfungen nach IEC 60076-1, IEC 60076-2 und IEC 60076-3 für Öltransformatoren und nach IEC 60076-11 für Trockentransformatoren durchzuführen.

Die Transformatorprüfungen sind unterteilt in Stück-, Typ- und Sonderprüfungen nach IEC 60076-1, 10.1.1, 10.1.2 und 10.1.3, für Öltransformatoren und IEC 60076-11, Abschnitt 5, für Trockentransformatoren.

Besteht die Notwendigkeit der Messung der Kurzschlussimpedanz zwischen zwei Ventilwicklungen, so ist es eventuell nicht möglich, 50 % des Bemessungsstroms zu erreichen. Die Messung wird mit dem höchsten, vom Prüfgerät zulässigen Strom durchgeführt. Die Toleranz der Messung muss mit dem Käufer abgestimmt werden. Bei verschachtelten Ventilwicklungen ist die Kurzschlussimpedanz zwischen ihnen vernachlässigbar.

6.1 Messung der Kommutierungsreaktanz und Bestimmung des induktiven Spannungsfalls

6.1.1 Kommutierungsreaktanz

Um die Kommutierungsreaktanz zu messen, sind die netzseitigen Anschlüsse des Transformators kurzzuschließen. Ein Wechselstrom mit Grundfrequenz, wie in Punkt b) von 6.1.2 festgelegt, ist durch zwei aufeinanderfolgende Phasen derselben Kommutierungsgruppe der Ventilwicklung zu leiten, und es ist die Spannung zwischen diesen Anschlüssen zu messen. Die Kommutierungsreaktanz $2 \cdot X_t$ ist gleich der induktiven Komponente der Impedanz, die aus dieser Messung berechnet wird. Es sind mindestens zwei Prüfungen mit verschiedenen Phasenpaaren in jeder Kommutierungsgruppe durchzuführen. Das arithmetische Mittel dieser Messungen ist als Wert der Kommutierungsreaktanz zu verwenden.

Wenn die gleiche Netzwicklung eine Kommutierungsgruppe speist, die parallel oder in Reihe geschaltet ist die gleichzeitig kommutiert, sind die Wicklungen, die zu diesen Gruppen gehören, für die oben genannten Prüfungen phasenweise parallel zu schalten.

Eine Abschätzung der Kommutierungsreaktanz kann wie folgt mit Hilfe der Ergebnisse der Transformatorimpedanzprüfung getroffen werden:

Die drei Phasen der Zell-(Ventil-)wicklung werden kurzgeschlossen. Die Kurzschlussimpedanz wird netzseitig gemessen (mit Bezug auf die Bemessungsleistung der Ventilwicklung). Die Kommutierungsreaktanz X_t ist gleich der induktiven Komponente der netzseitig gemessenen Kurzschlussimpedanz (in Prozent) multipliziert mit dem Quadrat der Spannung Phase – Phase der Ventilwicklung, dividiert durch die Leistung der Ventilwicklung.

Die drei Phasen der Ventilwicklung werden kurzgeschlossen. Die Kurzschlussimpedanz in Prozent wird netzseitig gemessen und auf die Bemessungsleistung und -spannung der Ventilwicklung bezogen. Die Kommutierungsreaktanz X_t ist gleich der induktiven Komponente der Kurzschlussimpedanz.

6.1.2 Induktive Spannungsänderung

Die induktive Spannungsänderung ist durch eines der folgenden zwei Verfahren zu bestimmen:

a) Berechnung mit der Gleichung

$$d_{xtN} = \frac{\delta \cdot p \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot g} \cdot X_t \cdot \frac{I_{dN}}{U_{di0}} \quad (17)$$

b) Messung wie in 6.1.1 beschrieben, mit einem Effektivwert des Stroms von

$$\frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \frac{\delta}{g} \cdot I_{dN} \quad (18)$$

Dabei ist

g die Anzahl der Kommutierungsgruppen auf die I_{dN} aufgeteilt wird;

I_{dN} der Bemessungsgleichstrom;

p die Kommutierungszahl;

s die Anzahl der in Reihe geschalteten Kommutierungsgruppen;

U_{di0} die ideale Leerlaufgleichspannung;

δ die Anzahl der Kommutierungsgruppen, die gleichzeitig primärseitig kommutieren.

In diesem Fall stellt die induktive Komponente der Speisespannung, ausgedrückt in Anteilen der Bemessungsspannung, zwischen den Anschlüssen U_{V0} , die induktive Spannungsänderung d_{xt1} dar.

Für die in Tabelle 1 dargestellten Schaltungen kann die induktive Spannungsänderung aus den Ergebnissen der Sekundär-Kurzschlussprüfungen errechnet werden, welche in der letzten Spalte festgelegt sind, mit Ausnahme der Schaltungen 9 und 12. Für diese Schaltungen wird die in 6.1.1 festgelegte Kurzschlussprüfung empfohlen (siehe 1.5.4 von IEC 60146-1-2).

6.2 Messung von Übersetzungsverhältnis und Phasenverschiebung

Gemäß der IEC 60076-1 ist das Übersetzungsverhältnis in jeder Schalterstellung zu messen. Stromrichtertransformatoren können jedoch eine sehr große Anzahl von Schalterstellungen haben. Für diesen Fall können Hersteller und Käufer eine Übereinkunft treffen, dass nur ein Teil der Schalterstellungen geprüft wird (z. B. ist es bei vorhandenen Grob- und Feineinstellungsmöglichkeiten ausreichend, jede Feineinstellung einer festen Grobeinstellung zu prüfen und dann nur eine Prüfung pro verbleibender Grobeinstellungsmöglichkeit durchzuführen).

Toleranzen des Übersetzungsverhältnisses in Schalterstellungen, außer der Nennstellung, und der Phasenlage in allen Schalterstellungen sollten zwischen Hersteller und Besteller vor Bestellung vereinbart werden. Ohne eine solche vorherige Vereinbarung zwischen Besteller und Hersteller ist für die Toleranz der Phasenlage der Wert $\pm 0,5^\circ$ zu verwenden.

Die Messung des Übersetzungsverhältnisses und der Phasenverschiebung kann mit Hilfe einer der folgenden Verfahren durchgeführt werden (siehe Anhang H):

- a) Messung der Übersetzung;
- b) Oszilloskopmessung.

Bei der Oszilloskopmessung wird die Phasenverschiebung mit der Abtastrate und der Auflösung der Messinstrumente gemessen, wohingegen die Messung des Übersetzungsverhältnisses unabhängig von der Auflösung des zur Prüfung der Phasenverschiebung benötigten Gerätes ist. Deshalb wird Methode a) empfohlen.

ANMERKUNG Falls Transduktoren verwendet werden, sollten Käufer und Hersteller vereinbaren, wie die Polarität und das Verhältnis der Transduktorspannung und des Kontrollstromkreises überprüft werden sollen.

6.3 Dielektrische Prüfungen

Für einzelne Aktivteile sind dielektrische Prüfungen gemäß der IEC 60076-3:2000 durchzuführen.

Für Gleichrichtertrafos mit mehr als einem Aktivteil im gleichen Kessel ist die verkettete Spannung der Primär- und Sekundäranschlüsse die Referenzspannung zur Festlegung der dielektrischen Prüfung. Oft ist es nicht möglich, Zwischenkreiswicklungen in formeller Übereinstimmung mit der IEC 60076-3:2000 zu prüfen. Deshalb ist zwischen dem Lieferanten und dem Käufer vor Bestellung zu vereinbaren, ob und welche Prüfungen weggelassen oder angepasst werden müssen. Falls Zwischenkreiswicklungen geprüft werden, so wird deren Isolationsgrad auf dem Typenschild angegeben. Wenn Transduktoren verwendet werden, sollten diese zum Zeitpunkt der dielektrischen Prüfungen vollständig montiert sein.

6.3.1 Dielektrische Prüfung zwischen verschachtelten Ventilwicklungen

Die dielektrische Widerstandsfähigkeit verschachtelter Ventilwicklungen ist wie folgt zu prüfen:

- a) dielektrische Widerstandsfähigkeit zwischen verschachtelten Ventilwicklungen und Erde. Eine einzelne Prüfung wird mit allen aneinander geschalteten verschachtelten Ventilwicklungsanschlüssen durchgeführt. Weitere Prüfungen gemäß IEC 60076-3;
- b) dielektrische Widerstandsfähigkeit zwischen verschachtelten Ventilwicklungen. Die Anschlüsse einer der beiden verschachtelten Ventilwicklungen werden zusammengeschaltet und geerdet. Die Anschlüsse der anderen Ventilwicklung werden zusammengeschaltet und eine Wechselprüfspannung wird für eine Minute zwischen diesen Anschlüssen und dem Boden angelegt. Der Wert der Prüfspannung ist gleich dem Doppelten der Bemessungswechselspannung plus 500 V, oder 2 500 V, je nachdem welcher Wert größer ist.

6.4 Prüfung der Lastverluste

Die Prüfung ist durchzuführen, um die Lastverluste im Transformator bei Bemessungsstrom (I_1) und Grundfrequenz zu ermitteln.

Die geeigneten Kurzschlussverbindungen für die Prüfungen sind in Tabelle 1 für die gemeinsam benutzten Anschlüsse angegeben.

Die Verluste werden für jede der Kurzschlusskombinationen A, B und C gemessen. Die gemessenen Verlustwerte P_A , P_B und P_C werden benutzt, um die Gesamtverluste mit der entsprechenden Gleichung aus Tabelle 1 zu errechnen.

Die Prüfergebnisse sind auf folgende Bezugstemperatur zu korrigieren:

- 75 °C für Öltransformatoren (siehe IEC 60076-1, 10.1);
- entsprechend den allgemeinen Anforderungen an Prüfungen in IEC 60076-11 für Trockentransformatoren.

Es ist nicht nötig, dass die Lastverluste, wie in IEC 61378-2 beschrieben, mit zwei verschiedenen Frequenzen gemessen werden.

6.4.1 Lastverlustmessung bei Gleichrichtertransformatoren mit Transduktoren im Igeichen Kessel

Wenn Transduktorkerne bei der Messung der Lastverluste und der Impedanz eingeschaltet sind, ergibt sich der Messwert als die Summe der Verluste bzw. der Impedanz des Transformators sowie der Verluste bzw. der Impedanz der Transduktorkerne. Außerdem bewirken die Transduktoren eine Verzerrung der Wellenform von Strom und Spannung. Messungen können somit beeinflusst werden und stimmen, wenn dies nicht ausreichend kompensiert wird, nicht mit den Bestimmungen der IEC 60076-1, 10.4 (Messung der Kurzschlussimpedanz und der Lastverluste), überein. Vereinbarungen zwischen Käufer und Hersteller sollten getroffen werden, um diese Prüfungen durchzuführen. Dabei sind mehrere Vorgehensweisen möglich, von denen einige in Anhang G dargestellt werden.

6.4.2 Anordnung der Prüfsammelschienen für das Kurzschließen von Hochstromventilwicklungen

Bei der Auswahl der Anordnung externer Sammelschienen zum Kurzschließen von Hochstromventilwicklungen muss besondere Sorgfalt auf die Abschätzung des Anstiegs der Lastverluste, der Kurzschlussimpedanz und der Möglichkeit von Kesselheißpunkten gelegt werden, die durch die Prüfsammelschienen selbst verursacht werden.

6.5 Erwärmungsprüfungen

Die Erwärmungsprüfung für Öltransformatoren nach IEC 60076-2, 5.2.2, wird, wie in 6.5.1 und 6.5.2 beschrieben, abgeändert.

Diese Abschnitte dienen auch als Anleitung, soweit anwendbar, für die Prüfung von Trockentransformatoren (siehe IEC 60076-11, Abschnitt 23).

Zweck dieser Prüfung ist es

- den Höchstwert der Ölerwärmung im Beharrungszustand bei Einspeisung der Gesamtverluste, die den Verlusten bei Bemessungsstrom der nichtsinusförmigen Stromrichterbelastung und bei dem Bemessungswert der sinusförmigen Transformatorspannung entspricht, nachzuweisen;
- die Erwärmung der Wicklungen über der Öltemperatur unter den gleichen Bedingungen nachzuweisen;
- die Erwärmung der Wicklungen über der Umgebungstemperatur bei Trockentransformatoren nachzuweisen.

Die Werte für die Öl- und Wicklungserwärmung werden mit den Verfahren bestimmt, die in 6.5.1 und 6.5.2 beschrieben werden.

In manchen Fällen kann es vorkommen, dass der Prüfstrom, der zum Erreichen des festgeschriebenen Prüfwerts der Gesamtverluste (siehe 6.5.1) benötigt wird, um einen Öltemperaturanstieg im Beharrungszustand nachzuweisen, einige der Wicklungen unzulässig überlastet. Deshalb kann es notwendig sein, dass der Strom/die Verluste unter die Anwendbarkeitsgrenzen der Korrekturgleichungen der IEC 60076-2, 5.6, verringert werden muss/müssen. In diesem Fall müssen Käufer und Hersteller vereinbaren, ob die Anwendbarkeit der Korrekturgleichungen erweitert werden oder die Erwärmung mit Hilfe von Berechnungen festgestellt werden soll.

Wenn Wicklungsanschlüsse zugänglich sind, so ist die Wicklungstemperatur bei äquivalentem Prüfstrom gemäß 6.5.2 zu messen.

Wenn Wicklungsanschlüsse nicht zugänglich sind (z. B. bei mehreren Aktivteilen im gleichen Kessel und/oder bei Regelwicklungen), so sind diese Wicklungen als Teil der „internen Konstruktion“ anzusehen und ihre Erwärmung durch Berechnung zu ermitteln.

Falls sich Transduktoren im selben Kessel wie die Aktivteile befinden, so kann die Erwärmungsprüfung mit Hilfe einer der folgenden Methoden durchgeführt werden. Welche Methode angewendet wird, ist zwischen Käufer und Hersteller während der Angebotsphase zu vereinbaren.

- a) die Transduktoren bleiben vollständig montiert. In diesem Fall weisen die Wicklungsströme während der Prüfung keine Sinuswellenform auf. Der zusätzliche Verlust durch den Oberschwingungsstrom ist bei der Ermittlung des äquivalenten Prüfstroms zu berücksichtigen. Der äquivalente Prüfstrom ist als Effektivwert zu messen;
- b) die Transduktoren werden entweder überbrückt oder ihre magnetischen Kerne entfernt, um während der Prüfung Wicklungsströme mit Sinuswellenform zu erreichen.

6.5.1 Einspeisung der Gesamtverluste

Die Gesamtverluste sind die Summe aus Lastverlusten und Leerlaufverlusten und, falls vorhanden, von Saugdrossel- und Transduktorverlusten.

Die Lastverluste sind die Verluste, die durch den nichtsinusförmigen Stromrichterbemessungsstrom entstehen (siehe 5.1). Die Leerlaufverluste beziehen sich auf die Bemessungsspannung des Transformators.

Die in den Transformator eingespeisten Verluste müssen gemessen werden. Der Strom I bei der Grundfrequenz ist so einzustellen, dass der festgelegte Prüfungswert für die Gesamtverluste erreicht wird.

6.5.2 Einspeisung des Bemessungswertes der Lastverluste

6.5.2.1 Zweiwicklungstransformator

Wenn der Höchstwert der Ölerwärmung festgestellt worden ist, ist die Prüfung mit einem sinusförmigen Prüfstrom fortzusetzen, der den Lastverlust für den Bemessungsstrom des Stromrichters entspricht. Diese Bedingung ist für die Dauer von 1 h aufrechtzuerhalten, während der Messungen der Öl- und Kühlmitteltemperatur durchzuführen sind.

Für den äquivalenten Prüfstrom gilt

$$I_{\text{eq}} = I_1 \cdot \left(\frac{I_{\text{LN}}^2 (R_W + R_C) + (F_{\text{WE}} \cdot P_{\text{WE1}})}{I_1^2 (R_W + R_C) + P_{\text{WE1}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

Am Ende der Erwärmungsprüfung ist die Temperatur der beiden Wicklungen zu bestimmen. Dies geschieht mit Hilfe einer Reihe von Widerstandsmessungen an beiden Wicklungen, die während der Abkühlphase durchzuführen sind, die dem schnellen Abschalten der Einspeisung und der Kurzschlüsse folgt. Nähere Angaben sind 5.2.2 und 5.5 sowie den Abschnitten C.2 und C.3 von IEC 60076-2 zu entnehmen.

ANMERKUNG Falls die Erwärmungsprüfung mit montiertem Transduktor durchgeführt wird, so sind bei der Ermittlung von I_{eq} die Oberschwingungsströme und die damit verbundenen Verluste zu berücksichtigen.

6.5.2.2 Mehrwicklungstransformator

Der häufigste Fall ist ein Stromrichtertransformator mit drei Wicklungen, wobei die beiden Sekundärwicklungen die gleiche Bemessungsleistung besitzen. Die sekundärseitige Dreiphasenschaltung ist entweder eine Stern/Stern-Schaltung mit einer Saugdrossel oder eine Stern/Dreieck-Schaltung.

Der äquivalente Prüfstrom für jede Wicklung ist wechselweise einzuspeisen und die Temperaturwerte der Wicklungserwärmung sind zu ermitteln.

Die allgemeine Gleichung für den Prüfstrom ist

$$I_{eq} = I_1 \cdot \left(\frac{I_{WN}^2 (R_W + R_C) + (F_{WE} \cdot P_{WE1})}{I_1^2 (R_W + R_C) + P_{WE1}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

ANMERKUNG Die zwei sekundären Ventilwicklungen pro Phase haben in den Berechnungen der Beispiele A.1 und A.2 eine magnetische Kopplung von nahezu 100 %. Deshalb basieren die Wirbelstromverluste aller Wicklungen auf 6 Impulsen in Beispiel A.1 und 12 Impulsen in Beispiel A.2 (siehe 5.2).

Der Wert für den äquivalenten Prüfstrom für jede Wicklung ist unter Verwendung genau festgelegter Werte für Widerstand, Wirbelstromverlust und Erhöhungsfaktor für die Wicklung zu ermitteln.

ANMERKUNG 1 Für Transformatoren mit Hochstrom-Sammelschienensystemen auf der Sekundärseite kann es schwierig oder unmöglich sein, ein schnelles Abschalten der Kurzschlüsse zu erreichen. In diesem Fall sollte zwischen Hersteller und Abnehmer eine Vereinbarung bezüglich der Erwärmung der betroffenen Wicklungen getroffen werden.

ANMERKUNG 2 Wegen der sehr geringen Widerstände ($10^{-5} - 10^{-6}$ Ohm) von Hochstromventilwicklungen ist die Messung des Widerstands solcher Wicklungen sehr gründlich durchzuführen, um Fehler zu vermeiden.

ANMERKUNG 3 I_{WN} ersetzt I_L , wenn der Erhöhungsfaktor F_{WE} für die geprüfte Wicklung nach Anhang A berechnet wird.

Die Prüfung ist auf folgende Weise durchzuführen:

Beide Sekundärwicklungen sind kurzzuschließen; der äquivalente Primärstrom ist einzuspeisen, um die Erwärmung der Primärwicklung über der mittleren Öltemperatur zu erhalten. Danach ist jede Sekundärwicklung wechselseitig kurzzuschließen (die andere bleibt offen) und der Primärstrom einzuspeisen, um den äquivalenten Strom in der geprüften Sekundärwicklung zu erzielen. Diese beiden Prüfungen ergeben die Wicklungserwärmungen der Sekundärwicklungen über der mittleren Öltemperatur.

Wahlweise ist nur die erste Prüfung mit beiden Sekundärwicklungen kurzgeschlossen durchzuführen. Die gemessenen Wicklungserwärmungen der Sekundärwicklungen aus dieser Prüfung sind dann entsprechend IEC 60076-2, 5.6, zu korrigieren.

6.5.2.3 Betrachtungen zu Wicklungs- und Kesselheißpunkten

Ein äquivalenter Prüfstrom wird berechnet, um Gesamtverluste zu produzieren, die den Verlusten entsprechen, die ein überschwingungsbehafteter Strom in Wicklungen erzeugen würde. Wirbelstromverluste mit Oberschwingungen nehmen jedoch in den Endregionen der Wicklungen zu, und eine Prüfung mit sinusförmigem Strom ist nicht in der Lage, die im Betrieb auftretenden Streufeldmuster zu reproduzieren. Zusammengefasst ist deshalb zu erwähnen, dass dieser äquivalente Prüfstrom nicht die lokale Verlustverteilung in den Wicklungen generiert, die auftreten, wenn Oberschwingungsströme vorhanden sind.

Besondere Aufmerksamkeit wird der Tatsache gewidmet, dass die Heißpunkttemperatur und -lage, die durch eine Erwärmungsprüfung mit sinusförmigem Strom ermittelt werden, nicht unbedingt mit denen übereinstimmen, die während des Stromrichterbetriebs auftreten. Deshalb ist wegen der Prüfprozedur in der Prüfphase Vorsicht walten zu lassen, um thermische Belastungen, die größer als im Betrieb sind, auszuschließen. Die Verwendung von Glasfasersensoren in den Wicklungen ist ein nützliches Mittel zur Überprüfung der Anlage während der thermischen Prüfung oder des Lastbetriebs. Bei nicht zugänglichen Zwischenstromkreiswicklungen können Glasfasern benutzt werden, um die thermische Konstruktion zu beurteilen.

Um unerwünschte Einflüsse externer magnetischer Felder zu minimieren und die ventilseitige Konstruktion zu optimieren, hat der Käufer den Transformatorhersteller über die mechanische Konstruktion der Sammelschienen zu informieren.

6.5.3 Prüfung der Erwärmung von Trockentransformatoren

Die Prüfung ist in Übereinstimmung mit einem der Verfahren nach Abschnitt 23 von IEC 60076-11 mit folgender Änderung durchzuführen:

Der Belastungsstrom ist so einzustellen, dass er den Lastverlusten bei Bemessungsstrom des Stromrichters entspricht. Die Einstellung ist nach Anhang A und den Gleichungen für den äquivalenten Strom in 6.5.2 vorzunehmen.

7 Lastgeräuschpegel mit Transduktoren und/oder Saugdrosseln

Falls vorhanden, sind Transduktoren und/oder Saugdrosseln die Hauptursache von Geräuschen in Stromrichtertransformatoren.

Bei beiden Geräten sind die erzeugten Geräusche von den Lastströmen und von Systemparametern außerhalb des Transformators abhängig.

Lastgeräuschmessungen sind entweder nicht möglich oder nicht für die Betriebsbedingungen repräsentativ, und es gibt keine verlässliche Methode, um den Lastgeräuschpegel zu berechnen.

Tabelle 1 – Schaltungen und Berechnungsfaktoren Teil 1

Schaltungsnummer	Transformator schaltungen		Ventilschaltungen	Impulszahl	Kommütie- rungs- zahl	$\frac{U_{di}}{U_{v0}}$	Faktor des netzseitigen Grundschwin- gungsstroms ¹⁾	Bemes- sungs- leistungs- verhältnis	Einweg- Grund- schwin- gungs- strom- faktor ²⁾	Einweg- Gleich- anteils- faktor ²⁾	Anschlüsse, die zur Kurzschlussmessung kurzgeschlossen werden			Garan- tierte Lastver- luste	Garantierte Kurz- schluss- impedanz
	Netzseite	Ventilseite					$\frac{I_{1P}}{I_{dN}}$	$\frac{S_V}{S_R}$	$\frac{I_{1V}}{I_{dN}}$	$\frac{I_{0V}}{I_{dN}}$	A	B	C		
Einzelstromrichter, Einwegschaltungen															
5				6	3	$\frac{3}{\pi \times \sqrt{2}}$ (≈ 0,675)	$\frac{3}{\pi \times \sqrt{2}}$ (≈ 0,390)	$2 \times \frac{\sqrt{2}}{2}$ (≈ 2 × 0,707)	$\frac{\sqrt{3}}{\pi \times 2\sqrt{2}}$ (≈ 0,195)	1/6 (≈ 0,167)	2U 2V 2W	3U 3V 3W		$\frac{(P_A + P_B)}{2}$	e_{XA} und e_{XB}
20				12	3	$\frac{3}{\pi \times \sqrt{2}}$ (≈ 0,675)	$2 \times \frac{\sqrt{3}}{\pi \times 2\sqrt{2}}$ (≈ 2 × 0,195)	$4 \times \frac{\sqrt{2}}{4}$ (≈ 4 × 0,3536)	$\frac{\sqrt{3}}{\pi \times 4\sqrt{2}}$ (≈ 0,0975)	1/12 (≈ 0,083)	A1	B1		$\frac{(P_{A1} + P_{B1})}{2}$	e_{XA1} und e_{XB}
											2U 2V 2W	3U 3V 3W		+	
											A2	B2		$\frac{(P_{A2} + P_{B2})}{2}$	e_{XA2} und e_{XB}
											4U 4V 4W	5U 5V 5W			
Einzelstromrichter, gleichförmige Zweiwegschaltungen															
8	8 · 1			6	3	$\frac{3 \times \sqrt{2}}{\pi}$ (≈ 1,350)	$\frac{\sqrt{6}}{\pi}$ (≈ 0,780)	1	—	—	2U 2V 2W			P_A	e_{XA}
	8 · 2									2U+ 2V+ 2W+ + 2U- 2V- 2W-			P_A	e_{XA}	
9	9 · 1			12	3	$\frac{3 \times \sqrt{2}}{\pi}$ (≈ 1,350)	$\frac{\sqrt{6}}{\pi}$ (≈ 0,780)	$2 \times 1/2$ (≈ 2 × 0,5)	—	—	2U 2V 2W	3U 3V 3W	2U 2V 2W und 3U 3V 3W	P_C	e_{XA} und e_{XB}

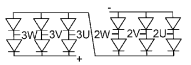
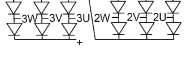
— Entwurf —

E DIN EN 61378-1 (VDE 0532-41):2009-12
FprEN 61378-1:2009

Tabelle 1 – Schaltungen und Berechnungsfaktoren Teil 2

Schaltungsnummer		Transformator schaltungen		Ventilschaltungen	Impulszahl	Kommütie- rungs- zahl	$\frac{U_{di}}{U_{v0}}$	Faktor des netzseitigen Grundschwin- gungs- stroms ¹⁾	Bemes- sungs- leistungs- verhältnis	Einweg- Grund- schwin- gungs- strom- faktor ²⁾	Einweg- Gleich- anteils- faktor ²⁾	Anschlüsse, die zur Kurzschlussmessung kurzgeschlossen werden			Garantierte Lastver- luste	Garantierte Kurz- schluss- impedanz
		Netz- seite	Ventilseite					$\frac{I_{1P}}{I_{dN}}$	$\frac{S_v}{S_R}$	$\frac{I_{1V}}{I_{dN}}$	$\frac{I_{0V}}{I_{dN}}$	A	B	C		
9	9 · 2				12	3	$\frac{3 \times \sqrt{2}}{\pi}$ (≈ 1,350)	$\frac{\sqrt{6}}{\pi}$ (≈ 0,780)	$2 \times 1/2$ (= 2 × 0,5)	$\frac{\sqrt{3}}{\pi \times 2\sqrt{2}}$ (≈ 0,195)	1/6 (≈ 0,167)	2U+ 2V+ 2W+ + 2U- 2V- 2W-	3U+ 3V+ 3W+ + 3U- 3V- 3W-	2U+ 2V+ 2W+ + 2U- 2V- 2W- und 3U+ 3V+ 3W+ 3U- 3V- 3W-	P_C	e_{XA} und e_{XB}
1 0	1 0 · 1				12	3	$\frac{3 \times \sqrt{2}}{\pi}$ (≈ 1,350)	$2 \times \frac{\sqrt{3}}{\pi \times \sqrt{2}}$ (≈ 2 × 0,390)	1	—	—	2U 2V 2W	3U 3V 3W		$P_A + P_B$	e_{XA} und e_{XB}
				2U+ 2V+ 2W++ 2U- 2V- 2W								3U+ 3V+ 3W+ + 2U- 2V- 2W-				

Tabelle 1 – Teil 2 (fortgesetzt)

Schaltungsnummer	Transformator schaltungen		Ventilschaltungen	Impulszahl <i>p</i>	Kommute- rungszahl <i>q</i>	$\frac{U_{di}}{U_{v0}}$	Faktor des netzseitigen Grundswin- gungs- stroms ¹⁾	Bemes- sungs- leistungs- verhältnis	Einweg- Grund- schwin- gungs- strom- faktor ²⁾	Einweg- Gleich- anteils- faktor ²⁾	Anschlüsse, die zur Kurzschlussmessung kurzgeschlossen werden			Garan- tierte Lastver- luste	Garan- tierte Kurz- schluss- impedanz
	Netz- seite	Ventilseite					$\frac{I_{1P}}{I_{dN}}$	$\frac{S_V}{S_R}$	$\frac{I_{1V}}{I_{dN}}$	$\frac{I_{0V}}{I_{dN}}$	A	B	C		
12				12	3	$\frac{6 \times \sqrt{2}}{\pi}$ ($\approx 2,701$)	$\frac{2 \times \sqrt{6}}{\pi}$ ($\approx 1,559$)	$2 \times 1/2$ ($\approx 2 \times 0,5$)	—	—	2U 2V 2W	3U 3V 3W		P_C	e_{XA} und e_{XB}
13				12	3	$\frac{6 \times \sqrt{2}}{\pi}$ ($\approx 2,701$)	$\frac{2 \times \sqrt{6}}{\pi}$ ($\approx 1,559$)	1	—	—	2U 2V 2W	3U 3V 3W		$P_A + P_B$	e_{XA} und e_{XB}

ANMERKUNG 1 Bezieht sich auf einen Transformator mit dem Spannungsverhältnis 1

ANMERKUNG 2 Bezieht sich auf den Ventilstrom.

Anhang A (informativ)

Ermittlung der Lastverluste des Transformators im Betrieb bei nichtsinusförmigem Bemessungsstrom des Stromrichters aus Messungen mit dem Bemessungsstrom des Transformators bei Grundfrequenz

Mit den Bezeichnungen aus der Aufstellung in 5.1 können die folgenden Beziehungen für Wicklungsverluste geschrieben werden:

$$\begin{aligned} P_{W1} &= R_W \cdot I_1^2 \left(1 + K_{WE} \cdot 1^x \right) \\ P_{W2} &= R_W \cdot I_2^2 \left(1 + K_{WE} \cdot 2^x \right) \\ &\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ &\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ P_{Wh} &= R_W \cdot I_h^2 \left(1 + K_{WE} \cdot h^x \right) \\ \hline P_W &= R_W \cdot I_L^2 + R_W \cdot K_{WE} \cdot \sum_1^n I_h^2 \cdot h^x \end{aligned}$$

Folglich gilt:

$$\frac{P_W - R_W \cdot I_L^2}{P_{W1} - R_W \cdot I_1^2} = \sum_1^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^x$$

Mit $x = 2$ für Wicklungen ist der Erhöhungsfaktor gleich:

$$F_{WE} = \sum_1^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^2$$

In Hochstrom-Sammelschienensystemen folgen die Verluste denselben Grundregeln wie die Wicklungen, aber der Exponent x ist geringer. Mit $x = 0,8$ ist der Erhöhungsfaktor für Verbindungen gleich:

$$\frac{P_C - R_C \cdot I_L^2}{P_{C1} - R_C \cdot I_1^2} = \sum_1^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^{0,8} = F_{CE}$$

Auf der Grundlage von anderen Studien wird der Erhöhungsfaktor für Zusatzverluste in Bauteilen dem von Sammelschienensystemen gleichgesetzt.

$$F_{SE} = \frac{P_{SE}}{P_{SE1}} = F_{CE}$$

ANMERKUNG IEC 61378-3: 2006, *Stromrichtertransformatoren – Teil 3: Anwendungsrichtlinie*, 9.1.2, *Verluste und Frequenz* beinhalten die Erklärung für die Wahl von $x = 2$ für Wicklungen und $x = 0,8$ für Hochstromsammelschienen und Bauteile.

Weitere Vereinbarungen zur Verlustberechnung:

- a) Die Wicklungsverluste P_{W1} werden als Summe der gemessenen Verluste $I_1^2 \cdot R_W$ und der berechneten Wirbelstromverluste P_{WE1} errechnet.

$$P_{W1} = (I_1^2 \cdot R_W) + P_{WE1}$$

- b) Die Summe der Wirbelstromverluste P_{CE1} der Verbindungen und der Zusatzverluste P_{SE1} in Bauteilen ist gleich den gemessenen Gesamtverlusten P_1 minus den Wicklungsverlusten P_{W1} entsprechend a) und minus den gemessenen Verlusten $I_1^2 \cdot R_C$ der Verbindung.

$$P_{CE1} + P_{SE1} = P_1 - (P_{W1} + (I_1^2 \cdot R_C))$$

Gesamtverluste mit Oberschwingungsbehaftetem Strom:

$$P_N = I_{LN}^2 \cdot (R_W + R_C) + (F_{WE} \cdot P_{WE1}) + F_{CE} \cdot (P_{CE1} + P_{SE1})$$

Alle Verlustkomponenten in den oben aufgeführten Berechnungen werden auf die Bezugstemperatur umgerechnet (siehe 10.1 von IEC 60076-1 und Abschnitt 12 von IEC 60076-11).

Die jeweiligen Anteile in den oben genannten Gleichungen müssen die Summe der Werte, die für jede Wicklung einzeln berechnet wurden, ergeben.

Die berechneten Wirbelstromverluste P_{WE1} in den Wicklungen zusammen mit den gemessenen Verlusten $I_1^2 \cdot R_W$ ergeben einen genauen Wert für die Gesamtwicklungsverluste P_{W1} .

Die Summe der Zusatzverluste der Verbindungen und der Bauteile $P_{CE1} + P_{SE1}$ kann mit brauchbarer Genauigkeit als die Differenz zwischen den gemessenen Gesamtverlusten P_1 abzüglich der Wicklungsverluste P_{W1} und abzüglich des gemessenen Wertes $I_1^2 \cdot R_C$ für die Gleichstromverluste der Anschlüsse abgeleitet werden.

Alternatives Verfahren zur Berechnung des Erhöhungsfaktors der Wicklungswirbelstromverluste

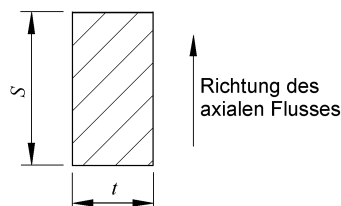
Eine etwas genauere Berechnung des Wirbelstromerhöhungsfaktors für Wicklungen F_{WE} kann durchgeführt werden, wenn die Wirbelstromverlustkomponenten vom axialen und radialen Streufluss (P_{WEax1} und P_{WErad1}) bekannt sind. Diese können bei Grundfrequenz berechnet werden unter Verwendung eines Finite-Elemente-Verfahrens der Feldanalyse.

Da die Verteilung des Oberschwingungsstreuflusses dieselbe ist wie die des Flusses bei Grundfrequenz in Wicklungen, die aus einzelnen Drähten bestehen, können folgende Beziehungen abgeleitet werden.

Maße der Wicklungsdrähte im Verhältnis zur Eindringtiefe:

$$X_{ah} = t \cdot \left(\frac{\mu_0 \cdot \omega_1 \cdot h}{2 \cdot \rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$X_{rh} = s \cdot \left(\frac{\mu_0 \cdot \omega_1 \cdot h}{2 \cdot \rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$



Dabei ist

ω_1 der Grundfrequenzfluss;

h die Oberschwingungs-Ordnungszahl.

Bild A.1 – Querschnitt eines Wicklungsdrahtes

Der zusätzliche Widerstand R_{ADh} kann bei einer Frequenz mit der Ordnungszahl $h \cdot \omega_1$ definiert werden als:

$$R_{ADh} = R_h - R_W \quad (\text{A.1})$$

Dabei ist

R_h der Wicklungswiderstand bei der Frequenz $h \cdot \omega_1$.

Die Erhöhung des zusätzlichen Widerstandes R_{ADh} im Verhältnis zu R_{AD1} bei Grundfrequenz ist für alle Wicklungsdrähte gleich, ungeachtet der spezifischen Wirbelstromverluste jedes Leiters, und kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\frac{R_{ADh}}{R_{AD1}} = \frac{\Psi(X_h)}{\Psi(X_1)} \quad (\text{A.2})$$

Dabei ist

$$\Psi(X_h) = 2X_h \cdot \frac{\sin h X_h - \sin X_h}{\cos h X_h + \cos X_h}$$

Folglich kann der Ausdruck für den Erhöhungsfaktor der Wicklungen F_{WE} ausgedrückt werden mit:

$$F_{WE} = \frac{P_{WEax1}}{P_{WE1}} \cdot \sum_1^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{\Psi(X_{ah})}{\Psi(X_1)} + \frac{P_{WErad1}}{P_{WE1}} \cdot \sum_1^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{\Psi(X_{rh})}{\Psi(X_1)} \quad (\text{A.3})$$

Für Folienentwicklung kann der Erhöhungsfaktor errechnet werden:

$$F_{WE} = \frac{P_{WEax1}}{P_{WE1}} \cdot \sum_1^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^2 + \frac{P_{WErad1}}{P_{WE1}} \cdot \sum_1^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{1}{h^2} \quad (\text{A.4})$$

Beispiel A.1: Bestimmung der Transformator-Lastverluste bei Oberschwingungsbehaftetem Strom

(Aufbau nach Tabelle 1, Schaltung 5, magnetische Kopplung zwischen Ventilwicklungen praktisch 100%, $p = 6$)

Bemessungsdaten des Stromrichters

$$U_{di} = 354 \text{ V}$$

$$I_{dN} = 50\,000 \text{ A}$$

Mit Saugdrossel im gemeinsamen Kessel

Transformatorschaltung Y y0y6

Netzwicklungsspannung des Transformators (kV) 30

Ventilwicklungsspannung des Transformators (kV) $0,354 \cdot \frac{\pi \cdot \sqrt{2}}{3} = 0,524$

Bemessungsnetzstrom des Transformators I_1 (A) $50\,000 \cdot \frac{\sqrt{3}}{\pi \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{0,524}{30} = 340,6$

Bemessungsleistung des Transformators S_R (kVA) $\sqrt{3} \cdot 30 \cdot 340,6 = 17\,700$

Ventilwicklungsleistung des Transformators S_v (kVA) $2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 17\,700 = 2 \cdot 12\,516$

Bemessungsstrom der Transformatorventilwicklung (A) $2 \cdot \frac{12\,516}{\sqrt{3} \cdot 0,524} = 2 \cdot 13\,783$

Ordnungszahl der Oberschwingung	Phasenstrom in der Ventil- wicklung	Phasenverschiebung zwischen Strömen in Ventilwicklungen	Berechneter Phasenstrom in der Netzwicklung
h	A	Grad	A
0	8 333,3	180	0,0
1	9 746,2	0	340,6
2	4 873,1	180	0,0
4	2 436,6	180	0,0
5	1 851,8	0	64,7
6	9,7	180	0,0
7	1 169,5	0	40,9
8	779,7	180	0,0
10	584,8	180	0,0
11	584,8	0	20,4
13	389,8	0	13,6
17	194,9	0	6,8
19	107,2	0	3,7
23	87,7	0	3,1
25	87,7	0	3,1

Ventilstrom

Gleichstrom I_0 (A) 50 000 = 8 333,3

$$\sum_1^{25} \left(\frac{I_{hp}}{I_{1p}} \right)^2 = 1,056 = \left(\frac{I_{PN}}{I_{1p}} \right)^2$$

$$\frac{I_{PN}}{I_{1p}} = 1,028 \quad I_{PN} = 350 \text{ A}$$

$$\sum_0^{25} \left(\frac{I_{hv}}{I_{1v}} \right)^2 = 2,11 = \left(\frac{I_{SN}}{I_{1p}} \right)^2$$

$$\frac{I_{SN}}{I_{1v}} = 1,453 \quad I_{SN} = 14\,157 \text{ A}$$

$$F_{WE} = \sum_1^{25} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^2 = 3,57$$

— Entwurf —

E DIN EN 61378-1 (VDE 0532-41):2009-12
FprEN 61378-1:2009

Grundschiwingung I_{1V} (A) $50\,000 \cdot \frac{\sqrt{3}}{\pi \cdot 2\sqrt{2}} = 9\,746,2$ $F_{CE} = F_{SE} \sum_1^{25} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^{0,8} = 1,24$

Messergebnisse entsprechend Prüfbericht:

Widerstandsmessungen bei 20 °C Wicklungstemperatur

Verbundene Anschlüsse (siehe Bild A.2)	Gemessener Phasenwiderstand	Korrigierte Werte bezogen auf 75 °C Ω
1U – 1V – 1W	$\frac{1}{2} \times \frac{0,1468 + 0,1463 + 0,1457}{3} = 73,13 \times 10^{-3}$	$88,9 \times 10^{-3}$
2U – 2V – 2W	$\frac{1}{2} \times \frac{869 + 905 + 867}{3} \times 10^{-7} = 44,0 \times 10^{-6}$	$53,5 \times 10^{-6}$
3U – 3V – 3W	$\frac{1}{2} \times \frac{875 + 907 + 876}{3} \times 10^{-7} = 44,3 \times 10^{-6}$	$53,8 \times 10^{-6}$
n2 – 2N	$14,7 \times 10^{-6}$	$17,9 \times 10^{-6}$
n3 – 3N	$13,6 \times 10^{-6}$	$16,5 \times 10^{-6}$

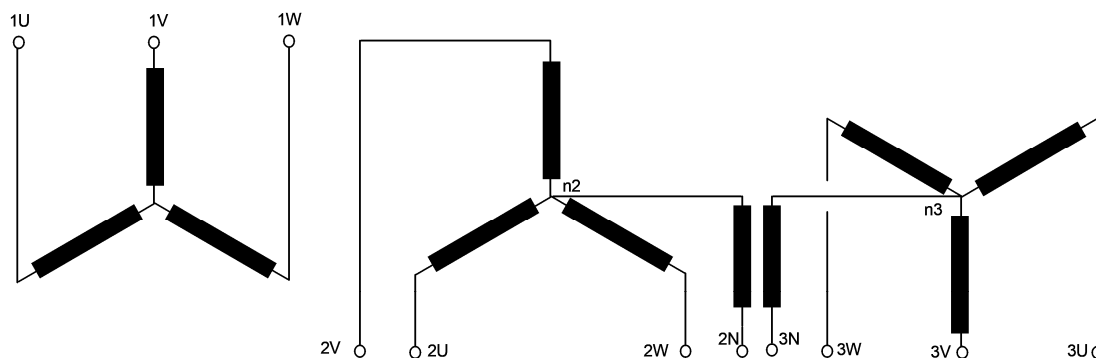


Bild A.2 – Kennzeichnung der Wicklungsanschlüsse Y y0y6

Gemessene Lastverluste bei 75 °C Wicklungstemperatur, 50 Hz und Bemessungsstrom $I_1 = 341$ A

$P_1 = 124,3$ kW

I^2R -Verluste bei 75 °C und Bemessungsstrom für die Transformatorenwicklungen und Verbindungen:

Primärwicklung $I^2R = 3 \times 341^2 \times 88,9 \times 10^{-3} \times 10^{-3} = 31,0$ kW

Sekundärwicklung $I^2R = 3 \times 13\,783^2 \times 53,5 \times 10^{-6} \times 10^{-3} = 30,5$ kW

Sekundärwicklung $I^2R = 3 \times 13\,783^2 \times 53,8 \times 10^{-6} \times 10^{-3} = 30,7$ kW

Wicklung und Verbindungen $\Sigma 92,2$ kW

Berechnete Wirbelstromverluste bei 75 °C $3,4$ kW

$\Sigma 95,6$ kW

Wirbelstromverluste des Transformators in den Verbindungen und Zusatzverluste in den Bauteilen

$$= P_{CE1} + P_{SE1} = P_1 - \left(\sum I^2 R + P_{WE1} \right) = 124,3 - 95,6 = 28,7 \text{ kW}$$

Die gesamten Lastverluste des Stromrichtertransformators bei überschwingungsbehaftetem Strom:

$$P_N = (1,056 \times 31) + (14\,157/13\,783)^2 \times (30,5 + 30,7) + (3,57 \times 3,4) + (1,24 \times 28,7) = 145 \text{ kW}$$

Die Lastverluste der Saugdrossel betragen:

$$I^2 R = 25\,000 \times (17,9 + 16,5) \times 10^{-6} = 21,5 \text{ kW}$$

Der Laststrom des Stromrichters bedeutet für den Transformator eine Belastung mit einem Grundscheinungsstrom plus der Oberschwingungsanteile bei allen Lastzuständen.

Beispiel A.2 – Bestimmung der Lastverluste des Transformators bei überschwingungsbehaftetem Strom

(Aufbau nach Tabelle 1, Schaltung 12, magnetische Kopplung zwischen elektrischen Ventilwicklungen praktisch 100 %, $p = 12$)

Bemessungsgrößen des Stromrichters	$U_{di} = 1\,580 \text{ V}$ $I_{dN} = 5\,200 \text{ A}$
Transformatorschaltung	D d0y1
Mit zwei sekundär in Reihe geschalteten 6-Impuls-Brücken	
Netzwicklungsspannung des Transformators (kV)	6,3
Ventilwicklungsspannung des Transformators (kV)	$1,580 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot \sqrt{2}} = 0,585$
Bemessungsnetzstrom des Transformators I_1 (A)	$5\,200 \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{0,585}{6,3} = 753$
Bemessungsleistung des Transformators S_R (kVA)	$\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 753 = 8\,216$
Ventilwicklungsleistung des Transformators S_v (kVA)	$2 \cdot 0,5 \cdot 8\,216 = 2 \cdot 4\,108$
Bemessungsstrom der Transformatorventilwicklung (A)	$2 \cdot \frac{4\,108}{\sqrt{3} \cdot 0,585} = 2 \cdot 4\,054$

Da das Verhältnis zwischen den Niederspannungswicklungswindungszahlen nicht genau $\sqrt{3}$ sein kann, gilt

Bemessungsdaten des Transformators	Primärwicklung	Sekundärwicklungen	
Bemessungsleistung (kVA)	8 216	4 129	4 087
Bemessungsspannung des Systems (kV)	6,3	0,588	0,582
Bemessungsstrom der Phase (A)	$I_{1P} = 434,7$	$I_{1S} = 2\,341$	$I_{1S} = 4\,054$
Schaltung	D	d	y

— Entwurf —

E DIN EN 61378-1 (VDE 0532-41):2009-12
FprEN 61378-1:2009

Ordnungszahl der Oberschwingung	Phasenstrom in der Dreieckventilwicklung	Phasenstrom in der Sternventilwicklung	Phasenstrom in der Netzwicklung
h	A	A	A
1	2 340,8	4 054,4	434,7
5	444,8	770,3	17,4
7	280,9	486,5	9,6
11	140,4	243,3	21,7
13	93,6	162,2	17,4
17	46,8	81,1	8,7
19	25,7	44,6	4,3
23	21,1	36,5	3,9
25	21,1	36,5	3,9

$$\sum_1^{25} \left(\frac{I_{hp}}{I_{1p}} \right)^2 = 1,007 = \left(\frac{I_{PN}}{I_{1P}} \right)^2$$

$$\frac{I_{PN}}{I_{1P}} = 1,0034 \quad I_{PN} = 755,5 \text{ A}$$

$$= 436,2 \cdot \sqrt{3} \text{ A}$$

$$\sum_1^{25} \left(\frac{I_{hv}}{I_{1v}} \right)^2 = 1,056 = \left(\frac{I_{SN}}{I_{1v}} \right)^2$$

$$\frac{I_{SN}}{I_{1v}} = 1,028 \quad I_{SN} = 4 167,2 \text{ A}$$

$$= 2 405,9 \cdot \sqrt{3} \text{ A}$$

$$F_{WE} = \sum_1^{25} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^2 = 1,88$$

$$F_{CE} = F_{SE} \sum_1^{25} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^{0,8} = 1,045$$

Messergebnisse des Prüfberichts

Verbundene Anschlüsse (siehe Bild A.3)	Gemessener Phasenwiderstand korrigiert auf 21,5 °C pro Phase	Korrigierte Werte bezogen auf 75 °C Ω
1U – 1V – 1W	$1,5 \times 17,5 \times 10^{-3} = 26,3 \times 10^{-3}$	$31,7 \times 10^{-3}$
2U – 2V – 2W	$1,5 \times 0,374 \times 10^{-3} = 0,561 \times 10^{-6}$	$0,678 \times 10^{-6}$
3U – 3V – 3W	$0,5 \times 0,378 \times 10^{-3} = 0,189 \times 10^{-6}$	$0,228 \times 10^{-6}$

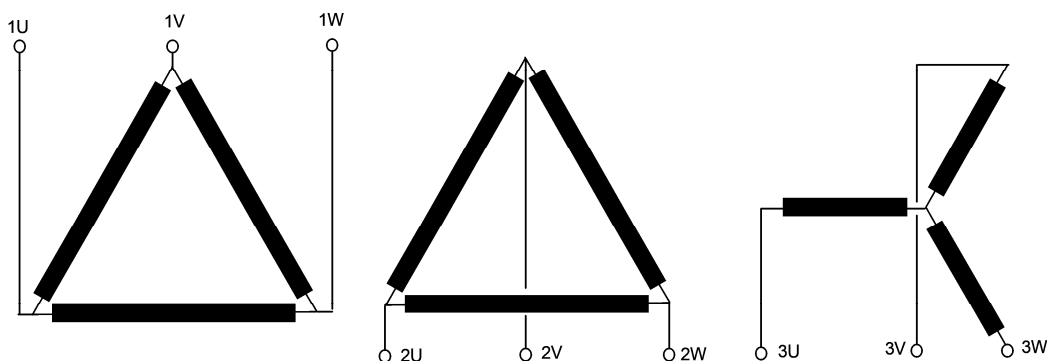


Bild A.3 – Kennzeichnung der Wicklungsanschlüsse D d0y1

Gemessene Lastverluste bei 75 °C Wicklungstemperatur, 50 Hz und Bemessungsstrom $I_{1P} = 434,7$ A und $I_{1S} = 2\,341$ A oder 4 054 A

$$P_1 = 49,77 \text{ kW}$$

Primärwicklung	$I^2 R = 3 \times 434,7^2 \times 31,7 \times 10^{-3} \times 10^{-3}$	=	17,97 kW
----------------	--	---	----------

Sekundärwicklung	$I^2 R = 3 \times 2\,341^2 \times 0,678 \times 10^{-6} \times 10^{-3}$	=	11,15 kW
------------------	--	---	----------

Sekundärwicklung	$I^2 R = 3 \times 4\,054^2 \times 0,228 \times 10^{-6} \times 10^{-3}$	=	11,24 kW
------------------	--	---	----------

Wicklung und Verbindungen	Σ	40,36 kW
---------------------------	----------	----------

Berechnete Wirbelstromverluste bei 75 °C		1,39 kW
--	--	---------

Σ	41,75 kW
----------	----------

Wirbelstromverluste des Transformators in den Verbindungen und Zusatzverluste in den Bauteilen

$$= P_{CE1} + P_{SE1} = P_1 - (\Sigma I^2 R + P_{WE1}) = 49,77 - 41,75 = 8,02 \text{ kW}$$

Die gesamten Lastverluste des Stromrichtertransformators bei überschwingungsbehaftetem Strom (I_{PN} und I_{SN}):

$$P_N = (1,007 \times 17,97) + (1,056 \times (11,15 + 11,24)) + (1,88 \times 1,39) + (1,045 \times 8,02) = 52,7 \text{ kW}$$

ANMERKUNG Die beiden sekundären Ventilwicklungen je Phase weisen in den Berechnungen, die in den Beispielen A.1 und A.2 durchgeführt werden, annähernd 100 % magnetische Kopplung auf. Deshalb beruhen die Wirbelstromverluste für alle Wicklungen auf 6 Pulsen in Beispiel A.1 und auf 12 Pulsen in Beispiel A.2 (siehe 5.3).

Ein anders konstruierter Transformator kann nahezu 0 % magnetische Kopplung zwischen den sekundären Ventilwicklungen aufweisen. Eine solche Konstruktion würde eine Berechnung von F_{WE} und F_{CE} erfordern, die in Beispiel A.1 auf 3 Pulsen und in Beispiel A.2 auf 6 Pulsen für die sekundären Ventilwicklungen beruht.

Beispiel A.3 – Bestimmung der Lastverluste des Transformators bei überschwingungsbehaftetem Strom, multiaktive Bauteile im gleichen Kessel, Brückenunfall.

(Aufbau nach Tabelle 1, Schaltung 10.2, magnetische Kopplung zwischen elektrischen Ventilwicklungen praktisch 0 %, $p = 12$)

Gleichrichtertransformatorkombination im selben Kessel:

- 1 regulierender Spartransformator
- 2 Gleichrichtertransformatoren, 2 Primärwicklungen stern- und dreieckgeschaltet, 2 Sekundärwicklungen dreieckgeschaltet
- 12 Transduktoren

zur Einbringung von $U_{di} = 1\,792$ V Leerlaufgleichspannung (1 600 V Lastgleichspannung), $I_{dN} = 55$ kA Gleichstrom zur Versorgung eines Aluminiumelektrolyseofens. Versorgungsspannung 132 kV.

Bemessungsgrößen der Transduktoren:

Anzahl: 12

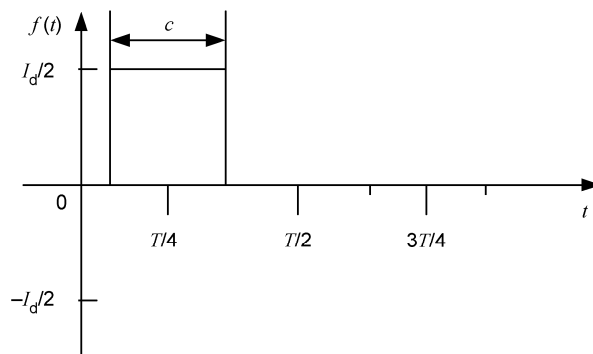
Zugewiesene Spannungsregulierung 50 V Gleichspannung

Strom: Ventilstrom

— Entwurf —

E DIN EN 61378-1 (VDE 0532-41):2009-12
FprEN 61378-1:2009

Ventilstrom: Ideale Wellenform, $C = T/3$



- stetige Komponente $= 55\,000 / 6$
 $= 9\,166,7\,A$
- Effektivwert der Grundschiwingung =

Ordnungszahl der Ober- Schwingung	Strom im Ventilnetz	Ober- schwingungs- ordnung	Strom im Ventilnetz
h	A	h	A
0	9 166,7	8	857,7
1	10 720,8	10	643,2
2	5 360,4	11	643,2
3	53,6	13	428,8
4	2 680,2	17	214,4
5	2 037,0	19	117,9
6	10,7	23	96,5
7	1 286,5	25	96,5

$$55\,000 \cdot \frac{\sqrt{3}}{\pi \cdot 2 \sqrt{3}} = 10\,720,8\,A$$

$$\sum_0^{25} \left(\frac{I_{hv}}{I_{1v}} \right)^2 = 2,1100$$

$$- I_{VN} = \left(\sum_0^{25} I_h^2 \right)^2 = 15\,573\,A$$

$$- \text{Gesamt, effektiv (rechteckige Welle)} = 15\,877\,A$$

$$F_{CE} = F_{SE} = \left(\sum_0^{25} \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^{0,8} = 1,9246$$

Bemessungsgrößen der Gleichrichtertransformatoren:

Anzahl 2

Primärspannung: 50 kV

Sekundärspannung ($U_{v0} = 1\,792/1,35\,V$): 1 327 V

Netzseitiger Bemessungsstrom

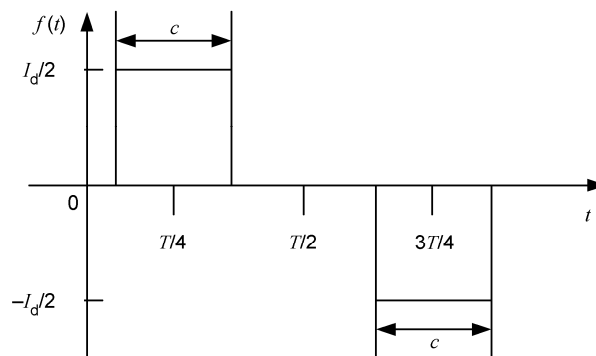
($I_1 = 55\,000 \times 0,390 \times 1\,327/50\,000$): 569 A

Primäre Bemessungsleistung: 49,3 MVA

Sekundäre Bemessungsleistung: ($\frac{S_{1S}}{S_R} : 1$) 49,3 MVA

Ventilseitiger Bemessungsstrom: 2 1442 A

Ventilseitenstrom: Ideale Wellenform C = T/3



Ordnungszahl der Oberschwingung	Phasenstrom in der Ventil- wicklung	Phasenstrom in der Netz- wicklung
h	A	A
1	21 441,7	569,0
2	64,3	1,7
3	107,2	2,8
4	64,3	1,7
5	4 073,9	108,1
6	21,4	0,6
7	2 573,0	68,3
11	1 286,5	34,1
13	857,7	22,8
17	428,8	11,4
19	235,9	6,3
23	193,0	5,1
25	193,0	5,1

$$-\sum_{1}^{25} \left(\frac{I_{hv}}{I_{1v}} \right)^2 = \sum_{1}^{25} \left(\frac{I_{hL}}{I_{1L}} \right)^2 = 1,0564$$

$$-I_{SN} = \left(\sum_{1}^{25} I_{Sh}^2 \right)^{0,5} \text{ Gesamt, effektiv} = 22\,038 \text{ A}$$

$$-I_{PN} = \left(\sum_{1}^{25} I_{Ph}^2 \right)^{0,5} \text{ Gesamt, effektiv} = 585 \text{ A}$$

$$-F_{WE} = \sum_{1}^{25} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^2 = 3,5673$$

$$-F_{CE} = F_{SE} = \sum_{1}^{25} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^{0,8} = 1,2434$$

Bemessungsgrößen des regelnden Spartransformators:

Anzahl: 1
 Sekundäre Bemessungsspannung: 50 kV
 Sekundärer Bemessungsstrom: 1 138 A (2 × 569 A)
 Bemessungsleistung: 98,6 MVA
 Primäre Bemessungsspannung: 132 kV
 Primärer Bemessungsstrom: 431 A

— Entwurf —

E DIN EN 61378-1 (VDE 0532-41):2009-12
FprEN 61378-1:2009

Ordnungszahl der Ober- schwingung	Phasenstrom in der Ventilwicklung	Phasenstrom in der Netzwicklung
h	A	A
1	1 138,1	431,1
2	3,4	1,3
3	5,7	2,2
4	3,4	1,3
5	45,5	17,2
6	1,1	0,4
7	25,0	9,5
11	56,9	21,6
13	45,5	17,2
17	22,8	8,6
19	11,4	4,3
23	10,2	3,9
25	10,2	3,9

$$- \sum_1^{25} \left(\frac{I_{hv}}{I_{1v}} \right)^2 = \sum_1^{25} \left(\frac{I_{hL}}{I_{1L}} \right)^2 = 1,0069$$

$$- I_{SN} = \left(\sum_1^{25} I_{Sh}^2 \right)^{0,5} \text{ Gesamt, effektiv} = 1142 \text{ A}$$

$$- I_{PN} = \left(\sum_1^{25} I_{Ph}^2 \right)^{0,5} \text{ Gesamt, effektiv} = 433 \text{ A}$$

$$- F_{WE} = \sum_1^{25} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^2 = 1,8822$$

$$- F_{CE} = F_{SE} = \sum_1^{25} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^{0,8} = 1,0446$$

Tertiäre Bemessungsspannung: 20 kV

Tertiärer Strom:

- Effektivwert gesamt: 946,6 A
- Effektivwert Grundschiwingung: 923,8 A
- Effektivwert Oberschiwingung 3: 184,8 A
- Effektivwert Oberschiwingung 5: 92,4 A

Tertiäre Bemessungsleistung: 32 MVA