

	DIN EN 61378-3 (VDE 0532 Teil 43)	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 2005-03-31 Entwurf Stromrichtertransformatoren – Teil 3: Anwendungsrichtlinie (IEC 14/487/CDV:2004); Deutsche Fassung prEN 61378-3:2004 Convertor transformers – Part 3: Application guide (IEC 14/487/CDV:2004); German version prEN 61378-3:2004 Transformateurs de conversion – Partie 3: Guide d'application (CEI 14/487/CDV:2004); Version allemande prEN 61378-3:2004 Anwendungswarnvermerk Dieser Norm-Entwurf 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 145 Seiten DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE		

– Entwurf –

E DIN EN 61378-3 (VDE 0532 Teil 43):2005-02

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

Nationales Vorwort

Dieser Norm-Entwurf enthält die Deutsche Fassung des Europäischen Norm-Entwurfs prEN 61378-3:2004 „Stromrichtertransformatoren – Teil 3: Anwendungsrichtlinie“, in den der Internationale Norm-Entwurf [Committee Draft for Voting (CDV)] IEC 14/487/CDV:2004 „Convertor transformers – Part 3: Application guide“ unverändert übernommen worden ist.

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 beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den mit aufgenommenen englischen IEC-Text.

Der Internationale Norm-Entwurf wurde vom TC 14 „Power transformers“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet.

Um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen, haben IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene entstandener Internationaler Norm-Entwurf zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC im CDV-Stadium zur Umfrage und im FDIS-Stadium zur Abstimmung gestellt wird.

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. Europäische Norm-Entwürfe, die die erforderliche Zustimmung in CENELEC erhalten haben und als Europäische Norm ratifiziert wurden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Für den vorliegenden Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium K 321 „Transformatoren“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE zuständig.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

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

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

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist nachstehend wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 60076-1:1997 + A1:2000 + A12:2002	IEC 60076-1:1993 mod. + A1:1999	DIN EN 60076-1 (VDE 0532 Teil 76-1):2003-01	VDE 0532 Teil 76-1
EN 60076-2:1997	IEC 60076-2:1993 mod. + Corr.:1997	DIN EN 60076-2 (VDE 0532 Teil 102):1997-12	VDE 0532 Teil 102
EN 60076-3:2001	IEC 60076-3:2000 + Corr.:2000	DIN EN 60076-3 (VDE 0532 Teil 3):2001-11 + Ber. 1:2002	VDE 0532 Teil 3
EN 60076-5:2000	IEC 60076-5:2000 ^{N1)}	DIN EN 60076-5 (VDE 0532 Teil 5):2001-11	VDE 0532 Teil 5
—	IEC 60076-8:1997	—	—
—	IEC 60214:1989	—	—
EN 60296:2004	IEC 60296:2003	DIN EN 60296 (VDE 0370 Teil 1)	VDE 0370 Teil 1
—	IEC 60422:1989	—	—
—	IEC 60542:1976 + A1:1988	DIN VDE 0532-31 (VDE 0532 Teil 31):1993-04	VDE 0532 Teil 31
EN 60567:1992	IEC 60567:1992	DIN EN 60567 (VDE 0370 Teil 9):1994-06	VDE 0370 Teil 9
EN 60599:1999	IEC 60599:1999	DIN EN 60599 (VDE 0370 Teil 7):1999-12	VDE 0370 Teil 7
—	IEC 60609:1978 ^{N2)}	—	—
EN 61378-1:1998 + Corr.:1998	IEC 61378-1:1997	DIN EN 61378-1 (VDE 0532 Teil 41):1999-09	VDE 0532 Teil 41
EN 61378-2:2001	IEC 61378-2:2001	DIN EN 61378-2 (VDE 0532 Teil 42):2001-11	VDE 0532 Teil 42

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60076-1 (VDE 0532 Teil 76-1), *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 Teil 102), *Leistungstransformatoren – Teil 2: Übertemperaturen* (IEC 60076-2:1993, modifiziert); Deutsche Fassung EN 60076-2:1997

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

^{N1)} Nationale Fußnote: In der IEC-Fassung wurde irrtümlich das Ausgabejahr 1994 angegeben.

^{N2)} Nationale Fußnote: In der IEC-Fassung wurde irrtümlich das Ausgabejahr 1988 angegeben.

– Entwurf –

E DIN EN 61378-3 (VDE 0532 Teil 43):2005-02

DIN EN 60076-5 (VDE 0532 Teil 5), *Leistungstransformatoren – Teil 5: Kurzschlussfestigkeit (IEC 60076-5:2000); Deutsche Fassung EN 60076-5:2000*

DIN EN 60296 (VDE 0370 Teil 1), *Flüssigkeiten für elektrotechnische Anwendungen – Neue Isolieröle für Transformatoren und Schaltgeräte (IEC 60296:2003); Deutsche Fassung EN 60296:2004*

DIN EN 60567 (VDE 0370 Teil 9), *Anleitung für die Probenahme von Gasen und von Öl aus ölgefüllten elektrischen Betriebsmitteln und für die Analyse freier und gelöster Gase (IEC 60567:1992); Deutsche Fassung EN 60567:1992*

DIN EN 60599 (VDE 0370 Teil 7), *In Betrieb befindliche, mit Mineralöl imprägnierte elektrische Geräte – Leitfaden zur Interpretation der Analyse gelöster und freier Gase (IEC 60599:1999); Deutsche Fassung EN 60599:1999*

DIN EN 61378-1 (VDE 0532 Teil 41), *Stromrichtertransformatoren – Teil 1: Transformatoren für industrielle Anwendungen (IEC 61378-1:1997); Deutsche Fassung EN 61378-1:1998 + Corrigendum 1998*

DIN EN 61378-2 (VDE 0532 Teil 42), *Stromrichtertransformatoren – Teil 2: Transformatoren für HGÜ-Anwendungen (IEC 61378-2:2001); Deutsche Fassung EN 61378-2:2001*

DIN VDE 0532-31 (VDE 0532 Teil 31), *Transformatoren und Drosselspulen – Leitlinie zur Auswahl und Anwendung von Stufenschaltern*

Deutsche Fassung

Stromrichtertransformatoren – Teil 3: Anwendungsrichtlinie

Inhalt

	Seite
Einleitung	4
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	7
4 Kurzzeichen und Abkürzungen.....	8
5 Bemessungswerte	8
6 Wicklungsanordnungen	9
6.1 Allgemeines	9
6.2 Industrielle Anwendungen	11
6.3 HGÜ-Anwendungen	15
7 Anzapfungen und Impedanzen.....	17
7.1 HGÜ-Anwendungen	17
8 Isolationsaspekte und Spannungsprüfungen	19
8.1 Hybrid-Isolationssysteme	19
8.2 Spannungsprüfungen	21
9 Verluste.....	25
9.1 Allgemeines	25
9.2 Erwärmungsprüfungen	35
10 Kern und Geräuschaspekte.....	36
10.1 Kern	36
10.2 Schall.....	37
11 Transformatorpflichtenheft.....	39
11.1 Einführung	39
11.2 Technisches Pflichtenheft versus funktionales Pflichtenheft.....	39
11.3 HGÜ-Transformator-Pflichtenheft.....	40
11.4 Anmerkungen und Stellungnahmen zu Pflichtenheftpositionen, die jeweils durch Käufer und Lieferanten bereitzustellen sind.....	40
11.5 Informationen, die vom Lieferanten bereitzustellen sind.....	41
11.6 Qualitätssicherheit und Prüfprogramme	44
11.7 Verfügbarkeit und Mittel zur Minimierung der Betriebsausfallzeit	44
11.8 Informationen, die vom Käufer oder Anlagenplaner bereitzustellen sind.....	44
12 Kurzschlussbetrachtungen	52
13 Bauelemente.....	54
13.1 Stufenschalter	54

	Seite
13.2 Ventilseitige Durchführungen.....	55
14 Wartung	57
14.1 Einführung.....	57
14.2 Öl.....	58
14.3 Isolationsgüte.....	59
14.4 Stufenschalter	63
14.5 Zubehör und Armaturen.....	65
15 Monitoring	66
15.1 Einleitung	66
15.2 Zustandsbeurteilung des Transformators im Betrieb.....	66
15.3 Wächtertypen.....	66
15.4 Zusammenfassung	70
Bild 1 – Brückenanschluss für Sechspuls-Anordnung	10
Bild 2 – Brückenanschluss für 12-Puls-Anordnung.....	10
Bild 3 – Transformatorschaltungen Stern-Dreieck und Stern-Stern oder Dreieck-Dreieck und Dreieck-Stern ergeben eine Verschiebung von 30° zwischen den ventilseitigen Spannungen	10
Bild 4 – 15° Phasendrehung durch erweiterte Dreieck- oder Zickzack-Schaltung. Die zwei Schaltungen können auch für andere Phasenwinkel wie 7,5° für 24-Puls-Brücken genutzt werden.	11
Bild 5 – Anschluss von selbsterregten Drosseln.....	11
Bild 6 – Spartransformatorauslegung für offene Wicklungsstränge.....	12
Bild 7 – Übliche Auslegung des Spartransformators für geschlossene Wicklungsstränge mit grober und feiner Regelung für kleine Regelstufen	13
Bild 8 – Zusatztransformatoranordnung zur Spartransformatorauslegung für geschlossene Wicklungsstränge mit grober und feiner Regelung für kleine Regelstufen.....	13
Bild 9 – Dreieckschaltung mit angezapften Wicklungen	14
Bild 10 – Zweiwicklungsausführung mit angezapften Wicklungen	14
Bild 11 – Zwei Grundanordnungen der einzelnen Wicklungen eines Zweiwicklungstransformators	16
Bild 12 – Kopplungsimpedanz.....	17
Bild 13 – Typische Impedanzmodelle	19
Bild 14 – Bauteile eines typischen Industrie-Stromrichtertransformator-Isolationssystems	20
Bild 15 – Isolationssystem, äquivalente R-C-Schaltung	21
Bild 16 – Spannungsverteilung vor und unmittelbar nach Polaritätswechsel	22
Bild 17 – AC/DC-Umwandlung - vereinfachte Darstellung	24
Bild 18 – Streufelder für Dreiwicklungstransformator mit eng gekoppelten Ventilwicklungen.....	29
Bild 19 – Streufelder für Dreiwicklungstransformator mit entkoppelten Ventilwicklungen	30
Bild 20 – Streufelder für Dreiwicklungstransformator mit locker gekoppelten doppelt konzentrischen Ventilwicklungen	31
Bild 21 – Streufelder für Dreiwicklungstransformator mit locker gekoppelten, doppelt aufeinandergeschichteten Ventilwicklungen.....	32
Bild 22 – Kurzschluss-Fehlerbedingungen	53

	Seite
Bild 23A – Freiluft-Durchführung	56
Bild 23B – Transformator-Wand-Durchführung	56
Bild 23 – Anordnung von Ventil-Durchführungen	56
Bild 24a – Wechselstrombedingungen	57
Bild 24b – Gleichstrombedingungen (20 °C)	57
Bild 24c – Polaritätswechsel (20 °C).....	57
Bild 24 – Beispiele von Wechsel-, Gleichstrom und kombinierten elektrischen Feldverteilungen in der Nähe von HGÜ-Durchführungen und zugehörigen elektrischen Isolationssystemen.....	57
Tabelle 1 – Anordnungen von zwei Wicklungen.....	16

Einleitung

IEC 61378 besteht aus drei Teilen:

Teil 1 behandelt solche Transformatoren, die in Verbindung mit allgemeinen industriellen Stromrichteranwendungen stehen (Kupferverarbeitung, Aluminiumschmelze und Elektrolyse bestimmter Gase).

Teil 2 behandelt solche Transformatoren, die für HGÜ-Anwendungen benötigt werden.

Teil 3 ist diese Anwendungsrichtlinie, die die folgenden Themenüberschriften beinhaltet:

Beschreibende Teile in dieser Richtlinie

IEC 61378-1 behandelt Stromrichtertransformatoren für industrielle Anwendungen und Transformatoren zur Spannungsversorgung von Elektrolyseanwendungen zur Aluminiumschmelze, Kupferraffination oder Erzeugung bestimmter Gase. Sie behandelt auch elektrische Antriebe, wie sie in Walzwerken und Schiffsantriebssystemen verwendet werden. Sie behandelt keine elektrischen Antriebe für Traktionsanwendungen die in Lokomotiven eingebaut sind, aber sie behandelt Stromrichteranwendungen, die in Verbindung mit statischen Antriebssystemen stehen. Zusätzlich gibt es einen weiten Bereich von Stromrichteraufgaben kleinerer Leistung, für die Teil 1 und diese Anwendungsrichtlinie gleichermaßen anwendbar sind.

IEC 61378-2 behandelt Stromrichtertransformatoren, die in HGÜ-Anwendungen eingesetzt werden. Es gibt zwei verschiedene Arten von HGÜ-Energieübertragungssystemen, bekannt unter dem Oberbegriff „Gegentakt-“ und „Übertragungs-“ Anordnung. Der Betrieb und die Bewertung von Transformatoren, die nach diesen zwei Systemen arbeiten, werden in Teil 2 und in dieser Anwendungsrichtlinie behandelt.

Bemessungsdaten, siehe Abschnitt 5

In beiden Teilen 1 und 2 unterscheiden sich die Bemessungsdaten von Stromrichtertransformatoren von den historisch gebräuchlichen. In diesem herkömmlichen Verfahren wurde der Effektivwert des Stromes zur Festlegung der Leistungsschild-Bemessungsdaten des Transformators verwendet. Diese neue Norm stellt eine grundlegende Änderung in dem Verfahren zur Festlegung der Bemessungsdaten des Transformators vor. Das Konzept der Verwendung grundlegender Bestandteile von Spannung und Strom als Grundlage für die Bemessungsdaten des Transformatorleistungsschildes wird erläutert. Die von diesen grundlegenden Bestandteilen abgeleiteten Bemessungsdaten des Leistungsschildes, bilden die Grundlage der garantierten Impedanzen und Verluste.

Wicklungsanordnungen, siehe Abschnitt 6

Es gibt eine große Anzahl von Wicklungsanschlüssen und -anordnungen in industriellen und HGÜ-Anwendungen, die auf Stromrichtertransformatoren zugeschnitten sind. Sie wurden über viele Jahre entwickelt. Die Betriebskennwerte der verschiedenen Gleichrichteranschlüsse werden größtenteils durch IEC 60146 abgedeckt. In der Anwendungsrichtlinie werden die Anschlüsse insoweit behandelt, wie sie die Bauart und einige betriebliche Aspekte des Transformators beeinflussen.

In industriellen Anwendungen werden häufig Regeldarstellungen benutzt. Diese Richtlinie behandelt die Grundsätze für einige dieser Darstellungen.

Anzapfungen und Impedanzen, siehe Abschnitt 7

Die Impedanz von Transformatoren für HGÜ-Anwendungen erfordert besondere Aufmerksamkeit und Bauartlösungen. Die Anforderungen betreffen in erster Linie die Begrenzung der Impedanz-Verstellbarkeit über den gesamten Anzapfungsbereich, die Begrenzung der Impedanzunterschiede zwischen den Transformatoren und in einigen Anwendungen die Impedanzunterschiede zwischen Stern- und Dreieckwicklungen. Die Anwendungsrichtlinie erörtert diese Anforderungen und ihre praktischen Aspekte. Im allgemeinen ist der Anzapfungsbereich in Stromrichtertransformatoren größer als in konventionellen Transformatoren. Diese Aus-

wirkung des breiteren Anzapfungsbereichs auf den Transformator und den Stufenschalter wird in dieser Richtlinie behandelt.

Isolationsaspekte und Spannungsprüfungen, siehe Abschnitt 8

Zwei Aspekte werden in diesem Abschnitt der Richtlinie behandelt. Erstens der zunehmende Gebrauch von „hybriden“ Isolationssystemen in Transformatoren für industrielle Anwendungen. Zweitens die Fähigkeit von Transformator-Isolationsstrukturen von HGÜ-Transformatoren, wenn sie mit Gleichspannung geprüft werden und im Betrieb.

Die elementaren Grundsätze, die Prüfverfahren und die Prüfspannungspegel, die bei der Wechsel- und Gleichspannungsprüfung eingesetzt werden, werden besprochen. Es werden auch die Sicherheitsabstände zusammen mit den vorgeschlagenen Prüfbedingungen überprüft.

Verluste, siehe Abschnitt 9

Die Richtlinie führt die Ableitung von Grundsätzen, Prüfung und Berechnungsverfahren die verwendet werden, einzeln auf, um die Auswirkungen von nicht-sinusförmigen Lastströmen in Stromrichtertransformatoren aller Arten zu berücksichtigen.

Die Grundsätze der Prüfung bei zwei Frequenzen für HGÜ-Anwendungen werden zusammen mit einem ausgearbeiteten Beispiel der Berechnung einzeln aufgeführt. Die aus diesen Prüfungen und Berechnungen hergeleiteten Verluste bilden die Grundlage für die Bestimmung der Prüfverluste und Ströme, die verwendet werden, um die Öl- und Wicklungsgradienten während der Wärmeprüfung aufzustellen.

Kern und Geräuschaspekte, siehe Abschnitt 10

Die Auswirkungen der Spannungsüberschwingungen und eines umlaufenden Vormagnetisierungs-Gleichstroms werden bezüglich der Ausführung und Bauart eines Kerns besprochen und zusammengefasst.

Die Ursachen von Geräuschen und die Unterschiede, die man zwischen den üblichen Schallmessungen in der Fabrik erwarten kann und denen, die am Aufstellort erwartet und festgestellt werden, werden betrachtet.

Die jüngsten Verfahren zur Bewertung von Schall im Zusammenhang mit Stromrichtertransformatoren werden besprochen.

Transformator-Pflichtenheft, siehe Abschnitt 11

Transformatoren für Umrichter unterscheiden sich bezüglich des Transformator-Pflichtenhefts wesentlich von Leistungstransformatoren. Ein Entwurf der in jedem Pflichtenheft erforderlichen Einzelheiten ist als Teil der Richtlinie, für beide Arten von technischen und funktionalen Pflichtenheften, enthalten.

Es wird eine Anleitung dafür gegeben, was während der Angebots- und Auftragsphase vom Käufer festgelegt und was vom Hersteller erwartet werden sollte.

Kurzschlussbetrachtungen, siehe Abschnitt 12

In gewöhnlichen Leistungstransformatoren ist die Berechnung der Kurzschlussströme einzig von den Impedanz- und Widerstandsanteilen des Transformators und der angeschlossenen Spannungsversorgung abhängig.

Bei Transformatoren, die zur Versorgung von Umrichteranwendungen eingesetzt werden, gibt es Fehlerbedingungen innerhalb des Umrichters, die betrachtet werden müssen, wenn die Spitzenwerte der Fehlerströme größer sein können, als die, die von gewöhnlichen Leistungstransformatoren abgeleitet werden. Diese Bedingungen werden in dieser Richtlinie einzeln aufgeführt.

Bauteile, siehe Abschnitt 13

In der Auslegung von Transformatoren für industrielle und HGÜ-Stromrichter-Anwendungen ist die Wahl und der Betrieb des Stufenschalters entscheidend. Diese Richtlinie hebt einige der Grundsätze hervor, die den Einsatz von Stufenschaltern in diesen Anwendungen bestimmen.

In der HGÜ-Anwendung ist die Wahl und die Integration der ventiltseitigen Durchführung in die Gesamtkonstruktion von ausschlaggebender Bedeutung.

Die allgemeinen Anforderungen und Empfehlungen für die Konstruktion, Integration der Durchführungen im Transformator und die geforderten Prüfungen werden einzeln aufgeführt. Eine IEC-Norm eigens für HGÜ-Durchführungen ist in Vorbereitung und die Empfehlungen der Richtlinie beziehen sich auf die Anforderungen der neuen Norm.

Wartung, siehe Abschnitt 14

Statistiken lassen darauf schließen, dass der HGÜ-Transformator einen hohen Standard der Wartung erfordert. Die Positionen, die eine besondere Aufmerksamkeit erfordern, sind Stufenschalter und die ventiltseitigen Durchführungen. In der Richtlinie wird die Aufmerksamkeit auf die Wartungsanforderungen gelenkt.

Monitoring und Vor-Ort-Untersuchungen, siehe Abschnitt 15

Das Transformator-Monitoring wird empfohlen, falls Vor-Ort-Probleme minimiert werden sollen und in dieser Hinsicht Zustandsüberwachung diskutiert wird. Die Richtlinie gibt auch Empfehlungen für zu befolgende Verfahren und Ausführungen im Fall eines Vor-Ort-Fehlers. Diese Empfehlungen sind derart, dass ausschlaggebende Hinweise und Daten im Anfangsstadium der Untersuchung nicht unbrauchbar oder verfälscht werden.

Der Gebrauch der Zustandsüberwachung in dieser Anwendung wird auch in diesem Abschnitt besprochen.

Zusätzliche Informationsquellen

Die Vorbereitung der Norm und der Anwendungsrichtlinie, insbesondere für HGÜ-Stromrichteranwendungen der IEC 61378-2, wurde maßgeblich von den Arbeitspapieren zu verschiedenen Themen der CIGRÉ Gemeinschaftsarbeitsgruppe 12/14.10 beeinflusst.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 61378 gibt dem Anwender Informationen zu bestimmten Themen bei denen sich die Bedingungen industrieller und HGÜ-Stromrichtertransformatoren in Planung, Konstruktion, Prüfung und Betriebsbedingungen von gewöhnlichen Transformatoren, die in Versorgungsnetzen eingesetzt werden, unterscheiden. Zusätzlich ist das Ziel dieser Richtlinie, den Herstellern den technischen Hintergrund zu vermitteln, der die Grundlage der in IEC 61378, Teile 1 und 2, verwendeten Grundsätze bildet.

Es ist beabsichtigt, dass dieser Teil von IEC 61378 die Anwendungsrichtlinie für Leistungstransformatoren, IEC 60076-8, ergänzt und nicht ersetzt, da viele der darin enthaltenen Grundsätze gleichermaßen für Stromrichtertransformatoren anwendbar sind.

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 60076-1: 1993, *Power Transformers – Part 1: General*

IEC 60076-2: 1993, *Power transformers – Part 2: Temperature rise*

IEC 60076-3: 2000, *Power Transformers – Part 3: Insulation levels and dielectric tests and external clearances in air*

IEC 60076-5: 1994, *Power Transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit*

IEC 60076-8: 1997, *Power Transformers – Part 8: Application guide*

IEC 60214, *On-load tap changers*

IEC 60296, *Specification for Unused Mineral Insulating Oils for Transformers and Switchgear*

IEC 60422, *Supervision and Maintenance Guide for Mineral Insulating Oils in Electrical Equipment*

IEC 60542, *Application guide for on-load tap changers*

IEC 60567, *Guide for the Sampling of Gases and Oil from Oil-filled Electrical Equipment and for the Analysis of Free and Dissolved Gases*

IEC 60599, *Mineral Oil Impregnated Electrical Equipment in Service – Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis*

IEC 60609: 1988, *Short Circuit current calculation in three phase a.c. systems*

IEC 61378-1: 1997, *Convertor transformers – Part 1: Transformers for Industrial Applications*

IEC 61378-2: 2001, *Convertor transformers – Part 2: Transformers for HVDC Applications*

3 Begriffe

Die in diesem Teil von IEC 61378 verwendeten Begriffe entsprechen denen, die in den Teilen 1 und 2 verwendet wurden.

4 Kurzzeichen und Abkürzungen

Kurzzeichen	Bedeutung	Einheit
I_1	Bemessungsstrom	A
I_x	Prüfstrom der Lastverluste bei der Frequenz f_x	A
I_{LN}	Wert des Laststroms im Betrieb in der betrachteten Wicklung	A
I_h	Strom bei der Oberschwingungs-Ordnungszahl h	A
I_{eq}	Effektivwert des äquivalenten sinusförmigen Stroms, der die Betriebslastverluste der Wicklung angibt	A
h	Oberschwingungs-Ordnungszahl	
U_1	Bemessungsspannung	V
S_R	Bemessungsleistung des Transformators	VA
P_1	Gesamtlastverluste bei Grundfrequenz (50 Hz oder 60 Hz)	W
P_x	Lastverluste bei der Frequenz f_x	W
$I_1^2 R$	Ohmsche Verluste bei Bemessungsstrom	W
R	Gleichstromwiderstand der Wicklungen einschließlich der inneren Leiter	Ω
P_{WE1}	Wirbelstromverluste in den Wicklungen bei Grundfrequenz	W
P_{SE1}	Streuverluste in Konstruktionsteilen (ausgenommen Wicklungen) bei Grundfrequenz	W
P_N	Gesamtlastverlust im Betrieb	W
f_1	Bemessungsfrequenz und auch Grundfrequenz	Hz
f_x	Frequenz ≥ 150 Hz zur Bestimmung der Verteilung der Wirbelstromverluste	Hz
f_h	Frequenz bei der Oberschwingungs-Ordnungszahl h	Hz
F_{WE}	Erhöhungsfaktor für Wirbelstromverluste der Wicklungen	
F_{SE}	Erhöhungsfaktor für Streuverluste in Konstruktionsteilen	
K_h	Verhältnis des Stroms I_h zum Bemessungsstrom I_1	
U_{ac}	Angelegte Prüf-Wechselspannung der Ventilwicklung (Effektivwert)	V
U_m	Höchste Systemspannung der Netzwicklung	V
U_{dm}	Höchste Gleichspannung der Ventilbrücke	V
U_{dc}	Angelegte Prüf-Gleichspannung der Ventilwicklung	V
U_{pr}	Pol-Umkehr-Prüfspannung für die Ventilwicklungen (Gleichspannung)	V
U_{vm}	höchste Leiter-Leiter Betriebs-Wechselspannung der Ventilwicklungen des Stromrichter-transformators	V
N	Anzahl der sechspulsigen Brücken in Reihe vom gleichstromseitigen Nulleiter bis zur an den Transformator angeschlossenen Gleichrichterbrücke	

„Ventilseite“ und „Netzseite“ beschreiben die äußeren Anschlüsse der Transformatorwicklungen. Die Netzseite bezieht sich auf die an das Wechselstromnetz angeschlossene Wicklung und die Ventilseite auf die Wicklung, die an den Stromrichter angeschlossen ist.

5 Bemessungswerte

IEC 61378 Teile 1 und 2 legen fest, dass die Bemessungskennwerte des Transformators als sinusförmige Größen im eingeschwungenen Zustand von Strom und Spannungen bei Bemessungs-Grundfrequenz ausgedrückt werden. Die garantierten Verluste, Impedanzen und Schallpegel müssen diesen Werten entsprechen.

Die Bemessungsspannung und der Bemessungsstrom beziehen sich auf die Grundgrößen, Leiter-Leiter-Spannung und Netzstrom.

Grundbauteile werden ausgewählt, um eine gemeinsame Plattform für garantierte Größen wie Verluste und Impedanzen einzurichten, unabhängig von den Betriebsbedingungen und dadurch dem Spektrum des Oberschwingungsgehalts. Es sollte beachtet werden, dass die Prüfungen zur Einrichtung der Betriebskennwerte nur mit sinusförmigen Größen ausgeführt werden können. Wenn Prüfeinheiten mit Messwertumformern (Sättigungs-drosseln) ausgestattet sind, könnte die Durchführung der Prüfung nicht mit sinusförmigen Größen übersetzt werden. In diesem Fall muss zwischen dem Lieferanten und dem Käufer vor der Unterzeichnung des Vertrags eine Vereinbarung über die Prüfbedingungen erreicht werden.

Garantierte Übertemperaturwerte sind für eine bestimmte Lastbedingung wichtig, wie sie durch Vereinbarung zwischen Käufer und Hersteller festgelegt wird. Da ein Stromrichtertransformator einem Strom mit einem bestimmten Oberschwingungsgehalt ausgesetzt wird, werden sich die tatsächlichen Verluste von den Verlusten, die durch einen rein sinusförmigen Strom entwickelt werden, unterscheiden. Im allgemeinen werden Oberschwingungen im Strom, verglichen mit dem Betrieb mit rein sinusförmigem Strom, zu einer Erhöhung der Lastverluste führen.

Die angelegte Spannung im Stromrichterbetrieb hat im allgemeinen eine vernachlässigbare Abweichung von einem wirklich sinusförmigen Strom. Deshalb wird der Leerlaufverlust im üblichen Betrieb ausreichend durch die Bemessungsspannung bestimmt.

Der aktuelle Lastverlust im Stromrichterbetrieb wird mit ausreichender Genauigkeit durch das in IEC 61378-1, 5.1 und in IEC 61378-2 vorgestellte Berechnungsverfahren abgeschätzt. Aus diesem Satz Gleichungen kann der entsprechende Prüfstrom zur Ermittlung der entsprechenden Übertemperatur abgeleitet werden, siehe IEC 61378-1, 6.4 oder IEC 61378-2, 10.5.

Es sollte ebenfalls zur Kenntnis genommen werden, dass der aktuelle Laststrom im Betrieb höher als der Bemessungsstrom sein kann, wenn er mit einem Messgerät zur Effektivwertanzeige des Stromes gemessen wird, da der auf dem Leistungsschild angegebene Bemessungsstrom sich auf den Grundanteil des Laststroms bezieht.

6 Wicklungsanordnungen

6.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt beschreibt die verschiedenen Versionen von Wicklungsanordnungen, die in industriellen und in HGÜ-Anwendungen vorhanden sein können.

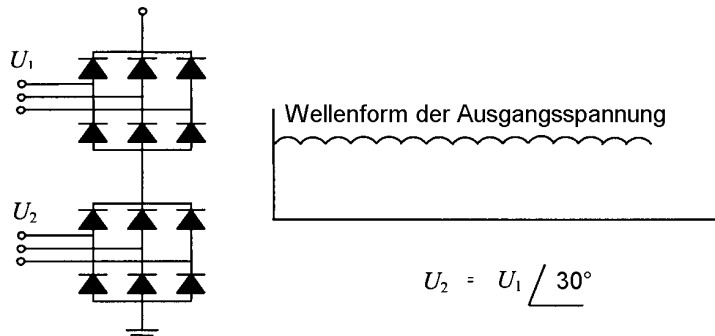
Im Allgemeinen werden die Wicklungen für eine Sechspuls-Stromrichterbrücke eines symmetrischen Drehstromsystems angeordnet sein. Der Stromrichter wird den Strom jeder Phase zweimal für die Dauer von 120° elektrisch führen, oder für ein Drittel des Zyklus, einmal in positiver und einmal in negativer Richtung.

Zwei oder mehr Sechspuls-Brücken können in Reihe oder parallel geschaltet werden. Bei Versorgung der einzelnen Brücken mit netzseitig zeitversetzten Dreiphasenspannungen, wird der Oberschwingungsgehalt der netzseitigen Ströme und der ventileitigen Spannungen und Ströme verringert. Mit zwei Sechspuls-Brücken, die in einer so genannten 12-Puls-Anordnung angeschlossen werden, müssen die zwei Drehstromversorgungen um 30° elektrisch getrennt sein. Noch höhere Pulszahlen der Stromrichter benötigen einen geringeren Abstand der Systeme.



Das Gleichrichtersymbol bedeutet entweder Diode oder Thyristor

Bild 1 – Brückenanschluss für Sechspuls-Anordnung



Das Gleichrichtersymbol bedeutet entweder Diode oder Thyristor

Bild 2 – Brückenanschluss für 12-Puls-Anordnung

ANMERKUNG Steigende Pulszahl verringert den Oberschwingungsgehalt von Spannung und Strom

Eine häufige Anordnung um zwei Drehstromsysteme mit einem Abstand von 30° elektrisch zu erhalten, ist der Anschluss von zwei Transformatoren an eine gemeinsame netzseitige Sammelschiene. Ein Transformator hat die gleiche Wicklungsschaltung auf der Netz- und Ventilseite, Stern-Stern oder Dreieck-Dreieck. Der andere Transformator hat die Schaltung Stern-Dreieck oder Dreieck-Stern.

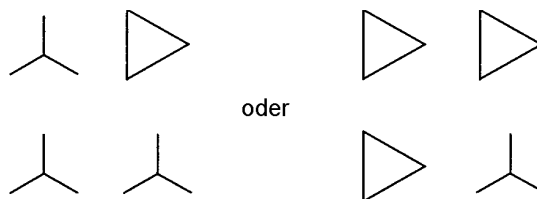


Bild 3 – Transformatorschaltungen Stern-Dreieck und Stern-Stern oder Dreieck-Dreieck und Dreieck-Stern ergeben eine Verschiebung von 30° zwischen den ventilseitigen Spannungen

Zwei identische Transformatoren mit einer Wicklungsschaltung, die eine Phasendrehung von 15° elektrisch zwischen der netzseitigen und ventilseitigen Spannung bewirkt, können dazu verwendet werden, eine 30° Phasendrehung zwischen den zwei ventilseitigen Spannungen bereitzustellen. Ein Transformator wird für positive Drehung (A-R, B-S und C-T) geschaltet, der andere für negative Drehung (A-S, B-R und C-T). Mit dieser Anordnung erhält man $+15^\circ$ elektrisch und -15° elektrisch auf der Ventilseite im Vergleich zu der Netzseite.

Eine Drehung um 15° elektrisch kann am besten erreicht werden, indem eine der zwei Wicklungen im Zickzack oder erweiterten Dreieck geschaltet wird.

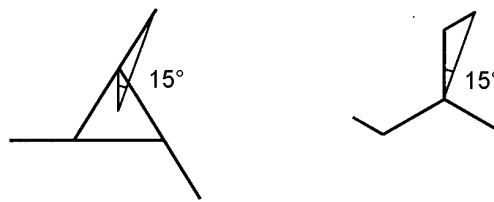


Bild 4 – 15° Phasendrehung durch erweiterte Dreieck- oder Zickzack-Schaltung. Die zwei Schaltungen können auch für andere Phasenwinkel wie 7,5° für 24-Puls-Brücken genutzt werden.

6.2 Industrielle Anwendungen

6.2.1 Gleichrichter

Stromrichtertransformatoren für industrielle Anwendungen werden im allgemeinen für ziemlich große Ströme auf der Ventilseite konstruiert. Die Ventilwicklungen müssen deshalb einfache Schaltungen wie Stern oder Dreieck besitzen.

Der Transformator für eine Sechspuls-Stromrichterbrücke ist eine Drehstromeinheit mit im Stern oder Dreieck geschalteten Ventilwicklungen.

12-Puls-Verhalten könnte durch den Einsatz von zwei Sechspuls-Einheiten mit unterschiedlichen Schaltgruppen erreicht werden oder durch Einsatz eines Transformators mit zwei Ventilwicklungen, die in Stern und Dreieck geschaltet sind. Die letzte Lösung erfordert einen normalen Dreiphasenkern.

Komplexere Fälle erfordern eine andere Anordnung mit Stern und Dreieck auf der Primärseite und im Stern oder Dreieck geschaltete Ventilwicklungen. Diese besonderen Anordnungen könnten auch eine besondere Kernkonstruktion erfordern.

Stromrichteranlagen mit mehr als 12-Pulsen fordern die Anwendung von unterschiedlichen Phasenwinkeln zwischen den verschiedenen Einheiten. Diese erhält man durch den Einsatz von Zickzack- oder erweiterten Dreieckschaltungen auf der Primärseite der verschiedenen Transformatoren.

Die physikalische Anordnung des Transformators wird möglichst mit der Ventilwicklung als äußerer Wicklung durchgeführt, um einfache Anordnungen der ventilseitigen Ausgänge zu bieten. Die ventilseitige Ausgangsanordnung hängt vom Stromrichteraufbau ab.

Falls der Stromrichter den Einsatz von Transduktoren benötigt, sind diese allgemein im gleichen Kessel des Transformators untergebracht. In diesem Fall ist es notwendig, zwei Leitungsausgänge je Phase vorzusehen.

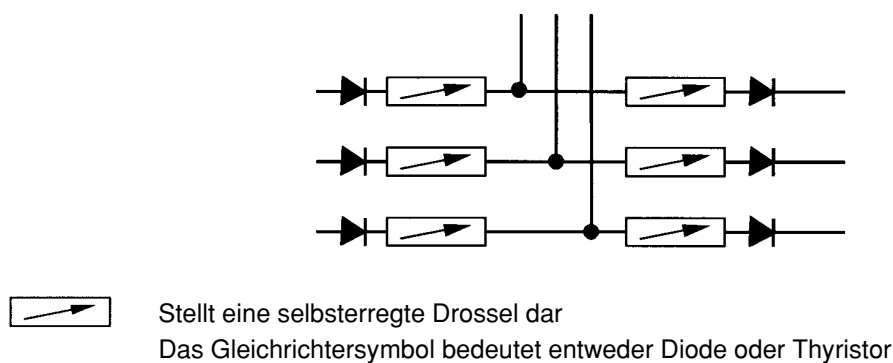


Bild 5 – Anschluss von selbsterregten Drosseln

prEN 61378-3:2004

Die technischen Hauptschwierigkeiten, die sich aus dieser Lösung für die Gesamtanordnung der Wicklungen ergeben, sind mit der Ausführung der Schaltung im Innern des Kessels verknüpft. Schwierigkeiten zur Beherrschung der Folgen der hohen Stromwerte sind mit der Geometrie unter dem Aspekt von Erwärmung durch Magnetisierung und der Größe der Impedanz verbunden.

6.2.2 Spannungsregelung

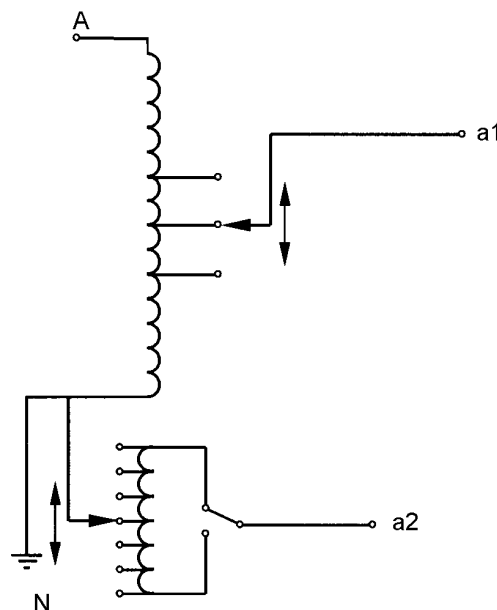
Im Allgemeinen gibt es die Notwendigkeit zur Spannungsregelung zwischen Versorgungs- und Ventilspannungen und oft ist der Regelbereich ziemlich groß, von ein paar Prozent bis zur Leistungsschildspannung und darüber. Der Zweck des weiten Anzapfungsbereichs ist, den Verbrauch von Blindleistung und die Verschmutzung durch Oberschwingungen, im Zusammenhang mit dem Stromrichterbetrieb, zu reduzieren. Aus praktischen Gründen erfordert der große Regelbereich oft einen eigenen Regeltransformator zwischen dem Wechselspannungsanschluss und dem Stromrichtertransformator.

Abhängig von der Netzspannung kann die Regeleinheit entweder als Spartransformator oder mit zwei einzelnen Wicklungen gebaut werden, um die Risiken des Eintritts von hohen Transienten in den Stromrichtertransformator zu reduzieren.

6.2.3 Spartransformatoraufbau

6.2.3.1 Sternschaltung - offene Wicklungsstränge

Der schematische Aufbau der Wicklung wird in Bild 6 gezeigt.

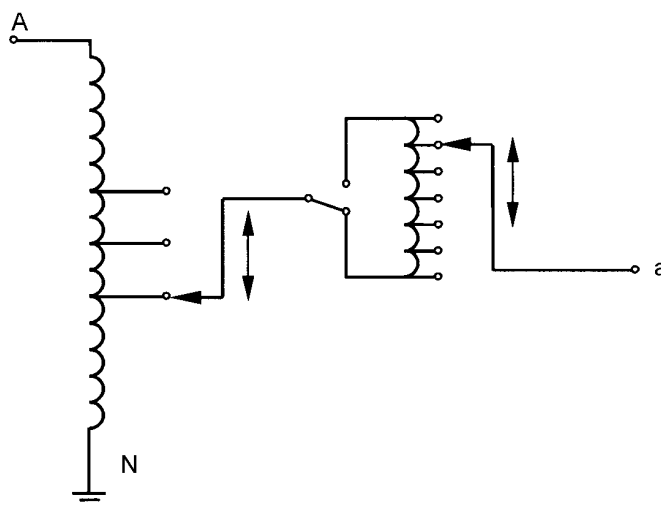


Legende

- A Netz
- N Netz-Sternpunkt
- a1 Stromrichtertransformator
- a2 Stromrichtertransformator

Bild 6 – Spartransformatorauslegung für offene Wicklungsstränge

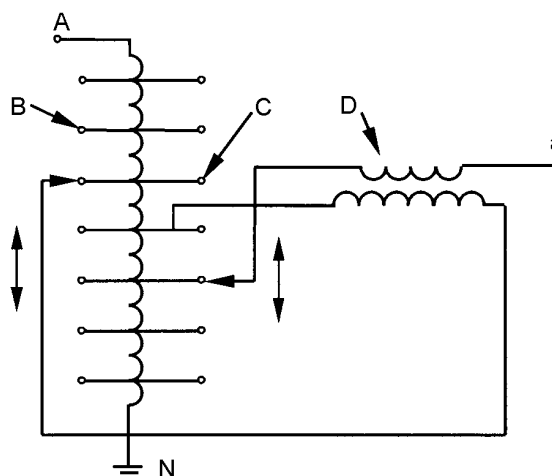
6.2.3.2 Sternschaltung - geschlossene Wicklungsstränge



Legende

- A Netz
- N Netz-Sternpunkt
- a Stromrichtertransformator

Bild 7 – Übliche Auslegung des Spartransformators für geschlossene Wicklungsstränge mit grober und feiner Regelung für kleine Regelstufen

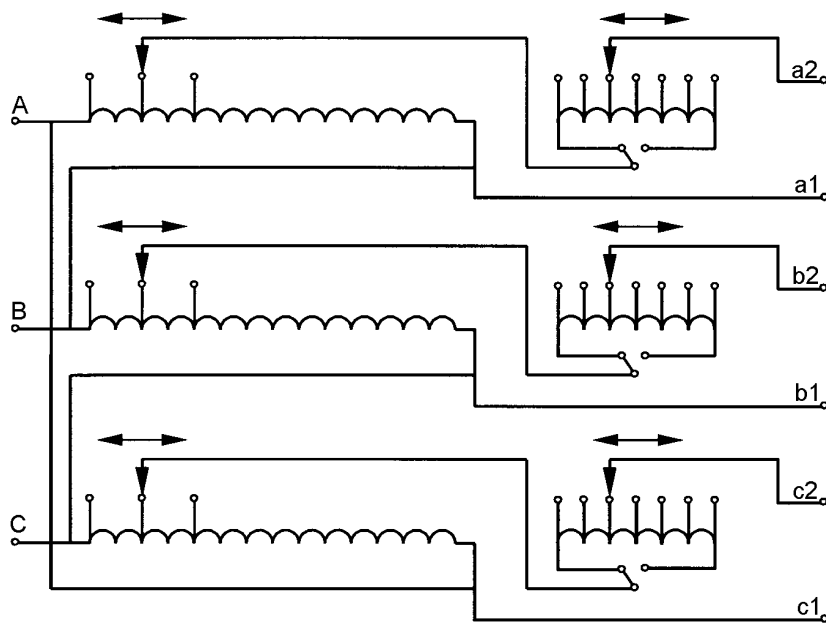


Legende

- A Netz
- B Feinanzapfung
- C Grobanzapfung
- D Zusatztransformator
- N Netz-Sternpunkt
- a Stromrichtertransformator

Bild 8 – Zusatztransformatoranordnung zur Spartransformatorauslegung für geschlossene Wicklungsstränge mit grober und feiner Regelung für kleine Regelstufen

6.2.3.3 Dreieckschaltung



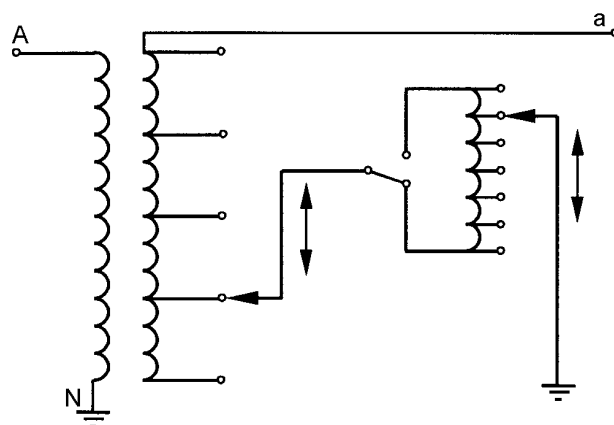
Legende

A	Netz	a1	Stromrichtertransformator	a2	Stromrichtertransformator
B	Netz	b1	Stromrichtertransformator	b2	Stromrichtertransformator
C	Netz	c1	Stromrichtertransformator	c2	Stromrichtertransformator

Bild 9 – Dreieckschaltung mit angezapften Wicklungen

6.2.3.4 Zweiwicklungsausführung

Die Regelung wird im Allgemeinen auf der Unterspannungsseite durchgeführt.



Legende

A	Netz
N	Netz-Sternpunkt
a	Stromrichtertransformator

Bild 10 – Zweiwicklungsausführung mit angezapften Wicklungen

6.3 HGÜ-Anwendungen

6.3.1 Verschieden Arten von Transformatoranordnungen

HGÜ-Übertragungen werden im allgemeinen für beträchtliche Nennleistungen mit Anschlüssen an Hochspannungs-Wechselstromnetze errichtet. Um Oberschwingungen in den Wechsel- und Gleichstromnetzen zu verringern, werden die Brücken im allgemeinen in 12-Puls-Anordnungen gebaut. Meistens haben die Transformatoren die Wicklungen auf der Netzseite im Stern geschaltet, um die nicht einheitlichen Isolationsanforderungen und eine Spannungsregelung nahe der Erde auszunutzen. Systemforderungen und effizienter Betrieb des Stromrichters erfordern häufig ziemlich umfangreiche Spannungsregelungen um im Bereich von bis zu ca. 40 % der Spannung auf dem Leistungsschild zu sein.

Abhängig von Nennleistung, Spannungen und physikalischen Einschränkungen können Stromrichtertransformatoren als einphasige oder dreiphasige Einheiten gebaut werden.

Um eine 12-Puls-Brücke für HGÜ-Transformatoren zu realisieren, sind die folgenden Lösungen möglich:

- a) Sechs einphasige Zwe Wicklungstransformatoren;
 - Drei in Stern-/Dreieckschaltung;
 - Drei in Stern-/Sternschaltung;
- b) Drei einphasige Dre Wicklungstransformatoren;
 - Alle in Stern-/Dreieck-Sternschaltung;
- c) Zwei Drehstromtransformatoren;
 - Einer in Stern-/Dreieckschaltung;
 - Einer in Stern-/Sternschaltung;
- d) Ein Dre Wicklungstransformator;
 - In Stern-/Dreieck-Sternschaltung.

Ein Stromrichtertransformator wird allgemein mit zwei oder drei Hauptwicklungen gebaut. Eine dritte Wicklung ist nur in einigen besonderen Fällen erforderlich, z. B. Einspeisung der Prüfspannung, Anschluss an besondere Filteranordnungen.

6.3.2 Wicklungsanordnungen

6.3.2.1 Allgemeines

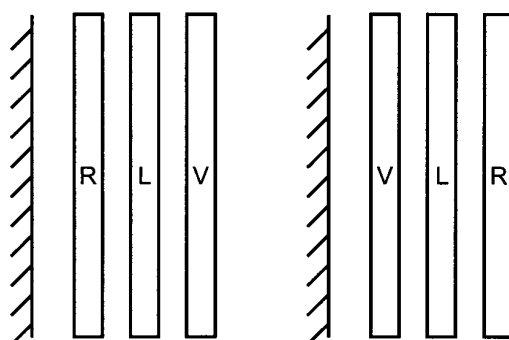
In Kerntransformatoren sind die Wicklungen zylinderförmig und konzentrisch um den Kernschenkel angeordnet. Der Anzapfungsteil der netzseitigen Wicklung bildet im allgemeinen eine eigene physikalisch getrennte Wicklung, die Steuerwicklung. Die einzelnen Wicklungen haben annähernd gleiche Höhe und gleiche Verteilung der Amperewindungen über die Wicklungshöhe.

Die Steuerwicklung ist im allgemeinen physikalisch nahe dem Hauptteil der Netzwicklung angeordnet aber nicht zwischen Ventil- und Netzwicklung (siehe Abschnitt 7, Anzapfungen und Impedanzen und Abschnitt 9, Verluste).

Eine dritte Wicklung, falls eingebaut, ist allgemein dicht beim Kern.

6.3.2.2 Zwei Wicklungen

Im allgemeinen gibt es zwei Möglichkeiten, die einzelnen Wicklungen in einem Zwe Wicklungstransformator anzuordnen, wie oben in Bild 6 dargestellt. Die Haupt- und Steuerwicklungen bilden die netzseitigen Wicklungen. Die ventilseitige Wicklung wird von einer einzelnen Wicklung gebildet.



Legende

- R Steuerwicklung (Anzapfung)
- L Hauptwicklung (Netz)
- V Ventilwicklung

Bild 11 – Zwei Grundanordnungen der einzelnen Wicklungen eines Zweiwicklungstransformators

Tabelle 1 – Anordnungen von zwei Wicklungen

Relative Lage der Wicklung	Vorteile	Nachteile
Steuerung - Netz - Ventil	Gleichstrom-Ausgangsleitungen leicht anzuordnen	Mechanische Ausführung der Ausgangsleitungen für die Steuerwicklung Wechselstrom-Ausgangsleitung Beschränkte Lösung für die Steuerwicklung
Ventil - Netz - Steuerung	Wechselstrom-Ausgangsleitungen leicht anzuordnen Steuer-Ausgangsleitung leicht anzuordnen Steuerung auf der Sternpunktseite	Gleichstrom-Ausgangsleitungen komplizierter auszuführen

6.3.2.3 Drei Wicklungen

Die Hauptlösung ist die Folgende:

In der Planung von Einphasentransformatoren gibt es allgemein zwei bewickelte Schenkel, einen für Stern/Dreieck- und den zweiten für Stern/Stern-Schaltung. Das bedeutet, dass die Ventilwicklung der Dreieckschaltung die $\sqrt{3}$ fache Anzahl Windungen der Wicklung in Sternschaltung hat, aber einen Laststrom von $1/\sqrt{3}$ des Stroms der Wicklung in Sternschaltung.

Die relativen Lagen der einzelnen Wicklungsschalen sind die gleichen, wie bei einem Zweiwicklungstransformator, siehe Tabelle 1.

Wenn die physikalische Größe nur begrenzte Nennleistungen und Netzspannungen zulässt, z. B. ein Rückarbeits-Stromrichter mittlerer Größe, kann der Transformator als dreiphasiger Dreiwicklungstransformator gebaut werden. Anforderungen an annähernd gleiche Impedanzen zwischen dem netzseitigen Anschluss und den zwei Ventilanschlüssen fordern oft die Planung mit zwei Wicklungsanordnungen, die axial auf dem gleichen Schenkel angeordnet sind, eine so genannter axiale Unterteilung. Die zwei netzseitigen Wicklungen mit ihren Steuerwicklungen sind parallel angeschlossen und eine der Ventilwicklungen ist im Dreieck, die andere im Stern geschaltet. Die relative Lage der einzelnen physikalisch getrennten Wicklungen stimmt mit Bild 11 überein.

Eine Anordnung, in der jede der zwei ventilseitigen Wicklungen zwei konzentrische Lagen belegen, oft auf entgegengesetzten Seiten der Netzwicklung, ist allgemein keine realisierbare Alternative. Bei einem Transformator mit Spannungsregelung wird es schwierig sein, die gleiche Impedanz zu den zwei ventilseitigen Wicklungen für alle Stufenstellungen zu erhalten.

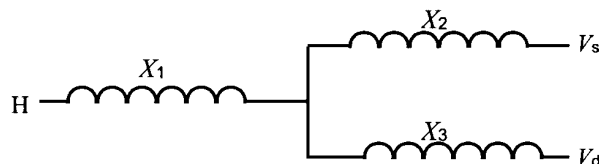
6.3.3 Impedanzbetrachtungen - Kopplungsimpedanz

6.3.3.1 Allgemeines

Das Impedanzmodell zwischen einem Netz- und zwei Ventilanschlüssen kann durch drei Impedanzen dargestellt werden, die in ein und demselben Punkt zusammengeschaltet sind, mit zwei Zweigen zu den Ventilanschlüssen und einem zum Netzanschluss, auch gemeinsame Kopplungsimpedanz genannt.

Im allgemeinen muss die gemeinsame Kopplungsimpedanz so klein wie möglich sein, um Wechselwirkungen zwischen den Spannungen während der Kommutierung zu vermeiden.

In Zweiwicklungstransformatoren ist die gemeinsame Kopplungsimpedanz durch den Transformator nicht vorhanden; ein Beitrag zur Kopplungsimpedanz kann man nur von der gemeinsamen Sammelschiene erhalten. Dreiwicklungstransformatoren, bei denen die zwei Ventilwicklungen auf verschiedenen Schenkeln angeordnet sind, werden auch keine Kopplungsimpedanz haben. Dreiwicklungstransformatoren, die eine axiale Unterteilung verwenden, werden auch eine geringe gemeinsame Kopplungsimpedanz aufweisen.



Legende

$X_1 + X_2 = X_1 + X_3 =$ Transformatorimpedanz

X_1 idealerweise gleich Null, aber immer viel kleiner als X_2 und X_3

Bild 12 – Kopplungsimpedanz

7 Anzapfungen und Impedanzen

7.1 HGÜ-Anwendungen

7.1.1 Impedanzwert

Die ausgewählte Impedanz ist das Ergebnis von Einflüssen einer Zahl von Anforderungen. Eine hohe Impedanz, obwohl sie die Oberschwingungsstrompegel verringert, erhöht die Kommutierungsreaktanz, die zu einem erhöhten Blindleistungsverbrauch des Stromrichters führt und dadurch die Kosten der Filterkreise und der Ventilbaugruppe erhöht.

Eine niedrige Impedanz hat einen Einfluss auf die Betrachtung der Kurzschlusskräfte und erhöht die Größe und das Gewicht des Transformators mit Folgewirkungen auf die Betrachtung der Kosten und des Transports.

7.1.2 Impedanzschwankungen

Es ist entscheidend, dass die wirkliche und die gemessene Transformatorimpedanz innerhalb einer gegebenen Abweichung von einem festgelegten Wert bleibt. Abweichungen können systemabhängig ebenso wie zufälliger Art sein.

prEN 61378-3:2004

Systemabhängige Abweichungen können ihren Ursprung in Einschränkungen im Entwurf und bei der Fertigung haben. Zufällige Abweichungen hängen von Fertigungsschwankungen und Messungenauigkeiten ab. Impedanzänderungen als Funktion der Stufenstellung können als systemabhängige Abweichungen betrachtet werden, bei denen die Art der Stufenanordnung die Richtung der Abweichung beeinflussen wird, d. h. lineare oder Umkehrstufen.

Erlaubte Abweichungen der Impedanz von festgelegten Werten können betreffen:

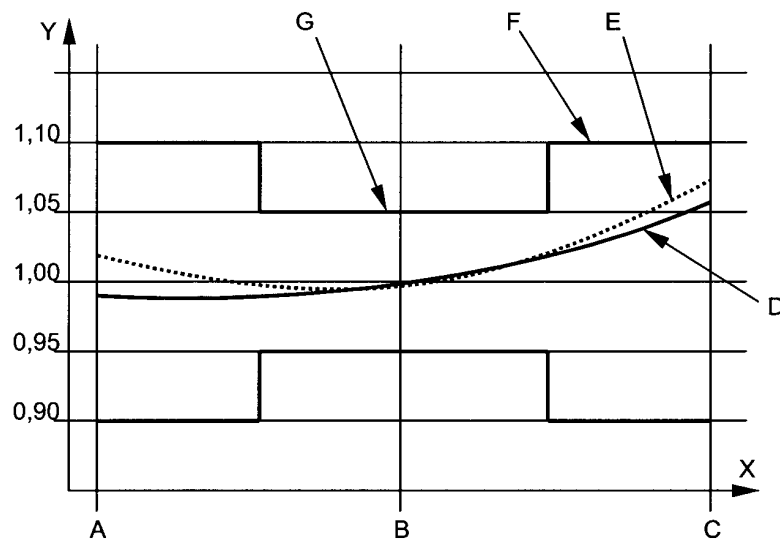
- Abweichungen von einem festgelegten Impedanzwert einer Hauptanzapfung;
- Veränderlichkeit zwischen einzelnen Phasen;
- Veränderlichkeit zwischen Transformatoreinheiten;
- Veränderlichkeit innerhalb des Anzapfungsbereichs;
- Abweichungen zwischen Wicklungen in Stern- oder Dreieckschaltung.

Der Käufer kann für alle fünf Möglichkeiten Grenzen festlegen.

Falls nichts anderes festgelegt, werden die in IEC 60076-1 niedergelegten Regeln für zulässige Grenzabweichungen zusammen mit den nachfolgenden Anforderungen angewendet.

Die durch den Käufer festgelegte Abweichung der Impedanz darf 5 % im üblichen Betriebsbereich des Stufenschalters nicht überschreiten. Außerhalb dieses Bereichs darf die Abweichung bis zu 10 % ansteigen, siehe Bild 13.

Die Impedanzänderungen zwischen einzelnen Phasen, Transformatoreinheiten und Wicklungen in Stern- und Dreieckschaltung sollten in der gleichen Stufenstellung 3 % nicht überschreiten. Die wirksame Auslöschung von Oberschwingungen in einer 12-Puls-Brückenschaltung erfordert geringe Impedanzveränderlichkeit. Große Änderungen zwischen Phasen, Einheiten und Wicklungen in Stern- und Dreieckschaltung werden die Größe der Filter erhöhen.



Legende

A	Kleinste Windungszahl	D	Lineare Anzapfung	G	± 5 % Toleranzband
B	Übliche Windungszahl	E	Umkehranzapfung	X	Windungen
C	Größte Windungszahl	F	± 10 % Toleranzband	Y	spezifische Transformatorimpedanz

Bild 13 – Typische Impedanzmodelle

8 Isolationsaspekte und Spannungsprüfungen

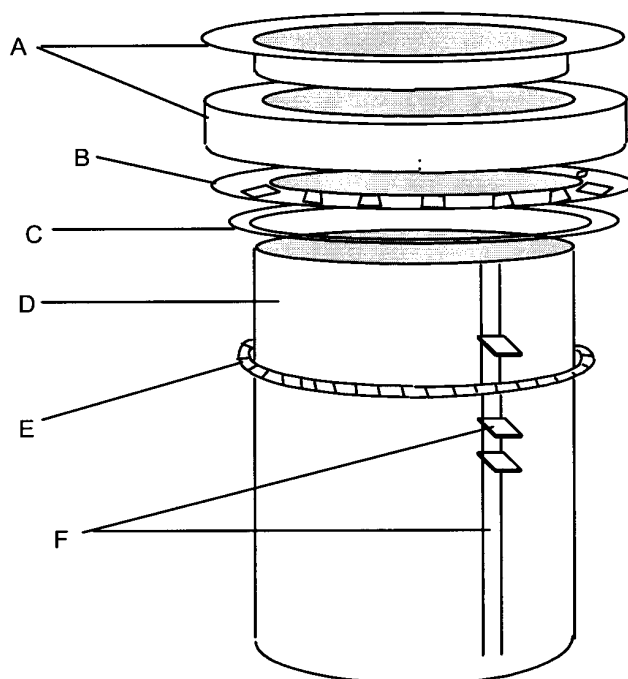
8.1 Hybrid-Isolationssysteme

8.1.1 Allgemeines

Hybrid-Isolationssysteme werden in erster Linie in industriellen Stromrichtertransformatoren eingesetzt, weil sich dort in solchen Transformatoren Betriebsvorteile bei erhöhten Temperaturen ergeben.

Wann immer der Begriff „hybrid“ bezüglich eines Isolationssystems gebraucht wird, ist gemeint, dass Hochtemperatur-Isolierwerkstoffe (wie Aramidpapier oder Hochtemperatur-Isolierlack) mit Niedertemperaturwerkstoffen (wie Zellulose) kombiniert werden.

Isolierwerkstoffe werden in einigen der verschiedenen Bauteile verwendet, die eine Transformatorwicklung bilden: Leiterisolierung, Abstandshalter, Zylinder, Winkelringe u.s.w., siehe Bild 14.



Legende

A	Winkelringe und Abdeckungen	C	Statikringe	E	Leiterisolierung
B	Hilfsunterlegscheibe	D	Zylinder	F	Axiale und radiale Abstandshalter

Bild 14 – Bauteile eines typischen Industrie-Stromrichtertransformator-Isolationssystems

Hybridisolation wird seit vielen Jahren für ölgekühlte Transformatoren angewendet. Hochtemperaturwerkstoffe werden für Teile in direktem Kontakt mit Kupfer (Leiterisolierung) oder in unmittelbarer Nähe dazu (Abstandshalter), verwendet, während alle anderen Isolationsbauteile aus Zellulose sind. Wicklungen mit Hybridisolation sind für eine Durchschnittsübertemperatur geplant worden, die höher ist, als die für Zellulose zulässige (ohne Verkürzung der Transformatorlebensdauer), dadurch erhöht sich die Leistung pro Volumeneinheit.

8.1.2 Hybridisolation für industrielle Stromrichtertransformatoren

Wann immer ein Transformator in Verbindung mit einem Stromrichter benutzt wird, werden Oberschwingungsströme in seine Wicklungen eingekoppelt. Die Oberschwingungsströme werden die Wirbelstromverluste der Wicklungen durch einen Faktor erhöhen, der in IEC 61378 Teil 1 und Teil 2 festgelegt ist. In einem gewöhnlichen Transformator sind die Wirbelstromverluste abhängig von der radialen und axialen Komponente des magnetischen Streuflusses und von den geometrischen Abmessungen des Leiters, der diesem Fluss ausgesetzt ist, siehe IEC 61378-1. Die Wirbelstromverluste ändern sich über die Wicklungshöhe. Sie sind niedriger im mittleren Teil der Wicklung, wo der Streufluss meist parallel zur Höhe des Leiters fließt und steigen an den Enden der Wicklung, wo der Streufluss nahezu senkrecht zur Breite des Leiters fließt.

Diese nicht einheitliche Verteilung von Verlusten ergibt sich aus der nicht einheitlichen Verteilung der Temperatur über die Wicklungshöhe. Die Differenz zwischen dem Heißpunkt und der mittleren Wicklungstemperatur ist deshalb erhöht, über die hinaus, die durch die üblichen Kühlungsmechanismen verursacht werden.

In Stromrichtertransformatoren kann, falls Oberschwingungsströme in Betracht gezogen werden, die Differenz zwischen dem Heißpunkt und der mittleren Wicklungstemperatur wegen des entsprechenden Anstiegs der Wirbelstromverluste weiter ansteigen, siehe 9.6 von IEC 60076-8.

Für dieses Problem ist eine Reihe von Lösungen verfügbar. Nach Vereinbarung mit dem Käufer ist die Übernahme von Hochtemperatur-Isolierwerkstoffen in den Heißpunktbereich eine Lösung, wenn es nicht möglich ist, die Heißpunkttemperatur auf die zulässigen Klasse A-Temperaturgrenzen zu verringern.

In Leistungstransformatoren ist Hybridisolation allgemein vorgesehen, um die zulässige mittlere Wicklungstemperatur und damit die Nennleistung zu erhöhen. Deshalb wird Hochtemperatur-Isolierwerkstoff in direkter Nähe aller Wicklungsleiter verwendet. In Stromrichtertransformatoren könnte Hybridisolation auch in den Nahbereichen örtlich hoher Heißpunkttemperaturen verwendet werden, während die mittlere Wicklungstemperaturerhöhung innerhalb der Grenzen bleibt. Es folgt auch, dass Hochtemperatur-Isolierwerkstoff auf die Wicklungsleiter in den Heißpunktbereichen angewendet werden sollte.

8.2 Spannungsprüfungen

8.2.1 Allgemeines

Spannungsprüfungen und Isolationsaspekte beziehen sich in erster Linie auf HGÜ-Stromrichtertransformatoren. Die Spannungsprüfungen und Isolationsaspekte bei industriellen Stromrichtertransformatoren stimmen mit denen von gewöhnlichen Leistungstransformatoren überein und werden von IEC 60076-3 abgedeckt.

Das Isolationssystem in einem HGÜ-Stromrichtertransformator wird Belastungen durch die angelegte Spannung und induzierte Spannungen ausgesetzt. Für die Netzwicklung und ihre Anschlüsse sind die Spannungen von gleicher Art wie für einen gewöhnlichen Transformator, das heißt, statische Wechselspannungen und transiente Spannungen wie Blitz- und Schaltstoßspannungen. Die Ventilwicklungen und ihre Anschlüsse werden, zusätzlich zu den Spannungen in einem gewöhnlichen Transformator, auch Gleichspannungen ausgesetzt. Das führt auf der anderen Seite zu einer Erhöhung einer kombinierten Gleich- und Wechselspannungsbelastung.

Die Verteilung aller zeitabhängigen Spannungen über das Isolationssystem ist hinreichend bestimmt durch die Geometrie und die Dielektrizitätskonstante der beteiligten Werkstoffe. Im Folgenden wird angenommen, dass diese Werkstoffe hauptsächlich Transformatorenöl und Zellulose sind. Die Verteilung von statischer Gleichspannung in Öl-/Zellulose-Isolation weicht bedeutend von der von zeitabhängigen Spannungen ab (Stoß- und Wechselspannungen). Die Verteilung wird hauptsächlich durch Scheinwiderstände bestimmt. Diese Widerstände sind in großem Umfang abhängig von Raumladungen im Isolationssystem. Als Folge davon ist der spezifische Widerstand kein gleichförmiger Wert und ändert sich mit einer Anzahl von Parametern, wie Temperatur, elektrische Belastung, Feuchtigkeit, Geschwindigkeit der Ölströmung, Dauer der Spannungsanwendung, Alterung und chemischer Aufbau. Diese Erscheinungen werden besser durch ein Raumladungs-Zeitmodell dargestellt.

Aus praktischer Sicht ist es allgemein anerkannt, dass eine Isolationsstruktur als R-C-Netzwerk modelliert werden kann, um ihr Verhalten unter Gleichstrombedingungen zu bestimmen. Wenn anfangs eine Gleichspannung eingespeist wird, ist die Spannungsverteilung kapazitiv, während das endgültige oder statische Gleichspannungsfeld in einer komplexen Struktur durch die relativen spezifischen Widerstände der beteiligten Werkstoffe bestimmt wird. In den meisten Fällen gibt die Anwendung eines R-C-Modells einen mäßigen und sicheren Planungsspielraum. Das spezifische Widerstandsverhältnis zwischen fester Isolation und Öl kann bei Raumtemperatur von 10:1 bis zu 500:1 streuen. Wenn die Temperatur erhöht wird, sinkt das spezifische Widerstandsverhältnis typisch bis zu einer Größenordnung.

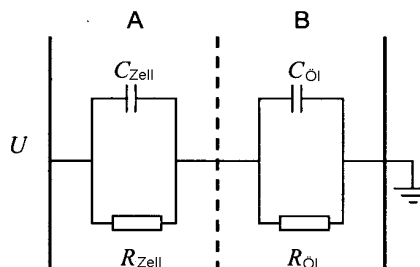


Bild 15 – Isolationssystem, äquivalente R-C-Schaltung

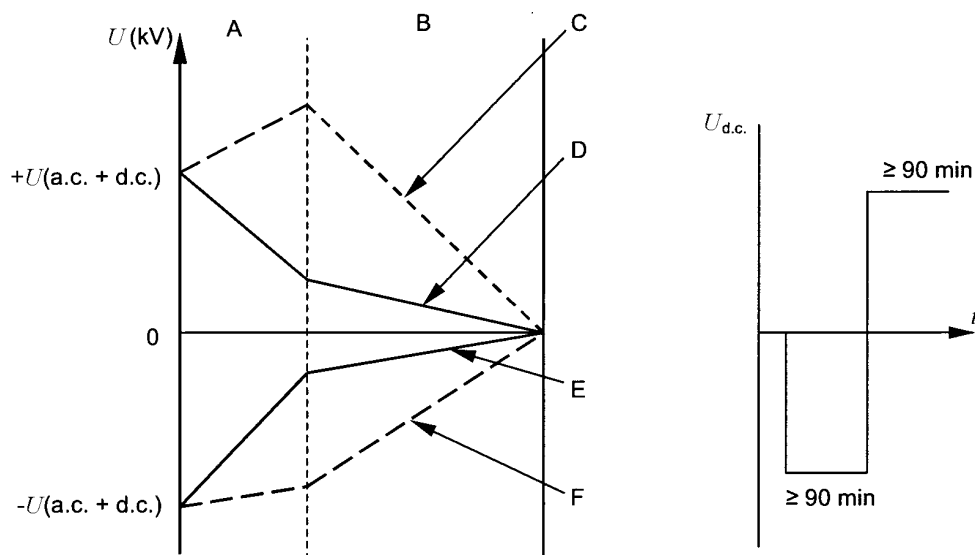
Das in Bild 15 gezeigte Modell kann verwendet werden, um das Isolationssystem nachzubilden. Es wird angenommen, dass die Grenzfläche zwischen der Öl- und der Zellulosesperrschicht eine Äquipotentialfläche ist.

Weil die Wechsel- und Gleichspannungsbeanspruchungen überwiegend von unabhängigen Parametern bestimmt werden, kann angenommen werden, dass jedes komplexe Spannungsfeld in seine Wechsel- und Gleichspannungsbestandteile zerlegt werden kann. Die Beanspruchung durch jede Spannung kann einzeln berechnet werden, und beide Beanspruchungen können kombiniert werden, um ein Maß für die aktuelle Beanspruchung zu geben.

Bild 16 gibt einen Hinweis auf die Beanspruchungen bei stationärer Gleichspannung und unmittelbar nach einem Polaritätswechsel, die die zwei kritischen Belastungszustände sind. Die größte Beanspruchung tritt auf, wenn das spezifische Widerstandsverhältnis Zellulose/Öl groß ist.

Unter stationären Bedingungen ist die Widerstandsverteilung der Gleichspannung vorherrschend. Normalerweise ist der spezifische Widerstand so, dass der Hauptteil des gesamten Spannungsfalls über der Zellulose abfällt. Zusammen mit dem Wechsellspannungsteil wird die Verteilung im zusammengesetzten System der niedrigeren Linie in Bild 16 entsprechen. Deshalb wird sich eine wesentliche Beanspruchung in der festen Isolation entwickeln und das hauptsächlich wegen der angelegten Gleichspannung.

Unmittelbar nach dem Polaritätswechsel (die obere Linie in Bild 16), bleibt die Ladung der Zellulose in entgegengesetzter Richtung erhalten, wird aber durch die kapazitive Spannungsverteilung an der 2U-Stufe ($-U$ bis $+U$) verringert. Die Folge ist ein bedeutender Anstieg der Spannung über dem Öl. Die Werte der beteiligten spezifischen Widerstände und Dielektrizitätskonstanten bestimmen die vorübergehende Spannung über dem Öl. Diese Spannung ist normalerweise höher als die Spannung über dem Öl unmittelbar nach dem Anlegen einer Spannung $+U$ oder $-U$, aber sie wird unter stationären Bedingungen auf einen geringen Wert verringert (hauptsächlich Wechsellspannung).



Legende

A Zellulose	D Schlussverteilung nach Umkehr	t Zeit
B Öl	E Schlussverteilung vor Umkehr	
C Anfangsverteilung nach Umkehr	F Anfangsverteilung vor Umkehr	

Bild 16 – Spannungsverteilung vor und unmittelbar nach Polaritätswechsel

8.2.2 Dielektrische Sicherheitsabstände bei Gleichspannungs-Dauer und Polaritätswechselprüfung

Während dem Betrieb werden bedeutende Änderungen des spezifischen Widerstands für Öl und Zellulose und daraus folgende spezifische Widerstandsverhältnisse auftreten. Das wirft die Frage auf, ob die Werksprüfung die Bedingungen wiedergibt, die zeigen, dass ein ausreichender dielektrischer Sicherheitsabstand für die Planung vorhanden ist.

Das Ziel der Gleichspannungs-Dauerprüfung mit angelegter Spannung ist es, nachzuweisen, dass es im Betrieb entlang der Zelluloseisolation einen ausreichenden Sicherheitsabstand oberhalb der Betriebsbeanspruchung gibt.

chungen gibt. Die Prüfung wird bei Raumtemperatur durchgeführt, weshalb das spezifische Widerstandsverhältnis zwischen Zellulose und Öl vergleichsweise hoch ist. Das wird Beanspruchungen hervorrufen, die wesentlich über den Höchstwerten im Betrieb liegen. Die Prüfung bei hoher Temperatur führt zu einem niedrigeren Sicherheitsabstand.

Das Ziel der Polaritätsumkehrprüfung ist es, nachzuweisen, dass es im Betrieb in den Ölleitungen einen ausreichenden Sicherheitsabstand oberhalb der Betriebsbeanspruchungen gibt. Jedoch wird die Dauer der Polaritätsumkehrbeanspruchung unter Prüfbedingungen in Frage gestellt. Es hat sich gezeigt, dass spezifische Widerstandsverhältnisse in der Nähe von 1:1, im Betrieb Beanspruchungen in den Ölleitungen erzeugen können, die nicht ausreichend durch die Polaritätsumkehrprüfung nachgewiesen werden können. Aus diesem Grund wurde eine neue 1 h-Wechselspannungsprüfung mit angelegter Spannung mit Teilentladungsmessung vorgestellt. Diese Prüfung erzeugt eine Ölleitungsdauerbeanspruchung, die ausreicht, um einen hinreichenden Sicherheitsabstand unter schlechtesten Bedingungen zu zeigen, die man im Betrieb bei Polaritätsumkehr erhält.

Es wird gefordert, dass die Gleichspannungsprüfung bei einer Temperatur von $20\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ ausgeführt werden muss. Falls die Prüfungen unmittelbar nach der Erwärmungsprüfung durchgeführt werden, werden die Zeitkonstanten für die Aufladung und Nachladung des Isolationssystems durch die hohen Temperaturen kürzer. Das kann zur Folge haben, dass die dielektrischen Abstände nicht korrekt gezeigt werden.

Es wird auf 5.2.3 und das Papier von Cigré JWG 12/14.10 verwiesen: „Relationship between test and service stresses as a function of resistivity ratio for HVDC convertor transformers and smoothing reactors.“

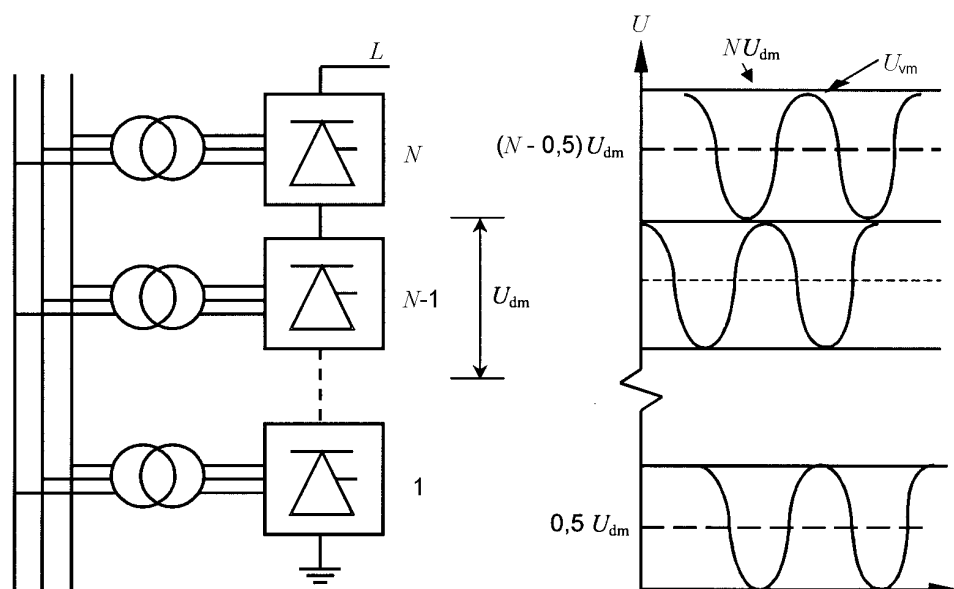
Die Empfehlungen des Cigré-Papiers wurden in den dielektrischen Prüfungsanforderungen von IEC 61378-2 eingearbeitet. Zusammengefasst enthält diese Norm drei dielektrische Prüfungen um die Gleichspannungs-Isolationsstruktur der Ventilwicklungen zu bestätigen:

- Langzeitprüfung mit angelegter Steh-Gleichspannung;
- die Polaritätsumkehrprüfung;
- Prüfung mit angelegter Steh-Wechselspannung.

8.2.3 Kommentare zu den dielektrischen Prüfverfahren

8.2.3.1 Allgemeines

Bild 17 zeigt eine vereinfachte Darstellung der AC/DC-Umwandlung und die Festlegung der Spannungen U_{vm} und U_{dm} , wie in IEC 61378-2 bestimmt.



Legende

L Strecke

t Zeit

Bild 17 – AC/DC-Umwandlung - vereinfachte Darstellung

8.2.3.2 Prüfung mit angelegter Steh-Gleichspannung

Der Prüfpegel U_{dc} wird durch die Gleichung in 8.2.3 von IEC 61378-2 ausgedrückt.

Entsprechend Bild 3 ist der Anteil $(N - 0,5)U_{dm}$ der Gleichspannungspegel der Transformatorwicklung.

$0,7U_{vm}$ ist der Spitzenwert des überlagerten Wechselspannungspegels. Die Konstante 0,7 ist der Multiplikationsfaktor, um diesen Spitzenwert aus dem Effektivwert der Leiter-Leiter-Wechselspannung zu erhalten.

In Übereinstimmung mit dem gleichen Verfahren, das zur Einrichtung von üblichen Werten der Wechselspannungs-Dauerprüfung verwendet wird, wird der Multiplikator 1,5 angewendet, um die Prüfspannung zu erhalten.

8.2.3.3 Polaritätsumkehrprüfung

Der Prüfpegel U_{pr} wird durch die Gleichung in 8.2.4 von IEC 61378-2 ausgedrückt.

Es werden die in 8.2.3.2 erwähnten Grundsätze angewendet. Wenn jedoch Gleichstrom mit überlagertem Wechselstrom betrachtet wird, wird die Gleichstromkomponente bei der Polaritätsumkehr verdoppelt und die Wechselstromkomponente wird addiert, aber nicht verdoppelt. Deshalb wird nur die Hälfte der Wechselstromkomponente addiert, was den Faktor 0,35 liefert. Das endgültige Ergebnis wird mit 1,25 multipliziert, um einen Sicherheitsabstand zu geben.

Die Polaritätsumkehr wird sowohl von der positiven zur negativen Polarität, als auch in umgekehrter Richtung durchgeführt. Der Grund dafür ist, dass die Isolationsstruktur nicht vollkommen symmetrisch ist und der Einfluss der transienten Beanspruchungen sich während der Umkehr, in Abhängigkeit von der Polarität, unterscheiden wird.

8.2.3.4 Prüfung mit angelegter Wechselspannung

Der Prüfpegel U_{sc} wird durch die Gleichung in 8.2.5 von IEC 61378-2 ausgedrückt.

Der Wechselspannungs-Prüfpegel entspricht der Summe des Gleichspannungspegels der Ventilwicklung und des Spitzenwertes der Leiter-Erde-Wechselspannung und Teilung durch $\sqrt{2}$ ergibt den Effektivwert. In Übereinstimmung mit dem nach IEC 60076-3 verwendeten Verfahren, das zur Einrichtung von üblichen Werten der Wechselspannungs-Dauerprüfung verwendet wird, wird der Multiplikator 1,5 angewendet, um die Prüfspannung zu erhalten.

Es ist zu beobachten, dass diese Prüfung kein Ersatz für die Polaritätsumkehrprüfung ist. Sie ist nur eine Ergänzungsprüfung, aus den oben beschriebenen Gründen.

9 Verluste

9.1 Allgemeines

Jedes Mal, wenn ein Wechselstrom durch die Wicklung eines Transformators fließt, erzeugt er zusätzlich zu den I^2R -Verlusten:

- Wirbelstromverluste in Wicklungen;
- Wirbelstromverluste in Hochstrom-Sammelschienen, falls vorhanden;
- Streuverluste in Stahlbauteilen.

ANMERKUNG 1 Die externe Kurzschlussverbindung, die zur Messung der Kurzschlussverluste eingerichtet wird, beeinflusst die Messergebnisse. Vor Beginn der Prüfung ist zwischen dem Lieferanten und dem Käufer eine Vereinbarung zu erzielen, wie die Messergebnisse aufgrund von Verlusten und Impedanzen des Prüfkreises zu korrigieren sind.

ANMERKUNG 2 Wenn mit Transduktoren ausgestattete Einheiten einer Prüfung der Kurzschlussverluste ausgesetzt werden, könnten die elektrischen Größen nicht sinusförmig sein. Vor Beginn der Prüfung ist zwischen dem Lieferanten und dem Käufer eine Vereinbarung zu erzielen, wie die Messergebnisse zu korrigieren sind.

Diese Verluste haben ihren Ursprung wie folgt:

Ein durch die Wicklung fließender Wechselstrom, erzeugt einen magnetischen Wechselfluss. Dieser Wechselfluss induziert elektromotorische Kräfte in allen leitfähigen Werkstoffen, auf die er trifft. Diese elektromotorischen Kräfte erzeugen Wirbelströme in allen leitfähigen Werkstoffen und daher erzeugen sie Wirbelstrom- und Streuverluste.

Elektromotorische Kräfte sind proportional zur Ableitung des magnetischen Flusses. wenn wir einen sinusförmigen Zustand betrachten, dann sind die elektromotorischen Kräfte proportional zu:

$$f \cdot B$$

Dabei ist f die Frequenz und B die magnetische Flussdichte.

Die Größe des induzierten Wirbelstroms ist proportional zu:

$$(f \cdot B) / R$$

Dabei ist R der Widerstand auf den die Wirbelströme treffen.

Wenn man bedenkt, dass B allgemein proportional zum Wicklungsstrom I ist, dann sind die Wirbelstromverluste proportional zu:

$$(f^2 \cdot B^2) / R \quad \text{und deshalb} \quad P_{\text{Wirbelstrom}} = \text{Konstante} \cdot (f^2 \cdot I^2) / R \quad (1)$$

prEN 61378-3:2004

Diese Beziehung gilt auch für Streuverluste in Stahlbauteilen, falls sie nicht gesättigt sind.

9.1.1 Verluste und Frequenz

Wirbelströme, in einem leitfähigen Werkstoff durch einen magnetischen Wechselfluss induziert, verteilen sich selbst ungleichmäßig in dem Leiterabschnitt und konzentrieren sich in der Nähe der Leiteroberfläche. Diese Erscheinung ist als Skin-Effekt bekannt.

Die Eindringtiefe von Wirbelströmen hängt von den elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Werkstoffs ab, zusammen mit der Frequenz des magnetischen Wechselfelds. Diese Beziehung kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\text{Eindringtiefe} = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \pi \cdot f \cdot \sigma}} \quad (2)$$

Dabei ist

μ die magnetische Permeabilität des Werkstoffs;

f die Frequenz;

σ die elektrische Leitfähigkeit.

Der Skin-Effekt beeinflusst dann den Wert des Leiterwiderstands bei einer gegebenen Frequenz. Deshalb kann Gleichung (1) auch geschrieben werden als:

$$P_{\text{wirbelstrom}} = \text{Konstante} \cdot \frac{(f^2 \cdot I^2)}{R(f)} \quad (3)$$

Der Leiterwiderstand bleibt bis zu einer bestimmten Frequenz (genannt Übergangsfrequenz) konstant. Wenn die Frequenz weiter erhöht wird, erhöht sich der Widerstand in der Art, die durch die Gleichungen in IEC 61378-1, Anhang A beschrieben wird.

Wirbelstromverluste in einem gegebenen Leiter steigen mit dem Quadrat der Frequenz bis zur Übergangsfrequenz. Für höhere Frequenzen gilt die Beziehung:

$$P_{\text{wirbelstrom}} \propto f^x \quad (4)$$

Dabei ist $0,5 < x \leq 2$ und wächst ständig mit sinkender Frequenz.

Der Wert der Übergangsfrequenz eines bestimmten Leiters hängt wesentlich von den geometrischen Abmessungen des Leiters selbst ab. Daher ergibt sich, je größer die Abmessungen, desto niedriger die Übergangsfrequenz, siehe IEC 61378-1, Anhang A.

Die verschiedenen Leiterwerkstoffe innerhalb des Transformators können in zwei Gruppen aufgeteilt werden:

- Wicklungsleiter mit Abmessungen, die gewöhnlich¹⁾ vergleichbar mit der Eindringtiefe bei Grundfrequenz sind.
- Hochstrom-Sammelschienen und Stahlbauteile, bei denen mindestens ein Maß wesentlich größer als die Eindringtiefe bei Grundfrequenz ist.

Die geometrischen Unterschiede zwischen den zwei Gruppen werden durch eine andere Beziehung zwischen Wirbelstromverlusten und Frequenz wiedergegeben. Wirbelstromverluste in Wicklungsleitern ändern sich mit f^2 , während solche in Hochstrom-Sammelschienen und Stahlbauteilen sich mit $f^{0,8}$ ändern.

¹⁾ Folienwicklungen sind hierfür eine Ausnahme, siehe IEC 61378-1, Anhang A, Gleichung (A.4).

Die Verwendung von gerade zwei Exponenten ist eine Vereinfachung bezüglich dem, was in IEC 61378-1, Anhang A, beschrieben ist, jedoch haben einige Messungen und Simulationen gezeigt, dass diese Exponenten beide sicher und angemessen sind.

9.1.2 Stromüberschwingungen

Der Oberwellenstrom erhöht die Wirbelstrom- und Streuverluste des Transformators. Ein solcher Anstieg kann Pegel erreichen, die zu einem Transformatorfehler führen.

Stromrichter, an die Transformatoren angeschlossen sind, wirken als Quellen von Oberwellenströmen. Die Kenngrößen solcher Überschwingungen hängen ab:

- von der Leistungsstromkreisordnung des Stromrichters;
- vom Regelungsverfahren des Stromrichters;
- von der Wechselwirkung zwischen Stromrichter und dem angeschlossenen System;
- von den Kenndaten der Leistungselektronik.

Der Hersteller des Transformators hat nicht die notwendigen Informationen und Kenntnisse um die vom Stromrichter erzeugten Stromüberschwingungen vorherzusagen. Entsprechend fordern die Teile 1 und 2 dieser Norm, dass ein Überschwingungsspektrum im Pflichtenheft enthalten ist. Der Käufer hat die Verantwortung, die Überschwingungen zu bezeichnen, denen der Transformator ausgesetzt sein wird, während der Transformatorhersteller die Verantwortung hat, beim Entwurf des Transformators die bezeichneten Überschwingungen in Betracht zu ziehen.

IEC 60146 ermittelt verschiedene Leistungsstromkreisordnungen des Stromrichters. Für jede dieser Anordnungen wurde eine Pulszahl p zugewiesen, so dass es möglich sein würde, die Überschwingungen, die theoretisch vorhanden sein sollten, vorherzusagen.

Aktuelle Entwicklungen in der Elektronik machen die Anwendung von neuen Echtzeit-Regelverfahren möglich, die das Verhalten des Stromrichters wesentlich verändern. Das Ergebnis ist, dass eine klare Beziehung zwischen der Leistungsstromkreisordnung des Stromrichters und der Anzahl von Pulsen und damit dem Wert der Stromüberschwingungen nicht sicher ist (und genauso seine Oberwellen).

9.1.3 Transformatoren mit drei oder mehr Wicklungen, die auf dem selben Kernschenkel gewickelt sind

Wicklungsanordnungen und Streufelder werden durch den Gebrauch eines Exemplars eines Kerntransformators beschrieben. Die gleichen Betrachtungen können auf einen Manteltransformator angewendet werden.

In einem Zweiwicklungstransformator sind die Amperewindungen ausgewogen, falls wir den Magnetisierungsstrom vernachlässigen. Die Überschwingungsströme, die in der Ventilwicklung fließen, sind Überschwingungen (mit gleicher, auf die Einheit bezogener Größe) in der Netzwicklung ausgeglichen. Deshalb ist der Wirbelstromverlust-Erhöpfungsfaktor der Gleiche für die Netz- und die Ventilwicklungen.

Es ist bekannt, dass in einem Transformator mit drei Wicklungen sich die Summe aller Wicklungs-Amperewindungen zu Null addiert und es ist deshalb notwendig, im Einzelnen zu überlegen, wie jeder Erhöpfungsfaktor der Wicklungswirbelstromverluste zu berechnen ist.

Es ist möglich, die folgenden Anordnungen von Dreiwicklungs-Kerntransformatoren zu bestimmen, die durch die Kopplung der Ventilwicklungen gekennzeichnet sind:

- 1) Enge Kopplung - zwei verflochtene Ventilwicklungen und eine Netzwicklung;
- 2) Keine Kopplung - zwei Paar Netz-Ventilwicklungen, die durch einen Zwischenschenkel getrennt sind;
- 3) Lockere Kopplung -
 - i. doppelt konzentrischer Transformator mit einer Netzwicklung, die radial zwischen zwei Ventilwicklungen angeordnet ist;

- ii. zwei parallele, übereinanderliegende Netzwicklungen, jede Netzwicklung steht einer Ventilwicklung gegenüber

Nach Messung der Stromüberschwingungen an allen drei Transformatoranschlussklemmen ist es möglich, zu beobachten, dass während einige der in die Ventilwicklungen eingepprägten Überschwingungen auf der Netzseite mit einem gleichen bezogenen Wert auftreten, andere Überschwingungen auf der Netzseite nicht vorhanden sind.

Deshalb ist es möglich, die in die Ventilwicklungen eingepprägten Überschwingungen in zwei Gruppen einzuteilen:

- 1) Gleichphasige Überschwingungen - es gibt keine Phasenverschiebung zwischen den Überschwingungen, die in den Ventilwicklungen fließen: sie addieren sich und erscheinen auf der Netzseite
- 2) Gegenphasige Überschwingungen - es gibt eine Phasenverschiebung von 180° zwischen diese Überschwingungen, die in den Ventilwicklungen fließen, sie löschen sich aus und erscheinen nicht auf der Netzseite²⁾

Gleichphasige Überschwingungsströme liefern immer einen Beitrag zum Gesamtwert der Wirbelstromverluste.

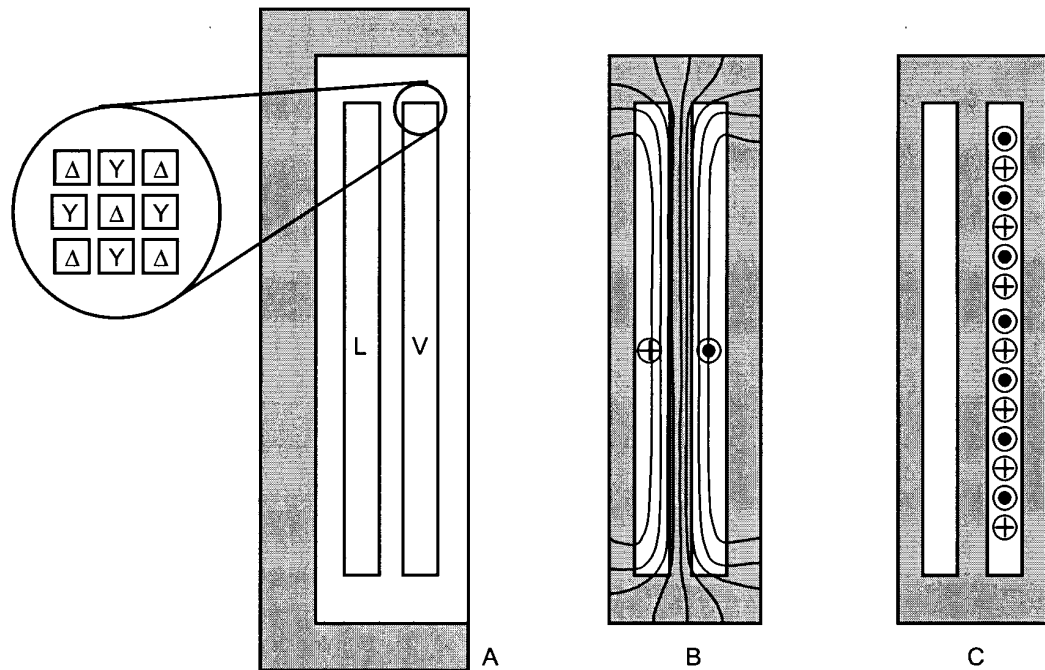
Die Auswirkung von gegenphasigen Überschwingungsströmen steht in Beziehung zur Kopplung der Ventilwicklungen, siehe 5.2 von IEC 61378-1.

- 1) Enge Kopplung - gegenphasige Überschwingungen werden zwischen verflochtenen Ventilwicklungen ausgeglichen; sie erzeugen einen vernachlässigbaren Streufluss, so dass sie nur I^2R -Verluste in den Ventilwicklungen hervorrufen, siehe Bild 18;
- 2) Keine Kopplung - der Zwischenschenkel trennt die magnetischen Kreise der zwei Paare von Netz-Ventilwicklungen; gegenphasige Überschwingungen werden zwischen jedem Ventil-Netzwicklungspaar ausgeglichen, so dass sie I^2R - und Wirbelstromverluste in Netz- und Ventilwicklung hervorrufen, siehe Bild 19;
- 3) Lockere Kopplung, die man mit doppelt konzentrischen Ventilwicklungen erhält - gegenphasige Überschwingungen fließen nicht in der Netzwicklung, da sie zwischen den Ventilwicklungen ausgeglichen sind, in denen sie I^2R - und Wirbelstromverluste hervorrufen, siehe Bild 20;
- 4) Lockere Kopplung, die man mit zwei parallelen Netzwicklungen erhält, die axial verschoben sind - gegenphasige Überschwingungen sind meist vollständig zwischen jedem Ventil-Netzwicklungspaar ausgeglichen, so dass die gleichen Überlegungen wie für den Fall ohne Kopplung angewendet werden, siehe Bild 21.

Wann immer die Größe der gegenphasigen Überschwingungen bedeutend ist und die Wicklungen, in denen sie fließen, locker gekoppelt sind, können die resultierenden Streufelder (mit wesentlichem radialen Anteil) unbeherrschbare örtliche Wirbelstromverluste hervorrufen. In diesen Situationen ist es höchst ratsam, die Auswirkungen von gegenphasigen Überschwingungen mit Hilfe geeigneter Simulationswerkzeuge zu untersuchen.

Ähnliche Betrachtungen auf Grundlage von gegenseitiger Kopplung der Wicklungen sind anwendbar, falls mehr als drei Wicklungen oder Rahmentransformatoren betrachtet werden.

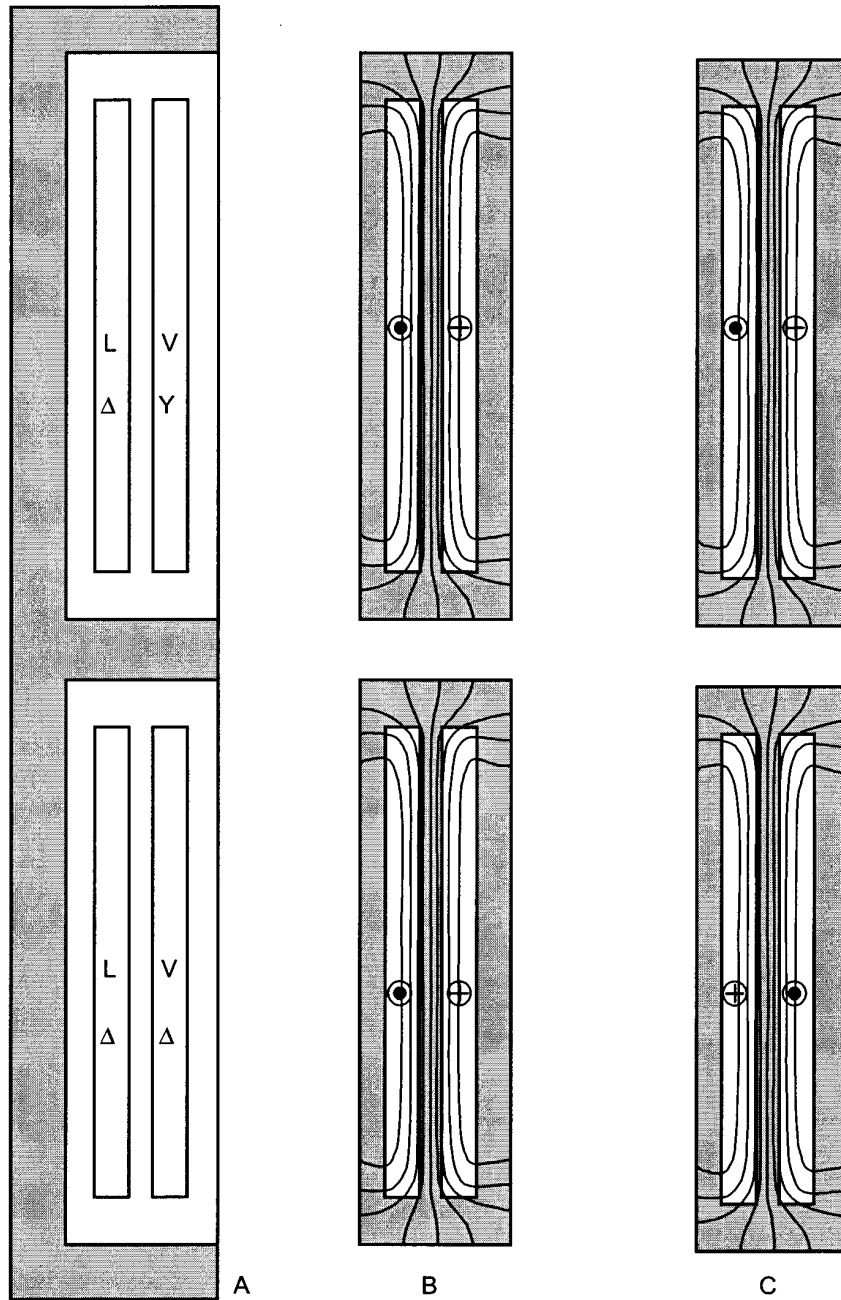
²⁾ wie geradzahlige Überschwingungen in einem Doppelstern-Einweggleichrichter.



Legende

- A Wicklungsanordnung im Kernfenster
- B Durch gleichphasige Oberschwingungen erzeugter Streufluss
- C Durch Oberschwingungen mit einer Phasenverschiebung von 180° erzeugter Streufluss
- L Netzwicklung
- V Verflochtene Ventilwicklungen

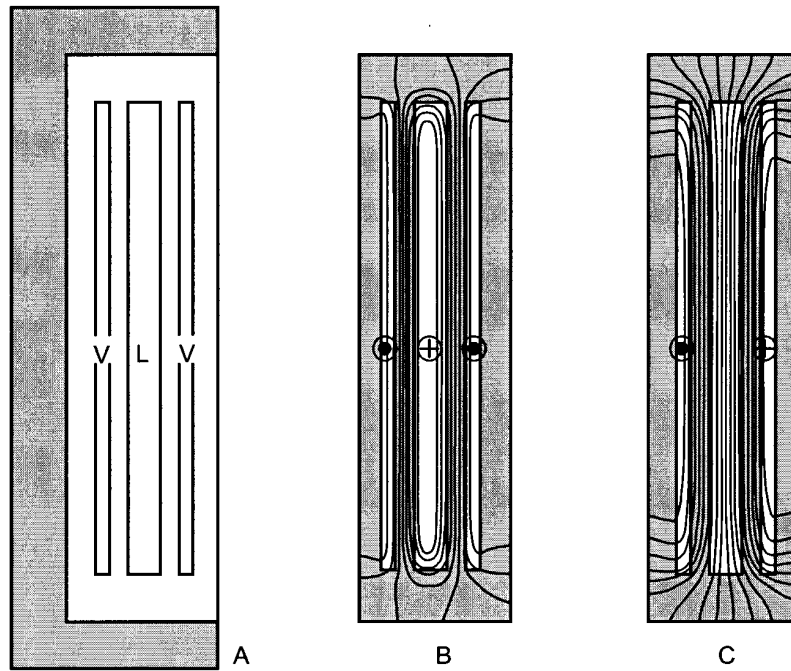
Bild 18 – Streufelder für Dreiwicklungstransformator mit eng gekoppelten Ventilwicklungen



Legende

- A Wicklungsanordnung im Kernfenster
- B Durch gleichphasige Oberschwingungen erzeugter Streufluss
- C Durch Oberschwingungen mit einer Phasenverschiebung von 180° erzeugter Streufluss
- L Netzwicklung
- V Verflochtene Ventilwicklungen

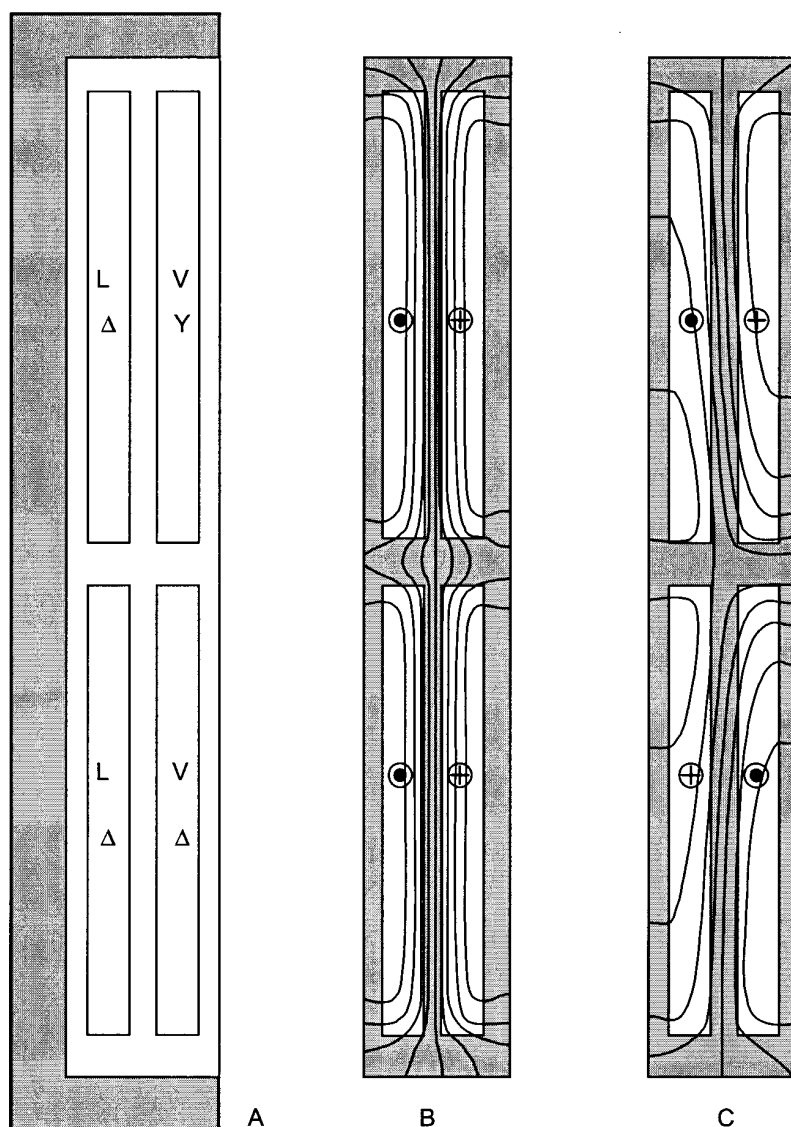
Bild 19 – Streufelder für Dreiwicklungstransformator mit entkoppelten Ventilwicklungen



Legende

- A Wicklungsanordnung im Kernfenster
- B Durch gleichphasige Oberschwingungen erzeugter Streufluss
- C Durch Oberschwingungen mit einer Phasenverschiebung von 180° erzeugter Streufluss
- L Netzwicklung
- V Verflochtene Ventilwicklungen

Bild 20 – Streufelder für Dre Wicklungstransformator mit locker gekoppelten doppelt konzentrischen Ventilwicklungen



Legende

- A Wicklungsanordnung im Kernfenster
- B Durch gleichphasige Oberschwingungen erzeugter Streufluss
- C Durch Oberschwingungen mit einer Phasenverschiebung von 180° erzeugter Streufluss
- L Netzwicklung
- V Verflochtene Ventilwicklungen

Bild 21 – Streufelder für Dreiwicklungstransformator mit locker gekoppelten, doppelt aufeinandergeschichteten Ventilwicklungen

9.1.4 Zweifrequenzprüfung von HGÜ-Transformatoren

Das Verfahren gründet sich auf die Unterschiede im Verhalten von Wirbelstromverlusten in Wicklungen und Streuverlusten in Bauteilen wie in 9.1 beschrieben. Durch die Messung bei zwei Frequenzen ist es möglich, die Einteilung von Wirbelstrom- und Streuverlusten entsprechend dem in 10.3.2 von IEC 61378-2 gezeigten Verfahren zu bewerten. Die Analyse hat gezeigt, dass eine angemessene Genauigkeit für die Einteilung erhalten wird, falls die Messungen der Kurzschlussverluste bei zwei verschiedenen Frequenzen durchgeführt werden, die genügend entfernt sind. Falls eine Messung bei Netzfrequenz 50 Hz oder 60 Hz durchgeführt wird, ist die zweite bei einer Frequenz größer oder gleich 150 Hz durchzuführen. Eine Spannungsquelle für die Messung der zweiten Frequenz ist normalerweise vorhanden, da die Einrichtung für die Prüfung der indu-

zierten Überspannung benutzt werden kann. Dieses Verfahren ist nicht für die Anwendung an Transformatoren nach IEC 60378-1 vorgesehen, bei denen eine theoretische Abschätzung der Wirbelstromverluste durchgeführt wird.

Das Zweifrequenzverfahren unterstellt, dass:

- das Ergebnis auf einem gut eingeführten Messverfahren beruht, das eine Teilung mit angemessener Genauigkeit ergibt;
- Messungen im kHz-Bereich vermieden werden;
- theoretische Abschätzung vermieden wird.

Berechnungsbeispiel:

P_1 sind die Gesamtkurzschlussverluste bei 50 Hz

P_5 sind die Gesamtkurzschlussverluste bei 250 Hz

P_{WE1} sind die Wirbelstromverluste in den Wicklungen bei 50 HZ

P_{SE1} sind die Streuverluste in Bauteilen bei 50 Hz

$I_{LN}^2 R$ sind die ohmschen Verluste bei Bemessungsstrom

I_v ist der Strom bei der Oberschwingung v

f ist die Frequenz

Transformatordaten:

$$P_1 = 449 \text{ kW}$$

$$I_{LN}^2 R = 366 \text{ kW}$$

$$P_5 = 1\,500 \text{ kW}$$

ergeben die folgenden Gleichungen:

$$P_1 = I_{LN}^2 R + P_{WE1} + P_{SE1}$$

$$P_5 = I_{LN}^2 R + P_{WE1} \left(\frac{f_5}{f_1} \right) + P_{SE1} \left(\frac{f_5}{f_1} \right)^{0,8}$$

Einsetzen der Werte:

$$449 \text{ kW} = 366 \text{ kW} + P_{WE1} + P_{SE1} \quad (4)$$

$$1\,500 \text{ kW} = 366 \text{ kW} + P_{WE1} \times (250/50)^2 + P_{SE1} \times (250/50)^{0,8} \quad (5)$$

Die Lösung der Gleichungen (4) und (5) ergibt:

$$P_{WE1} = 39 \text{ kW} \text{ und } P_{SE1} = 44 \text{ kW.}$$

prEN 61378-3:2004

Abschätzung der Betriebsverluste:

Oberschwingungsspektrum:

$\left(\frac{f_v}{f_1}\right)$	$\left(\frac{I_v}{I_{LN}}\right)$	$\left(\frac{f_v}{f_1}\right)^2$	$\left(\frac{f_v}{f_1}\right)^{0,8}$	$\left(\frac{I_v}{I_{LN}}\right)^2$
1	0,96	1	1	0,92
5	0,18	25	3,62	0,032
7	0,12	49	4,74	0,014
11	0,06	121	6,81	0,0036
13	0,05	169	7,78	0,0025
17	0,03	289	9,64	0,0009
19	0,02	361	10,5	0,0004

Betriebsverluste:

$$P_N = I_{LN}^2 R + P_{WE1} \cdot \sum_1^v \left(\left(\frac{I_v}{I_{LN}} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_v}{f_1} \right)^2 \right) + P_{SE1} \cdot \sum_1^v \left(\left(\frac{I_v}{I_{LN}} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_v}{f_1} \right)^{0,8} \right)$$

Die Gleichung kann geschrieben werden als:

$$P_N = I_{LN}^2 R + F_{WE} + P_{WE1} + F_{SE} + P_{SE1}$$

Dabei sind

F_{WE} und F_{SE} die Erhöhungsfaktoren, wie in IEC 61378-2 beschrieben.

Einsetzen der Werte:

$$\begin{aligned} P_N &= 366 \text{ kW} + \\ &39 \text{ kW}(0,92 \times 1 + 0,032 \times 25 + 0,014 \times 49 + 0,0036 \times 121 + 0,0025 \times 169 + 0,0009 \times 289 + 0,0004 \times 361) + \\ &44 \text{ kW}(0,92 \times 1 + 0,032 \times 3,62 + 0,014 \times 4,74 + 0,0036 \times 6,81 + 0,0025 \times 7,78 + 0,0009 \times 9,64 + 0,0004 \times 10,5) = \\ &366 \text{ kW} + 3,67 \times 39 \text{ kW} + 1,17 \times 44 \text{ kW} = 560 \text{ kW} \end{aligned}$$

9.1.5 Transformatoren mit mehr als einem Aktivteil im gleichen Kessel

Ein Stromrichtertransformator für industrielle Anwendungen kann beispielsweise, im gleichen Kessel einen Sparregeltransformator (angeschlossen an das Netz) enthalten, der zwei Abspanntransformatoren (angeschlossen an die Gleichrichter) mit festem Übersetzungsverhältnis speist.

Die Ventilwicklungen dieser zwei Transformatoren sind um 30 °versetzt und jede speist eine Sechspuls-Brücke.

Jeder Abspanntransformator wird Oberschwingungen durch den Sechspuls-Betrieb ausgesetzt (Ordnungszahl der Oberschwingung = $6 \times k \pm 1$ mit $k = 1, 2, 3, \dots$).

Jedoch haben die zwei Sechspuls-Systeme eine Verschiebung von 30 °, um netzseitig einen 12-Puls-Betrieb zu ergeben. Deshalb sind die Oberschwingungen im Spartransformator solche eines 12-Puls-Betriebs (Ordnungszahl der Oberschwingung = $12 \times k \pm 1$ mit $k = 1, 2, 3, \dots$).

Der Erhöhungsfaktor der Wirbelstromverluste für die Spartransformatorwicklungen ist dann niedriger als der der Abspanntransformatoren, weil die 5., 7., ... Oberschwingung ausgelöscht wird.

Die Erhöhungsfaktoren der Streuverluste sind auch verschieden, jedoch kann nur die Summe der von allen aktiven Teilen verursachten Streuverluste aus den Messungen abgeleitet werden.

Es ist vernünftig anzunehmen, dass jeder aktive Teil einen Anteil des Gesamtstreuefflusses erzeugt, der proportional zu dem Produkt aus seiner Bemessungsleistung und der Kurzschlussimpedanz ist (bezogene Größe).

Nur wenn das Stromoberschwingungsspektrum für alle Wicklungen in einem Transformator, der mehr als einen aktiven Teil hat, angegeben ist, dann ist es möglich, IEC 61378-1 mit der obigen Änderung für die Berechnung des Erhöhungsfaktors der Streuverluste anzuwenden.

9.2 Erwärmungsprüfungen

9.2.1 Allgemeines

Die Grundlage der Erwärmungsprüfung für einen Stromrichtertransformator ist, die Auswirkung der Stromoberschwingungen auf Wirbelstrom- und Streuverluste durch richtige Erhöhung von sinusförmigem Prüfverlust und Strom zu berücksichtigen.

9.2.2 Berechnung von Prüfströmen und Verlusten für industrielle Transformatoren

In Ergänzung zu dem bereits in IEC 61378 beschriebenen, ist es wichtig zu beachten, dass bei Betrachtung von Transformatoren mit mehr als einem aktiven Teil, die folgenden Probleme auftreten können:

- Wegen der Auslöschung von Oberschwingungen kann ein aktiver Teil Bemessungsstrom führen und F_{WE} bedeutend geringer als die anderen sein. Dies kann zu einer Überlast in diesem aktiven Teil während der Erwärmungsprüfung führen;
- Die Zusammenschaltung von Wicklungen, die zu verschiedenen aktiven Teilen gehören

Beide Probleme sollten durch eine Vereinbarung zwischen dem Transformatorhersteller und dem Kunden in der Vertragsphase gelöst werden.

9.2.3 Berechnung von Verlusten und Prüfströmen für HGÜ-Transformatoren

Die Betriebskurzschlussverluste werden durch das in 9.1.4 beschriebene Verfahren abgeschätzt.

Um die Betriebskurzschlussverluste während der Dauerprüfung mit Erwärmungsmessung nachzubilden, wird ein äquivalenter Laststrom verwendet, der aus dem Ergebnis der Zweifrequenzmessungen abgeleitet wird.

Unter Verwendung des Berechnungsbeispiels in 9.1.5:

Kurzschlussverluste bei Grundfrequenz: $P_1 = 449 \text{ kW}$ und

Betriebskurzschlussverluste: $P_N = 590 \text{ kW}$.

Aus dem obigen Zusammenhang ergibt sich der äquivalente Prüfstrom zu:

$$I_{eq} = I_1 \times \left(\frac{560}{449} \right)^{0,5} = 1,12 \times I_1 \quad \text{in A}$$

siehe die Gleichung in 10.5 von IEC 61378-2.

9.2.4 Betrachtungen am Heißpunkt und Grenzen der Erwärmungsprüfungen

Die Teile 1 und 2 dieser Norm bestimmen den Effektivwert eines sinusförmigen Stroms mit Netzfrequenz (in einer besonderen Wicklung), der die gesamten Verluste erzeugt, äquivalent zu dem bei überschwingungsbelasteter Wicklung. Wirbelstromverluste, mit Oberschwingungen, erhöhen sich an den Wicklungsenden und eine Prüfung mit sinusförmigem Strom ist nicht in der Lage, ein Streufelddiagramm zu erzeugen, wie es im Betrieb auftritt. Deshalb sollte zusammengefasst beachtet werden, dass dieser äquivalente Prüfstrom nicht die örtliche Verlustverteilung innerhalb der Wicklung erzeugt, die unter oberwellenbehafteten Lastbedingungen auftritt.

Besondere Aufmerksamkeit ist auf die Tatsache zu richten, dass die Heißpunkttemperatur und ihr Ort, die durch eine Erwärmungsprüfung mit sinusförmigem Strom bestimmt werden, nicht notwendig die gleichen sind, die während des Stromrichterbetriebs auftreten.

10 Kern und Geräuschaspekte

10.1 Kern

10.1.1 Konstruktive Merkmale

Der Entwurf eines magnetischen Kreises ist allgemein der gleiche für Stromrichtertransformatoren und übliche Wechselstrom-Leistungstransformatoren. Dreiphasige und einphasige Kern- und Rahmenkonstruktionen können verwendet werden, in denen eine von mehreren kundenspezifischen Jochausführungen eingebaut wird und gewickelte und ungewickelte Schenkel, wie in IEC 60076-8 beschrieben.

Die Art des Kerns und der Kernentwurf werden allgemein durch den Transformatorhersteller entschieden. Es ist das Ziel, die beste technische Ausführung zu erreichen. Jedoch kann der Kernentwurf auch durch das Pflichtenheft des Käufers beeinflusst werden, z. B. aus Gründen der Verträglichkeit oder Austauschbarkeit mit vorhandenen Betriebsmitteln.

Die Kernwerkstoffe, Schenkel- und Jochanordnungen, Befestigungs- und Stützkonstruktionen, Kernisolationsysteme, Flusssteuerungsmaßnahmen, u.s.w. folgen normalerweise der technischen Praxis von Wechselstrom-Leistungstransformatoren.

10.1.2 Auswirkung der Oberschwingungen

Die netz- und ventileitigen Spannungen sind sinusförmig oder annähernd sinusförmig zur Netzfrequenz für netzkommutierte Ventile, d. h. nicht-verlöschende Ventile. Es wird angenommen, dass die Spannung auf der Netzseite sinusförmig ist und deshalb kann die Spannung auf der Ventileite nur durch den internen Spannungsfall im Transformator von der Sinusform abweichen.

Mit einer sinusförmigen Spannung wird der magnetische Hauptfluss auch einen sinusförmigen Verlauf haben, der sich aus Leerlaufverlusten und Magnetisierungsströmen ergibt, ähnlich zu denen, die sich im normalen Wechselstrombetrieb entwickeln. Die Auswirkung einer Gleichstromvormagnetisierung auf die netzseitigen und/oder ventileitigen Ströme wird etwas genauer in einem separaten Abschnitt weiter unten behandelt.

Für zwangskommutierte Ventile kann die angelegte Spannung von einer reinen Sinusform abweichen und die Oberschwingungen in der Spannung werden den Oberwellengehalt des magnetischen Flusses, der betrachtet werden muss, beeinflussen.

10.1.3 Spannungswirkung durch Gleichstromvormagnetisierung

Ein kleiner Vormagnetisierungsgleichstrom, der in der (den) Ventilwicklung(en) kreist, kann seinen Ursprung in mehreren verschiedenen Quellen haben. Geringe Unterschiede im Ventilbetrieb können zu einer Zunahme

kleiner Restgleichströme durch die Ventilwicklung(en) führen. Potentialunterschiede zwischen netzseitigem Sternpunkt und dem Erdungspunkt für die netzseitige Wicklung in Sternschaltung werden zu einer Gleichstromvormagnetisierung in der Netzwicklung führen. Solche Potentialunterschiede können ihren Ursprung im benachbarten stromführenden Erdungspunkt des Gleichstromsystems haben, z. B. einem System mit Erdrückleitung.

Die Gleichstromvormagnetisierung wird den magnetischen Fluss durch einpolige oder Gleichstromanteile im Fluss beeinflussen. Im Allgemeinen wird eine kleines Offset des magnetischen Flusses nur eine begrenzte Auswirkung auf die Leerlaufverluste haben.

Die zwei Hauptfaktoren der Leerlaufverluste wie Hystereseverluste und Verluste durch Kreisströme, die in den Kernblechen durch Ummagnetisierung induziert wurden, werden durch das Fluss-Offset unbeeinflusst bleiben.

Eine andere Auswirkung der Gleichstromvormagnetisierung ist der wachsende Schallpegel durch einseitige Sättigung der Kernbleche.

10.1.4 Zusammenfassung

Der Grundunterschied zwischen Stromrichterbetrieb und üblichem Wechselstrombetrieb ist die vorhandene Gleichstromvormagnetisierung, die außerhalb der Steuerung durch den Transformatorplaner liegt. Verbesserte Überwachung und Verringerung der Gleichstromvormagnetisierung ist deshalb wichtig.

10.2 Schall

10.2.1 Einführung

Es ist eine zunehmende Forderung, dass die Betriebsschallpegel der Einrichtung keine Werte erreichen sollten, die annehmbare Umweltpegel überschreiten.

In der Praxis werden diese Pegel gewöhnlich durch Regierungs- oder andere gesetzgebende Behörden aufgelegt. Sie werden normalerweise auf die gesamte Stromrichteranlage angewendet und nicht auf die einzelnen Anlagenpositionen. Die Schallpegel können sich auf einen oder mehrere Messpunkte im Umkreis der Einrichtung beziehen, normalerweise an der Grundstücksgrenze.

Deshalb ist, in Ergänzung zu den anderen individuellen Anlagenpositionen, ein Schallpegelwert für jeden Transformator abzuleiten, wenn ein Gesamtschallpegel für die Stromrichteranlage vorgeschrieben ist. Der ermittelte Wert stellt den größten zulässigen Schallpegel dar, der im Betrieb erlaubt ist.

Anders als bei herkömmlichen Leistungstransformatoren im Wechselstrombetrieb, hängt der Schallpegel der Stromrichtertransformatoren ab von:

- ein Stromrichtertransformator kann im Betrieb einem weiten Bereich von Oberschwingungsspannungen und -strömen verschiedener Größenordnung ausgesetzt sein, zusätzlich zu einer (einem) Vormagnetisierungs-Gleichspannung und -strom;
- der Anwesenheit von Transduktoren und Saugdrosseln in der Einheit;
- der Festlegung eines zulässigen Gesamtschallpegels. Dabei gibt es das zweifache Problem der Bestimmung des aktuell zulässigen Beitrags von einem Transformator und der Prüfung des Wertes, wird er nicht oder ist er nicht überschritten worden.

Zur Zeit gibt es kein Norm-Prüfverfahren zur Bestimmung der Schallkennwerte unter Last für einen Stromrichtertransformator Vor-Ort zum Vergleich mit einem bestimmten Vor-Ort-Schallgrenzwert. Die heutige Normenpraxis für Käufer ist, einen gemessenen Schallpegel festzulegen, den man im Werk während einer Bemessungs-Leerlaufprüfung bei Grundfrequenz erhalten wird.

10.2.2 Grundbetrachtungen

10.2.2.1 Schallursachen

Der von einem üblichen Transformator abgestrahlte Schall entsteht hauptsächlich durch Magnetostruktionseffekte im Kern und in den geblechten Flussschirmen. Es gibt eine kleinere aber wesentliche, zusätzliche Schallkomponente, die von den elektromagnetischen Kräften verursacht wird, die in den Wicklungen, im Kessel und in anderen Bauteilen, einschließlich den nicht-magnetischen Flussschirmen auftreten.

Die Schallkomponente durch Magnetostruktion hängt von mehreren Faktoren ab, in erster Linie von der Größe und Frequenz der magnetischen Flussdichte. Andere Einzelheiten der Kernkonstruktion wie Kernblech-Kennwerte, Kernaussmaße und -masse, Kernaufbau und Aufbauqualität, Kernpressungsverfahren und Drücke tragen ebenfalls wesentliche Faktoren bei. Da die Magnetostruktion unabhängig von der Flussrichtung hinsichtlich positiver oder negativer Orientierung ist, ist die Grundschallfrequenz das Zweifache der Frequenz der angelegten Spannung.

Bei einer gegebenen Bauart ist die Magnetostruktion eine Funktion des Momentanwertes der magnetischen Flussdichte. Das bedeutet, dass der Schallpegel vom Grad der Magnetisierung abhängt. Ein Transformator der in Übererregung betrieben wird, wird einen höheren Schall abstrahlen, als im Betrieb bei normaler Erregung.

In einem Stromrichtertransformator mit einer leichten Gleichstromvormagnetisierung wird der Strom die Zeit-Flussdichte-Kurve von einem symmetrischen Wert um den Nullpunkt zu einer erhöhten Flussdichteamplitude in die eine Richtung und zu einer reduzierten Flussdichteamplitude in die andere Richtung verschieben. Die Verschiebung im Flussdiagramm wird sich auch im Zeit-Magnetostruktions-Diagramm und dadurch auch im Schalldiagramm widerspiegeln. Im Allgemeinen wird der Schallpegel durch eine Gleichstromvormagnetisierung erhöht.

Der Schall der den elektromagnetischen Kräften zuzuschreiben ist, ist das Ergebnis der Belastung. Diese Kräfte sind proportional zum Quadrat der Ströme und daraus folgend sind Schallfrequenz und -amplituden proportional zum Quadrat der durch diese Kräfte verursachten Schwingungen. In gewöhnlichen Leistungstransformatoren sind im Wechselstrombetrieb die Schallanteile durch den Laststrom grundsätzlich von gleicher Frequenz wie der Schall vom Kern, aber geringer als der Kernschall. Dieser Schallanteil trägt daher nicht zum Gesamtschallpegel bei.

Im Stromrichterbetrieb mit einem hohen Anteil an Stromüberschwingungen tragen die Oberschwingungen zu den elektromagnetischen Kräften bei. Die Frequenzen der Schallanteile, die durch die Oberschwingungen hervorgerufen werden, werden sich in einem Bereich größerer Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs befinden und deshalb für den Zuhörer wahrnehmbar.

10.2.2.2 Schallmessung

Das Problem dem sich Käufer und Lieferanten bezüglich der Schallpegel von Stromrichtertransformatoren gegenübersehen, ist zweifach. Es ist entweder, in der Lage zu sein, den Wert des abgestrahlten Schalls eines Stromrichtertransformators unter Last zu messen und mengenmäßig zu bestimmen, oder, in der Lage zu sein, den Schallpegel im Betrieb auf der Basis der Schallprüfungen im Werk vorherzusagen. Wie früher angegeben, wird dieses Problem kompliziert durch:

- die Schwierigkeit, die Quelle des vom Stromrichtertransformator erzeugten Schalls Vor-Ort von anderen benachbarten Geräuschen zu trennen und,
- die Schwierigkeit, die Betriebs-Schallleistung eines Stromrichtertransformators unter Last vorherzusagen, die auf den Schallpegelmessungen beruht, die im Werk während der Leerlaufprüfungen durchgeführt wurden. Das heißt, wenn man in der Lage ist, den im Werk gemessenen Leerlaufschallpegel zu erhöhen, um die zusätzlichen Schallanteile durch den Betrieb bei Bemessungsspannung und Laststrom Vor-Ort zu berücksichtigen, wird das als Ergebnis von Oberschwingungen und irgendeiner Gleichstrom-Spannungsstabilisierung auftreten.

Messungen der 'Schalleistung' können nicht direkt durchgeführt werden. Sie können nur entweder von 'Schalldruck'messungen oder von 'Schallintensitäts'messungen abgeleitet werden. Zur Zeit werden praktisch alle Schallmessungen durch Messung des 'Schalldrucks' ausgeführt. Das allein liefert einen Hinweis auf die Größe der 'Schalleistung'. Jedoch liefert die 'Schallintensität' Hinweise auf Größe und Richtung und aus diesem Grund würde dieses Verfahren zur Überprüfung akustischer Leistungen Vor-Ort empfohlen.

Auf beide Messverfahren wird in IEC 60076-10-1 und IEC 60076-10-2 verwiesen, auf die auch weiterhin verwiesen werden sollte.

11 Transformatorpflichtenheft

11.1 Einführung

Transformatorpflichtenhefte liegen in der Verantwortung des Käufers. Der Nutzen eines Transformatorpflichtenhefts ist es, dem Lieferanten genau und unzweideutig alle technischen und vertraglichen Anforderungen festzulegen, die benötigt werden, um eine Transformator zu kaufen. Ein Käufer erstellt normalerweise das Pflichtenheft, aber, falls das nicht möglich sein sollte, könnte ein geeignetes Pflichtenheft auch vom Lieferanten erhältlich sein oder aus einer unabhängigen Quelle wie einem Berater oder einem anderen Fachanbieter. Oder aber der Käufer könnte in Zusammenarbeit mit beiden das Pflichtenheft erstellen.

Dieser Abschnitt hebt einige der wichtigen Merkmale hervor, die zum Einschluss in einem Pflichtenheft für HGÜ- und industrielle Stromrichtertransformatoren betrachtet werden müssen. Es ist nicht möglich, alle darin enthaltenen Betrachtungsweisen abzudecken. In diesen Fällen wird zukünftigen Käufern geraten, sich mit ihrem potentiellen Lieferanten oder einem anderen Fachanbieter zu irgendeinem Punkt, den sie nicht lösen oder festlegen können, zu beraten.

Die meisten darin enthaltenen Betrachtungen werden orts- oder netzbezogen sein, aber zusätzlich werden viele Betrachtungsweisen schon Thema von IEC-, nationalen oder Industrie-Normen sein. Diese sollten so weit wie möglich genutzt werden, da sie einige Garantiewerte für nachgewiesenes Betriebsverhalten und die Prüfung anbieten.

Ergänzend zur Anwendung anerkannter Normen, sind der Gebrauch bewährter Werkstoffe und Bauteile zusammen mit der Anwendung von strengen Qualitätssicherungsmaßnahmen und -verfahren durch die gesamte Fertigung, Prüfung und Arbeitsvorbereitung wesentlich. Wenn Abweichungen von üblichen anerkannten und bewährten Praktiken übernommen werden, sind sorgfältige Untersuchungen und Einschätzungen jeder Neuerung dringend erforderlich. Es muss zu allen Zeiten daran erinnert werden, dass Pflichtenhefte nicht gleichbleibend sind, sondern dass sie äußeren Änderungen ausgesetzt sind. Sie werden von ökonomischen, technischen, politischen, umweltbedingten Veränderungen und nicht zuletzt durch frühere Erfahrungen beeinflusst. Sogar im Fall wiederholter Käufe, sollte das ursprüngliche Pflichtenheft vor der erneuten Verwendung überprüft werden. Die Gelegenheit sollte immer genutzt werden, das Pflichtenheft zu verbessern. Die treibende Kraft ist oft frühere Erfahrung in Konstruktion und Herstellung sowohl wie Betriebserfahrung. Zusätzlich, seit der letzten Veröffentlichung, können neue technische Entwicklungen vorgestellt worden sein oder möglicherweise gesetzliche oder Umwelanforderungen. Änderungen wie diese sollten vor der Neuausgabe eines Pflichtenhefts beurteilt werden.

11.2 Technisches Pflichtenheft versus funktionales Pflichtenheft

11.2.1 Allgemeines

Es gibt im allgemeinen Gebrauch zwei Arten von Pflichtenheften. Sie beziehen sich allgemein auf ein technisches Pflichtenheft und auf ein funktionales Pflichtenheft. Käufer haben sich zu entscheiden, welche Art von Pflichtenheft sie nutzen wollen und ihre Wahl wird meist von der Tiefe der verfügbaren technischen Ressourcen bestimmt, entweder hausintern oder von externen Ressourcen.

11.2.2 Technische Pflichtenhefte

Ein technisches Pflichtenheft beinhaltet nicht nur Beschreibungen der grundsätzlichen Kennwerte des geforderten Transformators, sondern auch beträchtlichen technischen Inhalt mit in Einzelheiten gehenden technische Anforderungen der Haupt- und Nebenteile des Transformators. Ein solches Pflichtenheft wird einzelne

Anforderungen enthalten, die Transformatorkonstruktion und -technik, Zubehör, Prüfung, Inbetriebnahme und Inbetriebsetzung abdecken. Ziel ist in vielen Fällen, den Transformator in einem solchen Grad zu beschreiben, dass das Produkt nicht bloß beschrieben sondern vorgeschrieben ist, das heißt, es gibt wenig Spielraum um von dem, was im Einzelnen beschrieben ist, abzuweichen. Solche Pflichtenhefte sind normalerweise aus umfangreichen Erfahrungen aus der Wechselstromtransformatorenpraxis und dem Betriebsverhalten abgeleitet, mit zusätzlichen Abschnitten, um Gleichstrombetrachtungsweisen des Transformators abzudecken. Der Gebrauch dieser Art des Pflichtenhefts ist im letzten Jahrzehnt zurückgegangen und wurde durch das funktionale Pflichtenheft ersetzt soweit die inneren Einzelheiten des Transformators betroffen sind.

11.2.3 Funktionales Pflichtenheft

Das funktionale Pflichtenheft ist die Beschreibung der Erwartungen des Kunden bezüglich der Leistungsfähigkeit des Transformators. Es hat auch die technische Beschreibung der mechanischen und elektrischen Schnittstellen zu den externen Systemen einzuschließen, z. B. Spannung, Bemessungsdaten, Impedanzen, Verluste, u.s.w.

11.3 HGÜ-Transformator-Pflichtenheft

Die Technologien und Werkstoffe, die bei Planung und Herstellung von HGÜ-Transformatoren angewendet werden, stimmen weitestgehend mit denen überein, die bei Hochspannungswechselstrom-Transformatoren angewendet werden. Die Hauptunterschiede werden als Ergebnis der unterschiedlichen Betriebskennwerte des Laststromes sichtbar, d. h. der Anwesenheit eines viel größeren Oberschwingungsgehalts und auch des Einflusses der zusammengefassten elektrischen Wechselstrom- und Gleichstromfelder auf die wesentlichen dielektrischen Kennwerte der Isolation.

11.5 und 11.8 führen einige der Informationen auf, die während der Zusammenstellung eines HGÜ-Transformator-Pflichtenhefts betrachtet werden sollten. 11.5 behandelt Informationen, die vom Transformatorlieferanten bereitzustellen sind, um es dem Käufer oder Systementwickler zu ermöglichen, die Übereinstimmung mit dem Pflichtenheft zu prüfen und den Transformator richtig in die Planung der Gesamtanlage einzubeziehen. 11.8 enthält Informationen, die vom Anlagenplaner oder Käufer bereitzustellen sind, um es dem Transformatorlieferanten zu ermöglichen, die richtige Ausführung zu liefern.

Die Anforderungen, die in diesen zwei Abschnitten aufgeführt werden, stellen das Minimum dar, das bei der Vorbereitung eines Pflichtenhefts für eine HGÜ-Anwendung berücksichtigt werden sollte. Die Daten in beiden Abschnitten wurden aus einer Reihe aktueller Anwendungen destilliert und können deshalb als Leitfaden für die Vorbereitung eines HGÜ-Transformator-Pflichtenhefts verwendet werden. Zusätzlich zu diesen Daten, die notwendigerweise von allgemeiner Art und für alle Anlagen anwendbar sind, gibt es auch solche Daten, die normalerweise käufer- oder anlagenbezogen sind. Diese sind nicht enthalten und sollten zu den in diesen Abschnitten aufgeführten Anforderungen ergänzt werden.

Die aufgeführten Daten beziehen sich auf Wechsel- und Gleichstromaspekte der Stromrichtertransformatoren. Jedoch sind die auf Wechselstrom bezogenen Betrachtungsweisen in Übereinstimmung mit den Anforderungen für übliche Wechselstromtransformatoren und brauchen nicht darauf erweitert zu werden.

Käufer und Lieferanten sollten sich bewusst sein, dass bestimmte, auf Gleichstrom bezogene Positionen eine besondere Betrachtung erfordern.

11.4 Anmerkungen und Stellungnahmen zu Pflichtenheftpositionen, die jeweils durch Käufer und Lieferanten bereitzustellen sind

Die Anmerkungen und Stellungnahmen werden in 11.5 zur Verfügung gestellt, als Leitfaden für Betrachtungen, die einzeln vom Käufer/Anlagenplaner und vom Lieferanten durchzuführen sind.

In einigen Fällen bedarf es eines eingehenden Meinungsaustauschs zwischen dem Käufer und dem Lieferanten, um das notwendige Vertrauen zu schaffen, dass die Planung die Betriebsbedingungen trifft. Zusätzlich zur Werkprüfung des Transformators, kann ein Nachweis durch Berechnung angebracht sein. Es kann zwischen den Prüfbedingungen für die Messung der garantierten Kennwerte und den aktuellen Betriebsleistungsbedingungen unterschieden werden. Das endgültig vereinbarte Pflichtenheft sollte in diesen Punkten genau sein, besonders in Hinsicht auf Verluste, die wirtschaftliche und betriebliche Integritätsbetrachtungen beinhalten.