

	DIN EN 60034-4 (VDE 0530-4)	DIN
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE
ICS 29.160.01 Ersatz für DIN EN 60034-4 (VDE 0530-4):1998-04 Siehe jedoch Beginn der Gültigkeit Drehende elektrische Maschinen – Teil 4: Verfahren zur Ermittlung der Kenngrößen von Synchronmaschinen durch Messungen (IEC 60034-4:2008); Deutsche Fassung EN 60034-4:2008 Rotating electrical machines – Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests (IEC 60034-4:2008); German version EN 60034-4:2008 Machines électriques tournantes – Partie 4: Méthodes pour la détermination, à partir d'essais, des grandeurs des machines synchrones (CEI 60034-4:2008); Version allemande EN 60034-4:2008 Gesamtumfang 78 Seiten DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE		

Beginn der Gültigkeit

Die von CENELEC am 2008-07-01 angenommene EN 60034-4 gilt als DIN-Norm ab 2009-04-01.

Daneben darf **DIN EN 60034-4 (VDE 0530-4):1998-04** noch bis 2011-07-01 angewendet werden.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN IEC 60034-4 (VDE 0530-4):2006-11.

Für diese Norm ist das nationale Arbeitsgremium K 311 „Drehende elektrische Maschinen“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom TC 2 „Rotating machinery“ 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 60034-4 (VDE 0530-4):1998-04** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) einige der in der vorherigen Ausgabe im Anhang A beschriebenen Versuche sind aufgrund fehlender praktischer Bedeutung entfallen;
- b) Regelungen für Versuche an Maschinen mit bürstenloser Erregung wurden getroffen;
- c) in einer tabellarischen Übersicht der Versuche sind die bevorzugten Methoden gekennzeichnet. Zusätzlich ist ein Querverweis der Versuche eingefügt worden;
- d) die Beschreibung des klassischen Modells der Zwei-Achsen-Theorie für die Schenkelpol-Synchronmaschine ist in einem Anhang enthalten.

Frühere Ausgaben

DIN VDE 0530-4 (VDE 0530-4): 1966-10, 1989-09

DIN EN 60034-4 (VDE 0530-4): 1998-04

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

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

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

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

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC 60050-411	^{*)}	–
EN 60034-1:2004	IEC 60034-1:2004	DIN EN 60034-1 (VDE 0530-1):2005-04	VDE 0530-1
–	–	DIN EN 60034-1 Ber 1 (VDE 0530-1 Ber 1):2007-09	VDE 0530-1 Ber 1
EN 60034-2-1:2007	IEC 60034-2-1:2007	DIN EN 60034-2-1 (VDE 0530-2-1):2008-08	VDE 0530-2-1
EN 60034-2:1996 + A1:1996 + A2:1996	IEC 60034-2A:1972 + IEC 60034-2A:1974 + A1:1995 + A2:1996	DIN EN 60034-2 (VDE 0530-2):1998-09	VDE 0530-2
Normen der Reihe EN 60051	Normen der Reihe IEC 60051	Normen der Reihe DIN EN 60051	–

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60034-1 (VDE 0530-1):2005-04, *Drehende elektrische Maschinen – Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten (IEC 60034-1:2004); Deutsche Fassung EN 60034-1:2004*

DIN EN 60034-1 Ber 1 (VDE 0530-1 Ber 1):2007-09, *Drehende elektrische Maschinen – Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten (IEC 60034-1:2004); Deutsche Fassung EN 60034-1:2004, Berichtigungen zu DIN EN 60034-1 (VDE 0530-1):2005-04*

DIN EN 60034-2-1 (VDE 0530-2-1), *Drehende elektrische Maschinen – Teil 2-1: Standardverfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades aus Prüfungen (ausgenommen Maschinen für Schienen- und Straßenfahrzeuge)*

DIN EN 60034-2 (VDE 0530-2), *Drehende elektrische Maschinen – Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades von drehenden elektrischen Maschinen aus Prüfungen (ausgenommen Maschinen für Schienen- und Straßenfahrzeuge)*

DIN EN 60051 (Reihe), *Direkt wirkende anzeigende elektrische Messgeräte und ihr Zubehör – Messgeräte mit Skalenanzeige*

^{*)} „Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Deutsche Ausgabe“, im Rahmen der Datenbank Anwendung DIN-TERM zu beziehen über Beuth Verlag.

– Leerseite –

**Drehende elektrische Maschinen –
Teil 4: Verfahren zur Ermittlung der Kenngrößen von Synchronmaschinen
durch Messungen**
(IEC 60034-4:2008)

Rotating electrical machines –
Part 4: Methods for determining synchronous
machine quantities from tests
(IEC 60034-4:2008)

Machines électriques tournantes –
Partie 4: Méthodes pour la détermination, à
partir d'essais, des grandeurs des machines
synchrones
(CEI 60034-4:2008)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2008-07-01 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

© 2008 CENELEC – Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren, sind weltweit den Mitgliedern von CENELEC vorbehalten.

Ref. Nr. EN 60034-4:2008 D

Vorwort

Der Text des Schriftstücks 2/1488/FDIS, zukünftige 3. Ausgabe von IEC 60034-4, ausgearbeitet von dem IEC TC 2, "Rotating machinery", wurde der IEC-CENELEC Parallelen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 2008-07-01 als EN 60034-4 angenommen.

Diese Europäische Norm ersetzt EN 60034-4:1995.

Die wesentlichen Änderungen zu EN 60034-4:1995 sind nachstehend aufgeführt:

- Einige der in der vorherigen Ausgabe im Anhang A beschriebenen Versuche sind aufgrund fehlender praktischer Bedeutung entfallen.
- Regelungen für Versuche an Maschinen mit bürstenloser Erregung wurden getroffen.
- In einer tabellarischen Übersicht der Versuche sind die bevorzugten Methoden gekennzeichnet. Zusätzlich ist ein Querverweis der Versuche eingefügt worden.
- Die Beschreibung des klassischen Modells der Zwei-Achsen-Theorie für die Schenkelpol-Synchronmaschine ist in einem Anhang enthalten.

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): 2009-04-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2011-07-01

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 60034-4:2008 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

Inhalt

	Seite
Vorwort.....	2
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Symbole und Einheiten.....	11
5 Übersicht der Messverfahren	13
6 Prüfverfahren	15
6.1 Allgemeines	15
6.2 Direkte Messung des Erregerstroms im Bemessungsbetrieb	18
6.3 Messung von Gleichstrom-Widerständen	19
6.4 Leerlaufversuch	19
6.5 Dreiphasiger Dauerkurzschlussversuch	21
6.6 Motorbetrieb im Leerlauf.....	21
6.7 Versuch mit Phasenverschiebung	22
6.8 Übererregungsversuch bei Leistungsfaktor Null	22
6.9 Gegenerrungsversuch	23
6.10 Messung des Polradwinkels unter Last.....	23
6.11 Versuch mit kleinem Schlupf	23
6.12 Dreiphasiger Stoßkurzschlussversuch	23
6.13 Versuch mit wiederkehrender Spannung	24
6.14 Dreiphasiger Stoßkurzschlussversuch nach vorheriger Netztrennung	25
6.15 Gleichstrom-Abklingversuch der Ankerwicklung bei Stillstand.....	25
6.16 Plötzliche Aufschaltung der Erregung bei offener Ankerwicklung.....	26
6.17 Versuch mit angelegter Spannung bei Läuferstellung in Längs- und Querachse	26
6.18 Versuch mit angelegter Spannung und beliebiger Winkelstellung des Läufers	27
6.19 Versuch mit Einphasen-Spannung an den drei Wicklungssträngen	27
6.20 Unsymmetrischer zweipoliger Dauerkurzschlussversuch	28
6.21 Zweipoliger Stoßkurzschlussversuch	28
6.22 Dauerkurzschlussversuch mit zwei untereinander und mit dem Sternpunkt kurzgeschlossenen Wicklungssträngen	29
6.23 Versuch mit gegenläufigem Drehfeld	29
6.24 Feldstrom-Abklingversuch mit offener Ankerwicklung	30
6.25 Feldstrom-Abklingversuch mit kurzgeschlossener Ankerwicklung bei Bemessungsdrehzahl.....	30
6.26 Versuch mit plötzlicher Aufschaltung der Erregung bei kurzgeschlossener Ankerwicklung.....	30
6.27 Feldstrom-Abklingversuch mit unsymmetrisch kurzgeschlossener Ankerwicklung im Stillstand	31
6.28 Versuch mit ausgebautem Läufer	31
6.29 Auslaufversuch im Leerlauf	32

	Seite
6.30 Schwingungsversuch mit aufgehängtem Läufer.....	32
6.31 Versuch mit festgebremstem Läufer.....	32
6.32 Übererregungsversuch bei Leistungsfaktor Null und variabler Ankerspannung	32
6.33 Asynchroner Betrieb mit reduzierter Spannung.....	33
6.34 Versuch mit einer Spannung variabler Frequenz im Stillstand.....	33
7 Bestimmung der Kenngrößen.....	35
7.1 Grafische Verfahren und Auswertung von Oszillogrammen.....	35
7.2 Synchron-Längsreaktanz.....	41
7.3 Transient-Längsreaktanz	42
7.4 Subtransient-Längsreaktanz.....	43
7.5 Synchron-Querreaktanz.....	44
7.6 Transient-Querreaktanz	46
7.7 Subtransient-Querreaktanz.....	47
7.8 Nullreaktanz	47
7.9 Inversreaktanz	48
7.10 Anker-Streureaktanz	50
7.11 Potier-Reaktanz	51
7.12 Nullwiderstand	51
7.13 Synchron-Widerstand	52
7.14 Inverswiderstand.....	52
7.15 Ohmsche Widerstände der Anker- und der Erregerwicklung	53
7.16 Transient-Kurzschlusszeitkonstante der Längsachse	53
7.17 Transient-Leerlaufzeitkonstante der Längsachse.....	54
7.18 Subtransient-Kurzschlusszeitkonstante der Längsachse.....	55
7.19 Subtransient-Leerlaufzeitkonstante der Längsachse	55
7.20 Transient-Kurzschlusszeitkonstante der Querachse	55
7.21 Transient-Leerlaufzeitkonstante der Querachse	55
7.22 Subtransient-Kurzschlusszeitkonstante der Querachse.....	55
7.23 Subtransient-Leerlaufzeitkonstante der Querachse	56
7.24 Anker-Kurzschlusszeitkonstante.....	56
7.25 Anlauf- und Trägheitszeitkonstante	56
7.26 Bemessungserregerstrom	58
7.27 Erregerstrom für Anker-Bemessungsstrom im Dauerkurzschluss	61
7.28 Frequenzgang.....	62
7.29 Leerlauf-Kurzschlussverhältnis.....	65
7.30 Bemessungs-Spannungsänderung	65
7.31 Kurzschlussimpedanz von Synchronmotoren	66
Anhang A (informativ) Übersicht Versuche und Prüfverfahren.....	67
Anhang B (informativ) Berechnungsschema für Frequenzgänge.....	70

	Seite
Anhang C (informativ) Konventionelles elektrisches Maschinenmodell	72
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	74
 Bild 1 – Schaltung für Gleichstrom-Abklingversuch der Ständerwicklung im Stillstand	 25
Bild 2 – Schaltbild für den zweipoligen Dauerkurzschlussversuch.....	28
Bild 3 – Schaltbild für den Dauerkurzschluss mit zwei untereinander und dem Sternpunkt kurzgeschlossenen Wicklungssträngen	29
Bild 4 – Anordnung der Messspule bei ausgebautem Läufer.....	31
Bild 5 – Aufgenommene Leistung und Strom über dem Schlupf (Beispiel).....	33
Bild 6 – Schaltung für den Versuch mit variabler Frequenz im Stillstand.....	34
Bild 7 – Aufgezeichnete Größen aus dem Versuch mit variabler Frequenz im Stillstand (Beispiel)	34
Bild 8 – Leerlauf-/Kurzschlusskennlinie.....	35
Bild 9 – Transiente und subtransiente Komponente des Kurzschlussstroms	36
Bild 10 – Bestimmung der transienten Komponente des Kurzschlussstroms.....	37
Bild 11 – Grafische Bestimmung der aperiodische Stromkomponente	37
Bild 12 – Transiente und subtransiente Komponente der wiederkehrenden Spannung	38
Bild 13 – Halblogarithmische Darstellung der Abklingkurven	39
Bild 14 – Plötzliche Aufschaltung der Erregung bei offener Ankerwicklung.....	40
Bild 15 – Induzierte Leerlaufspannung und Erregerstrom bei Schlüpfen um eine Polteilung	44
Bild 16 – Strom-Hüllkurven aus dem Versuch mit kleinem Schlupf	45
Bild 17 – Bestimmung der Potier-Reaktanz.....	51
Bild 18 – Potier-Diagramm.....	58
Bild 19 – ASA-Diagramm.....	59
Bild 20 – Schweden-Diagramm	60
Bild 21 – Erregerstrom aus dem Übererregungsversuch mit Leistungsfaktor Null.....	62
Bild 22 – Frequenzgänge bei niedrigen Frequenzen (Beispiel)	63
Bild C.1 – Ersatzschaltbild einer Schenkelpolmaschine.....	72
 Tabelle 1 – Messverfahren zur Ermittlung der Kenngrößen von Synchronmaschinen	 13
Tabelle A.1 – Übersicht Versuche und Prüfverfahren	67

1 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für dreiphasige Synchronmaschinen mit einer Bemessungs-Scheinleistung von 1 kVA und größer und Bemessungsfrequenzen nicht über 500 Hz und nicht unter 10 Hz.

Die meisten der angegebenen Prüfverfahren sind für die Anwendung an Maschinen mit Erregung über Schleifringe und Bürsten gedacht. Bei Synchronmaschinen mit bürstenloser Erregung sind dagegen bei einigen der angegebenen Prüfungen besondere Maßnahmen zur Durchführung erforderlich. Für Maschinen mit Permanentmagnet-Erregung sind die beschriebenen Prüfungen nur eingeschränkt anwendbar. Ferner müssen Vorsichtsmaßnahmen gegen irreversible Entmagnetisierung getroffen werden.

Die angegebenen Prüfungen gelten nicht für Axialfeld-Maschinen und Sonderausführungen von Synchronmaschinen, wie z. B. Induktormaschinen, Transversalfluss-Maschinen usw.

Diese Norm bedeutet nicht, dass einige oder alle beschriebenen Prüfungen an einer bestimmten Maschine durchgeführt werden müssen. Vielmehr sind die jeweils durchzuführenden Prüfungen zwischen Hersteller und Betreiber besonders zu vereinbaren.

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 60034-2-1, *Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*

IEC 60034-2A, *Rotating electrical machines – Part 2: Method for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for tractional vehicles) – First supplement: Measurement of losses by the calorimetric method*

IEC 60051 (all parts), *Direct acting indicating analogue electrical measuring instruments and their accessories*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe und Definitionen.

3.1

Kurzschlussimpedanz, Synchronmotoren

Quotient aus der angelegten Klemmenspannung und dem eingeschwungenen Mittelwert des Ankerstroms bei stillstehender Maschine

3.2

Synchron-Längsreaktanz

Quotient aus dem eingeschwungenen Wert derjenigen Grundswingungskomponente der Strangspannung, die durch den gesamten Ankerfluss der Längsachse infolge des Anker-Längsstroms erzeugt wird (Querspannung), und dem Grundswingungswert dieses Stroms (Längsstrom) bei Bemessungsdrehzahl

[IEV 411-50-07]

3.3

Transient-Längsreaktanz

Quotient aus dem Anfangswert einer plötzlichen Änderung derjenigen Grundswingungskomponente der Strangspannung, die durch den gesamten Ankerfluss in der Längsachse erzeugt wird (Querspannung), und dem sich gleichzeitig ändernden Wert der Grundswingungskomponente des Anker-Längsstroms bei

Bemessungsdrehzahl. Dabei werden die rasch abklingenden Anteile während der ersten Perioden nicht berücksichtigt

[IEV 411-50-09]

3.4

Subtransient-Längsreaktanz

Quotient aus dem Anfangswert einer plötzlichen Änderung derjenigen Grundswingungskomponente der Strangspannung, die durch den gesamten Ankerfluss der Längsachse erzeugt wird (Querspannung), und dem sich gleichzeitig ändernden Wert der Grundswingungskomponente des Anker-Längsstroms bei Bemessungsdrehzahl

[IEV 411-50-11]

3.5

Synchron-Querreaktanz

Quotient aus dem eingeschwungenen Wert derjenigen Grundswingungskomponente der Strangspannung, die durch den gesamten Ankerfluss in der Querachse infolge des Anker-Querstromes erzeugt wird (Längsspannung), und dem Grundswingungswert dieses Stroms (Querstrom) bei Bemessungsdrehzahl

[IEV 411-50-08]

3.6

Transient-Querreaktanz

Quotient aus dem Anfangswert einer plötzlichen Änderung derjenigen Grundswingungskomponente der Strangspannung, die durch den gesamten Ankerfluss in der Querachse erzeugt wird (Längsspannung), und dem sich gleichzeitig ändernden Wert der Grundswingungskomponente des Anker-Querstroms bei Bemessungsdrehzahl. Dabei werden die rasch abklingenden Anteile während der ersten Perioden nicht berücksichtigt

[IEV 411-50-10]

3.7

Subtransient-Querreaktanz

Quotient aus dem Anfangswert einer plötzlichen Änderung derjenigen Grundswingungskomponente der Strangspannung, die durch den gesamten Ankerfluss der Querachse erzeugt wird (Längsspannung), und dem sich gleichzeitig ändernden Wert der Grundswingungskomponente des Anker-Querstromes bei Bemessungsdrehzahl

[IEV 411-50-12]

3.8

Synchronreaktanz

Quotient aus der Grundswingungs-Blindkomponente einer mitlaufenden Ankerspannung infolge eines sinusförmigen, mitlaufenden Ankerstromes von Bemessungsfrequenz und dem Wert dieses Stromes bei Bemessungsdrehzahl

[IEV 411-50-14]

3.9

Inversreaktanz

Quotient aus der Grundswingungs-Blindkomponente einer inversen Ankerspannung infolge eines sinusförmigen inversen Ankerstromes von Bemessungsfrequenz und dem Wert dieses Stromes bei Bemessungsdrehzahl

[IEV 411-50-15]

3.10

Nullreaktanzen

Quotient aus der Grundschrwingungs-Blindkomponente einer Nullspannung der Ankerwicklung infolge der entsprechenden Grundschrwingung eines Nullstromes von Bemessungsfrequenz und dem Wert dieses Stromes bei Bemessungsdrehzahl

[IEV 411-50-16]

3.11

Potier-Reaktanz

Reaktanz, die zusätzlich zur Anker-Streureaktanz den Streufluss der Feldwicklung bei Last im übererregten Betrieb berücksichtigt. Die Potier-Reaktanz wird anstelle der Anker-Streureaktanz zur Berechnung des Lasterregerstromes nach dem Potier-Verfahren verwendet

[IEV 411-50-13]

3.12

Ankerstreureaktanz

Quotient aus der Grundschrwingungs-Blindkomponente der Ankerspannung infolge des Streuflusses der Ankerwicklung und der Grundschrwingungskomponente des Ankerstromes bei Bemessungsdrehzahl

3.13

Gleichstromwiderstand der Ankerwicklung

Widerstand, der zwischen den Klemmen der Ankerwicklung bei Gleichstromspeisung und einer definierten Wicklungstemperatur gemessen wird. Der Gleichstromwiderstand der Ankerwicklung wird als Strangwert angegeben

3.14

Gleichstromwiderstand der Erregerwicklung

Widerstand, der zwischen den Klemmen der Erregerwicklung bei Gleichstromspeisung und einer definierten Wicklungstemperatur gemessen wird

3.15

Synchron-Widerstand

Quotient aus dem Wirkanteil der Ankerspannung des Mitsystems aufgrund der ohmschen Verluste und der Zusatzverluste, die durch die Grundschrwingungskomponente des mitlaufenden Ankerstroms erzeugt werden, und dieser Stromkomponente bei Bemessungsdrehzahl

[IEV 411-50-18]

3.16

Inverswiderstand

Quotient aus dem Wirkanteil der Grundschrwingungskomponente der inversen Ankerspannung infolge eines sinusförmigen inversen Ankerstroms von Bemessungsfrequenz und dem Wert dieses Stroms bei Bemessungsdrehzahl

[IEV 411-50-19]

3.17

Nullwiderstand

Quotient aus der Grundschrwingungs-Wirkkomponente einer Nullspannung der Ankerwicklung infolge der Grundschrwingung eines Nullstroms von Bemessungsfrequenz und dieser Komponente des Stromes bei Bemessungsdrehzahl

[IEV 411-50-20]

3.18

Leerlauf-Kurzschluss-Verhältnis

Verhältnis des Leerlauf-Erregerstroms bei Bemessungsspannung zum Erregerstrom bei Bemessungs-Ankerstrom im symmetrischen Dauerkurzschluss; beide Werte bestimmt für Bemessungsdrehzahl

[IEV 411-50-21]

3.19

Transient-Leerlaufzeitkonstante der Längsachse

Zeitspanne, in der nach einer plötzlichen Änderung der Betriebsbedingungen die durch den Längsfluss erregte, langsam veränderliche Komponente der Leerlauf-Ankerspannung (Querspannung) auf den Anteil $1/e \approx 0,368$ ihres Anfangswertes abklingt, während die Maschine mit Bemessungsdrehzahl läuft

[IEV 411-48-27]

3.20

Transient-Kurzschlusszeitkonstante der Längsachse

Zeitspanne, in der nach einer plötzlichen Änderung der Betriebsbedingungen die langsam veränderliche Komponente des Kurzschluss-Ankerstroms in der Längsachse auf den Anteil $1/e \approx 0,368$ ihres Anfangswertes abklingt, während die Maschine mit Bemessungsdrehzahl läuft

[IEV 411-48-28]

3.21

Subtransient-Leerlaufzeitkonstante der Längsachse

Zeitspanne, in der nach einer plötzlichen Änderung der Betriebsbedingungen die durch den Längsfluss erregte und während der ersten Perioden vorhandene, rasch abklingende Komponente der Leerlauf-Ankerspannung (Querspannung) auf den Anteil $1/e \approx 0,368$ ihres Anfangswertes abfällt, während die Maschine mit Bemessungsdrehzahl läuft

[IEV 411-48-29]

3.22

Subtransient-Kurzschlusszeitkonstante der Längsachse

Zeitspanne, in der nach einer plötzlichen Änderung der Betriebsbedingungen die während der ersten Perioden vorhandene, rasch abklingende Komponente des Anker-Kurzschlussstromes der Längsachse auf den Anteil $1/e \approx 0,368$ ihres Anfangswertes abfällt, während die Maschine mit Bemessungsdrehzahl läuft

[IEV 411-48-30]

3.23

Transient-Leerlaufzeitkonstante der Querachse

Zeitspanne, in der nach einer plötzlichen Änderung der Betriebsbedingungen die durch den Querfluss erregte, langsam veränderliche Komponente der Leerlauf-Ankerspannung (Längsspannung) auf den Anteil $1/e \approx 0,368$ ihres Anfangswertes abklingt, während die Maschine mit Bemessungsdrehzahl läuft

[IEV 411-48-32]

3.24

Transient-Kurzschlusszeitkonstante der Querachse

Zeitspanne, in der nach einer plötzlichen Änderung der Betriebsbedingungen die langsam veränderliche Komponente des Kurzschluss-Ankerstroms in der Querachse auf den Anteil $1/e \approx 0,368$ ihres Anfangswertes abklingt, während die Maschine mit Bemessungsdrehzahl läuft

[IEV 411-48-33]

3.25

Subtransient-Leerlaufzeitkonstante der Querachse

Zeitspanne, in der nach einer plötzlichen Änderung der Betriebsbedingungen die durch den Querfluss erregte und während der ersten Perioden vorhandene, rasch abklingende Komponente der Leerlauf-Ankerspannung (Längsspannung) auf den Anteil $1/\epsilon \approx 0,368$ ihres Anfangswertes abfällt, während die Maschine mit Bemessungsdrehzahl läuft

[IEV 411-48-34]

3.26

Leerlaufzeitkonstante der Ersatzdämpferwicklung der Längsachse

Zeitspanne, in der nach einer plötzlichen Änderung der Betriebsbedingungen die in der Ersatzdämpferwicklung induzierte Stromkomponente auf den Anteil $1/\epsilon \approx 0,368$ ihres Anfangswertes abklingt. Die Maschine läuft mit Bemessungsdrehzahl, Anker- und Erregerwicklung sind offen

3.27

Kurzschlusszeitkonstante der Ersatzdämpferwicklung der Längsachse

Zeitspanne, in der nach einer plötzlichen Änderung der Betriebsbedingungen die in der Ersatzdämpferwicklung induzierte Stromkomponente auf den Anteil $1/\epsilon \approx 0,368$ ihres Anfangswertes abklingt. Die Maschine läuft mit Bemessungsdrehzahl, die Ankerwicklung ist kurzgeschlossen, die Erregerwicklung ist offen

3.28

Subtransient-Kurzschlusszeitkonstante der Querachse

Zeitspanne, in der nach einer plötzlichen Änderung der Betriebsbedingungen die während der ersten Perioden vorhandene, rasch abklingende Komponente des Anker-Kurzschlussstroms der Querachse auf den Anteil $1/\epsilon \approx 0,368$ ihres Anfangswertes abfällt, während die Maschine mit Bemessungsdrehzahl läuft

[IEV 411-48-35]

3.29

Anker-Kurzschlusszeitkonstante

Zeitspanne, in der nach einer plötzlichen Änderung der Betriebsbedingungen die aperiodische Gleichstromkomponente des Anker-Kurzschlussstromes auf den Anteil $1/\epsilon \approx 0,368$ ihres Anfangswertes abklingt, während die Maschine mit Bemessungsdrehzahl läuft

[IEV 411-48-31]

3.30

Anlaufzeitkonstante

Zeitspanne, die benötigt wird, um den Läufer der Synchronmaschine vom Stillstand auf Bemessungsdrehzahl zu beschleunigen, unter der Annahme, dass das Beschleunigungsmoment konstant und gleich dem Quotienten aus der Bemessungs-Wirkleistung und der Bemessungs-Winkelgeschwindigkeit ist

[IEV 411-48-15]

3.31

Trägheitskonstante

Quotient aus der bei Bemessungsdrehzahl im Läufer gespeicherten kinetischen Energie und der Bemessungs-Scheinleistung

3.32

Bemessungserregerstrom

Strom in der Erregerwicklung bei Betrieb der Maschine mit ihren Bemessungswerten für Spannung, Strom, Leistungsfaktor und Drehzahl

3.33

Erregerstrom für Anker-Bemessungsstrom im Dauerkurzschluss

Strom in der Erregerwicklung bei Betrieb der Maschine im eingeschwungenen Zustand mit Bemessungsdrehzahl, kurzgeschlossener Ankerwicklung und Bemessungs-Ankerstrom

3.34

Bemessungs-Spannungsänderung

Änderung der Klemmenspannung beim Übergang vom Bemessungsbetrieb in den Leerlaufbetrieb bei gleichbleibender Drehzahl und gleichbleibendem Erregerstrom

3.35

Frequenzgang

Der Frequenzgang einer Maschine wird durch eine Anzahl charakteristischer Kurven oder analytischer Ausdrücke dargestellt, die den komplexen Leitwert oder die dazu reziproke komplexe Impedanz (oder Komponenten davon) in Bezug zum Schlupf setzen. Sofern nicht anders angegeben, gilt der Frequenzgang für Bemessungsfrequenz

3.36

Frequenzgang der Längsreaktanz

Komplexer Quotient als Funktion des Schlupfes aus dem eingeschwungenen komplexen Wert (Vektor) derjenigen Grundsatzkomponente der Ankerspannung, die durch den Ankerstrom der Längsachse erzeugt wird, und dem Vektor der Grundsatzkomponente dieses Stroms. Die Maschine läuft mit dem entsprechend vorgegebenen Schlupf sowie mit kurzgeschlossener Erregerwicklung

ANMERKUNG Die komplexe Darstellung einer sinusförmigen Größe definierter Frequenz wird als Zeiger oder alternativ, wie in diesem Dokument, als Vektor bezeichnet.

3.37

Frequenzgang der Querreaktanz

Komplexer Quotient als Funktion des Schlupfes aus dem eingeschwungenen Vektor derjenigen Grundsatzkomponente der Ankerspannung, die durch den Ankerfluss in der Querachse infolge des Anker-Querstroms erzeugt wird, und dem Vektor der Grundsatzkomponente dieses Stroms. Die Maschine läuft mit dem entsprechend vorgegebenen Schlupf sowie mit kurzgeschlossener Erregerwicklung

3.38

Frequenzgang des Erregungsfaktors

Komplexer Quotient aus dem eingeschwungenen Vektor der Ankerspannung, hervorgerufen durch einen Strom der Frequenz $s \cdot f$ in der Erregerwicklung, und dem komplexen Wert der dafür an die Erregerwicklung angelegten Spannung. Die Maschine läuft mit Bemessungsdrehzahl

ANMERKUNG Es gibt verschiedene Methoden zur Bestimmung der Frequenzverläufe 3.36 bis 3.38 (oder im Fall 3.36 und 3.37 ihrer reziproken Werte), siehe beispielsweise 7.28.2 und 7.28.4. Die Kennlinien können auch mit einer über eine spezifizierte Impedanz abgeschlossenen Erregerwicklung ermittelt werden.

4 Symbole und Einheiten

f	Frequenz
f_N	Bemessungsfrequenz
$G(js)$	Komplexer Frequenzgang des Erregungsfaktors
H	Trägheitskonstante
I, i	Strom
I_N	Bemessungsstrom
I_{fk}	Erregerstrom für Anker-Bemessungsstrom im Dauerkurzschluss
I_{fN}	Bemessungs-Erregerstrom
K_c	Leerlauf-Kurzschlussverhältnis
$R_{(0)}$	Nullwiderstand
$R_{(1)}$	Synchron-Widerstand
$R_{(2)}$	Inverswiderstand
R_a	Gleichstromwiderstand der Ankerwicklung

R_f	Gleichstromwiderstand der Erregerwicklung
s	Schlupf
S_N	Bemessungs-Scheinleistung
U, u	Spannung
U_N	Bemessungs-Spannung
$X_{(0)}$	Nullreaktanz
$X_{(1)}$	Synchronreaktanz
$X_{(2)}$	Inversreaktanz
X_d	Synchron-Längsreaktanz
X'_d	Transient-Längsreaktanz
X''_d	Subtransient-Längsreaktanz
X_p	Potier-Reaktanz
X_q	Synchron-Querreaktanz
X'_q	Transient-Querreaktanz
X''_q	Subtransient-Querreaktanz
X_σ	Ankerstreureaktanz
$X_d(j\omega)$	Komplexer Frequenzgang der Längsreaktanz
$X_q(j\omega)$	Komplexer Frequenzgang der Querreaktanz
Z	Impedanz
Z_N	Bemessungsimpedanz
Z_{st}	Kurzschlussimpedanz ^{N1)}
ΔU_N	Bemessungs-Spannungsänderung
δ	Lastwinkel
τ_a	Anker-Kurzschlusszeitkonstante
τ_{kd}	Kurzschlusszeitkonstante der Ersatzdämpferwicklung der Längsachse
τ_{kdo}	Leerlaufzeitkonstante der Ersatzdämpferwicklung der Längsachse
τ'_d	Transient-Kurzschlusszeitkonstante der Längsachse
τ'_{do}	Transient-Leerlaufzeitkonstante der Längsachse
τ'_q	Transient-Kurzschlusszeitkonstante der Querachse
τ'_{qo}	Transient-Leerlaufzeitkonstante der Querachse
τ''_d	Subtransient-Kurzschlusszeitkonstante der Längsachse
τ''_{do}	Subtransient-Leerlaufzeitkonstante der Längsachse
τ''_q	Subtransient-Kurzschlusszeitkonstante der Querachse
τ''_{qo}	Subtransient-Leerlaufzeitkonstante der Querachse
τ_j	Anlaufzeitkonstante

^{N1)} Nationale Fußnote: Im IEC-Dokument fehlt irrtümlich Z_{st} .

5 Übersicht der Messverfahren

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Messverfahren zur Ermittlung der Kenngrößen von Synchronmaschinen und kennzeichnet die bevorzugten Prüfungen.

Tabelle 1 – Messverfahren zur Ermittlung der Kenngrößen von Synchronmaschinen

Kenngröße	Auswertung	Prüfung	Prüfverfahren	Bevorzugt / Fehler
Reaktanzen				
Synchron-Längsreaktanz X_d	7.2.1	Leerlauf- und Dauerkurzschlussversuch	6.4, 6.5	Bevorzugt (ungesättigt)
	7.2.2	Motorbetrieb im Leerlauf	6.6	Bevorzugt (gesättigt)
	7.2.3	Versuch mit Phasenverschiebung	6.7	
	7.2.4	Messung des Polradwinkels unter Last	6.10	
Transient-Längsreaktanz X'_d	7.3.1	Dreiphasiger Stoßkurzschlussversuch	6.12	Bevorzugt
	7.3.2	Versuch mit wiederkehrender Spannung	6.13	
	7.3.3	Gleichstrom-Abklingversuch der Ankerwicklung bei Stillstand	6.15	
	7.3.4	Berechnung aus Messergebnissen	–	
Subtransient-Längsreaktanz X''_d	7.4.1	Dreiphasiger Stoßkurzschlussversuch	6.12	Bevorzugt
	7.4.2	Versuch mit wiederkehrender Spannung	6.13	
	7.4.3	Versuch mit angelegter Spannung und Läuferstellung in Längs- und Querachse	6.17	
	7.4.4	Versuch mit angelegter Spannung und beliebiger Läuferstellung	6.18	
Synchron-Querreaktanz X_q	7.5.1	Gegenregungsversuch	6.9	Bevorzugt (ungesättigt)
	7.5.2	Versuch mit kleinem Schlupf	6.11	
	7.5.3	Versuch mit Phasenverschiebung	6.7	
	7.5.4	Messung des Polradwinkels unter Last	6.10	
Transient-Querreaktanz X'_q	7.6.1	Gleichstrom-Abklingversuch der Ankerwicklung bei Stillstand	6.15	
	7.6.2	Berechnung aus Messergebnissen	–	
Subtransient-Querreaktanz X''_q	7.7.1	Versuch mit angelegter Spannung und Läuferstellung in Längs- und Querachse	6.17	Bevorzugt
	7.7.2	Versuch mit angelegter Spannung und beliebiger Läuferstellung	6.18	
Nullreaktanz $X_{(0)}$	7.8.1	Speisung der Ankerwicklung mit einem einphasigen Spannungssystem	6.19	Bevorzugt
	7.8.2	Zweipoliger Dauerkurzschlussversuch mit Neutralleiter	6.22	
Inversreaktanz $X_{(2)}$	7.9.1	Unsymmetrischer zweipoliger Dauerkurzschlussversuch	6.20	Bevorzugt
	7.9.2	Versuch mit gegenläufigem Drehfeld	6.23	
	7.9.3	Berechnung aus Messwerten	–	
	7.9.4	Zweipoliger Stoßkurzschlussversuch	6.21	
	7.9.5	Gleichstrom-Abklingversuch der Ankerwicklung bei Stillstand	6.15	
Ankerstreureaktanz X_σ	7.10	Versuch mit ausgebautem Läufer	6.28	
Potier-Reaktanz X_p	7.11	Leerlauf- und Kurzschlussversuch	6.4, 6.5	
Widerstände				
Nullwiderstand $R_{(0)}$	7.12.1	Speisung der Ankerwicklung mit einem einphasigen Spannungssystem	6.19	Bevorzugt
	7.12.2	Zweipoliger Dauerkurzschlussversuch mit Neutralleiter	6.22	
Synchron-Widerstand $R_{(1)}$	7.13	Berechnung aus Messergebnissen	–	

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Kenngröße	Auswertung	Prüfung	Prüfverfahren	Bevorzugt / Fehler
Inverswiderstand $R_{(2)}$	7.14.1 7.14.2	Unsymmetrischer zweipoliger Dauerkurzschlussversuch Versuch mit gegenläufigem Drehfeld	6.20 6.23	Bevorzugt
Gleichstromwiderstand der Ankerwicklung R_a	7.15	Strom-Spannungs-Messung oder Brückenschaltung	6.3	
Gleichstromwiderstand der Erregerwicklung R_f	7.15	Strom-Spannungs-Messung oder Brückenschaltung	6.3	
Zeitkonstanten				
Transient-Kurzschlusszeitkonstante der Längsachse τ'_d	7.16.1 7.16.2 7.16.3 7.16.4 7.16.5	Dreiphasiger Stoßkurzschlussversuch Feldstrom-Abklingversuch mit kurzgeschlossener Ankerwicklung bei Bemessungsdrehzahl Gleichstrom-Abklingversuch der Ankerwicklung bei Stillstand Versuch mit plötzlicher Aufschaltung der Erregung bei kurzgeschlossener Ankerwicklung Feldstrom-Abklingversuch mit unsymmetrisch kurzgeschlossener Ankerwicklung im Stillstand	6.12 6.25 6.15 6.26 6.27	Bevorzugt
Transient-Leerlaufzeitkonstante der Längsachse τ'_{do}	7.17.1 7.17.2 7.17.3 7.17.4 7.17.5	Feldstrom-Abklingversuch mit offener Ankerwicklung bei Bemessungsdrehzahl Feldstrom-Abklingversuch mit offener Ankerwicklung im Stillstand Versuch mit wiederkehrender Spannung Gleichstrom-Abklingversuch der Ankerwicklung bei Stillstand Plötzliche Aufschaltung der Erregung bei offener Ankerwicklung	6.24.1 6.24.2 6.13 6.15 6.16	Bevorzugt
Subtransient-Kurzschlusszeitkonstante der Längsachse τ'_d	7.18	Dreiphasiger Stoßkurzschlussversuch	6.12	
Subtransient-Leerlaufzeitkonstante der Längsachse τ''_{do}	7.19.1 7.19.2	Versuch mit wiederkehrender Spannung Gleichstrom-Abklingversuch der Ankerwicklung bei Stillstand	6.13 6.15	Bevorzugt
Transient-Kurzschlusszeitkonstante der Querachse τ'_q	7.20.1 7.20.2	Berechnung aus Messergebnissen Gleichstrom-Abklingversuch der Ankerwicklung bei Stillstand	— 6.15	Bevorzugt
Transient-Leerlaufzeitkonstante der Querachse τ'_{qo}	7.21.1	Gleichstrom-Abklingversuch der Ankerwicklung bei Stillstand	6.15	
Subtransient-Kurzschlusszeitkonstante der Querachse τ''_q	7.22.1 7.22.2	Berechnung aus Messergebnissen Gleichstrom-Abklingversuch der Ankerwicklung bei Stillstand	— 6.15	Bevorzugt
Subtransient-Leerlaufzeitkonstante der Querachse τ''_{qo}	7.23.1	Gleichstrom-Abklingversuch der Ankerwicklung bei Stillstand	6.15	
Ankerkurzschlusszeitkonstante τ_a	7.24.1 7.24.2	Dreiphasiger Stoßkurzschlussversuch Berechnung aus Messergebnissen	6.12 —	Bevorzugt
Weitere Kenngrößen				
Anlaufzeitkonstante τ_i	7.25.1	Schwingungsversuch mit aufgehängtem Läufer	6.30	
Trägheitskonstante H	7.25.2	Auslaufversuch im Leerlauf	6.29	Bevorzugt
Bemessungs-Erregerstrom i_{fN}	7.26.1 7.26.2 7.26.3 7.26.4	Direkte Messung Potier-Diagramm ASA-Diagramm Schweden-Diagramm	6.2 — — —	Bevorzugt

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Kenngröße	Auswertung	Prüfung	Prüfverfahren	Bevorzugt / Fehler
Erregerstrom für Anker-Bemessungsstrom im Dauerkurzschluss i_{fk}	7.27.1	Übererregungsversuch bei Leistungsfaktor Null und variabler Ankerspannung	6.32	Bevorzugt
	7.27.2	Dreiphasiger Dauerkurzschlussversuch	6.5	
Frequenzgang	7.28.2	Asynchroner Betrieb mit reduzierter Spannung	6.33	Bevorzugt
	7.28.3	Versuch mit einer Spannung variabler Frequenz im Stillstand	6.34	
	7.28.4	Gleichstrom-Abklingversuch der Ankerwicklung bei Stillstand	6.15	
Leerlauf-Kurzschlussverhältnis K_c	7.29	Leerlauf- und Dauerkurzschlussversuch	6.4, 6.5	
Bemessungs-Spannungsänderung ΔU_N	7.30.1	Direkte Messung	6.2	Bevorzugt
	7.30.2	Grafisch mittels Leerlauf-Kurzschluss-Kennlinie und bekanntem Bemessungserregerstrom i_{fN}	6.4.2	
Kurzschlussimpedanz von Synchronmotoren Z_{st}	7.31	Versuch mit festgebremstem Läufer	6.31	

6 Prüfverfahren

6.1 Allgemeines

6.1.1 Anforderungen an die Messinstrumente

Anzeigende Messgeräte und deren Zubehör, wie z. B. Messtransformatoren, Nebenwiderstände und Messbrücken, die während der Prüfung benutzt werden, müssen eine Genauigkeit haben, die mindestens der Klasse 0,5 nach IEC 60051 entspricht, falls nicht ausdrücklich anders vermerkt. Die Geräte zur Bestimmung von Gleichstromwiderständen müssen eine Genauigkeit haben, die mindestens der Klasse 0,2 entspricht.

Die Genauigkeitsklassen von Oszillographen und anderen Rekordern sollten unter gebührender Berücksichtigung der Bemessungsleistung des Prüflings gewählt werden.

Die Drehzahl kann entweder stroboskopisch oder mit mechanischen oder elektrischen Tachometern gemessen werden. Anstelle der Drehzahl kann die Frequenz mit Hilfe eines Frequenzmessers ermittelt werden, wenn die Maschine allein oder synchron mit einer beliebigen anderen Maschine läuft.

6.1.2 Anforderungen an die Erregereinrichtung

Bei Synchronmaschinen mit bürstenloser Erregung ist die Erregerwicklung über einen drehenden Umrichter, meist ein Diodengleichrichter, ohne Schleifringe direkt mit der Ankerwicklung der Erregermaschine verbunden. Daher können Prüfungen, die entweder die direkte Messung des Erregerstroms, die Speisung aus einer separaten Erregereinrichtung oder das Kurzschließen der Erregerwicklung erfordern, gegebenenfalls nur unter besonderen Voraussetzungen (beispielsweise Montage von Messschleifringen) durchgeführt werden.

6.1.3 Prüfbedingungen

Prüfungen zur Bestimmung der Kenngrößen von Synchronmaschinen müssen an komplettierten Maschinen und bei abgeschalteten automatischen Regeleinrichtungen durchgeführt werden, sofern diese nicht ausdrücklich für die Prüfung benötigt werden. Bauteile, die keinen Einfluss auf die Werte der Kenngrößen haben, müssen nicht montiert sein.

Alle Prüfungen werden bei Bemessungsdrehzahl durchgeführt, sofern nicht ausdrücklich anders vermerkt.

ANMERKUNG Prüfverfahren, die im Stillstand durchgeführt werden, können andere Ergebnisse liefern als Messungen, die an der drehenden Maschine erfolgen. Dies tritt beispielsweise dann auf, wenn die Parameter der Dämpferwicklung durch die Zentrifugalkräfte beeinflusst werden.

Die Wicklungstemperaturen werden während des Versuchs gemessen, wenn

- die zu bestimmenden Größen von der Temperatur abhängen;
- es die Sicherheit der Maschine erfordert.

Falls die Gefahr besteht, dass der zeitliche Temperaturverlauf vorübergehend die Grenzwerte überschreitet, wird empfohlen, die Prüfungen nur nach dem Leerlaufbetrieb mit normaler Kühlung durchzuführen oder nach einer Stillstandszeit, die lang genug sein muss, um genügend niedrige Anfangstemperaturen zu gewährleisten. Ferner sollen in derartigen Fällen die Temperaturen sorgfältig überwacht oder vorausbestimmt werden, so dass die Prüfung abgebrochen werden kann, bevor die Temperaturen gefährliche Werte erreichen.

In der Regel sollen während der Prüfung die Schaltverbindungen in betriebsmäßigem Zustand sein.

Die Bestimmung sämtlicher Kenngrößen gilt für Sternschaltung der Ankerwicklung (falls nicht besondere Schaltungen, wie z. B. eine offene Dreieckschaltung, spezifiziert sind). Falls die Ankerwicklung betriebsmäßig in Dreieck geschaltet ist, gelten die nach der hier vorliegenden Norm ermittelten Werte der Kenngrößen für eine äquivalente Sternschaltung.

6.1.4 Bezugsgrößen

Alle Gleichungen geben entweder physikalische Größen in SI-Einheiten oder per-unit-Werte an, die auf ihre jeweiligen Bezugsgrößen bezogen sind. Die Bezugsgrößen sind im Allgemeinen die Bemessungsspannung U_N und die Bemessungsscheinleistung S_N . Daraus ergeben sich als abgeleitete Bezugsgrößen der Bemessungsstrom

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N}$$

und die Bemessungsimpedanz

$$Z_N = \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{S_N}{3I_N^2}$$

Zwischenrechnungen können in physikalischen Größen durchgeführt werden mit anschließender Umrechnung in die per-unit-Werte. Es wird empfohlen, die Zeit in Sekunden auszudrücken. Bei der Berechnung von Kennlinien und beim Zeichnen von Diagrammen wird als Bezugswert des Erregerstromes derjenige Erregerstrom gewählt, der sich aus der Leerlauf-Kennlinie bei Bemessungsspannung ergibt. Wenn Diagramme und Kennlinien dargestellt werden, können Strom- und Spannungswerte auch in physikalischen Größen angegeben werden.

Bei Maschinen mit mehreren verschiedenen Bemessungspunkten ist der als Basis für die Bezugsgrößen gewählte Bemessungspunkt anzugeben.

Falls nicht ausdrücklich anders vermerkt, gilt in dieser Norm das oben angegebene System. Dabei werden die Relativwerte durch kleine Buchstaben und die Absolutwerte durch große Buchstaben gekennzeichnet.

Sofern nicht ausdrücklich anders vermerkt, wird bei den in dieser Norm angegebenen Beziehungen zur Bestimmung von Reaktanzen der Synchron-Widerstand der Ankerwicklung als vernachlässigbar angenommen. Falls der Synchron-Widerstand der Ankerwicklung mehr als das 0,2-fache der gemessenen Reaktanz ausmacht, müssen die betreffenden Formeln als Näherungen angesehen werden.

6.1.5 Vereinbarungen und Annahmen

Die Definitionen der meisten Kenngrößen und die Prüfungen zu ihrer Bestimmung werden in dieser Norm entsprechend der weithin als gültig angesehenen Zweiachsentheorie der Synchronmaschine vorgenommen. Dabei werden alle Wicklungen angenähert dargestellt durch Ersatzwicklungen in zwei Achsen, die starr mit der Feldwicklung verbunden sind, wobei die Ersatzwicklungen entweder in der d-Achse (Längsachse) oder in der q-Achse (Querachse) angeordnet zu denken sind. Ferner wird der Wirkwiderstand der Ankerwicklung vernachlässigt oder nur näherungsweise berücksichtigt.

Als Folge dieser näherungsweisen Betrachtung der Maschine werden in dieser Norm drei Reaktanzen (Synchronreaktanzen, Transient- und Subtransientreaktanzen) und zwei Zeitkonstanten (Transient-Zeitkonstante und Subtransient-Zeitkonstante) in der Längsachse und zwei Reaktanzen (Synchron- und Subtransientreaktanzen) und eine Zeitkonstante (Subtransient-Zeitkonstante) in der Querachse bei der Behandlung transienter Vorgänge berücksichtigt. Darüber hinaus wird die Kurzschluss-Zeitkonstante der Ankerwicklung einbezogen.

Diese Zeitkonstanten beruhen auf der Annahme eines exponentiellen Abklingens der auftretenden einzelnen Komponenten von Strömen, Spannungen usw. Falls die Kurve einer gemessenen Größe nicht als reine Exponentialfunktion abklingt, wie z. B. im Fall einer Maschine mit Massivläufer, so sollte die Zeitkonstante üblicherweise definiert werden als diejenige Zeitspanne, in der die betreffende Größe auf den Anteil $1/e \approx 0,368$ ihres Anfangswertes abgeklungen ist. Exponentiell abklingende Kurven mit diesen Zeitkonstanten müssen als Ersatzfunktionen für die tatsächlich gemessenen Verläufe angesehen werden.

ANMERKUNG 1 Häufig ist die konventionelle Darstellung durch drei Reaktanzen und zwei Zeitkonstanten nicht ausreichend, um die Maschine zufriedenstellend zu beschreiben. Dies trifft beispielsweise auf Maschinen mit Turbo-läufern zu, bei denen das Modell durch die Parameter X''_d , τ''_d erweitert werden kann. Die Bestimmung dieser zusätzlichen Parameter kann in Anlehnung an die in dieser Norm beschriebenen Verfahren erfolgen (siehe [Anhang B](#)).

ANMERKUNG 2 Diese Norm beschreibt Verfahren zur Bestimmung der transienten Parameter der Querachse X_q , τ'_q , τ''_{q0} (siehe [6.15](#)), obwohl diese häufig in konventionellen Rechnungen nicht berücksichtigt werden, wo $X_q = X_d$ angenommen wird.

6.1.6 Berücksichtigung von Sättigungserscheinungen

Die Kenngrößen von Synchronmaschinen ändern sich mit der Sättigung des magnetischen Kreises. In der Praxis werden sowohl gesättigte als auch ungesättigte Werte benutzt.

Falls nicht ausdrücklich anders vermerkt, entsprechen in dieser Norm die „gesättigten Werte“ der Reaktanzen und Widerstände den Werten bei Bemessungs(anker)speisung, während die zugehörigen „ungesättigten Werte“ den Werten bei Bemessungs(anker)strom entsprechen. Ausgenommen sind hiervon die synchronen Reaktanzen, bei denen die Werte bei kleinen Spannungen als ungesättigt und die Werte bei Bemessungsspannung unter Last als gesättigte Werte aufgefasst werden. Die gesättigten Werte der Kenngrößen hängen ferner von der Betriebsart der Maschine ab.

Der Bemessungsspannungswert einer Kenngröße (ausgenommen Synchronreaktanzen) entspricht den magnetischen Verhältnissen der Maschine bei einem Stoßkurzschluss der Ankerwicklung aus Bemessungsspannung im Leerlauf, wobei die Maschine mit Bemessungsdrehzahl läuft.

Der Bemessungsstromwert einer Kenngröße entspricht demjenigen Zustand der Maschine, bei dem die Grundschrwingung des Strangstroms, der die betreffende Kenngröße bestimmt, gleich dem Bemessungsstrom ist.

Leerlauf- und Kurzschlussversuch dienen üblicherweise der Bestimmung des ungesättigten Werts der Synchron-Längsreaktanzen X_d . Die Prüfung „Motorbetrieb im Leerlauf“ und der „Versuch mit Phasenverschiebung“ erlauben die Bestimmung der ungesättigten und gesättigten Werte von X_d . Die gesättigten Werte, die mit diesen Prüfungen bestimmt werden, sind aber nicht für jeden Betriebspunkt der Maschine gültig und können nur zum Vergleich mit anderen Maschinen herangezogen werden, die nach demselben Verfahren getestet wurden.

Der Gegenregungsversuch und der Versuch mit kleinem Schlupf werden für die Ermittlung von ungesättigten Werten verwendet. Der „Versuch mit Phasenverschiebung“ erlaubt die Bestimmung von ungesättigten und gesättigten Werten von X_q .

Der dreiphasige Stoßkurzschlussversuch erlaubt die Bestimmung der ungesättigten und gesättigten Werte von X'_d . Es ist die bevorzugte Methode.

Wird der Wert aus Messergebnissen berechnet, ist der Feldstrom-Abklingversuchen bei Bemessungsdrehzahl (6.24 und 6.25) das bevorzugte Vorgehen für die hierfür nötige Bestimmung von τ'_{do} und τ'_d .

Der dreiphasige Stoßkurzschlussversuch und der Feldstrom-Abklingversuchen bei Bemessungsdrehzahl können zur Bestimmung von τ'_{do} und τ'_d an einer bürstenlos erregten Maschine durchgeführt werden. Dabei wird die Maschine durch ihre eigene Erregermaschine oder über Hilfsschleifringe und eine separate Erreger-einrichtung gespeist. Die Erregermaschine muss in beiden Fällen fremderregt werden. Der Versuch mit Spannungswiederkehr kann ohne Schleifringe durchgeführt werden, wenn die Maschine über ihre eigene Erregermaschine erregt wird. Diese muss dann fremderregt sein.

Andernfalls wird der Wert von X'_d für eine bürstenlos erregte Maschinen aus den Messwerten von τ'_{do} und τ'_d bestimmt, die wiederum aus den Feldstrom-Abklingversuchen im Stillstand bei offener Ankerwicklung (Zeitkonstante τ'_{do} , siehe 6.24) und mit zwei kurzgeschlossenen Ankerzweigen (Zeitkonstante τ'_d , siehe 6.27) bestimmt werden.

Der dreiphasige Stoßkurzschlussversuch erlaubt die Bestimmung der ungesättigten und gesättigten Werte von X''_d . Es ist die bevorzugte Methode.

Die Prüfungen mit angelegter Spannung sind praktisch gleichwertig und können zur Bestimmung ungesättigter Werte von X''_d und X''_q herangezogen werden. Die beiden Verfahren sind aber im Allgemeinen nicht zur Bestimmung gesättigter Werte anwendbar, da die hierfür benötigten hohen Ströme zu einer unzulässigen Erwärmung der Wicklung und massiver Bauteile führen können.

Falls ein dreiphasiger Stoßkurzschlussversuch zur Bestimmung von X'_d durchgeführt wird, sollte τ'_d aus derselben Prüfung bestimmt werden. In allen anderen Fällen wird der Feldstrom-Abklingversuchen bei Bemessungsdrehzahl mit kurzgeschlossener Ankerwicklung bevorzugt.

Wenn der Wert der Anker-Kurzschlusszeitkonstanten τ_a kleiner als eine Grundswingungsperiode ist, wird die Zeitkonstante aus dem Abklingen der aperiodischen Gleichstromkomponente des Ankerstroms bestimmt. Ist τ_a größer als eine Grundswingungsperiode, wird die Bestimmung aus dem Abklingen der periodischen Komponente des Erregerstroms bevorzugt.

ANMERKUNG Bei Phasenschiebern wird die Bemessungsscheinleistung anstelle der (abgegebenen) Bemessungswirkleistung verwendet.

Alle zuvor angegebenen Prüfmethode sind praktisch gleichwertig. Die Auswahl der jeweiligen Prüfmethode hängt vom Design und von der Scheinleistung des Prüflings ab.

6.2 Direkte Messung des Erregerstroms im Bemessungsbetrieb

Der Bemessungs-Erregerstrom I_{FN} ist der Erregerstrom bei Betrieb der Maschine mit Bemessungsspannung, Bemessungsstrom, Bemessungsleistungsfaktor und Bemessungsdrehzahl.

Bei Durchführung einer Übererregungsprüfung werden graphische Methoden zur Bestimmung des Bemessungserregerstroms verwendet. Wird der Bemessungserregerstrom dagegen durch eine direkte Messung bei Betrieb mit Bemessungsleistung ermittelt, sollte die zu prüfende Maschine durch ihre eigene Erreger-einrichtung versorgt werden, da der Erregerstrom bei Erregung über eine automatische Erreger-einrichtung vom Erregerstrom bei Fremderregung abweichen kann (insbesondere bei Maschinen mit statischen Erreger-einrichtungen).

ANMERKUNG Bei bürstenlos erregten Maschinen kann die direkte Messung des Erregerstroms durch Verwendung von Hilfsschleifringen erfolgen.

6.3 Messung von Gleichstrom-Widerständen

Für die Bestimmung von Gleichstromwiderständen durch eine Spannungs- und Strommessung (bevorzugte Methode) oder durch eine Brückenschaltung kann eine beliebige Gleichspannungsquelle (Batterie, Generator usw.) mit der benötigten Leistung und hinreichend konstanter Spannung verwendet werden.

Der Widerstand muss unmittelbar an den Wicklungsklemmen bei stillstehendem Läufer gemessen werden.

Die einfache Brückenschaltung zur Messung von ohmschen Widerständen von weniger als 1 Ω ist nicht zulässig.

Der Ankerwicklungs-Widerstand ist für jeden Wicklungsstrang einzeln zu messen. Für den Fall, dass der Widerstand der einzelnen Stränge nicht direkt messbar ist, wird die Messung zwischen jedem Klemmenpaar der Ankerwicklung durchgeführt.

Bei der Bestimmung der Gleichstromwiderstände der Anker- oder der Erregerwicklung mit

- einer Messbrücke ist es notwendig, dass mindestens drei Ablesungen durchgeführt werden, wobei jedes Mal die Brücke neu abgeglichen werden muss. Der Widerstand sollte auf den Schleifringen oder an den Wicklungsklemmen derart gemessen werden, dass der Widerstand der Bürsten und ihrer Kontaktflächen nicht mit gemessen wird.
- einer Strom- und Spannungsmessung wird die Aufnahme von drei bis fünf Messwerten bei verschiedenen stationären Strömen empfohlen.

Während der Messung des Gleichstromwiderstandes sollte der Strom so eingestellt werden, dass die Wicklungstemperatur während der Messung adiabatisch um höchstens 1 K zunimmt. Zur Berechnung der adiabaten Erwärmung wird folgende Beziehung benutzt:

$$\Delta\theta = \frac{j^2}{c} \text{ Kelvin je Sekunde}$$

Dabei ist

- j die Stromdichte während der Prüfung, in Ampere je Quadratmillimeter;
 c eine Materialkonstante; sie beträgt 200 für Kupfer und 86 für Aluminium.

Falls die Erwärmung der Wicklung unbekannt ist, sollte der Strom nicht mehr als das 0,1-fache des Bemessungsstroms der betreffenden Wicklung betragen und nicht länger als 1 min fließen.

Die Messzeit sollte so gewählt werden, dass im Ablesezeitpunkt der Instrumente die Zeiger stillstehen. Das bedeutet, dass sowohl in den Instrumenten als auch im Messkreis alle transienten Vorgänge abgeklungen sind.

Die Wicklungstemperatur sollte während der Messung durch eingebaute oder eingebettete Temperaturfühler ermittelt werden, falls solche vorhanden sind.

Die Thermometer und die Thermoelemente zur Messung der Wicklungstemperatur sollten mindestens 15 min vor der Messung an ihrem jeweiligen Ort angebracht worden sein und vor jedem äußeren Einfluss geschützt werden.

Die Registrierungsnummern der Messgeräte sollten aufgezeichnet werden, damit dieselben Messgeräte beim Erwärmungslauf eingesetzt werden können.

6.4 Leerlaufversuch

6.4.1 Versuchsdurchführung

Der Leerlaufversuch wird durchgeführt:

- a) durch Antreiben der zu prüfenden Maschine als Generator;
- b) durch Betreiben der Maschine als ungekuppelter Motor an einer symmetrischen Dreiphasenspannung;
- c) als Auslaufversuch.

Bei der Durchführung des Versuchs sollte die Erregung so verändert werden, dass sich die Klemmenspannung von höheren Werten zu niedrigeren Werten in etwa gleichen Stufen einstellt. Wenn möglich, beginnt man mit derjenigen Spannung, die dem Bemessungserregerstrom entspricht, jedoch nicht unter dem 1,3-fachen der Bemessungsspannung, und beendet den Versuch beim 0,2-fachen der Bemessungsspannung, falls die Remanenzspannung nicht höher ist.

Nach Reduzierung der Erregung auf Null wird die Remanenzspannung der Maschine gemessen.

Bevorzugt wird die Prüfung nach a) mit einer kalibrierten Gleichstrommaschine durchgeführt, da dann auch die Leerlaufverluste^{N2)} im Rahmen der Prüfung ermittelt werden können.

Falls die Leerlaufkennlinie im Motorbetrieb nach b) aufgenommen wird, ist es zusätzlich notwendig, den Ankerstrom zu messen. Bei jeder Spannungsstufe soll die Ablesung beim Minimalwert des Ankerstromes erfolgen, dieser ergibt sich für den Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$.

Falls die Leerlaufkennlinie im Auslaufversuch nach c) aufgenommen wird, darf die Auslaufverzögerung pro Sekunde nicht mehr als das 0,04-fache der Bemessungsdrehzahl betragen. Falls die Auslaufverzögerung pro Sekunde größer ist als das 0,02-fache der Bemessungsdrehzahl, muss die Erregung durch eine Fremdspannungsquelle vorgesehen werden, um eine genügend stabile Erregung während des Versuchs sicherzustellen. Vor dem Abschalten der speisenden Spannung wird die Maschine auf den höchsten benötigten Spannungswert erregt, jedoch mindestens auf das 1,3-fache der Bemessungsspannung. Die Erregung wird in Stufen abgesenkt, und bei jeder Stufe werden die Ankerspannung und die Drehzahl (Frequenz) gleichzeitig gemessen, wobei der Erregerstrom konstant gehalten wird. Der Auslaufversuch kann wiederholt werden, um alle benötigten Messpunkte zu erhalten.

Während des Versuchs sind gleichzeitig aufzuzeichnen:

- Erregerstrom;
- Netzspannung;
- Frequenz (oder Drehzahl);
- bei Durchführung nach b) minimaler Ankerstrom, der dem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$ entspricht;
- bei Durchführung nach c) die Ankerspannung.

6.4.2 Leerlaufkennlinie

Die aufgezeichneten Messwerte der Anker-Klemmenspannung (Ordinate) werden über dem Erregerstrom (Abszisse) entsprechend [Bild 8](#) für Bemessungsfrequenz aufgetragen. Falls bei hoher Remanenzspannung die Leerlaufkennlinie die Ordinatenachse oberhalb des Nullpunktes schneidet, wird eine Korrektur durchgeführt. Dabei wird der geradlinige Teil der Leerlaufkennlinie (die sogenannte Luftspaltkennlinie) bis zum Schnitt mit der (negativen) Abszissenachse verlängert. Der Abszissenabstand dieses Schnittpunktes vom Nullpunkt gibt denjenigen Korrekturwert an, der zu allen gemessenen Werten des Erregerstromes zu addieren ist.

Wenn die Frequenz während der Messung von der Bemessungsfrequenz abweicht, müssen alle gemessenen Spannungswerte auf die Bemessungsfrequenz umgerechnet werden.

^{N2)} Nationale Fußnote: Im IEC-Dokument werden irrtümlich Kurzschlussverluste genannt.