

Umlaufende elektrische Maschinen

Verfahren zur Ermittlung der Kenngrößen
von Synchronmaschinen durch Messungen

DIN

VDE 0530

Teil 4

Diese auch vom Vorstand des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (VDE) e.V. genehmigte Norm ist damit zugleich eine **VDE-Bestimmung** im Sinne von VDE 0022. Sie ist unter obenstehender Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der etz Elektrotechnische Zeitschrift bekanntgegeben worden.

Rotating electrical machines
Methods for determining synchronous machine quantities from tests

Ersatz für
VDE 0530 Teil 4/10.66xx

Machines électriques tournantes
Méthodes pour la détermination à partir d'essais des
grandeurs des machines synchrones

Zusammenhang mit dem vom Europäischen Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) herausgegebenen Harmonisierungsdokument HD 53.4 S2: 1988. Siehe Erläuterungen.

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm (VDE-Bestimmung) gilt ab 1. September 1989.

Fortsetzung Seite 2 bis 27

Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE)

Umlaufende elektrische Maschinen

Teil 4: Verfahren zur Ermittlung der Kenngrößen von Synchronmaschinen durch Messungen

Inhalt

	Seite		Seite
Vorwort	4	32 Bestimmung des Nennerergerstromes aus dem	
Einleitung	4	ASA-Diagramm	12
Hauptabschnitt eins —		33 Bestimmung des Nennerergerstromes aus dem	
Anwendungsbereich und Zweck		Schweden-Diagramm	12
1 Anwendungsbereich	5	34 Gegenregungsversuch	13
2 Zweck	5	35 Bestimmung von X_q aus dem	
Hauptabschnitt zwei — Allgemeines		Gegenregungsversuch	13
3 Allgemeines	5	36 Versuch mit kleinem Schlupf	13
Hauptabschnitt drei – Begriffe und Verfahren zur		37 Bestimmung von X_q aus dem Versuch	
Bestimmung der Kenngrößen		mit kleinem Schlupf	14
4 Synchron-Längsreaktanz X_d	6	38 Bestimmung des Lastwinkels δ im Lastbetrieb ..	14
5 Leerlauf-Kurzschluß-Verhältnis K_c	6	39 Bestimmung von X_q aus der Messung	
6 Synchron-Querreaktanz X_q	6	des Lastwinkels im Lastbetrieb	14
7 Transient-Längsreaktanz X''_d	6	40 Dreiphasiger Stoßkurzschluß	14
8 Subtransient-Längsreaktanz X'''_d	6	41 Bestimmung von Kenngrößen	
9 Subtransient-Querreaktanz X''_q	7	aus dem Stoßkurzschlußversuch	16
10 Invers-Reaktanz X_2	7	42 Versuch mit wiederkehrender Spannung	17
11 Invers-Widerstand R_2	7	43 Bestimmung von Kenngrößen aus dem	
12 Nullreaktanz X_0	7	Versuch mit wiederkehrender Spannung	17
13 Nullwiderstand R_0	7	44 Versuch mit angelegter Spannung bei	
14 Potier-Reaktanz X_p	7	Läuferstellung in Längs- und Querachse	18
15 Gleichstromwiderstände R_a und R_f der		45 Bestimmung von Kenngrößen aus dem	
Ankerwicklung und der Erregerwicklung	7	Versuch mit angelegter Spannung	
16 Synchron-Widerstand R_1	7	bei Läuferstellung in Längs- und Querachse	18
17 Transient-Leerlaufzeitkonstante		46 Versuch mit angelegter Spannung und	
(der Längsachse) τ'_{do}	7	beliebiger Winkelstellung des Läufers	18
18 Transient-Kurzschlußzeitkonstante		47 Bestimmung von Kenngrößen aus dem	
(der Längsachse) τ'_d	8	Versuch mit angelegter Spannung	
19 Subtransient-Kurzschlußzeitkonstante		bei beliebiger Winkelstellung des Läufers	18
(der Längsachse) τ'_d	8	48 Unsymmetrischer zweipoliger Dauerkurzschluß ..	19
20 Anker-Kurzschlußzeitkonstante τ_a		49 Bestimmung von Kenngrößen	
(Gleichstrom-Zeitkonstante)	8	aus dem unsymmetrischen zweipoligen	
21 Nenn-Anlaufzeit τ_l	8	Dauerkurzschlußversuch	19
22 Trägheitskonstante H	8	50 Versuch mit gegenläufigem Drehfeld	19
23 Nenn-Erregerstrom I_{fN}	8	51 Bestimmung von Kenngrößen aus dem	
24 Nenn-Spannungsänderung ΔU_N	9	Versuch mit gegenläufigem Drehfeld	20
Hauptabschnitt vier – Beschreibung der Versuche		52 Versuch mit Einphasen-Spannung an den	
und Bestimmung der Maschinen-Kenngrößen		drei Wicklungssträngen	20
aus den Versuchsergebnissen		53 Bestimmung von Kenngrößen aus dem	
25 Leerlaufversuch	9	Versuch mit Einphasen-Spannung an den drei	
26 Dreiphasiger Dauerkurzschlußversuch	9	Wicklungssträngen	20
27 Ermittlung von Kenngrößen aus dem Leerlauf-		54 Dauerkurzschlußversuch mit zwei	
und Dauerkurzschlußversuch	9	untereinander und mit dem Sternpunkt	
28 Übererregungsversuch beim Leistungsfaktor		kurzgeschlossenen Wicklungssträngen	20
Null	10	55 Bestimmung von Kenngrößen aus dem	
29 Bestimmung des Erregerstromes für Anker-		Dauerkurzschlußversuch mit zwei	
Nennspannung und -Nennstrom beim		untereinander und mit dem Sternpunkt	
Leistungsfaktor Null (übererregt)	10	kurzgeschlossenen Wicklungssträngen	20
30 Bestimmung der Potier-Reaktanz aus der		56 Bestimmung des Gleichstrom-Widerstandes	
Leerlaufkennlinie, der Kurzschlußkennlinie		durch Spannungs- und Strommessung	
und dem Erregerstrom für Nennspannung		und durch Brückenmessung	21
und Nennstrom bei Leistungsfaktor Null		57 Bestimmung des Gleichstrom-Widerstandes	
(übererregt)	10	der Wicklungen aus der Messung mit	
31 Bestimmung des Nennerergerstromes aus dem		Spannungs- und Strommesser sowie mit dem	
Potier-Diagramm	11	Brückenverfahren	21
		58 Feldstrom-Abklingversuch bei offener	
		Ankerwicklung	22

59	Bestimmung von τ'_{d0} aus dem Feldstrom-Abklingversuch	22	66	Auslaufversuch im Leerlauf	23
60	Feldstrom-Abklingversuch mit kurzgeschlossener Ankerwicklung	22	67	Bestimmung von τ_j und H aus dem Auslaufversuch im Leerlauf	23
61	Bestimmung von τ'_d aus dem Feldstrom-Abklingversuch bei kurzgeschlossener Ankerwicklung	22	68	Auslaufversuch im Motorbetrieb unter Last	23
62	Schwingungsversuch mit aufgehängtem Läufer	22	69	Bestimmung von τ_j und H aus dem Auslaufversuch im Motorbetrieb unter Last	23
63	Bestimmung von τ_j und H aus dem Schwingungsversuch mit aufgehängtem Läufer	22	70	Drehzahlanstieg nach Lastabwurf im Generatorbetrieb	23
64	Versuch mit Hilfsspendel	22	71	Bestimmung von τ_j und H aus dem Lastabwurf im Generatorbetrieb	23
65	Bestimmung von τ_j und H aus dem Versuch mit Hilfsspendel	23	72	Rechnerische Bestimmung von Kenngrößen anhand von gemessenen Kenngrößen	24
				Tabelle 1	25

Vorwort

- (1) Die offiziellen Beschlüsse oder Vereinbarungen der IEC über technische Fragen, die in Technischen Komitees von Vertretern aller an dem behandelten Thema besonders interessierten nationalen Komitees erarbeitet werden, bringen das höchstmögliche Maß internationaler Übereinstimmung für das behandelte Sachgebiet zum Ausdruck.
- (2) Sie stellen Empfehlungen zur internationalen Anwendung dar und sind als solche von den nationalen Komitees angenommen.
- (3) Um die internationale Vereinheitlichung zu fördern, wünscht die IEC, daß alle nationalen Komitees den Text der IEC-Empfehlungen soweit in ihre nationalen Regeln übernehmen, wie es die Gegebenheiten im jeweiligen Land gestatten. Jede Abweichung zwischen der IEC-Empfehlung und der entsprechenden nationalen Regel sollte in dieser, soweit möglich, deutlich gekennzeichnet werden.

Einleitung

Diese Norm wurde vom Unterkomitee 2G „Prüfmethoden und -verfahren“ des Technischen Komitees 2 „Umlaufende Maschinen“ der IEC erstellt.

Diese zweite Ausgabe ersetzt die erste Ausgabe von IEC 34-4 (1967) – unter Einbeziehung der Änderung Nr 1 (1973) – und die erste Ausgabe von IEC 34-4A (1972), erste Ergänzung.

Diese Norm bildet den Teil 4 einer Reihe von Publikationen, in denen umlaufende elektrische Maschinen behandelt werden; bei den anderen Teilen handelt es sich um:

- Teil 1: Rating and Performance, herausgegeben als IEC 34-1 (1983)
- Teil 2: Methods for Determining Losses and Efficiency of Rotating Electrical Machinery from Tests (excluding Machines for Traction Vehicles), herausgegeben als IEC 34-2 (1972)
- Teil 3: Ratings and Characteristics of Three-phase, 50 Hz Turbine-type Machines, herausgegeben als IEC 34-3 (1968)
- Teil 5: Classification of Degrees of Protection provided by Enclosures for Rotating Machines, herausgegeben als IEC 34-5 (1981)
- Teil 6: Methods of Cooling Rotating Machinery, herausgegeben als IEC 34-6 (1969)
- Teil 7: Symbols for Types of Construction and Mounting Arrangements of Rotating Electrical Machinery, herausgegeben als IEC 34-7 (1972)
- Teil 8: Terminal Markings and Direction of Rotation of Rotating Machines, herausgegeben als IEC 34-8 (1972)
- Teil 9: Noise Limits, herausgegeben als IEC 34-9 (1972)
- Teil 10: Conventions for Description of Synchronous Machines, herausgegeben als IEC 34-10 (1975)
- Teil 11: Built-in Thermal Protection, Chapter 1: Rules for Protection of Rotating Electrical Machines, herausgegeben als IEC 34-11 (1978)
- Teil 12: Starting Performance of Single-speed Three-phase Cage Induction Motors for Voltages up to and Including 660 V, herausgegeben als IEC 34-12 (1980)
- Teil 13: Specification for Mill Auxiliary Motors, herausgegeben als IEC 34-13 (1980)
- Teil 14: Mechanical Vibration of Certain Machines with Shaft Heights 56 mm and Higher, Measurement, Evaluation and Limits of the Vibration Severity, herausgegeben als IEC 34-14 (1982)

Der Text dieser Norm beruht auf folgenden Schriftstücken:

Sechsmonatsregel	Abstimmungsbericht
2G(CO)4	2G(CO)6
2G(CO)8	2G(CO)12
2G(CO)18	2G(CO)19

Weitere Angaben können den in der obigen Tabelle angegebenen Abstimmungsberichten entnommen werden.

Die folgende IEC-Publikation ist in dieser Norm zitiert:

IEC 51 (–): Direkt wirkende elektrische Meßgeräte mit analoger Anzeige und ihr Zubehör

Hauptabschnitt eins — Anwendungsbereich und Zweck

1 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für dreiphasige Synchronmaschinen mit einer Scheinleistung von 1 kVA und größer und Nennfrequenzen nicht über 400 Hz und nicht unter 15 Hz.

Die angegebenen Prüfverfahren gelten nicht für Sonderausführungen von Synchronmaschinen, wie z.B. Maschinen mit Permanentmagnet-Erregung, Induktormaschinen usw.

Die Versuche gelten im allgemeinen auch für bürstenlose Maschinen, jedoch bestehen hier gewisse Abweichungen, und es sind besondere Vorsorgemaßnahmen zu treffen.

2 Zweck

Zweck dieser Norm ist es, Verfahren zusammenzustellen zur Bestimmung von Kenngrößen von dreiphasigen Synchronmaschinen anhand von Versuchen.

Diese Norm bedeutet nicht, daß einige oder alle beschriebenen Versuche an einer bestimmten Maschine durchzuführen sind, vielmehr sind die jeweils durchzuführenden Versuche zwischen Hersteller und Betreiber besonders zu vereinbaren.

Hauptabschnitt zwei – Allgemeines

3 Allgemeines

Versuche zur Bestimmung von Kenngrößen von Synchronmaschinen sollen an vollständig intakten Maschinen und bei abgeschalteten automatischen Regeleinrichtungen durchgeführt werden.

Alle Versuche werden bei Nenndrehzahl durchgeführt, falls nicht ausdrücklich anders vermerkt.

3.1 Anzeigende Meßgeräte und deren Zubehör, wie z.B. Meßtransformatoren, Nebenwiderstände und Meßbrücken, welche während des Versuches benutzt werden, sollen eine Genauigkeit haben, die mindestens der Klasse 1,0 entspricht, falls nicht ausdrücklich anders vermerkt (vergleiche dazu IEC 51: Direkt wirkende elektrische Meßgeräte mit analoger Anzeige und ihr Zubehör). Die Geräte zur Bestimmung von Gleichstromwiderständen sollen eine Genauigkeit haben, welche mindestens der Klasse 0,5 entspricht. Es ist nicht der Zweck dieser Norm, Genauigkeitsklassen für die verwendeten Oszillographen und ihr Zubehör anzugeben. Die genannten Geräte sollten jedoch so gewählt werden, daß sich über den gesamten benötigten Frequenzbereich lineares Amplitudenverhalten ergibt.

Die Drehzahl von Synchronmaschinen kann entweder stroboskopisch oder mit mechanischen oder elektrischen Tachometern gemessen werden.

Es ist zulässig, anstelle der Drehzahl die Frequenz zu messen mit Hilfe eines Frequenzmessers, wobei die Maschine allein oder mit beliebigen anderen Synchronmaschinen parallel laufen kann.

3.2 Wenn die zu bestimmenden Kenngrößen temperaturabhängig sind oder wenn es die Sicherheit der Maschine erfordert, muß die Wicklungstemperatur gemessen werden.

Falls die Gefahr besteht, daß der zeitliche Temperaturverlauf vorübergehend die Sicherheit der Maschine gefährdet, wird empfohlen, die Versuche nur nach dem Leerlaufbetrieb mit normaler Kühlung durchzuführen oder nach einer Stillstandszeit, welche lang genug sein muß, um ge-

nügend niedrige Anfangstemperaturen zu gewährleisten. Ferner sollen in derartigen Fällen die Temperaturen sorgfältig überwacht oder vorausbestimmt werden, so daß der Versuch abgebrochen werden kann, bevor die Temperaturen gefährliche Werte erreichen.

3.3 In der Regel sollen während des Versuches die Wicklungsverbindungen in betriebsmäßigem Zustand sein.

Die Bestimmung sämtlicher Kenngrößen gilt für Sternschaltung der Ankerwicklung, mit Ausnahme derjenigen Fälle, in denen besondere Schaltungen, z.B. offene Dreieckschaltung, angewendet werden müssen. Falls die Ankerwicklung betriebsmäßig in Dreieck geschaltet ist, gelten die nach der hier vorliegenden Norm ermittelten Werte der Kenngrößen für eine äquivalente Sternschaltung.

3.4 Alle Kenngrößen und Kennlinien sollen in per-unit(p.u.)-Werten angegeben werden, wobei als Bezugswerte die Nennspannung U_N und die Nennscheinleistung S_N gelten. Für diesen Fall lautet die Beziehung für den Nennstrom:

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

und für die Nennimpedanz:

$$Z_N = \frac{U_N^2}{S_N} = \left[\frac{S_N}{3 I_N^2} \right]$$

Falls es bequem ist, können Zwischenrechnungen in physikalischen Größen (Absolutwerten) durchgeführt werden mit anschließender Umrechnung in die per-unit-Werte (Relativwerte). Es wird empfohlen, die Zeit in s auszudrücken. Bei der Berechnung von Kennlinien und beim Zeichnen von Schaubildern wird als Bezugswert des Erregerstromes derjenige Erregerstrom gewählt, welcher sich auf der Leerlauf-Kennlinie bei Nennspannung ergibt.

Falls eine Maschine mehrere verschiedene Nenn-Betriebsarten hat, sollte eine davon in geeigneter Weise als grundlegend gewählt werden.

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.

3.5 In den Formeln zur Bestimmung von Reaktanzen der Synchronmaschine, welche in dieser Norm verwendet werden, wird der Wirkwiderstand des Mitsystems der Ankerwicklung vernachlässigt, falls nicht ausdrücklich anders vermerkt.

Falls der Wirkwiderstand des Mitsystems der Ankerwicklung mehr als das 0,2fache der gemessenen Reaktanz ausmacht, müssen die betreffenden Formeln als Näherungen angesehen werden.

3.6 Die Definitionen der meisten Kenngrößen und die Versuche 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, welche 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 transients Vorgänge berücksichtigt, darüber hinaus die Kurzschluß-Zeitkonstante der Ankerwicklung.

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 welcher die betreffende Größe auf den Anteil $1/\varepsilon = 0,368$ ihres Anfangswertes abgeklungen ist. Exponentiell abklingende Kurven mit dieser Zeitkonstante sollten als Ersatzfunktionen für die tatsächlich gemessenen Verläufe angesehen werden.

3.7 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“ von Reaktanzen und Widerständen der Messung bei Nenn-Strangspannung, während die zugehörigen „ungesättigten Werte“ der Messung bei Nenn-Strangstrom entsprechen. Eine Ausnahme bildet die Synchronreaktanzen, welche nicht als gesättigt definiert ist.

Der Nennspannungswert einer Kenngröße entspricht den magnetischen Verhältnissen der Maschine bei einem Stoßkurzschluß der Ankerwicklung bei Nennspannung im Leerlauf, wobei die Maschine mit Nenndrehzahl läuft.

Der Nennstromwert einer Kenngröße entspricht demjenigen Zustand der Maschine, bei dem die Grundschiwingung des Strangstromes, welcher die betreffende Kenngröße bestimmt, gleich dem Nennstrom ist.

Hauptabschnitt drei – Begriffe und Verfahren zur Bestimmung der Kenngrößen

4 Synchron-Längsreaktanzen (kurz Synchronreaktanzen) X_d

X_d ist der Quotient aus dem eingeschwungenen Wert derjenigen Grundschiwingungskomponente der Strangspannung, welche durch den gesamten Ankerfluß der Längsachse infolge des Anker-Längsstromes erzeugt wird (Querspannung), und dem Grundschiwingungswert dieses Stromes (Längsstromes) bei Nenndrehzahl.

4.1 Die ungesättigte Synchron-Längsreaktanzen X_d wird aus der Leerlaufkennlinie (siehe Abschnitt 25.1) und der Kurzschlußkennlinie (siehe Abschnitt 26.1) bestimmt (siehe Abschnitt 27).

5 Leerlauf-Kurzschluß-Verhältnis K_c

K_c ist das Verhältnis des Leerlauf-Erregerstromes bei Nennspannung zum Erregerstrom für den symmetrischen Kurzschluß-Nennstrom.

Beide Werte gelten für Nenndrehzahl.

5.1 Das Leerlauf-Kurzschluß-Verhältnis wird aus der Leerlauf-Kennlinie (siehe Abschnitt 25.1) und der Kurzschlußkennlinie (siehe Abschnitt 26.1) bestimmt (siehe Abschnitt 27.1).

6 Synchron-Querreaktanzen (kurz Querreaktanzen) X_q

X_q ist der Quotient aus dem eingeschwungenen Wert derjenigen Grundschiwingungskomponente der Strangspannung, welche durch den gesamten Ankerfluß in der Querachse infolge des Anker-Querstromes erzeugt wird (Längsspannung), und dem Grundschiwingungswert dieses Stromes (Querstromes) bei Nenndrehzahl.

6.1 Die Synchron-Querreaktanzen wird durch folgende Verfahren ermittelt:

- Gegenrerregung (siehe Abschnitte 34 und 35);
- Schlupfversuch (siehe Abschnitte 36 und 37);
- Messung des Lastwinkels der belasteten Maschine (siehe Abschnitte 38 und 39).

Die zuerst genannten beiden Verfahren werden bevorzugt.

7 Transient-Längsreaktanzen X'_d

X'_d ist der Quotient aus dem Anfangswert einer plötzlichen Änderung derjenigen Grundschiwingungskomponente der Strangspannung, welche durch den gesamten Ankerfluß in der Längsachse erzeugt wird (Querspannung), und dem Wert der gleichzeitigen Änderung des Anker-Längsstromes bei Nenndrehzahl. Dabei werden die rasch abklingenden Anteile während der ersten Perioden nicht berücksichtigt.

7.1 Die Transient-Längsreaktanzen wird durch folgende Verfahren ermittelt:

- dreiphasiger Stoßkurzschluß (siehe Abschnitte 40 und 41);
- wiederkehrende Spannung (siehe Abschnitte 42 und 43);
- rechnerische Bestimmung aus den Prüfwerten von X_d (siehe Abschnitt 4), τ'_{do} (siehe Abschnitt 17) und τ'_d (siehe Abschnitt 18) anhand der Formel des Abschnittes 72.

Der dreiphasige Stoßkurzschluß wird bevorzugt. Er gestattet die Ermittlung der gesättigten und ungesättigten Werte von X'_d .

8 Subtransient-Längsreaktanzen (Anfangsreaktanzen, kurz Subtransient-Reaktanzen) X''_d

X''_d ist der Quotient aus dem Anfangswert einer plötzlichen Änderung derjenigen Grundschiwingungskomponente der Strangspannung, welche durch den gesamten Ankerfluß der Längsachse erzeugt wird (Querspannung), und dem Wert der gleichzeitigen Änderung der Grundschiwingungskomponente des Anker-Längsstromes bei Nenndrehzahl.

8.1 Die Subtransient-Längsreaktanzen wird durch folgende Verfahren ermittelt:

- dreisträngiger Stoßkurzschluß (siehe Abschnitte 40 und 41.1);
- wiederkehrende Spannung (siehe Abschnitte 42 und 43.1);
- Anlegen einer Spannung bei Längs- und Querstellung des Läufers relativ zur Achse des Ankerfeldes (siehe Abschnitte 44 und 45);

- d) Anlegen einer Spannung bei beliebiger Lage der Polachse (siehe Abschnitte 46 und 47).

Der dreiphasige Stoßkurzschluß wird bevorzugt. Er ermöglicht die Bestimmung des gesättigten und ungesättigten Wertes von X''_d .

Die Verfahren mit angelegter Spannung (c und d) können zur Bestimmung des ungesättigten Wertes von X''_d verwendet werden. Für die Bestimmung des gesättigten Wertes sind sie im allgemeinen nicht zweckmäßig wegen des benötigten hohen Stromes und der Gefahr der Überhitzung massiver Teile.

9 Subtransient-Querreaktanz X''_q

X''_q ist der Quotient aus dem Anfangswert einer plötzlichen Änderung der Grundswingungskomponente derjenigen Strangspannung, welche durch den gesamten Ankerfluß der Querachse induziert wird (Längsspannung), und dem Wert der gleichzeitigen Änderung der Grundswingungskomponente des Anker-Querstromes bei Nenndrehzahl.

9.1 Die Subtransient-Querreaktanz wird durch folgende Verfahren ermittelt:

- Anlegen einer Spannung bei Längs- und Querstellung des Läufers relativ zur Achse der Ankerwicklung (siehe Abschnitte 44 und 45.1);
- Anlegen einer Spannung bei beliebiger Stellung der Polachse (siehe Abschnitte 46 und 47.1).

Diese beiden Verfahren sind praktisch gleichwertig und können zur Bestimmung des ungesättigten Wertes benutzt werden. Sie sind im allgemeinen nicht zweckmäßig für die Bestimmung des gesättigten Wertes wegen der benötigten hohen Ströme und möglicher Überhitzung von Massivteilen.

10 Invers-Reaktanz X_2

X_2 ist der Quotient aus der Grundswingungs-Blindkomponente einer inversen Ankerspannung infolge eines sinusförmigen inversen Ankerstromes mit Nennfrequenz und dem Wert dieses Stromes bei Nenndrehzahl.

Anmerkung: Man erhält möglicherweise einen vom obigen abweichenden Wert für X_2 , wenn man von der Grundswingungskomponente eines Inversstromes ausgeht, welcher Oberschwingungen enthält. Jedoch gilt als richtiger Wert von X_2 derjenige, welcher mit sinusförmigem Gegenstrom ermittelt wird.

11 Invers-Widerstand R_2

R_2 ist der Quotient aus dem Wirkanteil der Grundswingungskomponente der inversen Ankerspannung bei sinusförmigem inversem Ankerstrom mit Nennfrequenz und dem Wert dieses Stromes bei Nenndrehzahl.

Anmerkung: Der Wert von R_2 kann vom oben definierten abweichen, falls die Grundswingung eines ober-schwingungshaltigen Inversstromes benutzt wird.

11.1 Die Invers-Reaktanz und der Invers-Widerstand werden durch folgende Verfahren ermittelt:

- einphasig-zweisträngiger Dauerkurzschluß (siehe Abschnitte 48, 49 und 49.1);
- gegenläufiges Drehfeld (siehe Abschnitte 50 und 51);
- Die Invers-Reaktanz kann auch rechnerisch bestimmt werden anhand der Meßwerte von X''_d (siehe Abschnitt 8) und X''_q (siehe Abschnitt 9); die Berechnung wird mit der Formel des Abschnittes 72.1 durchgeführt.

Der zweisträngige Dauerkurzschluß wird bevorzugt.

12 Nullreaktanz X_0

X_0 ist der Quotient der Grundswingungs-Blindkomponente einer Nullspannung in der Ankerwicklung infolge einer entsprechenden Grundswingung eines Nullstromes mit Nennfrequenz und dieser Komponente des Stromes bei Nenndrehzahl.

13 Nullwiderstand R_0

R_0 ist der Quotient aus der Grundswingungs-Wirkkomponente einer Nullspannung in der Ankerwicklung infolge der Grundswingung eines Nullstromes mit Nennfrequenz und dieser Komponente des Stromes bei Nenndrehzahl.

13.1 Nullreaktanz und Nullwiderstand werden durch folgende Verfahren ermittelt:

- Anlegen einer einphasigen Spannung an die drei in Reihe (offene Dreieckschaltung) oder parallelgeschalteten Wicklungsstränge (siehe Abschnitte 52 und 53);
- zweisträngiger und einsträngiger Dauerkurzschluß (siehe Abschnitte 54, 55 und 55.1).

Das Verfahren mit Einphasen-Wechselspannung an den drei in Reihe geschalteten Wicklungssträngen wird bevorzugt.

14 Potier-Reaktanz X_p

X_p ist eine äquivalente Reaktanz, die zur Berechnung des Lastergerstromes nach dem Potier-Verfahren anstelle der Anker-Streureaktanz eingesetzt wird. Hierdurch wird der zusätzliche Streufluß der Feldwicklung bei Last und im Gebiet der Übererregung berücksichtigt. X_p ist größer als die eigentliche Anker-Streureaktanz.

14.1 Die Potier-Reaktanz wird ermittelt nach Abschnitt 30.

15 Gleichstromwiderstände R_a und R_f der Ankerwicklung und der Erregerwicklung

Der Gleichstromwiderstand wird nach dem folgenden Verfahren ermittelt:

- Spannungs- und Strommessung (siehe Abschnitte 56 und 57);
- Einfach-Meßbrücke und Doppel-Meßbrücke (siehe Abschnitte 56 und 57.1).

Die Messung mit der Einfach-Meßbrücke ist für Widerstände unter 1Ω nicht zulässig.

16 Synchron-Widerstand R_1

R_1 ist der Quotient aus dem Wirkanteil der Ankerspannung des Mitsystems aufgrund der ohmschen Verluste und der Zusatzverluste, welche durch die Grundswingungskomponente des mitläufigen Ankerstromes erzeugt werden, und dieser Stromkomponente bei Nenndrehzahl.

16.1 Der Synchron-Widerstand wird ermittelt nach Abschnitt 72.2.

17 Transient-Leerlaufzeitkonstante (der Längsachse) τ'_{do}

τ'_{do} ist diejenige Zeit, welche die durch den Längsfluß erregte, langsam veränderliche Komponente der Ankerspannung (Querspannung) benötigt, um bei einer plötzlichen Änderung der Betriebsbedingungen auf den Anteil $1/\varepsilon \approx 0,368$ ihres Anfangswertes abzuklingen, während die Maschine mit Nenndrehzahl läuft.

17.1 Die Transient-Leerlaufzeitkonstante wird durch folgende Verfahren ermittelt:

- a) Abklingen des Feldstromes bei leerlaufender Ankerwicklung (siehe Abschnitte 58 und 59);
- b) wiederkehrende Spannung (siehe Abschnitte 42 und 43.2);
- c) rechnerisch anhand der gemessenen Werte von X_d (siehe Abschnitt 4), X'_d (siehe Abschnitt 7) und τ'_d (siehe Abschnitt 18) anhand der Formel aus Abschnitt 72.

Das Verfahren mit abklingendem Feldstrom wird bevorzugt.

18 Transient-Kurzschlußzeitkonstante (der Längsachse) τ'_d

τ'_d ist diejenige Zeit, welche die langsam veränderliche Komponente des Kurzschluß-Ankerstromes in der Längsachse benötigt, um nach einer plötzlichen Änderung der Betriebsbedingungen auf den Anteil $1/e \approx 0,368$ ihres Anfangswertes abzuklingen, während die Maschine mit Nenndrehzahl läuft.

18.1 Die Transient-Kurzschlußzeitkonstante wird durch folgende Verfahren ermittelt:

- a) dreiphasiger Stoßkurzschluß (siehe Abschnitte 40 und 41.2);
- b) Abklingen des Feldstromes bei kurzgeschlossener Ankerwicklung (siehe Abschnitte 60 und 61);
- c) Berechnung anhand der Meßwerte von X_d (siehe Abschnitt 4), X'_d (siehe Abschnitt 7) und τ'_{do} (siehe Abschnitt 17) mit Hilfe der Formel aus Abschnitt 72.

Wenn ein Stoßkurzschlußversuch durchgeführt wird für die Bestimmung von X'_d , dann sollte τ'_d aus dem gleichen Versuch ermittelt werden. In allen anderen Fällen wird die Methode des abklingenden Feldstromes bei kurzgeschlossener Ankerwicklung bevorzugt.

19 Subtransient-Kurzschlußzeitkonstante (der Längsachse) τ''_d

τ''_d ist diejenige Zeit, welche die während der ersten Perioden rasch abklingende Komponente des Anker-Kurzschlußstromes der Längsachse benötigt, um bei einer plötzlichen Änderung der Betriebsbedingungen auf den Anteil $1/e \approx 0,368$ ihres Anfangswertes abzuklingen, wobei die Maschine mit Nenndrehzahl läuft.

19.1 Die Subtransient-Kurzschlußzeitkonstante der Längsachse wird ermittelt durch den dreiphasigen Stoßkurzschlußversuch (siehe Abschnitte 40 und 41.3).

20 Anker-Kurzschlußzeitkonstante τ_a (Gleichstrom-Zeitkonstante)

τ_a ist diejenige Zeit, welche die aperiodische Gleichstromkomponente des Anker-Kurzschlußstromes benötigt, um bei einer plötzlichen Änderung der Betriebsbedingungen auf den Anteil $1/e \approx 0,368$ ihres Anfangswertes abzuklingen, wobei die Maschine mit Nenndrehzahl läuft.

20.1 Die Anker-Kurzschlußzeitkonstante wird anhand des dreiphasigen Stoßkurzschlußversuches durch folgende Verfahren ermittelt:

- a) Abklingen des Wechselanteils des Erregerstromes (siehe Abschnitte 40 und 41.4);

- b) Abklingen des aperiodischen (Gleich-)Anteiles im Ankerstrom (siehe Abschnitte 40 und 41.5);
- c) rechnerische Bestimmung aus den gemessenen Werten von X_2 (siehe Abschnitt 10) und R_a (siehe Abschnitt 15) mit Hilfe der Formel des Abschnittes 72.3.

Das Verfahren des abklingenden Wechselanteils des Erregerstromes wird bevorzugt.

21 Nenn-Anlaufzeit τ_J

τ_J ist diejenige Zeit, welche benötigt wird, um den Läufer der Synchronmaschine vom Stillstand auf Nenndrehzahl zu bringen, wobei das Beschleunigungsmoment konstant und gleich dem Quotienten aus der Nenn-Wirkleistung und der Nenn-Winkelgeschwindigkeit ist.

Anmerkung 1: Bei Blindleistungsmaschinen wird die Nenn-Wirkleistung durch die Nenn-Scheinleistung ersetzt.

Anmerkung 2: Wenn die Nenn-Anlaufzeit für eine Gruppe von gekuppelten Maschinen bestimmt wird, so werden für das Beschleunigungsmoment die Nenn-Wirkleistung und die Nenn-Winkelgeschwindigkeit der Synchron-Hauptmaschine zugrunde gelegt.

22 Trägheitskonstante H

H ist der Quotient aus der bei Nenndrehzahl im Läufer gespeicherten kinetischen Energie und der Nenn-Scheinleistung.

22.1 Die Nenn-Anlaufzeit und die Trägheitskonstante einer Maschine oder einer Maschinengruppe werden durch folgende Verfahren ermittelt:

- a) Schwingungen des aufgehängten Läufers (siehe Abschnitte 62 und 63);
- b) Ausschlag eines Hilfspendels (siehe Abschnitte 64 und 65);
- c) Auslauf aus dem Leerlauf (siehe Abschnitte 66 und 67);
- d) Auslauf bei Last und Motorbetrieb der Maschine (siehe Abschnitte 68 und 69);
- e) Beschleunigung nach plötzlicher Entlastung im Generatorbetrieb (siehe Abschnitte 70 und 71).

Alle obengenannten Verfahren sind praktisch gleichwertig. Die Anwendung des einen oder anderen Verfahrens hängt vom Entwurf und von der Scheinleistung der betreffenden Maschine ab.

23 Nenn-Erregerstrom I_{fN}

I_{fN} ist der Strom in der Erregerwicklung (Feldwicklung) beim Betrieb der Maschine mit ihren Nennwerten für Spannung, Strom, Leistungsfaktor und Drehzahl.

23.1 Der Nenn-Erregerstrom wird durch folgende Verfahren ermittelt:

- a) direkte Messung unter Nenn-Betriebsbedingungen;
- b) zeichnerisch anhand des Potier-Diagramms (siehe Abschnitt 31), des ASA-Diagramms (siehe Abschnitt 32) oder des Schweden-Diagramms (siehe Abschnitt 33).

Die direkte Messung wird bevorzugt, jedoch gelten die zeichnerischen Methoden als gleichwertig.

24 Nenn-Spannungsänderung ΔU_N

ΔU_N ist die Änderung der Klemmenspannung beim Übergang vom Nennbetrieb auf Leerlaufbetrieb bei gleichbleibender Drehzahl und gleichbleibendem Erregerstrom.

Die Nenn-Spannungsänderung wird durch folgende Verfahren ermittelt:

- direkte Messung;
- zeichnerisch anhand der gemessenen Leerlaufkennlinie (siehe Abschnitt 25.1) und des gemessenen Nenn-Erregerstromes (siehe Abschnitte 23 und 23.1).

Hauptabschnitt vier – Beschreibung der Versuche und Bestimmung der Maschinen-Kenngrößen aus den Versuchsergebnissen

25 Leerlaufversuch

Der Leerlaufversuch wird durchgeführt:

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

Während des Leerlaufversuchs sollen der Erregerstrom, die Klemmenspannung und die Frequenz (oder Drehzahl) gleichzeitig gemessen werden. Dabei soll die Erregung derart verändert werden, daß sich die Klemmenspannung von höheren Werten zu niedrigeren Werten in etwa gleichen Stufen einstellt. Wenn möglich, beginnt man mit derjenigen Spannung, welche dem Nennererregerstrom entspricht, jedoch nicht unter dem 1,3fachen der Nennspannung, und beendet den Versuch beim 0,2fachen der Nennspannung, falls die Remanenzspannung nicht höher ist.

Wenn der Erregerstrom auf den Wert Null abgenommen hat, wird die Remanenzspannung der Maschine gemessen.

Falls der Leerlaufversuch im Motorbetrieb nach b) durchgeführt wird, ist es notwendig, zusätzlich zu den obenerwähnten Größen den Ankerstrom zu messen. Bei jeder Spannungsstufe sollte der Mindestwert des Ankerstromes abgelesen werden. Dieser entspricht dem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$.

Der Leerlaufversuch kann in Form des Auslaufversuchs mit hinreichender Genauigkeit durchgeführt werden, falls die Auslaufverzögerung je Sekunde nicht mehr als das 0,04fache der Nenndrehzahl beträgt.

Falls die Auslaufverzögerung je Sekunde größer ist als das 0,02fache der Nenndrehzahl, muß eine Erregung von einer Fremdspannungsquelle vorgesehen werden, um genügend stabile Erregung während des Versuchs sicherzustellen. Vor dem Abschalten der speisenden Spannung wird die Maschine auf den höchsten benötigten Wert ihrer Spannung erregt, jedoch mindestens auf das 1,3fache der Nennspannung. 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.

25.1 Die Leerlaufkennlinie stellt den Verlauf der Klemmenspannung an der offenen Ankerwicklung in Abhängigkeit vom Erregerstrom bei Nenndrehzahl (Frequenz) dar. Die entsprechende Kurve wird aufgetragen anhand der Meßwerte des Leerlaufversuchs. Falls bei hoher Rema-

nanzspannung die Leerlaufkennlinie die Ordinatenachse oberhalb des Nullpunktes schneidet, wird eine Korrektur durchgeführt. Dabei wird der geradlinige Teil der Leerlaufkennlinie (die sogenannte Luftspaltkennlinie) verlängert bis zum Schnitt mit der (negativen) Abszissenachse. Der Abszissenabstand dieses Schnittpunktes vom Nullpunkt gibt denjenigen Korrekturwert an, welcher zu allen gemessenen Werten des Erregerstromes zu addieren ist (siehe Bild 1). Bei Frequenzschwankungen während der Messung sollen alle gemessenen Spannungswerte auf die Nennfrequenz umgerechnet werden.

26 Dreiphasiger Dauerkurzschlußversuch

Der dreiphasige Dauerkurzschlußversuch wird wie folgt durchgeführt:

- Antreiben der zu prüfenden Maschine als Generator;
- Auslaufversuch.

Der Kurzschluß soll so nah wie möglich an den Maschinenklemmen hergestellt werden. Der Erregerstrom wird eingeschaltet nach Schließen der Kurzschlußverbindungen.

Während des dreiphasigen Dauerkurzschlußversuchs sollen der Erregerstrom und der Ankerstrom gleichzeitig gemessen werden. Einer der Meßpunkte soll in der Nähe des Anker-Nennstromes liegen. Die Drehzahl (oder Frequenz) kann vom Nennwert abweichen, soll jedoch nicht weniger als das 0,2fache des Nennwertes betragen.

Der dreiphasige Dauerkurzschlußversuch während des Auslaufens der Maschine kann mit hinreichender Genauigkeit durchgeführt werden, falls die Verzögerung je Sekunde nicht größer als das 0,10fache der Nenndrehzahl beträgt. Falls die zu prüfende Maschine eine Auslaufverzögerung hat, die größer als das 0,04fache der Nenndrehzahl je s beträgt, wird zur Gewährleistung hinreichender Stabilität eine Fremd-Erregerstromquelle benötigt.

26.1 Anhand der Meßwerte des dreiphasigen Dauerkurzschlußversuchs wird die Kurzschlußkennlinie aufgetragen. Sie stellt den Zusammenhang zwischen dem Anker-Kurzschlußstrom und dem Erregerstrom dar.

27 Ermittlung von Kenngrößen aus dem Leerlauf- und Dauerkurzschlußversuch

Die Synchron-Reaktanz der Längsachse (siehe Abschnitte 4 und 4.1) wird aus dem Leerlaufversuch und dem Dauerkurzschlußversuch ermittelt als Quotient aus der Leerlaufspannung der Luftspaltkennlinie bei einem geeigneten gewählten Erregerstrom und einem Dauerkurzschlußstrom aus der Kurzschlußkennlinie bei dem gleichen Erregerstrom (Bild 1):

$$X_d = \frac{U_N}{\sqrt{3} I_{BC}} \left[x_d = \frac{AC}{BC} = \frac{OH}{OC} = \frac{i_{fk}}{i_{fg}} \right]$$

Der so gewonnene Wert von X_d entspricht dem ungesättigten Zustand der Maschine.

27.1 Das Leerlauf-Kurzschlußverhältnis K_C (siehe Abschnitte 5 und 5.1) wird aus der Leerlauf- und Kurzschlußkennlinie bestimmt. Dabei ist K_C der Quotient aus dem Erregerstrom bei Nennspannung auf der Leerlaufkennlinie und dem Erregerstrom für den Anker-Nennstrom auf der Kurzschlußkennlinie (siehe Bild 1):

$$K_C = \frac{OD}{OH} = \frac{i_{fo}}{i_{fk}}$$