

K. Bonfert

Betriebsverhalten der Synchronmaschine

**Verhalten im Normalbetrieb
und bei Störungen:**

**Näherungen für die Praxis
Zweiachsentheorie**

**Springer-Verlag
Berlin Heidelberg GmbH**

Betriebsverhalten der Synchronmaschine

Bedeutung der Kenngrößen für Planung und
Betrieb elektrischer Anlagen und Antriebe

Von

Dipl.-Ing. K. Bonfert

Berlin

Mit 109 Abbildungen



Springer-Verlag Berlin
Heidelberg GmbH 1962

ISBN 978-3-662-11246-5 ISBN 978-3-662-11245-8 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-11245-8

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten
Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet,
dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege
(Photokopie, Mikrokopie) oder auf andere Art zu vervielfältigen

© by Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1962

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag OHG., Berlin/Göttingen/Heidelberg 1962.

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1962

Library of Congress Catalog Card Number: 62—16300

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw.
in diesem Buche berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der An-
nahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetz-
gebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften

Vorwort

Die anschauliche Darstellung und eingehende Begründung des Betriebsverhaltens der Synchronmaschine im Normalbetrieb und bei Störungen ist der Zweck des vorliegenden Buches. Es richtet sich in erster Linie an den mit der Planung, mit dem Bau und mit dem Betrieb elektrischer Anlagen und Antriebe beauftragten Ingenieur, ist also auf die Praxis abgestimmt. Durch den Anhang, der auch als Teil 2 bezeichnet werden könnte und der mehr theoretischer Natur ist, erweitert sich der Interessentenkreis auch auf Leser, die an einer exakteren Herleitung der Zusammenhänge interessiert sind.

Im *Hauptteil* wird das Betriebsverhalten der Synchronmaschine mit Hilfe physikalischer Überlegungen anhand des Zeigerdiagramms ohne nennenswerten mathematischen Aufwand bei für große Maschinen zulässigen Vernachlässigungen hergeleitet. Dabei wird für plötzliche Laständerungen zunächst Flußkonstanz angenommen, und erst hinterher werden Überlegungen über das Abklingen der Ausgleichsvorgänge angestellt. Der Hauptteil ist entsprechend der Aufgabenstellung vollkommen auf die Überlegungen abgestimmt, die der Ingenieur bei der Planung von Energieerzeugungsanlagen und elektrischen Antrieben in bezug auf die Festlegung der Eigenschaften der Synchronmaschine anzustellen hat. Er beinhaltet dementsprechend die Darstellung des Verhaltens der Synchronmaschine im stationären und nichtstationären Betrieb, oder nach einem mehr betrieblichen Gesichtspunkt im Normalbetrieb und bei Störungen, und zeigt die Beeinflussungsmöglichkeiten der Betriebseigenschaften durch Änderung der Maschinendaten (Leistung, Leistungsfaktor, Spannung, Drehzahl) und Konstanten (Reaktanzen und Zeitkonstanten). Er gibt dem Planungs- und Betriebsingenieur damit auch die Möglichkeit, Maschinen mit unterschiedlichen Nenndaten und Konstanten bezüglich ihrer Vor- und Nachteile für eine bestimmte Betriebsforderung zu beurteilen und zu vergleichen. Die Konstanten (Reaktanzen und Zeitkonstanten), ihr meßtechnischer Nachweis und ihre zweckmäßige Wahl werden in diesem Zusammenhang eingehend behandelt. Die Herleitung und Begründung des Betriebsverhaltens im Normalbetrieb und bei Störungen aus dem jeweiligen Zeigerdiagramm zeigt dem Ingenieur Wege und Verfahren, um graphisch rasch einen bestimmten Betriebszustand auf seine Zulässigkeit untersuchen bzw. auf seine Folgen hin beurteilen zu können.

Dem Ziel des Buches entsprechend sind die Hauptabschnitte 2, 3, 6, 7 und 8, die sich mit dem Betriebsverhalten befassen, von besonderer Bedeutung und beanspruchen einen breiten Teil des Inhaltes, während die Abschnitte 4 und 5, die auf die Bemessung (Wasserkraftgenerator als Beispiel) und Spannungswahl eingehen, also für den Planungs-

und Betriebsingenieur mehr informativen Charakter haben, etwas kürzer gehalten wurden. Die Hauptabschnitte 9 und 10 schließlich ergänzen die Abhandlung durch Erläuterung des Verbundbetriebes und der Aufgaben der Spannungsregelung.

Praktisch der gesamte Hauptteil und Abschnitt 5 des Anhanges erschienen erstmalig im Jahre 1955 als Planungsunterlage der Technischen Stammabteilung „Energieversorgung“ der Siemens-Schuckertwerke [5]. Die Anregung dazu ging von Herrn Dipl.-Ing. H. WILHELMS, Vorstandsmitglied der Siemens-Schuckertwerke AG, aus. Hierfür möchte ich an dieser Stelle meinen Dank aussprechen.

Der *Anhang*, der, wie schon gesagt, auch als Teil 2 bezeichnet werden könnte, behandelt das Betriebsverhalten der „idealisierten“ Synchronmaschine (vgl. Anhang 2.1) mit Hilfe der Zweiachsentheorie in der PARKSchen Darstellung. Als mathematisches Hilfsmittel zur Lösung der Differentialgleichungen wird die Operatorenrechnung eingesetzt. Nach Herleitung der allgemeinen, das Betriebsverhalten der Synchronmaschine beschreibenden Gleichungen (Spannungsgleichungen und Bewegungsgleichung) werden Kurzschlußfälle, der asynchrone Anlauf und Betrieb und das Pendeln der Synchronmaschine bei pulsierendem Gegenmomentenverlauf behandelt.

Der Anhang soll den mehr an der theoretischen Klärung bestimmter Betriebs- oder Störungsfälle interessierten Lesern, also z. B. auch den Studierenden der technischen Hoch- und Fachschulen, die Möglichkeit geben, etwas tiefer in die Materie einzudringen und auch Wege zur Verfolgung nicht ausgeführter Untersuchungen weisen. Er bildet außerdem die theoretische Grundlage für eine zweckmäßige Darstellung der Synchronmaschine auf dem Analog- und Digitalrechner. Durch Verwendung der Operatorenrechnung wird das Eindringen in die Theorie der Synchronmaschine erleichtert, so daß es bei einigem Interesse für jeden Ingenieur bei verhältnismäßig geringem Zeitaufwand möglich sein müßte, eigene physikalische Vorstellungen und praktische Erfahrungen anhand der Darstellung theoretisch zu untermauern.

In der gesamten Abhandlung werden die inzwischen international eingeführten Bezeichnungen für die Konstanten der Synchronmaschine und das System mit bezogenen Größen (p.u.) verwendet.

Zum Schluß möchte ich nicht versäumen, allen Ingenieuren der Siemens-Schuckertwerke, die mir wertvolle Anregungen und ergänzende Hinweise gaben, zu danken. Besonderer Dank gebührt hier Herrn Dr.-Ing. E. h. J. TITTEL.

Für die Unterstützung beim Anfertigen der Abbildungsvorlagen und beim Lesen der Korrektur danke ich Fräulein E. MAUL, Herrn Dipl.-Ing. K. BURGER und Herrn G. KRIEG.

Dem Verlag danke ich für die gute Ausstattung des Buches und die angenehme Zusammenarbeit während der Drucklegung.

Berlin-Siemensstadt, den 15. Juni 1962

Kurt Bonfert

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Erläuterung zu den Rechengrößen und Formelzeichen	IX
Hauptteil	
1. Das „per-unit-System“ (Das System mit bezogenen, dimensionslosen Größen)	1
2. Elektrisches Verhalten von Synchronmaschinen	6
2.1 Spannungs- und Stromdiagramme der ungesättigten Synchronmaschine	6
2.2 Natürliches Leistungs-Grenzkurven-Diagramm der ungesättigten Maschine	12
2.2.1 Einfluß einer Änderung der Klemmenspannung	21
2.2.2 Einfluß einer Änderung der Netzfrequenz	29
2.2.3 Motorbetrieb der Synchronmaschine	31
2.2.4 Betrieb der Synchronmaschine als reiner Blindleistungserzeuger	31
2.2.5 Berücksichtigung der Sättigung bei der Ermittlung der Leistungsgrenzkurven	32
2.3 Die Synchronmaschine im Alleinbetrieb — Bestimmung der Erregung bei Belastung	35
2.4 Verhalten der Synchronmaschine bei plötzlichen Laständerungen . .	40
2.4.1 Der Kurzschluß der Synchronmaschine	40
2.4.1.1 Der Dauerkurzschluß	40
2.4.1.2 Der dreipolige, symmetrische Stoßkurzschluß	42
2.4.1.2.1 Gleichstromkomponente des Ständerkurzschlußstromes	46
2.4.1.2.2 Wechselstromkomponente	47
2.4.1.2.3 Der Stromverlauf in der Erregerwicklung	50
2.4.1.3 Der unsymmetrische Stoßkurzschluß	54
2.4.1.3.1 Der Ständerstromverlauf	54
2.4.1.3.2 Der Stromverlauf im Feldkreis beim unsymmetrischen Stoßkurzschluß	56
2.4.1.4 Kurzschlußfestigkeit und Kurzschlußbeanspruchung . .	58
2.4.2 Zeigerdiagramm der Synchronmaschine bei plötzlichen Laständerungen	62
2.4.3 Die synchronisierende Leistung	70
3. Konstanten und Reaktanzen der Synchronmaschine	72
3.1 Physikalische Deutung der Reaktanzen und Konstanten.	72
3.1.1 Die Ständerstreureaktanz $x_{d\sigma}$	72
3.1.2 Die Synchronreaktanzen x_d und x_q	73
3.1.3 Die Transientreaktanzen x'_d und x'_q	81

	Seite
3.14 Die Subtransientreaktanzen x_d' und x_q'	82
3.15 Gegen- oder Inversreaktanzen x_2 und Nullreaktanzen x_0	84
3.16 Die Dämpfungskonstante C_D	87
3.17 Die Anlaufzeitkonstante	89
3.2 Die Wahl der Reaktanzen und der Dämpfungskonstante und die Festlegung der Anlaufzeitkonstante, betrachtet am Beispiel der Wasserkraftgeneratoren	92
3.21 Die Wahl der Synchronreaktanzen x_d und x_q	92
3.22 Die Wahl der Transientreaktanzen x_d'	93
3.23 Wahl der Subtransientreaktanzen x_d'' und x_q'' und der Inversreaktanzen x_2	96
3.24 Anforderungen an die Dämpfungskonstante C_D	97
3.25 Die Festlegung der Anlaufzeitkonstante	98
4. Die elektrische Bemessung von Synchronmaschinen, betrachtet am Beispiel der Wasserkraftgeneratoren	102
5. Wahl der Maschinenspannung und Ausführung der Ständerwicklung	111
5.1 Die Stabwicklung	114
5.11 Zweistabwicklungen	114
5.12 Teilparallelgeschaltete Stabwicklungen	115
5.2 Die Spulenwicklung	116
6. Kurvenform der Spannungskurve und Fernsprechformfaktor	117
7. Die Erwärmung der Synchronmaschine	120
8. Die unsymmetrische Belastung von Synchronmaschinen	124
9. Verbundbetrieb	131
9.1 Statische Stabilität beim Betrieb über Fernleitungen auf ein starres Netz	131
9.11 Verlustlose Leitung und Fehlen von örtlichen Belastungen	131
9.12 Statische Stabilität beim Betrieb einer Maschine auf ein starres Netz über eine verlustbehaftete Leitung mit beliebigen örtlichen Belastungen	140
9.2 Statische Stabilität beim Zwei- und Mehrmaschinenproblem	142
9.21 Parallelbetrieb von 2 Kraftwerken über eine reine Reaktanz	143
9.22 Parallelbetrieb von 2 Kraftwerken über eine Kupplungsimpedanz.	145
9.23 Parallelbetrieb von 2 Kraftwerken mit gemeinsamer induktiver Belastung	148
9.24 Zusammenarbeiten von 2 Kraftwerken auf eine gemeinsame Belastung	149
9.25 Das Mehrmaschinenproblem	151
9.3 Dynamische Stabilität	153
10. Aufgaben der Spannungsregelung	164
10.1 Grundsätzliches.	164
10.2 Aufgaben einer schnellen Erregung im ungestörten Lastbetrieb	165
10.21 Begrenzung der Spannungsschwankungen auf kleine Werte	166

Inhaltsverzeichnis

	VII Seite
10.22 Stabile Blindlastverteilung	169
10.23 Erweiterung des statischen Stabilitätsbereiches	170
10.24 Betrieb leer laufender Hochspannungsleitungen und Kabelnetze	174
10.3 Aufgaben bei Störungen des Parallelbetriebes	175
10.31 Physikalische Kennzeichnung der Erregungsgeschwindigkeit	175
10.32 Dynamische Stabilität	181
10.33 Stabilität bei Pendelungen	185
10.4 Bestimmung der erforderlichen Erregungsgeschwindigkeit	186

Anhang

1. Spannungs- und Stromgleichungen der Synchronmaschine	194
1.1 Zeigerdarstellung und komplexe Rechnung	194
1.2 Spannungs- und Stromgleichungen	195
2. Die allgemeinen Gleichungen der Synchronmaschine	197
2.1 Transformationsgleichungen für die Synchronmaschine	197
2.2 Die allgemeinen Spannungsgleichungen	202
2.3 Die Operatorenkoeffizienten	207
2.4 Leistungs- und Drehmomentgleichungen	214
2.5 Die Bewegungsgleichung der Synchronmaschine	215
2.6 Zusammenstellung des gesamten Gleichungssystems	216
2.7 Die Konstanten der Synchronmaschine	217
2.71 Ersatzschaltbilder für die Zeitkonstanten und Versuchsanordnungen zu ihrer Messung	220
3. Der dreipolige (dreisträngige), symmetrische Stoßkurzschluß der Synchronmaschine	225
3.1 Der dreipolige Klemmenkurzschluß aus vorhergehendem Leerlauf	225
3.11 Der Kurzschlußstromverlauf	225
3.12 Das Kurzschlußdrehmoment „im Luftspalt“	231
3.13 Feldstromverlauf beim Kurzschluß	233
3.2 Berücksichtigung der Vorbelastung beim Kurzschluß	236
3.3 Plötzliche Änderung der Klemmenspannung	242
4. Der unsymmetrische Kurzschluß der Synchronmaschine	243
4.1 Der zweipolige (zweisträngig-einphasige) Kurzschluß aus vorhergehendem Leerlauf	243
4.11 Der Kurzschlußstromverlauf	244
4.12 Die Spannung an dem offenen Strang	249
4.13 Das Kurzschlußdrehmoment „im Luftspalt“	251
4.14 Feldstromverlauf beim Kurzschluß	252
4.2 Der einpolige (einsträngig-einphasige) Kurzschluß	254
4.3 Vergleich der Maximalamplituden der Kurzschlußdrehmomente „im Luftspalt“ und der maximalen Wickelkopfbeanspruchungen	256
4.4 Der Doppelerdkurzschluß bei geerdetem Maschinensternpunkt	256

	Seite
5. Die unsymmetrische Belastung von Synchronmaschinen durch Netzkurzschlüsse in Behandlung mit der „Methode der Symmetrischen Komponentenrechnung“	257
5.1 Netzkurzschlüsse als Sonderfälle der unsymmetrischen Belastung.	258
5.2 Der zweipolige Kurzschluß im Netz	262
5.21 Die einseitige Speisung	262
5.22 Der zweipolige Kurzschluß auf einer Verbindungsleitung (zweiseitige Speisung)	264
5.23 Der zweipolige Kurzschluß über die Kurzschlußimpedanz z_F auf einer Verbindungsleitung.	266
5.3 Der einpolige Erdschluß im geerdeten Netz	267
5.31 Die einseitige Speisung	267
5.32 Der einpolige Erdschluß im Netz mit geerdeten Transformatoren (zweiseitige Speisung)	268
5.33 Der einpolige Erdschluß im geerdeten Netz über die Fehlerimpedanz z_F	270
5.4 Der zweipolige Kurzschluß mit Erdberührung im geerdeten Netz	271
5.41 Die einseitige Speisung	271
5.42 Der zweipolige Kurzschluß mit Erdberührung im Netz mit geerdeten Transformatoren (zweiseitige Speisung).	273
5.43 Der zweipolige Kurzschluß mit Erdberührung im geerdeten Netz über die Fehlerimpedanz z_F	274
6. Die Synchronmaschine im asynchronen Betrieb	276
6.1 Der asynchrone Anlauf von Synchronmaschinen	276
6.2 Asynchroner Lauf der Synchronmaschine bei erregtem Polrad	284
6.3 Der sehr rasche Anlauf	287
7. Kleine Schwingungen der Synchronmaschine	288
7.1 Allgemeines: Die Differentialgleichung der pendelnden Synchronmaschine	288
7.2 Die „komplexe Synchronisierziffer“	293
7.3 Drehmoment-, Leistungs- und Stromschwankungen	305
7.4 Selbsterregte Schwingungen	308
Literaturverzeichnis	311
Tabellen	315
Sachverzeichnis	318

Erläuterung zu den Rechengrößen und Formelzeichen

Lateinische Buchstaben:	Beträge der Größen
Durch Fettdruck hervorgehobene Buchstaben:	Komplexe Größen, in der GAUSSSchen Zahlenebene als Zeiger dargestellt
Punkt über den Buchstaben:	Ableitung der Größen

Die Momentanwerte der Ströme, Spannungen und Flußverkettungen — sowie alle Wirk- und Blindwiderstände — werden mit kleinen, die Effektivwerte mit großen Buchstaben bezeichnet.

Zahlenangaben in eckigen Klammern im Textteil bedeuten Hinweise auf das Literaturverzeichnis am Schluß des Buches. Ist vor den Zahlen noch ein „A“, so handelt es sich um Literaturangaben zum Anhang.

A	in Klammern: Stromgröße in Ampere
A	in Abschn. 10 als Formelzeichen: Anstiegsgeschwindigkeit der Erregerspannung
a	Erregungsgeschwindigkeit [s^{-1}]
A_a	Ständerstrombelag in A/cm
b	Polbreite [m]
B_1	Grundfeldinduktion in Gauß (Amplitude)
C	Maschinenkonstante
C_d	Minderungsfaktor der Reaktanz der Ankerrückwirkung x_h in der Längsrichtung
C_D	Dämpfungskonstante
C_q	Minderungsfaktor der Reaktanz der Ankerrückwirkung x_h in der Querrichtung
D	Bohrungsdurchmesser [m]
E	Polradspannung (= Erregung)
e	EULERSche Zahl (= 2,7183)
E'	„Transiente“ Polradspannung
E'_o	„Treibende“ EMK bei transienten Vorgängen (Spannung hinter Transientreaktanz); Hauptfeldspannung für Vollpolmaschine mit Massivrotor (Näherung)
E''_o	„Treibende“ EMK bei subtransienten Vorgängen (z. B. Kurzschluß bei Vorbelastung)
E_1, E_2, \dots	in Abschn. 9: Polradspannungen der Maschinen 1, 2, ...
E'_1, E'_2, \dots	in Abschn. 9: Transiente Polradspannungen der Maschinen 1, 2, ...
E'_d	Hauptfeldspannung für die Schenkelpolmaschine
E_L	Innere EMK (Spannung hinter der Ständerstreureaktanz x_{σ}), Luftspaltspannung
E_{Ld}	Komponente der inneren EMK E_L in der Längsrichtung
E_{Lq}	Komponente der inneren EMK E_L in der Querrichtung
E_p	Spannung hinter der POTIER-Reaktanz (POTIER-Spannung)
G	Gewicht [kp]

X Erläuterung zu den Rechengrößen und Formelzeichen

g	Umrechnungsfaktor: Ständerstrom auf äquivalenten fiktiven Läuferstromeffektivwert im Kennliniendiagramm (Leerlauf- und Kurzschlußkennlinie)
$G D^2$	Schwungmoment (in kpm^2 oder Mpm^2)
H	Trägheitskonstante ($H = T_A/2$ in kWs/kVA)
I, i_a, i_b, i_c	Ständer- (Anker-) Scheinstrom (Stränge a, b, c)
i	Augenblickswert des jeweiligen Stromes
\hat{i}	Scheitelwert des jeweiligen Stromes
I_0, i_0	Nullkomponente des Ständerstromes
I_1	Mitkomponente des Ständerstromes; in Abschn. 9: Scheinstrom der Maschine 1
I_2	Invers- = Gegenkomponente des Ständerstromes; in Abschn. 9: Scheinstrom der Maschine 2
I_b	Blindkomponente von I
I_d, i_d	Längskomponente des Stromes
$I_o = \frac{i_o}{i_{oo}}$	Verhältnis des Erregerstromes zum Leerläufererregerstrom (vgl. Abschnitt 1), ohne Sättigung
i_e	Erregerstrom (vgl. Abschn. 1)
$I_{o(\sim)} = \frac{i_o}{\sqrt{2}}$	p.u.-Wert des fiktiven Erregerwechselstrom-Effektivwertes (vgl. Abschn. 1)
i_g	Stoßkurzschlußgleichstrom
I'_k	Übergangskurzschluß-Wechselstrom (transienter Kurzschlußwechselstrom)
I''_k	Stoßkurzschluß-Wechselstrom (subtransienter Kurzschlußwechselstrom)
I_{k_o}	Kurzschlußstrom bei Leerläuferregung (Dauer-)
I_{k_L}	Kurzschlußstrom bei Lasterregung (Dauer-)
I_{k_o}/I_N	Leerlaufkurzschlußverhältnis = I_{k_o} in p.u. (gesättigt)
I_{k_L}/I_N	Lastkurzschlußverhältnis = I_{k_L} in p.u.
i_p	Stoßkurzschlußstrom
I_q, i_q	Querkomponente des Stromes
I_w	Wirkkomponente von I
I_{w_e}	Wechselstromkomponente des Ständerstromes
i_z	in Abschn. 10: Zusatzerregerstrom durch Regelung
j	$\sqrt{-1}$ = imaginäre Einheit
k_{sb}, k_{sw}	Sättigungsfaktoren für die Hauptfeldreaktanz (vgl. Abschn. 3.12)
L	Eisenlänge einer Maschine einschließlich Luftschlitze [m]
l	mit Index d, q, h, e usw.: Induktivität (vgl. Reaktanzen)
l	ohne Index: Leitungslänge [km]
l_i	effektive Eisenlänge [m]
M, m	Drehmoment
M_A, m_A	Antriebsdrehmoment, z. B. Turbinendrehmoment
M_{As}	asynchrones Drehmoment (nicht bezogen)
M_D, m_D	Dämpfungsdrehmoment
M_E, m_E	elektrisches Drehmoment
$M_{p \max}, m_{p \max}$	Stoßmoment beim Klemmenkurzschluß
n	Drehzahl [U/min]
n_s	synchrone Drehzahl [U/min]
p	Polpaarzahl ($2p = \text{Polzahl}$)
P_A	Antriebsleistung, z. B. Turbinenleistung
P_b	Blindleistung
P_D	Dämpfungsleistung

P_K	Kippleistung
P_{nat}	natürliche Leistung einer Leitung
$P_p \text{ max}$	Stoßleistung bei Klemmenkurzschluß
P_s	Scheinleistung
P_w	Wirkleistung
P'_w	Wirkleistung bei plötzlichen Laständerungen (transiente)
P_{w_s}	synchronisierende Leistung [p. u./Radian]
P'_{w_s}	synchronisierende Leistung bei plötzlichen Laständerungen [p. u./Radian]
P_{Θ}	Beschleunigungsleistung
r_a	Ständerwiderstand
r_e	Läuferwiderstand
r_2	Inverswirkwiderstand
s	Schlupf
t	Zeit [s]
T_A	Anlaufzeitkonstante [s]
T_a	Zeitkonstante des Gleichstromgliedes beim Klemmenkurzschluß (Gleichstromzeitkonstante in s)
T'_d	Transient-Kurzschlußzeitkonstante [s]
T''_d	Subtransient-Kurzschlußzeitkonstante [s]
T'_{d0}	Leerlaufzeitkonstante [s]
T'_{dL}	Transientlastzeitkonstante [s]
U	Strangspannung
u	Augenblickswert der Strangspannung
U_1, U_2, \dots	in Abschn. 9: Spannungen der Maschinen 1, 2, ... (auch Generator- und Netzspannung)
V	in Klammern: Spannung in V
w	Windungszahl
x	Reaktanz
x_0	Nullreaktanz
x_2	Inversreaktanz
$x_{a\sigma}$	Streureaktanz der Ständerwicklung
x_d	Synchronlängsreaktanz
x'_d	Transientlängsreaktanz
x''_d	Subtransientlängsreaktanz
$x_{D\sigma}$	Streureaktanz der Dämpferwicklung
x_e	fiktive Reaktanz der Feldwicklung: $x_e = x_{h_d} + x_{e\sigma}$
$x_{e\sigma}$	Streureaktanz der Feldwicklung
x_h	Hauptfeldreaktanz (Reaktanz der Ankerrückwirkung) der Vollpolmaschine
x_{h_d}	$x_h C_d$ Hauptfeldreaktanz der Schenkelpolmaschine in der Längsrichtung
x_{h_q}	$x_h C_q$ Hauptfeldreaktanz der Schenkelpolmaschine in der Querrichtung
x_{Ltg}	Leitungsreaktanz
$x_{L\sigma}$	Läuferstreureaktanz bei Maschinen mit Dämpferwicklung (Parallelschaltung von $x_{D\sigma}$ mit $x_{e\sigma}$)
x_p	POTIER-Reaktanz
x_q	Synchronquerreaktanz
x'_q	Transientquerreaktanz
x''_q	Subtransientquerreaktanz
x_T	Transformatorreaktanz (Kurzschlußreaktanz)
x_v	in Abschn. 9: Vorreaktanz = Reaktanz zwischen Generator und Netz

XII Erläuterung zu den Rechengrößen und Formelzeichen

y	Admittanz
Z	Wellenwiderstand einer Leitung
z	Impedanz
z_1, z_2, \dots	in Abschn. 9: Impedanzen von Übertragungssystemen 1, 2, ...
b/τ_p	Polbedeckungsverhältnis
l_4/τ_p	Verhältnis der effektiven Eisenlänge zur Polteilung
Θ	Winkel zwischen Achse des Stranges a und der Polachse
ϑ	Polradwinkel
$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \dots$	in Abschn. 9: Trägheitsmomente der Maschinen 1, 2, 3, ...; im Anhang wird das Trägheitsmoment mit Θ_m bezeichnet
ϑ_1	innerer Polradwinkel (Winkel zwischen Klemmenspannung und Polradspannung)
ϑ_2	äußerer Polradwinkel (Winkel zwischen Netzspannung und Polradspannung)
ϑ_{12}	Winkel zwischen den Polradspannungen E_1 und E_2 in Abschn. 9
Θ_a	Ständer- (Anker-) Durchflutung
Θ_e	Magnetdurchflutung
Θ_L	Durchflutung im Luftspalt
λ	Leitungswinkel
ξ_1	Wicklungsfaktor der Ständerwicklung für die Grundwelle
τ_p	Polteilung ($\tau_p = D \cdot \pi/2p$)
Φ	Flußverkettung
φ	Phasenwinkel (Zählsinn für positives φ in mathematisch positiver Richtung, d. h. im Gegenuhrzeigersinn, und zwar vom Strom zur Spannung, für die Festlegung des Vorzeichens der Blindleistung, sonst ist φ nur der Betrag des Phasenwinkels)
φ_1	primärer Phasenwinkel (Winkel zwischen U_1 und I_1) in Abschn. 9
φ_2	sekundärer Phasenwinkel (Winkel zwischen U_2 und I_2) in Abschn. 9
Ω	OHM-Widerstandseinheit
Ω	Pendelwinkelgeschwindigkeit
ω	Kreisfrequenz ($\omega = 2\pi f$)

Allgemeine Indizes

1, 2, 0	Mit-, Gegen-, Nullkomponente
1, 2, 3, ...	Größen der Kraftwerke 1, 2, 3, ... (nur Abschn. 9)
a	Ankergrößen für Widerstände (Wirk- und Blind-)
b	Blindkomponente
D	Dämpferwicklung
d	Längsachse (direct-axis); Achtung: 90° Verschiebung zwischen den Spannungskomponenten im Anhang und denen im Hauptteil
e	Feldkreis (Erregerkreis der Synchronmaschine); als zweiter Index: Größe der Einphasenmaschine (vgl. Abschn. 2.4)
k	Kurzschluß
N	Nennwert
n	Netzgröße
o	Leerlaufwert bzw. Kennzeichen des stationären Ausgangszustandes
q	Querachse
w	Wirkkomponente
σ	Streuwert

Weitere hier nicht aufgeführte und nur selten oder nur einmal vorkommende Buchstaben werden jeweils im Text erläutert.

1. Das „per-unit-System“¹

(Das System mit bezogenen, dimensionslosen Größen)

Das Betriebsverhalten von elektrischen Maschinen, Geräten und Anlagen kann in den meisten Fällen durch einige wenige bestimmte Größen ausreichend beschrieben werden, wenn diese Größen in Prozent ausgedrückt werden (Maximalleistung in Prozent der Nennleistung; Spannungsänderung, Spannungsbereich oder Stoßstreuung in Prozent der Nennspannung; Drehzahlüberschwingweite — vorübergehende Drehzahlsteigerung bei plötzlicher Entlastung — und Durchgangsdrehzahl in Prozent der Nennzahl; Verluste in Prozent der Nennaufnahmeleistung usw.). Als Bezugswerte der Prozentangaben dienen dabei die jeweiligen Nennwerte. Ohne diese Bezugsgrößen ist die Angabe von Werten — z. B. 1000 V als Spannungsänderung ohne Angabe der Nennspannung — sinnlos. Ein Nachteil der Rechnung mit in Prozenten angegebenen Größen ist es, daß die Multiplikation von Prozentwerten leicht zu Fehlern führt.

Die Verwendung des p. u.-Systems, d. h. das Arbeiten mit bezogenen, dimensionslosen Größen, bietet nun alle Vorteile des Prozentsystems und schließt außerdem Multiplikationsfehler aus. Die Nenngrößen erhalten dabei nicht den Wert 100 (%), sondern Eins. Durch Wegfall der leicht zu Irrtümern führenden Zahlenwerte und Dimensionen in Rechenbeispielen (beim Arbeiten mit Zahlenwert- oder Größengleichungen) werden die Gleichungen vereinfacht und erhalten allgemeineren Charakter.

Die Anwendung dieses Systems hat von Amerika ausgehend [41, 43] heute fast allgemein in der einschlägigen elektrotechnischen Literatur Eingang gefunden.

Alle physikalischen Größen werden nach dem p. u.-System durch Division mit den passend gewählten Bezugsgrößen gleicher Dimension in bezogene Größen umgeformt. Die in den weiteren Abschnitten verwendeten Bezugsgrößen sind nun folgende (Sternschaltung der Maschinen vorausgesetzt):

a) Für Ständerstrom, Ständerspannung², Leistung, Drehmoment, Frequenz, Drehzahl usw. die jeweiligen Nennwerte dieser Größen, d. h.

¹ Lit.: [3, 6, 41, 43, 46, 50].

² Bei größeren Synchronmaschinen, um deren Behandlung es hier ja geht, entspricht der Ständer immer dem Anker (Index „a“).

also der Nennstrom (Effektivwert), die Nennstrangspannung (Effektivwert), die Nennstrangscheinleistung¹, das einer Wirkleistung von der Größe der Nennstrangscheinleistung bei synchroner Drehzahl entsprechende Drehmoment als Nenndrehmoment usw.

b) Für Reaktanzen und Widerstände ist der Bezugswert die Nennimpedanz der Maschine, d. h.

$$z_N = \frac{\text{Nennstrangspannung}}{\text{Nennstrom}} \quad 2$$

Die Nennstrangspannung hat also den dimensionslosen Wert Eins und ebenso der Nennstrom, die Nennscheinleistung usw., und die Angabe $x_d = 1$ bedeutet z. B., daß der Wert der Synchronreaktanz gleich dem der Nennimpedanz der Maschine ist.

c) Für die Flußverkettungen gilt als Bezugswert der Grundwellenfluß (U_N/ω_n) multipliziert mit der Kreisfrequenz ω_n , da die Zeit in Sekunden angegeben wird. Der Grundwellenfluß hat also in p. u. den Betrag: $1/\omega_n$.

d) Eine gewisse Schwierigkeit besteht in der Festlegung allgemeingültiger und gleichzeitig zu möglichst einfachen Darstellungsverhältnissen führender Bezugsgrößen für die Läuferkreise.

Wir verwenden in der vorliegenden Abhandlung als Bezugswerte für die Größen der Läuferkreise die Nennwerte (Stranggrößen) der entsprechenden Ständergrößen, d. h. für die Ströme den Nennstrom I_N [A] der Maschine, für die Spannungen die Nennspannung U_N [V] und für die Impedanzen die Nennimpedanz z_N [Ω]. Um die Läufergrößen in p. u. angeben zu können, müssen sie theoretisch (s. später) zunächst auf die Ständerseite umgerechnet werden, wie es auch beim Transformator oder der Asynchronmaschine üblich ist. Die entsprechenden Umrechnungsfaktoren können der einschlägigen Literatur über die Berechnung von Synchronmaschinen [3, 41, 43, 46, 50] entnommen werden. Leider werden in der deutschsprachigen Literatur hierzu keine eindeutigen Herleitungen angegeben. Daher wollen wir noch kurz auf die Umrechnungsfaktoren eingehen. Bei ihrer Ermittlung geht man so vor, daß man die Grundwelle des zur Kompensation eines bestimmten Ständerfeldes erforderlichen Läuferfeldes gleichsetzt mit der zu kom-

¹ Um bei Nennstrom und Nennspannung die Nennscheinleistung Eins zu erhalten, wird die Leistung wie folgt definiert:

$P_s = \frac{1}{m} \sum_{m=1}^m U I$. Für die Drehstrommaschine bedeutet das $P_s = \frac{1}{3} \sum U I = U I$, d. h., hier ist $m = 3$. Bei 2 Ersatzsträngen (d, q) gilt dann z. B. $m = 2$.

² Bei Dreieckschaltung der Ständerwicklung:

$\frac{\text{Nennleiterspannung}}{\text{Nennleiterstrom}/\sqrt{3}}$, d. h. allgemein $\frac{\text{Nennstrangspannung}}{\text{Nennstrangstrom}}$.

pensierenden Grundwelle des Ständerfeldes. Man erhält dann z. B. für den Feldkreis die Gleichung ($i_e [A_-]$ ist ein Augenblickswert, wird also klein geschrieben):

$$\ddot{i} = \frac{i_e [A_-]}{\frac{m}{2} \sqrt{2} I [A_\sim]} = \frac{4}{\pi} \frac{w_a \xi_a}{w_e} \beta C_d, \quad (1)$$

wobei

- \ddot{i} das Stromübersetzungsverhältnis,
- m die Ständerstrangzahl,
- w_a die Ständerwindungszahl je Pol und Strang,
- ξ_a den Ständerwicklungsfaktor,
- w_e die Polwindungszahl,
- β das von der Polschuhform abhängige Verhältnis der Luftspaltinduktion B_L zur Amplitude der Grundwelle und
- C_d den ebenfalls von der Polschuhform abhängigen Minderungsfaktor für das Ankerlängsfeld

darstellt.

C_d und β werden Kurven [50] entnommen, die aus Feldbildern ermittelt wurden.

Man sieht aus obiger Gleichung für das Übersetzungsverhältnis \ddot{i} , daß ein auf die Ständerseite umgerechneter Erregerstrom der Amplitude des zugehörigen Ständerstrangstromes entspricht:

$$\frac{i_e [A_-]}{\frac{m}{2} \ddot{i}} = \sqrt{2} I [A_\sim] = \sqrt{2} I_e [A_\sim].$$

Anstelle des Effektivwertes des Ankerstromes können wir in dieser Gleichung, wie wir es auch getan haben, den fiktiven Effektivwert eines Wechselstromes $I_e [A_\sim]$ setzen, der sich durch Umrechnung des Erregergleichstromes auf den m -strängigen Ständer ergibt.

Der bezogene (p. u.-) Wert des Erregerstromes muß sich nun daraus durch Division mit dem Effektivwert des Ständernennstromes I_N ergeben:

$$\frac{i_e [A_-]}{\frac{m}{2} \ddot{i}} = \frac{i_e [A_-]}{\frac{m}{2} \ddot{i} I_N [A_\sim]} = \frac{\sqrt{2} I [A_\sim]}{I_N [A_\sim]} = \frac{\sqrt{2} I_e [A_\sim]}{I_N [A_\sim]} = i_e [\text{p. u.}] (= \sqrt{2} I_{e\sim} [\text{p. u.}]) .^1 \quad (2a)$$

Für den Sonderfall des Ständernennstromes, d. h. für $I = I_N$, wird der Erregerstrom $i_e [A_-] = i_{e(I_N)} [A_-]$ und somit

$$i_{e(I_N)} [\text{p. u.}] = \frac{i_{e(I_N)} [A_-]}{\frac{m}{2} \ddot{i} I_N [A_\sim]} = \frac{\sqrt{2} I_N [A_\sim]}{I_N [A_\sim]} = \sqrt{2}. \quad (2b)$$

¹ „p. u.“ wird in diesem und ähnlichen Fällen der Übersichtlichkeit wegen wie eine Dimension behandelt. Man kann sich im übrigen die p. u.-Werte auch dimensionsbehaftet, und zwar mit den Maschinen-Nenngrößen als Einheiten, vorstellen.

Der zu der Spannung der Ankerrückwirkung $I_N x_{hd}$ — wobei x_{hd} die Hauptfeldreaktanz bedeutet (s. später) — gehörende, d. h. das gleiche Feld wie I_N erzeugende, Erregerstrom $i_{e(I_N)}$ ist also in p. u., d. h. als bezogene Größe ausgedrückt, gleich $\sqrt{2}$.

Wie gelangen wir nun zu dem zugehörigen Bezugswert direkt auf der Gleichstromseite? Wir sehen aus obigen Ableitungen, daß wir nur den Ankerrückwirkungsanteil des Ständernennstromes zu ermitteln brauchen. Der zugehörige Erregergleichstrom muß dann als bezogene Größe gleich $\sqrt{2}$ sein. Die Ermittlung kann z. B. meßtechnisch erfolgen, indem man die Leerlauf- und Kurzschlußkennlinie aufzeichnet (Abb. 15b, Ströme in A und Spannungen in V), den zum Nennstrom im Dauerkurzschluß gehörenden Erregerstrom $i_{e(I_k = I_N)}$ einträgt und diesen Erregerstrom im Verhältnis x_{hd}/x_d verkleinert. Es muß dafür dann gelten:

$$i_{e(I_k = I_N)} \frac{x_{hd}}{x_d} = \sqrt{2} \text{ in p. u.}$$

Die Strecke $g I_N$ in Abb. 15b muß also, in bezogenen Größen ausgedrückt, gleich $\sqrt{2}$ sein. Der Wert $i_e [\text{p. u.}] = 1$ ergibt sich dann einfach durch Teilen dieser Strecke durch $\sqrt{2}$. Der dem Streckenabschnitt $g I_N/\sqrt{2}$ der Abbildung entsprechende Erregerstrom in A muß damit gleich dem Bezugswert für den Erregerstrom in [A₌] sein. Mit der Gl. (2b) können wir auch die Bedeutung von g in einfacher Weise definieren. Es gilt danach:

$$i_{e(I_N)} [A_{=}] = \sqrt{2} \frac{m}{2} \ddot{u} I_N [A_{\sim}] = g I_N [A_{\sim}],$$

also

$$g = \sqrt{2} \frac{m}{2} \ddot{u} = \sqrt{2} \frac{m}{2} \frac{4}{\pi} \frac{w_a \xi_a}{w_e} \beta C_d. \quad (3)$$

Dividiert man $i_{e(I_N)} [A_{=}]$ durch g , so erhält man also I_N , den Effektivwert des Ständernennstromes, d. h., durch diese Division kann man einen Erregergleichstrom in den entsprechenden Effektivwert $I_{e\sim} = I$ eines fiktiven Erregerwechselstromes auf der Ständerseite umformen. Dieses Vorgehen ist z. B. für die Darstellung des Erregerstromes im Zeigerdiagramm [6] zweckmäßig. Wir wollen in der vorliegenden Abhandlung aber nur in ganz wenigen Sonderfällen davon Gebrauch machen. — Der p. u.-Wert des Effektivwertes des Erregerwechselstromes wird dann wie in Gl. (2a) mit $I_{e\sim}$ bezeichnet. — Wir werden vielmehr, um im Hauptteil der Abhandlung keine Komplikation durch die Definition des Erregerstrom-Bezugswertes hervorzurufen, den Erregerstrom als Vielfaches des Leerlauferregerstromes i_{e0}^1 angeben. Das gleiche gilt für die Erregerspannung. Durch diese Vereinfachung wird es belanglos, ob der

¹ Ohne Sättigung, vgl. Abb. 15b.

Erregerstrom in A oder in p. u. gegeben ist. Vor allem aber ist damit die Polradspannung in p. u. als Zahlenwert gleich dem Verhältnis i_e/i_{e0} . Für dieses Verhältnis werden wir, da es oft vorkommt, zur Abkürzung den Buchstaben I_e setzen, zum Unterschied vom fiktiven Wechselstromeffektivwert des Erregerstromes $I_{e\sim}$. Es gilt also:

$$\frac{i_e}{i_{e0}} = I_e; \quad i_{e0} \text{ ungesättigt, vgl. Abb. 15 b.} \quad (4)$$

Aus dem Stromübersetzungsverhältnis lassen sich nun auch die Umrechnungsfaktoren für den Widerstand und die Streureaktanz sowie für die Spannung des Feldkreises anschreiben. Es gilt für den Widerstand und die Reaktanz:

$$\varrho = \frac{m}{2} \ddot{u}^2 = \frac{m}{2} \left(\frac{4}{\pi} \frac{w_a \xi_a}{w_o} \beta C_d \right)^2. \quad (5)$$

Damit lautet z. B. der Feldwiderstand in p. u.:

$$r_e [\text{p. u.}] = \frac{r_e [\Omega_{=}] \varrho}{z_N [\Omega_{\sim}]} = r_e [\Omega_{=}] \frac{m}{2} \ddot{u}^2 \frac{I_N}{U_N}. \quad (6)$$

Für die Erregerspannung muß gelten:

$$u_e [\text{p. u.}] = i_e [\text{p. u.}] \cdot r_e [\text{p. u.}],$$

also mit den Gln. (2) und (6):

$$\begin{aligned} u_e [\text{p. u.}] &= \frac{i_e [A_{=}]}{\frac{m}{2} \ddot{u} I_N [A_{\sim}]} r_e [\Omega_{=}] \frac{m}{2} \ddot{u}^2 \frac{I_N [A_{\sim}]}{U_N [V_{\sim}]} = \frac{i_e [A_{=}] \cdot r_e [\Omega_{=}]}{U_N [V_{\sim}]} \ddot{u} \\ &= \frac{u_e [V_{=}]}{U_N [V_{\sim}]} \ddot{u}. \end{aligned} \quad (7)$$

Der bezogene Wert für die Flußverkettung ergibt sich in entsprechender Weise aus dem p. u.-Wert des Erregerstromes multipliziert mit dem p. u.-Wert der Selbstinduktivität des Feldkreises $(x_{hd} + x_{eo})/\omega_n$. x_{eo} stellt dabei die Streureaktanz der Erregerwicklung dar und $\omega_n = 2\pi f_n$.

Das hier auf das Beispiel des Feldkreises angewandte Verfahren der Umrechnung auf die Ständerseite hat den Vorteil, daß die Hauptfeldreaktanzen aller Läuferkreise gleich der Hauptfeldreaktanz x_{hd} werden.

Die Umrechnungsfaktoren für die Dämpferwicklungsgrößen entsprechen denjenigen der Asynchronmaschine und sind z. B. in den Literaturstellen [41, 43, 50] zu finden. Wir wollen hier nicht weiter darauf eingehen. Die Herleitung erfolgt in derselben Weise, wie es oben am Beispiel des Erregerkreises gezeigt wurde.

e) Um den physikalischen Zusammenhang zwischen Induktivität und Reaktanz nicht zu verwischen, wird die Zeit in Sekunden und die Winkelgeschwindigkeit in Radian je Sekunde (1/s) angegeben. Die der bezogenen Reaktanz 1 entsprechende Induktivität hat also den Betrag $1/\omega_n$.

Wird ausnahmsweise in einer Gleichung nicht das System mit bezogenen Größen (p.u.-System) verwendet, so wird dies ausdrücklich betont oder hinter das jeweilige Formelzeichen die Dimension gesetzt.

Erläuterungen zu den Formelzeichen und Rechengrößen sind nach dem Inhaltsverzeichnis aufgeführt.

2. Elektrisches Verhalten von Synchronmaschinen¹

2.1 Spannungs- und Stromdiagramme der ungesättigten Synchronmaschine

Das Verhalten einer Synchronmaschine bei Belastung läßt sich am besten aus dem Spannungszeigerdiagramm² erkennen. Abb. 1a zeigt das

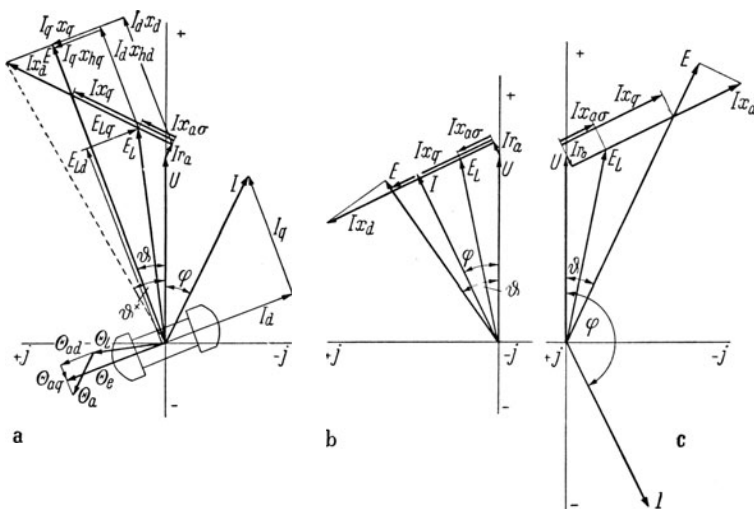


Abb. 1a—c. Spannungsdiagramm der Schenkelpolmaschine bei Belastung
 $U = U_N = 1$; $I = I_N = 1$; $x_d = 1$; $x_q = 0,6$; $x_{a\sigma} = 0,2$
 $r_a = 0,07$; $\cos \varphi = 0,9$

a) Generatorbetrieb, übererregt (Blindleistungsabgabe); b) Generatorbetrieb, untererregt (Blindleistungsaufnahme); c) Motorbetrieb, übererregt (Blindleistungsabgabe)

Zeigerdiagramm eines Schenkelpolgenerators (Erzeugerzählpfeilsystem) bei Abgabe von Wirk- und (Magnetisierungs-) Blindleistung³ (übererregt; nacheilender Strom), Abb. 1b bei Abgabe von Wirkleistung und

¹ Lit.: [1, 5, 6, 12, 17, 20, 23, 28, 29, 37, 39, 46, 50, 55, 57].

² Zur Veranschaulichung sinusförmiger Ströme und Spannungen werden diese als Zeiger dargestellt, für die die geometrischen Additionsgesetze der Vektorrechnung gelten (Anhang 1). Die Bezeichnung Vektor sollte jedoch für Raumvektoren vorbehalten werden.

³ Zur Festlegung des Vorzeichens der Blindleistung wird φ von I nach U in mathematisch positiver Richtung (Gegenuhrzeigersinn) positiv gezählt (Festlegung für EZS).

Aufnahme von Blindleistung (Abgabe von Ladeblindleistung, also untererregt; voreilender Strom), und Abb. 1 c zeigt das Zeigerdiagramm eines Motors bei Abgabe von Wirkleistung an der Welle und Blindleistung an das Netz. — Auf den Motorbetrieb wird vorerst nicht weiter eingegangen, da er gegenüber dem Generatorbetrieb nichts Neues bringt (vgl. S. 31). Die Diagramme gelten für einen Strang.

Wie kommt man nun zu den Größen dieses Zeigerdiagramms, das — wie wir sehen werden — für den stationären Betrieb gültig ist? — Wie die Überschrift besagt, setzen wir zur Vereinfachung eine ungesättigte Maschine voraus.

Abb. 2 stellt schematisch eine zweipolige, dreisträngige Synchronmaschine ohne Dämpferwicklung dar.

Der Ständer (Anker) enthält drei gleiche Wicklungsstränge a , b und c , die räumlich um 120° (bei Polpaarzahl $p > 1$, 120° el) gegeneinander versetzt sind. Das Polrad enthält die einachsige Erregerwicklung (Feldwicklung), welcher von der Erregerquelle der Gleichstrom i_e über die Schleifringe zugeführt wird. Dreht sich das Polrad mit der Winkelgeschwindigkeit ω , so wird vom Polradfluß in jedem der offenen Ständerwicklungsstränge die Spannung E induziert. Belastet man die Maschine symmetrisch, so fließen in den Strängen b und c Wechselströme, die (wie die Leerlaufspannungen) zeitlich um $(2\pi/3\omega)$ und $(4\pi/3\omega)$ gegen den Strom im Strang a verschoben, sonst aber vollkommen gleichartig sind. Es genügt also, den Strang a zu betrachten. Fällt nun die Achse des Stranges a mit der Polachse zusammen ($\Theta = 0$), so ist der wirksame Luftspalt am kleinsten und die Induktivität l des Stranges a hat damit ihren Höchstwert l_d (Längsfeldinduktivität). In der Querstellung der Polachse (Polradachse senkrecht auf der Achse des Stranges a) ist der wirksame Luftspalt am größten und die Induktivität hat ihr Minimum l_q (Querfeldinduktivität). Entsprechend der internationalen Praxis bezeichnet man die Polachse als Längsachse und die Größen, die sich auf sie beziehen, mit dem Index „ d “ (vom englischen Ausdruck „direct axis“). Die Achse der Polücke heißt Querachse, und die Größen, die sich darauf beziehen, erhalten den Index „ q “ (vom englischen Ausdruck „quadrature axis“). Multipliziert man die beiden Induktivitäten mit der Kreisfrequenz ω_n , die in unserem Beispiel (Polpaarzahl $p = 1$) der

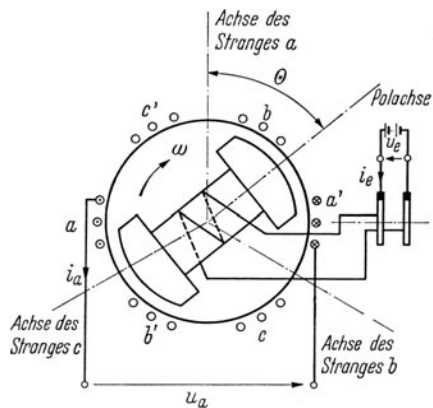


Abb. 2. Prinzipschema der Synchronmaschine