

Grundlagen der Übertragung elektrischer Energie

Von

Dr.-Ing. Paul Denzel

o. Professor

an der Rhein.-Westf. Technischen Hochschule Aachen
Direktor des Instituts für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft

Mit 349 Abbildungen



Springer-Verlag
Berlin / Heidelberg / New York
1966

ISBN 978-3-642-86900-6 ISBN 978-3-642-86899-3 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-86899-3

**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 1966
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1966
Library of Congress Catalog Card number: 66-17834**

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
Titel-Nr. 1303

Vorwort

Die Energieform *elektrische Energie* gewinnt immer mehr an Bedeutung. Aufgrund langjähriger Erfahrung rechnet man mit einer Verdopplung des Bedarfs an elektrischer Energie in zehn Jahren. Rohenergie wird heute in Kraftwerken mit Leistungen bis zu einigen 1000 MW in elektrische Energie umgewandelt, die einer Vielzahl von Verbrauchern mit zum Teil sehr kleinen Leistungen möglichst unterbrechungslos zugeführt werden muß. So sind aus den ursprünglichen Einzelleitungen und eng begrenzten Ortsnetzen ganze Länder überspannende Übertragungsleitungen und mehrfach überlagerte Verteilernetze entstanden. Die Übertragung elektrischer Energie hat sich zu einem Hauptgebiet der Starkstromtechnik entwickelt.

Voraussetzung für eine fruchtbare Tätigkeit auf diesem Gebiet ist die Beherrschung der Grundlagen der Übertragung elektrischer Energie. Da ein zusammenfassendes Lehrbuch hierüber seit Jahren fehlt, ist das vorliegende Buch aufgrund meiner langjährigen Tätigkeit in verschiedenen Energie-Versorgungsunternehmen und meiner Vorlesungen über elektrische Anlagen an der Rhein.-Westf. Technischen Hochschule Aachen entstanden. Es handelt sich um ein ausgesprochenes Lehrbuch, dessen Stoff jedem Elektroingenieur und insbesondere den Studenten der Starkstromtechnik bekannt sein müßte. Es enthält den Stoff meiner Vorlesungen, die ich auf dem Gebiet der Energieübertragung für Studierende des sechsten bis achten Semesters halte. Aus den zu diesen Vorlesungen gehörenden Übungen sind fast jedem Kapitel einige Aufgaben mit ausgeführtem Rechengang zur Anwendung der Theorie auf praktische Beispiele angefügt.

In der Bezeichnung und Schreibweise der Größen habe ich mich nach Möglichkeit an die Empfehlungen des Ausschusses für Einheiten und Formelgrößen (AEF) gehalten. Zur Darstellung komplexer Größen habe ich unterstrichene Buchstaben gewählt. Anstelle der vielfach üblichen Schreibweise $r \cdot e^{j\varphi}$ für komplexe Zahlen in Polarkoordinaten habe ich mich für die in der amerikanischen Literatur gebräuchliche, einfachere Schreibweise $r \cdot \underline{j\varphi}$ entschieden. Die symmetrischen Komponenten sind von mir, abweichend von den Empfehlungen des AEF, mit den hochgestellten Indizes m (Mit-), g (Gegen-) und 0 (Nullsystem) gekennzeichnet worden.

Am Aufbau und an der Niederschrift meiner Vorlesungen haben meine Assistenten, insbesondere mein Oberingenieur Dipl.-Ing. F. HAMMER und

meine Assistenten Dipl.-Ing. R. GRÖBER und Dipl.-Ing. H. SPICKMANN, mitgearbeitet. Anregung zu einer klareren Fassung einzelner Probleme hat auch mancher Studierende gegeben. Herrn GRÖBER und Herrn SPICKMANN habe ich die redaktionelle Bearbeitung des Manuskriptes und das Lesen der Korrekturen übertragen. Allen genannten Herren bin ich zu besonderem Dank verpflichtet.

Dem Springer-Verlag danke ich für die gute Ausstattung des Buches, die sorgfältige Ausführung der vielen Zeichnungen und auch dafür, daß er auf meine verschiedenen Wünsche eingegangen ist und insbesondere der von mir vorgeschlagenen Verwendung der *Dreher* zur Darstellung komplexer Größen in Polarkoordinaten zugestimmt hat. Ich wünsche dem Buch eine gute Aufnahme.

Aachen, im Januar 1966

P. Denzel

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen	IX
1 Einführung	1
1.1 Die Bedeutung der elektrischen Energie	1
1.2 Prinzipieller Aufbau der Energieanlagen	6
2 Das Rechnen mit Wechselströmen	8
2.1 Wechselgrößen	8
2.2 Zerlegung einer Wechselgröße in Harmonische	9
2.3 Elektrische Grundlagen	13
2.3.1 Die Maxwellschen Gleichungen	13
2.3.2 Die Kirchhoffschen Regeln	15
2.3.3 Die idealisierten Zweipole	16
2.3.3.1 Der ideale ohmsche Widerstand	17
2.3.3.2 Die ideale Spule	18
2.3.3.3 Der ideale Kondensator	18
2.3.3.4 Die ideale Spannungs- und Stromquelle	19
2.4 Der unverzweigte Stromkreis	20
2.5 Die symbolische Rechnung	24
2.6 Reihen- und Parallelschaltung von Impedanzen	28
2.7 Elektrische Netzwerke	30
2.7.1 Das Verfahren der Maschenanalyse	30
2.7.2 Das Verfahren der Knotenanalyse	33
2.7.3 Der Überlagerungssatz	36
2.7.4 Der Satz von der Ersatzspannungsquelle	37
2.7.5 Umwandlung eines Impedanzdreiecks in einen Impedanzstern und umgekehrt	41
2.8 Elektrische Leistung	44
2.9 Übungsaufgaben zu Kapitel 2	50
3 Mehrphasensysteme	54
3.1 Das allgemeine Mehrphasensystem	55
3.1.1 Die Leistung des allgemeinen Mehrphasensystems	58
3.2 Symmetrische Mehrphasensysteme	61
3.3 Spezielle Mehrphasensysteme	64
3.3.1 Das symmetrische Zweiphasensystem	64
3.3.2 Das unsymmetrische Zweiphasensystem	65
3.3.3 Das symmetrische Dreiphasensystem	67
3.3.3.1 Das symmetrisch belastete Dreiphasensystem	73
3.3.3.2 Die Leistungsmessung im symmetrischen Dreiphasen- system	74
3.3.3.2.1 Wirkleistungsmessung	74
3.3.3.2.2 Blindleistungsmessung	78

	Seite
3.4 Oberschwingungen im symmetrischen Drehstromsystem	79
3.5 Übungsaufgabe zu Kapitel 3	83
4 Die Drehstromleitung	87
4.01 Die Leitungsgleichungen	87
4.02 Deutung des Ergebnisses	93
4.03 Die natürliche Leistung	97
4.04 Die verlustlose Leitung	99
4.05 Die Ersatzschaltung der Drehstromleitung	105
4.06 Das Betriebsdiagramm der Leitung	107
4.07 Die Ersatzschaltung von Leitungen unter 500 km Länge	111
4.08 Die experimentelle Ermittlung der Impedanzen der Ersatzschaltung und der Leitungskonstanten	113
4.08.1 Der Kurzschlußversuch	114
4.08.2 Der Leerlaufversuch	115
4.09 Die Berechnung des Spannungsabfalles einer Leitung	116
4.10 Der Spannungsabfall bei Leitungen mit Zwischenentnahmen	119
4.10.1 Die Berechnung des Spannungsabfalles bei Fernübertragungsleitungen mit Zwischenentnahmen	119
4.10.2 Die Berechnung des Spannungsabfalles bei Nieder- und Mittelspannungsleitungen mit Zwischenentnahmen	121
4.10.2.1 Der Spannungsabfall bei verteilter Belastung	126
4.10.2.2 Der Verlauf des Spannungsbetrages längs Nieder- und Mittelspannungsleitungen	127
4.11 Das Verwerfen der Lasten und die zweiseitig gespeiste Leitung	129
4.12 Die Bestimmung der Stromverteilung in vermaschten Netzen	134
4.13 Übungsaufgaben zu Kapitel 4.	142
5 Der Transformator	147
5.1 Bezeichnung und Schaltung der Transformatoren	147
5.2 Die Ersatzschaltung des Drehstromtransformators	151
5.3 Kurzschluß- und Leerlaufversuch	154
5.3.1 Der Kurzschlußversuch	155
5.3.2 Der Leerlaufversuch	156
5.4 Der Spannungsabfall im Transformator	158
5.5 Parallelbetrieb von Transformatoren	159
5.6 Der wirtschaftliche Einsatz parallel geschalteter Transformatoren	164
5.7 Der Transformator im Netzverband	165
5.8 Übungsaufgabe zu Kapitel 5	167
6 Die Leitungskonstanten	169
6.1 Der ohmsche Widerstand	169
6.2 Die Ableitung g_B	174
6.3 Induktivitäten von Leitungen	175
6.3.01 Das magnetische Feld eines stromdurchflossenen, langen, kreiszylindrischen Leiters	176
6.3.02 Das magnetische Feld einer Leiterschleife, ihre Induktivität und der mit ihr verkettete Fluß	178
6.3.03 Der Einfluß weiterer stromführender Leiter auf eine Leiterschleife	182

	Seite
6.3.04 Induktivitäten von Mehrleitersystemen	185
6.3.05 Induktivitäten und Ersatzschaltung des Dreileitersystems	188
6.3.06 Die Ersatzschaltung des Vierleitersystems	191
6.3.07 Induktivitäten und Ersatzschaltungen von Doppelleitungen	192
6.3.08 Induktivitäten und Ersatzschaltungen verdrillter Leitungen	194
6.3.09 Die Berücksichtigung der Magnetisierbarkeit von Stahlseilen	198
6.3.10 Die Erde als stromführender Leiter	198
6.3.11 Induktivitäten und Flußkoeffizienten von Bündelleitern	202
6.3.12 Die Verallgemeinerung der Flußkoeffizienten auf Leiter beliebigen Querschnitts	207
6.3.13 Die näherungsweise Berechnung der Induktivitäten von Sammelschienen	209
6.4 Kapazitäten von Leitungen	212
6.4.01 Das elektrische Feld eines langgestreckten Leiters mit kreisförmigem Querschnitt	212
6.4.02 Die Kapazität eines Koaxialkabels	214
6.4.03 Die Kapazität einer Leiterschleife	215
6.4.04 Der Einfluß der Erde auf das elektrische Feld	217
6.4.05 Teilkapazitäten von n Leitern über Erde	220
6.4.06 Die Berechnung der Schleifenkapazität und der Erdkapazität einer Leiterschleife	222
6.4.07 Betriebs- und Erdkapazität der symmetrisch gebauten Drehstromleitung ohne Erdseil	228
6.4.08 Betriebs- und Erdkapazität der symmetrischen Drehstromleitung mit Erdseil	229
6.4.09 Betriebs- und Erdkapazität verdrillter Leitungen	231
6.4.10 Kapazitäten von Doppelleitungen	235
6.4.11 Kapazitäten von Leitungen aus Bündelleitern	237
6.4.12 Die kapazitive Beeinflussung von Leitungen	239
6.4.13 Die Berechnung der Randfeldstärke	244
6.5 Übungsaufgaben zu Kapitel 6	247
7 Der Erdschluß im isoliert betriebenen und im gelöschten Netz	256
7.1 Die Betriebsweisen von Netzen	256
7.2 Der Erdschluß im isoliert betriebenen Drehstromnetz geringer Ausdehnung	259
7.3 Der Erdschluß im gelösch betriebenen Netz geringer Ausdehnung	266
7.4 Der Doppelerdschluß im isolierten und im gelöschten Netz	271
7.5 Übungsaufgabe zu Kapitel 7	272
8 Der Kurzschluß im Drehstromnetz	275
8.1 Dreipoliger Kurzschluß hinter dem Transformator	276
8.2 Dreipoliger Kurzschluß der Synchronmaschine	279
8.3 Dreipoliger Kurzschluß im Netz	282
8.4 Die Kurzschlußberechnung mit 10 kV als Bezugsspannung	290
8.5 Die thermische Kurzschlußbeanspruchung	292
8.6 Übungsaufgabe zu den Kapiteln 8 und 10	295
9 Das Verfahren der symmetrischen Komponenten zur Behandlung unsymmetrischer Fehler	298
9.1 Herleitung der Komponenten-Ersatzschaltungen eines zyklisch symmetrischen Netzes	299

	Seite
9.2 Die Verknüpfung der Komponenten-Ersatzschaltungen eines Drehstromnetzes zur Darstellung unsymmetrischer Fehler	304
9.2.1 Der zweipolige Kurzschluß	306
9.2.2 Der zweipolige Erdkurzschluß	307
9.2.3 Der einpolige Erdschluß bzw. Erdkurzschluß	308
9.3 Die Komponenten-Ersatzschaltungen der einzelnen Anlagenteile	309
9.4 Die Berücksichtigung von Fehlerwiderständen	319
9.5 Leiterunterbrechungen und Doppelfehler	322
9.5.1 Leiterunterbrechungen	323
9.5.2 Doppelfehler	327
9.6 Übungsaufgabe zu Kapitel 9	329
10 Die mechanischen Kräfte im elektrischen und magnetischen Feld	332
10.1 Berechnung der Kraft auf die Leiter einer Schleife aufgrund ihres elektrischen Feldes	333
10.2 Berechnung der Kraft auf die Leiter einer Schleife aufgrund ihres magnetischen Feldes	334
10.2.1 Leiter mit rundem Querschnitt	334
10.2.2 Leiter mit rechteckigem Querschnitt	336
10.3 Bestimmung der Kräfte aus der Feldenergie	338
11 Die Stabilität der Energieübertragung mit Drehstrom	341
11.1 Die statische Stabilität von Energieübertragungssystemen	341
11.1.1 Einspeisung einer Synchronmaschine in ein Netz starrer Spannung	342
11.1.1.1 Ermittlung der von einer Synchronmaschine erzeugten Leistung	342
11.1.1.2 Das Stabilitätskriterium einer Synchronmaschine	347
11.1.1.3 Die Grenzleistung eines Übertragungssystems	350
11.1.2 Die statische Stabilität bei zwei Synchronmaschinen	355
11.1.3 Mittel zur Erhöhung der übertragbaren Leistung	363
11.1.3.1 Verbesserung der Stabilität durch Einbau von Kondensatoren in das Übertragungsnetz	363
11.1.3.2 Verbesserung der Stabilität durch zusätzliche Entnahme von Blindleistung	365
11.2 Dynamische Stabilität	367
11.2.1 Die Schwingungsgleichung der Synchronmaschine	370
11.2.2 Der Flächensatz	372
11.2.3 Numerische Integration der Schwingungsgleichung	377
Literaturverzeichnis	382
Sachverzeichnis	384

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

1. Beispiele für die verschiedenen Schreibweisen

f	Augenblickswert einer periodischen Zeitfunktion $f(t)$
\bar{f}	lineares Mittel einer periodischen Zeitfunktion $f(t)$
w_+, w_-	betragsmäßig größter positiver bzw. negativer Wert einer Wechselgröße $w(t)$
$ \overline{w} $	Gleichrichtwert einer Wechselgröße $w(t)$
\underline{w}	komplexe Zeitfunktion
\underline{w}^*	konjugiert komplexe Zeitfunktion
\overline{W}	Effektivwert einer Wechselgröße $w(t)$
\hat{a}	Scheitelwert einer harmonischen Funktion
\underline{U}_-	Gleichspannung
$\underline{U}, \underline{I}, \underline{Z}$	Zeiger (Effektivwerte)
$\underline{E}, \underline{H}$	Vektoren (der elektrischen und magnetischen Feldstärke)
$\text{Re } \underline{U}$	Realteil von \underline{U}
$\text{Im } \underline{U}$	Imaginärteil von \underline{U}
$\text{Arc } \underline{U}$	Winkel zwischen der reellen Achse und dem Zeiger \underline{U}
r, l, g, c	auf die Längeneinheit bezogene Größen
u_k, x_d	auf Nennwerte bezogene (dimensionslose) Größen

2. Indizes

0	Nullkomponente	}	der symmetrischen Komponenten (hochgestellte Indizes)
m	Mitkomponente		
g	Gegenkomponente		
$'$	subtransienter Bereich	}	beim Kurzschlußstrom der Synchronmasch. (hochgestellte Indizes)
$'$	transienter Bereich		
d	magnetische Längsachse	}	der Synchronmaschine
q	magnetische Querachse		
l	Längsrichtung	}	beim Spannungsabfall
q	Querrichtung		
A	Anfang		
E	Ende		
$0, l$	Leerlauf		
k	Kurzschluß		
w	Wirkanteil		
b	Blindanteil		
v	vorlaufend		
r	rücklaufend		
e	elektrisch		
m	magnetisch		
L	Leiter, Leitung		
M	Mp-Leiter		
B	Betrieb		

X**Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen**

<i>D</i>	Drossel
<i>DE</i>	Doppelerdschluß
<i>E</i>	Erde, Erdschluß
\bar{E}	Erdseil
<i>m</i>	Mittelwert
<i>N</i>	Nenn-
<i>S</i>	Schleife
<i>Sp</i>	Speise-
<i>Sq</i>	Spannungs- bzw. Stromquelle
<i>St</i>	Sternpunkt
<i>Z</i>	Zusatz

3. Lateinische Buchstaben

<i>a</i>	Dämpfungsmaß
<i>a</i>	Anfangswert des Gleichstromgliedes
<i>a_{ii}, a_{ik}</i>	Flußkoeffizienten bzw. Potentialkoeffizienten
<i>a_n</i>	Schlaglänge bei Leiterseilen
\underline{a}	$= \sqrt{120^\circ} = e^{j120^\circ}$
<i>A</i>	Arbeit
<i>A</i>	Abstand
<i>A</i>	Dämpfungskonstante des Läufers der Synchronmaschine
<i>b</i>	Phasenmaß
<i>B</i>	magnetische Induktion
<i>B</i>	= Im \underline{Y} Blindleitwert, Suszeptanz
<i>c</i>	Lichtgeschwindigkeit
<i>c</i>	spezifische Wärme
<i>c</i>	Federkonstante
<i>C</i>	Kapazität
<i>d</i>	Länge eines Leitungsabschnittes
<i>dF</i>	Flächenelement
<i>ds</i>	Wegelement
<i>D</i>	elektrische Verschiebung
<i>D</i>	Durchmesser
<i>D</i>	Determinante
<i>D_{ik}</i>	Abstand eines Leiters <i>i</i> von einem Leiter <i>k</i>
<i>e_m</i>	Höchstwert der Einschwingspannung
<i>E</i>	elektrische Feldstärke
<i>E</i>	Elastizitätsmodul
<i>E</i>	Polradspannung
<i>E'</i>	transiente treibende Spannung
<i>E''</i>	subtransiente treibende Spannung
<i>f</i>	= 1/T Frequenz
<i>f</i>	Durchhang einer Leitung
<i>f_e</i>	Einschwingfrequenz
<i>F</i>	Fläche, Querschnitt
<i>g</i>	Grundschwingungsgehalt
<i>g</i>	Erdbeschleunigung
<i>g_B</i>	Ableitung pro Längeneinheit bei Drehstromleitungen
<i>g_{pq}</i>	mittlerer geometrischer Abstand eines Leiters <i>p</i> von einem Leiter <i>q</i> .
\underline{g}	Fortpflanzungsmaß
\bar{G}	Stromdichte

G	= Re \underline{Y} ohmscher Leitwert, Konduktanz
G	Gewicht
h	Höhe eines Leiters über Erde
H	magnetische Feldstärke
I	Strom
I_a	Ausschaltwechselstrom
I_k	Dauerkurzschlußstrom
I'_k	Übergangs-Kurzschlußwechselstrom
I''_k	Anfangs-Kurzschlußwechselstrom
I_s	Stoßkurzschlußstrom
I_{th}	Einsekundenstrom
I	Trägheitsmoment
k, n, l, i	natürliche Zahlen
k	Oberschwingungsgehalt
k	Kennzahl von Transformatoren
k	Korrekturfaktor zur Berechnung der Kraft
K	Kraft
K_{ik}	Teilkapazität zwischen zwei Leitern i und k
l	Länge eines Leitungsabschnittes
L	Induktivität
m	Anzahl der Phasen
m	Masse
m, n	Faktoren zur Berechnung des thermisch wirksamen Kurzschlußstromes
M	Gegeninduktivität
\underline{M}_S	= $\underline{M}_P + j\underline{M}_Q$ Summe von Scheinleistungsmomenten
M	mechanisches Moment
n	Anzahl der Leiter eines Mehrleitersystems
p	Polpaarzahl
p	Anzahl der Zweige eines Netzwerkes
P	Wirkleistung
q	Anzahl der Knoten eines Netzwerkes
Q	Ladung
Q	Blindleistung
Q	Wärmemenge
r	Radius
r	Reflexionsfaktor
R	= Re \underline{Z} ohmscher Widerstand
s	Leitungslänge
S	Stromdichte
\underline{S}	= $P + jQ$ Scheinleistung
S	Anfangsteilheit
S_a	Netzausschaltleistung
S'_k	Anfangs-Kurzschlußwechselstromleistung
S_{th}	Nenn-Kurzzeit-Stromdichte
t	Zeit
t_a	Schaltverzug
T	Periodendauer
T_a	Anlaufzeitkonstante
T_g	Zeitkonstante des Gleichstromgliedes
T_m	Benutzungsdauer der Höchstlast
T'	transiente Zeitkonstante
T''	subtransiente Zeitkonstante

XII

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

\ddot{u}	Übersetzung
U	Spannung
v	Geschwindigkeit
V	Potential
V	Verluste
w	Windungszahl
w	Anzahl der Spannungsquellen
W_m	magnetische Energie
X	= Im Z Reaktanz
X_d	synchrone Längsreaktanz
X'_d	transiente Längsreaktanz
X''_d	subtransiente Längsreaktanz
Y	Scheinleitwert, Admittanz
z	Koordinate
Z	Impedanz, Scheinwiderstand
Z_W	Wellenwiderstand

4. Griechische Buchstaben

α	Winkel
α	Dämpfungskonstante
β	Phasenkonstante
γ	Fortpflanzungskonstante
γ	Überschwingfaktor
δ	Ersatzradius der Erdrückleitung
ε	$\varepsilon_0 \varepsilon_r$ Dielektrizitätskonstante
ζ	Koordinate
η	Wirkungsgrad
ϑ	Phasenwinkel
ϑ	Polradwinkel
ϑ	Temperatur
ϑ_0	Materialkonstante
θ	elektrische Durchflutung
θ	Trägheitsmoment
\varkappa	elektrische Leitfähigkeit
\varkappa	Faktor zur Berechnung des Stoßkurzschlußstromes
λ	Wellenlänge
λ_n	Schlaglängenverhältnis
μ	= $\mu_0 \mu_r$ Permeabilität
μ	Faktor zur Berechnung des Ausschaltwechselstromes
ϱ	Radius
ϱ	Dichte
σ	Aufschwingfaktor
τ	Zeitpunkt
φ	Phasenwinkel
Φ	magnetischer Fluß
ω, ω_0	Kreisfrequenz