

TEUBNERS TECHNISCHE LEITFÄDEN

BAND 24

DIE ELEKTRISCHEN MASCHINEN

EINFÜHRUNG IN IHRE THEORIE UND PRAXIS

VON

DR.-ING. M. LIWSCHITZ

OBERINGENIEUR DER SIEMENS-SCHUCKERT-WERKE

MIT 284 ABBILDUNGEN UND 13 TAFELN



1926

SPRINGER FACHMEDIEN WIESBADEN GMBH

ISBN 978-3-663-15547-8 ISBN 978-3-663-16119-6 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-663-16119-6
SOFTCOVER REPRINT OF THE HARDCOVER 1ST EDITION 1926

**ALLE RECHTE,
EINSCHLIESSLICH DES ÜBERSETZUNGSRECHTS VORBEHALTEN**

Vorwort.

An ausführlichen und umfassenden Werken, die die Theorie und Praxis der elektrischen Maschine behandeln, fehlt es nicht. Der Zweck des vorliegenden Bandes der Sammlung ist, ihren Zielen entsprechend, dem Anfänger, Studierenden oder jüngeren Ingenieur, *das Fundament für das tiefere Eindringen in die Theorie der elektrischen Maschine zu geben*. Es soll ihm der *Zusammenhang zwischen den Vorgängen in der elektrischen Maschine und den Naturgesetzen* dargetan werden, dessen Verständnis ihm erfahrungsgemäß hauptsächlich Schwierigkeiten bereitet. Deshalb sind Nebenerscheinungen hier außer acht gelassen und nur die wichtigeren Vorgänge, die sich in der elektrischen Maschine abspielen, behandelt worden. Die Theorie der einzelnen Maschinengattungen konnte so weit entwickelt werden, daß der Studierende die Grundlagen, die er für die *Berechnung der Maschine* und den *Entwurf der Wicklung* braucht, erhält. Entsprechend dem oben gekennzeichneten Zweck des Bandes ist auf die Konstruktion nur insoweit eingegangen worden, als es zum Verständnis der physikalischen Vorgänge wünschenswert erschien.

Die *Ordnung des Stoffes* entspricht dem Ziel. In den ersten drei Kapiteln sind die Grundgesetze aus der Theorie der Wechselströme, der magnetische Kreis der elektrischen Maschine und der einfachste elektrische Apparat, der Transformator, behandelt. Es folgen die elektrischen Maschinen, die nach den Transformatorgesetzen arbeiten, die Asynchronmaschine und deren Spezialfall, die Synchronmaschine. Erst dann kommen die Kommutatormaschinen, die Gleichstrommaschine, der Einankerumformer und der Wechselstrom-Kommutatormotor, an die Reihe.

Am Schluß des Buches wird ein kurzes *Literaturverzeichnis* gegeben, in dem auf die Quellen hingewiesen wird, wo eine ausführliche Behandlung des Stoffes zu finden ist, oder welche die gewählte Darstellung zur Grundlage nimmt. Im Text wird auf dieses Literaturverzeichnis durch entsprechende, in eckige Klammern gesetzte Ziffern hingewiesen.

Charlottenburg, im März 1926.

M. Liwtschitz.

Inhaltsverzeichnis.

I. Die Grundgesetze.		Seite
1. Das Faradaysche Induktionsgesetz		1
2. Erzeugung eines einphasigen Wechselstromes		2
3. Wechselstromkreis mit Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität		5
4. Darstellung von Wechselströmen durch Vektoren		10
5. Die Leistung eines einphasigen Wechselstromes		13
6. Erzeugung von Mehrphasenströmen		15
7. Das Biot-Savartsche Gesetz		19
II. Der magnetische Kreis. Verluste und Erwärmung der elektrischen Maschine.		
1. Das Ohmsche Gesetz des magnetischen Kreises		20
2. Bestimmung der Erreger-Amperewindungen für den magnetischen Kreis der elektrischen Maschine		22
3. Die Polstreuung		27
4. Magnetisierung mit Wechselstrom		29
5. Die Streuung der in Nuten gebetteten Wicklungen		30
a) Die Nutenstreuung		31
b) Die Zahnkopfstreuung		32
c) Die Spulenkopfstreuung		34
6. Das Material des magnetischen Kreises		34
7. Berechnungsbeispiel		36
8. Die Leerlaufcharakteristik. Die Ankerrückwirkung		38
9. Die Eisenverluste		39
10. Die Erwärmung der elektrischen Maschine		42
11. Einteilung der elektrischen Maschinen		44
III. Der Transformator.		
1. Das Spannungsdiagramm des Transformators im Leerlauf		45
2. Der Transformator bei Last		47
3. Die sekundäre Streuung		49
4. Das Spannungsdiagramm des Transformators bei Last		51
5. Die Spannungsänderung des Transformators		53
6. Berechnung des Magnetisierungsstromes J_μ und des Leerlaufstromes J_0		54
7. Berechnung der Streuung		56
8. Der Leerlauf- und der Kurzschlußversuch		58
9. Der Dreiphasentransformator		60
10. Der Spartransformator		62
11. Parallelarbeiten von Transformatoren		63
12. Der Wirkungsgrad des Transformators		64
13. Aufbau und Kühlung der Transformatoren		65
IV. Die Wicklungen der elektrischen Maschinen.		
A. Die Gleichstrom-Ankerwicklungen.		
1. Die Ringwicklung		68
2. Die Trommelwicklung. Die Schleifen- und die Wellenwicklung		70
3. Der Wicklungsschritt		71
4. Die Feldverschiebung und die Anzahl der Ankerzweige		73
5. Die Reihenparallelwicklung		76

6. Die Treppenwicklung	77
7. Das Spannungspolygon	78
8. Die Anzahl der phasengleichen Punkte	80
9. Die Ausgleichsverbindungen	82
10. Ausführung der Gleichstrom-Ankerwicklungen	83

B. Die Wechselstromwicklungen.

11. Die Dreiphasenwicklungen	84
12. Dreiphasenwicklungen mit ungleichartigen Spulen und Spulenköpfen in zwei Etagen	86
13. Dreiphasenwicklungen mit ungleichartigen Spulen und Spulenköpfen in drei Etagen	87
14. Dreiphasenwicklungen mit gleichartigen Spulen.	88
15. Die Bruchlochwicklungen.	89
16. Die Stabwicklungen	90
17. Die Zweiphasen- und Einphasenwicklungen	91
18. Ausführung der Spulenwicklungen	92
19. Die Käfigwicklung.	93

V. Die induzierte EMK und die Feldkurve einer Wechselstrom- und einer Gleichstromwicklung.

1. Die in einer Wechselstromwicklung induzierte EMK. Der Wicklungsfaktor.	94
2. Einfluß der dritten Oberwelle	97
3. Die in der Wicklung einer Gleichstrommaschine induzierte EMK	99
4. Die MMK-Kurve einer Einphasenwicklung. Das Wechselfeld	99
5. Die MMK-Kurve einer Dreiphasenwicklung. Das Drehfeld	102
6. Einfluß der Oberwellen	106
7. Wicklungen mit mehreren Nuten pro Pol und Strang. Der Wicklungsfaktor	106
8. Die Form der MMK-Kurve bzw. der Feldkurve einer verteilten Wicklung	107
9. Zerlegung eines Wechselfeldes in zwei Drehfelder.	110
10. Die doppelt verkettete Streuung	110

VI. Die Asynchronmaschine.

1. Die Mehrphasen-Asynchronmaschine als allgemeiner Transformator	113
2. Das Drehmoment und die Grundgleichungen der Mehrphasen-Asynchronmaschine	117
3. Leerlauf und Kurzschluß	121
4. Das Heylanddiagramm	123
5. Konstruktion des Heylanddiagramms aus Leerlauf und Kurzschluß	126
6. Arbeitsweise als Generator und Bremse	129
7. Das genaue Kreisdiagramm	131
8. Die Leistungslinie und die Drehmomentenlinie. Das Kippmoment	131
9. Einfluß der Streuung und der Widerstände der Wicklungen auf die Arbeitsweise der Asynchronmaschine	135
10. Anlassen des Mehrphasenmotors mit Schleifringläufer	136
11. Drehzahlregelung des Mehrphasenmotors	139
a) Drehzahlregelung mittels Widerstände im Läuferkreis	139
b) Drehzahlregelung durch Polumschaltung	139
c) Kaskadenschaltung zweier Asynchronmotoren	140
d) Drehzahlregelung mit Hilfe eines besonderen Regelsatzes. Phasenkompensation	142

	Seite
12. Anlassen des Mehrphasenmotors mit Kurzschlußläufer	145
13. Der Einphasen-Asynchronmotor	147
a) Das gleichsinnige und das inverse Drehfeld	147
b) Vergleich mit dem Dreiphasenmotor	149
c) Das Kreisdiagramm des Einphasenmotors	150
d) Anlassen des Einphasenmotors	151
14. Dimensionierung der Asynchronmaschine	152

VII. Die Synchronmaschine.

1. Die Synchronmaschine als Stromtransformator	154
2. Die Leerlaufcharakteristik	156
3. Das Spannungs- und das Amperewindungsdiagramm des Synchrongenerators mit Vollpolen	157
4. Die Ankerrückwirkung	158
5. Die charakteristischen Kurven der Synchronmaschine	161
a) Die Kurzschlußcharakteristik	161
b) Das Potier-Dreieck und die $\cos \varphi = 0$ -Charakteristik	162
c) Die Spannungsänderung	163
d) Die Regulierungskurve und die äußere Charakteristik	164
6. Der Synchrongenerator mit Einzelpolen	165
a) Zerlegung der Anker-MMK in Längs- und Querampere- windungen	165
b) Die rückwirkenden Anker-Längsamperewindungen	166
c) Die Anker-Queramperewindungen und der Querfluß	167
7. Das Spannungsdiagramm des Synchrongenerators mit Einzelpolen	168
8. Der Einphasengenerator	170
a) Zerlegung des Wechselfeldes des Ankers in das gleichsinnige und das inverse Drehfeld	170
b) Einfluß des inversen Drehfeldes auf die Form der Spannungs- kurve	171
c) Unterdrückung des inversen Drehfeldes mittels Dämpfer- wicklung	172
d) Vergleich der Einphasen- und der Dreiphasenmaschine	174
9. Parallelarbeiten und Parallelschalten von Synchronmaschinen	175
a) Einfluß des Winkels Θ auf die Größe der Wirkleistung	176
b) Einfluß der Erregung im Parallelbetrieb. Ausgleichströme	177
c) Parallelschalten von Synchronmaschinen	179
10. Der Synchronmotor	180
a) Das Spannungsdiagramm des Synchronmotors	180
b) Das Kreisdiagramm der Synchronmaschine für konstante Klemmenspannung und konstanten Erregerstrom	181
c) Konstruktion der Leistungslinie	182
d) Einfluß der Erregung auf die Überlastungsfähigkeit des Synchronmotors	184
e) Das Kreisdiagramm des Synchronmotors für konstante Klemmenspannung und konstante Leistung	185
f) Die V-Kurven des Synchronmotors	186
g) Anlassen des Synchronmotors	187
h) Der Synchronmotor als Blindleistungsmaschine	187
11. Das Pendeln von Synchronmaschinen	188
a) Das synchronisierende Moment der Synchronmaschine. Eigenschwingungen als Folge von Belastungstößen	188
b) Erzwungene Schwingungen als Folge der Ungleichförmigkeit des Antriebes	190
c) Das Verhältnis der Schwingungsamplitude im Parallel- betrieb zu der im Einzelbetrieb. Der Vergrößerungsfaktor	192

d) Die Eigenschwingungszahl der Synchronmaschine. Die Gefahr der Resonanz	195
e) Verbesserung des Parallelbetriebes mittels einer Dämpferwicklung	196

VIII. Die Gleichstrommaschine.

1. Die Wirkung des Kommutators	197
2. Arten der Polerregung	199
a) Die Reihenschlußerregung	199
b) Die Nebenschlußerregung	200
c) Die Doppelschlußerregung	201
3. Die Ankerrückwirkung	201
a) Die quermagnetisierende Wirkung des Ankers	203
b) Die längsmagnetisierende Wirkung des Ankers	205
c) Berechnung der Magnetamperewindungen bei Belastung	206
4. Die Kommutierung	209
a) Die Übergangskurve	210
b) Die Widerstandskommutierung	211
c) Bedingung für die Stromdichte Null unter der ablaufenden Bürstenkante	214
d) Einfluß der EMK der Selbstinduktion auf die Kommutierung	215
e) Einfluß des Magnetfeldes auf die Kommutierung	216
f) Einfluß des Ankerfeldes auf die Kommutierung	217
g) Erzeugung eines besonderen Wendefeldes mittels Wendepole	218
h) Aufhebung der MMK des Ankers mittels einer Kompensationswicklung	219
i) Die Größe der EMK der Selbstinduktion der kurzgeschlossenen Spule	221
k) Die Stärke des Wendepolfeldes	222
5. Die Spannungsgleichung eines Generators und eines Motors	225
6. Die charakteristischen Kurven des Gleichstromgenerators	225
a) Der fremderregte Generator	225
b) Der Reihenschlußgenerator	228
c) Der Nebenschlußgenerator	229
d) Der Doppelschlußgenerator	231
7. Parallelschalten und Parallelarbeiten von Gleichstromgeneratoren	232
8. Das Drehmoment des Gleichstrommotors	234
9. Drehrichtung der Nebenschluß- bzw. der Reihenschlußmaschine als Generator und Motor	234
10. Die charakteristischen Kurven des Nebenschlußmotors	237
11. Die charakteristischen Kurven des Reihenschluß- und des Doppelschlußmotors	240

IX. Der Einankerumformer.

1. Aufhebung der MMK des Gleichstromes durch die MMK des Wirkstromes	242
2. Die Spannungs- und Stromverhältnisse des Einankerumformers	244
3. Die Stromwärmeverluste des Einankerumformers	247
4. Verhältnis der Leistung des Einankerumformers zu der der Gleichstrommaschine gleicher Dimensionen	252
5. Die Kommutierung des Einankerumformers	253
6. Spannungsregelung des Einankerumformers	254
a) Spannungsregelung mittels Drosselspule	255
b) Spannungsregelung mittels Drehtransformators	255
7. Anlassen und Parallelarbeiten von Einankerumformern	257
8. Der Kaskadenumformer	259

	Seite
a) Die Drehzahl des Kaskadenumformers und die Leistungsverteilung auf beide Maschinen	259
b) Die Spannungsregelung des Kaskadenumformers	261
c) Das Anlassen des Kaskadenumformers	261
X. Die Wechselstrom-Kommutatormaschine.	
A. Die Einphasen-Kommutatormaschine.	
1. Der Gleichstromanker im Wechselfelde	263
a) Die EMK der Rotation der Ankerwicklung	263
b) Die EMK der Transformation der Ankerwicklung	264
c) Das Drehmoment	266
d) Die Kompensationswicklung	267
e) Die EMK der Transformation der kurzgeschlossenen Spule und die Wendefelder der Einphasen-Kommutatormaschine	268
2. Der Einphasen-Reihenschlußmotor	272
a) Das Spannungsdiagramm des Einphasen-Reihenschlußmotors.	272
b) Die Kommutierung des Einphasen-Reihenschlußmotors.	274
c) Der doppelt gespeiste Motor	278
3. Der Repulsionsmotor	279
a) Der Repulsionsmotor mit einfachem Bürstensatz.	279
b) Der Repulsionsmotor mit doppeltem Bürstensatz	285
c) Der kompensierte Repulsionsmotor	286
4. Der Einphasen-Nebenschlußmotor	289
B. Die Mehrphasen-Kommutatormaschine.	
5. Der Gleichstromanker im Drehfelde	292
a) Die Wirkung des Kommutators	292
b) Die magnetische Achse eines Mehrphasenankers	296
c) Einfluß der Bürstenstellung auf die Phase der Läufer- und der Ständer-EMKe	299
d) Das Drehmoment der Mehrphasen-Kommutatormaschine	299
e) Die Kommutierung der Mehrphasen-Kommutatormaschine	299
6. Der Dreiphasen-Reihenschlußmotor	301
a) Der Dreiphasen-Reihenschlußmotor mit einfachem Bürstensatz. Das Spannungsdiagramm	301
b) Der Leistungsfaktor des Dreiphasen-Reihenschlußmotors.	307
c) Die Stabilität des Dreiphasen-Reihenschlußmotors	308
d) Der Dreiphasen-Reihenschlußmotor mit doppeltem Bürstensatz	311
7. Der Dreiphasen-Nebenschlußmotor	313
a) Der ständer- und der läufergespeiste Dreiphasen-Nebenschlußmotor	313
b) Die Phasenkompensation	318
c) Das Spannungsdiagramm des Dreiphasen-Nebenschlußmotors.	319
d) Die Kommutierung	322
8. Der Phasenschieber	322
Literaturverzeichnis	327
Sachverzeichnis	332