

Eckhard Spring

# Elektrische Maschinen

Eine Einführung

2., durchgesehene Auflage

Mit 229 Abbildungen



Springer

# Inhaltsverzeichnis

<b>Die elektrischen Maschinen – Eine Kurzgeschichte der elektrischen Energietechnik .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Gleichstrommaschine .....</b>	<b>5</b>
1.1 Elektromechanische Energiewandlung .....	5
1.1.1 Generatorbetrieb .....	6
1.1.2 Motorbetrieb .....	9
1.1.3 Übergang vom Motor- in den Generatorbetrieb .....	14
1.2 Die Grundform der Gleichstrommaschine .....	16
1.2.1 Generator .....	17
1.2.2 Motor .....	19
1.3 Der Aufbau der Gleichstrommaschine .....	21
1.3.1 Leiterschleife .....	22
1.3.2 Doppel-T-Anker .....	23
1.3.3 Ringanker .....	23
1.3.4 Trommelanker .....	26
1.4 Gleichstromgenerator .....	28
1.4.1 Fremderregter Generator .....	29
1.4.2 Nebenschlußgenerator .....	34
1.4.3 Reihenschlußgenerator .....	40
1.4.4 Doppelschlußgenerator .....	43
1.5 Gleichstrommotor .....	45
1.5.1 Fremderregter Motor .....	45
1.5.2 Nebenschlußmotor .....	57
1.5.3 Reihenschlußmotor .....	60
1.6 Die magnetischen Felder der Gleichstrommaschine .....	69
1.6.1 Das Ankerfeld .....	71
1.6.2 Wendepolwicklung .....	72
1.6.3 Kompensationswicklung oder zusätzliche Erregerwicklung .....	73
1.6.4 Klemmenbezeichnungen bei der Gleichstrommaschine .....	75
1.7 Verluste und Wirkungsgrad .....	76
1.7.1 Die Ummagnetisierungsverlustleistung .....	77
1.7.2 Die Wirbelstromverlustleistung .....	79
1.7.3 Reibungsverlustleistung und weitere Verluste .....	81
1.7.4 Der Leistungsfluß der Maschine .....	82

1.7.5 Der Wirkungsgrad der Maschine .....	83
1.8 Weitere Beispiele für den Einsatz der Gleichstrommaschine .....	94
<b>2 Transformator</b> .....	<b>103</b>
2.1 Idealer Transformator .....	104
2.1.1 Das Spannungsgleichgewicht .....	104
2.1.2 Der Transformator als Spannungswandler .....	109
2.1.3 Das Durchflutungsgleichgewicht .....	111
2.1.4 Der Transformator als Stromwandler .....	112
2.1.5 Der belastete Transformator .....	112
2.2 Realer Transformator .....	115
2.2.1 Eisenverlustleistung .....	115
2.2.1.1 Der Transformator mit Eisenverlustleistung im Leerlauf .....	119
2.2.1.2 Der Transformator mit Eisenverlustleistung bei Belastung .....	121
2.2.2 Kupfer- oder Stromwärmeverlustleistung in den Wicklungen .....	123
2.2.3 Magnetischer Streufluß .....	124
2.3 Ersatzschaltung des Transformators .....	130
2.3.1 Idealer Transformator mit gleichen Wicklungswindungszahlen .....	130
2.3.2 Realer Transformator mit gleichen Wicklungswindungszahlen .....	133
2.3.3 Idealer Transformator mit ungleichen Wicklungswindungszahlen ..	136
2.3.4 Realer Transformator mit ungleichen Wicklungswindungszahlen ...	142
2.3.5 Vereinfachte Ersatzschaltung .....	144
2.4 Untersuchung und Betrieb des Transformators .....	147
2.4.1 Der Leerlaufversuch .....	147
2.4.2 Der Kurzschlußversuch .....	150
2.4.3 Der Wirkungsgrad .....	155
2.4.4 Stoßkurzschlußstrom und Einschaltstromstoß .....	170
2.4.5 Parallelbetrieb von Transformatoren .....	175
2.4.6 Wanderwellenverhalten des Transformators .....	178
2.5 Spannungs- und Stromwandler .....	181
2.5.1 Spannungswandler .....	182
2.5.2 Stromwandler .....	183
2.6 Dreiphasenwechselstrom- oder Drehstromtransformator .....	184
2.7 Spartransformator .....	205
2.8 Wachstumsgesetze .....	213
2.9 Dreiwicklungstransformator .....	218
<b>3 Asynchronmaschine</b> .....	<b>227</b>
3.1 Aufbau und Wirkungsweise der Asynchronmaschine .....	228
3.1.1 Der Aufbau der Maschine .....	228
3.1.2 Das Spannungsgleichgewicht auf der Statorseite .....	229
3.1.3 Die Entstehung des Drehfeldes .....	230

3.1.4	Das Drehfeld induziert in den Rotorleitern eine Spannung .....	235
3.1.5	Der Rotor dreht sich .....	236
3.1.6	Spannungs- und Durchflutungsgleichgewicht .....	243
3.1.7	Vor- und Nachteile des Asynchronmotors .....	244
3.2	Käfigläufer und Schleifringläufer .....	247
3.2.1	Das Drehmoment .....	247
3.2.2	Der Strom .....	251
3.2.3	Käfigläufer .....	252
3.2.4	Schleifringläufer .....	259
3.2.5	Möglichkeiten der Drehzahlverstellung .....	260
3.2.6	Drehrichtungsumkehr und Bremsen .....	262
3.3	Leistungsfluß des Asynchronmotors .....	262
3.4	Die Ersatzschaltung der Asynchronmaschine .....	270
3.4.1	Entwicklung der Ersatzschaltung .....	271
3.4.1.1	Die Ersatzschaltung für die Rotorseite .....	271
3.4.1.2	Die vollständige Ersatzschaltung .....	274
3.4.2	Leistungsfluß und Ersatzschaltung .....	275
3.4.3	Berechnung des Betriebsverhaltens der Maschine mit Hilfe der Ersatzschaltung .....	278
3.4.4	Die experimentelle Bestimmung der Ersatzschaltung .....	279
3.4.4.1	Der Kurzschlußversuch .....	282
3.4.4.2	Der Leerlaufversuch .....	285
3.4.5	Vereinfachte Ersatzschaltung für große Asynchronmaschinen .....	289
3.5	Das Kreisdiagramm der Asynchronmaschine .....	294
3.5.1	Die Impedanzortskurve für den Rotor .....	295
3.5.2	Die Admittanzortskurve für den Rotor .....	296
3.5.3	Die Ortskurve für den Rotorstrom .....	297
3.5.4	Das vereinfachte Kreisdiagramm für Maschinen großer Leistung ..	298
3.5.5	Das allgemeingültige Kreisdiagramm .....	301
3.5.6	Generatorbetrieb der Maschine .....	302
3.5.7	Bremsbetrieb .....	303
3.5.8	Experimentelle Ermittlung des Kreisdiagramms .....	304
3.6	Die Asynchronmaschine als Generator .....	308
3.6.1	Die Asynchronmaschine als Generator am Netz konstanter Spannung und Frequenz .....	309
3.6.2	Die Asynchronmaschine als Generator im Inselbetrieb .....	312
3.7	Blindstromkompensation bei der Asynchronmaschine .....	318
3.8	Die Asynchronmaschine am Netz variabler Frequenz .....	322
<b>4</b>	<b>Synchronmaschine .....</b>	<b>327</b>
4.1	Aufbau und Wirkungsweise der Synchronmaschine .....	327
4.1.1	Grundsätzlicher Aufbau .....	327
4.1.2	Inselbetrieb und Betrieb am Netz konstanter Spannung und Frequenz .....	328

4.1.3 Drehfeld und Motorbetrieb .....	329
4.1.4 Generatorbetrieb .....	332
4.1.5 Dampf- und Wasserkraftgeneratoren .....	332
4.2 Ersatzschaltung der Vollpolmaschine .....	337
4.2.1 Die Ersatzschaltung .....	337
4.2.2 Die Leerlaufkennlinie .....	340
4.2.3 Die Kurzschlußkennlinie .....	342
4.2.4 Die Synchronreaktanzen .....	345
4.3 Synchronisation .....	349
4.3.1 Dunkelschaltung .....	351
4.3.2 Gemischte Schaltung .....	353
4.4 Belastungseinstellung .....	354
4.4.1 Wirkleistungsverhältnisse .....	354
4.4.2 Blindleistungsverhältnisse .....	355
4.5 Das Stromdiagramm der Vollpolmaschine .....	359
4.5.1 Das Zeigerdiagramm .....	359
4.5.2 Das Stromdiagramm .....	360
4.5.3 Die Belastungsgrenzen .....	362
4.5.4 Belastungseinstellung im Stromdiagramm .....	363
4.6 Berechnung des Betriebsverhaltens der Vollpolmaschine .....	375
4.6.1 Generator- und Motorbetrieb .....	377
4.6.2 Blindleistungsabgabe und Blindleistungsaufnahme .....	380
4.7 Die Schenkelpolmaschine .....	388
4.7.1 Die Synchronreaktanzen der Vollpolmaschine .....	388
4.7.2 Die Reaktanzen der Schenkelpolmaschine .....	389
4.7.3 Messung der Reaktanzen der Schenkelpolmaschine .....	391
4.7.4 Wirkleistung und Blindleistung .....	391
4.8 Der Kurzschluß .....	394
4.8.1 Verlauf des Kurzschlußstroms .....	394
4.8.2 Die Reaktanzen der Maschine .....	395
4.8.3 Die Lenz'sche Regel .....	396
4.8.4 Die Zeitkonstanten der Maschine .....	398
4.8.5 Kurzschlußberechnung .....	398
4.9 Inselbetrieb .....	403
4.9.1 Belastungskennlinien .....	404
4.9.2 Regulierkennlinien .....	406
<b>5 Einphasenwechselstrommotoren .....</b>	<b>409</b>
5.1 Universalmotor .....	409
5.2 Asynchronmotor .....	411
5.3 Synchronmotor .....	417
<b>Literatur .....</b>	<b>419</b>
<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>425</b>