

<b>1 Grundlagen elektromechanischer Energiewandler</b> .....	1
1.1 Überblick und Bedeutung elektromechanischer Energiewandler. . .	1
1.2 Vielfalt elektrischer Maschinen .....	5
1.3 Grundgesetze der Mechanik, Elektromagnetik und Drehstromtechnik .....	10
1.3.1 Mechanische Grundgesetze. ....	11
1.3.2 Elektromagnetische Grundgesetze im Überblick .....	13
1.3.3 Erzeugung magnetischer Felder .....	14
1.3.4 Ampère'scher Durchflutungssatz und magnetischer Fluss . . .	15
1.3.5 Verminderung des Magnetisierungsbedarfs durch den Einsatz von Eisen .....	18
1.3.6 Das Induktionsgesetz .....	23
1.3.7 Die elektromagnetische Kraft .....	30
1.3.8 Flussverkettungen und Induktivitäten .....	34
1.3.9 Ummagnetisierungsverluste .....	37
1.3.10 Erzeugung eines Drehstromsystems .....	41
1.3.11 Strangspannung und verkettete Spannung .....	43
1.3.12 Leistungen in Gleich-, Wechsel- und Drehstromsystemen . . .	44
1.4 Elektromechanische Energiewandler .....	47
1.4.1 Grundsätzliches zur elektromechanischen Energiewandlung .....	47
1.4.2 Einfacher elektromechanischer Energiewandler. ....	49
1.4.3 Zählpeilsysteme .....	52
<b>2 Wicklungen für Drehfelder in elektrischen Maschinen</b> .....	57
2.1 Was ist ein Drehfeld? .....	57
2.2 Vereinfachte Feldberechnung im Luftspalt elektrischer Maschinen. ....	58
2.3 Erzeugung von magnetischen Drehfeldern. ....	64
2.4 Ein- und Zweischichtwicklungen .....	67
2.5 Grundwellendrehfeld .....	78
2.6 Wahl der Wicklungsstrangzahl .....	85
2.7 Bruchlochwicklungen .....	94
2.8 Wanderwellenwicklungen .....	109

<b>3</b>	<b>Mathematische Analyse von Luftspaltfeldern</b> .....	113
3.1	Grund- und Ober- bzw. Unterwellen des Luftspaltfelds.....	113
3.2	Fourier-Reihenentwicklung der Felderreggerkurve von $2m$ -Zonen-Ganzlochwicklungen .....	114
3.3	Fourier-Reihenentwicklung der Felderreggerkurve von Bruchlochwicklungen .....	126
3.4	Fourier-Reihenentwicklung der Felderreggerkurve weiterer Wicklungssysteme .....	140
3.5	Fourier-Analyse von gleichstromerregten Polradfeldern .....	143
3.6	Einfluss der Nutöffnungen und radialen Kühlkanäle auf das Luftspaltfeld .....	147
3.7	Zweidimensionales Luftspaltfeld .....	151
<b>4</b>	<b>Induzierte Spannung und magnetische Kräfte in Drehstrommaschinen</b> .....	157
4.1	Induzierte Spannung in einer gesehten Spule.....	157
4.2	Induzierte Strangspannung einer Drehfeldwicklung .....	163
4.3	Selbstinduktivität je Strang einer Drehfeldwicklung .....	171
4.4	Gegeninduktivität je Strang zweier Drehfeldwicklungen.....	179
4.5	Magnetische Energie.....	183
4.6	Kräfte in elektrischen Maschinen.....	189
4.7	Elektromagnetisches Drehmoment.....	204
4.8	Innere Leistung und elektromagnetische Ausnützung .....	210
<b>5</b>	<b>Die Schleifringläufer-Asynchronmaschine</b> .....	215
5.1	Funktionsweise der Schleifringläufer-Asynchronmaschine .....	215
5.2	Stationäres Betriebsverhalten der Asynchronmaschine .....	223
5.3	Asynchrone Energiewandlung .....	238
5.4	Kreisdiagramm der Asynchronmaschine .....	244
5.5	Anfahren eines Schleifringläufermotors mit Anfahrwiderständen .....	263
5.6	Drehzahlvariabler Betrieb von Schleifringläufer- Asynchronmaschinen .....	266
<b>6</b>	<b>Die Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine</b> .....	269
6.1	Ströme und Spannungen im Käfigläufer .....	271
6.2	Stromverdrängung in den Stäben des Läuferkäfigs .....	277
6.3	Käfigformen und Anlaufmomenterhöhung.....	292
6.4	Abweichungen vom Kreisdiagramm .....	299
6.5	Oberwellentheorie der Käfigläufer-Asynchronmaschine.....	304
6.6	Zusätzliche Drehmomente durch Oberwellen .....	334
6.7	Paketquerströme .....	346
6.8	Magnetisch erregte Geräusche .....	362
6.9	Zusatzverluste in Käfigläufer-Asynchronmaschinen .....	381

<b>7 Antriebstechnik mit der Asynchronmaschine</b> .....	393
7.1 Arbeitsmaschinen .....	393
7.2 Hochlauf der Asynchronmaschine am Netz .....	395
7.3 Stabile und instabile Arbeitspunkte – Quasistatische Stabilität ....	407
7.4 Abbremsen von Asynchronmaschinen .....	409
7.5 Drehzahlveränderbarer Betrieb von Asynchronmaschinen .....	414
7.6 Untersynchrone Stromrichter-kaskade .....	436
7.7 Betrieb der Asynchronmaschine bei veränderlicher Ständerfrequenz .....	441
7.8 Asynchronmaschine mit Frequenzumrichterspeisung .....	452
7.9 Auswirkungen der Stromüberschwingungen auf das Betriebsverhalten der Asynchronmaschine bei Frequenzumrichterspeisung .....	487
<b>8 Die elektrisch erregte Synchronmaschine</b> .....	507
8.1 Funktionsprinzip und Läuferbauweisen .....	507
8.2 Ständerspannungsgleichung der Vollpolmaschine .....	512
8.3 Ständerspannungsgleichung der Schenkelpolmaschine .....	519
8.4 Betriebsverhalten der Vollpolmaschine am „starr“ Netz .....	524
8.4.1 Zeigerdiagramme für unterschiedliche Betriebszustände am starren Netz .....	524
8.4.2 Zeigerdiagramme für besondere Betriebszustände .....	526
8.4.3 Drehmoment bei unterschiedlichem Polradwinkel .....	528
8.4.4 Statische Stabilität der Synchron-Vollpolmaschine .....	531
8.5 Betriebsverhalten der Schenkelpolmaschine am „starr“ Netz .....	534
8.6 Verlustbilanz bei Synchronmaschinen .....	539
8.7 Synchrongeneratoren im Inselbetrieb .....	543
8.8 Stromortskurven und Betriebskennlinien von Synchronmaschinen .....	550
8.9 Auslegungsmerkmale von Grenzleistungsturbogeneratoren .....	560
8.10 Elektrische Erregereinrichtungen .....	563
8.11 Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie, Erregerbedarf, Potier-Reaktanz .....	568
8.12 Elektrisch erregte Synchronmaschinen mit Dämpferwicklung ....	580
8.13 Die Dämpferwicklung bei Schiefkast und Oberwellen .....	594
8.14 Anlauf und Synchronisierung von großen Synchronmaschinen ...	598
8.15 Einphasen-Synchrongeneratoren .....	599
<b>9 Permanentmagneterregte Synchronmaschinen</b> .....	603
9.1 Magnetkreise mit Permanentmagneten .....	605
9.2 Funktionsweise von Permanentmagnet-Synchronmaschinen .....	619
9.2.1 Luftspalt-Flussdichteverteilung im Leerlauf .....	620
9.2.2 Induzierte Leerlaufspannung (Polradspannung) bei PM-Synchronmaschinen .....	622

9.2.3	Reluktanzwirkung von Permanentmagnetläufern . . . . .	634
9.2.4	Drehmomentbildung bei Polradlagegebersteuerung . . . . .	635
9.3	Blockstromspeisung und Sinusstromspeisung . . . . .	640
9.3.1	Drehmoment bei Blockstromspeisung und Sinusstromspeisung . . . . .	640
9.3.2	Antriebe mit Blockstromspeisung und Sinusstromspeisung . . . . .	648
9.3.3	Betriebsgrenzen von PM-Synchronmaschinen mit Querstromspeisung . . . . .	654
9.4	Drehmomentwelligkeit . . . . .	658
9.4.1	Wirkung der Drehmomentwelligkeit . . . . .	659
9.4.2	Drehmomentwelligkeit von PM-Synchronantrieben . . . . .	663
9.5	Feldschwächung bei Permanentmagnet-Synchronmaschinen . . . . .	678
9.6	Permanentmagnet-Synchronmaschinen mit Zahnspulen und High-Torque-Synchronmaschinen . . . . .	691
9.7	Permanentmagnet-Synchronmaschinen mit Anlaufkäfig ohne Polradlagegeber . . . . .	720
9.7.1	Stationäres Betriebsverhalten . . . . .	720
9.7.2	Beanspruchung der Permanentmagnete bei Störung des Synchronbetriebs . . . . .	722
9.7.3	Das bremsende Drehmoment der Permanentmagnete während des asynchronen Hochlaufs . . . . .	723
9.7.4	Synchronisierung nach erfolgtem Hochlauf . . . . .	727
<b>10</b>	<b>Reluktanzmaschinen und Schrittmotoren . . . . .</b>	<b>733</b>
10.1	Geschaltete Reluktanzantriebe („Switched Reluctance Drives“) . . . . .	734
10.1.1	Das „Geschaltete Reluktanz“-Prinzip . . . . .	734
10.1.2	Flussverkettung je Strang . . . . .	738
10.1.3	Spannungs- und Drehmomentgleichung . . . . .	743
10.1.4	Idealisierter Betrieb der geschalteten Reluktanzmaschine . . . . .	745
10.1.5	Drehmomentberechnung in gesättigten geschalteten Reluktanz- maschinen . . . . .	749
10.1.6	Realer Betrieb der geschalteten Reluktanzmaschine . . . . .	753
10.1.7	Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie . . . . .	761
10.1.8	Umrichterbemessung . . . . .	763
10.1.9	Motor-Technologie und Betriebsverhalten . . . . .	766
10.1.10	Anwendungen von geschalteten Reluktanzantrieben . . . . .	771
10.2	Synchrone Reluktanzmaschinen . . . . .	773
10.2.1	Grundfunktion der Synchron-Reluktanzmaschine . . . . .	773
10.2.2	Spannungs- und Drehmomentgleichung, Stromortskurve . . . . .	776
10.2.3	Netzbetrieb der Synchron-Reluktanzmaschine . . . . .	782
10.2.4	Statorflussverkettung und Eisensättigung . . . . .	787
10.2.5	Betriebsverhalten und Einsatzgebiete . . . . .	793
10.2.6	Asynchroner Anlauf von Synchron-Reluktanzmaschinen . . . . .	796
10.2.7	Spezielle Rotorbauformen für hohe Reluktanz-Verhältnisse . . . . .	804

10.3	Schrittmotor-Antriebe . . . . .	806
10.3.1	Funktionsprinzip von Schrittmotoren . . . . .	807
10.3.2	Ausführungsformen von Schrittmotoren . . . . .	818
10.3.3	Ansteuerverfahren von Schrittmotoren . . . . .	826
10.3.4	Drehmomente von Schrittmotoren . . . . .	831
<b>11</b>	<b>Gleichstromantriebe . . . . .</b>	<b>839</b>
11.1	Die Funktionsweise der Gleichstrommaschine . . . . .	839
11.2	Ankerwicklungen . . . . .	850
11.2.1	Schleifenwicklung . . . . .	850
11.2.2	Wellenwicklung . . . . .	857
11.2.3	Vergleich Schleifen- mit Wellenwicklung . . . . .	860
11.2.4	Mehrgängige Schleifen- und Wellenwicklungen . . . . .	862
11.2.5	Spannungsgrenze der Gleichstrommaschine . . . . .	866
11.3	Induzierte Spannung, elektromagnetisches Drehmoment, Verluste, Ausnutzung . . . . .	867
11.4	Ankerrückwirkung und Kompensationswicklung . . . . .	875
11.5	Kommutierung des Ankerstroms und Funktion der Wendepole . . . . .	881
11.6	Generator- und Motorschaltungen der Gleichstrommaschine . . . . .	896
11.7	Der drehzahlveränderbare Gleichstromantrieb . . . . .	909
11.8	Wirkungsgrad, Stabilität und Leistungsgrenzen der Gleichstrommaschine . . . . .	916
11.9	Der Einphasen-Reihenschlussmotor . . . . .	919
11.10	Die Unipolarmaschine . . . . .	925
<b>12</b>	<b>Dynamik elektrischer Maschinen . . . . .</b>	<b>929</b>
12.1	Motivation: Warum benötigen wir eine dynamische Theorie elektrischer Maschinen? . . . . .	929
12.2	Methoden zur Berechnung dynamischer Vorgänge in elektrischen Maschinen . . . . .	930
12.2.1	Differentialgleichungen anstelle algebraischer Gleichungen . . . . .	930
12.2.2	Lösungsmethodik linearer Differentialgleichungen . . . . .	932
12.2.3	Lösungsmethodik für nichtlineare Differentialgleichungen . . . . .	937
<b>13</b>	<b>Dynamik der Gleichstrommaschine . . . . .</b>	<b>941</b>
13.1	Dynamische Systemgleichungen der fremderregten Gleichstrommaschine . . . . .	941
13.2	Dynamisches Verhalten des elektrischen und mechanischen Subsystems . . . . .	944
13.2.1	Dynamik des mechanischen Subsystems . . . . .	944
13.2.2	Nenn-Anlaufdauer elektrischer Maschinen . . . . .	946
13.2.3	Dynamik des elektrischen Subsystems . . . . .	947
13.3	Dynamik des gekoppelten elektrisch-mechanischen Systems . . . . .	949

13.4	Linearisiertes Modell für veränderlichen Hauptfluss . . . . .	952
13.5	Übertragungsfunktion der fremderregten Gleichstrommaschine . . . . .	955
13.6	Simulationsergebnisse zum dynamischen Verhalten fremderregter Gleichstrommaschinen . . . . .	960
13.7	Stromrichter gespeiste fremderregte Gleichstrommaschinen . . . . .	971
<b>14</b>	<b>Raumzeigerrechnung und bezogene Größen . . . . .</b>	<b>981</b>
14.1	Definition des Durchflutungsraumzeigers . . . . .	981
14.2	Durchflutungsraumzeiger und Strangströme . . . . .	985
14.3	Raumzeiger für Strom, Spannung und Flussverkettung . . . . .	988
14.4	Raumzeiger-Transformation . . . . .	996
14.5	Einfluss des Nullsystems auf die Raumzeigerbildung . . . . .	1001
14.6	Das Rechnen mit bezogenen Größen . . . . .	1006
14.7	Verwendung unterschiedlicher Koordinatensysteme . . . . .	1014
14.8	Elektrische Leistung und magnetische Energie . . . . .	1017
<b>15</b>	<b>Dynamik der Asynchronmaschine . . . . .</b>	<b>1023</b>
15.1	Dynamische Spannungsgleichung in unterschiedlichen Bezugssystemen . . . . .	1023
15.2	Raumzeigergleichungen für die Flussverkettung . . . . .	1028
15.3	Die Raumzeiger-Drehmomentgleichung . . . . .	1032
15.4	Das dynamische Gleichungssystem im statorfesten Bezugssystem . . . . .	1038
15.5	Lösungen der dynamischen Gleichungen für konstante Drehzahl . . . . .	1043
15.6	Lösungen der dynamischen Gleichungen für variable Drehzahl . . . . .	1062
15.7	Übertragungsfunktion des linearisierten Gleichungssystems im drehfeldfesten Bezugssystem . . . . .	1073
15.8	Umrichter gespeiste Asynchronmaschinen mit feldorientierter Regelung . . . . .	1093
<b>16</b>	<b>Dynamik der Synchronmaschine . . . . .</b>	<b>1105</b>
16.1	Flussverkettungen in der Synchronmaschine bei dynamischen Vorgängen . . . . .	1105
16.1.1	Flussverkettungen bei der Vollpolmaschine . . . . .	1106
16.1.2	Flussverkettungen bei der Schenkelpolmaschine . . . . .	1115
16.1.3	Flussverkettungen der Synchronmaschine in bezogener Darstellung . . . . .	1123
16.1.4	Ersatzschaltbild für die Flussverkettungen der Synchronmaschine . . . . .	1126
16.1.5	Charakteristische Größen der Synchronmaschine aus den Ersatzschaltbildern . . . . .	1131
16.1.6	Bedeutung der Koppelinduktivität für die Bestimmung rotorseitiger subtransienter Ströme . . . . .	1141

16.2	Dynamisches Gleichungssystem der Synchronmaschine . . . . .	1143
16.3	Dynamisches Verhalten der Synchronmaschine bei konstanter Drehzahl . . . . .	1151
16.4	Zeitkonstanten der elektrisch erregten Synchronmaschine mit Dämpferkäfig . . . . .	1170
16.5	Berechnung des dreisträngigen Stoßkurzschlusses . . . . .	1176
16.5.1	Vereinfachte Betrachtung des Stoßkurzschlusses . . . . .	1176
16.5.2	Stoßkurzschluss bei Berücksichtigung der Widerstände . . . . .	1180
16.5.3	Stoßkurzschlussmoment . . . . .	1193
16.5.4	Experimentelle Bestimmung der dynamischen Parameter . . . . .	1195
16.6	Transientes Kippmoment . . . . .	1196
16.7	Transiente Stabilität und kritische Fehlerklärungszeit . . . . .	1203
<b>Literatur</b>	. . . . .	1215
Monographien . . . . .		1215
Weiterführende Fachbücher . . . . .		1216
Beitragswerke . . . . .		1218
Zeitschriftenbeiträge . . . . .		1219
Konferenzbeiträge . . . . .		1226
Dissertationen, Habilitationen . . . . .		1229
Druckschriften . . . . .		1231
<b>Sachverzeichnis</b>	. . . . .	1233