

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1 Grundlagen		
1.1	Magnetisches Feld	9
1.2	Bewegte Leiterschleife im Magnetfeld	12
1.3	Ruhende Leiterschleife im magnetischen Wechselfeld	15
1.4	Stromdurchflossene Leiterschleife im Magnetfeld	16
1.5	Grundlagen der Antriebstechnik	18
1.5.1	Drehmomenterzeugung in Elektromotoren	19
1.5.2	Gleichungen zur Antriebsberechnung	19
1.5.3	Antriebsquadranten	28
1.6	Bauelemente der Leistungselektronik	31
1.6.1	Dioden	35
1.6.2	Transistoren	37
1.6.2.1	Bipolare Transistoren, BP	37
1.6.2.2	Unipolartransistoren, MOSFET	39
1.6.2.3	Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT	42
1.6.3	Thyristoren	46
1.6.3.1	Symmetrisch sperrender Thyristor (SCR)	47
1.6.3.2	Weitere Thyristorarten	52
1.7	Grundsaltungen der Leistungselektronik	55
1.7.1	Netzgeführte Stromrichter	56
1.7.1.1	Einpuls-Mittelpunktschaltung M1	56
1.7.1.2	Zweipuls-Mittelpunktschaltung M2	70
1.7.1.3	Dreipuls-Mittelpunktschaltung M3	70
1.7.1.4	Vollgesteuerte Brückenschaltungen	74
1.7.1.5	Zwölfpuls-Brückenschaltungen	77
1.7.1.6	Halbgesteuerte Brückenschaltungen	78
1.7.2	Netzgeführte Wechselrichter	80
1.7.3	Berechnung netzgeführter Schaltungen	83
1.7.4	Wechselstrom- u. Drehstromsteller	88
1.7.4.1	Wechselstromsteller	88
1.7.4.2	Drehstromsteller	90
1.7.5	Selbstgeführte Stromrichter	91
1.7.5.1	Gleichstromsteller (Chopper)	91
1.7.5.2	Selbstgeführte Wechselrichter	99
1.7.5.3	Grundlagen der Frequenzumrichter	102
1.7.5.4	Modulation der Ausgangsspannung	106
1.7.5.5	Steuerung/Regelung der Ausgangsspannung	110
1.7.5.6	Netzurückwirkungen von Frequenzumrichtern	113
2 Gleichstrommaschinen		
2.1	Aufbau der Gleichstrommaschine	117
2.1.1	Stator – Ständer	118
2.1.2	Rotor – Anker	119
2.2	Schaltungen der Gleichstrommaschinen	121
2.3	Spannungserzeugung	122
2.4	Drehmomenterzeugung und Leistungsumsatz	127
2.5	Generatorbetrieb und Motorbetrieb	128
2.6	Magnetische Felder	131
2.6.1	Hauptfeld	131
2.6.2	Ankerfeld	131
2.6.3	Gesamtfeld (Resultierendes Feld)	132
2.7	Ankerrückwirkung	132
2.7.1	Entstehung	132
2.7.2	Reduzierung der Ankerrückwicklung	133
2.8	Stromwendung (Kommutierung)	134

		Seite
2 Gleichstrommaschinen		
Fortsetzung		
2.8.1	Ursachen des Bürstenfeuers	134
2.8.2	Stegspannung (Lamellenspannung)	136
2.9	Motoren	137
2.9.1	Nebenschlussmotor und fremderregter Motor.	137
2.9.2	Reihenschlussmotor (Hauptschlussmotor)	141
2.9.3	Doppelschlussmotor	142
2.10	Anlassvorgang	143
2.11	Elektrische Bremsung	146
2.11.1	Senkbremsung	146
2.11.2	Nachlaufbremsung	149
2.12	Drehzahlsteuerung	151
2.12.1	Ankerstellbereich	151
2.12.2	Feldstellbereich	153
2.12.3	Betrieb am Wechselstromnetz	155
2.12.3.1	Einquadrantenbetrieb (1-Q-Betrieb)	156
2.12.3.2	Zweiquadrantenbetrieb (2-Q-Betrieb)	159
2.12.3.3	Vierquadrantenbetrieb (4-Q-Betrieb)	160
2.12.4	Betrieb am Gleichstromnetz	162
2.13	Verluste und Wirkungsgrad	163
2.13.1	Verlustarten	163
2.13.2	Wirkungsgrad	164
2.14	Gleichstrom-Ankerwicklungen	167
2.14.1	Ringwicklung	167
2.14.2	Trommelwicklung	168
2.14.3	Umschalten bzw. Umwickeln einer Maschine.	175
3 Transformatoren		
3.1	Aufgaben und Arten	179
3.2	Einphasentransformator	181
3.2.1	Wirkungsweise des idealen Transformators	181
3.2.2	Grundgleichungen	183
3.2.2.1	Spannungsübersetzung	183
3.2.2.2	Stromübersetzung	183
3.2.2.3	Widerstandstransformation	184
3.2.2.4	Transformatoren-Hauptgleichung	184
3.3	Betriebsverhalten	185
3.3.1	Ersatzschaltung des realen Transformators	185
3.3.2	Leerlaufbetrieb	186
3.3.3	Lastbetriebsverhalten	190
3.3.4	Spannungsverhalten bei normaler Belastung.	193
3.4	Parallelschaltung von Transformatoren.	194
3.5	Energieumsatz im Transformator	197
3.5.1	Verluste	197
3.5.2	Volllastwirkungsgrad/Bemessungslastwirkungsgrad	198
3.5.3	Jahreswirkungsgrad	199
3.6	Drehstromtransformator	202
3.6.1	Transformatorenbank	202
3.6.2	Konstruktive Vereinigung von drei Einphasen- transformatoren zu einem Drehstromtransformator	203
3.6.3	Schaltgruppen	205
3.6.4	Betriebsverhalten von Drehstromtransformatoren unter einphasiger oder extrem unsymmetrischer Belastung	206
3.7	Besondere Ausführungsformen des Transformators	211
3.7.1	Spartransformator	211
3.7.2	Stelltransformator	213
3.7.3	Transformatoren für Messzwecke	214

		Seite
3 Transformatoren	3.8	Konstruktive und technologische Gestaltung
Fortsetzung		der aktiven Transformatorbauteile 217
	3.8.1	Anordnung der aktiven Bauteile 217
	3.8.2	Werkstoffe und Aufbau des Eisenkerns 218
	3.8.3	Blechschnitte und konstruktive Zusammenfassung
		der Kernbleche 219
	3.8.4	Wicklungen 221
	3.8.5	Äußere Gestaltung 224
	3.9	Transformatorenschutz 226
	3.9.1	Innere Fehler 226
	3.9.2	Schutzeinrichtungen 226
4 Wechselstrommaschinen	4.1	Grundlagen der Drehstromwicklungen 230
	4.2	Wicklungsfaktoren 231
	4.2.1	Verteilte Wicklung – Zonenfaktor 231
	4.2.2	Gesehnte Wicklung – Sehnungsfaktor 232
	4.2.3	Bedeutung der Wicklungsfaktoren 234
	4.3	Magnetische Felder 235
	4.3.1	Felderregerkurve und Feldkurve 235
	4.3.1.1	Konzentrierte Wicklung 236
	4.3.1.2	Verteilte Wicklung 237
	4.3.2	Nutzfluss und Streufluss 238
	4.3.3	Drehfelder 238
	4.4	Entwurf von Wechselstromwicklungen 242
	4.4.1	Einschicht-Ganzlochwicklungen 242
	4.4.2	Zweischicht-Ganzlochwicklungen 247
	4.4.3	Einschicht-Bruchlochwicklungen 251
	4.4.4	Zweischicht-Bruchlochwicklungen 254
	4.4.5	Polumschaltbare Wicklungen (Dahlander) 255
	4.4.6	Polumschaltbare Sonderwicklungen 260
	4.4.7	Einphasenwicklungen 260
	4.4.8	Umwickeln von Maschinenwicklungen 261
	4.5	Drehstrom-Asynchronmaschine 266
	4.5.1	Aufbau 266
	4.5.2	Wirkungsweise 267
	4.5.3	Läuferfrequenz und Läuferspannung 271
	4.5.4	Leistungsaufteilung 272
	4.5.5	Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm 275
	4.5.6	Drehmoment 278
	4.5.7	Stromaufnahme 281
	4.5.8	Kreisdiagramm 284
	4.5.8.1	Leerlauf und Kurzschlussversuch 285
	4.5.8.2	Auswertung 286
	4.5.8.3	Bedeutung des Kreisdiagramms 289
	4.5.9	Belastungskennlinien 290
	4.5.10	Anlauf und Anlassen 292
	4.5.10.1	Hochlaufvorgang 292
	4.5.10.2	Anlaufstrom 293
	4.5.10.3	Schleifringläufer mit Anlasswiderständen 294
	4.5.10.4	Stromverdrängungsläufer 297
	4.5.10.5	Stern-Dreieck-Anlaufschaltung 298
	4.5.10.6	Sanftanlasser mit Drehstromsteller 301
	4.5.10.7	Anlasstransformator 302
	4.5.10.8	Weitere Anlassverfahren 302
	4.5.11	Drehzahlsteuerung 303
	4.5.11.1	Steuerungsmöglichkeiten 303

	Seite
4 Wechselstrommaschinen	
Fortsetzung	
4.5.11.2 Ändern der Ständerspannung	304
4.5.11.3 Schlupfwiderstände	306
4.5.11.4 Läufergegenspannung	307
4.5.11.5 Frequenzverstellung	307
4.5.11.6 Polumschaltung	309
4.5.12 Bremsen	311
4.6 Einphasen-Asynchronmotoren	315
4.6.1 Einsträngiger Motor – Anwurfmotor	315
4.6.2 Zweisträngiger Motor	317
4.6.2.1 Zweiphasiger Anschluss	318
4.6.2.2 Einphasiger Anschluss	319
4.6.2.3 Kondensatormotor	320
4.6.2.4 Einphasenmotor mit Widerstandshilfswicklung	322
4.6.2.5 Spaltpolmotor	323
4.6.3 Drehstrommotor im Einphasenbetrieb	324
4.7 Synchronmaschinen	326
4.7.1 Aufbau und Arten	326
4.7.1.1 Außenpolmaschine	327
4.7.1.2 Innenpolmaschine	328
4.7.2 Erregung	330
4.7.3 Wirkungsweise	331
4.7.3.1 Leerlauf	331
4.7.3.2 Belastung	332
4.7.3.3 Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm	333
4.7.3.4 Kurzschluss	334
4.7.3.5 Drehmoment	336
4.7.4 Generatorbetrieb	337
4.7.4.1 Inselbetrieb	337
4.7.4.2 Parallelbetrieb	338
4.7.5 Motorbetrieb	339
4.7.5.1 Betriebsverhalten	339
4.7.5.2 Mechanische Pendelungen	341
4.7.5.3 Anlauf	341
4.7.6 Drehzahlsteuerung	342
4.7.7 Besonderheiten der Schenkelpolmaschine	342
4.8 Drehstromantriebe am Frequenzumrichter (<i>U</i> -Umrichter)	344
4.8.1 Drehstrom-Kurzschlussläufermotor am Frequenzumrichter	345
4.8.2 87-Hz-Betrieb	347
4.8.3 Parametrierung von Frequenzumrichtern	347
4.8.4 Bremsung, Bremsarten	349
4.8.5 Motorschutz	349
4.8.6 Parallelschalten von Motoren	350
4.8.7 Elektrischer Anschluss	350
5 Weitere Maschinenarten	
5.1 Transformatoren	351
5.1.1 Streufeldtransformator	351
5.1.2 Stromrichtertransformator (SRT)	352
5.2 Wechselstrommaschinen	356
5.2.1 Einphasen-Reihenschlussmotor und Universalmotor	356
5.2.2 Repulsionsmotor	358
5.2.3 Drehstrom-Kollektormotor	358
5.2.4 Reluktanzmotor	359
5.2.5 Drehstromsynchronmotor mit permanenterregtem Läufer	360
5.2.6 Asynchroner Linearmotor	361
5.3 Servoantriebe	362
5.3.1 Bauarten	363

		Seite
5 Weitere Maschinenarten		
Fortsetzung	5.3.2 Erregerkreiswerkstoffe	364
	5.3.3 Motorkenndaten	365
	5.3.4 Gleichstrom-Scheibenläufermotor	369
	5.3.4.1 Aufbau und Wirkungsweise	369
	5.3.4.2 Betriebsverhalten	370
	5.3.5 Gleichstrom-Langläufermotor	370
	5.3.5.1 Aufbau und Wirkungsweise	370
	5.3.5.2 Betriebsverhalten	371
	5.3.6 Bürstenloser Gleichstrom-Servomotor	371
	5.3.7 Drehstrom-Asynchronservomotoren	373
	5.3.8 Drehstrom-Synchronservomotoren	374
	5.3.9 Gebersysteme für Servomotoren	376
	5.4 Schrittmotoren	380
	5.4.1 Aufbau, Bauarten und Wirkungsweise	380
	5.4.2 Ansteuerungsarten/Betriebsarten	381
	5.4.3 Schritarten	383
	5.4.4 Steuerlogik	384
	5.4.5 Treiberstufen	385
	5.4.6 Betriebsverhalten	386
	5.4.7 Zusammenfassung und Erläuterungen	387
	5.5 Umformer	388
6 Prüfen der Maschinen	6.1 Elektrische Prüfung	391
	6.1.1 Körperschluss (Prüfung der Isolation)	391
	6.1.2 Windungsschluss	395
	6.1.3 Unterbrechung	396
	6.2 Erwärmungsprüfung	398
	6.3 Strom- und Drehmomentüberlastbarkeit	401
	6.4 Mechanische Prüfung	402
	6.5 Störungen und Fehlersuche im Betrieb	403
7 Normung der Maschinen	7.1 Übersicht über die einschlägigen Normen elektrischer Maschinen	408
	7.2 Bauformen und Baugröße	409
	7.3 Schutzarten	412
	7.4 Bemessung und Betrieb	414
	7.5 Betriebsarten, Bemessungsklassen	414
	7.6 Erwärmung – Thermische Klassen, Wärmeklassen	420
	7.7 Kühlung, Umgebungs- und Kühlmitteltemperatur	422
	7.8 Bemessungsspannungen	425
	7.9 Leistungsschilder	426
	7.10 Anschlussbezeichnungen und Drehsinn drehender elektrischer Maschinen	427
Anhang		429
Bildquellenverzeichnis		431
Sachwortverzeichnis		432