

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	20
	1.5.3	Antriebsquadranten	29
	1.5.4	Energieeffizienz und Wirkungsgrad	32
	1.5.5	Antriebe 4.0	35
	1.6	Bauelemente der Leistungselektronik	37
	1.7	Grundsaltungen der Leistungselektronik	41
	1.7.1	Netzgeführte Stromrichter	42
	1.7.1.1	Einpuls-Mittelpunktschaltung M1	42
	1.7.1.2	Zweipuls-Mittelpunktschaltung M2	56
	1.7.1.3	Dreipuls-Mittelpunktschaltung M3	56
	1.7.1.4	Vollgesteuerte Brückenschaltungen	60
	1.7.1.5	Zwölfpuls-Brückenschaltung	63
	1.7.1.6	Halbgesteuerte Brückenschaltungen	64
	1.7.2	Netzgeführte Wechselrichter	66
	1.7.3	Berechnung netzgeführter Schaltungen	69
	1.7.4	Wechselstrom- u. Drehstromsteller	74
	1.7.4.1	Wechselstromsteller	74
	1.7.4.2	Drehstromsteller	76
	1.7.5	Selbstgeführte Stromrichter	77
	1.7.5.1	Gleichstromsteller (Chopper)	77
	1.7.5.2	Selbstgeführte Wechselrichter	85
	1.7.5.3	Grundlagen der Frequenzumrichter	88
	1.7.5.4	Modulation der Ausgangsspannung	92
	1.7.5.5	Steuerung/Regelung der Ausgangsspannung	96
2 Gleichstrom- maschinen	2.1	Aufbau der Gleichstrommaschine	100
	2.1.1	Stator – Ständer	101
	2.1.2	Rotor – Anker	102
	2.2	Schaltungen der Gleichstrommaschinen	104
	2.3	Spannungserzeugung	105
	2.4	Drehmomenterzeugung und Leistungsumsatz	110
	2.5	Generatorbetrieb und Motorbetrieb	111
	2.6	Magnetische Felder	114
	2.6.1	Hauptfeld	114
	2.6.2	Ankerfeld	114
	2.6.3	Gesamtfeld (Resultierendes Feld)	115
	2.7	Ankerrückwirkung	115
	2.7.1	Entstehung	115
	2.7.2	Reduzierung der Ankerrückwirkung	116
	2.8	Stromwendung (Kommutierung)	117
	2.8.1	Ursachen des Bürstenfunken	117
	2.8.2	Stegspannung (Lamellenspannung)	119
	2.9	Motoren	120
	2.9.1	Nebenschlussmotor und fremderregter Motor	120
	2.9.2	Reihenschlussmotor (Hauptschlussmotor)	124
	2.9.3	Doppelschlussmotor	125
	2.10	Anlassvorgang	126
	2.11	Elektrische Bremsung	129
	2.11.1	Senkbremsung	129
	2.11.2	Nachlaufbremsung	132
	2.12	Drehzahlsteuerung	134
	2.12.1	Ankerstellbereich	134
	2.12.2	Feldstellbereich	136
	2.12.3	Betrieb am Wechselstromnetz	138
	2.12.3.1	Einquadrantenbetrieb (I-Q-Betrieb)	139
	2.12.3.2	Zweiquadrantenbetrieb (2-Q-Betrieb)	142

			Seite
2 Gleichstrom- maschinen Fortsetzung	2.12.3.3	Vierquadrantenbetrieb (4-Q-Betrieb)	143
	2.12.4	Betrieb am Gleichstromnetz	145
	2.13	Verluste und Wirkungsgrad	146
	2.13.1	Verlustarten	146
	2.13.2	Wirkungsgrad	147
	2.14	Gleichstrom-Ankerwicklungen	150
	2.14.1	Ringwicklung	150
	2.14.2	Trommelwicklung	151
	2.14.3	Umschalten bzw. Umwickeln einer Maschine	158
3 Transformatoren	3.1	Aufgaben und Arten	162
	3.2	Einphasentransformator	164
	3.2.1	Wirkungsweise des idealen Transformators	164
	3.2.2	Grundgleichungen	166
	3.2.2.1	Spannungsübersetzung	166
	3.2.2.2	Stromübersetzung	166
	3.2.2.3	Widerstandstransformation	167
	3.2.2.4	Transformatoren-Hauptgleichung	167
	3.3	Betriebsverhalten	168
	3.3.1	Ersatzschaltung des realen Transformators	168
	3.3.2	Leerlaufbetrieb	169
	3.3.3	Lastbetriebsverhalten	173
	3.3.4	Spannungsverhalten bei normaler Belastung	176
	3.4	Parallelschaltung von Transformatoren	177
	3.5	Energieumsatz im Transformator	180
	3.5.1	Verluste	180
	3.5.2	Volllastwirkungsgrad/Bemessungslastwirkungsgrad	181
	3.5.3	Jahreswirkungsgrad	182
	3.6	Drehstromtransformator	185
	3.6.1	Transformatorenbank	185
	3.6.2	Konstruktive Vereinigung von drei Einphasentransformatoren zu einem Drehstromtransformator	186
	3.6.3	Schaltgruppen	188
	3.6.4	Betriebsverhalten von Drehstromtransformatoren unter einphasiger oder extrem unsymmetrischer Belastung	189
	3.7	Besondere Ausführungsformen des Transformators	194
	3.7.1	Spartransformator	194
	3.7.2	Stelltransformator	196
	3.7.3	Transformatoren für Messzwecke	197
	3.8	Konstruktive und technologische Gestaltung der aktiven Transformatorbauteile	200
	3.8.1	Anordnung der aktiven Bauteile	200
	3.8.2	Werkstoffe und Aufbau des Eisenkerns	201
	3.8.3	Blechschnitte und konstruktive Zusammenfassung der Kernbleche	202
	3.8.4	Wicklungen	204
	3.8.5	Äußere Gestaltung	207
	3.9	Transformatorenschutz	209
	3.9.1	Innere Fehler	209
	3.9.2	Schutzeinrichtungen	209
4 Wechselstrom- maschinen	4.1	Grundlagen der Drehstromwicklungen	213
	4.2	Wicklungsfaktoren	214
	4.2.1	Verteilte Wicklung – Zonenfaktor	214
	4.2.2	Gesehnte Wicklung – Sehnungsfaktor	215
	4.2.3	Bedeutung der Wicklungsfaktoren	217
	4.3	Magnetische Felder	218
	4.3.1	Felderregerkurve und Feldkurve	218
	4.3.1.1	Konzentrierte Wicklung	219
	4.3.1.2	Verteilte Wicklung	220
	4.3.2	Nutzfluss und Streufluss	221
	4.3.3	Drehfelder	221
	4.4	Entwurf von Wechselstromwicklungen	225
	4.4.1	Einschicht-Ganzlochwicklungen	225
	4.4.2	Zweischicht-Ganzlochwicklungen	230

	Seite
4 Wechselstrom-	
maschinen	
Fortsetzung	
4.4.3	Einschicht-Bruchlochwicklungen 234
4.4.4	Zweischicht-Bruchlochwicklungen 237
4.4.5	Polumschaltbare Wicklungen (Dahlander) 238
4.4.6	Bruchlochwicklung eines Servomotors 243
4.4.7	Einphasenwicklungen 243
4.4.8	Umwickeln von Maschinenwicklungen 244
4.5	Drehstrom-Asynchronmaschine 249
4.5.1	Aufbau 249
4.5.2	Wirkungsweise 250
4.5.3	Läuferfrequenz und Läuferspannung 254
4.5.4	Leistungsaufteilung 255
4.5.5	Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm 258
4.5.6	Drehmoment 261
4.5.7	Stromaufnahme 264
4.5.8	Kreisdiagramm 267
4.5.8.1	Leerlauf- und Kurzschlussversuch 268
4.5.8.2	Auswertung 269
4.5.8.3	Bedeutung des Kreisdiagramms 272
4.5.9	Belastungskennlinien 273
4.5.10	Anlauf und Anlassen 275
4.5.10.1	Hochlaufvorgang 275
4.5.10.2	Anlaufstrom 276
4.5.10.3	Schleifringläufer mit Anlasswiderständen 277
4.5.10.4	Stromverdrängungsläufer 280
4.5.10.5	Stern-Dreieck-Anlaufschaltung 281
4.5.10.6	Sanftanlasser mit Drehstromsteller 284
4.5.10.7	Anlasstransformator 285
4.5.10.8	Weitere Anlassverfahren 285
4.5.11	Drehzahlsteuerung 286
4.5.11.1	Steuerungsmöglichkeiten 286
4.5.11.2	Ändern der Ständerspannung 287
4.5.11.3	Schlupfwiderstände 289
4.5.11.4	Läufergegenspannung 290
4.5.11.5	Frequenzverstellung 290
4.5.11.6	Polumschaltung 292
4.5.12	Bremsen 294
4.6	Einphasen-Asynchronmotoren 298
4.6.1	Einsträngiger Motor – Anwurfmotor 298
4.6.2	Zweisträngiger Motor 300
4.6.2.1	Zweiphasiger Anschluss 301
4.6.2.2	Einphasiger Anschluss 302
4.6.2.3	Kondensatormotor 303
4.6.2.4	Einphasenmotor mit Widerstandshilfswicklung 305
4.6.2.5	Spaltpolmotor 306
4.6.3	Drehstrommotor im Einphasenbetrieb 307
4.7	Synchronmaschinen 309
4.7.1	Aufbau und Arten 309
4.7.1.1	Außenpolmaschine 310
4.7.1.2	Innenpolmaschine 311
4.7.2	Erregung 313
4.7.3	Wirkungsweise 314
4.7.3.1	Leerlauf 314
4.7.3.2	Belastung 315
4.7.3.3	Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm 316
4.7.3.4	Kurzschluss 317
4.7.3.5	Drehmoment 319
4.7.4	Generatorbetrieb 320
4.7.4.1	Inselbetrieb 320
4.7.4.2	Parallelbetrieb 321
4.7.5	Motorbetrieb 322
4.7.5.1	Betriebsverhalten 322
4.7.5.2	Mechanische Pendelungen 324
4.7.5.3	Anlauf 324
4.7.6	Drehzahlsteuerung 325
4.7.7	Besonderheiten der Schenkelpolmaschine 325

			Seite
5	Drehstrom- antriebe am Frequenz- umrichter (U-Umrichter)	5.1	Drehstrom-Kurzschlussläufermotor am Frequenzumrichter 328
		5.2	87-Hz-Betrieb 330
		5.3	Parametrierung von Frequenzumrichtern 330
		5.4	Bremung, Bremsarten. 332
		5.5	Motorschutz 332
		5.6	Parallelschalten von Motoren 333
		5.7	Elektrischer Anschluss 333
		5.8	Netzurückwirkungen von Frequenzumrichtern. 333
		5.9	Erhöhte Spannungsbeanspruchung durch Umrichterbetrieb. 337
6	Servoantriebe	6.1	Bauarten 341
		6.2	Erregerkreiswerkstoffe 341
		6.3	Motorkenndaten 342
		6.4	Gleichstrom-Scheibenläufermotor 346
		6.4.1	Aufbau und Wirkungsweise 346
		6.4.2	Betriebsverhalten 347
		6.5	Gleichstrom-Langläufermotor 348
		6.5.1	Aufbau und Wirkungsweise 348
		6.5.2	Betriebsverhalten 348
		6.6	Bürstenloser Gleichstrom-Servomotor 349
		6.7	Drehstrom-Asynchronservomotoren 351
		6.8	Drehstrom-Synchronservomotoren 352
		6.9	Schrittmotoren 354
		6.9.1	Aufbau, Bauarten und Wirkungsweise 354
		6.9.2	Ansteuerungsarten/Betriebsarten 356
		6.9.3	Schrittarten 357
7	Weitere Maschinenarten	6.9.4	Steuerlogik 359
		6.9.5	Treiberstufen 359
		6.9.6	Betriebsverhalten 360
		6.9.7	Zusammenfassung und Erläuterungen 361
		6.10	Gebersysteme für Servomotoren 362
		7.1	Transformatoren 366
		7.1.1	Streuelfeldtransformator 366
		7.1.2	Stromrichtertransformator (SRT) 367
		7.2	Wechselstrommaschinen 371
		7.2.1	Einphasen-Reihenschlussmotor und Universalmotor 371
		7.2.2	Repulsionsmotor 373
		7.2.3	Drehstrom-Kollektormotor 373
		7.2.4	Energiesparmotoren 374
		7.2.4.1	Der Reluktanzmotor 376
		7.2.4.2	Synchron-Reluktanzmotor 377
		7.2.4.3	Drehstromsynchronmotor mit permanenterregtem Läufer 378
		7.2.4.4	Torquemotoren 379
		7.2.5	Asynchroner Linearmotor 380
		7.3	Windenergieanlagen (WEA) zur Stromerzeugung 382
		7.3.1	Wirkungsweise der WEA 383
		7.3.2	Anlagenkonstruktion 384
		7.3.3	Konzepte von WEA zur Stromeinspeisung 385
		7.3.4	Generatoren in WEA 387
		7.3.5	Windenergieanlagen und Netzintegration. 390
8	Explosions- geschützte Motoren	8.1	Explosionsschutz – Maßnahmen und Ziele 391
		8.2	Rechtsgrundlagen und Normen 391
		8.3	Begriffsbestimmungen. 392
		8.4	Gerätekennzeichnungen und Zertifizierungsverfahren in Europa (ATEX) und international (IEC Ex) 398
		8.5	Explosionsgeschützte Drehstrom-Käfigläufermotoren 402
		8.5.1	Besondere Konstruktionsmerkmale 402
		8.5.2	Zündschutzarten von Elektromotoren 402
		8.5.2.1	Druckfeste Kapselung – Ex „d“ 403
		8.5.2.2	Überdruckkapselung – Ex „p“ 405
		8.5.2.3	Erhöhte Sicherheit – „e“-Schutzniveau „eb“ 407
		8.5.2.4	Erhöhte Sicherheit Ex „e“ – Schutzniveau – „ec“ 413
		8.5.2.5	Zündschutzart – Ex „db eb“ 413

			Seite
8 Explosions- geschützte Motoren			
Fortsetzung			
8.5.2.6	Motoren mit doppelter Zündschutzart – Ex „db eb+eb“	414	
8.5.2.7	Staub-Zündschutzart – Schutz durch Gehäuse – Ex „t“	414	
8.5.2.8	Staub-Zündschutzart – Schutz durch Überdruckkapselung – Ex „p“	415	
8.5.2.9	Zusammenfassungen	415	
8.6	Explosionengeschützte Asynchronmotoren im Frequenzumrichterbetrieb	416	
8.6.1	Allgemeines	416	
8.6.2	Leistungsbegrenzung und Drehmomentreduktion	418	
8.6.3	Motorverluste im FU-Betrieb	419	
8.6.4	Lagerbelastungen	420	
8.6.5	U/f-Verhältnis und Motorerwärmung	421	
8.6.6	Spannungsfälle im FU-Motorabzweig	421	
8.6.7	Wicklungsbelastung durch Impulsspannungen	422	
8.6.8	Störungen im FU-Betrieb und Schutzfunktionen	422	
8.6.9	Maßnahmen zum sicheren Betrieb von Ex-Motoren am Frequenzumrichter	423	
8.6.10	Projektierung eines Ex-Antriebs mit Frequenzumrichter	424	
8.7	Anforderungen an den Schutz von Ex-Motoren	426	
8.7.1	Rechtliche und normative Vorgaben	426	
8.7.2	Schutzprinzipien und Schutzgeräte für Ex-Motoren	427	
8.7.2.1	Stromabhängiger Schutz	427	
8.7.2.2	Temperaturabhängiger Motorschutz	428	
8.7.2.3	Schutz durch Strombegrenzung	429	
8.7.3	Auswahl eines Motorschutzkonzepts	430	
8.7.4	Mechanischer Schutz	432	
8.7.5	Kurzschlussschutz	432	
8.7.6	Kennzeichnung, Installation und Inbetriebnahme von Motor-Schutzgeräten	433	
8.7.7	Motorschutz für Ex-Motoren im Frequenzumrichterbetrieb	434	
8.7.8	Motorschutz in Abhängigkeit von der Betriebsart	435	
8.8	Wartung und Instandsetzung von Ex-Motoren und elektrischen Geräten	437	
8.8.1	Rechtlicher und normativer Rahmen	437	
8.8.2	Instandsetzung von Ex-Motoren	437	
8.9	Begriffsdefinitionen (Glossar)	439	
9 Prüfen der Maschinen			
9.1	Elektrische Prüfung	441	
9.1.1	Körperschluss (Prüfung der Isolation)	441	
9.1.2	Stoßspannungsprüfung	443	
9.1.3	Prüfungen von Maschinen im Umrichterbetrieb	443	
9.2	Erwärmungsprüfung	448	
9.3	Strom- und Drehmomentüberlastbarkeit	451	
9.4	Mechanische Prüfung	453	
10 Normung der Maschinen			
10.1	Übersicht über die einschlägigen Normen elektrischer Maschinen	454	
10.2	Bauformen und Baugröße	455	
10.3	Schutzarten	458	
10.4	Bemessung und Betrieb	459	
10.5	Betriebsarten, Bemessungsklassen	460	
10.6	Erwärmung – Thermische Klassen, Wärmeklassen	466	
10.7	Kühlung, Umgebungs- und Kühlmitteltemperatur	467	
10.8	Bemessungsspannungen	470	
Anhang			
	Bildquellenverzeichnis	474	
	Sachwortverzeichnis	475	