

Inhalt

Schreibweisen und Gezeichnetes	1
1 Grundlegendes Handwerkszeug	5
1.1 Trigonometrie	5
1.1.1 Winkel	6
1.1.2 Rechtwinkeliges Dreieck und Winkelfunktionen	7
1.1.3 Allgemeines Dreieck	11
1.2 Vektorrechnung	12
1.2.1 Zweidimensionale Vektoren	12
1.2.2 Dreidimensionale Vektoren	14
1.3 Komplexe Rechnung	21
1.4 Bezugspfeile	25
1.5 Einphasenwechselstrom	27
1.5.1 Komplexe Effektivwert-Zeitzeiger	27
1.5.2 Impedanz und Admittanz	28
1.5.3 Leistungsbegriffe	31
1.6 Drehstrom	34
1.6.1 Sternschaltung	35
1.6.2 Dreieckschaltung	36
1.6.3 Leistungsbegriffe	36
1.7 Leistungselektronik	37
1.7.1 Bauelemente	38
1.7.2 Grundlegende Kennwerte periodischer Größen	40
2 Mechanik	43
2.1 Statik	43
2.1.1 Kraft	44
2.1.2 Axiome der Statik	46

2.1.3	Zentrales ebenes Kraftsystem	48
2.1.4	Gewichtskraft	48
2.1.5	Äußere und innere Kräfte	49
2.1.6	Kraftübertragungselemente	51
2.1.7	Auflager	52
2.1.8	Drehmoment	53
2.1.9	Allgemeines ebenes Kraftsystem	56
2.1.10	Steigung	56
2.1.11	Reibung	58
2.1.12	Statischer Fahrwiderstand	61
2.2	Kinetik	62
2.2.1	Translatorische Kinetik	62
2.2.2	Rotatorische Kinetik	68
2.2.3	Elemente translatorischer und rotatorischer Systeme	75
2.2.4	Gemischt translatorische und rotatorische Kinetik	80
3	Betriebsumfeld	81
3.1	Klassifikation	82
3.2	Ausführungsformen	84
3.2.1	Baugröße und Flanschgröße	84
3.2.2	International Mounting	85
3.2.3	Schutzart	86
3.3	Verluste, Erwärmung, Kühlung	87
3.3.1	Verluste in elektrischen Maschinen	87
3.3.2	Verluste in Leistungselektronik	88
3.3.3	Wirkungsgradklassen von Drehstrommotoren	89
3.3.4	Wärmetransport und Wärmespeicherung	90
3.3.5	Wärmeklasse	93
3.3.6	Betriebsarten elektrischer Maschinen	94
3.3.7	Überlast	96
3.3.8	Kühlung elektrischer Maschinen	98
3.4	Typenschild	101
3.5	Normen	102
4	Magnetfeld	107
4.1	Feldvektoren	107
4.2	Magnetischer Widerstand	109
4.3	Durchflutungssatz	111
4.4	Induktionsgesetz	113

4.5	Induktivität	119
4.6	Lorentzkraft	119
4.7	Eisenverluste	120
5	Einphasen-Transformator	123
5.1	Idealer Transformator	123
5.1.1	Physikalisches Modell	123
5.1.2	Bauformen, Aufbau und Begriffe	127
5.1.3	Transformation von Impedanzen	130
5.2	Realer Transformator	131
5.2.1	Physikalisches Modell	131
5.2.2	Bemessungsgrößen	133
5.2.3	Allgemeiner Belastungszustand	134
5.3	Kurzschlussimpedanz	135
5.3.1	Kappsches Dreieck	137
5.3.2	Spannungsänderung bei Belastung	138
5.3.3	Kurzschlussspannung	139
5.3.4	Dauerkurzschlussstrom	140
5.4	Parameterbestimmung	140
5.4.1	Kurzschlussversuch	141
5.4.2	Leerlaufversuch	142
5.4.3	Typenschild	144
5.4.4	Leistungsbilanz und Wirkungsgrad	144
5.5	Besondere Ausführungsformen	146
5.5.1	Dreiwicklungs-Transformator	147
5.5.2	Transformator mit Anzapfung	147
5.5.3	Spannungswandler	148
5.5.4	Stromwandler	149
5.5.5	Spartransformator	150
5.5.6	HGÜ-Transformator	152
5.6	Besonderheiten	153
5.6.1	Parallelbetrieb	153
5.6.2	Magnetisierungsstrom	154
5.6.3	Einschaltstromstoß	155
5.6.4	Stoßkurzschlussstrom	156

6	Drehstrom-Transformator	157
6.1	Aktivteil	157
6.1.1	Eisenkern	157
6.1.2	Wicklung	160
6.2	Kühlung	162
6.3	Wicklungsverschaltung	164
6.3.1	Klemmenbezeichnung	165
6.3.2	Bemessungsgrößen	166
6.3.3	Spannungsübersetzung	167
6.3.4	Schaltgruppe	167
6.4	Typenschild	172
6.5	Ersatzschaltbild	173
6.5.1	Idealer Transformator	174
6.5.2	Transformator mit Kurzschlussimpedanz	175
6.6	Asymmetrische Belastung	175
6.6.1	Übersicht	176
6.6.2	Einphasig belasteter Yyn-Transformator	176
6.7	Besonderheiten	178
6.7.1	Parallelbetrieb	178
6.7.2	Verteiltransformator mit Laststufenschalter	179
6.7.3	Dreiwicklungs-Transformator	181
6.7.4	Phasenschieber-Transformator	181
6.7.5	Prüfung	184
7	Gleichstrommaschine	185
7.1	Aufbau und Wirkungsweise	185
7.1.1	Prinzip	186
7.1.2	Technische Umsetzung	191
7.1.3	Ankerwicklung	194
7.1.4	Erregerwicklung	195
7.1.5	Feldverteilung	196
7.1.6	Kommutierung und Wendepolwicklung	199
7.1.7	Ankerrückwirkung	201
7.2	Modellbildung	203
7.2.1	Klemmenbezeichnung	203
7.2.2	Symbole und Schaltungen	204
7.2.3	Modell und Ersatzschaltbild	206
7.2.4	Leistungsbilanz	210

7.2.5	Typenschild und Bemessungsgrößen	214
7.2.6	Berechnete Bemessungsgrößen	214
7.2.7	Bauvolumen	215
7.3	Betriebsverhalten	216
7.3.1	Ein- und Ausschalten	216
7.3.2	Permanentmagnetmaschine	217
7.3.3	Vier-Quadranten-Betrieb	221
7.3.4	Fremderregte Gleichstrommaschine	223
7.3.5	Wirksame Windungszahl	227
7.3.6	Nebenschlussgenerator	229
7.3.7	Reihenschlussmaschine	230
7.3.8	Universalmaschine	231
8	Gleichstromsteller	233
8.1	Tiefsetzsteller	233
8.2	H-Brücke	237
9	Netzgeführter Gleichrichter	241
9.1	M1U-Gleichrichter	242
9.2	M1C-Gleichrichter	244
9.3	B2U-Gleichrichter	246
9.4	B2C-Gleichrichter	248
9.5	B6U-Gleichrichter	251
9.6	B6C-Gleichrichter	253
10	Drehfeldmaschine	257
10.1	Grundlegende Eigenschaften	258
10.2	Erzeugung eines Drehfelds	259
10.2.1	Rotierender Permanentmagnet	260
10.2.2	Drehfeld einer Drehstromwicklung	262
10.2.3	Ideale Drehfeldmaschine	264
10.2.4	Reale Drehfeldmaschine	265
10.3	Drehstromwicklung	266
10.3.1	Kenngrößen	268
10.3.2	Typenschild	272
10.3.3	Berechnete Bemessungsgrößen	273
10.3.4	Klemmenkasten	274
10.3.5	Polumschaltbare Wicklung	274
10.4	Raumzeiger	275

10.4.1	Rücktransformation	278
10.4.2	Leistung und Drehmoment	278
10.4.3	Bezogene Raumzeiger	279
10.5	Bauvolumen	280
11	Asynchronmaschine	281
11.1	Aufbau	281
11.1.1	Kurzschlussläufer	281
11.1.2	Schleifringläufer	284
11.2	Grundlegende Eigenschaften	286
11.2.1	Wirkungsweise	286
11.2.2	Ersatzschaltbild	288
11.2.3	Eigenschaften des Drehfelds	290
11.2.4	Typenschild und Bemessungsgrößen	291
11.2.5	Leistungsbilanz	292
11.3	Vereinfachtes Ersatzschaltbild	295
11.3.1	Leistung und Verluste	295
11.3.2	Streuung und Rotorzeitkonstante	296
11.3.3	Bemessungsgrößen	297
11.4	Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer am Netz	297
11.4.1	Statorstromortskurve	298
11.4.2	Betriebskennlinien	301
11.4.3	Stromverdrängung und Netzanlauf	307
11.4.4	Strombegrenzung beim Netzanlauf	311
11.4.5	Drehzahlstellung	315
11.5	Parameterbestimmung	316
11.5.1	Kurzschlussversuch	316
11.5.2	Leerlaufversuch	318
11.5.3	Übersetzungsverhältnis	320
11.6	Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer am Stromrichter	320
11.6.1	Ersatzschaltbild	321
11.6.2	Betriebskennlinien	322
11.6.3	Grenzkennlinien	325
11.6.4	Vergleich Netz- und Stromrichterbetrieb	328
11.7	Asynchronmaschine mit Schleifringläufer am Netz	329
11.7.1	Externe Rotorwiderstände	330
11.7.2	Betriebskennlinien	330
11.8	Doppelt gespeiste Asynchronmaschine	332

11.8.1	Leistungsbilanz	333
11.8.2	Vergleich von Schleifringläufer-Maschinen mit externen Rotorwiderständen und doppelter Speisung	335
11.9	Einphasen-Asynchronmaschine	336
11.9.1	Drehstromasynchronmaschine im einphasigen Betrieb	337
11.9.2	Asynchronmaschine mit Haupt- und Hilfswicklung	338
12	Synchronmaschine	339
12.1	Aufbau	340
12.1.1	Vollpolläufer mit elektrischer Erregung	341
12.1.2	Schenkelpolläufer mit elektrischer Erregung	343
12.1.3	Erregersystem	345
12.1.4	Permanentmagnetläufer	347
12.1.5	Reluktanzläufer	349
12.2	Grundlegende Eigenschaften	349
12.2.1	Rotorfestes Koordinatensystem	349
12.2.2	Ersatzschaltbild bei magnetisch symmetrischem Rotor	351
12.2.3	Leistungsbilanz	353
12.2.4	Vereinfachtes Ersatzschaltbild bei magnetisch symmetrischem Rotor ..	356
12.3	Vollpolmaschine am Netz	356
12.3.1	Typenschild und Bemessungsgrößen	356
12.3.2	Polradwinkel	357
12.3.3	Betriebszustände	358
12.3.4	Zeigerdiagramme	360
12.3.5	Betriebskennlinien	362
12.3.6	Synchronisierung	367
12.4	Vollpolgenerator im Inselbetrieb	368
12.5	Schenkelpolmaschine am Netz	369
12.5.1	Vereinfachte Gleichungen	369
12.5.2	Betriebskennlinien	370
12.6	Kennlinien bei variabler Erregung	372
12.6.1	Leerlaufversuch	372
12.6.2	Kurzschlussversuch	373
12.6.3	Leerlauf-Kurzschlussverhältnis	374
12.7	Permanentmagnet-Maschine am Stromrichter	375
12.7.1	Vereinfachte Gleichungen	375
12.7.2	Feldorientierte Regelung	377
12.7.3	Betriebskennlinien	378

12.7.4	Grenzkennlinien	382
12.7.5	Bürstenlose Gleichstrommaschine	383
12.8	Synchronmaschine mit Reluktanzläufer am Stromrichter	383
12.8.1	Betriebseigenschaften	384
12.8.2	Betriebskennlinien	384
12.8.3	Vergleich mit Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine	386
13	Selbstgeführter Stromrichter	387
13.1	Maschinenstromrichter	388
13.2	Pulsmuster	391
13.2.1	Vollblockbetrieb	392
13.2.2	Unterschwingungsverfahren	393
13.2.3	Raumzeigermodulation	397
13.3	Netzstromrichter	399
A	Technologievergleich	403
A.1	Vergleich von elektrischen Maschinen	403
A.2	Vergleich von Netzgleichrichtern für den Umrichterbetrieb	405
	Literatur	407
	Stichwortverzeichnis	411