

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 10. Auflage XIII

Vorwort zur 1. Auflage (1970) XVII

- 0** **Einleitung** 1
- 0.1 Schreibweise der Formelzeichen 1
- 0.2 Formelzeichen 2
- 0.3 Vorzeichenvereinbarungen 7
- 0.4 Formulierung der Grundgesetze 10
- 0.5 Zusammengefasste Darstellung der komplexen Wechselstromrechnung 20
- 0.6 Einführung und Eigenschaften des symmetrischen Dreiphasensystems 32
- 0.7 Einführung symmetrischer Komponenten 37
- 0.8 Darstellung magnetischer Felder 39

- 1** **Transformator** 45
- 1.1 Historische Entwicklung und wirtschaftliche Bedeutung 45
- 1.2 Wirkungsweise und Betriebsverhalten des Einphasentransformators 47
- 1.2.1 Prinzipielle Ausführungsformen 47
- 1.2.2 Wirkungsweise 49
- 1.2.3 Analytische Behandlung 83
- 1.2.4 Betriebsverhalten am Netz starrer Spannung 89
- 1.2.5 Betriebsverhalten bei vorgegebenem Strom 102
- 1.3 Wirkungsweise und Betriebsverhalten des Dreiphasentransformators 104
- 1.3.1 Ausführungsformen 104
- 1.3.2 Wirkungsweise unter symmetrischen Betriebsbedingungen 112
- 1.3.3 Analytische Behandlung und Betriebsverhalten unter symmetrischen Betriebsbedingungen 129
- 1.3.4 Betriebsverhalten unter unsymmetrischen Betriebsbedingungen 131

1.3.5	Einsatz der Schaltungskombinationen	142
1.4	Besondere Ausführungsformen	144
1.4.1	Spartransformatoren	144
1.4.2	Stelltransformatoren	148
1.4.3	Stromrichtertransformatoren	150
1.4.4	Messwandler	153
1.5	Energieumsatz	163
1.5.1	Verluste	163
1.5.2	Wirkungsgrad	164
1.6	Prüfung	168
1.6.1	Festgelegte Anforderungen	168
1.6.2	Leerlaufversuch	169
1.6.3	Kurzschlussversuch	171
1.7	Erwärmung und Kühlung	176
1.7.1	Wärmequellen	176
1.7.2	Mechanismus des Erwärmungsvorgangs und der stationären Wärmeströmung	177
1.7.3	Wärmeströmung innerhalb der aktiven Bauteile	181
1.7.4	Kühlungsarten	183
1.7.5	Übertemperatur der Wicklung und Wärmeklassen des Isoliersystems	187
1.7.6	Betriebsarten	188
1.8	Technische Ausführung von Leistungstransformatoren	188
1.8.1	Grundlegendes über die Baugröße	188
1.8.2	Konstruktive und technologische Gestaltung der aktiven Bauteile	191
1.8.3	Äußere Gestaltung	196
1.8.4	Schaltzeichen	198
1.8.5	Schutztechnik	199
1.8.6	Ausführungsbeispiele	203
2	Allgemeine Betrachtungen über rotierende elektrische Maschinen	207
2.1	Aufgaben	207
2.2	Energieumsatz	208
2.2.1	Grundlagen der elektrömechanischen Energiewandlung	208
2.2.2	Stationärer Energieumsatz	213
2.3	Konstruktive und technologische Gestaltung	223
2.3.1	Aktive Bauteile	223
2.3.2	Inaktive Bauteile	232
2.3.3	Bauformen	234
2.3.4	Schutzgrade	235
2.4	Magnetisches Feld	237
2.4.1	Aufteilung der Felder und Verkettungsmechanismus	237
2.4.2	Beschreibung des Luftspaltfelds	240
2.4.3	Bestimmung des Luftspaltfelds	243
2.4.4	Spannungsinduktion durch das magnetische Feld	252

- 2.5 Erwärmung und Kühlung 257
 - 2.5.1 Wärmequellen 257
 - 2.5.2 Erwärmungsvorgang 257
 - 2.5.3 Stationäre Wärmeströmung 263
 - 2.5.4 Kühlmethoden 266
- 2.6 Prüfung 275
 - 2.6.1 Festgelegte Anforderungen 275
 - 2.6.2 Prüfungsdurchführung 277
- 2.7 Technische Ausführung 280
 - 2.7.1 Grundlegendes über die Baugröße 280
 - 2.7.2 Zusammenhang zwischen Baugröße und Wirkungsgrad 283
 - 2.7.3 Anforderungen an die Energieeffizienz 284
 - 2.7.4 Elemente der Schaltzeichen 286
 - 2.7.5 Schutztechnik 286
- 3 Gleichstrommaschine 289**
 - 3.1 Historische Entwicklung und wirtschaftliche Bedeutung 289
 - 3.2 Aufbau 290
 - 3.2.1 Prinzipieller Aufbau 290
 - 3.2.2 Entwicklung des Kommutatorankers 290
 - 3.2.3 Aufbau der realen Gleichstrommaschine 295
 - 3.3 Analytische Behandlung 302
 - 3.3.1 Luftspaltfeld 302
 - 3.3.2 Spannungsinduktion im Kommutatoranker 310
 - 3.3.3 Spannungsgleichung des Ankerkreises 312
 - 3.3.4 Drehmoment 313
 - 3.3.5 Kommutierung 313
 - 3.4 Gleichstrommaschinen mit Fremd-, Nebenschluss- und Permanenterregung 319
 - 3.4.1 Betriebsverhalten als Generator bei konstanter Drehzahl 319
 - 3.4.2 Betrieb an einem Netz starrer Spannung 323
 - 3.4.3 Betrieb im drehzahlvariablen Antrieb 336
 - 3.4.4 Energieumsatz 347
 - 3.5 Gleichstrommaschinen mit Reihenschlusserregung 348
 - 3.5.1 Motorbetrieb am Netz starrer Spannung 348
 - 3.5.2 Anlassen 353
 - 3.5.3 Bremsen 354
 - 3.6 Einsatz 354
 - 3.7 Prüfung 356
 - 3.8 Technische Ausführung 357
 - 3.8.1 Konstruktive und technologische Gestaltung 357
 - 3.8.2 Schaltzeichen 358
 - 3.8.3 Klemmenbezeichnungen 358
 - 3.8.4 Ausführungsbeispiele 360

- 4 **Allgemeine Betrachtungen über Maschinen mit Drehfeldern als Luftspaltfeld** 365**
- 4.1 Drehfeld 365
- 4.1.1 Definition des Drehfelds 365
- 4.1.2 Aufbau eines Drehfelds 367
- 4.1.3 Spannungsinduktion durch ein Drehfeld 379
- 4.1.4 Entwicklung des mittleren Drehmoments aus Sicht der Drehfelder des Luftspaltfelds 381
- 4.2 Mechanismus der Hauptwellenverkeftung 384
- 4.2.1 Prinzip der Hauptwellenverkeftung 384
- 4.2.2 Spannungsgleichung des Strangs a 384
- 4.3 Leistungsfluss und Drehmoment 386
- 4.3.1 Beziehungen zwischen Ständer- und Läufergrößen 386
- 4.3.2 Leistungsfluss 392
- 4.3.3 Entwicklung der verschiedenen Arten von Drehfeldmaschinen 395
- 4.3.4 Ermittlung des Drehmoments 397

- 5 **Dreiphasen-Induktionsmaschine** 399**
- 5.1 Historische Entwicklung und wirtschaftliche Bedeutung 399
- 5.2 Prinzipieller Aufbau 400
- 5.3 Wirkungsweise 403
- 5.3.1 Wirkungsweise am starren Netz in erster Näherung – Leerhochlauf und Lastübernahme 404
- 5.3.2 Wirkungsweise am starren Netz in zweiter Näherung 411
- 5.3.3 Wirkungsweise am Netz variabler Frequenz 413
- 5.4 Analytische Behandlung 416
- 5.4.1 Analytische Behandlung der Maschine mit Schleifringläufer 416
- 5.4.2 Analytische Behandlung der Maschine mit Käfigläufer 421
- 5.5 Betriebsverhalten mit kurzgeschlossenem Schleifringläufer bzw. mit stromverdrängungsfreiem Käfigläufer am starren Netz 426
- 5.5.1 Ströme 426
- 5.5.2 Ortskurven von Ständer- und Magnetisierungsstrom 430
- 5.5.3 Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie 436
- 5.5.4 Stromortskurve unter Berücksichtigung des Widerstands der Ständerwicklung 442
- 5.5.5 Energieumsatz 444
- 5.6 Betriebsverhalten mit Käfigläufer unter dem Einfluss der Stromverdrängung 445
- 5.6.1 Maschine mit Einfachkäfig-Hochstabläufer 445
- 5.6.2 Maschine mit Doppelkäfigläufer 445
- 5.7 Spezielle Betriebszustände am starren Netz 447
- 5.7.1 Anlassen 447
- 5.7.2 Bremsen 456
- 5.8 Betriebsverhalten mit Schleifringläufer als doppeltgespeiste Induktionsmaschine 459

- 5.8.1 Aufbau und Leistungsfluss 459
- 5.8.2 Strom-Spannungs-Verhalten 462
- 5.8.3 Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien 467
- 5.9 Betriebsverhalten mit Käfigläufer im drehzahlvariablen Antrieb 469
- 5.10 Besondere Ausführungsformen 474
 - 5.10.1 Polumschaltbare Maschinen 474
 - 5.10.2 Gegendrehfeld-Erregermaschinen 474
- 5.11 Einsatz 475
- 5.12 Prüfung 477
 - 5.12.1 Festgelegte Anforderungen 477
 - 5.12.2 Betriebskennlinien und Betriebskennwerte 478
- 5.13 Technische Ausführung 483
 - 5.13.1 Konstruktive und technologische Gestaltung 483
 - 5.13.2 Schaltzeichen 486
 - 5.13.3 Klemmenbezeichnungen 486
 - 5.13.4 Schutztechnik 487
 - 5.13.5 Ausführungsbeispiele 492
- 6 Dreiphasen-Synchronmaschine 501**
 - 6.1 Historische Entwicklung und wirtschaftliche Bedeutung 501
 - 6.2 Prinzipieller Aufbau 503
 - 6.3 Wirkungsweise am starren Netz 506
 - 6.3.1 Komponenten des Luftspaltfelds und zugehörige Spannungen 507
 - 6.3.2 Herstellen der Verbindung mit dem Netz 510
 - 6.3.3 Mechanismus der Blindlastübernahme 514
 - 6.3.4 Mechanismus der Wirklastübernahme 516
 - 6.4 Analytische Behandlung 520
 - 6.4.1 Allgemeine Spannungsgleichung und Beziehung für die Ankerdurchflutung 521
 - 6.4.2 Spannungsgleichung der ungesättigten Maschine – Einführung von Reaktanzen 523
 - 6.4.3 Kurzschluss 535
 - 6.5 Betriebsverhalten der ungesättigten Maschine am starren Netz 537
 - 6.5.1 Ankerstrom 537
 - 6.5.2 Drehmoment 539
 - 6.5.3 Statische Stabilität 543
 - 6.5.4 Ortskurven des Ankerstroms 547
 - 6.5.5 V-Kurven 551
 - 6.5.6 Grenzleistungsdiagramm 553
 - 6.6 Betriebsverhalten der ungesättigten Maschine bei Generatorbetrieb auf ein passives Netzwerk 553
 - 6.6.1 Ankerstrom 554
 - 6.6.2 Drehmoment 556
 - 6.6.3 Strom-Spannungs-Kennlinien 558
 - 6.6.4 Bremsbetrieb 561

6.7	Genäherte Behandlung der gesättigten Maschine	562
6.7.1	Leerlauf	563
6.7.2	Kurzschluss	564
6.7.3	Belastung	565
6.7.4	Energieumsatz	570
6.8	Erregung	571
6.8.1	Klassische Erregungssysteme für Synchrongeneratoren	572
6.8.2	Moderne Erregungssysteme für Synchrongeneratoren	574
6.8.3	Selbsterregte Synchronmaschinen	575
6.8.4	Erregung von Synchronmotoren	577
6.8.5	Entregungsschaltungen	580
6.9	Spezielle Betriebszustände am starren Netz – Anlauf und Synchronisieren	581
6.10	Betriebsverhalten im drehzahlvariablen Antrieb	584
6.10.1	Betriebsverhalten der fremdgeführten Maschine	586
6.10.2	Betriebsverhalten der selbstgeführten Maschine	591
6.10.3	Sinusstromspeisung und Blockstromspeisung	595
6.11	Besonderheiten von Synchronmaschinen mit Permanenterregung	598
6.12	Besonderheiten synchroner Reluktanzmaschinen	602
6.13	Besondere Ausführungsformen	605
6.13.1	Synchronisierte Induktionsmaschine	605
6.13.2	Klauenpolmaschine	606
6.13.3	Torquemotor	607
6.13.4	Außenpol-Erregermaschine	607
6.13.5	Synchronmaschine mit supraleitender Erregerwicklung	609
6.14	Einsatz	610
6.15	Prüfung	614
6.15.1	Festgelegte Anforderungen	614
6.15.2	Betriebskennlinien und Betriebskennwerte	615
6.16	Technische Ausführung	616
6.16.1	Konstruktive und technologische Gestaltung	616
6.16.2	Schaltzeichen	628
6.16.3	Klemmenbezeichnungen	628
6.16.4	Schutztechnik	629
6.16.5	Ausführungsbeispiele	630
7	Maschinen für Betrieb am Einphasennetz	639
7.1	Historische Entwicklung und wirtschaftliche Bedeutung	639
7.2	Einphasen-Induktionsmaschine	640
7.2.1	Prinzipielle Eigenschaften	640
7.2.2	Ausführungsformen	642
7.3	Einphasen-Synchronmaschine	646
7.4	Einphasen-Reihenschlussmaschine (Universalmotor)	648
7.4.1	Ausführungsformen	648
7.4.2	Prinzipielle Eigenschaften	650

7.4.3	Betriebsverhalten am starren Netz	654
8	Weitere Maschinenkonzepte	663
8.1	Weitere aktuelle Maschinenkonzepte	663
8.1.1	Hybridmaschine (Switched-Flux PM Machine)	663
8.1.2	Geschaltete Reluktanzmaschine	666
8.1.3	Transversalflussmaschine	669
8.1.4	Linearmotor	671
8.2	Heute nicht mehr ausgeführte Maschinenkonzepte	673
8.2.1	Drehstrom-Kommutatormaschine	673
8.2.2	Drehtransformator	676
8.2.3	Harzsche Schaltung	677
8.2.4	Hysteresemotor	678
8.2.5	Leonardschaltung	679
8.2.6	Mittelfrequenzgenerator	679
8.2.7	Querfeldmaschine	680
8.2.8	Repulsionsmotor	681
8.2.9	Verstärkermaschine	681
9	Maschinen für andere Arten der Einspeisung	683
9.1	Schrittmotoren	683
9.1.1	Prinzipielle Eigenschaften	683
9.1.2	Ausführungsformen	688
9.2	Bürstenlose Maschinen für Gleichstrombetrieb	690
9.2.1	Prinzipielle Eigenschaften	690
9.2.2	Ausführungsformen	692
	Anhang	695
A.1	Fourier-Koeffizienten	695
A.2	Nennspannungen und Nennfrequenzen	698
A.2.1	Nennspannungen nach IEC 60038 (DIN IEC 60038) (Angaben in V)	698
A.2.2	Nennfrequenzen von 16,7 Hz bis 10 000 Hz nach DIN IEC 40005 (Angaben in Hz)	698
A.3	Zusammenstellung der wichtigsten Normen	698
	Weiterführende Literatur	705
	Stichwortverzeichnis	707