

Inhalt

1 Grundlagen	1
1.1 Einheiten, Zählpfeile, Bezeichnungen und Schreibweisen	2
1.2 Elektromagnetische Induktion, Induktionsgesetz	4
1.2.1 Leiterschleife	8
1.2.2 Rotierende Leiterschleife im homogenen Magnetfeld – Wechselspannungsgenerator 1	10
1.2.3 Reihenschaltung von N Leiterschleifen, Induktionsfluss	15
1.2.4 Wechselspannungsgenerator 2	16
1.2.5 Drehspannungsgenerator	21
1.3 Durchflutungsgesetz, Magnetische Charakteristik	23
1.4 Einphasentransformator, Magnetisierungsstrom	27
1.4.1 Der verlust- und streuungslose Zweiwicklungs-Transformator	28
1.4.2 Der Zweiwicklungs-Transformator	35
1.5 Elektrische Ausgleichsvorgänge	39
1.5.1 Spule an Gleichspannung	43
1.5.2 Spule an Wechselspannung	47
1.5.3 Kurzgeschlossener Transformator	51
1.6 Elektrische Leistung	53
1.6.1 Momentanwert der elektrischen Leistung	54
1.6.2 Leistung bei sinusförmigen Wechselgrößen	54
1.7 Kräfte und Drehmomente	61
1.7.1 Kraftwirkungen auf Ladungsträger	61
1.7.2 Faraday-Maxwell'sche Flächenspannungen	65
1.7.3 Grenzflächenkräfte	69
1.7.4 Energiebilanzen	71
1.7.5 Zweispulensystem und die Grundtypen elektrischer Maschinen	76
1.7.6 Kraftwirkungen auf Leiter in Nuten	82
1.8 Komponentensysteme	88
1.8.1 Abspaltung eines Nullsystems	89
1.8.2 Einführung der Raumzeiger	90

1.8.3	Diagonalkomponenten nach E. Clarke	93
1.8.4	Symmetrische Komponenten nach C.L. Fortescue	93
1.8.5	Transformation in ein rotierendes Bezugssystem	94
1.8.6	Leistungen	96
1.8.7	Bildung des Spannungsraumzeigers am Wechselrichter mit Spannungszwischenkreis	97
1.8.8	Vektormodulation	100
	Literatur	102
2	Magnetfelder	105
2.1	Feldgleichungen	105
2.2	Modellbildung für die analytische Magnetfeldberechnung	106
2.2.1	Berücksichtigung der Nutung	107
2.3	Koordinatensysteme, Zählpfeile	108
2.4	Randbedingungen für das Feldproblem	111
2.4.1	Grenzbedingungen	111
2.4.2	Strombeläge	112
2.5	Lösung des Feldproblems für das Vier-Gebiete-Modell	118
2.5.1	Numerische Auswertung, Anwendungsbeispiele „Röntgenmotor“ und „Torquemotor“	123
2.6	Luftspaltfeld und dessen eindimensionale Näherung	129
2.7	Lösung des Feldproblems für das I-Gebiete-Modell mit Strombelagsanregung	131
2.8	Fünf-Gebiete-Modell mit bewegten, leitfähigen Feldräumen	134
2.8.1	Flussverketzung, Drehmoment und Leistungen	138
2.8.2	Feldanregung durch einen Rotorstrombelag	141
2.8.3	Anwendungsbeispiel „Zweipolige 1060 kW-Asynchronmaschine“	142
2.9	Maschinen mit Dauermagneterregung	142
2.9.1	Werkstoffeigenschaften der Dauermagnete	144
2.9.2	Feldgleichungen für Gebiete mit Dauermagneten	148
2.9.3	Leerlauffeld	151
2.9.4	Eindimensionale Feldnäherung, magnetische Charakteristik, Entmagnetisierungsstrom, Werkstoffeinsatz	155
2.9.5	Anwendungsbeispiel „Servomotor“	162
2.10	Stirnraumfelder	164
2.10.1	Kurzschlussfall	165
2.10.2	Leerlaufall	170
2.10.3	Stromverdrängung im Kurzschlussring von Asynchronmaschinen	171
2.10.4	Anwendungsbeispiel und Ergebnisanalyse	177
2.11	Felder in massiven Nutenleitern	180
2.11.1	Rechteckstäbe	180
2.11.2	Rundstäbe	196
2.11.3	Oberflächenstromdichte und Stabstrom	205
	Literatur	207

3	Wicklungen und Flussverkettungen	209
3.1	Mehrsträngige überlappende Wicklungen	210
3.1.1	Drehfelder	213
3.1.2	Betrachtungen zur Strangzahl	217
3.2	Konzentrierte Wicklungen	217
3.3	Kommutatorwicklungen	220
3.3.1	Eingängige ungekreuzte Schleifenwicklungen	221
3.4	Wicklungen für Reluktanzmotoren	227
3.5	Luftspaltfelder und ihr Beitrag zur Flussverkettung	229
3.5.1	Felder m-strängiger Wicklungen	229
3.5.2	Strangfelder	235
3.6	Nutenfelder und ihr Beitrag zur Flussverkettung	237
3.6.1	Einschichtwicklungen	240
3.6.2	Zweischichtwicklungen	240
3.6.3	Konzentrierte Wicklungen	244
3.6.4	Nutstreuinduktivität für stationäre Strangströme	245
3.6.5	Nutstreuinduktivität für instationäre Strangströme	246
3.6.6	Nichtlinear permeable Nutverschlüsse	247
3.6.7	Nutstreuleitwerte für keilförmige und runde Nuten	250
3.7	Stirnraumfelder und ihr Beitrag zur Flussverkettung	251
3.7.1	Beitrag des Stirnraumfeldes zur Flussverkettung einer Spule	252
3.7.2	Beitrag des Stirnraumfeldes zur Strang-Flussverkettung von konzentrierten Wicklungen	252
3.7.3	Beitrag des Stirnraumfeldes zur Strang-Flussverkettung von überlappenden Wicklungen	253
3.7.4	Stirnstreuinduktivitäten	255
3.8	Flussverkettung mit fremderregten Feldern	256
3.8.1	Flussverkettung mit einer Spule	257
3.8.2	Flussverkettung mit dem Strang k für überlappende Wicklungen	260
3.8.3	Flussverkettung mit dem Strang k für konzentrierte Wicklungen	262
3.8.4	Polradspannungen	264
	Literatur	266
4	Asynchronmaschinen – Stationärer Betrieb	267
4.1	Von den Anfängen zu aktuellen FuE-Themen	268
4.2	Aufbau und Ausführungsformen	269
4.3	Betriebsart und Modellierung	270
4.4	Funktionsprinzip	270
4.5	Wirkung der Statorgrundströme	273
4.5.1	Flussverkettung mit den Statorwicklungssträngen	273
4.5.2	Flussverkettung mit einer rotorfesten Windung	274

4.6	Kurzschlussläufer	277
4.6.1	Flussverkettung der Statorgrundströme mit den Käfigmaschen	277
4.6.2	Käfigströme und deren Felder	278
4.6.3	Flussverkettung der Rotorfelder mit den Käfigmaschen	280
4.6.4	Flussverkettung der Rotorfelder mit dem k-ten Statorstrang	280
4.6.5	Statorströme mit netzfremden Frequenzen, deren Felder und Flussverkettung mit dem k-ten Statorstrang	281
4.6.6	Flussverkettung der Felder der Statoroberströme mit den Käfigmaschen	284
4.6.7	Statorspannungsgleichung für die Netzfrequenz	286
4.6.8	Spannungsgleichungen für die Statoroberströme	287
4.6.9	Spannungsgleichungen für die Rotormaschen	288
4.6.10	Zusammenstellung der Spannungsgleichungen und Berechnung der Ströme	291
4.6.11	Nachweis der Ankerrückwirkungen durch Messung der Statorströme	294
4.6.12	Leistungen und Drehmoment	296
4.7	Asynchronmaschinen mit Schleifringläufer	301
4.7.1	Flussverkettung des Statorfeldes mit der Rotorwicklung	301
4.7.2	Rotorströme, deren Felder und Induktionswirkungen	303
4.7.3	Spannungsgleichungen	305
4.8	Grundwellenmodell für Kurzschlussläufer- und Schleifringläufermaschinen	305
4.8.1	Leistungen und Drehmoment	310
4.8.2	Zeigerbild, Stromortskurven, einsträngiges Ersatzschaltbild	315
4.8.3	Verluste und Wirkungsgrad	322
4.9	Betrieb mit veränderbarer Drehzahl	324
4.9.1	Änderung des Schlupfes	325
4.9.2	Polumschaltbare Wicklungen	326
4.9.3	Änderung der Leerlaufdrehzahl durch Frequenzsteuerung	326
4.9.4	Umrichter mit Spannungszwischenkreis	328
4.10	Doppeltgespeiste Asynchronmaschinen	337
4.10.1	Synchronisierte Asynchronmaschine	340
	Literatur	344
5	Asynchronmaschinen – Dynamischer Betrieb	347
5.1	Das zu behandelnde System	348
5.2	Mathematisches Modell – Grundform	349
5.2.1	Zusammenstellung der wirksamen Induktivitäten aus zweidimensionaler analytischer Feldberechnung	350
5.2.2	Spannungsgleichungen für die Maschine mit Käfigläufer ...	351

5.2.3	Spannungsgleichungen für die Maschine mit Schleifringläufer	359
5.2.4	Die Systemgleichungen	362
5.2.5	Transformation in ein gemeinsames Koordinatensystem	363
5.3	Behandlung in statorfesten Koordinaten	365
5.3.1	Einführung eines Magnetisierungsstrom-Raumzeigers	366
5.3.2	Feldorientierter Betrieb	367
5.3.3	(Quasi-) Stationärer Betrieb am symmetrischen Drehspannungssystem	368
5.4	Analytische Integration der Systemgleichungen	369
5.4.1	Das mathematische Modell	370
5.4.2	Die Integrationsmethode	373
5.5	Einbeziehung der Stromverdrängung in den Stäben von Käfigläufermaschinen	375
5.5.1	Transiente Stromverteilung in Rechteckstäben	377
5.6	PC-Programm und Beispielrechnungen	383
	Literatur	385
6	Fremderregte Maschinen mit symmetrischem Magnetkreis – Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschinen und Synchronmaschinen	387
6.1	Einleitung	388
6.2	Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschinen, 120° Blockbetrieb, konstante Drehzahl	390
6.2.1	Systembeschreibung	390
6.2.2	Drehmomentenbildung und Stromaufnahme	392
6.2.3	Funktionsweise	395
6.2.4	Betriebsverhalten für stationären Betrieb an konstanter Zwischenkreisspannung, Gleichstrommodell	398
6.2.5	Stationärer Betrieb an konstanter Zwischenkreisspannung, Wechselstrommodell	402
6.3	Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschine, 180° Blockbetrieb, stationär	413
6.4	Sensorlose Kommutierung	416
6.4.1	Betrieb mittels Back-EMF-Sensing	417
6.5	Betrieb mit eingprägten sinusförmigen Spannungen	428
6.5.1	Spannungsgleichungen	428
6.5.2	Drehmomentbildung	431
6.5.3	Stromortskurve und Ersatzschaltbild	436
6.5.4	Anwendungsbeispiel „Torquemotor“	437
6.5.5	Betrieb mit veränderlicher Drehzahl	438
6.5.6	Quasistationäres Bremsen	443
6.6	Vergleich der Motorkonzepte für stationären Betrieb	445
6.7	Dynamischer Betrieb	449
6.7.1	Spannungsgleichungen für dynamischen Betrieb	449
6.7.2	Elektrodynamisches Moment und Bewegungsgleichung	454

6.7.3	Zusammenstellung der Systemgleichungen und Transformation in ein rotierendes Bezugssystem	455
6.7.4	Rotorfeld orientierter Betrieb	457
6.7.5	Regelantrieb	457
6.7.6	Analytische Integration der Systemgleichungen	462
	Literatur	472
7	Beschreibung des elektromagnetischen Feldes durch das magnetische Vektorpotential \vec{A}	473
7.1	Feldgleichung für metallische Leiter	476
	Literatur	477
8	Ebene Feldprobleme	479
8.1	Partielle Differentialgleichung, Lösungsstrategie	479
8.2	Laplace'sche Differentialgleichung	480
8.2.1	Zylindrische Feldräume mit Strombelagsanregung	481
8.2.2	Carterfaktor-Problem	484
8.3	Poisson'sche Differentialgleichung	486
8.3.1	Spezialfall $A \neq A(\varphi)$	486
8.3.2	Spezialfall $J(r, \varphi) = \sum_v J_r(r) \cdot {}^v J_\varphi(\varphi)$	488
	Literatur	489
	Sachverzeichnis	491