
Ekkehard Bolte

Elektrische Maschinen

Grundlagen · Magnetfelder · Erwärmung ·
Funktionsprinzipien · Betriebsarten ·
Einsatz · Entwurf · Wirtschaftlichkeit

2. Auflage

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	1
1.1	Einheiten, Zählpeile, Bezeichnungen und Schreibweisen	2
1.2	Elektromagnetische Induktion, Induktionsgesetz.....	4
1.2.1	Leiterschleife	10
1.2.2	Rotierende Leiterschleife im homogenen Magnetfeld – Wechselspannungsgenerator 1	12
1.2.3	Reihenschaltung von N Leiterschleifen, Induktionsfluss	17
1.2.4	Wechselspannungsgenerator 2	18
1.2.5	Drehspannungsgenerator	23
1.3	Durchflutungsgesetz, Magnetische Charakteristik	25
1.4	Einphasentransformator, Magnetisierungsstrom.....	30
1.4.1	Der verlust- und streuungslose Zweiwicklungs-Transformator .	30
1.4.2	Der Zweiwicklungs-Transformator	37
1.5	Elektrische Ausgleichsvorgänge.....	42
1.5.1	Spule an Gleichspannung	46
1.5.2	Spule an Wechselspannung	50
1.5.3	Kurzgeschlossener Transformator	54
1.6	Elektrische Leistung.....	56
1.6.1	Momentanwert der elektrischen Leistung	57
1.6.2	Leistung bei sinusförmigen Wechselgrößen	58
1.7	Kräfte und Drehmomente	64
1.7.1	Kraftwirkungen auf Ladungsträger	64
1.7.2	Faraday-Maxwell'sche Flächenspannungen	68
1.7.3	Grenzflächenkräfte	72
1.7.4	Energiebilanzen	74
1.7.5	Zweispulensystem und die Grundtypen elektrischer Maschinen	79
1.7.6	Kraftwirkungen auf Leiter in Nuten	86
1.8	Komponentensysteme	92

1.8.1	Abspaltung eines Nullsystems	92
1.8.2	Einführung der Raumzeiger	93
1.8.3	Diagonalkomponenten nach E. Clarke	96
1.8.4	Symmetrische Komponenten nach C.L. Fortescue	97
1.8.5	Transformation in ein rotierendes Bezugssystem	98
1.8.6	Leistungen	99
1.8.7	Bildung des Spannungsraumzeigers am Wechselrichter mit Spannungszwischenkreis	101
1.8.8	Vektormodulation	104
Literatur		106
2	Magnetfelder	109
2.1	Feldgleichungen	110
2.2	Modellbildung für die analytische Magnetfeldberechnung	110
2.2.1	Berücksichtigung der Nutung	112
2.3	Koordinatensysteme, Zählpfeile	114
2.4	Randbedingungen für das Feldproblem	115
2.4.1	Grenzbedingungen	115
2.4.2	Strombeläge	116
2.5	Lösung des Feldproblems für das Vier-Gebiete-Modell	122
2.5.1	Numerische Auswertung, Anwendungsbeispiele „Röntgenmotor“ und „Torquemotor“	127
2.6	Luftspaltfeld und dessen eindimensionale Näherung	133
2.6.1	Zweidimensionales Luftspaltfeld	133
2.6.2	Eindimensionale Näherung des Luftspaltfeldes	135
2.6.3	Eindimensionale Näherung des Luftspaltfeldes – Einseitige Nutung, Leitwertswellen	139
2.6.4	Eindimensionale Näherung des Luftspaltfeldes – Doppelseitige Nutung	145
2.7	Lösung des Feldproblems für das I-Gebiete-Modell mit Strombelagsanregung	147
2.8	Fünf-Gebiete-Modell mit bewegten, leitfähigen Feldräumen	149
2.8.1	Flussverkettung, Drehmoment und Leistungen	154
2.8.2	Feldanregung durch einen Rotorstrombelag	156
2.8.3	Anwendungsbeispiel „Zweipolige 1060 kW Asynchronmaschine“	157
2.9	Maschinen mit Dauermagneterregung	158
2.9.1	Werkstoffeigenschaften der Dauermagnete	159
2.9.2	Feldgleichungen für Gebiete mit Dauermagneten	163
2.9.3	Leerlauf Feld	166
2.9.4	Eindimensionale Feldnäherung, magnetische Charakteristik, Entmagnetisierungsstrom, Werkstoffeinsatz	169

2.9.5	Anwendungsbeispiel „Servomotor“	177
2.10	Stirnraumfelder	178
2.10.1	Kurzschlussfall	180
2.10.2	Leerlauf fall	184
2.10.3	Stromverdrängung im Kurzschlussring von Asynchronmaschinen	186
2.10.4	Anwendungsbeispiel und Ergebnisanalyse	191
2.11	Felder in massiven Nutenleitern	195
2.11.1	Rechteckstäbe	195
2.11.2	Rundstäbe	210
2.11.3	Oberflächenstromdichte und Stabstrom	220
	Literatur	222
3	Wicklungen und Flussverkettungen	225
3.1	Mehrsträngige überlappende Wicklungen	226
3.1.1	Drehfelder	231
3.1.2	Betrachtungen zur Strangzahl	233
3.2	Konzentrierte Wicklungen	234
3.3	Kommutatorwicklungen	237
3.3.1	Eingängige ungekreuzte Schleifenwicklungen	237
3.4	Wicklungen für Reluktanzmotoren	244
3.5	Luftspaltfelder und ihr Beitrag zur Flussverkettung	246
3.5.1	Felder m-strängiger Wicklungen	246
3.5.2	Strangfelder	252
3.6	Nutenfelder und ihr Beitrag zur Flussverkettung	254
3.6.1	Einschichtwicklungen	257
3.6.2	Zweischichtwicklungen	258
3.6.3	Konzentrierte Wicklungen	261
3.6.4	Nutstreuintduktivität für stationäre Strangströme	263
3.6.5	Nutstreuintduktivität für instationäre Strangströme	263
3.6.6	Nichtlinear permeable Nutverschlüsse	264
3.6.7	Nutstreuleitwerte für keilförmige und runde Nuten	268
3.7	Stirnraumfelder und ihr Beitrag zur Flussverkettung	269
3.7.1	Beitrag des Stirnraumfeldes zur Flussverkettung einer Spule ...	269
3.7.2	Beitrag des Stirnraumfeldes zur Strang-Flussverkettung von konzentrierten Wicklungen	270
3.7.3	Beitrag des Stirnraumfeldes zur Strang-Flussverkettung von überlappenden Wicklungen	270
3.7.4	Stirnstreuintduktivitäten	271
3.8	Flussverkettung mit fremderregten Feldern	274
3.8.1	Flussverkettung mit einer Spule	275

3.8.2	Flussverkettung mit dem Strang k für überlappende Wicklungen	277
3.8.3	Flussverkettung mit dem Strang k für konzentrierte Wicklungen	279
3.8.4	Polradspannungen	281
3.9	Messung der Streuinduktivität	283
3.9.1	Anwendungsbeispiel, Schlussfolgerungen	286
	Literatur	290
4	Asynchronmaschinen – Stationärer Betrieb	291
4.1	Von den Anfängen zu aktuellen FuE-Themen	292
4.2	Aufbau und Ausführungsformen	293
4.3	Betriebsart und Modellierung	294
4.4	Funktionsprinzip	294
4.5	Wirkung der Statorgrundströme	297
4.5.1	Flussverkettung mit den Statorwicklungssträngen	297
4.5.2	Flussverkettung mit einer rotorfesten Windung	298
4.6	Kurzschlussläufer	301
4.6.1	Flussverkettung der Statorgrundströme mit den Käfigmaschen	301
4.6.2	Käfigströme und deren Felder	302
4.6.3	Flussverkettung der Rotorfelder mit den Käfigmaschen	304
4.6.4	Flussverkettung der Rotorfelder mit dem k -ten Statorstrang	304
4.6.5	Statorströme mit netzfremden Frequenzen, deren Felder und Flussverkettung mit dem k -ten Statorstrang	305
4.6.6	Flussverkettung der Felder der Statoroberströme mit den Käfigmaschen	307
4.6.7	Statorspannungsgleichung für die Netzfrequenz	309
4.6.8	Spannungsgleichungen für die Statoroberströme	311
4.6.9	Spannungsgleichungen für die Rotormaschen	311
4.6.10	Zusammenstellung der Spannungsgleichungen und Berechnung der Ströme	315
4.6.11	Nachweis der Ankerrückwirkungen durch Messung der Statorströme	317
4.6.12	Leistungen und Drehmoment	319
4.7	Asynchronmaschinen mit Schleifringläufer	323
4.7.1	Flussverkettung des Statorfeldes mit der Rotorwicklung	324
4.7.2	Rotorströme, deren Felder und Induktionswirkungen	326
4.7.3	Spannungsgleichungen	328
4.8	Grundwellenmodell für Kurzschlussläufer- und Schleifringläufermaschinen	329
4.8.1	Leistungen und Drehmoment	334
4.8.2	Zeigerbild, Stromortskurven, einsträngiges Ersatzschaltbild	340

4.8.3	Verluste und Wirkungsgrad	346
4.9	Betrieb mit veränderbarer Drehzahl	349
4.9.1	Änderung des Schlupfes	349
4.9.2	Polumschaltbare Wicklungen	350
4.9.3	Änderung der Leerlaufdrehzahl durch Frequenzsteuerung	351
4.9.4	Umrichter mit Spannungszwischenkreis	353
4.10	Doppeltgespeiste Asynchronmaschinen	362
4.10.1	Synchronisierte Asynchronmaschine	365
	Literatur	368
5	Asynchronmaschinen – Dynamischer Betrieb	371
5.1	Das zu behandelnde System	372
5.2	Mathematisches Modell – Grundform	373
5.2.1	Zusammenstellung der wirksamen Induktivitäten aus zweidimensionaler analytischer Feldberechnung	374
5.2.2	Spannungsgleichungen für die Maschine mit Käfigläufer	376
5.2.3	Spannungsgleichungen für die Maschine mit Schleifringläufer	383
5.2.4	Die Systemgleichungen	386
5.2.5	Transformation in ein gemeinsames Koordinatensystem	388
5.3	Behandlung in statorfesten Koordinaten	390
5.3.1	Einführung eines Magnetisierungsstrom-Raumzeigers	390
5.3.2	Feldorientierter Betrieb	391
5.3.3	(Quasi-)Stationärer Betrieb am symmetrischen Drehspannungssystem	393
5.4	Analytische Integration der Systemgleichungen	394
5.4.1	Das mathematische Modell	394
5.4.2	Die Integrationsmethode	397
5.5	Einbeziehung der Stromverdrängung in den Stäben von Käfigläufermaschinen	401
5.5.1	Transiente Stromverteilung in Rechteckstäben	402
5.6	PC-Programm und Beispielrechnungen	408
	Literatur	410
6	Fremderregte Maschinen mit symmetrischem Magnetkreis – Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschinen und Synchronmaschinen	411
6.1	Einleitung	412
6.2	Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschinen, 120° Blockbetrieb, konstante Drehzahl	414
6.2.1	Systembeschreibung	414
6.2.2	Drehmomentenbildung und Stromaufnahme	417
6.2.3	Funktionsweise	418

6.2.4	Betriebsverhalten für stationären Betrieb an konstanter Zwischenkreisspannung, Gleichstrommodell	420
6.2.5	Stationärer Betrieb an konstanter Zwischenkreisspannung, Wechselstrommodell	428
6.3	Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschine, 180° Blockbetrieb, stationär	437
6.4	Sensorlose Kommutierung	441
6.4.1	Betrieb mittels Back-EMF-Sensing	441
6.5	Betrieb mit eingepprägten sinusförmigen Spannungen	453
6.5.1	Spannungsgleichungen	453
6.5.2	Drehmomentbildung	455
6.5.3	Stromortskurve und Ersatzschaltbild	460
6.5.4	Anwendungsbeispiel „Torquemotor“	462
6.5.5	Betrieb mit veränderlicher Drehzahl	464
6.5.6	Quasistationäres Bremsen	467
6.6	Vergleich der Motorkonzepte für stationären Betrieb	470
6.7	Dynamischer Betrieb	474
6.7.1	Spannungsgleichungen für dynamischen Betrieb	476
6.7.2	Elektrodynamisches Moment und Bewegungsgleichung	480
6.7.3	Zusammenstellung der Systemgleichungen und Transformation in ein rotierendes Bezugssystem	481
6.7.4	Rotorfeldorientierter Betrieb	482
6.7.5	Regelantrieb	483
6.7.6	Analytische Integration der Systemgleichungen	488
	Literatur	498
7	Fremderregte Maschinen mit magnetischer Unsymmetrie im Rotor – Schenkelpollläufer	499
7.1	Einleitung	500
7.2	Gegenstand der Untersuchung	501
7.3	Spannungsgleichungen	502
7.4	Bewegungsgleichung und Drehmoment	506
7.5	Einführung der $(d, q, 0)$ -Komponenten	507
7.6	Einteilung der dynamischen Betriebszustände in Gruppen	511
7.7	Synchroner Betrieb am symmetrischen Drehspannungssystem	512
7.8	Magnetfelder und Induktivitäten	519
7.8.1	Grundwellen-Leitwerte, Polformkoeffizienten	519
7.8.2	Messungen	524
	Literatur	526
8	Reluktanzmaschinen	527
8.1	Wirkungsprinzip, Betriebsarten, Aufbau	528
8.2	Geschaltete Reluktanzmaschinen	531

8.2.1	Einsträngige geschaltete Reluktanzmaschinen	531
8.2.2	Mehrsträngige geschaltete Reluktanzmaschinen	544
8.3	Synchrone Reluktanzmaschinen	554
	Literatur	557
9	Erwärmung und Temperaturverteilung	559
9.1	Einleitung	560
9.2	Erwärmung eines homogenen Körpers – Einkörperproblem	560
9.3	Differentialgleichung der Wärmeleitung	566
9.4	Wärme, Wärmeübertragung, Wärmeübergangszahl	568
9.4.1	Wärme und Wärmeübertragung	568
9.4.2	Wärmeübergangszahl	569
9.5	Mehrkörpersysteme, Wärmequellennetze	570
9.6	Temperaturberechnung für Mehrkörpersysteme	574
9.6.1	Temperaturberechnung für konstante Wärmekapazitäten, thermische Leitwerte und Leistungen	575
9.6.2	Allgemeine Temperaturberechnung	576
9.6.3	Näherungslösung	577
9.6.4	Anwendungsbeispiel	578
9.7	Messwerte für Wärmeleitwert und Wärmekapazität	579
9.8	Kühlung	582
	Literatur	584
10	Wirbelströme	585
10.1	Phänomenologie der Wirbelströmung	586
10.2	Eindringen eines elektromagnetischen Feldes in den eben begrenzten Halbraum	589
10.3	Wirbelströme in Blechen	591
10.4	Asynchronmaschinen mit massivem oder geschichtetem Sekundärteil ...	596
	Literatur	599
11	Auslegung von elektrischen Maschinen	601
11.1	Einführende Überlegungen	602
11.2	Einige Grundlagen aus der Mechanik	603
11.3	Getriebe mit Drehzahlwandlung	613
11.4	Elastisch gekoppelte Massen	617
11.4.1	Drehmomentmessung	619
11.5	Anforderungen	625
11.5.1	Elektrische Kraftfahrzeugantriebe	626
11.5.2	Generatoren für Windkraftanlagen	633
11.6	Einstieg in die Dimensionierung	637
11.7	Maschinen mit dauermagnetischer Erregung	643
11.7.1	Leerlauffeld und Magnetkreis	646

11.7.2	Zweidimensionale Magnetfeldberechnung	650
11.7.3	Gestaltung des Wickelraumes	654
11.7.4	Statorjochhöhe und Außenradius	659
11.7.5	Entmagnetisierungsfestigkeit	660
11.7.6	Ankerfeld	662
11.7.7	Windungszahl	663
11.7.8	Hybriderregte Synchronmaschine	664
	Literatur	666
12	Beschreibung des elektromagnetischen Feldes durch das magnetische Vektorpotential \vec{A}	669
12.1	Feldgleichung für metallische Leiter	672
	Literatur	673
13	Ebene Feldprobleme	675
13.1	Partielle Differentialgleichung, Lösungsstrategie	675
13.2	Laplace'sche Differentialgleichung	676
13.2.1	Zylindrische Feldräume mit Strombelagsanregung	678
13.2.2	Carterfaktor-Problem	680
13.3	Poisson'sche Differentialgleichung	682
13.3.1	Spezialfall $A \neq A(\varphi)$	683
13.3.2	Spezialfall $J(r, \varphi) = \sum_{\nu} {}^{\nu}J_r(r) \cdot {}^{\nu}J_{\varphi}(\varphi)$	685
	Literatur	685
	Sachverzeichnis	687