

Inhalt

Formelzeichen	23
0 Einführung	29
0.1 Geschichtliche Entwicklung	29
0.2 Leistungsklassen	30
0.3 Anwendungsgebiete	30
0.3.1 Elektrische Energieversorgung	31
0.3.2 Volkswirtschaftliche Aspekte	32
1 Allgemeine Grundlagen	35
1.1 Größen und Einheiten	35
1.2 Zählpeilsysteme	37
1.3 Einführung in die Wechselstromtechnik	39
1.4 Drehstrom	45
1.4.1 Grundlagen	45
1.4.2 Schaltungen bei Drehstrom	47
1.4.3 Unsymmetrische Belastung	51
1.4.3.1 Dreileiternetz	51
1.4.3.2 Vierleiternetz	52
1.4.4 Symmetrische Komponenten	53
1.5 Aufgaben zum Wechsel- und Drehstrom	55
1.6 Kennlinien	61
1.7 Stabilität	63
1.8 Grundgesetze	63
1.8.1 Durchflutungsgesetz und magnetische Feldstärke	64
1.8.2 Ohm'sches Gesetz des magnetischen Kreises, magnetischer Fluss Φ und Induktion B	67

1.8.3	Magnetisierungskennlinie (Hystereseschleife), Weich- und Permanentmagnete	68
1.8.4	Energie und Kraft im magnetischen Feld	77
1.8.5	Induktionsgesetz	80
1.8.6	Selbstinduktion und Selbstinduktivität	84
1.8.7	Gegeninduktion und Gegeninduktivität	86
1.8.8	Induzierte Spannung in einer rotierenden Spule im äußeren Magnetfeld	87
1.8.9	Aufgaben zum magnetischen Kreis	89
2	Transformatoren	99
2.1	Einleitung	99
2.2	Funktionsweise und Aufbau	99
2.2.1	Unterteilung nach der Form des Eisenkerns	100
2.2.2	Unterteilung nach der Form der Wicklungen	103
2.2.3	Unterteilung nach der Kühlung, der Isolierung und des Schutzes	103
2.3	Magnetisierungsstrom und Oberschwingungsverhalten	103
2.4	Betriebsverhalten, Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm	107
2.4.1	Idealer Transformator	107
2.4.2	Technischer Transformator	110
2.5	Spezielle Betriebszustände	115
2.5.1	Leerlauf	115
2.5.2	Vereinfachtes Ersatzschaltbild und Kurzschluss	118
2.5.3	Betrieb im Bemessungspunkt	122
2.5.3.1	Änderungen der Sekundärspannung bei Belastung	122
2.5.3.2	Grafische Darstellung (Kapp'sches Dreieck)	124
2.6	Parallelschaltung von Transformatoren	125
2.6.1	Ungleichheit der Übersetzungsverhältnisse	126
2.6.2	Ungleichheit der relativen Kurzschlussspannungen	127
2.7	Schaltungen und Schaltgruppen der Drehstromtransformatoren	128
2.8	Spartransformator	132
2.9	Stromtransformator	134
2.10	Verluste in elektrischen Maschinen	136
2.10.1	Eisenverluste	137
2.10.1.1	Wirbelstromverluste	137
2.10.1.2	Hystereseverluste	142
2.10.2	Kupferverluste	143
2.10.3	Bürstenübergangsverluste	145
2.10.4	Erreger- und Gleichrichterverluste	145

2.10.5	Lagerreibungs-, Luft-, Bürstenreibungs- und Lüfterverluste	145
2.10.6	Zusatzverluste	147
2.11	Wirkungsgrad.....	147
2.12	Life-Cycle-Costs elektrischer Antriebe	149
2.13	Aufgaben zu Transformatoren	153

3 Gleichstrommaschinen 159

3.1	Einleitung	159
3.2	Aufbau	160
3.3	Magnetischer Kreis (Entstehung des magnetischen Felds und der Pole)	161
3.4	Wicklungsarten des Ankers	165
3.5	Induzierte Spannung im Anker und Kommutation	167
3.6	Strombelag	172
3.7	Vereinfachte Schaltung, Drehmoment, Wirkungsweise und Ersatzschaltbild	174
3.8	Energiebilanz (Sankey-Diagramm)	176
3.9	Leistungsbeziehungen (innere und äußere Leistung)	177
3.10	Gleichstrommotoren	178
3.10.1	Besonderheiten, Betriebskennlinie, spezielle Anwendungen und Drehzahlverstellung	178
3.10.1.1	Fremderregter Motor und Nebenschlussmotor	178
3.10.1.2	Reihenschlussmotor	185
3.10.1.3	Doppelschlussmotor	187
3.10.2	Anlassen des Motors mithilfe der Ankervorwiderstände	189
3.11	Gleichstromgeneratoren.....	192
3.11.1	Fremderregter Generator.....	192
3.11.2	Selbsterregter Generator	194
3.12	Ankerrückwirkung, Wendepol und Kompensationswicklung ..	196
3.13	Kennzeichen der Anschlüsse	199
3.14	Ergänzungen	200
3.15	Aufgaben zu Gleichstrommaschinen	201

4 Grundlagen der Wechsel- bzw. Drehstrom- maschinen 209

4.1	Einleitung	209
4.1.1	Vergleich mit Gleichstrommaschinen	209
4.1.2	Vergleich von Wechselstrom- mit Drehstrommaschinen	210

4.1.3	Hauptunterteilung rotierender elektrischer Maschinen	210
4.1.3.1	Unterteilung nach Strangzahl	210
4.1.3.2	Unterteilung nach Außen- bzw. Innenpol	211
4.2	Drehfeld	212
4.2.1	Entstehung und Beschreibung	212
4.2.1.1	Drehfeld durch rotierendes Polrad (für Synchronmaschinen) ...	212
4.2.1.2	Drehfeld durch dreisträngige symmetrische Wicklung (für Asynchronmaschinen)	214
4.2.2	Induzierte Spannung des Drehfelds	221
4.3	Wicklungsfaktor (Zonen- und Sehnungsfaktor)	223
5	Asynchronmaschinen	227
5.1	Qualitative Betrachtung	227
5.1.1	Einleitung	227
5.1.2	Aufbau	232
5.1.3	Anschlussbezeichnungen und Verschaltung der Klemmen bei Drehstrom- und Wechselstrommaschinen	235
5.1.4	Funktionsweise und Betriebsverhalten (Schlupf, Drehzahlen, Frequenzen, Spannungen und Drehmoment)	236
5.1.5	Zeigerdiagramm der Induktion und des Strombelags.....	239
5.1.6	Betriebskennlinie (Drehmoment-Schlupf-Abhängigkeit, Kloss'sche Formel)	240
5.1.7	Energiebilanz (Sankey-Diagramm), Betriebszustände, ausgedrückt durch Luftspalt-, Läuferverlust- und mechanische Leistung	244
5.1.8	Asynchrongenerator	248
5.1.9	Anlass- und Bremsverfahren	251
5.1.9.1	Anlassverfahren	251
5.1.9.1.1	Läuferanlasser	251
5.1.9.1.1.1	Schleifringläufer	251
5.1.9.1.1.2	Käfigläufer	253
5.1.9.1.2	Ständeranlasser	254
5.1.9.1.2.1	Anlasstransformator	254
5.1.9.1.2.2	Unsymmetrische Speisung der Ständerwicklung (Kusa-Schaltung)	255
5.1.9.1.2.3	Anlassen mit veränderbarer Frequenz (Umrichter gespeiste Drehstromasynchronmaschinen)	256
5.1.9.1.2.4	Stern-Dreieck-Anlauf	258

6.8	Magnetfeldmessung	306
6.9	Drehzahlmessung	309
6.10	Drehmomentmessung	311
6.11	Geräuschmessung	316
6.11.1	Einleitung	316
6.11.2	Methoden zur Bestimmung von Kraft und Schwingungen	316
6.11.2.1	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	317
6.11.2.2	Schwingungsmessung mit Kondensatormikrofon	317
6.11.2.3	Schwingungsmessung mit induktivem magnetoelastischen Kraftaufnehmer	318
6.11.2.4	Schwingungsmessung mit transformatorischem magnetoelastischen Kraftaufnehmer	319
6.11.3	Methoden der Geräuscherfassung	320
6.11.3.1	Schalldruckmessung	320
6.11.3.2	Schallintensitätsmessung	324
6.11.3.3	Schallintensitätsmessung mit Microflow-Schallschnelle-Sensor	335
6.11.3.4	Akustische Kamera	336
6.11.3.4	Experimentelle Modalanalyse	337

7 Ausgewählte Kapitel der Leistungselektronik 341

7.1	Einleitung	341
7.2	Grundlagen der Halbleiterbauelemente	342
7.3	Aufbau, Wirkungsweise und Anwendung der Bauelemente	346
7.3.1	Widerstände, Kondensatoren und Spulen	346
7.3.2	Transistoren	348
7.3.3	Diode	353
7.3.4	Thyristor	354
7.4	Spezielle Anwendungen von Diode und Thyristor	356
7.4.1	Speisung des Gleichstrommotors durch das Wechselspannungsnetz	356
7.4.2	Gleichrichterschaltungen	357
7.4.2.1	Mit Wechselstrom	357
7.4.2.2	Mit Drehstrom	359
7.4.2.3	Glättung	360
7.4.2.4	Prinzipschaltung von Gleichrichterschaltungen (Stromrichter)	362
7.4.3	Antiparallel- bzw. Zweiwegschaltung (Triac)	363
7.4.4	Halbleiterbauelemente als Schalter	364
7.4.5	Prinzipschaltung von Wechselrichtern	365

7.4.6	Prinzipschaltung von Gleichstromstellern	366
7.4.7	Umrichter	367
7.4.8	<i>I</i> -, <i>U</i> - und Direktumrichter	367

8 Synchronmaschinen 369

8.1	Qualitative Betrachtung	369
8.1.1	Besonderheiten, Anwendung und Aufbau	369
8.1.2	Betriebsverhalten am starren Netz	371
8.1.2.1	Leerlauf	371
8.1.2.1.1	Drehfeld infolge des Ständerstroms	372
8.1.2.1.2	Drehfeld infolge des Erregerstroms	372
8.1.2.1.3	Drehfeld infolge von Ständer- und Erregerstrom	373
8.1.2.2	Lastfall	374
8.1.3	Pendelungen der Synchronmaschine	377
8.1.4	Synchronmaschine mit Dämpferwicklung und asynchroner Anlauf	379
8.1.5	Drehmoment bei der Schenkelpolsynchronmaschine	380
8.1.6	Anlauf und Synchronisierung des Synchrongenerators	381
8.2	Quantitative Betrachtung der Vollpolsynchronmaschine	383
8.2.1	Spannungsgleichung, Ersatzschaltbild und Potier'sche Dreiecke	383
8.2.2	Kreisdiagramm der Vollpolsynchronmaschine	388
8.2.2.1	Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie des Generators	391
8.2.2.2	Drehmoment und Leistung	391
8.2.2.3	V-Kurven (Abhängigkeit des Ständerstroms vom Erregerstrom bei konstanter Wirkleistung)	392
8.3	Vergleich von Synchron- und Asynchronmaschinen	393
8.4	Permanentmagneterregte Synchronmotoren	394
8.5	Aufgaben zu Synchronmaschinen	400

9 Drehzahlverstellung von Drehstromasynchronmotoren 405

9.1	Schlupfänderung	405
9.2	Polpaarzahländerung (polumschaltbare Motoren)	406
9.2.1	Unterbringung von Wicklungen unterschiedlicher Polpaarzahl	406
9.2.2	Dahlander-Schaltung	406
9.2.3	Kaskadenschaltung von Drehstromasynchronmaschinen	410
9.3	Speisefrequenzänderung	412

9.3.1	Dynamischer Frequenzwandler	412
9.3.1.1	Asynchroner Frequenzwandler	412
9.3.1.2	Frequenzwandler in Leonard-Schaltung	414
9.3.1.3	Integrierter dynamischer Frequenzwandler (Schrage-Richter- bzw. Scherbius-Maschine)	415
9.3.2	Statischer Frequenzwandler	417
9.3.2.1	Statischer Frequenzwandler im Läuferkreis	417
9.3.2.1.1	Drehstrom-Gleichstrom-Kaskade	417
9.3.2.1.2	Drehzahlverstellung mit Frequenzwandler im Läuferkreis	418
9.3.2.2	Statischer Frequenzwandler im Ständerkreis (stromrichtergespeiste Drehstromasynchronmaschinen)	420
9.3.2.2.1	Einleitung	420
9.3.2.2.2	Grundlagen	422
9.3.2.2.2.1	Verfügbare Umrichtersysteme (<i>I</i> -, <i>U</i> - und Direktumrichter) ...	422
9.3.2.2.2.2	Entstehung der Drehmomentüberschwingungen	423
9.3.2.2.2.3	Auswirkungen der Oberschwingungen	428
9.3.2.2.3	Auswertung	429
9.3.2.2.4	Reduzierung der umrichterbedingten parasitären Erscheinungen	434
9.3.2.2.5	Zusammenfassung	435
10	Kleinmaschinen	437
10.1	Spezielle Asynchronmaschinen	437
10.1.1	Anwendung des Drehstromasynchronmotors im Wechsel- stromnetz (unsymmetrischer Betrieb des Drehstrom- asynchronmotors)	437
10.1.1.1	Betriebsverhalten	437
10.1.1.2	Pulsierendes (stehendes), elliptisches und kreisförmiges Wechselfeld	440
10.1.1.3	Kusa-Schaltung	441
10.1.1.4	Anlassen von Drehstromasynchronmotoren im Wechselstrom- netz (Steinmetz-Schaltung)	441
10.1.1.5	Nachteile der Anwendung von Drehstromasynchronmotoren im Wechselstromnetz	444
10.1.2	Einsträngige Induktionsmaschinen (Wechselstrommaschinen)	444
10.1.2.1	Betriebsverhalten und Funktionsweise	444
10.1.2.2	Modifikationen	445
10.1.2.2.1	Spaltpolmotor	446

10.1.2.2.2	Motor mit Hilfswicklung (Hilfswicklung mit erhöhtem Widerstand)	447
10.1.2.2.3	Motor mit Hilfswicklung und Betriebskondensator	447
10.1.2.2.4	Motor mit Hilfswicklung und Anlasskondensator	447
10.1.2.2.5	Motor mit Hilfswicklung, Betriebs- und Anlasskondensator	447
10.1.2.3	Vergleich von einsträngigen Induktionsmotoren	447
10.1.3	Wechselstrom-Kommutatormotoren	450
10.1.3.1	Universalmotor	450
10.1.3.2	Schrage-Richter-Motor (Scherbius-Maschine)	450
10.1.4	Motoren mit eisenlosem Läufer	450
10.1.4.1	Ferrarismotor	450
10.1.4.2	Scheibenläufer	452
10.1.5	Massivläufer	453
10.1.6	Tachogenerator	454
10.2	Spezielle Synchronmaschinen	454
10.2.1	Hysteresemotor	454
10.2.2	Klauenpolmaschine (Lichtmaschine)	455
10.2.3	Schrittmotoren	463
10.2.3.1	Einleitung	463
10.2.3.2	Klassifizierung	464
10.2.3.3	Aufbau	466
10.2.3.4	Wirkungsweise	471
10.2.3.5	Eckdaten und Einsatzgebiet	473
10.2.3.6	Zusammenfassung	474
10.3	Spezielle Gleichstrommaschinen	475
10.3.1	Mit Permanentmagneterregung	475
10.3.2	Elektronikmotor (EC-Motor bzw. bürstenloser Gleichstrommotor) im Vergleich zum Schrittmotor	477
11	Sondermaschinen	479
11.1	Linearmotor	479
11.2	Elektrische Welle	484

12	Ausgewählte Kapitel der elektrischen Antriebs- technik (Zusammenwirken von Motor und Arbeitsmaschine)	491
12.1	Aufbau eines Antriebs	491
12.2	Drehmomentkennlinien	492
12.2.1	Betriebskennlinien von Motoren (M_a)	492
12.2.2	Widerstandsmoment von Arbeitsmaschinen (M_w)	493
12.2.2.1	$M_w = f(n)$	493
12.2.2.2	$M_w = f(t)$	494
12.2.2.3	$M_w = f(\alpha)$	494
12.3	Bewegungsgleichung	495
12.3.1	Impulsatz	495
12.3.2	Getriebe	497
12.3.3	Leistung und Arbeit	498
12.4	Der stationäre Betriebspunkt (Stabilität)	499
12.5	Berechnung der Anlaufzeiten	501
12.5.1	Leerlauf	501
12.5.1.1	Leerlauf eines Gleichstromnebenschlussmotors	501
12.5.1.2	Leerlauf eines Asynchronmotors	503
12.5.2	Anfahren unter Last	504
12.5.2.1	Geschlossene Methode	505
12.5.2.2	Numerische Methode	505
12.6	Erwärmung und Kühlung	506
12.6.1	Wachstumsgesetze	506
12.6.2	Isolationsklassen	509
12.6.3	Lebensdauer	510
12.6.4	Temperaturerfassung	510
12.6.4.1	Temperaturmessung	511
12.6.4.2	Temperaturberechnung	511
12.6.4.2.1	Elektrische Maschine als homogener Körper	511
12.6.4.2.2	Elektrische Maschine als inhomogener Körper	513
12.6.4.3	Maßnahmen zur Abkühlung elektrischer Maschinen	524
12.7	Auswahl des geeigneten Motors	525
12.7.1	Das mittlere quadratische Drehmoment	525
12.7.2	Betriebsarten	526
12.7.2.1	Dauerbetrieb (Betriebsart S1)	526
12.7.2.2	Kurzzeitbetrieb (Betriebsart S2)	527
12.7.2.3	Aussetzbetrieb (Betriebsart S3)	527
12.7.2.4	Aussetzbetrieb mit Einfluss des Anlaufvorgangs (Betriebsart S4)	527

12.7.2.5	Aussetzbetrieb mit Einfluss des Anlaufvorgangs und elektrischer Bremsung (Betriebsart S5)	527
12.7.2.6	Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Aussetzbelastung (Betriebsart S6)	528
12.7.2.7	Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Einfluss des Anlaufvorgangs und elektrischer Bremsung (Betriebsart S7)....	528
12.7.2.8	Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Drehzahländerung (Betriebsart S8)	528
12.7.2.9	Ununterbrochener Betrieb mit nicht periodischer Last- und Drehzahländerung (Betriebsart S9)	528
12.7.2.10	Betrieb mit einzelnen konstanten Belastungen (Betriebsart S10)	528
12.8.1	Mechanische Betrachtung des Antriebssystems als Punktmasse	532
12.9	Geräuschentwicklung elektrischer Maschinen	535
12.9.1	Einleitung	535
12.9.2	Entstehung des Geräuschs in rotierenden elektrischen Maschinen	544
12.9.3.1	Geräuscharten und deren Entwicklung in elektrischen Maschinen	546
12.9.4	Simulation	549
12.9.5	Maßnahmen zur Geräuschminderung	560
12.9.5.1	Möglichkeiten zur Reduzierung des magnetischen Geräuschs ..	560
12.9.5.1.1	Primärmaßnahmen	560
12.9.5.1.2	Sekundärmaßnahmen	560
12.9.5.2	Möglichkeiten zur Reduzierung des aerodynamischen Geräuschs	561
12.9.5.3	Möglichkeiten zur Reduzierung des Lagergeräuschs	562
12.9.6	Beispiele (Simulation – Messung – Vergleich)	563
12.9.7	Zusammenfassung	569
12.10	Leistungsschildangaben	573

13 Einführung in das dynamische Verhalten rotierender elektrischer Maschinen (Ursachen, Wirkungen, Darstellung und Betrachtung) 579

13.1	Einleitung	579
13.2	Ausgleichsvorgänge bei Gleichstrommotoren (Zeitabhängigkeit von Ankerstrom, Drehmoment und Drehzahl sowie Drehmoment-Drehzahl-Abhängigkeit im dynamischen Zustand)	579

13.3	Ausgleichsvorgänge bei Asynchronmotoren und Synchronmotoren	585
13.3.1	Elektromagnetischer Ausgleichsvorgang (Zeitabhängigkeit der Ströme und des magnetischen Felds im dynamischen Zustand)	585
13.3.2	Elektromechanischer Ausgleichsvorgang (Drehmoment-Drehzahl- sowie Drehzahl-Zeit-Verhalten)	588
13.4	Allgemeine Aufgaben	592

14 Grundzüge der Simulation elektrischer Maschinen 595

14.1	Einleitung	595
14.2	Simulation der Einflussgrößen	597
14.2.1	Magnetische Einflussgrößen (Feldverteilung, Leistung, Drehmoment, Kräfte etc.)	597
14.2.1.1	Analytische Methoden	598
14.2.1.2	Numerische Methoden	602
14.2.1.2.1	Feldberechnung (Aufstellung der Feldgleichungen)	604
14.2.1.2.2	Lösung der Feldgleichungen	611
14.2.1.2.3	Modellierung	613
14.2.1.2.4	Feldverteilung	614
14.2.1.2.5	Strategien zur Berechnung von Leerlauf- und Lastkennlinie	614
14.2.1.2.6	Erfahrungen mit dem Programmsystem ANSYS	616
14.2.2	Thermische Einflussgrößen (Temperaturverteilung stationär und instationär)	616
14.2.3	Strömungstechnische Einflussgrößen (Strömungsverhalten)	618
14.2.4	Schwingungs- und verformungstechnische und akustische Einflussgrößen	618
14.3	Praktische Prüfungen	618
14.3.1	Prüfstand	618
14.3.2	Messeinrichtung	620
14.3.3	Auswerteeinheit und Auswertung	620
14.3.4	Belastungseinheit für Generatorprüfstand	621

15	Lösungen der Aufgaben	623
15.1	Lösungen zu „Wechsel- und Drehstrom“	623
15.2	Lösungen zu „Magnetischer Kreis“	638
15.3	Lösungen zu „Transformatoren“	647
15.4	Lösungen zu „Gleichstrommaschinen“	658
15.5	Lösungen zu „Asynchronmaschinen“	673
15.6	Lösungen zu „Synchronmaschinen“	692
15.7	Lösungen zu „Allgemeine Aufgaben“	699
 Fragen zur Selbstkontrolle		 705
 Literaturverzeichnis		 715
 Sachwortverzeichnis		 723