

Elektrische



dandelion.com

© 2008 AGI-Information Management Consultants
May be used for personal purposes only or by
libraries associated to dandelion.com network.

Energieversorgung I

**Drehstromsysteme • Leistungen •
Wirtschaftlichkeit**

Von Univ.-Professor Dr.-Ing. Gerhard Herold
Universität Erlangen-Nürnberg

Mit 226 Bildern



J. Schlembach Fachverlag

Inhaltsverzeichnis

1 Aufbau von elektrischen Energieversorgungssystemen.....	1
1.1 Energie und menschliche Entwicklung.....	1
1.1.1 Zum Begriff der Energie.....	1
1.1.2 Wichtige Primärenergieträger.....	2
1.1.3 Kulturelle Entwicklung des Menschen und Energienutzung.:.....	5
1.1.4 Energieverbrauch in den entwickelten Industrieländern.....	7
1.1.5 Energieversorgung in den Entwicklungsländern.....	9
1.2 Eigenschaften der elektrischen Energie.....	10
1.2.1 Erzeugung und Anwendung.....	10
1.2.2 Anpaßbarkeit an den Verbrauch.....	12
1.2.3 Unzureichende Speicherkapazität.....	14
1.2.4 Verluste und Leitungsgebundenheit.....	16
1.3 Elektrische Energieversorgungsnetze.....	20
1.3.1 Wahl des Stromsystems.....	20
1.3.2 Verbundbetrieb.....	23
1.3.3 Leistungsregelung in Verbundnetzen.....	24
1.3.4 Struktur von elektrischen Energieversorgungsnetzen.....	28
1.3.5 Netzknotenpunkte.....	30
1.3.6 Typische Netzformen.....	33
1.3.7 Sonderformen elektrischer Energieversorgungsnetze.....	37
1.4 Elektrische Betriebsmittel.....	38
1.4.1 Gesamtüberblick.....	38

1.4.2 Rotierende elektrische Drehstrommaschinen.....	40
1.4.3 Transformatoren.....	42
1.4.4 Leitungen.....	42
1.4.5 Drosselspulen.....	45
1.4.6 Kondensatoren.....	46
1.4.7 Schaltgeräte.....	46
1.4.8 Sonstige Betriebsmittel und Elemente elektrischer Energieversorgungsnetze....	47
2 Grundlagen der Wechselstromtechnik.....	49
2.1 Periodische Wechselgrößen.....	49
2.2 Komplexe Wechselstromrechnung.....	51
2.2.1 Komplexe Darstellung trigonometrischer Funktionen.....	51
2.2.2 Addition zweier Kosinusfunktionen.....	52
2.2.3 Darstellung kosinusförmiger Wechselgrößen durch Zeiger.....	53
2.2.4 Stationäre Ströme und Spannungen in Wechselstromkreisen.....	55
2.2.4.1 Kosinusförmiger Strom durch einen ohmschen Widerstand.....	55
2.2.4.2 Kosinusförmige Spannung über einer idealen Induktivität.....	56
2.2.4.3 Kosinusförmige Spannung über einer verlustbehafteten Induktivität.....	56
2.2.4.4 Kosinusförmiger Strom durch einen idealen Kondensator.....	58
2.2.4.5 Kosinusförmiger Strom durch einen verlustbehafteten Kondensator.....	58
2.2.5 Grundgesetze für Wechselstromnetzwerke.....	59
2.2.5.1 Kirchhoffsche Sätze für kosinusförmige Wechselgrößen.....	59
2.2.5.2 Ohmsches Gesetz für kosinusförmige Wechselströme.....	60
2.2.5.3 Satz von der Ersatzquelle.....	62
2.2.6 Wechselstromleistung.....	63
2.2.6.1 Momentanwert der Leistung.....	63
2.2.6.2 Wirkleistung und Effektivwert.....	64
2.2.6.3 Leistung und Energie in einem verlustfreien Blindelement.....	65
2.2.6.4 Komplexe Darstellung der momentanen Leistung.....	66

2.2.7 Kosinusförmige symmetrische Dreiphasensysteme.....	68
2.2.7.1 Drehoperatoren.....	68
2.2.7.2 Sinusförmige symmetrische Ströme und Spannungen.....	70
2.2.8 Vorzeichenfestlegungen und Zählfeilsysteme.....	73
2.3 Vierpole als Elemente von Wechselstromnetzwerken.....	76
2.3.1 Parameter von linearen Vierpolen.....	76
2.3.1.1 Leerlauf und Kurzschluß als spezielle Belastungsfälle des Vierpols.....	76
2.3.1.2 Meßschaltungen zur Bestimmung der Vierpolparameter.....	78
2.3.1.3 Beschreibung des belasteten Vierpols.....	80
2.3.2 Vierpolgleichungen.....	80
2.3.2.1 Kettenform der Vierpolgleichungen.....	80
2.3.2.2 Impedanzform der Vierpolgleichungen.....	81
2.3.2.3 Admittanzform der Vierpolgleichungen.....	81
2.3.2.4 Hybride Formen der Vierpolgleichungen.....	82
2.3.2.5 Änderung der Zählfeilsysteme am Vierpol.....	84
2.3.2.6 Leistungen an Vierpolen.....	85
2.3.3 Anwendung der Vierpolgleichungen.....	85
2.3.3.1 Kettenschaltung von Vierpolen.....	85
2.3.3.2 Reihenschaltung von Vierpolen.....	86
2.3.3.3 Parallelschaltung von Vierpolen.....	87
2.3.3.4 Reihen-Parallelschaltung und Parallel-Reihenschaltung von Vierpolen.....	88
2.3.4 Elementar-Vierpole.....	90
2.3.4.1 Elementar-Längsvierpol.....	90
2.3.4.2 Elementar-Quervierpol.....	91
2.3.4.3 Leitungskreuzung.....	91
2.3.4.4 Synthese von Vierpolen aus Elementar-Vierpolen.....	92
2.3.4.5 Grenzfall der Belastung von Vierpolen in der elektrischen Energietechnik ...	94
2.3.5 Homogene Vierpolketten.....	95
2.3.5.1 Kettengleichung eines symmetrischen Vierpols.....	96
2.3.5.2 Kettengleichung einer Kette aus n symmetrischen Vierpolen.....	97
2.3.5.3 Spezielle Belastungsfälle der Vierpolkette.....	98
2.3.6 Homogene Leitung.....	99
2.3.6.1 Ersatzschaltung eines Leitungselementes differentieller Länge.....	99

2.3.6.2 Leitungsgleichungen bei kosinusförmigen Strömen und Spannungen.....	101
2.3.6.3 Wellenwiderstand, Übertragungsmaß und natürliche Leistung.....	102
2.3.6.4 Spezielle Betriebszustände der homogenen Leitung.....	103
2.3.6.5 Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm der kurzen Leitung.....	105
2.3.7 Vierpole mit induktiver Kopplung zwischen den Toren.....	106
2.3.7.1 Der mit einer Spule verkettete Fluß.....	107
2.3.7.2 Idealer Transformator.....	108
2.3.7.3 Realer Transformator.....	110
2.3.7.4 Messung der Parameter der Transformator-Ersatzschaltung.....	113
2.3.7.5 Kurzschluß der Sekundärwicklung.....	113
2.4 Nichtkosinusförmige periodische Wechselgrößen.....	115
2.4.1 Darstellung periodischer Wechselgrößen als Fourierreihen.....	116
2.4.2 Symmetrien in der Kurvenform von periodischen Wechselgrößen.....	118
2.4.2.1 Symmetrie zur Abszisse.....	118
2.4.2.2 Symmetrie zur Ordinate.....	119
2.4.2.3 Verschiebung des Koordinatenursprungs.....	120
2.4.3 Kenngrößen nichtkosinusförmiger periodischer Wechselgrößen.....	120
2.4.3.1 Effektivwert.....	120
2.4.3.2 Grundswingungsfaktor, Klirrfaktor, Formfaktor, Scheitelfaktor.....	121
2.4.4 Anwendung an einer Zweipuls-Brückenschaltung.....	122
2.4.4.1 Leerlauf.....	122
2.4.4.2 Belastung der Zweipuls-Brückenschaltung.....	124
2.4.5 Netzberechnungen mit nichtkosinusförmigen Wechselgrößen.....	126
2.4.5.1 Beschreibung der Wechselgrößen.....	126
2.4.5.2 Nichtkosinusförmige Leerlaufspannung des Wechselstromnetzes.....	127
2.4.5.3 Abnehmer als Konstantstromquelle für höhere Harmonische.....	128
3 Transformationen für Dreiphasensysteme.....	129
3.1 Nullgrößen und Raumzeiger.....	130
3.1.1 Definition der Nullgröße und des Raumzeigers.....	130
3.1.2 Umrechnung von Raumzeigern zwischen verschiedenen Bezugskordinaten- systemen.....	131

3.1.3 Rücktransformation von Raumzeigern und Nullgrößen.....	132
3.1.4 Raumzeiger, Diagonalkomponenten und Zwei-Achsen-Komponenten.....	134
3.1.5 Momentane Drehstromleistung und normierte Transformationen.....	137
3.1.6 Raumzeiger verketteter Größen.....	139
3.1.7 Anwendungsbeispiel.....	141
3.2 Kosinusförmige Dreiphasensysteme.....	144
3.2.1 Symmetrische Komponenten.....	144
3.2.2 Raumzeiger und Symmetrische Komponenten.....	146
3.2.3 Diagonal-Komponenten kosinusförmiger Dreiphasensysteme.....	150
3.2.4 Zwei-Achsen-Komponenten kosinusförmiger Dreiphasensysteme.....	151
3.2.5 Verkettete kosinusförmige Dreiphasensysteme.....	152
3.3 Nichtkosinusförmige periodische Dreiphasensysteme.....	154
3.3.1 Periodische Raumzeiger mit symmetrischen Zeitfunktionen.....	155
3.3.1.1 Symmetrie zur Abszisse.....	155
3.3.1.2 Phasenverschiebung von 120 Grad.....	157
3.3.1.3 Symmetrie zur Abszisse und Phasenverschiebung von 120 Grad.....	159
3.3.2 Charakteristische Harmonische in Drehstromsystemen.....	160
3.3.2.1 Zweipulsbrücken als Abnehmer im Drehstromsystem.....	161
3.3.2.2 Magnetisierungsströme von Drehstromtransformatoren.....	163
3.3.3 Ströme eines dreipulsigen Stromrichters in Mittelpunktschaltung.....	167
3.3.3.1 Schaltung und Ventilströme.....	167
3.3.3.2 Raumzeiger der Ventilströme.....	169
3.3.3.3 Leiterströme im Drehstromnetz.....	169
3.3.4 Überlagerung von p-pulsigen Raumzeigern.....	171
3.3.4.1 Periodische Raumzeiger im synchron umlaufenden Koordinatensystem.....	171
3.3.4.2 Überlagerung von zwei dreipulsigen Raumzeigern.....	173
3.3.4.3 Erzeugung höherer Pulszahlen.....	177
3.3.5 Symmetrische Raumzeiger-Komponenten.....	180

3.3.5.1 Raumzeiger unsymmetrischer Dreiphasensysteme.....	180
3.3.5.2 Dreipulsige Symmetrische Raumzeiger-Komponenten.....	182
3.3.5.3 Sechspulsige Symmetrische Raumzeiger-Komponenten.....	184
3.4 Transformation symmetrischer Drehstromnetze.....	189
3.4.1 Elementar-Achtpole.....	189
3.4.1.1 Elementar-Längsachtpol.....	189
3.4.1.2 Elementar-Querachtpol.....	191
3.4.1.3 Elementar-Achtpole in Symmetrischen Komponenten.....	192
3.4.2 Satz von der Ersatzspannungsquelle für Drehstromnetze.....	194
3.4.3 Ersatzschaltungen für Drehstromtransformatoren.....	196
3.4.3.1 Drehstromtransformator mit unverschalteten Wicklungen.....	196
3.4.3.2 Verschaltung der Wicklungen eines Drehstromtransformators.....	198
3.4.3.3 Idealer Raumzeigertransformator.....	201
3.4.3.4 Schaltgruppen von Drehstromtransformatoren.....	202
3.4.3.5 Linearer Raumzeigertransformator.....	203
3.4.3.6 Nullgrößen-Transformator.....	204
3.4.3.7 Drehstrom-Transformator in Symmetrischen Komponenten.....	208
3.4.4 Rotierende elektrische Maschinen.....	209
3.4.4.1 Besonderheiten im Vergleich zu anderen Betriebsmitteln.....	209
3.4.4.2 Induktivitäten und Flüsse von Dreiphasenwicklungen.....	210
3.4.4.3 Spannungsgleichungen der rotierenden elektrischen Maschine.....	214
3.4.4.4 Ersatzschaltungen rotierender elektrischer Maschinen im Mitsystem.....	215
3.4.4.5 Ersatzschaltung rotierender elektrischer Maschinen im Gegensystem.....	217
3.4.4.6 Ersatzschaltung rotierender elektrischer Maschinen im Nullsystem.....	219
3.4.4.7 Rücktransformation der Symmetrischen Impedanzen rotierender elektrischer Maschinen.....	219
3.4.5 Ersatzschaltungen eines Drehstromnetzwerkes.....	220
3.5 Unsymmetrische Betriebszustände in Drehstromnetzen.....	223
3.5.1 Symmetrischer Betrieb eines Drehstromsystems.....	223
3.5.2 Einpolige Unsymmetrien.....	224
3.5.3 Zweipolige Unsymmetrien.....	230
3.5.4 Unsymmetrische Last in Dreieck-Schaltung.....	235

3.5.5 Symmetrierung unsymmetrischer Lasten.....	237
3.5.5.1 Symmetrierschaltung nach Steinmetz.....	237
3.5.5.2 Symmetrierschaltung nach Scott.....	240

4 Leistungen in elektrischen Energieversorgungssystemen.....243

4.1 Grundbegriffe.....	243
4.1.1 Wirkungsgrad energetischer Prozesse.....	243
4.1.2 Bildung der elektrischen Energie.....	250
4.1.3 Verluste in elektrischen Energieversorgungsnetzen.....	252
4.1.4 Maximaler Wirkungsgrad.....	256
4.1.5 Wirk- und Scheinleistung.....	259
4.1.6 Leistungsfaktor und Blindleistung.....	260
4.2 Leistungen in Drehstromsystemen.....	264
4.2.1 Wirkleistung.....	264
4.2.2 Effektivwerte von Dreiphasensystemen und Scheinleistung.....	265
4.2.3 Leistungsverhältnisse bei kosinusförmigen, symmetrischen Spannungen.....	267
4.2.4 Leistungen bei kosinusförmigen, symmetrischen Spannungen und Strömen. . .	269
4.2.5 Leistungsfluß über einen Netzzweig.....	271
4.2.6 Leistungen unsymmetrischer Drehstromabnehmer.....	274
4.2.6.1 Leistungsgrößen.....	274
4.2.6.2 Berechnung der unsymmetrischen Spannungen und Ströme.....	276
4.2.6.3 Niederspannungstransformator mit unsymmetrischer Belastung.....	277
4.2.6.4 Besonderheit unsymmetrischer Belastungen...;	282
4.2.7 Leistungen von Stromrichtern im Drehstromsystem.....	286
4.2.7.1 Leistungen bei kosinusförmigen, symmetrischen Spannungen.....	286
4.2.7.2 Stromrichterleistungen bei verzerrten Spannungen.....	288
4.2.7.3 Grundswingungsmodell eines Stromrichters.....	296
4.2.8 Leistungen bei Strommodulation.....	297

4.3 Stochastisch veränderliche Leistungen	300
4.3.1 Bestimmung elektrischer Belastungen	300
4.3.2 Gang- und Dauerlinie	301
4.3.3 Weitere Kenngrößen zur Beschreibung von Belastungen	306
4.3.4 Verlustfaktor	309
4.4 Blindleistungskompensation	313
4.4.1 Grundprinzip	313
4.4.2 Kompensation der Verschiebungsblindleistung	315
4.4.2.1 Serienkompensation	315
4.4.2.2 Parallelkompensation	315
4.4.2.3 Parallelkompensation mit Synchronmaschinen	317
4.4.2.4 Kompensation von Leitungen	318
4.4.3 Kompensation der Verzerrungsblindleistung	319
4.4.4 Kompensation der Modulationsblindleistung	320
4.4.4.1 Grundprinzip	320
4.4.4.2 Praktische Realisierung	321
4.4.5 Moderne Entwicklungen	322
5 Wirtschaftliche Energieversorgung	325
5.1 Kosten in der Energieversorgung	325
5.1.1 Kostenbegriffe	325
5.1.1.1 Lohnkosten als Wertverzehr für den Faktor Arbeit	325
5.1.1.2 Materialkosten als Wertverzehr für den Faktor Werkstoffe	325
5.1.1.3 Anlagenkosten als Wertverzehr für den Faktor Betriebsmittel und Anlagen	325
5.1.1.4 Kapitalkosten als Wertverzehr für das Kapital	327
5.1.1.5 Sonstige Kosten, Gemeinkosten	327
5.1.2 Feste und veränderliche Kosten	327
5.1.3 Externe Effekte	328

5.2 Investitions- und Kostenrechnung	330
5.2.1 Finanzmathematische Grundlagen	330
5.2.2 Gesteungskosten für die elektrische Energie	333
5.2.3 Energiekosten und Energiepreise	335
5.2.4 Bewertung von Verlusten in Energieversorgungsnetzen	338
5.2.5 Bewertung von Netznutzungen	339
5.2.5.1 Netznutzung in einer marktwirtschaftlich orientierten Elektrizitätswirtschaft	339
5.2.5.2 Strommarktmodelle	340
5.2.5.3 Einflüsse auf die Netznutzungskosten	341
5.2.5.4 Durchleitungsentgelte auf der Basis von Kapitalkosten	342
5.2.5.5 Durchleitungsentgelte auf der Basis von Betriebskosten	343
5.3 Wirtschaftlicher Betrieb von elektrischen Energieversorgungsnetzen	344
5.3.1 Allgemeines Optimierungsproblem	344
5.3.2 Klassische Form der Lastverteilung	344
5.3.3 Verlustminimaler Verbundbetrieb bei konstanter Last	349
5.3.4 Ausgleich der Belastungskurve und wirtschaftlicher Kraftwerkseinsatz	352
5.3.5 Wirtschaftliche Auslastung elektrischer Betriebsmittel	355
5.3.5.1 Wirtschaftliche Auslastung von Transformatoren	355
5.3.5.2 Wirtschaftliche Auslastung von Kabeln	357
5.3.5.3 Wirtschaftliche Auswahl von Betriebsmitteln aus einer Typenreihe	357
5.4 Least-Cost-Planning	360
5.4.1 Grundgedanken des Least-Cost-Planning	360
5.4.2 Energieeinsparpotentiale in den Haushalten	363
Literaturverzeichnis	365
Sachwortverzeichnis	373