

Inhaltsverzeichnis

1 AUFBAU VON ELEKTRISCHEN ENERGIEVERSORGUNGSSYSTEMEN

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	8
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 Speicherfähigkeit.....	15
1.2.4	Verluste und Leitungsgebundenheit.....	17
1.3	Elektrische Energieversorgungsnetze.....	20
1.3.1	Wahl des Stromsystems	20
1.3.2	Verbundbetrieb	23
1.3.3	Leistungsregelung in Verbundnetzen	25
1.3.4	Struktur von elektrischen Energieversorgungsnetzen.....	28
1.3.5	Netzknotenpunkte	30
1.3.6	Typische Netzformen	34
1.3.7	Sonderformen elektrischer Energieversorgungsnetze	39
1.4	Elektrische Betriebsmittel	40
1.4.1	Gesamtüberblick	40
1.4.2	Rotierende elektrische Drehstrommaschinen	42
1.4.3	Transformatoren.....	44
1.4.4	Leitungen	45
1.4.5	Drosselpulen.....	47
1.4.6	Kondensatoren	48
1.4.7	Schaltgeräte.....	49
1.4.8	Sonstige Betriebsmittel und Elemente elektrischer Energieversorgungsnetze	49

2 GRUNDLAGEN DER WECHSELSTROMTECHNIK

2.1	Periodische Wechselgrößen	51
2.2	Komplexe Wechselstromrechnung.....	53

2.2.1	Komplexe Darstellung trigonometrischer Funktionen.....	53
2.2.2	Addition zweier Kosinusfunktionen.....	54
2.2.3	Darstellung kosinusförmiger Wechselgrößen durch Zeiger	55
2.2.4	Stationäre Ströme und Spannungen in Wechselstromkreisen.....	57
2.2.4.1	Kosinusförmiger Strom durch einen ohmschen Widerstand	57
2.2.4.2	Kosinusförmige Spannung über einer idealen Induktivität	58
2.2.4.3	Kosinusförmige Spannung über einer verlustbehafteten Induktivität.....	58
2.2.4.4	Kosinusförmiger Strom durch einen idealen Kondensator.....	60
2.2.4.5	Kosinusförmiger Strom durch einen verlustbehafteten Kondensator	60
2.2.5	Grundgesetze für Wechselstromnetzwerke	61
2.2.5.1	Kirchhoff'sche Sätze für kosinusförmige Wechselgrößen	61
2.2.5.2	Ohmsches Gesetz für kosinusförmige Wechselströme.....	62
2.2.5.3	Satz von der Ersatzquelle	64
2.2.6	Wechselstromleistung	65
2.2.6.1	Momentanwert der Leistung	65
2.2.6.2	Wirkleistung und Effektivwert.....	66
2.2.6.3	Leistung und Energie in einem verlustfreien Blindelement.....	67
2.2.6.4	Komplexe Darstellung der momentanen Leistung	69
2.2.7	Kosinusförmige symmetrische Dreiphasensysteme.....	70
2.2.7.1	Drehoperatoren	70
2.2.7.2	Sinusförmige symmetrische Ströme und Spannungen.....	72
2.2.8	Vorzeichenfestlegungen und Zählpfeilsysteme	76
2.3	Vierpole als Elemente von Wechselstromnetzwerken.....	80
2.3.1	Parameter von linearen Vierpolen.....	80
2.3.1.1	Leerlauf und Kurzschluß als spezielle Belastungsfälle des Vierpols	80
2.3.1.2	Meßschaltungen zur Bestimmung der Vierpolparameter	82
2.3.1.3	Beschreibung des belasteten Vierpols.....	84
2.3.2	Vierpolgleichungen	85
2.3.2.1	Kettenform der Vierpolgleichungen.....	85
2.3.2.2	Impedanzform der Vierpolgleichungen.....	85
2.3.2.3	Admittanzform der Vierpolgleichungen.....	86
2.3.2.4	Hybride Formen der Vierpolgleichungen.....	86
2.3.2.5	Änderung der Zählpfeilsysteme am Vierpol.....	89
2.3.2.6	Leistungen an Vierpolen	90
2.3.3	Anwendung der Vierpolgleichungen.....	90
2.3.3.1	Kettenschaltung von Vierpolen.....	90
2.3.3.2	Reihenschaltung von Vierpolen	92
2.3.3.3	Parallelschaltung von Vierpolen	92
2.3.3.4	Reihen-Parallelschaltung und Parallel-Reihenschaltung von Vierpolen	93
2.3.4	Elementar-Vierpole	95
2.3.4.1	Elementar-Längsvierpol	95
2.3.4.2	Elementar-Quervierpol.....	96
2.3.4.3	Leitungskreuzung.....	97
2.3.4.4	Synthese von Vierpolen aus Elementar-Vierpolen.....	97

2.3.4.5	Grenzfälle der Belastung von Vierpolen in der elektrischen Energie- technik.....	100
2.3.5	Homogene Vierpolketten	101
2.3.5.1	Kettengleichung eines symmetrischen Vierpols.....	102
2.3.5.2	Kettengleichung einer Kette aus n symmetrischen Vierpolen	103
2.3.5.3	Spezielle Belastungsfälle der Vierpolkette.....	104
2.3.6	Homogene Leitung.....	105
2.3.6.1	Ersatzschaltung eines Leitungselementes differentieller Länge	105
2.3.6.2	Leitungsgleichungen bei kosinusförmigen Strömen und Spannungen	106
2.3.6.3	Wellenwiderstand, Übertragungsmaß und natürliche Leistung.....	108
2.3.6.4	Spezielle Betriebszustände der homogenen Leitung.....	109
2.3.6.5	Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm der kurzen Leitung	111
2.3.7	Vierpole mit induktiver Kopplung zwischen den Toren.	113
2.3.7.1	Der mit einer Spule verkettete Fluß	113
2.3.7.2	Idealer Transformator	114
2.3.7.3	Realer Transformator.....	116
2.3.7.4	Messung der Parameter der Transformator-Ersatzschaltung.....	119
2.3.7.5	Kurzschluß der Seite 2	120
2.4	Nichtkosinusförmige periodische Wechselgrößen	121
2.4.1	Darstellung periodischer Wechselgrößen durch Fourierreihen	122
2.4.2	Symmetrien in der Kurvenform von periodischen Wechselgrößen	124
2.4.2.1	Symmetrie zur Abszisse	124
2.4.2.2	Symmetrie zur Ordinate	125
2.4.2.3	Verschiebung des Koordinatenursprungs.....	126
2.4.3	Kenngrößen nichtkosinusförmiger periodischer Wechselgröße.....	126
2.4.3.1	Effektivwert	126
2.4.3.2	Grundschwingungsfaktor, Klirrfaktor, Formfaktor, Scheitelfaktor	127
2.4.4	Anwendung an einer Zweipuls-Brückenschaltung	128
2.4.4.1	Leerlauf der Brückenschaltung	128
2.4.4.2	Belastung der Zweipuls-Brückenschaltung	130
2.4.5	Netzberechnungen mit nichtkosinusförmigen Wechselgrößen.....	133
2.4.5.1	Beschreibung der Wechselgrößen.....	133
2.4.5.2	Nichtkosinusförmige Leerlaufspannung des Wechselstromnetzes	134
2.4.5.3	Abnehmer als Konstantstromquelle für höhere Harmonische	135

3 TRANSFORMATIONEN FÜR DREIPHASENSYSTEME

3.1	Nullgrößen und Raumzeiger	138
3.1.1	Definition der Nullgröße und des Raumzeigers	138
3.1.2	Umrechnung von Raumzeigern zwischen beliebigen Bezugskordinaten- systemen.....	139
3.1.3	Rücktransformation von Raumzeigern und Nullgrößen	141

3.1.4	Raumzeiger, Diagonalkomponenten und Zwei-Achsen-Komponenten	143
3.1.5	Momentane Drehstromleistung und normierte Transformationen	146
3.1.6	Raumzeiger verketteter Größen	147
3.1.7	Anwendungsbeispiel	150
3.2	Kosinusförmige Dreiphasensysteme	153
3.2.1	Symmetrische Komponenten	153
3.2.2	Raumzeiger und Symmetrische Komponenten	155
3.2.3	Diagonal-Komponenten kosinusförmiger Dreiphasensysteme	159
3.2.4	Zwei-Achsen-Komponenten kosinusförmiger Dreiphasensysteme	161
3.2.5	Verkettete kosinusförmige Dreiphasensysteme	161
3.3	Nichtkosinusförmige periodische Dreiphasensysteme	163
3.3.1	Periodische Raumzeiger mit symmetrischen Zeitfunktionen	164
3.3.1.1	Symmetrie zur Abszisse	164
3.3.1.2	Phasenverschiebung von 120 Grad	166
3.3.1.3	Symmetrie zur Abszisse und Phasenverschiebung von 120 Grad	168
3.3.2	Charakteristische Harmonische in Drehstromsystemen	169
3.3.2.1	Zweipulsbrücken als Abnehmer im Drehstromsystem	170
3.3.2.2	Magnetisierungsströme von Drehstromtransformatoren	172
3.3.3	Ströme eines dreipulsigen Stromrichters in Mittelpunktschaltung	176
3.3.3.1	Schaltung und Ventilströme	176
3.3.3.2	Raumzeiger der Ventilströme	178
3.3.3.3	Leiterströme im Drehstromnetz	179
3.3.4	Überlagerung von p-pulsigen Raumzeigern	180
3.3.4.1	Periodische Raumzeiger im synchron umlaufenden Koordinatensystem	180
3.3.4.2	Überlagerung von zwei dreipulsigen Raumzeigern	182
3.3.4.3	Erzeugung höherer Pulszahlen	186
3.4	Transformation symmetrischer Drehstromnetze	190
3.4.1	Elementar-Achtpole	190
3.4.1.1	Elementar-Längsachtpol	190
3.4.1.2	Elementar-Querachtpol	192
3.4.1.3	Elementar-Achtpole in Symmetrischen Komponenten	193
3.4.2	Satz von der Ersatzspannungsquelle für Drehstromnetze	195
3.4.3	Ersatzschaltungen für Drehstromtransformatoren	197
3.4.3.1	Drehstromtransformator mit unverschalteten Wicklungen	197
3.4.3.2	Verschaltung der Wicklungen eines Drehstromtransformators	200
3.4.3.3	Idealer Raumzeigertransformator	203
3.4.3.4	Schaltgruppen von Drehstromtransformatoren	204
3.4.3.5	Linearer Raumzeigertransformator	205
3.4.3.6	Nullgrößen-Transformator	206
3.4.3.7	Drehstrom-Transformator in Symmetrischen Komponenten	210
3.4.4	Rotierende elektrische Maschinen	212
3.4.4.1	Besonderheiten im Vergleich zu anderen Betriebsmitteln	212

3.4.4.2	Induktivitäten und Flüsse von Dreiphasenwicklungen	213
3.4.4.3	Spannungsgleichungen der rotierenden elektrischen Maschine	217
3.4.4.4	Ersatzschaltungen rotierender elektrischer Maschinen im Mitsystem	218
3.4.4.5	Ersatzschaltung rotierender elektrischer Maschinen im Gegensystem	220
3.4.4.6	Ersatzschaltung rotierender elektrischer Maschinen im Nullsystem	222
3.4.4.7	Rücktransformation der Symmetrischen Impedanzen rotierender elektrischer Maschinen	223
3.4.5	Ersatzschaltungen eines Drehstromnetzwerkes	223
3.5	Unsymmetrische Betriebszustände in Drehstromnetzen.....	227
3.5.1	Symmetrischer Betrieb eines Drehstromsystems.....	227
3.5.2	Einpolige Unsymmetrien.....	228
3.5.3	Zweipolige Unsymmetrien	234
3.5.4	Unsymmetrische Last in Dreieck-Schaltung	240
3.5.5	Symmetrierung unsymmetrischer Lasten.....	242
3.5.5.1	Symmetrierschaltung nach Steinmetz.....	242
3.5.5.2	Symmetrierschaltung nach Scott	245

4 LEISTUNGEN IN ELEKTROENERGIESYSTEMEN

4.1	Grundbegriffe.....	251
4.1.1	Wirkungsgrad energetischer Prozesse	251
4.1.2	Bildung der Elektroenergie	258
4.1.3	Verluste in elektrischen Energieversorgungsnetzen	260
4.1.4	Maximaler Wirkungsgrad	264
4.1.5	Wirk- und Scheinleistung	268
4.1.6	Leistungsfaktor und Blindleistung	269
4.2	Leistungen in Drehstromsystemen	273
4.2.1	Wirkleistung.....	273
4.2.2	Effektivwerte von Dreiphasensystemen und Scheinleistung	275
4.2.3	Leistungsverhältnisse bei kosinusförmig symmetrischen Spannungen.....	277
4.2.4	Leistungen bei kosinusförmigen symmetrischen Spannungen und Strömen ...	278
4.2.5	Leistungsfluß über einen Netzzweig	281
4.2.6	Leistungen unsymmetrischer Drehstromabnehmer.....	284
4.2.6.1	Leistungsgrößen	284
4.2.6.2	Berechnung der unsymmetrischen Spannungen und Ströme.....	286
4.2.6.3	Niederspannungstransformator mit unsymmetrischer Belastung.....	288
4.2.6.4	Besonderheit unsymmetrischer Belastungen	293
4.2.7	Leistungen von Stromrichtern im Drehstromsystem	297
4.2.7.1	Leistungen bei kosinusförmig symmetrischen Spannungen	297
4.2.7.2	Stromrichterleistungen bei verzerrten Spannungen.....	299
4.2.7.3	Grundschwingungsmodell eines Stromrichters	307

4.2.8	Leistungen bei Strommodulation	309
4.3	Stochastisch veränderliche Leistungen.....	312
4.3.1	Bestimmung elektrischer Belastungen	312
4.3.2	Gang- und Dauerlinie	313
4.3.3	Weitere Kenngrößen zur Beschreibung von Belastungen	319
4.3.4	Verlustfaktor	322
4.4	Blindleistungskompensation	327
4.4.1	Grundprinzip.....	327
4.4.2	Kompensation der Verschiebungsblindleistung	329
4.4.2.1	Serienkompensation	329
4.4.2.2	Parallelkompensation	330
4.4.2.3	Parallelkompensation mit Synchronmaschinen	331
4.4.2.4	Kompensation von Leitungen	333
4.4.3	Kompensation der Verzerrungsblindleistung	335
4.4.4	Kompensation der Modulationsblindleistung.....	335
4.4.4.1	Grundprinzip.....	335
4.4.4.2	Praktische Realisierung.....	336
4.4.5	Moderne Entwicklungen	337

5 WIRTSCHAFTLICHE ENERGIEVERSORGUNG

5.1	Kosten in der Energieversorgung	339
5.1.1	Kostenbegriffe.....	339
5.1.1.1	Lohnkosten.....	339
5.1.1.2	Materialkosten.....	339
5.1.1.3	Anlagenkosten (Abschreibungen)	339
5.1.1.4	Kapitalkosten (Zinsen)	341
5.1.1.5	Sonstige Kosten (Gemeinkosten)	341
5.1.2	Feste und veränderliche Kosten	341
5.1.3	Externe Effekte	343
5.2	Investitionsrechnung	345
5.2.1	Finanzmathematische Grundlagen	345
5.2.2	Gestehungskosten für die elektrische Energie.....	348
5.2.3	Energiekosten und Energiepreise	350
5.2.4	Bewertung von Verlusten in Energieversorgungsnetzen	353
5.3	Wirtschaftlicher Betrieb von elektrischen Energieversorgungsnetzen	355
5.3.1	Allgemeines Optimierungsproblem.....	355
5.3.2	Klassische Form der Lastverteilung.....	355
5.3.3	Verlustminimaler Verbundbetrieb bei konstanter Last.....	360

5.3.4	Ausgleich der Belastungskurve und wirtschaftlicher Kraftwerkseinsatz.....	364
5.3.5	Wirtschaftliche Auslastung elektrischer Betriebsmittel.....	368
5.3.5.1	Wirtschaftliche Auslastung von Transformatoren.....	368
5.3.5.2	Wirtschaftliche Auslastung von Kabeln.....	369
5.3.5.3	Wirtschaftliche Auswahl von Betriebsmitteln aus einer Typenreihe.....	370
5.4	Least-Cost-Planning.....	373
5.4.1	Grundgedanken des Least-Cost-Planning	373
5.4.2	Energieeinsparpotentiale in den Haushalten	376
LITERATURVERZEICHNIS.....		379
SACHWORTVERZEICHNIS.....		387