

# Elektrische Energieversorgung I

**Drehstromsysteme - Leistungen - Wirtschaftlichkeit**

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

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 251 Bildern



J. Schlembach Fachverlag

# Inhaltsverzeichnis

1 Aufbau von elektrischen Energieversorgungssystemen.....	1
<b>1.1 Energie und menschliche Entwicklung.....</b>	<b>1</b>
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
<b>1.2 Eigenschaften der elektrischen Energie.....</b>	<b>10</b>
1.2.1 Erzeugung und Anwendung.....	10
1.2.2 Anpaßbarkeit an den Verbrauch.....	12
1.2.3 Unzureichende Speicherfähigkeit.....	14
1.2.4 Verluste und Leitungsgebundenheit.....	16
<b>1.3 Elektrische Energieversorgungsnetze.....</b>	<b>20</b>
1.3.1 Wahl des Stromsystems.....	20
1.3.2 Verbundbetrieb.....	22
1.3.3 Leistungsregelung in Verbundnetzen.....	24
1.3.4 Struktur von elektrischen Energieversorgungsnetzen.....	27
1.3.5 Einfluß von Deregulierung und dezentraler Einspeisung.....	28
1.3.5.1 Monopol oder Wettbewerb in der elektrischen Energieversorgung.....	28
1.3.5.2 Einspeisung dezentraler Erzeuger in das elektrische Netz.....	29
1.3.6 Netzknotenpunkte.....	32
1.3.7 Typische Netzformen.....	34
1.3.8 Sonderformen elektrischer Energieversorgungsnetze.....	38
<b>1.4 Elektrische Betriebsmittel.....</b>	<b>39</b>
<b>1.4.1 Gesamtüberblick.....</b>	<b>39</b>
1.4.2 Rotierende elektrische Drehstrommaschinen.....	41
1.4.3 Transformatoren.....	42
1.4.4 Leitungen.....	43
1.4.5 Drosselspulen.....	46
1.4.6 Kondensatoren.....	47
1.4.7 Schaltgeräte.....	47
1.4.8 Sonstige Betriebsmittel und Elemente elektrischer Energieversorgungsnetze.....	48

2 Grundlagen der Wechselstromtechnik.....	49
<b>2.1 Periodische Wechselgrößen.....</b>	<b>49</b>
<b>2.2 Komplexe Wechselstromrechnung.....</b>	<b>50</b>
2.2.1 Komplexe Darstellung trigonometrischer Funktionen.....	50
2.2.2 Addition zweier Kosinusfunktionen.....	51
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.....	55
2.2.4.3 Kosinusförmige Spannung über einer verlustbehafteten Induktivität.....	56
2.2.4.4 Kosinusförmiger Strom durch einen idealen Kondensator.....	57
2.2.4.5 Kosinusförmiger Strom durch einen verlustbehafteten Kondensator.....	57
2.2.5 Grundgesetze für Wechselstromnetzwerke.....	59
2.2.5.1 Kirchhoff'sche Sätze für kosinusförmige Wechselgrößen.....	59
2.2.5.2 Ohmsches Gesetz für kosinusförmige Wechselströme.....	59
2.2.5.3 Satz von der Ersatzquelle.....	61
2.2.6 Wechselstromleistung.....	62
2.2.6.1 Momentanwert der Leistung.....	62
2.2.6.2 Wirkleistung und Effektivwert.....	63
2.2.6.3 Leistung und Energie in einem verlustfreien Blindelement.....	64
2.2.6.4 Komplexe Darstellung der momentanen Leistung.....	65
2.2.7 Kosinusförmige symmetrische Dreiphasensysteme.....	66
2.2.7.1 Drehoperatoren.....	66
2.2.7.2 Sinusförmige symmetrische Ströme und Spannungen.....	69
2.2.8 Vorzeichenfestlegungen und Zählpeilsysteme.....	71
<b>2.3 Vierpole als Elemente von Wechselstromnetzwerken.....</b>	<b>75</b>
2.3.1 Parameter von linearen Vierpolen.....	75
2.3.1.1 Leerlauf und Kurzschluß als spezielle Belastungsfälle des Vierpols.....	75
2.3.1.2 Meßschaltungen zur Bestimmung der Vierpolparameter.....	77
2.3.1.3 Beschreibung des belasteten Vierpols.....	78
2.3.2 Vierpolgleichungen.....	79
2.3.2.1 Kettenform der Vierpolgleichungen.....	79
2.3.2.2 Impedanzform der Vierpolgleichungen.....	79
2.3.2.3 Admittanzform der Vierpolgleichungen.....	80
2.3.2.4 Hybride Formen der Vierpolgleichungen.....	80
2.3.2.5 Änderung der Zählpeilsysteme am Vierpol.....	82
2.3.2.6 Leistungen an Vierpolen.....	83

2.3.3 Anwen

2.4 Nichtkosin

3.3 Anwendung der Vierpolgleichungen.....	83
2.3.3.1 Kettenschaltung von Vierpolen.....	83
2.3.3.2 Reihenschaltung von Vierpolen.....	84
2.3.3.3 Parallelschaltung von Vierpolen.....	85
2.3.3.4 Reihen-Parallelschaltung und Parallel-Reihenschaltung von Vierpolen.....	86
2.3.4 Elementar-Vierpole.....	87
2.3.4.1 Elementar-Längsvierpol.....	87
2.3.4.2 Elementar-Quervierpol.....	88
2.3.4.3 Leitungskreuzung.....	89
2.3.4.4 Synthese von Vierpolen aus Elementar-Vierpolen.....	89
2.3.4.5 Grenzfall der Belastung von Vierpolen in der elektrischen Energietechnik ...	91
2.3.5 Homogene Vierpolketten.....	93
2.3.5.1 Kettengleichung eines symmetrischen Vierpols.....	93
2.3.5.2 Kettengleichung einer Kette aus n symmetrischen Vierpolen.....	94
2.3.5.3 Spezielle Belastungsfälle der Vierpolkette.....	95
2.3.6 Homogene Leitung.....	96
2.3.6.1 Ersatzschaltung eines Leitungselementes differentieller Länge.....	96
2.3.6.2 Leitungsgleichungen bei kosinusförmigen Strömen und Spannungen.....	98
2.3.6.3 Wellenwiderstand, Übertragungsmaß und natürliche Leistung.....	99
2.3.6.4 Spezielle Betriebszustände der homogenen Leitung.....	100
2.3.6.5 Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm der kurzen Leitung.....	102
2.3.7 Vierpole mit induktiver Kopplung zwischen den Toren.....	103
2.3.7.1 Der mit einer Spule verkettete Fluß.....	103
2.3.7.2 Idealer Transformator.....	104
2.3.7.3 Realer Transformator.....	106
2.3.7.4 Messung der Parameter der Transformatorersatzschaltung.....	109
2.3.7.5 Kurzschluß der Seite 2.....	109
<b>2.4 Nichtkosinusförmige periodische Wechselgrößen.....</b>	<b>111</b>
2.4.1 Darstellung periodischer Wechselgrößen als Fourierreihen.....	112
2.4.2 Symmetrien in der Kurvenform von periodischen Wechselgrößen.....	114
2.4.2.1 Symmetrie zur Abszisse.....	114
2.4.2.2 Symmetrie zur Ordinate.....	115
2.4.2.3 Verschiebung des Koordinatenursprungs.....	116
2.4.3 Kenngrößen nichtkosinusförmiger periodischer Wechselgrößen.....	116
2.4.3.1 Effektivwert.....	116
2.4.3.2 Grundschwingungsfaktor, Klirrfaktor, Formfaktor, Scheitelfaktor.....	117
2.4.4 Anwendung an einer Zweipuls-Brückenschaltung.....	118

2.4.4.1 Leerlauf.....	118
2.4.4.2 Belastung der Zweipuls-Brückenschaltung.....	120
2.4.5 Netzberechnungen mit nichtkosinusförmigen Wechselgrößen.....	122
2.4.5.1 Beschreibung der Wechselgrößen.....	122
2.4.5.2 Nichtkosinusförmige Leerlaufspannung des Wechselstromnetzes.....	123
2.4.5.3 Abnehmer als Konstantstromquelle für höhere Harmonische.....	124
<b>3 Transformationen für Dreiphasensysteme.....</b>	<b>125</b>
<b>3.1 Nullgrößen und Raumzeiger.....</b>	<b>126</b>
3.1.1 Definition der Nullgröße und des Raumzeigers.....	126
3.1.2 Umrechnung von Raumzeigern zwischen verschiedenen Bezugskordinatensystemen.....	127
3.1.3 Rücktransformation von Raumzeigern und Nullgrößen.....	128
3.1.4 Raumzeiger, Diagonalkomponenten und Zwei-Achsen-Komponenten.....	130
3.1.5 Momentane Drehstromleistung und normierte Transformationen.....	133
3.1.6 Raumzeiger verketteter Größen.....	135
3.1.7 Anwendungsbeispiel.....	137
<b>3.2 Kosinusförmige Dreiphasensysteme.....</b>	<b>140</b>
3.2.1 Symmetrische Komponenten.....	140
3.2.2 Raumzeiger und Symmetrische Komponenten.....	142
3.2.3 Diagonal-Komponenten kosinusförmiger Dreiphasensysteme.....	146
3.2.4 Zwei-Achsen-Komponenten kosinusförmiger Dreiphasensysteme.....	147
3.2.5 Verkettete kosinusförmige Dreiphasensysteme.....	148
<b>3.3 Nichtkosinusförmige periodische Dreiphasensysteme.....</b>	<b>150</b>
3.3.1 Periodische Raumzeiger mit symmetrischen Zeitfunktionen.....	151
3.3.1.1 Symmetrie zur Abszisse.....	151
3.3.1.2 Phasenverschiebung von 120 Grad.....	153
3.3.1.3 Symmetrie zur Abszisse und Phasenverschiebung von 120 Grad.....	155
3.3.2 Charakteristische Harmonische in Drehstromsystemen.....	156
3.3.2.1 Zweipulsbrücken als Abnehmer im Drehstromsystem.....	157
3.3.2.2 Magnetisierungsströme von Drehstromtransformatoren.....	159
3.3.3 Ströme eines dreipulsigen Stromrichters in Mittelpunktschaltung.....	163
3.3.3.1 Schaltung und Ventilströme.....	163
3.3.3.2 Raumzeiger der Ventilströme.....	165
3.3.3.3 Leiterströme im Drehstromnetz.....	165
3.3.4 Überlagerung von p-pulsigen Raumzeigern.....	167

**3.4 Transfon**

## 3.4.1 Element

**HK§ Unsymmetri**

%4.1 Periodische Raumzeiger im synchron umlaufenden Koordinatensystem .....	167
13.4.2 Überlagerung von zwei dreipulsigen Raumzeigern.....	169
3.3.4.3 Erzeugung höherer Pulszahlen.....	173
3.3.5 Symmetrische Raumzeiger-Komponenten.....	176
3.3.5.1 Raumzeiger unsymmetrischer Dreiphasensysteme.....	176
3.3.5.2 Dreipulsige Symmetrische Raumzeiger-Komponenten.....	178
3.3.5.3 Sechspulsige Symmetrische Raumzeiger-Komponenten.....	180
<b>3.4 Transformation symmetrischer Drehstromnetze.....</b>	<b>185</b>
3.4.1 Elementar-Achtpole.....	185
3.4.1.1 Elementar-Längsachtpol.....	185
3.4.1.2 Elementar-Querachtpol.....	186
3.4.1.3 Elementar-Achtpole in Symmetrischen Komponenten.....	188
3.4.2 Satz von der Ersatzspannungsquelle für Drehstromnetze.....	189
3.4.3 Ersatzschaltungen für Drehstromtransformatoren.....	191
3.4.3.1 Drehstromtransformator mit unverschalteten Wicklungen.....	191
3.4.3.2 Verschaltung der Wicklungen eines Drehstromtransformators.....	194
3.4.3.3 Idealer Raumzeigertransformator.....	296
3.4.3.4 Schaltgruppen von Drehstromtransformatoren.....	297
3.4.3.5 Linearer Raumzeigertransformator.....	298
3.4.3.6 Nullgrößen-Transformator.....	299
3.4.3.7 Drehstrom-Transformator in Symmetrischen Komponenten.....	202
3.4.4 Rotierende elektrische Maschinen.....	203
3.4.4.1 Besonderheiten im Vergleich zu anderen Betriebsmitteln.....	203
3.4.4.2 Induktivitäten und Flüsse von Dreiphasenwicklungen.....	205
3.4.4.3 Spannungsgleichungen der rotierenden elektrischen Maschine.....	208
3.4.4.4 Ersatzschaltungen rotierender elektrischer Maschinen im Mitsystem.....	209
3.4.4.5 Ersatzschaltung rotierender elektrischer Maschinen im Gegensystem.....	211
3.4.4.6 Ersatzschaltung rotierender elektrischer Maschinen im Nullsystem.....	212
3.4.4.7 Rücktransformation der Symmetrischen Impedanzen rotierender elektrischer Maschinen.....	213
3.4.5 Ersatzschaltungen eines Drehstromnetzwerkes.....	214
<b>3.5 Unsymmetrische Betriebszustände in Drehstromnetzen.....</b>	<b>217</b>
3.5.1 Symmetrischer Betrieb eines Drehstromsystems.....	217
3.5.2 Einpolige Unsymmetrien.....	218
3.5.3 Zweipolige Unsymmetrien.....	223
3.5.4 Querunsymmetrien im symmetrischen Drehstromsystem.....	228
3.5.4.1 Mitkomponenten der Querunsymmetrie.....	228
3.5.4.2 Unsymmetrieimpedanzen.....	229

3.5.4.3 Symmetrische Ströme und Spannungen der Querunsymmetrie.....	230
3.5.4.4 Natürliche Ströme und Spannungen der Querunsymmetrie.....	230
3.5.5 Sternpunktbehandlung in Drehstromnetzen.....	232
3.5.5.1 Begriffsbestimmung.....	232
3.5.5.2 Einfluß der Sternpunktbehandlung auf das Nullsystem.....	232
3.5.5.3 Isoliert betriebenes Netz.....	233
3.5.5.4 Erdschlußkompensation.....	235
3.5.5.5 Unmittelbare Sternpunktterdung.....	236
3.5.5.6 Anwendungsgebiete der verschiedenen Arten der Sternpunktbehandlung.....	238
3.5.6 Symmetrierang unsymmetrischer Lasten.....	239
3.5.6.1 Unsymmetrische Last in Dreieckschaltung.....	239
3.5.6.2 Symmetrierschaltung nach Steinmetz.....	240
3.5.6.3 Symmetrierschaltung nach Scott.....	242
<b>4 Leistungen in elektrischen Energieversorgungssystemen.....</b>	<b>245</b>
<b>4.1 Grundbegriffe.....</b>	<b>245</b>
4.1.1 Wirkungsgrad energetischer Prozesse.....	245
4.1.2 Bildung der elektrischen Energie.....	252
4.1.3 Verluste in elektrischen Energieversorgungsnetzen.....	254
4.1.4 Maximaler Wirkungsgrad.....	258
4.1.5 Wirk- und Scheinleistung.....	261
4.1.6 Leistungsfaktor und Blindleistung.....	262
<b>4.2 Leistungen in Drehstromsystemen.....</b>	<b>265</b>
4.2.1 Wirkleistung.....	265
4.2.2 Effektivwerte von Dreiphasensystemen und Scheinleistung.....	266
4.2.3 Leistungsverhältnisse bei kosinusförmigen, symmetrischen Spannungen.....	268
4.2.4 Leistungen bei kosinusförmigen, symmetrischen Spannungen und Strömen.....	270
4.2.4.1 Leistungsgrößen.....	270
4.2.4.2 Leistungsfluß über einen Netzzweig.....	272
4.2.5 Leistungen unsymmetrischer Drehstromabnehmer.....	275
4.2.5.1 Leistungsgrößen.....	275
4.2.5.2 Berechnung der unsymmetrischen Spannungen und Ströme.....	276
4.2.5.3 Niederspannungstransformator mit unsymmetrischer Belastung.....	278
4.2.5.4 Grenzfälle der unsymmetrischen Belastung.....	280
4.2.5.5 Besonderheit unsymmetrischer Belastungen.....	282
4.2.6 Leistungen von Stromrichtern im Drehstromsystem.....	285
4.2.6.1 Leistungen bei kosinusförmig symmetrischen Spannungen.....	285
4.2.6.2 Stromrichterleistungen bei verzerrten Spannungen.....	288

**4.3 Zeitlich v****4.4 Blindleisti****4.4.5 Leistung;**

4.2.6.3 Grundswingungsmodell eines Stromrichters.....	295
4.2.6.4 Leistungsverhältnisse bei Pulsstromrichtern.....	397
<b>4.3 Zeitlich veränderliche Belastungen.....</b>	<b>301</b>
4.3.1 Leistungen bei Modulation.....	301
4.3.1.1 Leistungsgrößen bei Modulation.....	301
4.3.1.2 Typische Betriebsarten bei Modulation.....	302
4.3.1.3 Drehstrommotor mit aussetzender Belastung.....	304
4.3.1.4 Gleichstromsteller.....	305
4.3.2 Stochastisch veränderliche Leistungen.....	307
4.3.2.1 Gang- und Dauerlinie.....	307
4.3.2.2 Benutzungsdauern und Belastungsgrade.....	311
4.3.2.3 Verlustfaktor.....	312
4.3.3 Ermittlung elektrischer Belastungen.....	317
4.3.3.1 Bestimmung elektrischer Belastungen.....	317
4.3.3.2 Bedarfskoeffizienten und Gleichzeitigkeitsgrade.....	318
4.3.3.3 Zweigliederformel.....	320
4.3.3.4 Spezifische Flächenbelastung und spezifischer Energiebedarf.....	320
4.3.3.5 Belastungskenngrößen der öffentlichen Energieversorgung.....	321
<b>4.4 Blindleistungskompensation.....</b>	<b>323</b>
4.4.1 Grundprinzip.....	323
4.4.2 Kompensation der Verschiebungsblindleistung.....	325
4.4.2.1 Serienkompensation.....	325
4.4.2.2 Parallelkompensation.....	325
4.4.2.3 Parallelkompensation mit Synchronmaschinen.....	326
4.4.2.4 Kompensation von Leitungen.....	328
4.4.3 Kompensation der Verzerrungsblindleistung.....	329
4.4.4 Kompensation der Modulationsblindleistung.....	330
4.4.4.1 Grundprinzip.....	330
4.4.4.2 Praktische Realisierung.....	331
4.4.5 Leistungselektronische Kompensationsanlagen.....	332
<b>5 Wirtschaftliche Energieversorgung.....</b>	<b>333</b>
<b>5.1 Kosten in der Energieversorgung.....</b>	<b>333</b>
5.1.1 Kostenbegriffe.....	333
5.1.1.1 Lohnkosten als Wertverzehr für den Faktor Arbeit.....	333
5.1.1.2 Materialkosten als Wertverzehr für den Faktor Werkstoffe.....	333



5.1.1.3 Anlagenkosten als Wertverzehr für den Faktor Betriebsmittel und Anlagen ...	333
5.1.1.4 Kapitalkosten als Wertverzehr für das Kapital.....	335
5.1.1.5 Sonstige Kosten, Gemeinkosten.....	335
5.1.2 Feste und veränderliche Kosten.....	335
5.1.3 Externe Effekte.....	336
<b>5.2 Investitions- und Kostenrechnung.....</b>	<b>338</b>
5.2.1 Finanzmathematische Grundlagen.....	338
5.2.2 Gesteungskosten für die elektrische Energie.....	340
5.2.3 Energiekosten und Energiepreise.....	343
5.2.4 Bewertung von Verlusten in Energieversorgungsnetzen.....	345
5.2.5 Bewertung von Netznutzungen.....	346
5.2.5.1 Netznutzung in einer marktwirtschaftlich orientierten Elektrizitätswirtschaft	346
5.2.5.2 Strommarktmodelle.....	347
5.2.5.3 Einflüsse auf die Netznutzungskosten.....	348
5.2.5.4 Durchleitungsentgelte auf der Basis von Kapitalkosten.....	349
5.2.5.5 Durchleitungsentgelte auf der Basis von Betriebskosten.....	350
<b>5.3 Wirtschaftlicher Betrieb von elektrischen Energieversorgungsnetzen.....</b>	<b>351</b>
5.3.1 Allgemeines Optimierungsproblem.....	351
5.3.2 Klassische Form der Lastverteilung.....	351
5.3.3 Verlustminimaler Verbundbetrieb bei konstanter Last.....	356
5.3.4 Ausgleich der Ganglinie und wirtschaftlicher Kraftwerkseinsatz.....	359
5.3.5 Wirtschaftliche Auslastung elektrischer Betriebsmittel.....	361
5.3.5.1 Wirtschaftliche Auslastung von Transformatoren.....	361
5.3.5.2 Wirtschaftliche Auslastung von Kabeln.....	363
5.3.5.3 Wirtschaftliche Auswahl von Betriebsmitteln aus einer Typenreihe.....	363
<b>5.4 Least-Cost-Planning.....</b>	<b>367</b>
5.4.1 Grandgedankendes Least-Cost-Planning.....	367
5.4.2 Energieeinsparpotentiale in den Haushalten.....	369
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>372</b>
<b>Sachwortverzeichnis.....</b>	<b>380</b>