Grundlagen der elektrischen Energieversorgung

Von Dr.-Ing. habil. Gerhard Herold
Professor an der Universität Erlangen-Nürnberg

Mit 220 Bildern

B. G. Teubner Stuttgart 1997

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Herold, Gerhard:

Grundlagen der elektrischen Energieversorgung / von Gerhard Herold.

Stuttgart : Teubner, 1997

ISBN-13: 978-3-519-06187-8

e-ISBN-13: 978-3-322-87190-9

DOI: 10.1007/978-3-322-87190-9

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jeder Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© B. G. Teubner Stuttgart 1997

Gesamtherstellung: Präzis-Druck GmbH, Karlsruhe

Einbandgestaltung: Peter Pfitz, Stuttgart

Vorwort

Die Versorgung mit Energie gehört zu den elementaren Bedürfnissen aller Menschen. Das Lebensniveau in den hochentwickelten Ländern der Erde konnte nur auf einer stabilen und leistungsfähigen energetischen Grundlage entstehen. Ohne Energie ist keine industrielle Produktion möglich, Energie verleiht Mobilität, erleichtert das Leben und ist das Fundament seiner Annehmlichkeiten. Weltweit unterscheidet sich der Pro-Kopf-Verbrauch an Energie um zwei bis drei Größenordnungen mit den entsprechenden Auswirkungen auf die Lebensbedingungen. Die Verringerung dieser Unterschiede bei schonendem Umgang mit allen verfügbaren Energiequellen ist nicht nur eine humanitäre, sondern auch eine existentielle Aufgabe. Daher wird die Auseinandersetzung mit Energiefragen auf lange Sicht von erstrangiger Bedeutung bleiben.

Die elektrische Energie nimmt seit dem Beginn ihrer großtechnischen Nutzung im Prozeß einer nachhaltigen energetischen Entwicklung auf der Erde wegen ihrer besonderen Eigenschaften und nicht zuletzt wegen ihrer hervorragenden Anpaßbarkeit an die Erfordernisse des Verbrauchs eine Schlüsselposition ein. Wir stehen am Beginn einer Entwicklung, in der in Kombination von moderner Leistungs- und Informationselektronik intelligente elektrische Betriebsmittel mit bisher unbekannten Gebrauchswerteigenschaften für eine rationelle Energieübertragung, -verteilung und -anwendung geschaffen werden, die zum weiteren Ausbau dieser Position beitragen wird. Elektrische Energieversorgung ist eine herausfordernde Aufgabe mit Zukunft.

Das vorliegende Buch entstand aus meiner Vorlesung "Grundlagen der elektrischen Energietechnik", die ich nun zum vierten Mal vor Studenten der Elektrotechnik des fünften Semesters an der Universität Erlangen-Nürnberg gehalten habe. Bei ihrer Konzeption ließ ich mich von der Ansicht leiten, daß man in der Ausbildung den aktuellen Entwicklungen in der elektrischen Energietechnik am besten durch Konzentration auf wichtige Grundlagen Rechnung tragen kann. Einerseits sollten es Grundlagen für weiterführende Vorlesungen sein. Andererseits lag es in meiner Absicht, Hörern, die später andere Spezialisierungsrichtungen einschlagen, "energietechnisches" Denken nahezubringen und so Verständnis und Offenheit für diese grundlegenden und zukunftsbestimmenden Fragen zu wecken.

Das erste Kapitel dient dem Überblick. Der grundsätzliche Aufbau von elektrischen Energieversorgungssystemen wird aus den Eigenschaften der elektrischen Energie abgeleitet. Nach einer Vorstellung typischer Netzstrukturen werden die wichtigsten elektrischen Betriebsmittel aufgeführt. Das zweite Kapitel faßt die für die elektrische Energietechnik wichtigen Grundlagen der Wechselstromtechnik zusammen. Es dient als Vorbereitung für die Auseinandersetzung mit symmetrischen Drehstromnetzwerken.

In der elektrischen Energieversorgung dominiert ungebrochen die Drehstromtechnik. Ihre Bedeutung hat sich durch die Entwicklungen auf dem Gebiet der modernen Leistungselektronik weiter erhöht. Das dritte Kapitel behandelt daher die in der elektrischen Energietechnik gebräuchlichen Koordinatentransformationen für Dreiphasensysteme in ihren wechselseitigen Zusammenhängen mit dem Ziel, Hilfsmittel für eine anschauliche

Beschreibung von Betriebsvorgängen in Drehstromsystemen bereitzustellen. Das Fundament für diese Betrachtungen ist die Transformation von Dreiphasensystemen in Raumzeiger und Nullgrößen.

Der Prozeß der elektrischen Energieversorgung wird sowohl im Hinblick auf quantitative Aspekte als auch auf seine Qualität durch Größen wie den Wirkungsgrad, die Wirk-, die Schein- und die Blindleistung sowie den Leistungsfaktor beschrieben. Unter dem Stichwort "Energiequalität" ist das Interesse an diesem Problemkreis vor allem im Zusammenhang mit dem zunehmenden Einsatz von leistungselektronischen Anlagen in Energieversorgungsnetzen sehr hoch. Die Beschränkung auf Leistungsgrößen bei kosinusförmigen Strömen und Spannungen ist daher nicht mehr zeitgemäß. Andererseits ist die wissenschaftliche Diskussion über verallgemeinerte, von den Zeitfunktionen der Ströme und Spannungen unabhängige, Leistungsgrößen noch nicht abgeschlossen. Dieser Situation angepaßt wird hier der Versuch unternommen, die Leistungstheorie möglichst allgemein aufzubauen und dabei doch mit wenigen Begriffen und Kenngrößen, die auf eine physikalisch interpretierbare Grundlage zurückgeführt werden können, auszukommen. Zwangsläufig kann so der wissenschaftliche Bearbeitungsstand nicht in allen seinen Aspekten widerspiegelt werden.

Das letzte Kapitel beschäftigt sich mit Fragen der wirtschaftlichen Energieversorgung angefangen von den Gestehungskosten für elektrische Energie über die Lastverteilung bis hin zur wirtschaftlichen Auslastung elektrischer Betriebsmittel. Nicht zuletzt soll hier die Erkenntnis vermittelt werden, daß elektrische Energieversorgung nur dann wirtschaftlich gestaltet werden kann, wenn das komplexe System über große Zeiträume betrachtet wird. Die Ansätze des Integrated-Ressource-Planning begründen ihre Wirkungen auf einer Erweiterung der Grenzen über das eigentliche elektrische System hinaus. Sie lassen sich von der Erkenntnis leiten, daß die Energieprobleme nur durch Erfassung immer komplexerer Zusammenhänge gelöst werden können.

Ein Buch wie das vorliegende ist in gewisser Weise immer ein Gemeinschaftswerk. So bin auch ich vielen Menschen für ihre Hilfe bei seiner Erarbeitung zu Dank verpflichtet. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Christian Weindl, der bei der Korrektur und Nachrechnung weder Zeit noch Mühen gescheut hat. Auch Frau Ingrid Willner, Frau Gertraud Stumpf, Frau Johanna Biegel und Herrn Tobias Knoll schulde ich großen Dank dafür, daß sie meine Computermanuskripte in eine dem Leser zumutbare Form gebracht haben. Schließlich danke ich dem Teubner-Verlag für die gute und fördernde Zusammenarbeit.

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 Speicherkapazität	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	Drosselspulen	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 Zählpeilsysteme	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 Zählpeilsysteme 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 Energietechnik.....	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 Bezugskoordinatensystemen.....	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	Magnetisierungströme 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