
Elektrische Energieversorgung 3

Valentin Crastan · Dirk Westermann

Elektrische Energieversorgung 3

Dynamik, Regelung und Stabilität,
Versorgungsqualität, Netzplanung,
Betriebsplanung und -führung, Leit- und
Informationstechnik, FACTS, HGÜ

2., aktualisierte Auflage

Valentin Crastan
Evilard
Schweiz

Dirk Westermann
Technische Universität Ilmenau
Ilmenau
Deutschland

Die Darstellung von manchen Formeln und Strukturelementen war in einigen elektronischen Ausgaben nicht korrekt, dies ist nun korrigiert. Wir bitten damit verbundene Unannehmlichkeiten zu entschuldigen und danken den Lesern für Hinweise.

ISBN 978-3-662-49020-4 ISBN 978-3-662-49021-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-49021-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2012, 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur zweiten Auflage des dritten Bandes

In der vorliegenden zweiten Auflage des dritten Bandes wurde Kap. 1 überarbeitet und in Zusammenhang mit der Echtzeitsimulation etwas erweitert, wofür wir uns bei Herrn Pöller bedanken. Neben den üblichen Anpassungen und Korrekturen an verschiedenen Stellen wurde insbesondere Kap. 8 und 9 erweitert. Bedanken möchten wir uns ferner bei Frau Dr. Marten für den Beitrag zu HGÜ-Netzen in Abschn. 8.7 und bei Herrn Apel für die Überarbeitung von Kap. 10.

Evilard/Weimar
Mai 2017

V. Crastan, D. Westermann

Vorwort

Für die vorliegende 3. Auflage des zweiten Bandes der Reihe Elektrische Energieversorgung (2. Auflage 2008) drängte sich angesichts der vielen Aktualisierungen und Erweiterungen eine Aufspaltung in zwei Teile auf, die fortan als Band 2 und 3 erscheinen.

Band 2 setzt sich mit den Fragen der Energiewirtschaft und des Klimaschutzes auseinander, sowie mit der Elektrizitätswirtschaft und der damit verbundenen Liberalisierungsanstrengungen. Ferner wird die Elektrizitätserzeugung mit klassischen und alternativen Mitteln dargelegt.

Im vorliegenden Band 3, neu von V. Crastan und D. Westermann gemeinsam herausgegeben, werden die Probleme der Dynamik, Regelung und Stabilität sowie der Planung und des Betriebs des Netzes einschließlich Netzleittechnik behandelt. Die Techniken der Steuerung mittels Leistungselektronik (FACTS) und der immer wichtiger werdenden Gleichstromübertragung (HGÜ) werden aus systemtechnischer Sicht dargelegt.

Der Aspekt Versorgungsqualität wird neu im Beitrag von Gerhard Bartak umfassend besprochen (Kap. 5). Die in Zusammenhang mit der Netzplanung anstehenden Fragen wurden durch die praxisbezogenen Ausführungen von Dr. Jutta Hanson, ABB, sehr gut ergänzt (Kap. 6). Beiden Autoren sei für Ihre Mitwirkung gedankt.

Die für das europäische Netz wichtige Frage des Anschlusses des türkischen Netzes und die bei der praktischen Realisierung gewonnenen Erfahrungen werden im Beitrag von Prof. Dr. H. Weber dargelegt, wofür wir Ihm zu Dank verpflichtet sind. Einen großen Dank auch an Dr. R. Apel und O. Vollmeier, Siemens AG für die Aktualisierung und Neufassung des Kapitels Netzleittechnik sowie dem Springer-Verlag für die gute Zusammenarbeit.

Evilard/Weimar
im Januar 2011

V. Crastan, D. Westermann

Vorwort zur 2. Auflage

In der nun vorliegenden 2. Auflage des 2004 erschienenen zweiten Bandes ist Kap. 1 deutlich ausgebaut worden, um den Veränderungen im Bereich der Energiewirtschaft und insbesondere den durch den Klimawandel aufgeworfenen Fragestellungen Rechnung zu tragen.

Außerdem wurde im Rahmen der Ausführungen zur Liberalisierung der Elektrizitätswirtschaft dem Aspekt Risikomanagement ein größeres Gewicht beigemessen, wofür ich T. Putzi der Bernischen Kraftwerke AG und Prof. M. Höckel, HTI Biel, zu Dank verpflichtet bin. Ebenso danke ich Dr. J. Kreusel, ABB, für einige Aktualisierungen zum Thema.

Die Struktur des Bandes ist im Wesentlichen die gleiche geblieben. Ungenauigkeiten und Fehler wurden ausgemerzt sowie Anpassungen und Aktualisierungen dort vorgenommen, wo dies notwendig war.

Danken möchte ich ferner Prof. A. Shah, Universität Neuchâtel, für den anregenden Gedankenaustausch zum Thema Photovoltaik, Prof. M. Q. Tran, ETH Lausanne, für die Durchsicht und einige Anregungen zu Kap. 9 (Kernfusion) und Dr. Ulf Bossel für Bemerkungen zum Thema Brennstoffzellen.

Schließlich sei den Ko-Autoren Dr. R. Apel und O. Vollmeier, Siemens AG, gedankt für die Mühe, die Sie sich genommen haben, ihre Kapitel zum Thema Netzleittechnik anzupassen und optimal zu koordinieren.

Dem Springer-Verlag danke ich für die gute und effiziente Zusammenarbeit.

Biel
im Juni 2008

V. Crastan

Vorwort zur 1. Auflage

Der im Jahr 2000 erschienene Band 1 des nun vorliegenden zweibändigen Werkes „Elektrische Energieversorgung“ behandelt die elektrotechnischen Grundlagen, die Modellierung der Elemente des Drehstromnetzes, das stationäre und quasi-stationäre Verhalten symmetrischer Netze und von Netzen mit Unsymmetrien sowie die Grundlagen der Netzelement-Bemessung, der Schaltvorgänge und der Schutztechnik.

In Band 2 werden diese vor allem die Energieübertragung und -verteilung betreffenden Ausführungen durch die energie- und insbesondere die elektrizitätswirtschaftlichen Aspekte ergänzt, wozu auch die Kraftwerktechnik und alternative Arten der Stromerzeugung gehören. Breiten Raum finden ferner die Fragen der Dynamik und Stabilität des Energieversorgungsnetzes und die mit der Planung und Betriebsführung zusammenhängenden Probleme. Obwohl gut 60 % des Buches von mir stammen und dieses somit Monographie-Charakter hat, sind wesentliche Beiträge von den auf Seite XXV aufgeführten Ko-Autoren geleistet worden, denen ich meinen herzlichsten Dank ausspreche.

Der aus fünf Teilen und einem Anhang bestehende Band 2 gliedert sich wie folgt:

Teil I widmet sich den energiewirtschaftlichen Grundfragen unter Einbezug ökologischer Aspekte sowie den Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsrechnung. Einen breiten Raum nehmen dann die Fragen der Marktöffnung ein, die durch den Beitrag von Dr. J. Kreusel zur Funktionsweise liberalisierter Strommärkte wesentlich vertieft und mit den Ausführungen von Prof. M. Höckel zu den Themen Risikomanagement und Strompreisgestaltung abgerundet werden.

Teil II behandelt die konventionelle auf Wasserkraft sowie auf fossile und nukleare Brennstoffen basierende Kraftwerktechnik einschl. Modellierung und Dynamik. Die Ausführungen zu den für die Zukunft wichtigen Kombikraftwerken sind durch einen Beitrag von H. Kleinen ergänzt. Ein Abschnitt über die ökologisch wichtige Wärmepumpe rundet den Aspekt Energieumwandlung ab.

Teil III betrifft die alternativen Methoden der Stromproduktion, ihre Technik und Aussichten. Besonders erwähnt seien die Windkraft, die Photovoltaik, die Kernfusion und die Brennstoffzelle.

Teil IV setzt sich mit den Fragen der Regelung und Stabilität des Energieversorgungsnetzes auseinander. Die z.T. bereits in Band 1 behandelten Modellierungsprobleme werden ergänzt und vertieft und die heute vorhandenen Werkzeuge zur Simulation komplexer Netze im Beitrag von Dr. M. Pöller beschrieben. Ausserdem werden die Fragen der Netzregelung und die Probleme der Polradwinkel- und der Spannungsstabilität eingehend behandelt. Eine Analyse der Polradwinkelstabilität in ausgedehnten Netzen (UCTE-Netz) und der Ursachen entsprechender Polradwinkelpendelungen findet sich im Beitrag von Prof. Dr. H. Weber.

Teil V erörtert zuerst das Betriebsoptimierungsproblem für das vertikal integrierte Energieversorgungssystem und geht dann auf die durch die Marktöffnung und den Wettbewerb sich aufdrängenden Änderungen ein. Der Fall der Betriebsoptimierung bei ausgehandeltem Netzzugang wird im Beitrag von Dr. J. Kreusel vertieft. Eine wesentliche Innovation im Bereich der Steuerung und Optimierung des Energieversorgungsnetzes stellen die FACTS dar, deren Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten in dem von Dr. D. Westermann verfassten Kap. 15 eingehend behandelt werden. Da gerade wegen der Marktöffnung auch die Fragen der Leit- und Informationstechnik an Bedeutung zunehmen, befassen sich zwei Beiträge von Dr. R. Apel (Kap. 16) und O. Vollmeier (Kap. 17) aus verschiedenen Blickwinkeln mit diesem Fragenkomplex.

Im Anhang sind in erster Linie physikalisch-mathematische Grundlagen, die für das vertiefte Verständnis einiger Kapitel notwendig sind, wie thermodynamische und kernphysikalische Grundlagen oder Grundbegriffe der Dynamik, Regelungstechnik und Optimierungsrechnung, gegeben. Die Lösungen der Aufgaben und einige Tabellen und Graphiken finden sich ebenfalls im Anhang.

Für die Durchsicht des Abschnitts Kernfusion und einige nützliche Hinweise bin ich Dr. Kurt Appert, ETHL, zu Dank verpflichtet, ebenso danke ich Dr. Ulf Bossel für die Durchsicht des Abschnitts Brennstoffzellen. Den Ko-Autoren möchte ich nochmals für ihre wesentlichen Beiträge danken. Dem Springer-Verlag sei für die stets angenehme und insbesondere Frau G. Maas für Ihre engagierte Zusammenarbeit gedankt.

Biel
im April 2003

V. Crastan

Ko-Autoren Band 3

Rolf Apel

Siemens AG, Sektor Energie, Nürnberg, Deutschland

Kap. 10

Gerhard Bartak

Consultant, Wien, Österreich

Kap. 5

Jutta Hanson

ABB AG, Mannheim, Deutschland

Kap. 6

Jochen Kreusel

ABB AG, Mannheim, Deutschland

Abschn. 9.3.3

Anne-Katrin Marten

50 Hertz Transmission GmbH, Berlin, Deutschland

Abschn. 8.7

Markus Pöller

DigSILENT GmbH, Gomaringen, Deutschland

Abschn. 1.4

Otto Vollmeier

Siemens AG, Zürich, Schweiz

Abschn. 10.6

Harald Weber

Universität Rostock, Rostock, Deutschland

Abschn. 3.7 und 3.8

Inhaltsverzeichnis

Teil I Regelung, Stabilität des Energieversorgungsnetzes

1	Modellierung und Simulation	3
	Valtenin Crastan	
1.1	Generatormodelle und sonstige Einspeisungen	4
1.1.1	Kurzzeitmodelle der SM	5
1.1.2	Langzeitmodell der SM	9
1.1.3	Sonstige Einspeisungen	10
1.2	Lastmodelle	11
1.2.1	Statische Last	12
1.2.2	Dynamische Lasten	13
1.3	Netzdarstellung	15
1.4	Simulationsprogramme	16
1.4.1	Modellierung des elektrischen Netzes	19
1.4.2	Allgemeines Modell zur Analyse von Stabilitätsproblemen . .	25
1.4.3	Numerische Integration	26
1.4.4	Genauigkeit und Stabilität numerischer Integrationsverfahren	31
1.4.5	Simulationsalgorithmen	38
1.4.6	Behandlung von Nichtlinearitäten	41
1.4.7	Besondere Anforderungen an die Echtzeitsimulation	43
1.4.8	Dynamische Modellierung	44
1.4.9	Initialisierung (Berechnung von Anfangsbedingungen)	46
	Literatur	51
2	Drehzahl- und Frequenzleistungsregelung	53
	Valtenin Crastan	
2.1	Primärregelung	54
2.1.1	Wasserturbinen	56
2.1.2	Dampfkraftwerk	57
2.1.3	Gasturbinen- und Kombikraftwerke	60

2.2	Frequenzregelung im Inselnetz	64
2.2.1	Primärregelung	64
2.2.2	Sekundärregelung	66
2.3	Frequenzleistungsregelung im Verbund	67
	Literatur	70
3	Synchronisierung und Polradwinkelstabilität	71
	Valtenin Crastan	
3.1	Synchrongruppe am starren Netz	71
3.1.1	Torsionsschwingungen	71
3.1.2	Störungen des Gleichgewichts	74
3.1.3	Wirkung der Netzreaktanz	76
3.1.4	Statische Stabilität der unregelmäßigten SM	78
3.1.5	Statische Stabilität mit Spannungsregelung	79
3.1.6	Verhalten im Kurzzeitbereich	81
3.2	Dynamik der kleinen Störungen	82
3.2.1	Wirkung der Drehzahlregelung	86
3.2.2	Wirkung der Spannungsregelung	87
3.2.3	Wirkung des Pendeldämpfungsgeräts	88
3.3	Verhalten bei großen Störungen	89
3.3.1	Transiente Analyse	93
3.3.2	Stabilisierungsmaßnahmen	97
3.4	Modellierung mit subsynchronen Schwingungen	101
3.4.1	Synchronmaschine	101
3.4.2	Netzverbindung	101
3.4.3	Polar-dq-Transformation	103
3.4.4	Mechanik	103
3.4.5	Hydraulisches oder thermisches System und Drehzahlregelung	103
3.5	Transiente Analyse von Mehrmaschinensystemen	104
3.5.1	Elektrisch statische Darstellung der Generatoren	104
3.5.2	Netzdarstellung	106
3.5.3	Die elektrische Leistung	106
3.5.4	Systeme mit $m > 3$	113
3.5.5	Spannungsunabhängigkeit der Last	113
3.5.6	Stabilität im Großen	114
3.5.7	Ordnungsreduktion	115
3.6	Lineare Analyse von Mehrmaschinensystemen	120
3.6.1	Berücksichtigung von Spannung und Blindleistung	124
3.6.2	Netzreduktion	124
3.6.3	Ordnungsreduktion der Generatorübertragungsfunktionen . .	125

3.7	Polradwinkelstabilität und ihre Analyse in der Praxis des Netzbetriebs	125
3.7.1	Entstehungsursachen von Polradwinkelpendelungen	128
3.7.2	Einfluss von Leistungs transit auf die Polradwinkelstabilität ..	132
3.7.3	Einfluss der Verbraucherstruktur auf die Polradwinkelstabilität	135
3.7.4	Identifizierung destabilisierender Spannungsregler in Mehrmaschinensystemen	138
3.8	Praktische Untersuchungen zur Polradwinkelstabilität: Anschluss des türkischen Netzes an das europäische ENTSO-E-System	141
3.8.1	Durchgeführte Untersuchungen	142
3.8.2	Ermittlung der Stabilitätsgrenze	145
3.8.3	Untersuchung des Einflusses der Wasserkraftwerke	146
3.8.4	Untersuchung des Einflusses der Pendeldämpfungsgeräte ...	148
3.8.5	Untersuchung des Einflusses von Static Var Compensators (SVCs) und STATCOMs	150
3.8.6	Einbau eines Bremswiderstands	154
3.8.7	Dämpfungsverhalten des Gesamtsystems nach Anschluss am 18. September 2010	156
	Literatur	157
4	Spannungsregelung und Spannungsstabilität	159
	Valentin Crastan	
4.1	Erregersysteme und Spannungsregelung der SM	160
4.1.1	Erregersysteme	160
4.1.2	Spannungsregelung der Synchronmaschine	162
4.2	Regelung von Stufentransformatoren	171
4.2.1	Reglerauslegung	171
4.2.2	Lastflussberechnung mit Regeltransformator	173
4.3	Geregelte Kompensationsanlagen	175
4.3.1	Parallelkompensation mit SVC	175
4.3.2	Statische Konverter (STATCOM)	178
4.3.3	Seriakompensation	179
4.4	Statische Spannungsstabilität der SM	180
4.4.1	(u, p)-Kennlinien bei konstantem Leistungsfaktor	182
4.4.2	(u, q)-Kennlinien bei vorgegebener Wirklast	186
4.4.3	Darstellung mit der Generatorblindleistung	188
4.5	Statische Spannungsstabilität im vermaschten Netz	192
4.6	Dynamik	194
4.6.1	Kurzzeitanalyse	194
4.6.2	Langzeitinstabilität	195
	Literatur	195

Teil II Netzplanung, Betriebsplanung und -führung

5	Versorgungsqualität	199
	Gerhard Bartak	
5.1	Einleitung, Grundbegriffe	199
5.1.1	Elektrizitätsversorgung und Gesellschaft	199
5.1.2	Qualitätsbegriffe im Bereich der Elektrizitätsversorgung	199
5.1.3	Struktur der Qualitätsbereiche bei der Elektrizitätsversorgung	200
5.1.4	Mit QoS befasste Institutionen	203
5.1.5	Einflusskomponenten für die QoS und die Player	203
5.2	Versorgungssicherheit SoS	205
5.2.1	Allgemeines	205
5.2.2	Definition	205
5.2.3	Komponenten und deren Gewichtung	206
5.2.4	Spezifisches Regelwerk	207
5.3	Versorgungszuverlässigkeit CoS	207
5.3.1	Allgemeines	207
5.3.2	Definition	208
5.3.3	Große Versorgungsunterbrechungen der letzten Jahre	210
5.3.4	Wesentliche Gründe für Versorgungsunter- brechungen und deren Kosten	211
5.3.5	Unterstützung durch den europäischen Verbundbetrieb	212
5.3.6	Spezifisches Regelwerk	213
5.3.7	Kenngrößen	214
5.3.8	Monitoring und Statistik: Praxis und Probleme	216
5.4	Spannungsqualität (PQ, VQ)	217
5.4.1	Allgemeines	217
5.4.2	Definition	219
5.4.3	Bezug zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV)	219
5.4.4	Spezifisches Regelwerk	221
5.4.5	Entwicklung der PQ-Normung	224
5.4.6	Position der PQ-Normung im Gesamtumfeld des Regelwerks	229
5.4.7	Mutation der EN 50160. Aktuelle Probleme und Ausblick	230
5.4.8	Monitoring und Statistik: Praxis und Probleme	232
5.5	Commercial quality (CQ)	233
5.6	Entwicklung der QoS-Wahrnehmung, Rückblick und Ausblick	234
5.7	Zusammenfassung	235
	Literatur	236

6	Netzplanung und Netzberechnung	239
	Jutta Hanson	
6.1	Berechnungen zur Konzeptanalyse	241
6.1.1	Lastflussberechnungen	241
6.1.2	Kurzschlussstromberechnungen	243
6.1.3	Überstromschutz	243
6.1.4	Thermische Belastbarkeit von Kabeln	245
6.1.5	Sternpunktbehandlung	247
6.1.6	Oberschwingungen	248
6.1.7	Dynamischer Motoranlauf	252
6.1.8	Transiente Stabilität	255
6.1.9	Statische Stabilität	257
6.1.10	Probabilistische Zuverlässigkeit	260
6.1.11	Überspannungen	262
6.2	Netzplanung für unterschiedliche Versorgungsnetze	266
6.2.1	Öffentliches Verteilnetz	266
6.2.2	Industriernetz	268
6.2.3	Windparks	270
6.2.4	Netzanschluss und Eigenbedarf von Kraftwerken	274
	Literatur	276
7	Flexible AC Transmission Systems	277
	Dirk Westermann	
7.1	Übersicht	277
7.2	Technologie	282
7.2.1	Halbleiterbauelemente	283
7.2.2	Pulsweitenmodulation Spannungsumrichter (PWM-VSC) ..	289
7.2.3	Kaskadierter Zweilevel Spannungsumrichter (CTL-VSC) ...	299
7.2.4	Modularer Multilevel Spannungsumrichter (MMC-VSC) ...	303
7.2.5	Hybrider Multilevel Spannungsumrichter (HML-VSC)	305
7.2.6	Grundstruktur Schutz- und Leitsystem	309
7.3	Aufbau und stationäres Betriebsverhalten	312
7.3.1	Shuntelemente – SVC und STATCOM	313
7.3.2	Serienelemente – TCSC und SSSC	320
7.3.3	Parallel-serielle Elemente – PAR und UPFC	325
7.3.4	Anwendung im Netz	333
7.4	Integration in die Lastflussgleichungen	344
7.4.1	Vorbemerkung	344
7.4.2	Knoteninjektionsverfahren	347
7.4.3	Integration in die Leistungsflussgleichungen	350

7.5	Modellierung für die Effektivwertsimulation	352
7.5.1	Shuntelemente – STATCOM	353
7.5.2	Serienelemente – SSSC	356
7.5.3	Parallel-Serielle-Elemente – UPFC	359
7.5.4	Synthese mit den Netzgleichungen	364
7.6	Einsatzortbestimmung	367
7.6.1	Shuntelemente	368
7.6.2	Serienelemente	369
7.6.3	Betrachtung Netzdynamik	371
7.7	Einfluss auf die transiente Winkelstabilität	373
7.7.1	Allgemeine Betrachtung	373
7.7.2	Allgemeiner Ansatz	377
7.7.3	Ausführungsbeispiele	380
7.8	Einsatz in den unteren Spannungsebenen	383
7.8.1	Störungsursachen	384
7.8.2	FACTS-Elemente zur Verbesserung der Versorgungsqualität	386
7.8.3	Vergleich	394
	Literatur	396
8	Hochspannungsgleichstromübertragung	399
	Dirk Westermann	
8.1	Einleitung	399
8.2	Netzgeführte HGÜ (LCC-HGÜ)	402
8.2.1	Grundlegende Funktionsweise	402
8.2.2	Ausführungsformen	410
8.2.3	Anforderungen an die Netzanschlusspunkte	414
8.2.4	Regelung eines LCC-HGÜ-Systems	416
8.2.5	Eckdaten LCC-HGÜ-Technologie	435
8.3	Selbstgeführte HGÜ (VSC- HGÜ)	435
8.3.1	PWM-VSC und Grundprinzip des Vierquadrantenbetriebs	438
8.3.2	MMC-VSC-HGÜ	441
8.3.3	Eckdaten und Ausführungsoptionen	442
8.4	HGÜ-Systeme	445
8.4.1	Ausführung des DC-Kreises	445
8.4.2	Beispiele realisierter Projekte	448
8.4.3	Stationsverluste der unterschiedlichen Technologien	450
8.4.4	Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit	451
8.5	Beispiele für Hochleistungsübertragung im Modell	452
8.6	Umweltbeeinflussung von HGÜ	462
8.6.1	Geräuschemission	463
8.6.2	Feldemission	464

8.7	HGÜ Netze	466
8.7.1	Technologien	466
8.7.2	Betrieb	466
	Literatur	475
9	Betriebsplanung	479
	Valtenin Crastan	
9.1	Mikroökonomische Grundlagen	479
9.2	Betrieboptimierung eines vertikal integrierten Energieversorgungsunternehmens	481
9.2.1	Netzberechnung	482
9.2.2	Netzberechnung mit Spannungseinkopplung	485
9.2.3	Optimaler Leistungsfluß (OPF)	487
9.2.4	Optimale Speicherbewirtschaftung	497
9.2.5	Einsatzplan der thermischen Gruppen	500
9.2.6	Die langfristige Optimierung	502
9.2.7	Die mittelfristige Optimierung	504
9.2.8	Die Kurzzeit-Optimierung	504
9.2.9	Momentane Optimierung	505
9.2.10	Optimierung bei Einsatz von Wind- und Solarenergie	505
9.2.11	Tarifierung	506
9.3	Betrieboptimierung bei Wettbewerb	507
9.3.1	Mathematische Grundlagen	507
9.3.2	Pool-Lösung und ausgehandelter Netzzugang	511
9.3.3	Betrieboptimierung bei ausgehandeltem Netzzugang	512
9.4	Neue und zukünftige Aspekte der Betriebsoptimierung	516
	Literatur	518
10	Leit- und Informationstechnik	519
	Rolf Apel	
10.1	Überblick	519
10.1.1	Aufgabe der Leit- und Informationstechnik	519
10.1.2	Historie	520
10.1.3	Ausblick	521
10.2	Feld- und Stationsleittechnik	522
10.2.1	Plattform und Systemarchitektur	522
10.2.2	Prozess- und Feldebene	524
10.2.3	Netzschutz	525
10.2.4	Stationsebene	528
10.2.5	Anwendung	529
10.3	Phasenwinkelmessungen	540
10.3.1	Messgeräte	541
10.3.2	Anwendungen	541

10.4	Fernwirktechnik	541
10.4.1	Infrastruktur	541
10.4.2	Protokolle	542
10.5	Zählerfernauslesung	543
10.5.1	Der intelligente Zähler	543
10.5.2	Zählerfernauslesung und Verteilnetzautomatisierung	544
10.5.3	Das IKT-Gateway als Schnittstelle zur Gebäude- und Hausautomatisierung	544
10.6	Netzleittechnik	545
10.6.1	Marktumfeld, Anforderungen an die Netzleittechnik	545
10.6.2	Systemkonzeption für Netzleitsysteme	547
10.6.3	Systemarchitektur	549
10.6.4	Domänen- und Funktionsüberblick	552
10.6.5	Bedien- und Anwendungsfunktionen	576
10.6.6	Systemkonfigurationen	589
10.6.7	Systemübergreifender Workflow	591
10.6.8	Systemintegrationskonzepte	593
10.6.9	Ausblick	593
10.7	Smart Grid	595
10.7.1	Die neuen Anforderungen	595
10.7.2	Fernauslesbare Zähler	596
10.7.3	Integration erneuerbarer Energien	597
10.7.4	Die neuen Prinzipien bei der Netzregelung	598
10.7.5	Das Elektroauto	600
10.7.6	Microgrids	600
Anhang A Dynamik und Regelungstechnik		603
Stichwortverzeichnis		625