

Valentin Crastan  
Dirk Westermann

# Elektrische Energieversorgung 3

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

*2. Auflage*

---

## 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 Ausichten. 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

<b>1</b>	<b>Modellierung und Simulation</b> .....	<b>3</b>
	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
<b>2</b>	<b>Drehzahl- und Frequenzleistungsregelung</b> .....	<b>53</b>
	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
<b>3</b>	<b>Synchronisierung und Polradwinkelstabilität . . . . .</b>	<b>71</b>
	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 unregelmäßig 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
<b>4</b>	<b>Spannungsregelung und Spannungsstabilität . . . . .</b>	<b>159</b>
	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	Seriekompensation . . . . .	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

<b>5</b>	<b>Versorgungsqualität</b>	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

<b>6</b>	<b>Netzplanung und Netzberechnung</b> .....	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
<b>7</b>	<b>Flexible AC Transmission Systems</b> .....	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
<b>8</b>	<b>Hochspannungsgleichstromübertragung . . . . .</b>	<b>399</b>
	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
<b>9</b>	<b>Betriebsplanung</b> . . . . .	<b>479</b>
	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
<b>10</b>	<b>Leit- und Informationstechnik</b> . . . . .	<b>519</b>
	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
	<b>Anhang A  Dynamik und Regelungstechnik . . . . .</b>	<b>603</b>
	<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>625</b>

---

**Teil I**

**Regelung, Stabilität des Energieversorgungsnetzes**

Valtenin Crastan

Die Analyse des dynamischen Verhaltens und der Stabilität des Energieversorgungsnetzes setzt eine wirklichkeitsgetreue Modellierung aller Netzelemente einschließlich Regelkomponenten voraus. Sowohl zur Lösung spezieller Aufgaben wie für das Verständnis der sich abspielenden Vorgänge sind aber zweckmäßige Vereinfachungen sinnvoll.

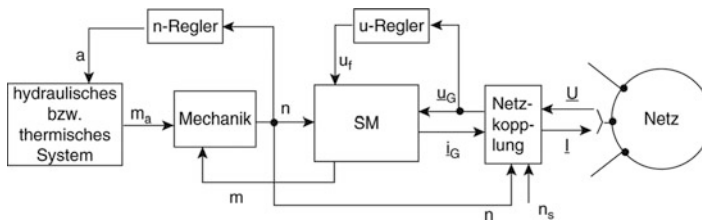
Die in den folgenden [Abschn. 1.1](#) bis [1.3](#) behandelten Modelle sind für Vorgänge mit Frequenzen eindeutig unter 50 Hz geeignet (enthalten also z. B. keine transformatorischen Terme (t.S.) der Synchronmaschine, und das Netz ist stationär dargestellt). Sie dienen in erster Linie der Analyse des Spannungs- und Lastverhaltens sowie der elektromechanischen Pendelungen und zur Stabilitätsanalyse. Für eine weitergehende Modellierung zwecks Simulation sehr großer Netze oder Berücksichtigung der elektromagnetischen Ausgleichsvorgänge s. [Abschn. 1.4](#) und [Anhang A.5](#).

Das Netz besteht aus Leitungen und Transformatoren (größtenteils *passiven Netzzweigen*), aus *Kraftwerken* und *anderen Einspeiseelementen*, die an bestimmten Knotenpunkten (Einspeiseknoten) angeschlossen sind, sowie aus *aktiven* und *passiven Lasten*. Ein Knoten oder Netzzweig wird als *aktiv* bezeichnet, wenn er mit dynamischen Komponenten beschaltet ist. Leistungsübergabeknoten von und zu anderen Netzen können wie Lastknoten behandelt werden.

Wichtigstes dynamisches Element ist das Kraftwerk, dessen Blockschema in [Abb. 1.1](#) dargestellt ist. Die Größen des Kraftwerks sind in p. u. ausgedrückt, insbesondere der Strom  $i_G$  und die Spannung  $u_G$  in lokaler Parkzeiger- bzw. Parkvektorform (s. Band 1, Kap. 2). Als Bezugsgrößen dienen die Generatorspannung  $U_r$  und die Generatorleistung  $S_r$ . Der Block „Netzkopplung“ berechnet den Polradwinkel  $\delta$  (für die exakte

---

V. Crastan (✉)  
Evilard, Schweiz  
e-mail: [valentin.crastan@bluewin.ch](mailto:valentin.crastan@bluewin.ch)



**Abb. 1.1** Gesamtmodell des netzgekoppelten Kraftwerks

Def. und Herleitung s. [Kap. 3](#)), wandelt die elektrischen Größen von lokalen Park- in Netzkoordinaten um und berücksichtigt die Bezugsspannung  $U_n$  der Netzberechnung:

$$T_r \frac{d\delta}{dt} = n - n_s \quad T = \begin{vmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{vmatrix}$$

$$\vec{u}_G = T \vec{u}, \quad \text{mit} \quad \underline{u} = \frac{U}{U_n} \quad (1.1)$$

$$\vec{i} = T^t \vec{i}_G, \quad \text{---} \succ \quad \underline{I} = \underline{i} \frac{S_r}{3U_n}$$

Die Richtung von Spannung und Strom im Blockdiagramm kann für Vorgänge mit Frequenz  $\ll 50$  Hz auch umgekehrt werden, d. h. das Kraftwerk mit Spannung als Ausgangs- und Strom als Eingangsgröße beschrieben werden.

Die Analyse des hydraulischen bzw. thermischen Systems ist in Band 2, in den Abschn. 4.5 und 5.1 zu finden. Drehzahlregelung und Spannungsregelung einschl. Pendeldämpfung sowie mögliche Torsionsschwingungen werden näher in den nachfolgenden [Kap. 2, 3](#) und [4](#) besprochen. In den folgenden [Abschn. 1.1](#) bis [1.3](#) werden unter den erwähnten Voraussetzungen die wichtigsten Modelle der elektrischen Hauptelemente beschrieben: Generator, Last und Netz. Für den mechanischen Antrieb (Turbine usw.) und Drehzahländerung, s. Band 2, [Kap. 4](#) und [5](#), [[27](#)].

## 1.1 Generatormodelle und sonstige Einspeisungen

Die Grundlagen der Synchronmaschine (SM) sind in Band 1, [[4](#)] dargelegt worden. Das zu wählende Modell hängt von der Aufgabenstellung und insbesondere von der Frequenz der zu untersuchenden dynamischen Vorgängen ab.

Ein allgemeines Modell 2. Ordnung mit transformatorischen Spannungen (t.S.), das auch Vorgänge im Bereich von 10 Hz und darüber korrekt erfasst, ist in Band 1, [Abschn. 6.7](#), als Zustandsraummodell ([Abb. 6.72](#)) gegeben worden; die dazu notwendigen Parameter können entsprechend [Abschn. 6.7.3](#) bestimmt werden.

Zur Analyse elektromechanischer Pendelungen oder der Spannungsstabilität ist i. d. R. die Berücksichtigung der t.S. nicht notwendig, und der Generator kann dann mit drei

physikalisch leicht interpretierbaren Übertragungsfunktionen beschrieben werden. Im Folgenden sei vor allem dieser Ansatz näher betrachtet. Für den allgemeinen Zusammenhang zwischen der Beschreibung mit Übertragungsfunktionen und der Zustandsraumdarstellung s. auch Anhang A.

### 1.1.1 Kurzzeitmodelle der SM

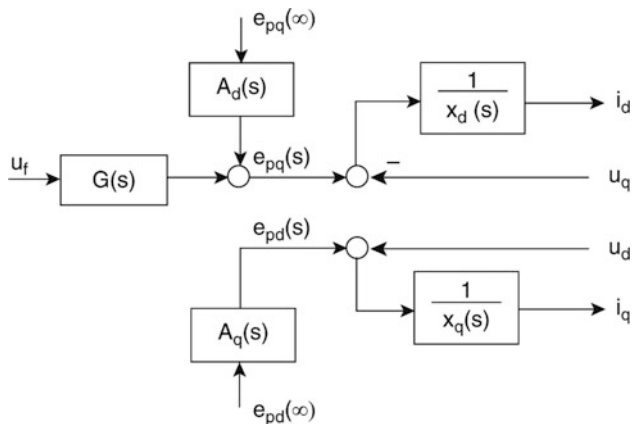
Der Kurzzeitbereich umfasst Vorgänge, die sich im Laufe einiger Sekunden abspielen. Die Drehzahl kann dann (zur Beschreibung der SM) als konstant angenommen werden. Die Synchronmaschine wird bei Vernachlässigung von Statorwiderstand, transformatorischen Spannungen und Drehzahleinfluss ( $n = 1$ ) *elektrisch* durch das in **Abb. 1.2** gegebene Modell (Grundlagen in Band 1, Abschn. 6.4) dargestellt. Die Übertragungsfunktionen der SM sind (Modell 2. Ordnung):

$$\begin{aligned}
 x_d(s) &= x_d \frac{(1 + sT'_d)(1 + sT''_d)}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})}, & x_q(s) &= x_q \frac{(1 + sT'_q)(1 + sT''_q)}{(1 + sT'_{q0})(1 + sT''_{q0})} \\
 G(s) &= \frac{(1 + sT_{\sigma D})}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})}.
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$

Die Inverse der Reaktanzen lassen sich auch schreiben

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{x_d(s)} &= \left( \frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \frac{sT''_d}{1 + sT''_d} + \left( \frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{sT'_d}{1 + sT'_d} + \frac{1}{x_d} \\
 \frac{1}{x_q(s)} &= \left( \frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x'_q} \right) \frac{sT''_q}{1 + sT''_q} + \left( \frac{1}{x'_q} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{sT'_q}{1 + sT'_q} + \frac{1}{x_q}.
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

**Abb. 1.2** Modell der Synchronmaschine



Die *Anfangs-Polradspannungen*  $e_{pd}(s = \infty)$  und  $e_{pq}(s = \infty)$  stellen punktuelle Werte unmittelbar nach der Störung dar, erfassen also die Anfangsbedingungen. Für die Funktion  $A_d(s)$  der Längsachse folgt aus Band 1, Abschn. 6.4.2, Gl. (6.56),

$$A_d(s) = \frac{sT'_{d0}T''_{d0}(1 + sT\sigma)}{T_\sigma(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})}, \quad \text{mit} \quad T_\sigma = \frac{\psi_{f0}T_{\sigma D}R_D + \psi_{D0}T_{\sigma f}R_f}{\psi_{f0}R_D + \psi_{D0}R_f}. \quad (1.4)$$

Der Wert von  $A_q(s)$  wird in formal identischer Weise mit Ersatz der Indizes d, f, D durch q, Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub> erhalten (s. dazu auch Band 1, Abschn. 6.7.3).

Das in [Abb. 1.2](#) dargestellte Modell erfasst sowohl die transienten als auch die subtransienten Vorgänge. Obwohl die subtransienten Vorgänge im Sekundenbereich, was die rein elektrische Wirkung betrifft, vernachlässigt werden könnten, sind sie für die korrekte Erfassung des Dämpfungsmoments notwendig (s. dazu Band 1, Abschn. 6.6.7.2). Die Mechanikgleichungen lauten dann (mit  $n = 1$ )

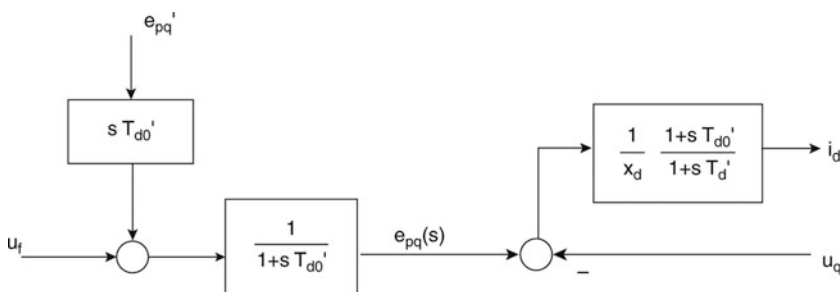
$$\begin{aligned} m &= u_d i_d + u_q i_q \\ m_a - m &= T_m \frac{dn}{dt}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

[Abbildung 1.2](#) zusammen mit [Gl. \(1.5\)](#) ergeben die für die Untersuchung von Vorgängen im Kurzzeitbereich exakteste Darstellung der SM. Dazu äquivalente Beschreibungen im Zustandsraum finden sich in Band 1, Abschn. 6.7.

Eine in der Literatur oft verwendete Näherung besteht darin, die subtransienten Vorgänge (bzw. Zeitkonstanten) zu vernachlässigen und die elektrischen Bremsmomente getrennt zu berechnen. Die Anfangs-Polradspannungen werden dann zu den *transienten Polradspannungen*  $e'_{pd}$  und  $e'_{pq}$ , und die Übertragungsfunktionen vereinfachen sich zu

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{1}{1 + sT'_{d0}}, & x_d(s) &= x_d \frac{1 + sT'_d}{1 + sT'_{d0}}, & x_q(s) &= x_q \frac{1 + sT'_q}{1 + sT'_{q0}} \\ A_d(s) &= \frac{sT'_{d0}}{1 + sT'_{d0}}, & A_q(s) &= \frac{sT'_{q0}}{1 + sT'_{q0}}, \end{aligned} \quad (1.6)$$

und die Längsachse der SM kann durch [Abb. 1.3](#) modelliert werden.



**Abb. 1.3** Modell der Längsachse der Synchronmaschine ohne Subtransienten

Der Längsoperator kann auch geschrieben werden

$$x_d(s) = x_d \left( 1 - \frac{T'_d}{T'_{d0}} \right) G(s) + x_d \frac{T'_d}{T'_{d0}} = (x_d - x'_d)G(s) + x'_d, \quad (1.7)$$

zur Genauigkeit der Näherung s. Band 1, Abschn. 6.4.2, insbesondere Gl. (6.67).

Mit Gl. (1.7) lässt sich Abb. 1.3 durch Abb. 1.4 ersetzen. An Stelle der Polradspannung  $e_{pq}$  treten in Abb. 1.4 die Flussverkettung  $\psi_f$  der Erregerwicklung und der Erregerstrom  $i_f$  in Erscheinung. Dies lässt sich bei Vernachlässigung der Dämpferwirkungen mit den drei Gleichungen (Laplace-Carson)

$$\begin{aligned} u_q &= \psi_d = i_f - x_d i_d \\ \psi_f &= (1 + \sigma_f) i_f - x_{hd} i_d \\ u_f &= i_f + s T_{hf} \psi_f - s T_{hf} \psi_{f0} \end{aligned} \quad (1.8)$$

aus dem Gleichungssystem (6.141), Band 1, auch direkt nachweisen:

Durch Elimination von  $i_f$  erhält man

$$\begin{aligned} u_q &= \frac{\psi_f}{1 + \sigma_f} - \left( x_d - \frac{x_{hd}}{1 + \sigma_f} \right) i_d \\ u_f + s T_{hf} \psi_{f0} &= \frac{\psi_f}{1 + \sigma_f} [1 + s T_{hf} (1 + \sigma_f)] + \frac{x_{hd}}{1 + \sigma_f} i_d, \end{aligned} \quad (1.9)$$

wobei im Rahmen der erwähnten Approximation

$$\frac{x_{hd}}{1 + \sigma_f} = x_d - x'_d, \quad T_{hf} (1 + \sigma_f) = T'_{d0}, \quad T_{hf} \psi_{f0} = T'_{d0} e'_{pq}. \quad (1.10)$$

Die der Flussverkettung  $\psi_f / (1 + \sigma_f)$  entsprechende EMK  $e_q$  ist nach einer Störung des Gleichgewichts im ersten Augenblick ( $s \rightarrow \infty$ ) gleich zu  $e'_{pq}$ .

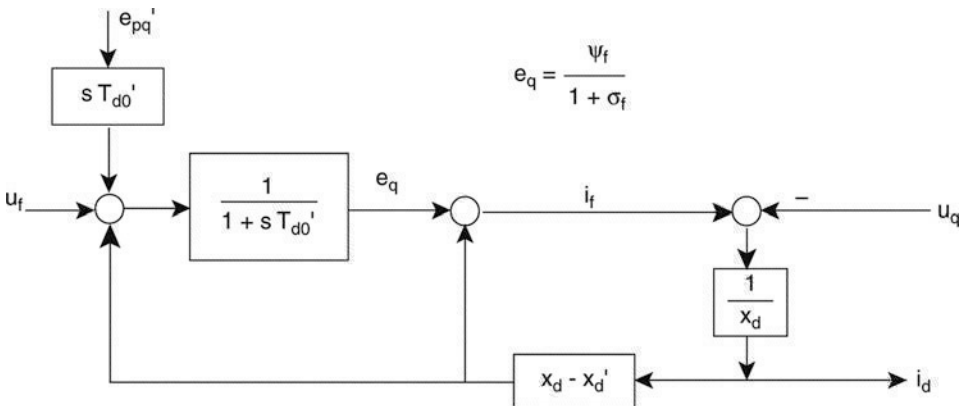
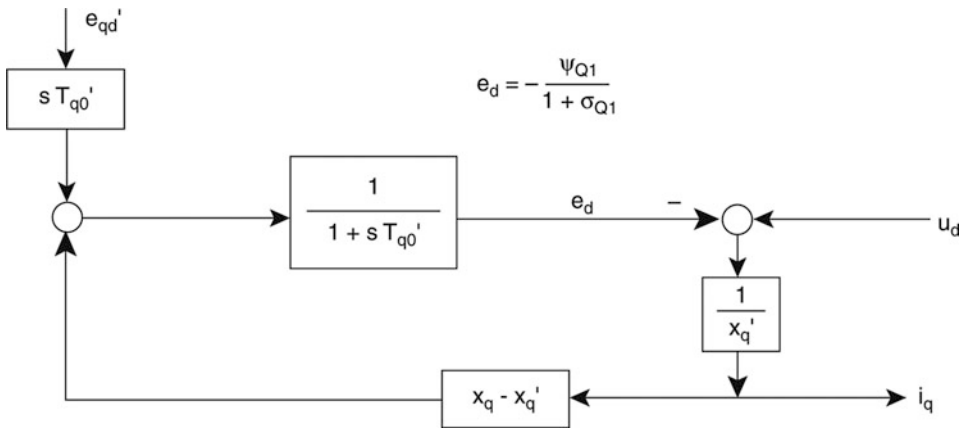


Abb. 1.4 Modell der Querachse der Synchronmaschine



**Abb. 1.5** Modell der Querachse der Synchronmaschine

Analog dazu ergeben sich für die q-Achse  $e_d = -\psi_{Q1}/(1 + \sigma_{Q1})$  und das Schema in [Abb. 1.5](#), wobei  $e_d (s \rightarrow \infty) = e'_{pd}$ . Im Fall der SM mit lamelliertem Rotor (Band 1, Abschn. 6.4.2) sind  $x'_q = x_q$  und  $e'_{pd} = 0$ , womit auch  $e_d = 0$ .

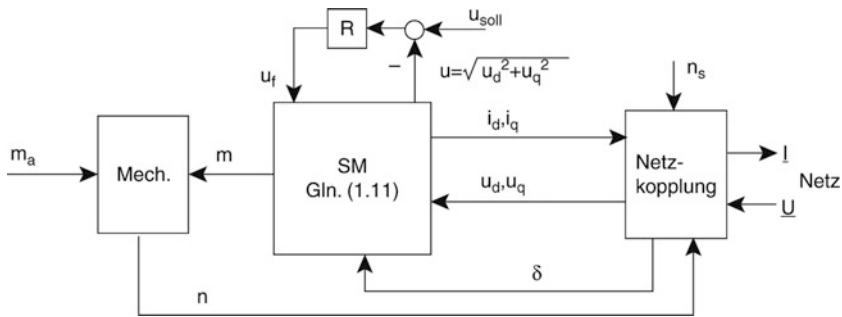
Entsprechend den [Abb. 1.4](#) und 1.5 reduziert sich das Gleichungssystem (6.141) von Band 1 (SM+Mechanik), zum Folgenden:

$$\begin{aligned}
 u_d &= e_d + x'_q i_q \\
 u_q &= e_q - x'_d i_d \\
 u_f &= T'_{d0} \frac{de_q}{dt} + e_q + (x_d - x'_d) i_d \\
 0 &= T'_{q0} \frac{de_d}{dt} + e_d - (x_q - x'_q) i_q \\
 m &= m_s(\delta, e_d, e_q) + K_d \frac{d\delta}{dt} \\
 m_a - m &= T_m \frac{dn}{dt},
 \end{aligned} \tag{1.11}$$

worin  $n$  lediglich zur Bildung des Polradwinkels benötigt wird und das elektrische Moment  $m$  nicht mehr durch die erste der [Gl. \(1.5\)](#) gegeben, sondern durch einen in [Kap. 3](#) abgeleiteten Ausdruck zu ersetzen ist. Die SM (einschl. Mechanik und Netzkopplung) wird durch die vier Zustandsgrößen  $n$ ,  $\delta$ ,  $e_q$  und  $e_d$  beschrieben. Ein Blackbox-Schema mit  $i$  als Ausgangsgröße zeigt [Abb. 1.6](#).

Im Kurzzeitbereich muss i. d. R die Änderung des Antriebsmoments  $m_a$  (Primärregelung) sowie jene der vom Spannungsregler kontrollierten Steuervariablen  $u_f$  mit Dynamik und Begrenzungen berücksichtigt werden.

Während einer kurzen Zeit nach der Störung (Größenordnung 0,1 s) können  $e_d$  und  $e_q$  wegen der Trägheit der Hauptflussverkettung (Zeitkonstanten  $T'_{d0}$  und  $T'_{q0}$  groß) als



**Abb. 1.6** Blackbox-Schema für den Kurzzeitbereich

konstant und gleich  $e'_{pd}$  bzw.  $e'_{pq}$  angenommen werden, wodurch die dritte und vierte der [Gl. \(1.11\)](#) entfallen (sogenannte „transiente“ Näherung, s. [Kap. 3](#)). Ebenso kann das Antriebsmoment  $m_a$  als konstant betrachtet werden.

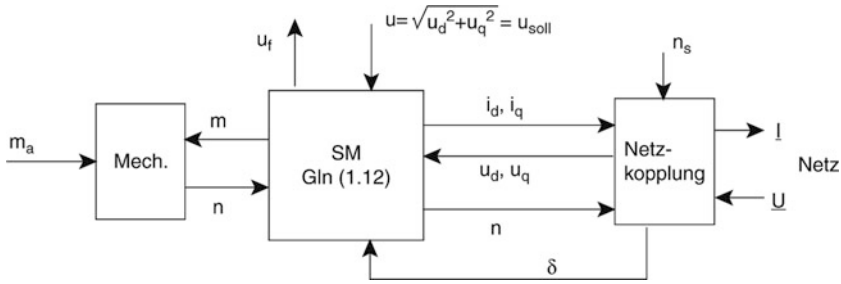
### 1.1.2 Langzeitmodell der SM

Der Langzeitbereich betrifft Vorgänge, die minutenlang dauern. Der Drehzahleinfluss muss berücksichtigt werden, die subtransienten und meist auch die transienten Vorgänge können aber als abgeklungen gelten, die SM also stationär mit vorgegebenem Spannungsmodul (entsprechend dem Sollwert) modelliert werden. Die Gleichungen der SM sind

$$\begin{aligned}
 u_d &= nx_q i_q \\
 u_q &= n(u_f - x_d i_d) \\
 e_d &= u_d - nx'_q i_q \\
 e_q &= u_q + nx'_d i_d \\
 m &= m_s(\delta, e_d, e_q) + K_d \frac{d\delta}{dt} \\
 m_a - m &= T_m \frac{dn}{dt}.
 \end{aligned} \tag{1.12}$$

Das entsprechende Blackbox-Schema zeigt [Abb. 1.7](#). Erreicht die Erregerspannung ihre Grenzen, wird  $u_f$  konstant gehalten und somit  $u_q$  freigegeben. Der Spannungswert  $u = u_{soll}$  kann dann nicht mehr eingehalten werden.

Da im Langzeitbereich  $i_f = u_f$ , übersteigt der Erregerstrom für  $u_f = u_{fmax}$  (meist etwa 4 p. u.) den thermisch zulässigen Wert (meist 2–3 p. u.). Demzufolge muss entweder  $u_{fmax}$  in Abhängigkeit von der Dauer der Überlast zurückgenommen oder eine entsprechende Begrenzungsschaltung für den Erregerstrom  $i_f$  vorgesehen werden (s. dazu auch [Abschn. 4.1.2](#)).



**Abb. 1.7** Blackbox-Schema für den Langzeitbereich

Das Antriebsmoment  $m_a$  ist im Langzeitbereich nicht konstant und eine Modellierung von Primär- und Sekundärregelung deshalb notwendig (Kap. 2).

### 1.1.3 Sonstige Einspeisungen

Neben den Kraftwerksknoten sind weitere Einspeiseknoten im Netz dynamisch aktiv, nämlich Knoten mit geregelter Blindleistungseinspeisung (z. B. SVC, STATCOM) sowie weitere FACTS-Elemente und Transformatoren mit Längs- und/oder Querregelung (dynamisch aktive Zweige). Im Folgenden werden letztere sowie SVC und STATCOM-Modelle kurz besprochen. Näheres und Weiteres ist in den Abschn. 4.2 und 4.3 und über UPFC im Abschn. 9.22 und Kap. 7 zu finden.

#### 1.1.3.1 Transformatoren mit Längsregelung

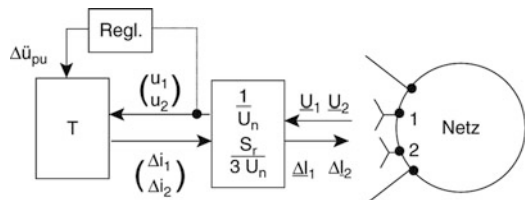
Entsprechend der p. u. Darstellung des Transformators in Band 1, Abschn. 4.8.2, gilt

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \underline{\Delta i}_1 \\ \underline{\Delta i}_2 \end{pmatrix} \quad (1.13)$$

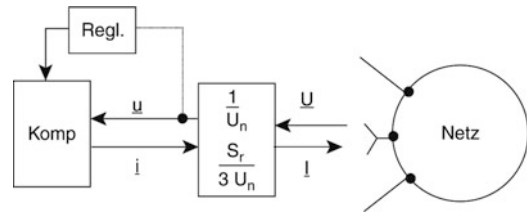
mit 
$$\begin{pmatrix} \underline{\Delta i}_1 \\ \underline{\Delta i}_2 \end{pmatrix} = \Delta \ddot{u}_{pu} \begin{vmatrix} 0 & y_{12} \\ y_{21} & (2 + \Delta \ddot{u}_{pu})_{y_{22}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}. \quad (1.14)$$

Dem normalen Transformator mit fester Nennübersetzung überlagert sich das Modell in Abb. 1.8. Für die Regelung s. Abschn. 4.2. Mit den bei Netzberechnungen üblichen

**Abb. 1.8** Modell des geregelten Transformators



**Abb. 1.9** Modell der geregelten Kompensationsanlage



Stromvorzeichen und Vernachlässigung des Magnetisierungsstromes ist  $\underline{y}_{11} = \underline{y}_{22} = 1/\underline{z}$  und  $\underline{y}_{12} = \underline{y}_{21} = -1/\underline{z}$ .

### 1.1.3.2 Transformatoren mit Schräg- oder Querregelung

Wie in Band 1, Abschn. 4.9.4.2, dargelegt, besteht der einzige Unterschied zur Längsregelung formell darin, dass die Übersetzungsabweichung komplex ist. Das Schema [Abb. 1.8](#) ist weiterhin gültig. Für die Stromeinspeisung gilt an Stelle von [Gl. \(1.14\)](#) bei Vernachlässigung des Magnetisierungsstromes folgender Zusammenhang

$$\begin{pmatrix} \underline{\Delta i}_1 \\ \underline{\Delta i}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\underline{z}} \begin{vmatrix} 0 & -\underline{\Delta u}_{pu} \\ -\underline{\Delta \ddot{u}}_{pu} & (\ddot{u}_{0pu}(\underline{\Delta \ddot{u}}_{pu} + \underline{\Delta \ddot{u}}_{pu}^*) + \underline{\Delta \ddot{u}}_{pu}^2) \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{u}_1 \\ \underline{u}_2 \end{pmatrix}. \quad (1.15)$$

Mit der Schrägregelung wird auch die Wirkleistungsübertragung beeinflusst. Dazu Näheres in Band 1, Abschn. 4.9.4.2, und in Zusammenhang mit FACTS in [Kap. 7](#).

### 1.1.3.3 Geregelte Kompensationsanlagen

Entsprechend [Abschn. 4.3](#) ergibt sich für die Parallelkompensation mittels SVC und STATCOM das Modell in [Abb. 1.9](#) mit den Gleichungen

$$\begin{aligned} \underline{i} &= \underline{y}\underline{u} \quad \text{mit } y \text{ steuerbar, SVC} \\ \underline{i} &= \underline{y}_T(\underline{u} - \underline{e}) \quad \text{mit } e \text{ steuerbar, STATCOM.} \end{aligned} \quad (1.16)$$

### 1.1.3.4 Asynchronmaschinen

Dazu s. [Abschn. 1.2.2](#) und Band 1, Abschn. 7.1.

## 1.2 Lastmodelle

Lasten können durch eine vorgängige Analyse der Verbrauchertypen summarisch dargestellt werden. Die summarische Darstellung setzt sich aus einem *statischen* und einem *dynamischen* Anteil zusammen.

### 1.2.1 Statische Last

Der statische Anteil kann, was die *Spannungs- und Frequenzabhängigkeit* betrifft, als Exponentiallast beschrieben werden (Band 1, Gl. 7.41)

$$\begin{aligned} P &= P_0 u^\alpha f^p \\ Q &= Q_0 u^\beta f^q. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Im Kurzzeitbereich wird die Frequenzabhängigkeit i. d. R. vernachlässigt, und es folgt das nichtlineare Modell

$$\underline{I} = \frac{P_0 u^\alpha - j Q_0 u^\beta}{3\underline{U}^*}. \quad (1.18)$$

Kann die Last als Impedanzlast (bzw. Admittanzlast) dargestellt werden, was dem Spezialfall  $\alpha = \beta = 2$  entspricht, folgt aus (1.18)

$$\underline{I} = \frac{S_0^* u^2}{3\underline{U}^*} = \underline{Y} \underline{U}, \quad \text{mit} \quad \underline{Y} = \frac{S_0^*}{U_{\Delta n}^2}. \quad (1.19)$$

Falls  $\alpha$  und  $\beta$  zwischen 0 und 2 liegen (was meist der Fall ist), kann die Last auch als Summe aus Konstantadmittanz-, Konstantstrom- und Konstantleistungsanteil ausgedrückt werden, also die Form

$$\underline{S} = \underline{S}_0 + 3\underline{U} \underline{I}_0^* + 3\underline{Y}^* U^2$$

annehmen. Der entsprechende Laststrom ist

$$\underline{I} = \frac{\underline{S}_0^*}{3\underline{U}^*} + \underline{I}_0 + \underline{Y} \underline{U}. \quad (1.20)$$

Durch Linearisierung der Spannungsabhängigkeit des Konstantleistungsanteils kann schließlich dieser Strom angenähert auch

$$\underline{I} = \underline{Y}_{\ddot{a}q} \underline{U} + \underline{I}_{0\ddot{a}q} \quad (1.21)$$

geschrieben werden (Näheres und Anwendung in [Abschn. 3.5.5](#)).

*Kleine Änderungen* Für *kleine Änderungen* kann die [Gl. \(1.17\)](#) linearisiert werden, und es folgt

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{P} &= \alpha \frac{\Delta U}{U} + p \frac{\Delta f}{f} \\ \frac{\Delta Q}{Q} &= \beta \frac{\Delta U}{U} + q \frac{\Delta f}{f}. \end{aligned} \quad (1.22)$$