

# Inhalt

## Teil I Regelung Stabilität des Energieversorgungsnetzes

<b>1 Modellierung und Simulation (Prof. Dr.-Ing. Valentin Crastan) . . . . .</b>	<b>3</b>
1.1 Generatormodelle und sonstige Einspeisungen . . . . .	4
1.1.1 Kurzzeitmodelle der SM . . . . .	4
1.1.2 Langzeitmodell der SM . . . . .	9
1.1.3 Sonstige Einspeisungen . . . . .	10
1.2 Lastmodelle . . . . .	11
1.2.1 Statische Last . . . . .	11
1.2.2 Dynamische Lasten . . . . .	13
1.3 Netzdarstellung . . . . .	14
1.4 Simulationsprogramme (Dr.-Ing. Markus Pöller) . . . . .	15
1.4.1 Modellierung des elektrischen Netzes . . . . .	18
1.4.2 Allgemeines Modell zur Analyse von Stabilitätsproblemen . . . . .	24
1.4.3 Numerische Integration . . . . .	25
1.4.4 Genauigkeit und Stabilität numerischer Integrationsverfahren . . . . .	29
1.4.5 Simulationsalgorithmen . . . . .	36
1.4.6 Behandlung von Nichtlinearitäten . . . . .	39
1.4.7 Dynamische Modellierung . . . . .	41
1.4.8 Initialisierung (Berechnung von Anfangsbedingungen) . . . . .	43
Literatur . . . . .	47
<b>2 Drehzahl- und Frequenzleistungsregelung (Prof. Dr.-Ing. Valentin Crastan) . . . . .</b>	<b>49</b>
2.1 Primärregelung . . . . .	50
2.1.1 Wasserturbinen . . . . .	52
2.1.2 Dampfkraftwerk . . . . .	53
2.1.3 Gasturbinen- und Kombikraftwerke . . . . .	56

2.2	Frequenzregelung im Inselnetz . . . . .	60
2.2.1	Primärregelung . . . . .	60
2.2.2	Sekundärregelung . . . . .	62
2.3	Frequenzleistungsregelung im Verbund. . . . .	63
	Literatur . . . . .	65
<b>3</b>	<b>Synchronisierung und Polradwinkelstabilität</b>	
	(Prof. Dr.-Ing. Valentin Crastan) . . . . .	67
3.1	Synchrongruppe am starren Netz . . . . .	67
3.1.1	Torsionsschwingungen . . . . .	67
3.1.2	Störungen des Gleichgewichts . . . . .	70
3.1.3	Wirkung der Netzreaktanz . . . . .	72
3.1.4	Statische Stabilität der ungeregelten SM . . . . .	74
3.1.5	Statische Stabilität mit Spannungsregelung . . . . .	75
3.1.6	Verhalten im Kurzzeitbereich . . . . .	78
3.2	Dynamik der kleinen Störungen . . . . .	78
3.2.1	Wirkung der Drehzahlregelung . . . . .	82
3.2.2	Wirkung der Spannungsregelung . . . . .	82
3.2.3	Wirkung des Pendeldämpfungsgeräts . . . . .	84
3.3	Verhalten bei großen Störungen . . . . .	85
3.3.1	Transiente Analyse . . . . .	89
3.3.2	Stabilisierungsmaßnahmen . . . . .	93
3.4	Modellierung mit subsynchronen Schwingungen . . . . .	96
3.4.1	Synchronmaschine . . . . .	96
3.4.2	Netzverbindung . . . . .	97
3.4.3	Polar-dq-Transformation . . . . .	98
3.4.4	Mechanik . . . . .	98
3.4.5	Hydraulisches oder thermisches System und Drehzahlregelung . . . . .	99
3.5	Transiente Analyse von Mehrmaschinensystemen . . . . .	99
3.5.1	Elektrisch statische Darstellung der Generatoren . . . . .	100
3.5.2	Netzdarstellung . . . . .	101
3.5.3	Die elektrische Leistung . . . . .	102
3.5.4	Systeme mit $m > 3$ . . . . .	108
3.5.5	Spannungsunabhängigkeit der Last . . . . .	109
3.5.6	Stabilität im Großen . . . . .	110
3.5.7	Ordnungsreduktion . . . . .	111
3.6	Lineare Analyse von Mehrmaschinensystemen . . . . .	116
3.6.1	Berücksichtigung von Spannung und Blindleistung . . . . .	119
3.6.2	Netzreduktion . . . . .	120
3.6.3	Ordnungsreduktion der Generatorübertragungs- funktionen . . . . .	120
3.7	Polradwinkelstabilität und ihre Analyse in der Praxis des Netzbetriebs (Prof. Dr.-Ing. Harald Weber) . . . . .	121
3.7.1	Entstehungsursachen von Polradwinkelpendelungen . . . . .	123
3.7.2	Einfluss von Leistungstransit auf die Polradwinkelstabilität . . . . .	128

3.7.3 Einfluss der Verbraucherstruktur auf die Polradwinkelstabilität . . . . .	131
3.7.4 Identifizierung destabilisierender Spannungsregler in Mehrmaschinensystemen . . . . .	133
3.8 Praktische Untersuchungen zur Polradwinkelstabilität: Anschluss des türkischen Netzes an das europäische ENTSO-E-System (Prof. Dr.-Ing. Harald Weber) . . . . .	137
3.8.1 Durchgeführte Untersuchungen . . . . .	138
3.8.2 Ermittlung der Stabilitätsgrenze . . . . .	141
3.8.3 Untersuchung des Einflusses der Wasserkraftwerke . . . . .	142
3.8.4 Untersuchung des Einflusses der Pendeldämpfungsgeräte . . . . .	145
3.8.5 Untersuchung des Einflusses von Static Var Compensators (SVCs) und STATCOMs . . . . .	146
3.8.6 Einbau eines Bremswiderstands . . . . .	150
3.8.7 Dämpfungsverhalten des Gesamtsystems nach Anschluss am 18. September 2010 . . . . .	152
Literatur . . . . .	153
<b>4 Spannungsregelung und Spannungsstabilität</b> (Prof. Dr.-Ing. Valentin Crastan) . . . . .	155
4.1 Erregersysteme und Spannungsregelung der SM . . . . .	156
4.1.1 Erregersysteme . . . . .	156
4.1.2 Spannungsregelung der Synchronmaschine . . . . .	158
4.2 Regelung von Stufentransformatoren . . . . .	168
4.2.1 Reglerauslegung . . . . .	168
4.2.2 Lastflussberechnung mit Regeltransformator . . . . .	170
4.3 Geregelte Kompensationsanlagen . . . . .	171
4.3.1 Parallelkompensation mit SVC . . . . .	172
4.3.2 Statische Konverter (STATCOM) . . . . .	174
4.3.3 Seriekompensation . . . . .	175
4.4 Statische Spannungsstabilität der SM . . . . .	177
4.4.1 (u, p)-Kennlinien bei konstantem Leistungsfaktor . . . . .	179
4.4.2 (u, q)-Kennlinien bei vorgegebener Wirklast . . . . .	182
4.4.3 Darstellung mit der Generatorblindleistung . . . . .	185
4.5 Statische Spannungsstabilität im vermaschten Netz . . . . .	189
4.6 Dynamik . . . . .	191
4.6.1 Kurzzeitanalyse . . . . .	191
4.6.2 Langzeitinstabilität . . . . .	191
Literatur . . . . .	192

## Teil II Netzplanung, Betriebsplanung und -führung

<b>5 Versorgungsqualität</b> (Dipl.-Ing. Gerhard Bartak) . . . . .	195
5.1 Einleitung, Grundbegriffe . . . . .	195
5.1.1 Elektrizitätsversorgung und Gesellschaft . . . . .	195
5.1.2 Qualitätsbegriffe im Bereich der Elektrizitätsversorgung . . . . .	195

5.1.3	Struktur der Qualitätsbereiche bei der Elektrizitätsversorgung . . . . .	196
5.1.4	Mit QoS befasste Institutionen . . . . .	198
5.1.5	Einflusskomponenten für die QoS und die Player . . . . .	199
5.2	Versorgungssicherheit SoS . . . . .	200
5.2.1	Allgemeines . . . . .	200
5.2.2	Definition . . . . .	201
5.2.3	Komponenten und deren Gewichtung . . . . .	201
5.2.4	Spezifisches Regelwerk . . . . .	202
5.3	Versorgungszuverlässigkeit CoS . . . . .	203
5.3.1	Allgemeines . . . . .	203
5.3.2	Definition . . . . .	203
5.3.3	Große Versorgungsunterbrechungen der letzten Jahre . . . . .	205
5.3.4	Wesentliche Gründe für Versorgungsunterbrechungen und deren Kosten . . . . .	206
5.3.5	Unterstützung durch den europäischen Verbundbetrieb . . . . .	207
5.3.6	Spezifisches Regelwerk . . . . .	209
5.3.7	Kenngrößen . . . . .	209
5.3.8	Monitoring und Statistik: Praxis und Probleme . . . . .	210
5.4	Spannungsqualität (PQ, VQ) . . . . .	212
5.4.1	Allgemeines . . . . .	212
5.4.2	Definition . . . . .	213
5.4.3	Bezug zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) . . . . .	214
5.4.4	Spezifisches Regelwerk . . . . .	216
5.4.5	Entwicklung der PQ-Normung . . . . .	218
5.4.6	Position der PQ-Normung im Gesamtumfeld des Regelwerks . . . . .	223
5.4.7	Mutation der EN 50160. Aktuelle Probleme und Ausblick . . . . .	224
5.4.8	Monitoring und Statistik: Praxis und Probleme . . . . .	226
5.5	Commercial quality (CQ) . . . . .	227
5.6	Entwicklung der QoS-Wahrnehmung. Rückblick und Ausblick . . . . .	228
5.7	Zusammenfassung . . . . .	229
	Literatur . . . . .	230
6	<b>Netzplanung und Netzberechnung (Dr.-Ing. Jutta Hanson)</b> . . . . .	233
6.1	Berechnungen zur Konzeptanalyse . . . . .	234
6.1.1	Lastflussberechnungen . . . . .	235
6.1.2	Kurzschlussstromberechnungen . . . . .	236
6.1.3	Überstromschutz . . . . .	237
6.1.4	Thermische Belastbarkeit von Kabeln . . . . .	239
6.1.5	Sternpunktbehandlung . . . . .	241
6.1.6	Oberschwingungen . . . . .	242
6.1.7	Dynamischer Motoranlauf . . . . .	246

6.1.8	Transiente Stabilität .....	249
6.1.9	Statische Stabilität .....	250
6.1.10	Probabilistische Zuverlässigkeit .....	253
6.1.11	Überspannungen .....	255
6.2	Netzplanung für unterschiedliche Versorgungsnetze .....	258
6.2.1	Öffentliches Verteilnetz .....	258
6.2.2	Industrienetz .....	260
6.2.3	Windparks .....	263
6.2.4	Netzanschluss und Eigenbedarf von Kraftwerken .....	267
Literatur .....		268
<b>7</b>	<b>Flexible AC Transmission Systems</b>	
(Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann) .....		271
7.1	Übersicht .....	271
7.2	Technologie .....	275
7.2.1	Halbleiterbauelemente .....	277
7.2.2	Pulsweitenmodulation Spannungsumrichter (PWM-VSC) .....	284
7.2.3	Kaskadierter Zweilevel Spannungsumrichter (CTL-VSC) .....	294
7.2.4	Modularer Multilevel Spannungsumrichter (MMC-VSC) .....	298
7.2.5	Hybrider Multilevel Spannungsumrichter (HML-VSC) .....	301
7.2.6	Grundstruktur Schutz- und Leitsystem .....	305
7.3	Aufbau und stationäres Betriebsverhalten .....	309
7.3.1	Shuntelemente – SVC und STATCOM .....	309
7.3.2	Serienelemente – TCSC und SSSC .....	317
7.3.3	Parallel-serielle Elemente – PAR und UPFC .....	323
7.3.4	Anwendung im Netz .....	332
7.4	Integration in die Lastflussgleichungen .....	342
7.4.1	Vorbemerkung .....	342
7.4.2	Knoteninjektionsverfahren .....	345
7.4.3	Integration in Newton Raphson Verfahren .....	349
7.5	Modellierung für die Effektivwertsimulation .....	351
7.5.1	Shuntelemente – STATCOM .....	351
7.5.2	Serienelemente – SSSC .....	355
7.5.3	Parallel-Serielle-Elemente – UPFC .....	358
7.5.4	Synthese mit den Netzgleichungen .....	363
7.6	Einsatzortbestimmung .....	366
7.6.1	Shuntelemente .....	366
7.6.2	Serienelemente .....	368
7.6.3	Betrachtung Netzdynamik .....	370
7.7	Einfluss auf die transiente Winkelstabilität .....	372
7.7.1	Allgemeine Betrachtung .....	372
7.7.2	Allgemeiner Ansatz .....	375
7.7.3	Ausführungsbeispiele .....	378

7.8	Verbesserung der Versorgungsqualität .....	381
7.8.1	Störungursachen .....	382
7.8.2	FACTS-Elemente zur Verbesserung der Versorgungsqualität .....	384
7.8.3	Vergleich .....	393
	Literatur .....	394
<b>8</b>	<b>Hochspannungsgleichstromübertragung</b>	
	(Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann) .....	397
8.1	Einleitung .....	397
8.2	Netzgeführte HGÜ (LCC-HGÜ) .....	400
8.2.1	Grundlegende Funktionsweise .....	400
8.2.2	Ausführungsformen .....	407
8.2.3	Anforderungen an die Netzzuschlusspunkte .....	413
8.2.4	Regelung eines LCC-HGÜ-Systems .....	415
8.2.5	Eckdaten LCC-HGÜ-Technologie .....	434
8.3	Selbstgeführte HGÜ (VSC-HGÜ) .....	436
8.3.1	PWM-VSC und Grundprinzip des Vierquadrantenbetriebs .....	438
8.3.2	MMC-VSC-HGÜ .....	441
8.3.3	Eckdaten VSC-HGÜ-Technologie .....	442
8.4	HGÜ-Systeme .....	443
8.4.1	Ausführung des DC-Kreises .....	443
8.4.2	Aktuell realisierte Projekte .....	445
8.4.3	Stationsverluste der unterschiedlichen Technologien .....	446
8.4.4	Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit .....	448
8.5	Beispiele für Hochleistungsübertragung im Modell .....	450
8.6	Umweltbeeinflussung von HGÜ .....	455
8.6.1	Geräuschemission .....	458
8.6.2	Feldemission .....	459
8.7	HGÜ Netze .....	461
	Literatur .....	461
<b>9</b>	<b>Betriebsplanung</b> (Prof. Dr.-Ing. Valentin Crastan) .....	465
9.1	Mikroökonomische Grundlagen .....	465
9.2	Betriebsoptimierung eines vertikal integrierten Energieversorgungsunternehmens .....	467
9.2.1	Netzberechnung .....	468
9.2.2	Netzberechnung mit Spannungseinkopplung .....	471
9.2.3	Optimaler Leistungsfluß (OPF) .....	473
9.2.4	Optimale Speicherbewirtschaftung .....	483
9.2.5	Einsatzplan der thermischen Gruppen .....	486
9.2.6	Die langfristige Optimierung .....	488
9.2.7	Die mittelfristige Optimierung .....	489
9.2.8	Die Kurzzeit-Optimierung .....	490

9.2.9	Momentane Optimierung . . . . .	491
9.2.10	Optimierung bei Einsatz von Windenergie . . . . .	492
9.2.11	Tarifierung . . . . .	493
9.3	Betriebsoptimierung bei Wettbewerb . . . . .	493
9.3.1	Mathematische Grundlagen . . . . .	493
9.3.2	Pool-Lösung und ausgehandelter Netzzugang . . . . .	498
9.3.3	Betriebsoptimierung bei ausgehandeltem Netzzugang (Prof. Dr.-Ing. Jochen Kreusel) . . . . .	498
Literatur	.....	503
<b>10</b>	<b>Leit- und Informationstechnik</b>	
(Dr.-Ing. Rolf Apel / Dipl.-Ing. Otto Vollmeier)	.....	505
10.1	Überblick . . . . .	505
10.1.1	Aufgabe der Leit- und Informationstechnik . . . . .	505
10.1.2	Historie . . . . .	506
10.1.3	Ausblick . . . . .	507
10.2	Feld- und Stationsleittechnik . . . . .	508
10.2.1	Plattform und Systemarchitektur . . . . .	508
10.2.2	Prozess- und Feldbusebene . . . . .	509
10.2.3	Netzschutz . . . . .	511
10.2.4	Stationsebene . . . . .	514
10.2.5	Anwendung . . . . .	515
10.3	Phasenwinkelmessungen . . . . .	527
10.3.1	Messgeräte . . . . .	527
10.3.2	Anwendungen . . . . .	527
10.4	Fernwirktechnik . . . . .	528
10.4.1	Infrastruktur . . . . .	528
10.4.2	Protokolle . . . . .	530
10.5	Zählerfernauslesung . . . . .	531
10.5.1	Der intelligente Zähler . . . . .	531
10.5.2	Zählerfernauslesung und Verteilnetzautomatisierung . . . . .	531
10.5.3	Das IKT-Gateway als Schnittstelle zur Gebäude- und Hausautomatisierung . . . . .	531
10.6	Netzleittechnik . . . . .	532
10.6.1	Marktumfeld, Anforderungen an die Netzleittechnik . . . . .	532
10.6.2	Systemkonzeption für Netzteilsysteme . . . . .	534
10.6.3	Systemarchitektur . . . . .	536
10.6.4	Domänen- und Funktionsüberblick . . . . .	540
10.6.5	Bedien- und Anwendungsfunktionen . . . . .	564
10.6.6	Systemkonfigurationen . . . . .	576
10.6.7	Systemübergreifender Workflow . . . . .	579
10.6.8	Systemintegrationskonzepte . . . . .	580
10.6.9	Ausblick . . . . .	581
10.7	Smart Grid . . . . .	582
10.7.1	Die neuen Anforderungen . . . . .	582
10.7.2	Fernauslesbare Zähler . . . . .	583

10.7.3 Integration erneuerbarer Energien .....	584
10.7.4 Die neuen Prinzipien bei der Netzregelung .....	586
10.7.5 Das Elektroauto .....	587
10.7.6 Microgrids .....	587
<b>Anhang A Dynamik und Regelungstechnik</b>	
(Prof. Dr.-Ing. Valentin Crastan) .....	589
A.1 Darstellung linearer Systeme .....	589
A.2 Stabilität .....	591
A.3 Kopplung linearer Teilsysteme .....	592
A.4 Modale Analyse .....	593
A.4.1 Modale Zerlegung .....	593
A.4.2 Modale Reduktion .....	594
A.5 Netzdarstellung für höhere Frequenzen .....	595
A.6 Elementare lineare Regelungstechnik .....	597
A.6.1 Vorgabe des Stellverhaltens .....	598
A.6.2 Synthese im Frequenzbereich .....	599
<b>Anhang B Berechnung der Blindleistungen im Rahmen der linearen Analyse von Mehrmaschinensystemen</b>	
(Prof. Dr.-Ing. Valentin Crastan) .....	603
B.1 Blindleistungsabgabe der Generatoren .....	603
B.2 Lineare Analyse des Mehrmaschinensystems .....	604
<b>Anhang C Optimierung</b> (Prof. Dr.-Ing. Valentin Crastan) .....	
C.1 Lagrange-Verfahren .....	607
C.2 Optimaler Leistungsfluss (OPF) .....	609
<b>Anhang D Abkürzungen</b> (Dipl.-Ing. Gerhard Bartak) .....	
<b>Sachverzeichnis</b> .....	613