

Inhalt

Teil I Regelung Stabilität des Energieversorgungsnetzes

1 Modellierung und Simulation (Prof. Dr.-Ing. Valentin Crastan)	3
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
2 Drehzahl- und Frequenzleistungsregelung (Prof. Dr.-Ing. Valentin Crastan)	49
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
3	Synchronisierung und Polradwinkelstabilität	
	(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 unregelmäßigten 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 Leistungsströmen 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

4 Spannungsregelung und Spannungsstabilität

	(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

5	Versorgungsqualität (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	Netzplanung und Netzberechnung (Dr.-Ing. Jutta Hanson)	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	Industriernetz	260
6.2.3	Windparks	263
6.2.4	Netzanschluss und Eigenbedarf von Kraftwerken	267
	Literatur	268
7	Flexible AC Transmission Systems	
	(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	Störungsursachen	382
7.8.2	FACTS-Elemente zur Verbesserung der Versorgungsqualität	384
7.8.3	Vergleich	393
	Literatur	394
8	Hochspannungsgleichstromübertragung (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 Netzanschlusspunkte	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
9	Betriebsplanung (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

10 Leit- und Informationstechnik

	(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 Netzleitsysteme	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	Fernaulesbare 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
Anhang A Dynamik und Regelungstechnik	
(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
Anhang B Berechnung der Blindleistungen im Rahmen der linearen	
Analyse von Mehrmaschinensystemen	
(Prof. Dr.-Ing. Valentin Crastan)	603
B.1 Blindleistungsabgabe der Generatoren	603
B.2 Lineare Analyse des Mehrmaschinensystems	604
Anhang C Optimierung (Prof. Dr.-Ing. Valentin Crastan)	607
C.1 Lagrange-Verfahren	607
C.2 Optimaler Leistungsfluss (OPF)	609
Anhang D Abkürzungen (Dipl.-Ing. Gerhard Bartak)	611
Sachverzeichnis	613