

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
	Valentin 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 unregelten 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 Leistungstransit 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	393
	Literatur	395
8	Hochspannungsgleichstromübertragung	397
	Dirk Westermann	
8.1	Einleitung	397
8.2	Netzgeführte HGÜ (LCC-HGÜ)	400
8.2.1	Grundlegende Funktionsweise	400
8.2.2	Ausführungsformen	408
8.2.3	Anforderungen an die Netzanschlusspunkte	412
8.2.4	Regelung eines LCC-HGÜ-Systems	414
8.2.5	Eckdaten LCC-HGÜ-Technologie	433
8.3	Selbstgeführte HGÜ (VSC- HGÜ)	433
8.3.1	PWM-VSC und Grundprinzip des Vierquadrantenbetriebs ..	436
8.3.2	MMC-VSC-HGÜ	439
8.3.3	Eckdaten und Ausführungsoptionen	440
8.4	HGÜ-Systeme	443
8.4.1	Ausführung des DC-Kreises	443
8.4.2	Beispiele realisierter Projekte	446
8.4.3	Stationsverluste der unterschiedlichen Technologien	448
8.4.4	Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit	449
8.5	Beispiele für Hochleistungsübertragung im Modell	450
8.6	Umweltbeeinflussung von HGÜ	460
8.6.1	Geräuschemission	461
8.6.2	Feldemission	462

8.7	HGÜ Netze	464
8.7.1	Technologien	464
8.7.2	Betrieb	464
	Literatur	473
9	Betriebsplanung	477
	Valentin Crastan	
9.1	Mikroökonomische Grundlagen	477
9.2	Betriebsoptimierung eines vertikal integrierten Energieversorgungsunternehmens	479
9.2.1	Netzberechnung	480
9.2.2	Netzberechnung mit Spannungseinkopplung	483
9.2.3	Optimaler Leistungsfluß (OPF)	485
9.2.4	Optimale Speicherbewirtschaftung	495
9.2.5	Einsatzplan der thermischen Gruppen	498
9.2.6	Die langfristige Optimierung	500
9.2.7	Die mittelfristige Optimierung	502
9.2.8	Die Kurzzeit-Optimierung	502
9.2.9	Momentane Optimierung	503
9.2.10	Optimierung bei Einsatz von Wind- und Solarenergie	503
9.2.11	Tarifierung	504
9.3	Betriebsoptimierung bei Wettbewerb	505
9.3.1	Mathematische Grundlagen	505
9.3.2	Pool-Lösung und ausgehandelter Netzzugang	509
9.3.3	Betriebsoptimierung bei ausgehandeltem Netzzugang	510
9.4	Neue und zukünftige Aspekte der Betriebsoptimierung	514
	Literatur	516
10	Leit- und Informationstechnik	517
	Rolf Apel	
10.1	Überblick	517
10.1.1	Aufgabe der Leit- und Informationstechnik	517
10.1.2	Historie	518
10.1.3	Ausblick	519
10.2	Feld- und Stationsleittechnik	520
10.2.1	Plattform und Systemarchitektur	520
10.2.2	Prozess- und Feldbusebene	522
10.2.3	Netzschutz	523
10.2.4	Stationsebene	526
10.2.5	Anwendung	527
10.3	Phasenwinkelmessungen	538
10.3.1	Messgeräte	539
10.3.2	Anwendungen	539

10.4	Fernwirktechnik	539
10.4.1	Infrastruktur	539
10.4.2	Protokolle	540
10.5	Zählerfernauslesung	541
10.5.1	Der intelligente Zähler	541
10.5.2	Zählerfernauslesung und Verteilnetzautomatisierung	542
10.5.3	Das IKT-Gateway als Schnittstelle zur Gebäude- und Hausautomatisierung	542
10.6	Netzleittechnik	543
10.6.1	Marktumfeld, Anforderungen an die Netzleittechnik	543
10.6.2	Systemkonzeption für Netzleitsysteme	545
10.6.3	Systemarchitektur	547
10.6.4	Domänen- und Funktionsüberblick	550
10.6.5	Bedien- und Anwendungsfunktionen	574
10.6.6	Systemkonfigurationen	587
10.6.7	Systemübergreifender Workflow	589
10.6.8	Systemintegrationskonzepte	591
10.6.9	Ausblick	591
10.7	Smart Grid	593
10.7.1	Die neuen Anforderungen	593
10.7.2	Fernauslesbare Zähler	594
10.7.3	Integration erneuerbarer Energien	595
10.7.4	Die neuen Prinzipien bei der Netzregelung	596
10.7.5	Das Elektroauto	598
10.7.6	Microgrids	598
Anhang A Dynamik und Regelungstechnik		601
Stichwortverzeichnis		623