
Inhaltsverzeichnis

1	Elektrische Energieversorgung	1
	Literatur	5
2	Elektrische Energieversorgungsnetze	7
2.1	Elektrische Energieversorgung in Deutschland	7
2.2	Öffentliche Energieversorgungsnetze	9
2.2.1	Übertragungsnetze	11
2.2.1.1	Höchstspannungsnetze	11
2.2.1.1.1	Übertragungsnetze in Deutschland	11
2.2.1.1.2	Übertragungsnetze in Österreich und in der Schweiz	17
2.2.1.2	Verbundnetze	17
2.2.1.2.1	Europäische Verbundnetze	19
2.2.1.2.2	Außereuropäische Verbundnetze	25
2.2.1.3	Interkonnektivität	28
2.2.1.4	Overlaynetze	30
2.2.2	Verteilnetze	33
2.2.2.1	Aufgabe der Verteilnetze	33
2.2.2.2	Hochspannungsnetze	34
2.2.2.3	Mittelspannungsnetze	34
2.2.2.4	Niederspannungsnetze	35
2.2.3	Netzkomponenten	35
2.2.3.1	Betriebsmittel	35
2.2.3.2	Schaltanlagen	37
2.2.3.3	Leitungen und Transformatoren	41
2.2.3.3.1	Leitungen	41
2.2.3.3.2	Transformatoren	50
2.2.3.4	Kompensationseinrichtungen	56
2.2.3.5	Sekundärtechnik	57

2.2.4	Beobachtungsbereich, Netzmodell, Ersatznetz	58
2.2.4.1	Beobachtungsbereich	58
2.2.4.2	Modell des elektrischen Energieversorgungsnetzes	59
2.2.4.3	Ersatzdarstellung nicht unmittelbar modellierter Netzteile	60
2.2.5	Regulatorische Vorgaben	60
2.3	Entwicklung des Verbundnetzes in Deutschland	63
2.3.1	Anfänge der elektrischen Energieversorgung	63
2.3.2	Erste Ansätze eines Verbundbetriebs	65
2.3.3	Nach dem Zweiten Weltkrieg.	68
2.3.4	Nach der Wiedervereinigung	71
2.3.5	Liberalisierung und Unbundling	71
	Literatur.	75
3	Betrieb elektrischer Übertragungssysteme.	81
3.1	Systemführung.	81
3.1.1	Aufgabenstellung.	81
3.1.1.1	Funktionsbereich Netzführung	82
3.1.1.2	Funktionsbereich Frequenzhaltung.	83
3.1.1.3	Funktionsbereich Spannungshaltung	83
3.1.1.4	Funktionsbereich Wiederaufbau	84
3.1.1.5	Instrumentenkasten der Systemführung	84
3.1.1.6	Neue Herausforderungen durch die Energiewende.	85
3.1.1.7	Zeitbereiche.	87
3.1.2	Definition des Systemzustands	93
3.1.3	Organisationsstruktur.	96
3.1.3.1	Zentral oder dezentral.	96
3.1.3.2	Flächenorganisation	96
3.1.3.3	Zentrale Netzleitstelle.	97
3.1.3.4	Back- und Front Office	99
3.1.3.5	Krisenzentrum.	100
3.2	Netzführung	100
3.2.1	Aufgabenstellung.	100
3.2.1.1	SCADA-System	101
3.2.1.2	Wetter- und Blitzinformationssysteme	103
3.2.1.3	Höhere Entscheidungs- und Optimierungsfunktionen . . .	104
3.2.1.3.1	Topologieerkennung.	105
3.2.1.3.2	Beobachtbarkeit	106
3.2.1.3.3	State Estimation	106
3.2.1.3.4	Kurzschlussrechnung	107
3.2.1.3.5	Ausfallsimulationsrechnung.	107
3.2.1.3.6	Leistungsflussoptimierung	107
3.2.1.4	Offline-Funktionen	108

3.2.2	Netzsicherheitsüberwachung	108
3.2.2.1	Netzsicherheitsanalyse	108
3.2.2.2	Bewertungskriterien	111
3.2.2.2.1	Einhaltung der Wirkleistungsbilanz	111
3.2.2.2.2	Einhaltung von Spannungsgrenzen	111
3.2.2.2.3	Einhaltung von Stromgrenzen	112
3.2.2.2.4	Einhaltung von Grenzwerten der Parallelschaltgeräte.	114
3.2.2.2.5	Einhaltung der maximalen Einspeiseleistung an einer Sammelschiene . . .	115
3.2.2.2.6	Einhaltung der transienten Stabilität	115
3.2.2.2.7	Einhaltung der minimal und maximal zulässigen Kurzschlussströme	116
3.2.2.3	Simulation von Systemänderungen.	117
3.2.2.3.1	Betriebsmittelausfälle.	118
3.2.2.3.2	Geplante Systemänderungen	122
3.2.2.3.3	Kurzfristig erzwungene Systemänderungen	122
3.2.2.3.4	Kurzschlüsse.	124
3.2.3	Modifikation des Netzzustands	124
3.2.3.1	Netzzustandskorrektur	124
3.2.3.2	Netzbezogene Maßnahmen.	126
3.2.3.2.1	Schaltmaßnahmen.	127
3.2.3.2.2	Koordinierung bzw. Durchführung von Schaltmaßnahmen.	128
3.2.3.2.3	Schaltberechtigung.	130
3.2.3.2.4	Arbeitspunkteinstellungen	131
3.2.3.2.5	Netzbasiertes Engpassmanagement	133
3.2.3.3	Marktbezogene Maßnahmen.	133
3.2.3.3.1	Redispatch	134
3.2.3.3.2	Zu- oder abschaltbare Lasten	138
3.2.3.3.3	Countertrading	138
3.2.3.4	Notfallmaßnahmen	138
3.2.3.4.1	Maßnahmen bei Unterfrequenz	138
3.2.3.4.2	Maßnahmen bei Überfrequenz.	139
3.2.4	Netzschutz	140
3.2.4.1	Aufgabe.	140
3.2.4.2	Überstromschutz.	141
3.2.4.3	Distanzschutz	141
3.2.4.4	Differenzialschutz.	142
3.2.4.5	Frequenzschutz	142
3.2.4.6	Sonderfunktionen	143

3.3	Spannungshaltung und Spannungsstabilität.	144
3.3.1	Aufgabenstellung.	144
3.3.2	Statische Spannungshaltung.	145
3.3.3	Dynamische Spannungshaltung.	146
3.3.4	Spannungsstabilität	147
3.3.5	Spannungs-Blindleistungsoptimierung	149
3.4	Entstörungsmanagement und Netzwiederaufbau.	149
3.4.1	Aufgabenstellung.	149
3.4.2	Großstörungen	150
3.4.2.1	Definition	150
3.4.2.1.1	Netzwischer	151
3.4.2.1.2	Brownout	151
3.4.2.1.3	Blackout	152
3.4.2.2	Ursachen	155
3.4.2.2.1	Technische Störungen.	155
3.4.2.2.2	Einflüsse von außen, Naturereignisse.	156
3.4.2.2.3	Fehlverhalten des Personals, Kommunikationsprobleme, Datenfehler.	158
3.4.2.2.4	Marktmechanismen	160
3.4.2.2.5	Sabotage	162
3.4.2.3	Maßnahmen zur Vermeidung eines Blackouts	163
3.4.3	Wiederaufbau.	163
3.4.3.1	Voraussetzungen für den Wiederaufbau	163
3.4.3.2	Ablauf des Wiederaufbaus	165
3.4.3.2.1	Top-down-Strategie	166
3.4.3.2.2	Bottom-up-Strategie	167
3.4.3.3	Abschluss des Wiederaufbaus.	167
3.4.4	Schwarzstart.	168
3.4.5	Inselbetrieb.	169
3.4.6	Unterstützung des Personals beim Netzwiederaufbau.	171
3.4.6.1	Training.	171
3.4.6.2	Handlungsempfehlungen	171
3.4.6.3	Expertensystem.	171
3.5	Systembilanzierung	172
3.5.1	Aufgabenstellung.	172
3.5.2	Leistungs-Frequenz-Regelung und Regelenergieeinsatz.	172
3.5.2.1	Elektrische Leistungsaufteilung	176
3.5.2.2	Mechanische Leistungsaufteilung.	178
3.5.2.3	Primärregelung (primary control).	178
3.5.2.4	Sekundärregelung (secondary control).	180
3.5.2.5	Tertiärregelung (tertiary control)	182
3.5.2.6	Quartärregelung (time control).	182

3.5.3	Netzregelverbund.....	183
3.5.3.1	Motivation Netzregelverbund.....	183
3.5.3.2	Prinzip des Netzregelverbunds.....	184
3.5.3.3	Technische Funktionsweise.....	186
3.5.3.4	Systemsicherheit und Wirtschaftlichkeit des Netzregelverbunds.....	187
3.5.3.5	Entwicklung des Netzregelverbunds.....	188
3.5.4	Beschaffung von Regelenergie.....	189
3.5.5	Last- und Einspeiseprognose.....	191
3.5.6	Fahrplanmanagement.....	192
3.5.6.1	Austauschprogramme.....	192
3.5.6.2	Bilanzkreise.....	197
3.5.6.3	Ausgleichsenergie.....	198
3.5.6.4	Bilanzkreismanagement.....	199
3.5.6.5	Bilanzierungsgebiete.....	200
3.5.7	EEG-Bewirtschaftung.....	200
3.5.7.1	Integration erneuerbarer Energien.....	200
3.5.7.2	EEG-Anlagen.....	202
3.5.7.3	EEG-Mechanismus.....	203
3.5.8	Besondere Betriebssituationen.....	205
3.5.8.1	Herausforderung Sonnenfinsternis.....	205
3.5.8.2	Der Ball muss ins Netz.....	207
3.5.8.3	Earth Hour Aktion „Licht aus!“.....	208
3.5.8.4	Das Stundenphänomen.....	208
3.6	Erweiterte und innovative Systemführung.....	210
3.6.1	Kuratives (N-1)-Prinzip.....	210
3.6.1.1	Aufgabenstellung.....	210
3.6.1.2	Betriebsmittelgrenzen.....	211
3.6.1.3	Wirkungsweise kurativer Maßnahmen.....	211
3.6.1.4	Konzept des kurativen (N-1)-Prinzips.....	212
3.6.1.5	Bewertung der kurativen (N-1)-Maßnahmen.....	214
3.6.2	Special Protection Schemes.....	215
3.6.2.1	Konzept SPS.....	215
3.6.2.2	Phasenschiebertransformator.....	217
3.6.2.3	Leistungselektronische Leistungsflussregler.....	218
3.6.2.4	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung.....	220
3.6.2.5	Netzbooster.....	221
3.6.2.6	Automatische Entlastungskontrolle.....	225
3.6.2.7	Emergency Power Control.....	226
3.6.2.8	Rotierende Phasenschieber.....	228
3.6.3	Erhöhung der Übertragungsfähigkeit.....	230
3.6.3.1	Freileitungsmonitoring.....	230

3.6.3.2	Hochtemperaturbeseilung	232
3.6.3.3	Spannungsumstellung	234
3.6.3.4	Anlagen mit Verwendung von Supraleitertechnologie . . .	234
3.6.4	Wide Area Monitoring Systems	235
3.6.5	Innovationen für die Systemführung	237
3.6.5.1	Digitalisierung und Automatisierung der Energieversorgung	237
3.6.5.2	Genetische Algorithmen	238
3.6.5.3	Expertensysteme	240
3.6.5.3.1	Merkmale, Aufgaben und Aufbau	240
3.6.5.3.2	Anwendungsbeispiele für Expertensysteme in elektrischen Energieversorgungssystemen	241
3.6.5.4	Blockchain	244
3.6.5.5	Multiagentensysteme	245
3.6.5.6	Künstliche Neuronale Netze	246
3.6.6	Neue Aufgaben der Systemführung	250
3.7	IKT Systemsicherheit.	251
3.7.1	IKT Struktur.	251
3.7.2	IKT Sicherheit	252
3.7.3	IT-Sicherheitskatalog für Energieanlagen	257
	Literatur.	258
4	Systemsicherheit im europäischen Verbundsystem	271
4.1	Koordinierung des europäischen Energieaustauschs	271
4.2	Regionale Koordinierungszentren	273
4.3	Systemschutzplan.	277
4.4	Netzreserve, Kapazitätsreserve und Sicherheitsbereitschaft	278
4.4.1	Reserveleistungsvorhaltung	278
4.4.2	Netzreserve	279
4.4.3	Kapazitätsreserve	282
4.4.4	Sicherheitsbereitschaft.	283
4.4.5	Besondere netztechnische Betriebsmittel	283
	Literatur.	284
5	Schaltleitung	287
5.1	Aufgaben	287
5.2	Aufbau	288
5.2.1	Gebäude	288
5.2.2	Netzwarte	289

5.2.3	Netzleitsystem	290
5.2.3.1	Anforderung	290
5.2.3.2	Hardwarestruktur	292
5.2.3.3	Softwarestruktur	293
5.2.4	Notwarte	294
5.3	Prozessvisualisierung für die Systemführung	295
5.3.1	Visualisierung des Systemzustands	295
5.3.2	Innovative Visualisierung	302
5.4	Trainingssysteme	306
	Literatur	310
6	Strommarkt und Übertragungskapazität	313
6.1	Aufgabenstellung	313
6.2	Rahmenbedingungen	315
6.2.1	Neuordnung des europäischen Elektrizitätsbinnenmarktes	315
6.2.2	Staatliche Überwachung	316
6.3	Märkte	317
6.3.1	Terminmarkt	317
6.3.2	Spotmarkt	317
6.3.3	Marktintegration der erneuerbaren Energien	318
6.3.4	Negative Strompreise	319
6.3.5	Market Coupling	319
6.3.6	Regelleistungsmarkt	320
6.3.7	Merit-Order-Verfahren	322
6.4	Aufgaben des Übertragungsnetzes im Stromhandel	324
6.4.1	Bilanzieller Leistungsausgleich bei Stromhandelsdifferenzen	324
6.4.2	Begrenzungen des Stromhandels durch die Übertragungskapazitäten	324
6.4.3	Kapazitätsberechnungsregionen	325
	Literatur	328
	Stichwortverzeichnis	331