

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Kurzfassung	IV
Abstract	V
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIX
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes	XX
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Zielstellung.....	3
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Aufbau, Betriebsmittel und Berechnung elektrischer Energieversorgungssysteme	9
2.1 Aufbau und Strukturmerkmale elektrischer Netze.....	9
2.2 Leistungsflussberechnung in elektrischen Netzen	11
2.2.1 Modellierung der Netzbetriebsmittel	12
2.2.2 Formulierung des Leistungsflussproblems	16
2.2.3 Verfahren zur Leistungsflussberechnung	21
2.3 Leistungselektronik in elektrischen Netzen	25
2.4 Betriebsmittel und Systeme zur Leistungsflusssteuerung und Spannungshaltung ...	29
3 Operatives Engpassmanagement in der Netz- und Systemführung	31
3.1 Netz- und Systemführung	31
3.1.1 Organisation und Begriffe	31
3.1.2 Prozesse und Komponenten des Netzleitsystems	33
3.1.3 Regulatorischer Rahmen des Engpassmanagements	38
3.2 Leistungsflusssteuerung und Spannungshaltung im Engpassmanagement.....	40
3.2.1 Engpässe im elektrischen Energieversorgungsnetz	40
3.2.2 Leistungsflusssteuerung durch netzbezogene Maßnahmen	41
3.2.3 Leistungsflusssteuerung durch marktbezogene Maßnahmen	44
3.3 Engpassmanagement durch kurativen Maßnahmenereinsatz.....	46
4 Werkzeug zur nichtlinearen mathematische Optimierung	51
4.1 Optimierung im Kontext der elektrischen Energieversorgung	51
4.2 Modellierung nichtlinearer mathematischer Optimierungsprobleme	53
4.2.1 Optimierungsklassen und -methoden.....	53
4.2.2 Mathematische Formulierung von Optimierungsproblemen	55
4.2.3 Lösungsverfahren.....	56
4.2.4 Optimalitätsbedingungen in beschränkten Optimierungsproblemen.....	58
4.3 Optimierungswerkzeug zur Leistungsflussoptimierung	63

4.3.1	Aufbau von Optimierungswerkzeug und -umgebung.....	63
4.3.2	Leistungsfluss als Optimierungsproblem.....	66
4.3.3	Abbildung von Flexibilitäten im Leistungsfluss.....	69
4.4	Optimierung im Bereich des operativen Engpassmanagements	74
4.4.1	Netzbezogene Maßnahmen.....	74
4.4.2	Marktbezogene Maßnahmen.....	79
4.4.3	Präventiver und kurativer Maßnahmenereinsatz	80
5	Modellierung von Quer- und Längselementen	83
5.1	Querelemente	83
5.1.1	Modellierungsansatz	83
5.1.2	Betriebsmittelspezifische Umsetzung.....	86
5.2	Längselemente.....	96
5.2.1	Modellierungsansatz	96
5.2.2	Betriebsmittelspezifische Umsetzung.....	103
6	Modellierung von kombinierten Elementen.....	113
6.1	Kombinierte FACTS	113
6.1.1	Modellierungsansatz	113
6.1.2	Betriebsmittelspezifische Umsetzung.....	116
6.2	Phasenschieber-Transformatoren	121
6.2.1	Ausführungsformen und Wirkung	121
6.2.2	Modellierungsansatz und -umsetzung	124
6.3	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssysteme	127
6.3.1	Ausführungsformen	127
6.3.2	Modellierungsansatz	128
6.3.3	Systemspezifische Umsetzung.....	131
7	Modellierung von Maßnahmen und Konzepten	139
7.1	Redispatch und Einspeisemanagement	139
7.1.1	Redispatch.....	139
7.1.2	Einspeisemanagement.....	144
7.2	Präventives und kuratives Engpassmanagement.....	145
7.2.1	Modellierungsansatz	145
7.2.2	Allgemeine Formulierung des Optimierungsproblems.....	146
8	Anwendung der erweiterten Optimierungsumgebung	149
8.1	Leistungsflusssteuerung und Spannungshaltung mit FACTS	150
8.1.1	Testsystem und Simulationsszenarien	150
8.1.2	Verifikation stationärer Arbeitspunkte	151
8.1.3	Anwendungsbeispiel und Ergebnisdiskussion.....	152
8.2	Leistungsflussoptimierung in kombinierten AC/DC-Systemen.....	156
8.2.1	Testsystem und Simulationsszenarien	156

8.2.2	Verifikation stationärer Arbeitspunkte	158
8.2.3	Anwendungsbeispiel und Ergebnisdiskussion	159
8.3	Operatives Engpassmanagement mit FACTS und HGÜ-Systemen	162
8.3.1	Testsystem und Engpasssituation durch Ausfallvariantenrechnung	162
8.3.2	Szenariobasierte Anwendungsbeispiele im Engpassmanagement	166
8.3.3	Ergebnisübersicht und -diskussion	174
8.4	Optimierter Einsatz marktbezogener Maßnahmen im Übertragungsnetz	176
8.4.1	Testsystem und Leistungsflusszenario	176
8.4.2	Umsetzungs- und Anwendungsbeispiele	177
8.4.3	Vergleich von Implementierungsansätzen und Ergebnisdiskussion	179
9	Zusammenfassung, Fazit und Ausblick	181
9.1	Zusammenfassung und Fazit	181
9.2	Ausblick	185
10	Literaturverzeichnis	187
11	Anhang	205
11.1	Wirkungsmechanismen zur Leistungsflusssteuerung	205
11.2	Leistungselektronische Komponenten und Systeme	210
11.3	Lösungsverfahren nichtlinearer Optimierungsprobleme	218
11.4	Konvexität von Optimierungsproblemen	227
11.5	Automatische Differentiation	228
11.6	Elemente der Längs-Leitungs-Element Admittanzmatrix	230
11.7	Simulationsergebnisse und -daten	232
	Veröffentlichungen	242
	Patente	246
	Betreute Abschlussarbeiten	247
	Lebenslauf	248