

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	ix
Abstract	xi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Präventives und kuratives (n-1)-Kriterium	3
1.3 Stand der Forschung	4
1.3.1 Kuratives Netzengpassmanagement	5
1.3.2 Auswirkungen der Höherauslastung auf die Systemstabilität	7
1.3.3 Bewertung der dynamischen Stabilität	10
1.3.4 Einsatz von Batteriespeichern im Übertragungsnetz	11
1.3.5 Fazit	13
1.4 Zielsetzung und Struktur der Arbeit	15
2 Grundlagen des Betriebs elektrischer Übertragungsnetze	17
2.1 Gesetzliche und regulatorische Rahmenbedingungen	19
2.2 Präventives Netzengpassmanagement	19
2.2.1 (n-1)-Kriterium	21
2.2.2 Bewertung des Netzzustands	22
2.2.3 Maßnahmen zur Korrektur des Netzzustandes	26
2.3 Kuratives Netzengpassmanagement	27
2.3.1 Funktionsweise des kurativen (n-1)-Prinzips	27
2.3.2 Netzbooster-Konzept	30
2.4 Auswirkungen der Höherauslastung auf die Systemstabilität	33
2.4.1 Grundlagen der Systemstabilität	33
2.4.2 Auswirkungen der Höherauslastung auf die Spannungsstabilität	37
2.4.3 Auswirkungen der Höherauslastung auf die Polradwinkelstabilität	38
2.5 Dynamic Stability Assessment als Assistenzsystem im Netzbetrieb	43
2.5.1 Allgemeine Struktur eines DSA-Systems	45
2.5.2 Kriterien zur Stabilitätsbewertung	47
2.5.3 Python-basiertes Dynamic Stability Assessment	49
3 Dynamische Netzmodellierung	51
3.1 Dynamisches Netzmodell	52
3.2 Modellierung der Betriebsmittel	53
3.2.1 Synchronmaschinen	55

Inhaltsverzeichnis

3.2.2	Onshore-Windenergieanlagen	61
3.2.3	Offshore-Windenergieanlagen	68
3.2.4	Hochspannungsgleichstromübertragung	69
3.2.5	Blindleistungskompensationsanlagen	75
3.2.6	Lasten	77
3.3	Modellierung von Batteriespeichern für Systemstudien	78
3.3.1	Netzanbindung mit einer netzfolgenden Umrichterregelung	80
3.3.2	Netzanbindung mit einer netzbildenden Umrichterregelung	82
3.4	Auswahl relevanter Netznutzungsfälle	84
4	Kurativer Einsatz von Netzboostern in hochausgelasteten Netzen	87
4.1	Kurativer Einsatz eines singulären Netzbooster-Paares	88
4.2	Kurativer Einsatz eines systemischen Netzboosters	90
4.3	Diskussion der Ergebnisse	93
4.4	Fazit	98
5	Bereitstellung von weiteren Systemdienstleistungen	101
5.1	Bereitstellung von Blindleistung im STATCOM-Betrieb	102
5.2	Bereitstellung von virtueller Trägheit	105
5.3	Kombinierte Betriebsweise der Netzbooster	109
5.4	Fazit	114
6	Identifikation optimaler Betriebsweisen mit Hilfe eines betrieblichen DSA-Werkzeugs	117
7	Zusammenfassung	123
8	Ausblick	127
Anhang	129
A	Kenndaten einer 380-kV-Freileitung	130
B	Modellanpassungen und Plausibilisierung des dynamischen Netzmodells	131
C	Herleitung der Gleichungen für Synchronmaschinen	134
D	Verwendete Parameter für dynamischen Modelle der Synchronmaschine	140
E	Herleitung des mathematischen Umrichtermodells	143
F	Verwendete Parameter für die Regelung von HGÜ-Systemen	145
G	Simulationsergebnisse des grenzstabilen Fehlerszenarios 1, NNF 2 bei Einsatz eines Netzbooster-Paares im STATCOM - Betrieb	146

Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis 147

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis 159

Literaturverzeichnis 165