

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XXXI
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes.....	XXXV
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Motivation.....	1
1.2 Forschungsfragen und Zielstellungen	8
1.3 Gliederung der Arbeit.....	17
2 Ausführungsformen von HGÜ-Verbindungen und Klassifizierung ihrer Regelungen	18
2.1 Polkonfigurationen	18
2.2 Etablierte Konverter-Technologien.....	22
2.2.1 Netzgeführte Konverter (LCC-Technologie).....	23
2.2.2 Selbstgeführte Konverter (SCC-Technologie).....	26
2.2.3 Übersichtsdarstellung etablierter Konverter-Technologien	41
2.3 Neuartige Ausführungsform der DRU-HGÜ-Verbindung.....	43
2.4 Regelung und Modellierung des modularen Multilevel-Konverters.....	46
2.5 Klassifizierungskriterien für Konverterregelungen.....	56
3 Modulare Modellierung paralleler Netzanbindungssysteme und ihrer Regelung	64
3.1 Windpark-Netz-Module (W).....	66
3.1.1 Windenergieanlagen-Modell.....	67
3.1.2 66-kV-Windpark-Netz-Modul (W1).....	74
3.1.3 150-kV-Windpark-Netz-Modul (W2).....	78
3.2 Offshore-Konverter-Module (K).....	81
3.2.1 Offshore-VSC-Modul (K1).....	81
3.2.2 Offshore-DRU-Modul (K2)	83
3.3 Anbindungs-Module (A)	84
3.3.1 Anbindungs-Module mit Transformatorkopplung bei VSC-VSC (A1.1 und A1.2)	85
3.3.2 Anbindungs-Module mit direkter Kopplung bei VSC-VSC (A2.1 und A2.2)	87
3.3.3 Anbindungs-Module mit Transformatorkopplung bei VSC-DRU (A3.1 und A3.2).....	88
3.4 Onshore-Modul inkl. DC-Strecke (O).....	89
4 Regelungskonzeptuntersuchungen für den Parallelbetrieb VSC-VSC	97
4.1 Kommunikationsloses Regelungskonzept.....	99
4.2 Kommunikationsbehaftetes Regelungskonzept	107
4.3 Vergleich und technische Bewertung der Regelungskonzepte	113
4.3.1 Nachweis der O-NAR-Konformität der Windpark-Regelungen	114
4.3.2 Nachweis der EPC1-Kompatibilität der Regelungskonzepte	116

4.3.3	Regelungskonzeptvergleich bei direkter Kopplung der Konverter.....	119
4.3.3.1	Vergleich unter Einsatz des 66-kV-Windpark-Netz-Moduls	121
4.3.3.2	Vergleich unter Einsatz des 150-kV-Windpark-Netz-Moduls ...	130
4.3.3.3	Kurzfasit	138
4.3.4	Regelungskonzeptvergleich bei Transformatorkopplung der Konverter..	138
4.3.4.1	Vergleich unter Einsatz des 66-kV-Windpark-Netz-Moduls	138
4.3.4.2	Vergleich unter Einsatz des 150-kV-Windpark-Netz-Moduls ...	143
4.3.4.3	Kurzfasit	146
4.3.5	Fazit des Regelungskonzeptvergleichs für den Parallelbetrieb VSC-VSC	147
4.4	Vertiefung der Untersuchungen des kommunikationsbehafteten Konzeptes.....	149
4.4.1	Auswirkungen von Kommunikationslaufzeiten.....	150
4.4.2	Auswirkungen des Erreichens der Wirkleistungsbegrenzungen.....	157
4.4.3	Auswirkungen des Erreichens implementierter Blindleistungsbegrenzungen.....	160
4.4.4	Fazit der vertieften Untersuchungen des kommunikationsbehafteten Konzeptes	164
5	Regelungskonzeptuntersuchungen für den Parallelbetrieb VSC-DRU	166
5.1	Regelungskonzept mit direkter Spannungsregelung	167
5.2	Regelungskonzept mit kaskadierter Strom- und Spannungsregelung.....	168
5.3	Vergleich und technische Bewertung der Regelungskonzepte	173
5.3.1	Nachweis der EPC1-Kompatibilität der Regelungskonzepte	174
5.3.2	Regelungskonzeptvergleich ohne Einsatz von passiven Oberschwingungsfiltern	176
5.3.2.1	Vergleich unter Einsatz des 66-kV-Windpark-Netz-Moduls	181
5.3.2.2	Vergleich unter Einsatz des 150-kV-Windpark-Netz-Moduls ...	194
5.3.2.3	Kurzfasit	201
5.3.3	Auswirkungen des Einsatzes passiver Oberschwingungsfilter	202
5.3.4	Regelungskonzeptvergleich mit Einsatz von passiven Oberschwingungsfiltern	212
5.3.4.1	Vergleich unter Einsatz des 66-kV-Windpark-Netz-Moduls	214
5.3.4.2	Vergleich unter Einsatz des 150-kV-Windpark-Netz-Moduls ...	220
5.3.4.3	Kurzfasit	221
5.3.5	Untersuchung der Blindleistungsbereitstellung durch die Windenergieanlagen.....	221
5.3.6	Fazit des Regelungskonzeptvergleichs für den Parallelbetrieb VSC-DRU	229
5.4	Vergleich der Parallelkonfigurationen VSC-VSC und VSC-DRU	234
6	Zusammenfassung und Ausblick	237
7	Literaturverzeichnis	244