

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XXXI</b>
<b>Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes .....</b>	<b>XXXV</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Motivation.....	1
1.2 Forschungsfragen und Zielstellungen .....	8
1.3 Gliederung der Arbeit.....	17
<b>2 Ausführungsformen von HGÜ-Verbindungen und Klassifizierung ihrer Regelungen .....</b>	<b>18</b>
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
<b>3 Modulare Modellierung paralleler Netzanbindungssysteme und ihrer Regelung ....</b>	<b>64</b>
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
<b>4 Regelungskonzeptuntersuchungen für den Parallelbetrieb VSC-VSC .....</b>	<b>97</b>
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	Kurzfazit .....	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	Kurzfazit .....	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
<b>5</b>	<b>Regelungskonzeptuntersuchungen für den Parallelbetrieb VSC-DRU .....</b>	<b>166</b>
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	Kurzfazit .....	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	Kurzfazit .....	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
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>237</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>244</b>