

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vii
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangspunkt und Ziel der Arbeit	1
1.2 Aufbau und Inhalt	3
2 Die elektrische Energieversorgung im Wandel: Herausforderungen und Lösungsansätze für die Nutzung regenerativer Energiequellen	5
2.1 Hintergrund	5
2.2 Klassifizierung von Stromerzeugungsanlagen und ihre Netzintegration....	8
2.2.1 Inhärente Eigenschaften und Einspeisewürfel	8
2.2.2 Konventionelle und nicht-konventionelle Stromerzeugungsanlagen	11
2.2.3 Netzintegration nicht-konventioneller Stromerzeugungsanlagen...	12
2.3 Aufbau und Betrieb elektrischer Netze mit konventionellen Stromerzeugungsanlagen.....	14
2.3.1 Struktur und Aufbau elektrischer Netze	14
2.3.2 Physikalische Grundlagen für den Betrieb von Wechselstromnetzen	15
2.3.3 Eigenschaften und Regelung von Synchrongeneratoren.....	21
2.3.4 Bilanzmodell und Frequenzverhalten des elektrischen Netzes	35
2.3.5 Berechnung elektrischer Netze mit Symmetrischen Komponenten	40
2.4 Auswirkungen der direkten Netzintegration nicht-konventioneller Stromerzeugungsanlagen (NIM1)	42
2.4.1 Erhöhte Komplexität im Verteilnetz	42
2.4.2 Erschwerte Betriebsführung des Übertragungsnetzes.....	44

2.4.3 Veränderter Betrieb und Subventionierung konventioneller Kraftwerke	45
2.4.4 Verschlechterung des Frequenzverhaltens	46
2.4.5 Unbekanntes Fehlerverhalten und erschwerte Fehlerberechnung .	48
2.5 Begriffsdefinitionen.....	50
2.5.1 Momentanreserve, (virtuelle) Trägheit und schnelle Frequenzregelung.....	50
2.5.2 Netzdienlichkeit und Grundfunktion der elektrischen Energieversorgung.....	51
2.6 Bisherige Ansätze zur verbesserten Netzintegration und Nutzung nicht-konventioneller Stromerzeugungsanlagen.....	53
2.6.1 Direkte Netzintegration verbunden mit Zusatzmaßnahmen (NIM1).....	53
2.6.2 Erweiterung um Zusatzfunktionen (NIM2).....	55
2.6.3 Erweiterung zur Stromeinspeiseanlage (NIM3).....	56
2.7 Das Smart renewable Power Plant (SrPP) zur netzdienlichen Integration nicht-konventioneller Stromerzeugungsanlagen (NIM4).....	58
2.7.1 Übersicht.....	58
2.7.2 Wesentliche Eigenschaften und Vergleich mit anderen Ansätzen .	59
2.8 Zeitliche und örtliche Bewertung von Stromerzeugungs- und Stromeinspeiseanlagen	64
2.8.1 Hintergrund und Anwendungsbeispiel	64
2.8.2 Zeitliche Bewertung	66
2.8.3 Örtliche Bewertung	68
3 Aufbau, Komponenten und Regelung eines SrPP	73
3.1 Aufbau und Varianten	73
3.2 Komponenten	75
3.2.1 Stromrichter.....	75
3.2.2 Stromerzeugungsanlagen	83
3.2.3 Energiespeicher.....	84

3.3 Regelung.....	85
3.3.1 Netzseitiges Verhalten	85
3.3.2 Internes Verhalten	85
4 Laborumgebung zur SrPP-Nachbildung und Untersuchung von Stromrichterregelungen.....	89
4.1 Komponenten, Laborkonzeption und Laboraufbau	89
4.2 Konfigurationen und Verschaltungsmöglichkeiten	93
4.2.1 Untersuchung des netzseitigen SrPP-Verhaltens.....	93
4.2.2 Untersuchung des internen SrPP-Verhaltens.....	94
5 Die Schnittstelle des SrPP zum Netz: Modellierung, Regelung und Betriebsverhalten des netzseitigen VSC	97
5.1 Koordinatentransformationen.....	97
5.1.1 Beschreibung eines dreiphasigen Systems mit Symmetrischen Komponenten und Raumzeigern.....	97
5.1.2 Positiv rotierendes Koordinatensystem (SRF) und Bestimmung des Netzwinkels über eine PLL.....	101
5.1.3 Positiv und negativ rotierendes Koordinatensystem für unsymmetrische Zustände (DSRF).....	104
5.2 AC-seitige Modellierung eines VSC.....	107
5.2.1 Raumzeigermodell eines VSC am elektrischen Netz	107
5.2.2 VSC-Modell in DSRF-Koordinaten	108
5.2.3 Wirk- und Blindleistungsaustausch mit dem elektrischen Netz....	111
5.3 Übersicht und Klassifizierung von VSC-Regelungen.....	119
5.3.1 Regelung in SRF-, $\alpha\beta$ - und DSRF-Koordinaten.....	119
5.3.2 Regelungsmodi und Betriebsverhalten eines VSC.....	121
5.4 Analyse und Entwurf verschiedener VSC-Regelungen in DSRF-Koordinaten.....	127
5.4.1 Stromregelung und PQ -Steuerung	127
5.4.2 Netzfolgende Statikregelung $P(f)Q(U)$ und Synchronmaschinennachbildung.....	139

5.4.3 Spannungsregelungen uf und Uf	141
5.4.4 Netzbildende Statikregelung $f(P)U(Q)$	148
5.4.5 Virtuelle Trägheit	170
5.5 Vergleich von VSC und Synchrongenerator	174
5.5.1 Stabilitätsverhalten.....	174
5.5.2 Betriebsverhalten und Ersatzschaltbilder in Symmetrischen Komponenten	178
5.6 Modellierung und Regelung des MMC mit integrierten Batteriespeichern	181
5.6.1 MMC-Modellierung.....	181
5.6.2 MMC-Regelung.....	182
5.6.3 Integration von Batterien	185
5.7 Untersuchungen am Versuchsaufbau.....	186
5.7.1 Führungs- und Störverhalten netzbildender Regelungsmodi	186
5.7.2 Winkelstabilität netzbildender Stromrichter.....	191
5.7.3 Momentanreserve	196
5.7.4 Frequenzmessung bei netzfolgenden Regelungsmodi.....	200
5.7.5 Frequenzverhalten des elektrischen Netzes mit netzstützenden Stromrichtern	201
5.7.6 Transientes Verhalten eines VSC im Fehlerfall	206
5.7.7 Stationäres Verhalten eines VSC im Fehlerfall	208
5.8 Zusammenfassung.....	216
6 Das interne SrPP-Netz: Auslegung und Betrieb der Energiespeicher	219
6.1 SrPP-Nachbildung am Versuchsaufbau.....	219
6.1.1 Der MMC mit integrierten Batteriespeichern als Netz-VSC	219
6.1.2 Anwendungsbeispiel: Verbesserung der Wirkleistungscharakteristik einer PV-Anlage	220
6.1.3 Auswirkungen des Spannungstotbandes auf das dynamische Verhalten	222

6.1.4 Verhalten bei Blackout und Netzwiederaufbau	225
6.2 Speicherauslegung und Langzeitverhalten.....	229
6.2.1 Bestimmung der Leistungsbandgrenzen und Speicherdimensionierung.....	229
6.2.2 Betrieb der Energiespeicher und SrPP-Wirkungsgrad.....	231
6.2.3 Erweiterungen und alternative Betriebsweisen	235
7 Zusammenfassung und Ausblick.....	237
Anhang	239
Abkürzungsverzeichnis.....	247
Literaturverzeichnis	249