

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 Stromeinspeisanlage (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 Stromeinspeisanlagen.....	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 u_f und U_f	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 Wirkleistungs- charakteristik 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