

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Der Modulare Multilevel-Umrichter als Antriebs- umrichter - Ziele der Forschungsarbeit . . . . .	1
1.2	Stand der Technik . . . . .	4
1.3	Gliederung und Vorgehensweise . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Grundlagen zum MMC</b>	<b>15</b>
2.1	Struktur des MMCs . . . . .	15
2.1.1	Schaltungsnetzwerk des MMCs . . . . .	15
2.1.2	Modularität durch identische Zellen . . . . .	17
2.1.3	Zusammenhang zwischen Zellen und Zweig . . . . .	20
2.1.4	Energetische Zusammenhänge eines Zweigs . . . . .	22
2.1.5	Funktion der Zweiginduktivität . . . . .	24
2.2	Entkoppelte Stromeinprägung . . . . .	25
2.2.1	Herleitung durch einphasiges Ersatzschaltbild . . . . .	26
2.2.2	Dreiphasige Stromeinprägung in transformierten Koordinaten . . . . .	29
2.2.3	Zusammensetzung der Zweigspannungen . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Steuerverfahren zur Symmetrierung der Zweigenergien</b>	<b>35</b>
3.1	Symmetrierung phasenweise . . . . .	37
3.2	Transformation der Zweigleistungen . . . . .	40
3.2.1	Definition der Größen . . . . .	40
3.2.2	Herleitung der transformierten Zweigleistungen . . . . .	43
3.3	Identifikation der Wirkleistungskomponenten zur Sym- metrierung . . . . .	44
3.3.1	Gesamtenergie und horizontale Symmetrierung . . . . .	45

3.3.2	Reduktion des Energiehubs durch 2. Harmonische in den Kreisströmen im hf-Modus . . . . .	47
3.3.3	Vertikale Symmetrierung bei hoher Ausgangsfrequenz - hf-Modus . . . . .	48
3.3.4	Vertikale Symmetrierung bei niedriger Frequenz - lf-Modus . . . . .	51
3.3.5	Vorsteuerung der internen Ströme . . . . .	54
3.3.6	Umschaltung zwischen hf- und lf-Modus . . . . .	57
3.4	Modellbildung der transformierten Zweigenenergien . . . . .	59
3.4.1	Herleitung der AC-Komponenten im hf-Modus . . . . .	60
3.4.2	Herleitung der AC-Komponenten im lf-Modus . . . . .	62
<b>4</b>	<b>Regelung des MMCs als Antriebsumrichter</b>	<b>65</b>
4.1	Regelung der DC- und Symmetrierströme . . . . .	68
4.1.1	Transformation der Istwerte . . . . .	69
4.1.2	Auslegung der Stromregler . . . . .	70
4.1.3	Berechnung der Sollwerte . . . . .	75
4.1.4	Begrenzung der Stellgrößen . . . . .	77
4.1.5	Wahl des Nullsystems in der 3AC-Spannung . . . . .	83
4.1.6	Rücktransformation der Zweigspannungen . . . . .	88
4.2	Zweigenenergieregulation und -symmetrierung . . . . .	89
4.2.1	Direkte Regelung . . . . .	95
4.2.2	Regelung mit Istwert-Filter . . . . .	98
4.2.3	Modellbasierte Regelung . . . . .	100
4.3	Simulation und Vergleich der Regelverfahren . . . . .	101
4.3.1	Simulationsmodell in MATLAB/Simulink . . . . .	101
4.3.2	Simulationsergebnisse der einzelnen Regelverfahren	107
4.3.3	Vergleich der Symmetrierverfahren . . . . .	113
4.3.4	Hochlauf mit Umschaltung des Betriebsmodus . . . . .	118
4.4	Überlagerte Maschinen- und Netzregelung . . . . .	121
4.4.1	Regelung des Drehstromsystems im rotierenden Koordinatensystem . . . . .	121
4.4.2	Regelung von Drehstrommaschinen . . . . .	123
4.4.3	Regelung für Active-Front-End-Umrichter . . . . .	133
4.5	DC-seitige Kopplung von MMCs . . . . .	135
4.6	Vorladung des MMCs . . . . .	140
<b>5</b>	<b>Modulation</b>	<b>145</b>
5.1	Ziele und Bewertungskriterien . . . . .	146

5.2	Spannungsbildung in den Zweigen . . . . .	152
5.2.1	Pulsbreitenmodulation der taktenden Zelle . . . . .	154
5.3	Auswirkungen auf die Strom- und Spannungsqualität im MMC . . . . .	157
5.3.1	Untersuchung der Modulation in einer Phase des MMCs . . . . .	157
5.3.2	Untersuchung der Modulation für das Gesamtsystem . . . . .	162
5.4	Zellsymmetrierung durch Auswahl der spannungsbildenden Zellen . . . . .	171
5.4.1	Reduktion der mittleren Schaltfrequenz in den Zellen durch reduzierte Sortierverfahren . . . . .	172
5.4.2	Minimierung der mittleren Schaltfrequenz durch die Berücksichtigung vorangegangener Schaltzustände . . . . .	174
<b>6</b>	<b>Dimensionierung</b>	<b>179</b>
6.1	Dimensionierung der Zellkapazität . . . . .	180
6.1.1	Wahl des Spannungshubs in den Kondensatoren . . . . .	180
6.1.2	Berechnung des Energiehubs . . . . .	186
6.1.3	Energiehub im lf-Modus . . . . .	188
6.1.4	Energiehub im hf-Modus . . . . .	191
6.2	Ermittlung der Strombelastung im MMC . . . . .	195
6.2.1	lf-Modus . . . . .	197
6.2.2	hf-Modus . . . . .	200
6.3	Vergleich der Berechnungen mit der Simulation . . . . .	202
6.4	Grenzbelastung des Umrichters . . . . .	207
6.4.1	Belastung mit quadratischer Kennlinie . . . . .	212
6.4.2	Umschaltung der Betriebsmodi anhand der Auslegung . . . . .	215
6.5	Dimensionierung der Zweigdrosseln . . . . .	218
6.5.1	Magnetischer Kreis . . . . .	219
6.5.2	Elektrischer Kreis . . . . .	222
6.5.3	Vergleich der beiden Drosselvarianten . . . . .	222
<b>7</b>	<b>Versuchsaufbau des MMC-Systems für Niederspannung</b>	<b>227</b>
7.1	Design der Zellen . . . . .	229
7.1.1	Wahl der Zellspannung . . . . .	231
7.1.2	Leistungsteil . . . . .	232

7.1.3	Spannungsversorgung . . . . .	235
7.1.4	Spannungserfassung und LWL-Anbindung . . . . .	237
7.2	Aufbau der Umrichterphase . . . . .	238
7.2.1	Zweigdrossel . . . . .	239
7.3	Signalverarbeitung des MMC-Systems . . . . .	244
7.3.1	Digitaler Signalprozessor zur Steuerung und Regelung des MMCs . . . . .	246
7.3.2	FPGA als Modulator . . . . .	248
7.4	Aufbau des Gesamtsystems mit Belastungs- und Versorgungseinrichtungen . . . . .	250
<b>8</b>	<b>Untersuchungen am Prototyp</b>	<b>253</b>
8.1	Vorladung des MMCs . . . . .	254
8.2	Messergebnisse zur MMC-Regelung . . . . .	255
8.2.1	Hochlauf der Maschine . . . . .	256
8.2.2	Dynamisches Verhalten der Zweigsymmetrierung . . . . .	260
8.3	Messergebnisse zur Modulation . . . . .	264
8.3.1	Untersuchung der Zweig- und 3AC-Größen . . . . .	265
8.3.2	Untersuchung der Zellsymmetrierung im Zweig . . . . .	266
8.4	Verluste und Wirkungsgrad . . . . .	268
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>273</b>
9.1	Ausblick . . . . .	275
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>279</b>
A.1	Symbolverzeichnis . . . . .	280
A.2	Abbildungsverzeichnis . . . . .	284
A.3	Tabellenverzeichnis . . . . .	289
A.4	Veröffentlichungen im Rahmen der Dissertation . . . . .	290
A.5	Studentische Arbeiten im Rahmen der Dissertation . . . . .	293
A.6	Bauteile und Komponenten des MMC-Prototyps . . . . .	295
A.7	Literaturverzeichnis . . . . .	297