

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
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
2 Grundlagen zum MMC	15
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
3 Steuerverfahren zur Symmetrierung der Zweigenergien	35
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 Symmetrierung	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 Zweigenergien	59
3.4.1	Herleitung der AC-Komponenten im hf-Modus . .	60
3.4.2	Herleitung der AC-Komponenten im lf-Modus . .	62
4	Regelung des MMCs als Antriebsumrichter	65
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	Zweigenergieregelung 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
5	Modulation	145
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
6	Dimensionierung	179
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
7	Versuchsaufbau des MMC-Systems für Niederspannung	227
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
8	Untersuchungen am Prototyp	253
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
9	Zusammenfassung	273
9.1	Ausblick	275
A	Anhang	279
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