

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XI
Symbolverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XIX
1. Einleitung	1
1.1. Einführung	1
1.2. Selbstgeführte Umrichter in HGÜ-Anwendungen	1
1.3. Multilevel Umrichter für HGÜ-Anwendungen	2
1.4. Mehrgrößenregelverfahren in leistungselektronischen Systemen	3
1.5. Stand der Wissenschaft und Forschung	4
1.5.1. Regelungsaufgaben	4
1.5.2. Entkoppelte PI(D)-Regelung	4
1.5.3. Zustandsregelung	5
1.5.4. Internal Model Control	6
1.5.5. H_∞ -Regelung	8
1.5.6. Model Predictive Control	11
1.6. Ziele dieser Dissertation	12
1.7. Publikationen und Patentanmeldungen	13
2. Grundlagen Modularer Multilevel Umrichter	15
2.1. Multileveltopologien im Überblick	15
2.1.1. Neutral-Point / Diode Clamped Converters	15
2.1.2. Flying Capacitor Converters	16
2.1.3. Kaskadierte H-Brücken mit potentialgetrennten Versorgungen	16
2.2. Aufbau des Modularen Multilevel Umrichters nach Marquardt	17
2.2.1. Modularer Aufbau	18
2.2.2. Vorteile der MMC-Topologie	19
2.3. Klassifizierung Modularer Multilevel Umrichter	21
2.4. Anforderung an die Regelung von Modularen Multilevel Umrichtern	22
2.4.1. Regelgrößen	22

3. Mathematische Modellierung des Modularen Multilevel Umrichters	25
3.1. Modellierung der Phasenmodule als steuerbare Spannungsquellen	25
3.1.1. Regelung und Symmetrierung der Kondensatorspannungen	25
3.1.2. Modellierung eines Submoduls	27
3.1.3. Phasenmodulausgangs- und -summenspannung	27
3.2. Netzwerkanalyse anhand des Ersatzschaltbildes	31
3.2.1. Knoten- und Maschenanalyse	32
3.2.2. Aufstellen des Differentialgleichungssystems	32
3.3. Lineares Zustandsraummodell des MMC	34
3.3.1. Lineare Zustandsraummodelle	34
3.3.2. Definition von Zustands-, Stell- und Netzgrößen für MMC	34
3.3.3. Transformation des Zustandsraummodells in eine Netz-/Kreisstromdarstellung	36
3.3.4. Diskretisierung des Zustandsraummodells	42
3.4. Modellierung von Totzeiten	43
3.4.1. Modellierung von Stelltotzeiten	44
3.4.2. Modellierung von Messtotzeiten	47
3.4.3. Modellierung von Stell- und Messtotzeiten	48
3.5. Modellierung des MMC als bilineares System	50
3.5.1. Bilineare Systeme	50
3.5.2. Zustandsraumdarstellungen bilinearer Systeme	51
3.5.3. Bilineares Zustandsraummodell des MMC	52
3.6. Modellierung des MMC als bilineares periodisch-zeitvariantes System	57
3.6.1. Energiebalancierung innerhalb des Umrichters	57
3.6.2. PBTV-Zustandsraummodell des MMC	65
4. Entwurf und Anwendung von Mehrgrößenregelungsverfahren	69
4.1. Zustandsreglerentwurf für lineare Systeme	69
4.1.1. Zustandsregelungen	69
4.1.2. Reglerentwurf durch Polvorgabe	70
4.1.3. Optimale Regelung	71
4.2. Zustandsreglerentwurf zur Stromregelung des MMC	76
4.2.1. LQR-Entwurf für MMC mit Vorsteuerung	76
4.2.2. LQR-Entwurf für MMC unter Berücksichtigung von Stelltotzeiten	79
4.3. Beobachterentwurf	81
4.3.1. Struktur des Luenberger-Beobachters	82
4.3.2. Beobachterentwurf unter Berücksichtigung von Stell- und Messtotzeiten	82
4.3.3. Der geschlossene Regelkreis mit Beobachter	83
4.4. Reglerentwurf für bilineare Systeme	85
4.4.1. Stabilität bilinearer Systeme	85

4.4.2. Entwurf einer stabilen Zustandsrückführung	88
4.4.3. Optimale Regelung von BLS	90
4.5. Reglerentwurf zur Strom- und Energieregelung des MMC	94
4.5.1. Stabilitätsbetrachtung des geschlossenen Regelkreises	94
4.6. Reglerentwurf für periodisch-zeitvariante Systeme	97
4.7. Reglerentwurf zur Stromregelung, Energieregelung und -balancierung	100
4.7.1. Regelkreisstruktur	101
4.7.2. Simulation	102
4.7.3. Analyse des geschlossenen Regelkreises	103
5. Erweiterter Beobachter zur aktiven Störungskompensation	105
5.1. Frequenzselektive Regelung als Stand der Technik	107
5.1.1. Regelung des Gleichstroms	107
5.1.2. Regelung von Wechselgrößen mit PI(D)-Reglern	107
5.1.3. Betrachtung der Park-Transformation im Laplacebereich	107
5.1.4. Parallele Regelung mehrerer Frequenzen	108
5.1.5. Regelung von Mit-, Gegen- und Nullsystem	108
5.2. Konzept des erweiterten Beobachters zur Störungskompensation bzw. Führungssignalfolge	111
5.2.1. Konzept der Störgrößenbeobachtung	112
5.2.2. Regelungsstruktur mit erweitertem Beobachter	112
5.3. Erweiterung von Zustandsmodellen um Störsignale	113
5.3.1. Modellierung von Störsignalen	114
5.3.2. Modellierung von Mit-, Gegen- und Nullsystemstörungen	114
5.3.3. Beobachtermodell für MMC	116
5.3.4. Erweiterung des Modells um harmonische Störungen	116
5.3.5. Diskretes Modell	117
5.4. Regelkreisstruktur und Entwurf des erweiterten Beobachters	118
5.5. Simulationsbeispiele	119
6. Vergleich und Einordnung der Konzepte und Verfahren	125
6.1. Kaskadierte Regelung	125
6.2. Mehrgrößenstromregelung	127
6.3. Bilineare Strom- und Energieregelung	127
6.4. Periodische Regelung	127
6.5. Funktionalität und Komplexität der Verfahren	128
7. Zusammenfassung und Ausblick	131
A. Transformationen	135
B. Verfahren zur Ansteuerung der Phasenmodule	137

C. Bestimmung der Gleichanteile der Kondensatorsummenspannungen	139
C.1. Rekursiver Least-Square-Schätzer	139
D. Simulationen	141
Literaturverzeichnis	153
Publikationen	159
Patentanmeldungen	161