

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Der Modulare Hochfrequenz Umrichter - Steuerung, Auslegung, Aufbau -

Dipl.-Ing. Martin Schulz

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und
Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

- Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Weyh
1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Marquardt
 2. Berichterstatter: Prof. Hans-Peter Nee

Die Dissertation wurde am 30.09.2014 bei der
Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für
Elektrotechnik und Informationstechnik am 25.10.2014 angenommen.

Die mündliche Prüfung fand am 10.12.2014 statt.

Forschungsberichte Leistungselektronik und Steuerungen

Band 8

Martin Schulz

**Der Modulare Hochfrequenz Umrichter
– Steuerung, Auslegung, Aufbau –**

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3514-8

ISSN 1867-5700

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Lehrstuhl für Leistungselektronik und Steuerungen an der Universität der Bundeswehr entstand die vorliegende Arbeit. Ich möchte mich an dieser Stelle besonders bei meinem Doktorvater bedanken, der mir die Anfertigung dieser Dissertation erst ermöglicht hat. In unzähligen Gesprächen lies er mich an seinem sehr umfangreichen Erfahrungs- und Wissensschatz teilhaben und zeigte mir auf diese Weise oft neue Blickwinkel auf bestimmte Sachverhalte. Er vermittelte weiterhin, dass innovative Lösungen oft dann gefunden werden, wenn vorherrschende, etablierte Lösungsansätze nicht als gegeben hingenommen, sondern kritisch hinterfragt werden. Die so gewonnenen Blickwinkel und Erkenntnisse führten zu einer Vielzahl neuer Ideen und Lösungen, die in die vorliegende Arbeit Einzug gehalten haben.

Neben der exzellenten fachlichen Betreuung danke ich ihm auch für das sehr angenehme Arbeitsklima. Dieses ermöglichte es, dass nicht nur über „MOSFETs“ und „Raumzeiger“ gesprochen wurde, sondern auch weltliche Themen wie Anwälte, Kaufleute, (ehemalige) Verteidigungsminister und den Papst diskutiert werden konnten.

Bei meinem Korreferenten Prof. Nee möchte ich mich für die sehr interessanten und lehrreichen Gespräche und das rege Interesse an meiner Arbeit bedanken. Prof. Weyh danke ich für die sehr angenehme Leitung des Prüfungsausschusses.

Ein großer herzlicher Dank geht an die Kolleginnen, Kollegen und Studenten des Instituts, mit denen ich während meiner Zeit am Lehrstuhl zusammenarbeiten durfte. Sie standen mir stets mit Rat und Tat zur Seite. Ich werde mich stets mit Freude an die sehr lehrreiche und lustige Zeit mit Ihnen erinnern. Besonderer Dank gilt meiner Kollegin Anna Mayer, die es neben ihrer fachlichen Kompetenz stets verstanden hat gute Laune zu versprühen. Meiner Familie möchte ich für die Unterstützung während meiner gesamten Ausbildung danken. Hier gebührt meinem Vater Rüdiger großer Dank, der durch meine Erziehung und Unterstützung in jeglicher Hinsicht erst meinen akademischen Werdegang ermöglicht hat. Meiner Frau Steffi danke ich für ihr unendliches Verständnis gegenüber meiner oft mürrischen Art und der Vielzahl an Wochenenden, die ich ausschließlich am PC verbracht habe.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	5
2.1 Elektrisches Antriebssystem in der Elektromobilität	5
2.1.1 Reduktion der Kapazität C_{ZK} am DC-Bus	8
2.1.2 Reduktion des Kühlaufwands	9
2.1.3 Filteraufwand im konventionellen elektrischen Antriebsstrang	10
2.1.4 Zusammenfassung und Herleitung der Anforderungen an effiziente Antriebswechselrichter	11
2.2 Zwischenkreiskondensatoren	13
2.3 Leistungshalbleiter	17
2.3.1 Einleitung	17
2.3.2 Schaltverhalten von FETs	22
2.3.2.1 Schaltverhalten bei induktiver Last unter Berücksichti- gung parasitärer Kapazitäten	22
2.3.2.2 Einfluss von parasitären Induktivitäten	25
2.3.2.3 Einfluss von Freilaufdioden	27
2.3.3 Entwicklungspotential-Ausblick	30
2.4 Aufbautechnik und Packaging	33
2.4.1 Aufbau von Leistungselektronik mit Leistungsmodulen	34
2.4.2 Aufbau von Leistungselektronik auf Leiterplattenbasis	37
2.4.2.1 Leiterplattentechnologien	37
2.4.2.2 Entwicklungen der Gehäusetechnik (Packaging) von dis- kreten Leistungsschaltern	40
3 Aufbau und Funktionsweise des Modularen Hochfrequenz Umrichters	45
3.1 Der Leistungsteil des MHF Umrichters	45
3.2 Steuerungs- und Regelungsstruktur	48

3.3	Voraussetzungen und Definitionen der Signalgrößen	49
3.4	Stationärer Betrieb der DC-Seite: Regelung des DC-Stroms I_{DC}	51
3.5	Leistungspulsationen und Dimensionierung der Energiespeicher	52
3.5.1	Modifikation der DC-seitigen Ansteuerung	53
3.5.1.1	Allgemeine Betrachtung	53
3.5.1.2	Das DC-seitige Modulationsverfahren $DCmod_z$	56
3.5.2	Modifikation der AC-seitigen Ansteuerung	60
3.5.2.1	Das AC-seitige Modulationsverfahren $ACmod_1$	61
3.5.2.2	Das AC-seitige Modulationsverfahren $ACmod_2$	66
3.5.2.3	Das AC-seitige Modulationsverfahren $ACmod_3$	76
3.5.3	Vergleich und Bewertung der Modulationsverfahren	84
3.5.3.1	Reduktion der benötigten installierten Energie W_C	84
3.5.3.2	Einfluss der Modulationsverfahren auf das Betriebsverhalten der Maschine	86
3.5.3.3	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	90
3.6	Einführung von Modellierungsfunktionen $h_x(t)$	92
3.7	Regelungsstruktur des MHF	96
3.8	Aussteergrenzen des Modularen Hochfrequenz Umrichters	97
3.9	Untersuchung und Minimierung des hochfrequenten Schaltrippels	99
4	Bestimmung der Halbleiterverluste im MHF Umrichter	109
4.1	Berechnung und Optimierung der Durchlassverluste	109
4.1.1	Minimierung der DC-seitigen Durchlassverluste	112
4.1.2	Minimierung der AC-seitigen Durchlassverluste	114
4.2	Schaltverluste	118
5	Auslegung des Gesamtsystems mit MHF Umrichtern	121
5.1	Grundlagen & Definitionen: Modell und Kennfelder der Maschine	122
5.2	Einführendes Beispiel: Anpassung an eine gegebene Maschine	125
5.3	Beschreibung der begrenzenden Systemgrößen	131
5.4	Darstellung möglicher Betriebsstrategien und deren Einfluss auf die Auslegung	134
5.4.1	Betrieb des MHF Umrichters im Ankerstellbereich	134
5.4.2	Betrieb des MHF Umrichters im Feldschwächbereich	138
5.4.3	Leerlaufbetrieb ($M_M = 0$) bei $\hat{U}_{rot} > U_C$	139
5.4.4	Auswirkungen der Betriebsstrategie des Antriebssystems auf die benötigte installierte Kondensatorenergie	141

5.5	Auswirkung der MHF Konfiguration auf dessen Effizienz	144
5.6	Alternative Submodulvarianten für die Minimierung von W_C	149
5.6.1	Doppel-Submodul (D-SM) und 3-Phasen-Submodule (3Ph-SM)	149
5.6.2	Das Vollbrücken-Submodul (VB-SM)	151
5.6.3	Submodul mit AC-seitigen MIS-Umrichter (MIS-SM)	153
5.6.4	Vergleich der alternativen Submodultopologien	153
6	Auslegung und Realisierung eines MHF Submoduls	157
6.1	Einleitung - Anforderungen an schnell schaltende Leistungselektronik	157
6.2	Aufbau des Leistungsteils	159
6.2.1	Das Konzept von Switching Cells	159
6.2.2	Design einer niederinduktiven Switching Cell	163
6.2.3	Erweiterte, optimierte Switching-Cell für den MHF Umrichter	166
6.3	Auslegung und Realisierung der Treiberschaltung	173
6.3.1	Entwicklung der Treiberschaltung	174
6.3.2	Erzeugung der Versorgungsspannung des Treibers	175
6.3.3	Auslegung der Gatewiderstände	178
6.4	Messungen an der realisierten Leistungsplatine	181
6.4.1	Schaltverhalten und Abschätzung der Kommutierungsinduktivität	181
6.4.2	Abschätzung der auftretenden Schaltverluste	184
6.5	Submodul-Steuerungselektronik	189
6.5.1	Aufbau und Aufgaben der Lokalen Steuerungseinheit (LSE) des Submoduls	189
6.5.2	Interne Kommunikationsschnittstelle	190
6.5.2.1	Übertragungsmedium	191
6.5.2.2	Das Übertragungsprotokoll	192
6.5.3	Ablaufsteuerung des Submoduls	196
7	Die ZSE – Ein Steuerungssystem für neuartige Leistungselektroniken	199
7.1	Überblick	199
7.2	Prozessoreinheit aus DSP und FPGA	201
7.3	Hoch aufgelöste Pulsweitenmodulation hoher Pulsfrequenz	202
7.4	Galvanische Trennung zwischen Zentraler Steuereinheit und Leistungsteil	203
7.4.1	Messwerterfassung über $\Delta\Sigma$ -Wandler	204
7.4.2	Temperaturmessung	205
7.5	Benutzerinterface und Debugging	206

8	Simulationsergebnisse und Messungen am MHF Umrichter	209
8.1	Betriebsverhalten des Prototyps	209
8.2	Simulationsergebnisse	216
9	Zusammenfassung und Ausblick	221
A	Wicklungskonfigurationen und Beispielmaschinen	223
A.1	Wicklungskonfigurationen von Synchronmaschinen	223
A.2	Beispielmaschinen	229
B	Herleitungen und Nebenrechnungen	231
B.1	Der stationäre Betrieb des MHF Umrichters (DC-Seite)	231
B.2	Aussteuergrenzen für Maschinen mit geradzahlgiger Phasenzahl	232
B.3	Maximaler Stromrippel einer 2-Level-Schaltung	235
B.4	Berechnung MOSFET Schaltverluste nach [Inf06]	236
B.5	Verlustoptimale Halbleiteraufteilung einer Vollbrücke bei symmetrischer Taktung	237
B.6	Vereinfachte Berechnung des Energiehubs ΔW_C nach [Lam12]	238
B.7	Berechnung der minimal benötigte Submodulkapazität aus dem Energie- hub ΔW	239
B.8	Maximales Drehmoment bei gegebenen Phasenwinkel	240
B.9	Berechnung diverser Arbeitspunkte der Antriebsmaschine	243
C	Nebenrechnungen und Abschätzungen	245
C.1	Parasitäre Kapazitäten und Induktivitäten beim Leiterplattendesign	245
C.2	Hardware-Anforderungen an die implementierte interne Kommunikation	246
	Literaturverzeichnis	249
	Eigene Veröffentlichungen	259
	Betreute Arbeiten	261
	Abbildungsverzeichnis	270
	Tabellenverzeichnis	272
	Variablenübersicht	273
	Abkürzungsverzeichnis	279