

M2C-Converter auf Basis von MOS-Transistoren
für Niederspannungsnetze

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität der Bundeswehr München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

M.Sc. Marek Galek

Neubiberg

2016

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. T. Weyh
1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. R. Marquardt
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. G. Griepentrog
Tag der Prüfung: 10. Oktober 2016

Forschungsberichte Leistungselektronik und Steuerungen

Band 9

Marek Galek

**M2C-Converter auf Basis von MOS-Transistoren
für Niederspannungsnetze**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4870-4

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur bei der Siemens AG am Standort München in der Zeit von 2011 bis 2016.

Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Marquardt danke ich für die Möglichkeit zur Erstellung der Dissertation an seinem Lehrstuhl sowie für die fachliche Betreuung meiner Arbeit. Er wies mir stets neue Betrachtungsweisen auf und motivierte mich am Thema des M2C stetig weiter zu arbeiten, was entscheidend zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Griepentrog danke ich für die freundliche Unterstützung zu Beginn meiner Arbeit, für seine zahlreiche wertvolle Anregungen und für die Übernahme der Aufgabe des Zweitgutachters.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei Dr.-Ing. J. Rackles für seine Förderung während des Studiums, welche mir den Weg für meine berufliche und akademische Laufbahn ebnete.

Sehr herzlich bedanken möchte ich mich bei meinem Kollegen Manuel Blum, der meine Forschung von Anfang an begleitet hat und mir jederzeit ein überaus wertvoller Gesprächspartner, später auch Mitstreiter war.

Mein Dank geht auch an Herrn Yeqi Wang, der stets für einen guten Kontakt zur Universität gesorgt hat und mir ein wertvoller Austauschpartner war.

Mein ganz aufrichtiger Dank geht an meine Familie. Sie hat mich von Anfang an bei allen meinen Vorhaben unterstützt und musste dafür die eine oder andere Entbehrung hinnehmen.

München, Oktober 2016

MAREK GALEK

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Wechselrichter-Topologien im Niederspannungsnetz	9
2.1	Zweipunkt-Stromrichter	10
2.2	Dreipunkt-Stromrichter	11
2.3	Kaskadierte H-Brücken-Umrichter	15
2.4	Umrichter mit binär gestuften Wicklungen	17
3	Modulare Multilevel Converter	19
3.1	Prinzipieller Aufbau	20
3.2	Funktionsweise	24
3.3	Eigenschaften	29
4	Verfahren zur Messung und zur Begrenzung von Störaussendungen	35
4.1	Messverfahren	36
4.1.1	Genormte Messung von Oberschwingungen	36
4.1.2	Genormte Messung von leitungsgebundenen Störungen	37
4.2	Die Impedanz des Niederspannungsnetzes	41
4.2.1	Einflussfaktoren	41
4.2.2	Modellierung	41
4.3	Begrenzung von Netzurückwirkungen	43
4.3.1	Filterung der wechselrichterseitigen Oberschwingungen	43
4.3.2	Filterung der leitungsgebundenen Störaussendungen	45
4.4	Gegentaktfilter für Umrichter mit hoher Schaltfrequenz	48
4.4.1	Anforderungen	48
4.4.2	Analytische Bestimmung der minimalen Dämpfung	50
4.4.3	Numerische Berechnung von leitungsgebundenen Störungen	53
4.5	Getrennte Messung von Gleichtakt- und Gegentaktstörungen	57
5	M2C für Anwendungen im Niederspannungsnetz	61
5.1	Konsequente Nutzung der Modularität	61
5.1.1	Kommunikation innerhalb des Umrichters	61
5.1.2	Ansteuerung	71
5.1.3	Zweigdrosseln	72
5.2	Auslegung	73
5.2.1	Selektive Eliminierung von Harmonischen	74
5.2.2	Leistungsteil	78
5.3	Realisierung	82
5.3.1	Anforderungen	82

5.3.2	Ansteuerung	83
5.3.3	Submodul	86
5.3.4	Hilfssysteme	94
5.3.5	Kommunikation	96
6	Netzanbindung	109
6.1	Kombinierte Netzdrossel	109
6.2	Filterauslegung	111
6.3	Vorladung des M2C	114
6.4	Regelung	116
6.4.1	PLL	116
6.4.2	Regelung des Netzstroms	118
7	Untersuchungen am Versuchsaufbau	123
7.1	Halbduplex Kommunikation	123
7.2	Schaltvorgänge im Submodul	126
7.3	Vorladung des Umrichters	129
7.4	Ströme im gesteuerten Betrieb	130
7.5	Submodulspannungen im gesteuerten Betrieb	132
7.6	Spannungsverlauf am Phasenmodul	134
7.7	Dynamisches Verhalten des Umrichters	136
7.8	Leitungsgebundene Störungen	139
7.9	Ausgangfilter	143
8	Zusammenfassung und Ausblick	151
	Literaturverzeichnis	153

Symbolverzeichnis

Formelzeichen

S_x	Schalter Nummer x
U_Z	Zwischenkreisspannung
C_Z	Zwischenkreiskapazität
D_x	Diode Nummer x
C_x	Kapazität Nummer x
R_x	Widerstand Nummer x
L_x	Induktivität Nummer x
U	Spannung
I	Strom, I-Anteil des Reglers
P	Leistung, Proportionalanteil des Reglers
N	Anzahl der Wicklungen
L_Z	Zwischenkreisdrossel
I_Z	Zwischenkreisstrom
U_{Zelle}	Zellspannung
C_{xSM}	Zellkapazität
U_R, U_S, U_T	Phasenspannung
I_R, I_S, I_T	Phasenstrom
T_x	Thyristor Nummer x
x, h, σ	Zählindex, Variable
n	Zählindex, Anzahl der Zellen pro Zweig
m	Aussteuergrad
$U_{P,x}$	Zweigspannung oberer Zweig Phasenmodul x
$U_{N,x}$	Zweigspannung unterer Zweig Phasenmodul x
$I_{P,x}$	Zweigstrom oberer Zweig Phasenmodul x
$I_{N,x}$	Zweigstrom unterer Zweig Phasenmodul x
$I_{KR,x}$	Kreisstrom Phasenmodul x
$U_{L,x}$	Zweigdrosselspannung Phasenmodul x
Z	Impedanz
φ	Winkel
U_{ZF}	Zwischenfrequenzspannung
U_{QPk}	Quasi-Peak-Spannung
f	Frequenz
f_{mod}	Modulationsfrequenz
T	Zeitraum
s	Laplace-Parameter
a_n	Fourier-Koeffizienten, Filterkoeffizienten
b_n	Fourier-Koeffizienten, Filterkoeffizienten
t	Zeit
T_P	Periodendauer

D	Tastgrad
L	Spannungspegel
a	Dämpfung
A	Signalname
B	Signalname
α	Schaltwinkel
ω	Kreisfrequenz
ω_{LO}	Kreisfrequenz des Lokaloszillators
z	Parameter der z -Transformation
V_{DC}	Versorgungsspannung
V_{Ref}	Referenzspannung
Q	Gütefaktor
U_{α}, U_{β}	Spannungen im α, β -System
U_d, U_Q	Spannungen im d, q -System
Φ	Winkelinformation

Abbildungsverzeichnis

2.1	Zweipunkt-Stromrichter mit eingepprägter Gleichspannung	10
2.2	Dreistufiger Stromrichter mit diodengeschaltetem Nullpotential (3L-NPC)	11
2.3	Dreipunkt-Stromrichter mit aktiv geschaltetem Nullpotential	13
2.4	Kaskadierter H-Brücken-Umrichter mit getrennter DC-Versorgung	15
2.5	Umrichter auf Basis eines Transformators mit binär gestuften Sekundärwicklungen	17
3.1	Prinzipielle Struktur eines dreiphasigen M2C	20
3.2	A) Halbbrücken-Submodul B) Vollbrücken-Submodul	22
3.3	A) Halbbrücken-Submodul mit Bypass-Thyristor und Kurzschlusschalter B) Clamp-Doppelsubmodul	23
3.4	Ersatzschaltbild des M2C	25
3.5	Größen innerhalb eines Phasenmoduls	27
3.6	Wirkung der variablen Submodulspannung auf den Verlauf der Ausgangsspannung des M2C	29
3.7	HVDC-Strecke mit zwei Wechselrichter-Einheiten	30
3.8	Back-to-Back HVDC-Kopplung	30
3.9	M2C als STATCOM in Drehstromsystemen	31
3.10	M2C als Umrichter für elektrische Maschinen	32
3.11	M2C als Lade-Wechselrichter	32
4.1	Messaufbau zur Messung von Oberschwingungen bis 2 kHz	37
4.2	Einphasige Netznachbildung	38
4.3	Dreiphasiger EMV Messaufbau	39
4.4	Messvorgang bei lückenloser Abtastung	39
4.5	Aufbau des QPk-Detektors	40
4.6	Netzimpedanz nach Lage der Normung	42
4.7	Verlauf der Netzimpedanz auf Basis genormter Werte	42
4.8	Netzfilter: a) Netzdrossel, b) LC-Filter, c) LCL-Filter	44
4.9	Charakteristisches Ausgangsspektrum eines Netzwechselrichters mit 10kHz Taktfrequenz	46
4.10	Struktur eines einphasigen EMV-Filters	47
4.11	Vereinfachte Ausgangsspannung	50
4.12	Gegenüberstellung der ersten 32 Oberschwingungen in Bezug auf den Tastgrad	51
4.13	Herabmischen des Störsignals auf eine feste Zwischenfrequenz	54
4.14	Filtercharakteristik des Zwischenfrequenz-Filters [62]	55
4.15	Struktur eines IIR-Filters	55
4.16	Schaltbild eines passiven CM/DM-Separators	57

4.17	Aufteilung der simulierten Störspannungen an der Netznachbildung (mit und ohne Netzfilter)	58
4.18	Aufbau des CM/DM-Separators	59
5.1	Sterntopologie der üblichen Kommunikation innerhalb des Umrichters	62
5.2	Busbasierte Struktur des M2C	63
5.3	Erzeugung des Manchester Leitungscodes	65
5.4	Netzwerktopologien [15]	66
5.5	Modulare Ansteuerung des M2C	71
5.6	M2C mit kombinierter Netzdrossel	72
5.7	Submodul mit verteilten Zweigdrosseln	73
5.8	Ausgangsspannung eines Mehrpunkt-Umrichters mit Grundfrequenzmodulation	75
5.9	Verlauf der Ausgangsspannung mit SHE optimierten Schaltwinkeln	76
5.10	Spektrum der verketteten Ausgangsspannung eines 14-stufigen Stromrichters mit SHE optimierten Schaltwinkeln	77
5.11	Zeitlicher Verlauf der relevanten Zweiggrößen	79
5.12	Spannungshub der Submodulspannung in Abhängigkeit der Submodulkapazität	80
5.13	Funktionsdemonstrator des LV-M2C	82
5.14	Zentrale Steuerung des M2C	84
5.15	Aufbau der zentralen Steuerung	84
5.16	Struktur der gesamten Ansteuerung	85
5.17	Struktur des 4-fach Submoduls	86
5.18	Aufbau des 4-fach Submoduls	87
5.19	Isolierter MOSFET-Treiber auf Basis des ADuM4224	87
5.20	Spannungsmessung des M2C-Submoduls	88
5.21	Hilfsspannungsversorgung der Vierfach-Submodule	90
5.22	Aufbau der Hilfsspannungsversorgung	91
5.23	Temperaturmessung auf Basis eines diskreten Delta-Sigma-Wandlers	91
5.24	Vorladung der Submodulkapazität auf Basis eines Spannungservvielfachers (Villard-Vervielfacherschaltung)	93
5.25	Aufbau der Zweigstrommessung	94
5.26	Zweigstrommessung auf Basis eines Kompensationswandlers	95
5.27	Potentialbezug der Phasenspannungsmessung	96
5.28	Struktur der Ringbus Kommunikation	97
5.29	Kommunikationsnetzwerk im Halbduplex-Verfahren auf Basis von Pulstransformatoren	98
5.30	Kommunikationsnetzwerk im Vollduplex-Verfahren auf Basis von Digitalisolatoren	98
5.31	Telegramme zwischen der Steuerung und den Submodulen (Decodiert)	99
5.32	Zuordnung der Telegramme mittels der Erfassung der Sendepause	100
5.33	Zeitlicher Ablauf der internen Kommunikation	101
5.34	Automat zur Erzeugung des Synchronisationspulses	102
5.35	Sendepausen-basierte Schnellabschaltung des Umrichters	103
5.36	Anzahl der fehlerhaften Pakete und der Fehlerart in Bezug auf die Störung	105
6.1	Einphasiges Ersatzschaltbild der Netzanbindung	110

6.2	Zeigerdiagramm der Netzanbindung	110
6.3	Netzfilter auf Basis von Serienschwingkreisen mit nachgeschaltetem Tschebyscheff-Filter	113
6.4	Struktur der Submodulvorladung	115
6.5	Vorladung eines Submoduls auf Basis einer Zweipunktregelung	115
6.6	Struktur der dreiphasigen SRF-PLL	116
6.7	Sprungantwort der dreiphasigen PLL ($\Delta\phi = -\frac{\pi}{3}$)	118
6.8	Struktur der AIC-Regelung	119
6.9	Struktur eines Stromreglers	120
6.10	Sprungantwort eines Stromreglers (Sollwertsprung auf 10 Ampere)	120
6.11	Simulationsergebnis der Netzanbindung	121
7.1	Halbduplex Kommunikation während des Betriebs	123
7.2	Jitter der Synchronisation	124
7.3	Beeinträchtigung der Kommunikation während des Schaltvorgangs	125
7.4	Verfälschung eines Bits bei laufender Kommunikation	125
7.5	Schaltentlastung in Abhängigkeit vom Zweigstrom	126
7.6	Schaltvorgänge innerhalb des Submoduls	127
7.7	Schaltvorgang des Submoduls	128
7.8	Submodulspannung im Betrieb	129
7.9	Vorladung eines Submoduls unter Verwendung einer Zweipunktregelung	130
7.10	Zwischenkreisstrom bei 1,5 kW Ausgangsleistung	130
7.11	Ströme des M2C im gesteuerten Betrieb bei 5,9kW Ausgangsleistung an einer ohmschen Last	131
7.12	Submodulspannung des M2C im gesteuerten Betrieb bei 2,2kW Ausgangs- leistung an einer ohmschen Last	132
7.13	Gemittelte Submodulspannung des M2C im gesteuerten Betrieb bei 2,2kW Ausgangsleistung an einer ohmschen Last	133
7.14	Summenspannung eins Phasenmoduls bei 450V U_{ZK}	135
7.15	Spannungseinbruch während der Submodulumschaltung bei 450V U_{ZK}	135
7.16	Ausgangsspannung bei 2,2kHz Drehfeldfrequenz	137
7.17	Führungsverhalten der Stromrichterregelung	138
7.18	Führungsverhalten der Stromrichterregelung	138
7.19	Ausgangsspannung des M2C ohne Filter an 100 Ω	139
7.20	Gemessene Störaussendung des M2C ohne Netzfilter	140
7.21	Berechnete Störaussendung des M2C ohne Netzfilter	141
7.22	Simulierte Störaussendung des M2C ohne Netzfilter	142
7.23	Messaufbau zur Messung von leitungsgebundenen Sörungen	144
7.24	Übersprechen des CM/DM-Separators	146
7.25	Vergleich Gegentaktstörung ohne Filter	147
7.26	Vergleich Gegentaktstörung mit Filter	147
7.27	Vergleich Gleichtaktstörung mit Filter	148