

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto: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

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Wechselrichter-Topologien im Niederspannungsnetz</b>	<b>9</b>
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
<b>3</b>	<b>Modulare Multilevel Converter</b>	<b>19</b>
3.1	Prinzipieller Aufbau . . . . .	20
3.2	Funktionsweise . . . . .	24
3.3	Eigenschaften . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Verfahren zur Messung und zur Begrenzung von Störaussendungen</b>	<b>35</b>
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
<b>5</b>	<b>M2C für Anwendungen im Niederspannungsnetz</b>	<b>61</b>
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
<b>6</b>	<b>Netzanbindung</b>	<b>109</b>
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
<b>7</b>	<b>Untersuchungen am Versuchsaufbau</b>	<b>123</b>
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
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>151</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>153</b>



# 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
$x, h, \sigma$	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
$\varphi$	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
$\alpha$	Schaltwinkel
$\omega$	Kreisfrequenz
$\omega_{LO}$	Kreisfrequenz des Lokaloszillators
$z$	Parameter der $z$ -Transformation
$V_{DC}$	Versorgungsspannung
$V_{Ref}$	Referenzspannung
$Q$	Gütefaktor
$U_{\alpha}, U_{\beta}$	Spannungen im $\alpha, \beta$ -System
$U_d, U_Q$	Spannungen im $d, q$ -System
$\Phi$	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 Spannungsvervielfachers (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 100Ω . . . . .	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