Modular Multilevel Converter M2C für Multiterminal HVDC

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

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Daniel Schmitt

Neubiberg
2012

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Klaus Landes

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Marquardt

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Stimper

Tag der Promotion: 17. Oktober 2012

Forschungsberichte Leistungselektronik und Steuerungen

Band 7

Daniel Schmitt

**Modular Multilevel Converter M2C
für Multiterminal HVDC**

Shaker Verlag
Aachen 2012

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1499-0

ISSN 1867-5700

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

– Danke für die Hand, die Du mir gegeben hast. –

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Leistungselektronik und Steuerungen an der Fakultät der Elektro- und Informationstechnik an der Universität der Bundeswehr München im Zeitraum von September 2005 bis Oktober 2011. Die gesamte Entwicklungsarbeit wurde maßgeblich von ITIS e.V. und deren Forschungspartner unterstützt und finanziert.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Marquardt, danke ich ganz herzlich für die Betreuung meiner Promotion. Sein großer Erfahrungsschatz, gepaart mit einer enormen technischen Kreativität und seiner außerordentlichen Gabe, zukünftige leistungselektronische Problemstellungen frühzeitig zu erkennen, haben entscheidend zum Erfolg meiner Arbeit beigetragen. Die unzähligen Diskussionen und die vielen Hilfestellungen, sowie Anleitungen, um komplexe Themen effektiv bearbeiten zu können, waren sehr konstruktiv und ermöglichten mir oft eine neue Sichtweise auf die Welt der Leistungselektronik. Aber nicht nur die technischen Möglichkeiten für Forschung und Entwicklung waren am Lehrstuhl exzellent, auch die vielfältigen Aufgaben, wie Lehre, Beschaffung, Verwaltung, Organisation und den damit verbundenen weitreichenden Freiheiten, haben mir ein breites Spektrum der Entwicklung ermöglicht.

Bei dem Vorsitzenden der Prüfungskommission, Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Landes, möchte ich mich für die Organisation und Moderation der Prüfung bedanken. Gleichermaßen gilt dies für den Korreferenten, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Stimper, für das entgegengebrachte Interesse an meiner Arbeit.

Bedanken möchte ich mich bei allen Kollegen und Kolleginnen des Instituts für elektrische Antriebstechnik, in deren Umfeld ich mich stets sehr wohl gefühlt habe. Ebenso beim Umrichterteam Anton Lesnicar und Roman Hamerski, die mich damals als sehr jungen Ingenieur kennenlernten und mich in kürzester Zeit – durch eine sehr gute und vor allem intensive Einarbeitung – integrierten. Zusätzlich zu meiner Person wurde das Team mit Silke Allebrod verstärkt, welche die regelungstechnische Untersuchung des M2C übernahm. Die vielen Diskussionen und Iterationsschritte mit ihr führten letztendlich zu einer Komplettinbetriebnahme des Prototypen, Danke. Nicht zu vergessen ist unser Oldie Harald Hofmann und mein Freund Björn Weigold, die nicht nur beruflich immer ein offenes Ohr bewiesen und mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Weiterhin gilt mein Dank allen Studien- und Diplomarbeitern bzw. Bachelor- und Master-Studenten, die durch ihre Arbeiten maßgeblich zu den erfolgreichen Forschungsergebnissen beigetragen haben. Für die Umsetzung der mechanischen Aufbauten, bei dem doch sehr hohen konstruktiven Aufwand des M2C, möchte ich

den beiden Werkstätten von Uli Bayle und Jürgen Hofherr meinen Dank aussprechen. Zuletzt möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling und seinem Laboringenieur Dr.-Ing. Benno Lange herzlich bedanken, die den M2C und mich für die ganze Zeit meiner Promotion als Gäste in ihrem Labor beherbergten.

Meiner Familie, vor allem meinem Bruder Elmar, möchte ich für die fortwährende Unterstützung in jeglichen Belangen danken. Gemeinsam zur Familie bildeten meine engsten Freunde einen wohltuenden Pol der Ruhe, der mich immer wieder mit Energie und Motivation versorgte, um den Weg bis hierher zu gehen an dem ich heute stehe. Für diese schier endlose Geduld mit diesem 'Schmitt'...
...einfach nur Danke.

Unterhaching, im Oktober 2011

DANIEL SCHMITT

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	21
2	Umrichter-Topologien für die Energieübertragung	25
2.1	Zweipunkt-Umrichter	26
2.2	Neutral-Point-Clamped Umrichter	28
2.3	Capacitor-Clamped Umrichter	31
2.4	Series Cascaded H-Bridge Umrichter	34
2.5	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung HGÜ	37
2.5.1	Entwicklung der HGÜ	37
2.5.2	Ausführung von HGÜ-Anlagen	37
2.5.3	Übersicht von HGÜ- und FACTS-Projekten	41
3	Modular Multilevel Converter	45
3.1	Stromrichterkonzept	46
3.2	Regelungskonzept des M2C	55
4	Konzeption der Doppelsubmodul-Elektronik	65
4.1	Autarke DSM-Versorgung	68
4.1.1	Aufbau und Funktionsweise der DSM-Versorgung	68
4.1.2	Allgemeine Kaskodenschaltung	69
4.1.3	Tiefsetzsteller mit Kaskodenschaltung	71
4.1.4	Galvanische Trennung mit Gleichrichterausgang	72
4.2	IGBT Treiberschaltung	74
4.2.1	Spannungsversorgung der Treiberschaltung	74
4.2.2	Komparatorschaltung zur Schaltsignalauskopplung	76
4.2.3	Darlington-Verstärkerstufe mit Gate-Ansteuerung	77
4.2.4	Kapazitive Leistungseinkopplung	79
4.3	LWL-Kommunikationsschnittstelle	82
4.3.1	Eigenschaften der Kommunikationsschnittstelle	82
4.3.2	Realisierung der Kommunikationsschnittstelle	85
4.3.3	Funktionsweise der Kommunikationsschnittstelle	86
4.3.4	Codierung mit zyklischem (7,3)-Code	89
4.3.5	Protokoll der Schaltsignalübertragung	91

5	Messergebnisse	97
5.1	Vermessung der DSM-Versorgung	97
5.2	Vermessung der Treiberschaltung	102
5.2.1	Messung Einschaltverhalten	103
5.2.2	Messung Ausschaltverhalten	104
5.2.3	Messung reales Abschaltverhalten des IGBT	105
5.2.4	Vermessung der Schalt- und Verriegelungszeiten der IGBT	106
5.2.5	Doppelsubmodul-Test mit Dreifach-Puls	107
5.3	Hochfahrprozess (Black-Start)	108
5.4	Frequenzvariable Netzeinspeisung	111
5.4.1	Betrieb der Laboranlage M2C als frequenzvariable Einspeisung an einer dreiphasigen induktiven Last	111
5.4.2	Sollwertsprung der Energieregeler, zur Simulation einer Netzstörung	116
5.5	Back-to-Back Betrieb	120
5.5.1	Elektrische Energieübertragung mit Hilfe von Netzkurzkupplungen	120
5.5.2	Laboranlage M2C im simulierten Back-to-Back Betrieb	122
6	DC-Breaker für Multiterminal DC-Netze	131
6.1	Neuartige Schaltungstopologie eines DC-Breakers	133
6.2	Simulation des neuartigen DC-Breakers	138
6.2.1	Unipolare Energieübertragung mit Kurzschluss der Ausgangsseite	143
6.2.2	Bipolare Energieübertragung mit Erdfehler	146
6.3	Analytische Betrachtung des DC-Breakers	151
6.3.1	Formale mathematische Beschreibung	151
6.3.2	Analyse der Auslegungsparameter und Vergleich der analytischen Berechnung mit den Simulationsergebnissen	163
7	Zusammenfassung	169
8	Anhang	171
8.1	Aufbau der M2C-Laboranlage	171
8.1.1	Doppelsubmodul DSM	172
8.1.2	Schaltwarte	177
8.1.3	Messdatenerfassung der ZSE	178
8.2	Betriebsmittel der Laboranlage M2C	181
8.2.1	REO Dreiphasen DC-Versorgung (VDE 0160)	181
8.2.2	Drosselndaten	182
8.3	Dimensionierung und hardwaretechnische Realisierung der DSM-Versorgung	183
8.4	Betriebsverhalten der LWL-Kommunikationsschnittstelle	188
8.4.1	Übertragungsbeispiele	188
8.4.2	Barker-Code Erkennung	190

8.5	Ergänzende Messergebnisse zu den Kapiteln 5.4 und 5.5	193
8.5.1	Messmittel zur Messung an der Laboranlage M2C	195
8.5.2	Messung bei $\hat{U}_{LL} = 200V$ und $f_1 = 16,67Hz$	196
8.5.3	Messung bei $\hat{U}_{LL} = 1200V$ und $f_1 = 60Hz$	198
8.5.4	Messung bei $\hat{U}_{LL} = 500V$ und positivem Sollwertsprung . . .	200
8.5.5	Messung bei U1: $\hat{U}_{LL} = 1200V$ und $f_1 = 60Hz$ U2: $\hat{U}_{LL} = 600V$ und $f_1 = 60Hz$	202
8.5.6	Messung bei U1: $\hat{U}_{LL} = 1200V$ und $f_1 = 60Hz$ U2: $\hat{U}_{LL} = 1200V$ und $f_1 = 60Hz$	204
8.6	Ergänzende Vergleiche der analytischen Berechnung zu Kapitel 6.3.2	206
8.7	DESERTEC Foundation	210

Literaturverzeichnis**215**

Symbolverzeichnis

Formelzeichen

a	Variable
b	Breite, Variable
c	Codewortvorrat, Variable
C	Kapazität, Kollektor
C_{rss}	Rückwirkungskapazität
d	Datenvektor, Durchmesser, Dämpfung, Gewichtungsfaktor, Hammingdistanz, Variable
e	eulersche Zahl
ϵ	relative Spannungswelligkeit
f	Frequenz, Variable
f_1	Grundfrequenz
f_{cm}	Common-Mode Frequenz
F_E	erkennbare Fehler
F_K	korrigierbare Fehler
f_P	Pulsfrequenz
f_S	Schaltfrequenz
g	Generatorpolynom, Variable
G	Generatormatrix
h	Hilf-, Höhe, Variable
i	Zählindex ($i = 1, 2, 3, \dots$)
I, i	Strom
I_{ADJ}	variabler Strom (temperaturabhängig)
I_C	Kollektorstrom
$I_{C,nom}$	Kollektor-Dauergleichstrom
I_d	Einspeisegleichstrom
I_G	Gatestrom
i_{kr}, i_{krx}	Kreisstrom
I_L, I_x	Laststrom, Strangstrom
i_z, i_{zxP}, i_{zxN}	Zweigstrom
ϑ	Leitungswinkelverschiebung
k	normierte Spannungsaussteuerung, Index, Variable
kop	Kopplungsfaktor
l	Länge, Variable

L	Drossel, Induktivität
L_D	Lastdrossel
L_L	Leitungsinduktivität
L_z	Zweigdrossel
M	Masse, MOSFET
m	normierte Stromaussteuerung, Stufenzahl, Variable
n	Nenn-, Reihenschaltzahl, Zählvariable
η	Wirkungsgrad
o	Variable
ϕ	Phasenwinkel (zwischen Strom und Spannung)
φ_{LP}	Leistungspulsationswinkel
P, p	Leistung, Prüfmatrix, Variable
P_V	Verlustleistung
P_{VF}	Durchlassverluste
P_{VS}	Schaltverluste
p_z	Zweigleistung
Q	Güte
Q_G	Gateladung
R, r	Sicherheitsfaktor, Widerstand
r_{diff}	differentieller Widerstand
R_V	Vorwiderstand
S, s	Laplace-Parameter, Schottky-Diode
T	Schalter, Temperatur, Transformator, Transistor
t	Zeit
$t_{B,max}$	maximale Berechnungszeit
t_q	Freiwerdezeit
t_s	Schonzeit
τ	Zeitkonstante
t_{PWM}	Zykluszeit
t_{Trapez}	Trapezanstiegszeit
U, u	Spannung
$U1$	Umrichter 1
$U2$	Umrichter 2
U_B	Basisspannung
U_C	Kollektorspannung, Submodulspannung, Zwischenkreisspannung
U_{CC}	Versorgungsspannung DSM-Elektronik
U_{CE}	Kollektor-Emitter Spannung
U_{CES}	Kollektor-Emitter Sperrspannung
U_{cm}	Common-Mode Spannung
u_{cmpp}	prozentualer Skalierungsfaktor
U_d	Gleichstromsammelschienen-Spg., Zwischenkreisspannung
U_{DS}	Drain-Source Spannung
U_E	Emitterspannung
U_F	Durchlassspannung

U_{GE}	Gate-Emitter Spannung
U_{GS}	Gate-Source Spannung
U_L, U_x	Lastspannung, Strangspannung
U_{LL}, U_{xx}	Leiter-Leiter Spannung, verkettete Spannung
U_N	Ausgangsspannung, Nennspannung
U_r	Bemessungsspannung, Rated Voltage
$U_{SM}, U_{xSMiP}, U_{xSMiN}$	Submodulspannung, Zwischenkreisspannung
U_{sum}	Summe der Zweigsummenspannungen einer Phase
ΔU_{sum}	Differenz der Zweigsummenspannungen einer Phase
$U_{sum,0}$	Summennullspannung
U_{sumxP}, U_{sumxN}	Zweigsummenspannung
U_{T0}	Schleusenspannung
U_v	Zweigspannung der Vorsteuerung
U_X	Klemmenspannung
U_z, U_{zxP}, U_{zxN}	Zweigspannung
U_{zd}	Spannungsabfall über der Zweigdrossel
$\ddot{u}$	Übersetzungsverhältnis
VDR	Varistor, Voltage Dependent Resistor
ω	Kreisfrequenz
W	Energie

Indizes

<i>A</i>	Ausgang
<i>ADJ</i>	variabel, veränderbar
<i>B</i>	Basis, Berechnungs-
<i>C</i>	Current, Kapazität, Kollektor
<i>CE</i>	Kollektor-Emitter
<i>Ch</i>	Chopper
<i>cm</i>	Common-Mode
<i>cmpp</i>	Common-Mode Prozent
<i>CSG</i>	Kapazität des Stromimpulsgenerators
<i>D</i>	Drain, Drossel, Dämpfung, Schaltverzögerung
<i>Daten</i>	Datenblattwerte
<i>DG</i>	Dämpfungsglied
<i>diff</i>	differentiell
<i>E</i>	Eingang-, Emitter, erkennbar
<i>EF</i>	Emitterfolger
<i>eff</i>	Effektivwert
<i>F</i>	Forward
<i>G</i>	Gate
<i>GE</i>	Gate-Emitter
<i>ges</i>	Gesamtwert
<i>grenz</i>	Grenzwert
<i>GS</i>	Gate-Source
<i>h</i>	Hilfs-
<i>HS</i>	Hybrid-Schalteinheit
<i>i</i>	Zählindex ($i = 1, 2, 3, \dots$)
<i>in</i>	Eingang
<i>K</i>	Kabel, korrigierbar
<i>KL</i>	kapazitive Leistungseinkopplung
<i>kr</i>	Kreis
<i>L</i>	Leiter, Leitung
<i>LL</i>	Leiter-Leiter
<i>LP</i>	Leistungspulsation
<i>LSG</i>	Induktivität des Stromimpulsgenerators
<i>max</i>	maximal, Maximalwert
<i>mess</i>	Messwert
<i>min</i>	minimal, Minimalwert
<i>N</i>	N-Zweig, negativ, negativer Pol, Nennwert
<i>nom</i>	nominell
<i>off</i>	Aus
<i>on</i>	Ein
<i>out</i>	Ausgang
<i>P</i>	P-Zweig, positiv, positiver Pol

<i>PWM</i>	Pulsweitenmodulation
<i>r</i>	Bemessung, Rated
<i>rrm</i>	Repetitive Reverse Max
<i>RSG</i>	Widerstand des Stromimpulsgenerators
<i>rss</i>	Reverse Transfer, Rückwirkung
<i>s</i>	Schon-
<i>S</i>	Schalt-, Schalter, Source, Sperrspannung
<i>SG</i>	Stromimpulsgenerator
<i>SM</i>	Submodul
<i>sum</i>	Summe
<i>tot</i>	Gesamtwert
<i>Trapez</i>	Trapezform
<i>U1</i>	Umrichter 1
<i>U2</i>	Umrichter 2
<i>v</i>	Vorsteuerung
<i>V</i>	Verlust, Vor-
<i>VDR</i>	Varistor, Voltage Dependent Resistor
<i>x</i>	Phase ($x = 1, 2, 3$ bzw. $x = U, V, W$)
<i>z</i>	Zweig
<i>*</i>	Sollwert

Abkürzungen

AC	Alternating Current, Wechselstrom
ADC	Analog/Digital-Converter
AVT	Actual-Value-Transmitter
CAN	Controller-Area-Network
C-DSM	Clamp-Doppelsubmodul, Clamp-Double-Submodule
CSC	Current-Source-Converter
CSP	Concentrating Solar-Thermal Power
<i>D</i>	Diode
DC	Direct Current, Gleichstrom
DG	Dämpfungsglied
DII	DESERTEC Industrial Initiative Planungsgesellschaft
DLR	Deutsches Zentrums für Luft- und Raumfahrt
DSM	Doppelsubmodul
e.V.	eingetragener Verein
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
ESB	Ersatzschaltbild
EU	Europa
EUMENA	Europe, Middle East und North Africa
FACTS	Flexible-AC-Transmission-Systems
FB-SM	Full-Bridge-Submodule
FET	Field-Effect Transistor
FPGA	Field Programmable Gate Array
FR	Flame Retardant
GKK	Gleichstrom-Kurzkupplung
GPIB	General Purpose Interface Bus
GTO	Gate Turn-Off
GUI	Graphical User Interface
HB-SM	Half-Bridge-Submodule
Hg.	Herausgeber
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
HS	Hybrid-Schalteinheit
HV	High-Voltage, Hochvolt
HVDC	High-Voltage-Direct-Current
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
IGCT	Integrated-Gate Commutated Thyristor
ITIS	Institut für Technik Intelligenter Systeme
LEM	Liaisons Electroniques-Mécaniques
LDT	Long-Distance-Transmission
LWL	Lichtwellenleiter
<i>M</i>	MOSFET
M2C	Modular Multilevel Converter

MMC	Modular Multilevel Converter
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
N	negativer Pol
n.b.	nicht bekannt
n.v.	nicht verwendet
NPC	Neutral-Point-Clamped
OPV	Operationsverstärker
P	positiver Pol
PC	Personal Computer
PTD	Power Transmission and Distribution, Abteilung der Siemens AG
PWM	Pulsweitenmodulation
S	Schottky-Diode
SG	Stromimpulsgenerator
SM	Submodul
SRG	Schieberegister
Spg.	Spannung
SVAR	statische Blindleistungskompensation
SVC	Static Var Compensator
T	Temperatur, Transistor, Transformator
<i>Thy</i>	Thyristor
TO	Transistor-Outline
TSE	Trägerstauereffekt
TU	Temperatur Umgebung
U1	Umrichter 1
U2	Umrichter 2
URL	Uniform Resource Locator
USB	Universal Serial Bus
USV	unterbrechungsfreie Stromversorgung
VDR	Varistor, Voltage Dependent Resistor
VPE	vernetztes Polyethylen
VSC	Voltage-Source-Converter
VSI	Voltage-Source-Inverter
VSP	Ventilsperre
Z	Zener-Diode
ZSE	zentrale Steuerungseinheit