

# **Neuartiger, Modularer Mehrpunktumrichter M2C für Netzkupplungsanwendungen**

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. Anton Lesnicar

Neubiberg

2008

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Klaus Landes

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

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Bernet

Tag der Promotion: 16. Mai 2008

Forschungsberichte Leistungselektronik und Steuerungen

Band 1

**Anton Lesnicar**

**Neuartiger, Modularer Mehrpunktumrichter M2C  
für Netzkupplungsanwendungen**

Shaker Verlag  
Aachen 2008

**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., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7660-7

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)

– Zum Dank an meine Eltern und an Frau Weiß –



## **Danksagung**

Im Rahmen meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Lehrstuhl für Leistungselektronik und Steuerung an der Universität der Bundeswehr München entstand die vorliegende Arbeit mit der finanziellen Unterstützung durch die Siemens AG, DT LD.

Eingangs möchte ich dem Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. Rainer Marquardt für die Betreuung meiner Arbeit besonderen Dank aussprechen. Sein großer beruflicher Erfahrungsschatz sowie sein tief greifendes Fachwissen haben den Erfolg dieser Promotion gefördert. Darüber hinaus hat er mir hilfreiche Methoden für die Herangehensweise an schwierige und komplexe Themen aufgezeigt.

Nicht weniger will ich Prof. Dr.-Ing. Klaus Landes als Vorsitzenden des Promotionsausschusses und Prof. Dr.-Ing. Steffen Bernet als Koreferenten für das Interesse an meiner Arbeit danken.

Ein herzliches Dankeschön geht auch an meine Kolleginnen und Kollegen des Institutes für die interessante und schöne Zeit während meiner Doktorarbeit. Durch die zahlreichen konstruktiven Diskussionen und die gute Teamarbeit am Prototypen-Umrichter wurde das Gelingen dieses ehrgeizigen Projektes erst ermöglicht.

Abschließend möchte ich hier die Gelegenheit nutzen, meiner Familie für die grundlegende Unterstützung zu danken. Meinen Eltern verdanke ich unter anderem die Gabe, große Herausforderungen positiv anzunehmen. Meiner Frau Jasminka und meinem Sohn Riaan will ich für die Liebe und viele Geduld meine ganz besondere Wertschätzung aussprechen.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Bestehende Hochleistungsumrichter-Konzepte</b> .....	<b>11</b>
2.1	Umrichter mit seriengeschalteten Halbleitern.....	13
2.2	Diode Clamped Converter.....	16
2.3	Capacitor Clamped Converter.....	18
2.4	Cascaded H-Bridge Converter .....	21
<b>3</b>	<b>Modular Multilevel Converter M2C</b> .....	<b>25</b>
3.1	Stromrichterkonzept .....	25
3.1.1	Funktionsweise und Steuerung .....	26
3.1.2	Prinzipielles Steuerverfahren zur Spannungssymmetrierung.....	30
3.2	Bauteilaufwand .....	32
3.2.1	Energiespeicherauslegung .....	34
3.2.2	Halbleiteraufwand und Halbleiterverluste.....	47
3.2.3	Kreisströme.....	53
<b>4</b>	<b>Ansteuerverfahren</b> .....	<b>65</b>
4.1	Steuerverfahren mit vorausberechneten Pulsmuster .....	67
4.2	Bestimmung der Zweigsollspannung.....	69
4.3	PWM-Verfahren mit gemittelten Aussteuergrad .....	73
4.4	PWM-Verfahren mit Master/Slave – Aussteuergrad .....	75
4.5	Raumzeigerverfahren im 3-dimensionalen Raum.....	78
4.6	Schnelles Raumzeigerverfahren.....	85
4.7	Steuerverfahren zur Reduzierung der Schaltverluste .....	89
<b>5</b>	<b>Simulationsergebnisse</b> .....	<b>93</b>
5.1	Simulationsmodell.....	93
5.2	Black Start .....	94
5.3	Stationäres Betriebsverhalten.....	96
5.4	Redundanzfall .....	105
5.5	Bremssteller.....	110
5.6	Netzkupplungsanwendung .....	113
5.7	Kurzzeitiger Netzausfall.....	115

## IV Inhaltsverzeichnis

---

<b>6</b>	<b>Untersuchungen an der Versuchsanlage .....</b>	<b>119</b>
6.1	Aufbau der universellen Versuchsanlage .....	120
6.1.1	Zentrale Steuereinheit.....	122
6.1.2	Doppelsubmodul .....	123
6.1.3	Stromrichterschrank .....	126
6.2	Messergebnisse .....	127
6.2.1	Black Start .....	127
6.2.2	1-phasiger Betrieb eines Mittelfrequenztransformators .....	129
6.2.3	3-phasiger Betrieb einer induktiven Last .....	131
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>134</b>
7.1	Konzeptvergleich .....	135
7.2	Theoretische Untersuchungen.....	137
7.2.1	Auslegung.....	137
7.2.2	Ansteuerverfahren .....	138
7.3	Simulative Untersuchungen .....	139
7.4	Experimentelle Untersuchungen.....	140
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>142</b>
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>147</b>
9.1	Allgemeiner Ansatz zur Berechnung der Verlustleistung .....	147
9.2	Simulationsergebnisse mit gemittelten Aussteuergrad.....	150
9.3	Aussteuergrade für das Raumzeigerverfahren im 3-dim. Raum .....	152
9.4	Messergebnisse an der Versuchsanlage.....	153

## Symbolverzeichnis

### Abkürzungen

AC	Wechselstrom (Alternating Current)
AFE	Active-Front-End
AHDL	Altera Hardware Description Language
ASM	Asynchronmaschine
D	Diode
DC	Gleichstrom (Direct Current)
DSM	Doppelsubmodul
DSP	Digitaler Signal Prozessor
DUR	Direktumrichter
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
FFT	Finite Fourier Transformation
FPGA	Field Programmable Gate Array
GTO	Gate Turn Off Thyristor
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
IdS	Interface dSpace
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	Integrated Gate-Commutated Thyristor
LWL	Lichtwellenleiter
MFT	Mittelfrequenztransformator
M2C	Modular Multilevel Converter
NPC	Neutral-Point Clamped
PCC	Power-Chip-Capacitor
PWM	Pulsweitenmodulation
SM	Submodul
SR	Stromrichter
SRS	Stromrichterschrank

T	Transistor
VHDL	Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language
WR	Wechselrichter
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
ZSE	Zentrale Steuereinheit
ZSM	Zweigstrommessung
4QS	Vierquadrantensteller (IGBT-Vollbrückenschaltung)

### Grundzeichen

A, a	Aussteuergrad
b	Mittlerer Gleichspannungsaussteuerungsgrad der Submodule im Zweig
C	Kapazität
f	Frequenz
I, i	Strom
k	Normierte Spannungsaussteuerung im Zweig
L	Induktivität
m	Stufenzahl, normierte Stromaussteuerung im Zweig
P, p	Leistung
Q, q	Ladung, Spannungsquelle
R, r	Widerstand
S	Scheinleistung
T	Periodendauer, Temperatur, Transformator
t	Zeit
U, u	Spannung
W	Energie
Z	Impedanz
$\alpha$	Schaltwinkel
$\varepsilon$	Relative Spannungswelligkeit
$\varphi$	Phasenwinkel (zwischen Strom und Spannung)
$\eta$	Wirkungsgrad
$\tau$	Zeitkonstante
$\omega$	Kreisfrequenz

**Indizes**

C	Kollektor, Kapazität
D	Diode
E	Emitter
eff	Effektivwert
F	Durchlass (Forward)
G	Gate
ges	gesamt
ist	Istwert
max	Maximalwert
min	Minimalwert
n	negativ
OFF	Aus-
ON	Ein-
p	positiv
PM	Phasenmodul
pri	primär
q	Ideale Spannungsquelle
ref	Referenzwert
S	Schalter, Streuung
sek	sekundär
soll	Sollwert
St	Steuerwert (z.B. $u_{St}$ = Steuerspannung)
V	Verlustwert (z.B. $P_V$ = Verlustleistung)
Z	Zweig

### Wichtige zusammengesetzte Größen

$f_N$	Netzfrequenz
$f_P$	Pulsfrequenz
$f_{SM}$	Mittlere Schaltfrequenz der Submodule
$f_{Sym}$	Mittlere Symmetrierfrequenz der Submodulspannungen im Zweig
$i_K$	Kreisstrom
$n_{low}$	Untere Anzahl an zuzuschaltenden Submodulen im Zweig
$n_{high}$	Obere Anzahl an zuzuschaltenden Submodulen im Zweig
$n_{Stufe}$	Anzahl der zuzuschaltenden Spannungsstufen (Sollwert)
$n_{SM}$	Gesamte Anzahl an installierten Submodulen pro Zweig
$n_{SZ}$	Theoretisch mögliche Anzahl an Schaltzuständen
$n_{SZ,Zweig}$	Anzahl an Schaltzuständen innerhalb eines Zweiges
$n_{VS}$	Anzahl unterschiedlicher Spannungsvektoren
$U_{CE}$	Kollektor-Emitter-Spannung
$U_{SM}$	Mittlere Submodulspannung
$U_{TO}$	Knickspannung einer Durchlasskennlinie
$r_{diff}$	Differentieller Widerstand
$R_{ESR}$	Serieller Ersatzwiderstand einer Kapazität
$T_{junct}$	Sperrschichttemperatur
$W_{OFF}$	Ausschaltverlustenergie während der induktiven Kommutierung
$W_{ON}$	Einschaltverlustenergie während der induktiven Kommutierung
$W_{REC}$	Ausschaltenergie der Dioden

### Symbole

$Re(x)$	Realteil der komplexen Größe $x$
$Im(x)$	Imaginärteil der komplexen Größe $x$