Modulares Mehrpunkt-Umrichtersystem - ein neuartiges Konzept am Beispiel der elektrischen Traktion

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. Martin Glinka

Neubiberg

2011

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. J. Schein
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. R. Marquardt
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. H.-G. Eckel
Tag der Promotion:	9. Juni 2010

Forschungsberichte Leistungselektronik und Steuerungen

Band 4

Martin Glinka

Modulares Mehrpunkt-Umrichtersystem – ein neuartiges Konzept am Beispiel der elektrischen Traktion

Shaker Verlag
Aachen 2011

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., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0105-1
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

– Zum Dank an meine Eltern, meine Lehrer und meine Frau –

Danksagung

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Marquardt danke ich sehr herzlich für die Betreuung meiner Promotion. Viele wertvolle Impulse und Diskussionen in ausgesprochen angenehmer Atmosphäre haben die vorliegende Arbeit wesentlich geprägt. Für das große entgegengebrachte Vertrauen und die weitreichenden Freiheiten bezüglich meiner vielfältigen Arbeiten am Institut bedanke ich mich sehr. Von dem in dieser Zeit gesammelten reichen Erfahrungsschatz profitiere ich in großem Maße.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Günter Eckel als Koreferent und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Schein als Vorsitzender des Prüfungsausschusses danke ich sehr herzlich für ihre Unterstützung und das der Arbeit entgegengebrachte Interesse. Dr.-Ing. Wolf-Dieter Weigel danke ich herzlich für die Initiierung des gemeinsamen Forschungsvorhabens zwischen dem Lehrstuhl von Prof. Dr.-Ing. Rainer Marquardt und der Siemens AG.

Herrn Andreas Köster, Geschäftsführer von ITIS e.V., danke ich vielmals für die immer freundliche und professionelle Betreuung. Ohne ITIS e.V. wäre die untersuchte Versuchsanlage in dieser Größenordnung nicht realisierbar gewesen. Insbesondere die unbürokratische, schnelle Bereitstellung der finanziellen Mittel für die unterschiedlichsten Arbeiten und Investitionen im Labor hat dieses Forschungsprojekt ermöglicht.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Elektrische Antriebstechnik sowie allen Diplom-, Studienarbeiten und Praktikanten möchte ich ganz herzlich für die sehr gute Zusammenarbeit in Büro, Labor und Werkstatt danken. Gerade durch das hohe Engagement aller Beteiligten ist die Installation der Versuchsanlage des M2C erst möglich geworden - ich denke, wir können alle gemeinsam auf den ersten M2C-Stromrichter stolz sein.

Meiner Familie und ganz besonders meiner Frau Ulla Glinka möchte ich für ihre sehr große Unterstützung und die viele Geduld im Laufe dieser Zeit sehr herzlich danken.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen III

Verzeichnisse der Grundzeichen, Indizes und Symbole V

1 Einleitung 9

2 Mittelspannungsumrichter - neue Möglichkeiten für die elektrische Traktion ... 11

2.1 Traktionsstromrichter - Stand der Technik 12

2.1.1 Stromrichterbetrieb am Wechselspannungsfahrdraht (AC-Netz) 13

2.1.2 Stromrichterbetrieb am Gleichspannungsfahrdraht (DC-Netz) 14

2.1.3 Stromrichterbetrieb am AC-Netz im Vergleich zum Betrieb am DC-Netz 14

2.2 Innovationsmöglichkeiten zukünftiger Traktionsantriebe und deren Anforderungen .. 14

2.3 Mittelspannungsumrichter und andere Alternativen zum Netztransformator 18

2.3.1 Zweipunktumrichter mit Serienschaltung von Leistungshalbleitern 19

2.3.2 Mehrpunktstromrichter mit Mittelpunktsdioden 21

2.3.3 Mehrpunktstromrichter mit Kondensatoren auf schwebendem Spannungspotenzial (Flying Capacitor Inverter) 22

2.3.4 Direkt- oder Matrixumrichter mit Mittelfrequenztransformator 23

2.3.5 Kaskadenschaltung mit Mittelfrequenzpotenzialtrennung 24

2.3.6 Traktionsstromrichter mit Modularem AC/AC-Stromrichter 26

2.3.7 Supraleitender Transformator 28

2.3.8 Weitere Mittelspannungsumrichtertopologien 29

2.4 Vergleich der Alternativen zum Netztransformator 33

2.4.1 Detailvergleich der Eigenschaften der Kernkomponenten 33

2.4.2 Vergleich wesentlicher Antriebseigenschaften 38

3 Modulares Stromrichterkonzept 42

3.1 Stromrichteraufbau und Steuerungsprinzip 42

3.1.1 Einphasiger Modularer Direktumrichter 42

3.2 Die Varianten des Modularen Stromrichterkonzepts 70

3.2.1 Modulare Direktumrichter (AC/AC-M2C) 70

3.2.2 Modulare Zwischenkreisumrichter (DC/AC-M2C) 70

3.3 Versuchsanlage des Modularen Stromrichters 71

3.3.1 Stromrichterkonstruktion 72

3.3.2 Submodul 72

3.3.3 Stromrichtersteuerung 75

4 Eigenschaften des Modularen Direktumrichters als Traktionsstromrichter im Betrieb direkt am Fahrdraht 79
4.1 Einschaltvorgang des Stromrichters 81
4.2 Statisches Betriebsverhalten 82
4.2.1 Betrieb am 15kV/16,7Hz-Bahnnetz 82
4.2.2 Betrieb am 25kV/50Hz-Bahnnetz 84
4.2.3 Stromoberschwingungen 85
4.3 Dynamisches Betriebsverhalten 86

5 Modulares Stromrichterkonzept im Vergleich mit alternativen Varianten 88
5.1 Halbleiterverluste des Modularen Direktumrichters im Vergleich mit einem 2-Punkt-Direktumrichter 88
5.1.1 Vergleichsbedingung 89
5.1.2 Herleitung der Halbleiterverlustgleichungen 92
5.1.3 Herleitung der Gleichungen zur Ermittlung der Halbleiterflächen 100
5.1.4 Vergleich der Stromrichterverluste und Halbleiterflächen 108
5.2 Energiespeicheraufwand beim Modularen Stromrichter 111
5.3 Vergleich der Traktionsstromrichter Modularer Direktumrichter und Kaskadenschaltung mit mittelfrequenter Potenzialtrennung im Betrieb direkt am Fahrdraht 112
5.3.1 Stromrichterbetriebseigenschaften 113
5.3.2 Vergleich der Netzfilter 114
5.3.3 Vergleich des Halbleiteraufwandes beider Mittelspannungsstromrichter 116
5.3.4 Vergleich des Energiespeicheraufwands 119
5.3.5 Vergleich der MF-Trafos und der Stromrichterkonstruktion 119
5.3.6 Zusammenfassung 120

6 Zusammenfassung 122

7 Literaturverzeichnis 124

Anhang

A Leistungsaufteilung auf die Zweige des einphasigen Modularen Direktumrichters und deren Regelung 131
A.1 Zweigleistungen in Abhängigkeit der Klemmengrößen 131
A.2 Beliebiger Energieaustausch zwischen den Stromrichterzweigen 135
A.2.1 Energieaustausch innerhalb des Stromrichters durch eine Kreisstromregelung 136
A.2.2 Beliebiger Energieaustausch innerhalb des Stromrichters durch Steuerung von Gleichtaktspannung und Kreisstrom 138
A.2.3 Herleitung der analytischen Ergebnisse für die vorgestellten Verfahren 143
A.2.4 Berechnungsergebnisse der Steuerverfahren nach Anhang A.2.2 146

Verzeichnis der Abkürzungen

4QS	Vierquadrantensteller (IGBT-Vollbrückenschaltung)
ABG	Ansteuerbaugruppe
ASM	Asynchronmaschine
Conf.	Conference (Englisch)
DB	Deutsche Bahn
DCB	Direct Copper Bonded - Keramiksubstrat
DFT	Diskrete Fourier Transformation
DG	Drehgestell
DSM	Doppelsubmodul (Vollbrückenschaltung mit Speicherkondensator und Ansteuerbaugruppe bzw. Reihenschaltung von zwei Halbbrückenschaltungen mit zugeordneten Speicherkondensatoren und Ansteuerbaugruppe)
DUR	Direktumrichter
FPGA	Field Programmable Gate Array (Englisch)
FIT	Failure In Time
GS	Grundschwingung
GTO	Gate Turn Off Thyristor
HL	Halbleiter
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
Int.	International (Englisch)
LWL	Lichtwellenleiter
MF-Trafo	Mittelfrequenztrafo
MOSFET	Metall-Oxid-Semiconductor-Field-Effect-Transistor
M2C	Modular-Multilevel-Converter
n. v.	nicht vorhanden
OS	Oberschwingung
Proc.	Proceedings (Englisch)
PWM	Pulsweitenmodulation
PWR	Pulswechselrichter
SiC	Silizium Carbid
SM	Submodul (Vollbrückenschaltung mit Speicherkondensator und Ansteuerbaugruppe)

SK	Saugkreis (Serienschaltung aus Kondensator und Induktivität, deren Resonanzfrequenz auf die doppelte Netzfrequenz abgestimmt ist)
SR	Stromrichter
SW	Stromwandler
T	Transistor
THD	total harmonic distortion - Klirrfaktor
VB	Vollbrücke (Vollbrückenschaltung)
ZCS	Zero-Current-Switching
ZK	Zwischenkreis
ZSE	Zentrale Steuereinheit
ZVS	Zero-Voltage-Switching

Verzeichnisse der Grundzeichen, Indizes und Symbole

Allgemeine Bemerkungen

- Zeitlich veränderliche Größen, Momentanwerte werden mit Kleinbuchstaben gekennzeichnet, z.B. i_N, $i_N(t)$.
- Amplituden, Konstanten, Mittelwerte und Gleichgrößen werden mit Großbuchstaben gekennzeichnet, z.B. U_{SC}

Grundzeichen / Formelzeichen

â	Amplitude (der zeitlich veränderlichen Größe a)
$\overline{a}$	arithmetischer Mittelwert (der zeitlich veränderlichen Größe a)
$\overline{u}$	arithmetischer Mittelwert (der Größe u eines Stromrichterzweigs)
A, a	Aussteuergrad
C	Kapazität
f	Frequenz
I, i	Strom
L	Induktivität
M	Drehmoment
N	Anzahl (z.B. N_Z = Anzahl der Submodule eines Zweigs)
N	Anzahl der unipolaren Spannungsstufen von Spannungszwischenkreisumrichtern (inkl. Nullspannung)
P, p	Leistung
Q, q	Ladung
R, r	Widerstand
S, s	Scheinleistung
T	Periodendauer
T, t	Zeit
U, u	Spannung
V	Verstärkung
W	Energie
ü	Übersetzungsverhältnis
j	imaginäre Einheit
AC, ac	Wechselstrom (alternating current)
DC, dc	Gleichstrom (direct current)

Z	Zugkraft
atan2(x,y)	$\arctan\left(\frac{y}{x}\right)$, (Mathcad-Funktion mit x und y als reelle Skalare)
VZ(x)	Vorzeichen der Zahl x: VZ(x)= 1 für x≥0, sonst -1
α	Zündwinkel
μ	magnetische Feldkonstante
η	Wirkungsgrad
τ	Zeitkonstante
ω	Kreisfrequenz
Ψ	magnetische Flussverkettung
Φ	magnetischer Fluss
φ	Phasenwinkel (zwischen Strom und Spannung)

Indizes

A	Anode
amb	ambient (Umgebung)
B	Basis
C	Kollektor, Kapazität
D	Diode, Drain
E	Emitter
F	Fluss - (z.B. u_F = Flussspannung bzw. Durchlassspannung)
eff	Effektivwert
G	Gate
ges	gesamt
j	junction (Sperrschicht)
L	Last, Induktivität
M, m	Modulationsgrad
MF	Mittelfrequenz
mit	arithmetischer Mittelwert
n	negativ
OFF	Aus-

ON	Ein-
p	positiv
pri	primär
SC	Speicherkondensator (storage capacitor)
sek	sekundär
SK	Saugkreis
SM	Submodul
SS	Spitze-Spitze
St	Steuerwert (z.B. u_{St} = Steuerspannung)
tot	konstante Verzögerung (z.B. T_{tot} = konstante Totzeit)
V	Verlustwert (z.B. P_V = Verlustleistung)
Z	Zweig
ZK	Zwischenkreis
σ	Streuung

Wichtige zusammengesetzte Größen

R_{thjc}	Innerer Wärmewiderstand zwischen Sperrschicht und Gehäuse
T_j	Sperrschichttemperatur
U_{CE}	Kollektor-Emitter-Spannung
W_{OFF}	Ausschaltverlustenergie während der induktiven Kommutierung
W_{ON}	Einschaltverlustenergie während der induktiven Kommutierung

Symbole

$Re(x)$	Realteil der komplexen Größe x
$Im(x)$	Imaginärteil der komplexen Größe x
j	imaginäre Einheit
$\overline{x}$	arithmetischer Mittelwert
$\underline{X}$	komplexe Zeigergrößen
Δ	Differenz