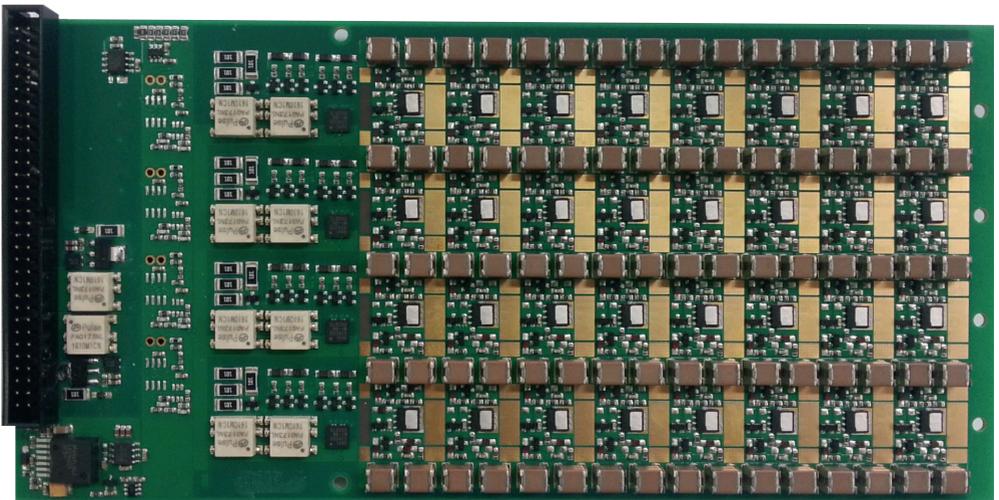


Florian Kapaun

Konzeption und Untersuchung eines fehlertoleranten FET-Umrichters



Konzeption und Untersuchung eines fehlertoleranten FET-Umrichters

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

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation

von

M.Sc. Florian Kapaun

Neubiberg 2019

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil Thomas Weyh

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

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Marc Hiller

Tag der Promotion: 18.03.2019

Forschungsberichte Leistungselektronik und Steuerungen

Band 11

Florian Kapaun

**Konzeption und Untersuchung
eines fehlertoleranten FET-Umrichters**

Shaker Verlag
Düren 2019

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., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6661-6

ISSN 1867-5700

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Leistungselektronik und Steuerungen an der Universität der Bundeswehr München.

Die Promotion wurde mir durch meinen Doktorvater Prof. Dr.-Ing Rainer Marquardt ermöglicht. Hier möchte ich meine große Dankbarkeit für die hervorragende Betreuung, die Unterstützung und die guten Ratschläge während der vergangenen sechs Jahre ausdrücken. Prof. Marquardt ist stets bereit, seine Mitarbeiter an seinem umfangreichen Erfahrungsschatz teilhaben zu lassen und konnte mir viele Weisheiten, die über die technischen Details der Arbeit hinausgehen, vermitteln.

Außerdem bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing Marc Hiller für die Übernahme des Zweitgutachtens und die sehr netten und konstruktiven Gespräche.

Auch Prof. Dr.-Ing habil. Thomas Weyh sei an dieser Stelle für die Leitung des Prüfungsausschusses und den reibungslosen Ablauf vor und während der Prüfung gedankt.

Ein großer Dank gebührt meinen aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für das tolle Arbeitsklima, den regen Austausch und die vielen schönen Stunden bei der Arbeit. Besonders Dr.-Ing. Martin Schulz war und ist mir stets ein wertvoller Gesprächspartner und Freund.

Meiner Frau Christine danke ich ganz besonders für ihre positive und antreibende Art, die vor allem nach Rückschlägen immer zu neuer Motivation verholfen hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Fehlertoleranz und redundante Strukturen in leistungselektronischen Systemen	3
2.1	Aufbau- und Verbindungstechnik in leistungselektronischen Systemen	6
2.1.1	Gängige Kontaktierungsmethoden für Halbleiter	7
2.1.2	Aufbau und Kontaktierung von Leistungsmodulen	9
2.1.3	Kontaktierung einer platinenbasierten Leistungseinheit	11
2.1.3.1	Thermische Betrachtung der LVC-Kontaktierung	13
2.1.3.2	Umsetzung beim LVC	16
2.1.3.3	Möglichkeiten zur Verspannung	18
2.2	Möglichkeiten zur Spannungsversorgung leistungselektronischer Systeme	20
2.3	Realisierung von Redundanz in Signal- und Messelektronik	22
2.4	Redundanz in leistungselektronischen Systemen	23
2.4.1	Redundanz von Umrichtern in der Hoch- und Mittelspannungstechnik	23
2.4.2	Redundanz von Umrichtern im Niederspannungsbereich	26
2.5	Realisierung in zukünftigen Schaltungen	27
3	Konzept und Aufbau des Umrichter-Leistungsteils	29
3.1	Das Konzept der Switching Cells	30
3.2	Realisierung von Switching Cells auf einer Multilayer-Platine	32
3.3	Kombination von Switching Cells zum Low Voltage Converter	36
3.4	Aufbau und Layout der LVC-Leiterplatte	39
3.4.1	Layout der LVC-Leiterplatte	39
3.4.2	Anordnung der LVC-Funktionsgruppen	40
4	Spannungsversorgung, Treiber und Sensorik des LVC	43
4.1	Galvanische Trennung und Spannungsversorgung des LVC	43

4.2	Grundlagen von Treiberschaltungen	45
4.2.1	Unterschiede bei Treiber-ICs	46
4.2.2	Möglichkeiten zur Spannungsversorgung der Treibereinheit	46
4.3	Treiberschaltung beim LVC	48
4.3.1	Filter	49
4.3.2	Gegentaktendstufe	52
4.3.3	Offset-Shift-Circuit	53
4.3.4	Gate-Widerstand und Local Turn-Off-Circuit	53
4.4	Strom- und Spannungsmessung	56
4.4.1	Grundlagen der Strommessung	56
4.4.2	Optimierte Strommessung beim LVC	57
4.4.3	Beschreibung der Strommessschaltung	60
4.4.4	Spannungsmessung	63
5	Messungen am LVC-Prototypen	65
5.1	Prototyp des LVC	65
5.2	Schaltverhalten des LVC	66
5.3	Bestimmung der Kommutierungsinduktivität	67
5.4	Bestimmung der Schaltverluste	71
5.4.1	Bestimmung der Schaltverluste über Variation der Schaltfrequenz (Messmethode 1)	73
5.4.2	Schaltverlustbestimmung mit Vollbrückentopologie und Lastkom- pensation (Messmethode 2)	75
5.4.3	Messtechnische Ermittlung der Schaltverluste über Messmethode 1	78
5.4.4	Messtechnische Ermittlung der Schaltverluste über Messmethode 2	80
5.4.4.1	Bestimmung der Durchlassverluste	80
5.4.4.2	Bestimmung der Schaltverluste	81
5.4.4.3	Einfluss von Sperrverriegelungszeit und parasitären FET- Kapazitäten	82
5.4.5	Vergleich der Messmethoden	89
5.5	LVC mit 650 V-Bestückung	91
5.5.1	Schaltverhalten der 650 V-Halbleiter	91
5.5.2	Vergleich der Schaltverluste der 650 V-Halbleiter	94
5.6	Statische Stromverteilung der Schienen	95
5.7	Temperaturverteilung und abführbare Wärmeenergie der FETs	98

6 Fehleranalyse und Definition der Anforderungen an einen funktional sicheren Umrichter	101
6.1 Grundlegende Voraussetzungen	101
6.2 Verhalten des LVC im Fehlerfall	102
6.2.1 Ermittlung der gespeicherten Energie	102
6.2.2 Beschreibung des Testaufbaus	104
6.2.3 Brücken-Kurzschluss-Messungen	105
6.2.4 Avalanche-Messungen	109
6.2.5 Treiberkreis	111
6.3 Messergebnisse und Diskussion	112
6.4 Anforderungen an einen funktional sicheren Umrichterbetrieb	116
7 Redundanzkonzept für einen platinenbasierten Umrichter	117
7.1 Beschreibung des Umrichterkonzeptes	117
7.2 Funktionsgruppen	118
7.3 AC-Bus	120
7.3.1 Mögliche AC-Bus Konfigurationen	121
7.3.2 Steuerung des AC-Bus	124
7.3.3 Kurzschluss- und Leerlaufverhalten des AC-Bus	126
7.3.4 Auslegung der AC-Bus-Komponenten	130
7.3.4.1 Bestimmung der benötigten Betriebsfrequenz	131
7.3.4.2 Bestimmung der maximal übertragbaren Leistung	131
7.4 Experimentelle Überprüfung des Redundanzkonzeptes	133
7.4.1 Redundanz im Leistungsteil	133
7.4.2 Messungen am AC-Bus im Fehlerfall	134
7.5 Hilfsspannungsversorgung mit AC-Bus	136
8 Zusammenfassung und Ausblick	139
A Thermische Auslegung	141
B Treiberschaltung mit Coreless-Transformer-ICs	145
B.1 Treiberschaltung	145
B.2 Power-Boost-Circuit	146
C Verschienung und Kontaktierung beim LVC	155
C.1 Schiene zur Kontaktierung der Lastanschlüsse (L-Schiene)	155
C.2 Schiene zur Kontaktierung der positiven DC-Versorgung (P-Schiene)	156

C.3	Schiene zur Kontaktierung der negativen DC-Versorgung (N-Schiene) . . .	157
C.4	Fertigungsparameter der Schienen	158
C.5	Berechnung des Anzugsdrehmoments zur Schienenverpressung	158
D	Messergebnisse	163
D.1	Messaufbau zur Schaltverlustbestimmung nach Messmethode 2	163
D.2	Messreihen zur Schaltverlustbestimmung nach Messmethode 2	164
D.3	Leistungsgewicht des LVC	169
E	Steuereinheit zur Ansteuerung schnell schaltender Leistungselektroniken	171
	Literaturverzeichnis	175
	Abbildungsverzeichnis	181
	Tabellenverzeichnis	187

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom/ Wechselspannung
ADC	Analog-Digital-Converter
BOT	Bottom, unterste Lage einer Leiterplatte
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio
CT	Coreless-Transformer
DC	Gleichstrom/ Gleichspannung
DCB	Direct Copper Bonded
DS	Drain-Source
DUT	Device Under Test
Elko	Elektrolytkondensator
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ESB	Ersatzschaltbild
FET	Field-Effect Transistor
FPGA	Field Programmable Gate Array
FS	Funktionale Sicherheit
FO	Fail-Operational
GaN	Galliumnitrid
GG	Gategruppe
GS	Gate-Source
HB	Halbbrücke
HEMT	High Electron Mobility Transistor
HL	Halbleiter
HS	High-Side
IC	Integrated Circuit, integrierter Schaltkreis
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
LS	Low-Side
LTO	Local Turn-Off
LVC	Low Voltage Converter, Niederspannungsumrichter

MHF	Modularer-Hochfrequenz-Umrichter
ML	Multilevel
MMC	Modular Multilevel Converter
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
MP	Messpunkt
ns	Nanosekunde
PCB	Printed Circuit Board, Leiterplatte
PG	Powergruppe
ps	Pikosekunde
PSZ	Parallelschaltzahl; Anzahl parallel geschalteter Halbleiter
SC	Switching Cell
Si	Silicium
SJ-FET	Super-Junction-FET
SM	Submodul
SMD	Surface-Mounted Device
SMT	Surface-Mounting Technology
SR	Slew Rate
SZ	Scheibenzelle
TOP	Top, oberster Lage einer Leiterplatte
UVLO	Undervoltage lockout
VB	Vollbrücke
VIA	Durchkontaktierung bei mehrlagigen Platinen
WBG	Wide-Bandgap
μ s	Mikrosekunde
ZK	Zwischenkreis

Formelzeichen

Zeichen Einheit Bezeichnung

Spannungen und Potentiale

du/dt	V/s	Spannungsanstiegsgeschwindigkeit
U_{BC}	V	Basis-Kollektor-Spannung
U_{DC}	V	DC-Spannung
U_{DS}	V	Drain-Source-Spannung
$U_{F,D}$	V	Vorwärtsspannung Diode
U_{GS}	V	Gate-Source-Spannung
U_{GE}	V	Gate-Emitter-Spannung
U_{iso}	V	Isolationsspannung
U_{ref}	V	Referenzspannung
U_{Sig}	V	Signalspannung
U_{th}	V	Schwellenspannung
U_T	V	Ausgangsspannung Treiber
U_{Tr}	V	Transformatorspannung
$U_{Tr,LL}$	V	Transformator-Leerlaufspannung
U_Z	V	Zener-Spannung
U_{ZK}	V	Zwischenkreisspannung
V	V	elektrisches Potential
V_B	V	Basis-Potential
V_D	V	Drain-Potential
V_{KS}	V	Potential am Kelvin-Source-Anschluss eines FETs
V_S	V	Potential am Source-Anschluss eines FETs
V_T	V	Potential am Treiberausgang

Ströme

di/dt	A/s	Stromanstiegsgeschwindigkeit
$I_{AC,eff}$	A	Effektivwert der AC-Stromkomponente
I_B	A	Basis-Strom
I_C	A	Kollektor-Strom
I_D	A	Drain-Strom
$I_{F,D}$	A	Vorwärtsstrom Diode
I_{KS}	A	Kurzschluss-Strom
I_L	A	Laststrom
I_Q	A	Quellenstrom
I_Z	A	Zener-Strom

Widerstände elektrisch und thermisch

R	Ω	ohmscher Widerstand
R_B	Ω	Basis-Widerstand
$R_{DS,on}$	Ω	Durchlasswiderstand eines eingeschalteten MOSFETs
R_K	Ω	Entkoppelwiderstand
R_{leg}	Ω	Widerstand des durchlegierten Halbleiters
R_{pr}	Ω	Widerstand der Primärwicklung eines Transformators
R_{sek}	Ω	Widerstand der Sekundärwicklung eines Transformators
R_S	Ω	Shunt-Widerstand
R_Z	Ω	Vorwiderstand Zenerdiode
R_{CP}^{th}	K/W	thermischer Widerstand zwischen Gehäuse und Kontaktpad
R_D^{th}	K/W	thermischer Widerstand Distanzstück
R_F^{th}	K/W	thermischer Widerstand Wärmeleitfolie
R_{JC}^{th}	K/W	thermischer Widerstand zwischen Sperrschicht und Gehäuse
R_{JP}^{th}	K/W	thermischer Widerstand zwischen Sperrschicht und Kontaktpad
R_Q^{th}	K/W	thermischer Widerstand Querschienen
ρ	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	spezifischer elektrischer Widerstand

Kapazitäten und Ladungen

C_{iss}	F	Eingangskapazität
C_{oss}	F	Ausgangskapazität
C_{rss}	F	Rückwirkungskapazität
C_{DG}	F	Drain-Gate-/ Millerkapazität
C_{DS}	F	Drain-Source-Kapazität
C_{GS}	F	Gate-Source-Kapazität
$C_{GS'}$	F	Künstlich eingebrachte Gate-Source-Kapazität
C_K	F	Koppelkapazität
C_S	F	Shunt-Kapazität
Q_g	C	Gateladung
$Q_{g'}$	C	künstlich eingebrachte Gateladung
Q_{rr}	C	Reverse-Recovery-Ladung

Induktivitäten

L_G	H	Induktivität des Gate-Kreises
$L_{G,off}$	H	Induktivität des Ausschalt-Gate-Kreises
L_H	H	Hauptinduktivität
L_K	H	Kommutierungsinduktivität
L_S	H	Shunt-Induktivität
L_σ	H	Streuinduktivität
L_z	H	zusätzliche Induktivität zur Vergrößerung von L_σ

Thermische Größen

ϑ	°C	Temperatur
ϑ_H	%	homologe Temperatur
ϑ_J	°C	Sperrschichttemperatur
ϑ_{KK}	°C	Kühlkörpertemperatur
ϑ_{KW}	°C	Kühlwassertemperatur
ϑ_S	°C	Schmelztemperatur

c	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	spezifische Wärmekapazität
λ	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	spezifische Wärmeleitfähigkeit

Frequenzen und Zeitvariablen

a	%	Aussteuergrad
f_{AC}	Hz	AC-Bus-Frequenz
f_{g}	Hz	Grenzfrequenz
f_{s}	Hz	Schaltfrequenz
f_0	Hz	Resonanzfrequenz
t	s	Zeit
t_{d}	s	Zeitverzögerung
t_{f}	s	Abfallzeit
t_{r}	s	Anstiegszeit
t_{t}	s	Totzeit
T	s	Periodendauer
τ	s	Zeitkonstante

Leistungen und Wirkungsgrad

P_{AC}	W	Leistung des AC-Bus
P_{ein}	W	eingespeiste Leistung
P_{L}	W	Verlustleistung der Last
P_{on}	W	Durchlassverluste
P_{out}	W	Ausgangsleistung
P_{s}	W	Schaltverluste
P_{T}	W	Treiberleistung
P_{Tr}	W	Transformatorleistung
P_{V}	W	Verlustleistung
η	%	Wirkungsgrad

Energien

E	J	Energie
E _{on}	J	Einschaltenergie
E _{off}	J	Abschaltenergie
E _s	J	Schaltenergie
E _{ZK}	J	Zwischenkreisenergie

Schwing- und Regelkreis

Q	–	Gütefaktor
G	–	Verstärkung des geschlossenen Regelkreises

Geometrische Größen

A	m ²	Fläche
b	m	Breite
h	m	Höhe
l	m	Länge
V	m ³	Volumen

Kraft und Drehmoment

F	N	Kraft
M	Nm	Drehmoment
M _A	Nm	Anzugsdrehmoment

