

Design and Operation Considerations of Three-Phase Dual Active Bridge Converters for Low-Power Applications with Wide Voltage Ranges

**Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation**

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Hauke van Hoek
aus Köln

Berichter:
Univ.-Prof. Dr. ir. Dr. h. c. Rik W. De Doncker
Prof. Dr.-Ing. J. A. Ferreira

Tag der mündlichen Prüfung: 24. November 2016

Hauke van Hoek

**Design and Operation Considerations of Three-Phase
Dual Active Bridge Converters for Low-Power
Applications with Wide Voltage Ranges**

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

AACHENER BEITRÄGE DES ISEA

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr. ir. Dr. h.c. Rik W. De Doncker
Leiter des Instituts für Stromrichtertechnik und
Elektrische Antriebe der RWTH Aachen (ISEA)
52056 Aachen

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5011-0

ISSN 1437-675X

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

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe (ISEA) der RWTH Aachen. Am ISEA gehören Dual-Active-Bridge-DC/DC-Wandler seit vielen Jahren zu den zentralen Forschungsthemen. Ich reihe mich mit diesem Schriftstück gerne in die Tradition ein, zumal die Arbeiten zeigen, dass unsere Ideen noch längst nicht erschöpft sind. Ich möchte mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. De Doncker bedanken. Er hat mich im Studium mit seiner Begeisterung für die Leistungselektronik und die Dual-Active-Bridge angesteckt. Ich danke ihm für die Möglichkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an seinem Institut an meinem Dissertationsthema arbeiten zu können sowie die großen Freiräume zur eigenständigen wissenschaftlichen Arbeit. Herrn Prof. Ferreira danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Ich bedanke mich herzlich bei den Studenten, die meine Dissertationsarbeit im Rahmen von Abschlussarbeiten und HiWi-Stellen unterstützt haben: Albert Kröber, Georges Engelmann, Markus Neubert, Annegret Klein-Heßling, Christoph Lüdecke, Keijo Jacobs und Tizian Senoner. Markus und Georges danke ich auch für die gemeinsamen Arbeiten, als sie später Kollegen waren. Markus gilt mein besonderer Dank für die vielen fachlichen Diskussionen zu den Ansteuerverfahren der Topologie, für das Korrekturlesen der Dissertation und nicht zuletzt für die stets glorreichen, gemeinsamen Aktionen vom Projektantrag bis hin zum Fußballabend im Meisenfrei. Das Institut war für mich ein Ort, an dem neben der Arbeit das Miteinander einen sehr hohen Stellenwert einnahm. Ich bedanke mich bei allen ISEAnern für viele schöne Events von den legendären B12-Runden über „Outdoor-Meetings“ bis hin zu unvergesslichen Abenteuern auf Exkursionen und Dienstreisen.

Ich danke meinen langjährigen Bürokollegen Michael Bragard, Christoph Neeb, Matthias Biskoping, Karl Oberdieck und zuletzt im OI-Büro Stefan Engel für die gemeinsame Zeit. Michael gilt ein besonderer Dank für die gegenseitige Bereicherung im fachlichen und menschlichen Bereich, die sein Prädikat „overexceptional“ verdient. Ich verdanke ihm viele Weisheiten über die Natur des Institutslebens und der Leistungselektronik sowie ergebnisoptimierter Zeitplanung. Matthias möchte ich im Besonderen für die gemeinsame Zeit als Gruppenleiter danken. Während die gegenseitige Unterstützung ein Selbstläufer war, bedanke ich mich insbesondere für viele unvergessliche Momente, seien es späte Abende im Büro, lange fachliche Diskussionen oder die vielen lustigen Momente, wie die Reißverschlusskrise oder unsere Sitzplatzflächenoptimierung. Steff danke ich für die unvergleichliche Zusammenarbeit als Oberingenieur und den gegenseitigen Druck die Promotion abzuschließen. Ich glaube, das Geheimnis unseres Erfolgs war es, in Zeiten größten Trubels Ruhe zu bewahren, gemeinsam über das extern induzierte Chaos zu schmunzeln und es dann koordiniert zu ordnen.

Bei meiner Familie, vor allem meiner Mutter, bedanke ich mich für die stetige Unterstützung. Meiner Freundin danke ich für den Rückhalt, ihre Geduld und ihr Verständnis.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Aim of this work	2
1.2	Electric vehicle application	3
1.3	Prototype specifications	5
1.4	Outline of the thesis	6
2	Fundamentals	9
2.1	Metal-oxide semiconductor field-effect transistors (MOSFETs)	9
2.1.1	Super-junction MOSFETs	11
2.1.2	DirectFET package	12
2.2	Semiconductor hard and soft-switching transitions	14
2.3	Symmetric three-phase transformers	20
2.3.1	Magnetic description	20
2.3.2	Core losses	22
2.3.3	Winding losses	24
2.4	Differential mode disturbance and filters	28
2.5	Filter capacitors	30
3	Three-phase dual active bridge converter operation	33
3.1	Circuit elements	33
3.2	Single phase-shift operation	34
3.2.1	Operation scheme	34
3.2.2	Relation of power and phase shift	34
3.2.3	Operational area and soft-switching borders	36
3.2.4	Influence of switch capacitances	38
3.2.5	Influence of magnetization currents	41
3.2.6	Dead time effects	42
3.2.7	Discussion of phase shift and dead time effects	46
3.3	Parallel phase operation	47
3.3.1	Trapezoidal current mode	49
3.3.2	Triangular current mode	51
3.3.3	Operational area	53
3.3.4	Generation of switching patterns (idealized)	54
3.3.5	Dead-time compensation	55
3.4	Enhanced triangular and trapezoidal current mode operation	57
3.4.1	Version 1: Compensation of deviations to ensure ZCS	58
3.4.2	Version 2: ZVS on the input side	62

3.5	Filter currents	65
3.6	Combination of operation modes	66
3.7	Summary	68
4	Analytical description and simulation methods	71
4.1	DAB converter description approaches for loss estimations	71
4.2	Motivation for the usage of two converter modeling approaches	72
4.3	The analytical calculation tool “DAB-Tools”	74
4.4	Sample-based simulation models in PLECS	76
4.5	Performance assessment of the analytical description	78
4.5.1	Accuracy	78
4.5.2	Calculation speed	83
4.6	Summary	85
5	Analysis of the three-phase DAB converter operation characteristics	87
5.1	Characteristic device stress of the operating modes	87
5.1.1	Phase currents	87
5.1.2	Switching currents	89
5.1.3	Filter RMS currents	91
5.1.4	Filter harmonics	91
5.1.5	Summary	94
5.2	Comparison with the single-phase dual active bridge converter	95
5.2.1	Semiconductor stress	97
5.2.2	Filter effort	101
5.2.3	Transformer	109
5.2.4	Summary	115
6	Prototype configuration and simulation results	117
6.1	Device models	117
6.1.1	Semiconductor switches	117
6.1.2	Three-phase transformer	118
6.1.3	Filter capacitors	121
6.1.4	Auxiliary resistances	123
6.2	Abstract analysis	123
6.2.1	Weighting of operating points	124
6.2.2	Optimal configuration	125
6.2.3	Parameter definition for the prototype	127
6.3	Detailed analysis	127
6.3.1	Loss analysis and efficiency	128
6.3.2	Switching frequency variation	131
6.4	Summary	134
7	Prototype synthesis and verification	135
7.1	Prototype concept	135
7.2	Converter volume	140

7.3	Operation mode verification	141
7.4	Efficiency analysis	145
7.5	Summary	147
8	Conclusion and outlook	149
A	Appendix	153
A.1	Description methods of capacitive commutations in a half-bridge	153
A.1.1	Mathematical expressions	153
A.1.2	Electric quantities of the equivalent circuit	156
A.2	Equations for the filter design	157
A.3	Supplementary analysis of the dual-active-bridge converter operation modes	159
A.3.1	Phase current description of the three-phase DAB converter with SPS operation	159
A.3.2	Flux and magnetization current description of the three-phase DAB converter with SPS modulation	162
A.3.3	Piecewise phase current description of the three-phase DAB converter with SPS modulation including dead time effects	166
A.3.4	Piecewise phase current description of the single-phase DAB converter with SPS modulation	178
A.3.5	Enhanced TRI/TRAP-CM version 1	180
A.3.6	Enhanced TRI/TRAP-CM version 2	184
A.4	Additional analysis of the dual-active-bridge operation characteristics	188
A.4.1	Influence of output voltage, transformer ratio and inductance value on RMS currents	188
A.4.2	Comparison of the 1p-DAB and the 3p-DAB converter: output RMS currents	191
A.4.3	Comparison of the 1p-DAB and the 3p-DAB converter: second harmonic of filter currents	192
A.5	Supplementary data on the transformer design	193
A.5.1	Reluctance network	193
A.5.2	Approach for transformer size approximation	195
A.5.3	Supplementary analysis on transformer effort	198
A.6	Device data	201
A.6.1	LV MOSFET ratings	201
A.6.2	Filter capacitors data	201
A.7	Supplementary data on efficiency measurements	202
	Acronyms	205
	Software	207
	Symbols	209
	List of Figures	213

List of Tables	217
Bibliography	219
Curriculum vitae	231