

Modeling and Reduction of Conducted Electromagnetic Interference in Three- phase Power Electronics Systems

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität der Bundeswehr München

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

M.Sc. Junsheng Wei



Neubiberg

2014

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Lindenmeier
1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Gerd Griepentrog

Tag der Promotion: 03.11.2014

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 15

Junsheng Wei

**Modeling and Reduction of Conducted
Electromagnetic Interference in Three-phase
Power Electronics Systems**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

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 978-3-8440-3512-4

ISSN 1863-0707

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

Danksagung

An dieser Stelle ist es mir ein besonders Anliegen all den Menschen zu danken, ohne welche die Anfertigung dieser Arbeit nicht möglich wäre.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Elektrische Antriebstechnik und Aktorik (EAA) an der Universität der Bundeswehr München in Zusammenarbeit mit der Siemens AG, Corporate Technology. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling für die exzellente Betreuung dieser Arbeit, die stete Unterstützung und sein in mich gesetztes Vertrauen während meiner Zeit an der Universität. Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerd Griepentrog danke ich für sein Vertrauen während seiner Zeit als Gruppenleiter bei der Siemens AG sowie sein Engagement bei der Übernahme des Berichterstatters. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Lindenmeier danke ich für die Übernahme des Vorsitzes.

Den Mitarbeitern bei CT RTC PET POE der Siemens AG danke ich für die stets unkomplizierte Unterstützung, insbesondere Herrn Dr. Michal-Wolfgang Waszak für die Initiierung des Projekts und die viel Zeit bei Messungen, Marek Galek für den Ideenaustausch und jede Menge Unterstützung bei Vorbereitung der Messungen, Michael Finkenzeller für die Zugang zum Labor wenn andere Kollegen in Urlaub sind sowie Jürgen Rupp für die Zusammenarbeit.

Besonderer Dank gilt auch meinen Kollegen am EAA, die mich die Zeit an der Universität belgeitet haben. Besonders hervorheben möchte ich Dr. Hans-Joachim Köbler für das Abnehmen vieler organisatorischer Aufgaben und die Freude bei Biertests und Fußballspiel, Dr. Benno Lange für die Unterstützung im Labor und bei Praktikum, Dr. Harald Hofmann für seine Hilfsbereitschaft bei jeder IT- oder Geräteprobleme, Herrn Rainer Hilderbrand für die Beschaffung der Bauelemente, Dr. Gurakuq Dajaku für die Diskussion über elektrische Maschine und den Hinweis für Schreiben, Edin Hasic für die Mitbenutzung des Büros und das angenehme Büroklima sowie Dr. Qiang Yu, Wei Xie, Dr. Johannes Klötzl, Eva Knischourek, Hans-Christian Lahne, Yevgen Polonskiy, Dmytro Bilyi, Florian Bachheibl und Andreas Baumgardt für die Freundschaft.

Danken möchte ich auch meinen Eltern Zhuangyang Wei und Peizhen Sun, meinen Schwiegereltern Wenjian Yang und Huahua Qiu, für den Glauben, die Unterstützung und die Geduld während meines Studiums in Deutschland. Ein großer Dank gilt meiner Frau, Yinyin, für ihre Geduld und den Verzicht auf vielen eigenen Wunsch.

München, 2014
Junsheng Wei

Abstract

This thesis deals with modeling and reduction of conducted electromagnetic interference (EMI) in power electronic systems, with focus on three-phase applications. Different modeling methods based on physical modeling and behavioral modeling are studied and developed, in order to achieve accurate and fast prediction of level of conducted EMI. The accuracy of prediction is validated by comparison with result from measurement which carried out in standard-defined environment. Once the problem of conducted EMI is identified, solutions should be found to get rid of it. Different methods for reduction of conducted EMI are studied, especially the use of passive EMI filter as suppression along propagation path and the use of modulation methods as suppression at the source. With simulation models and experimental implementation, the influential factors and the applications of reduction methods are analyzed and evaluated.

The first part of the thesis is devoted to modeling of conducted EMI. By analyzing available data in different stages of product development, either physical modeling or behavioral modeling can be applied. During the study, physical phenomena which occur within components in power electronic system are analyzed. Analytical, numerical and empirical methods are applied to obtain parameters of the physical models which provide required accuracy in frequency range concerned. Different systematic simulation methods are compared and a new method based on linear-time-varying system is proposed in order to achieve accurate, fast and stable simulation. Behavioral modeling, which does not rely on detailed knowledge of used components, is also studied by analyzing the network representation of power electronic system. The extraction of parameters in behavioral model is accomplished by simulation and experiment. Requirements, devices and procedure of parameter extraction are analyzed and detailed described.

The second part of the thesis focuses on methods for reduction of conducted EMI. Firstly, passive EMI filter as widely used countermeasure for EMI problem is chosen to be analyzed and studied. The high frequency characteristics of filter components as well as filter as a whole are predicted. Thanks to the proposed model based on symmetrical component theory, the behavior of three-phase EMI filter can be better understood and characterized. A virtual design procedure of EMI filter based on behavioral modeling of power electronic system and circuitry model of EMI filter is demonstrated, with result confirmed by measurement. Influence of the structure of EMI filter, symmetrical or unsymmetrical, is also investigated. The potential of benefit brought by unsymmetrical structure is demonstrated by a design example. Influences of different variables on conducted EMI level are analyzed, modeled and evaluated,

which provide references for consideration of EMI problem during design process. To complete the analysis on reduction methods, the suppression at noise source is also studied. Methods using different modulation strategies are analyzed. With simulation and experimental verification, their influences on conducted EMI and operational performances are compared and evaluated.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Modellierung und Reduktion leitungsgebundener elektromagnetischen Störungen in drei-phasigen leistungselektronischen Systemen. Um schnelle und genaue Vorhersagen der Störungen zu erzielen werden verschiedene Methoden einschließlich physikalischer Modellierung und Verhaltensmodellierung untersucht und entwickelt. Die Genauigkeit der Vorhersagen wird mit experimentellen Ergebnissen validiert, welche aus einer normdefinierten Messumgebung stammen. Sobald das Problem leitungsgebundener Störungen identifiziert ist, müssen entsprechende Lösungen herausgefunden und eingesetzt werden, um die Normen einzuhalten. Verschiedene Methoden zur Reduktion der Störungen werden untersucht, insbesondere die Anwendung von passiven EMV-Filtern (EMV: elektromagnetische Verträglichkeit) zur Unterdrückung der Störung entlang des Ausbreitungspfads und die Anwendung von Modulationsverfahren, die die Störung direkt an der Quelle reduzieren. Durch sowohl Simulationsmodelle als auch experimentelle Untersuchungen werden die von verschiedenen Faktoren verursachten Beeinträchtigungen und die Auswirkungen der Methoden zur Reduktion der Störung analysiert sowie evaluiert.

Der erste Teil der Arbeit konzentriert sich auf die Modellierung leitungsgebundener Störungen. Nach einer Analyse der verfügbaren Daten kann entschieden werden, ob es geeigneter ist, in einem Schritt des Entwicklungsprozess eine physikalische Modellierung oder eine Verhaltensmodellierung zu verwenden. Physikalische Phänomene in Komponenten der leistungselektronischen Systeme werden analysiert. Anhand von analytischen, empirischen sowie numerischen Berechnungen werden physikalische Modelle aufgebaut. Damit ist die systematische Simulation der Störungen möglich. Verschiedene systematische Simulationsmethoden werden untersucht, nämlich die Simulationen im Zeit- sowie im Frequenzbereich. Um die zeitvariante Charakteristik der leistungselektronischen Systeme zu berücksichtigen wird eine neue Methode entwickelt, die auf linearen zeitvarianten (LTV) Systemen beruht. Dadurch wird eine schnelle, genaue und stabile Simulation im Frequenzbereich möglich. Unabhängig von vorhandenen Daten ist es möglich, mit einer Verhaltensmodellierung die Störung zu analysieren. Dafür wird das leistungselektronische System durch Netzwerke beschrieben. Zur Extraktion der erforderlichen Parameter für die Verhaltensmodelle werden Simulationen sowie Experimente durchgeführt. Anforderungen, eingesetzte Geräte sowie verwendete Prozesse werden detailliert analysiert und beschrieben.

Im zweiten Teil werden Methoden zur Reduktion der Störungen betrachtet. Passive EMV-Filter, als eine der populären Lösungen für das EMV-Problem,

werden zuerst analysiert. Deren hochfrequente Charakteristik wird auf Komponentenebene sowie Systemebene simuliert. Dank des vorgestellten Modells, das auf symmetrischen Komponenten beruht, kann das Verhalten des Filters hinsichtlich Dämpfung und Modenwandlung besser verstanden sowie charakterisiert werden. Weiterhin wird anhand eines Verhaltensmodells des leistungselektronischen Systems und eines Schaltungsmodells des Filters ein virtueller Entwurfsprozess für EMV-Filter erstellt. Durch experimentelle Untersuchungen werden die Entwürfe validiert. Der Einfluss der Symmetrie der Filterstruktur wird diskutiert und der mögliche Vorteil, den ein unsymmetrisches Filter einbringt, wird mit Hilfe von Simulationen dargestellt. Die Beeinträchtigungen des Pegels der Störung durch verschiedene Faktoren werden analysiert, modelliert und evaluiert. Die Ergebnisse können als Referenz für die Bewertung des EMV-Problems während des Entwicklungsprozesses dienen. Anschließend werden die Auswirkungen verschiedener Modulationsmethoden auf leitungsgebundene Störungen untersucht. Durch Simulationen sowie Hardwaretests wird die Performance der Methoden bezüglich EMV- und Betriebseigenschaft evaluiert.

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Electromagnetic interference in power electronics.....	1
1.1.1 Electromagnetic interference	1
1.1.2 Three-phase power electronics system	3
1.2 Background	4
1.3 Outline and contributions of the thesis	6
Chapter 2 Physical modeling of conducted EMI in power electronics systems	9
2.1 Introduction	9
2.2 Modeling of measurement environment	10
2.2.1 Line impedance stabilization network	11
2.2.2 EMI receiver	11
2.3 Modeling of components in power electronics systems.....	15
2.3.1 Passive components.....	15
2.3.2 Printed circuit board	26
2.3.3 Cable	31
2.3.4 Semiconductors	33
2.3.5 Load.....	40
2.4 System modeling	41
2.4.1 Time domain simulation.....	41
2.4.2 Frequency domain simulation.....	43
2.4.3 Comparison of simulation methods	52
2.5 Conclusion	53
Chapter 3 Terminal modeling of conducted EMI in power electronics systems	54
3.1 Introduction	54
3.2 Y-Parameter modeling of power electronics systems.....	54

3.2.1 Y-Parameter as network parameter.....	55
3.2.2 Network representation of conducted EMI in power electronics systems	55
3.3 Characterization process with time domain simulation.....	57
3.3.1 Network parameter of LISN and cable	57
3.3.2 Network parameter of three-phase diode-bridge	58
3.3.3 Network parameter of boost part.....	58
3.3.4 Prediction of conducted EMI based terminal model from time domain simulation	60
3.4 Characterization process with measurement	62
3.4.1 Hardware setup.....	62
3.4.2 Measurement devices.....	67
3.4.3 Characterization process.....	70
3.4.4 Prediction of conducted EMI based on measurement characterization	74
3.5 Conclusion	75
Chapter 4 Modeling and characterization of passive three-phase EMI filter	76
4.1 Introduction	76
4.2 Analytical calculation of characteristic of filter components	77
4.2.1 Capacitors	77
4.2.2 Inductors	81
4.3 Experimental characterization of EMI filter with S-parameters.....	87
4.3.1 Network characterization with S-Parameters	87
4.3.2 Characterization of three-phase EMI filter.....	90
4.3.3 Influence of components' placement on filter performance	93
4.4 Sequence model of EMI filter.....	93
4.4.1 Mode noise and mode conversion.....	93
4.4.2 Sequence theory for three-phase application.....	95

4.4.3 Sequence model.....	96
4.5 Conclusion	101
Chapter 5 Virtual filter design procedure and design related issues.....	103
5.1 Introduction	103
5.2 Virtual filter design procedure	104
5.2.1 Circuitry model of filter capacitors.....	105
5.2.2 Circuitry model of filter inductors.....	106
5.2.3 Parameter extraction for behavioral circuitry model of CM inductors	108
5.2.4 Virtual design examples	110
5.3 Influences of variants	114
5.3.1 Influence of operation conditions.....	114
5.3.2 Influence of multi-layer PCB structure.....	117
5.3.3 Influence of on-board power supply of gate driver	119
5.3.4 Influence of heat sink on magnetic components.....	124
5.3.5 Influence of arrangement of filter components.....	125
5.4 Symmetry of filter structure.....	126
5.4.1 Symmetrical structure.....	127
5.4.2 Unsymmetrical structure	129
5.4.3 Example of unsymmetrical filter design.....	130
5.5 Conclusion	132
Chapter 6 Noise source suppression through modulation methods.....	133
6.1 Introduction	133
6.2 Modulation methods.....	135
6.2.1 Pulse width modulation	135
6.2.2 Hysteresis-control-based modulation	139
6.3 Simulation-based performance analysis	141
6.3.1 CMV.....	141

Contents

6.3.2 Input current spectrum	142
6.3.3 Operational performance	143
6.4 Hardware implementation and experimental results	146
6.4.1 VSI and controller hardware	147
6.4.2 Experimental results and discussions.....	148
6.5 Conclusion	155
Chapter 7 Conclusions and future works	156
7.1 Conclusions	156
7.2 Future works	157
References	159
Appendix.....	163
A.1 Flow chart for high frequency inductor simulation	164
A.2 Sequence mode insertion loss and mode transfer ratio with unsymmetrical filter	165