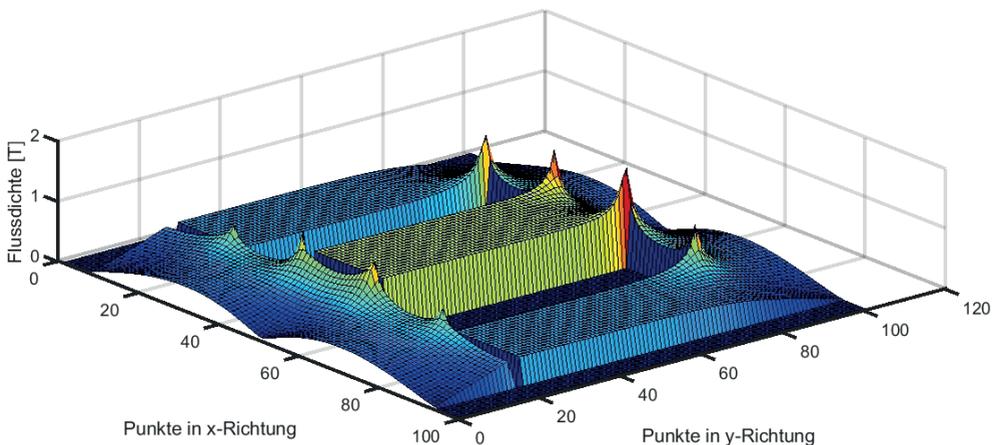


Forschungsberichte
Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

Florian Bachheibl

**Effiziente Modellierung von passiven
Komponenten in elektrischen
Hochleistungsantrieben**



Effiziente Modellierung von passiven Komponenten in elektrischen Hochleistungsantrieben

Florian Dominik Bachheibl

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik der
Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling
2. Prof. Dr.-Ing. Ingo Hahn
3. Prof. Dr.-Ing. (habil) Wilfrid Pascher

Die Dissertation wurde am 15.05.2017 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektro- und Informationstechnik am 15.10.2018 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 22.11.2018 statt.

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 41

Florian Bachheibl

**Effiziente Modellierung von passiven Komponenten
in elektrischen Hochleistungsantrieben**

Shaker Verlag
Düren 2020

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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7485-7

ISSN 1863-0707

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

Abstract

In the context of this work, several topics from the field of passive components for electrical high performance drives have been investigated.

Firstly, iron loss in laminated iron cores has been investigated while considering flux displacement. In the following, a reluctance network has been developed to describe the flux density distribution in three-phase chokes. The so generated distribution has been used to also calculate iron losses under heavily non-sinusoidal load. The results are in good agreement with measurements performed in this work.

The field emission of high-current traction power nets in electric vehicles has been analyzed and topologies have been developed which guarantee compliance with existing legal limits under relevant operating conditions.

Furthermore, capacitor load in high-phase drivetrains has been investigated. It was shown in theory that the AC-load on the DC-bus can be greatly reduced by intelligent interleaving of the carrier signals in a sine-triangle-modulation.

Finally, complex transformers with a large number of secondary taps have been investigated. Short circuits in one secondary group may lead to an increase in open-circuit voltage of other secondary groups. This behavior was justified by an extended equivalent circuit.

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Themen aus dem Kontext passiver Komponenten für elektrische Hochleistungsantriebe untersucht.

Zunächst wurden Eisenverluste in geblechten Magnetkernen unter Berücksichtigung der Flussverdrängung beleuchtet. Anschließend wurde mit Hilfe eines Reluktanznetzwerkes die Flussdichteverteilung in Dreiphasendrosseln beschrieben. Die so erzielte Verteilung wurde ebenfalls zur Verlustberechnung bei stark nichtsinusförmiger Belastung herangezogen. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit ebenfalls durchgeführten Messungen.

Die Feldabstrahlung von Hochstrom-Traktionsbordnetzen wurde untersucht und es wurden Topologien entwickelt, welche in relevanten Betriebspunkten die Einhaltung bestehender Grenzwerte garantieren.

Außerdem wurde die Kondensatorbelastung in hochphasigen Niederspannungsantrieben untersucht und es wurde theoretisch gezeigt, dass die AC-Belastung durch intelligentes Interleaving der Trägersignale deutlich reduziert werden kann.

Schließlich wurden komplexe Transformatoren mit einer Vielzahl sekundärseitiger Anzapfungen untersucht. Bei Kurzschlüssen einer sekundärseitigen Gruppe kann eine Spannungsüberhöhung anderer Sekundärwicklungen auftreten. Dieses Verhalten wurde durch ein erweitertes Ersatzschaltbild plausibilisiert.

Danksagung

Ich möchte die Gelegenheit nutzen den Menschen zu danken, die mich auf dem Weg zu dieser Arbeit unterstützt haben.

Anfangen möchte ich mit meinem Doktorvater Professor Dieter Gerling. Durch unermüdliche Anstrengung hat er an seinem Lehrstuhl ein Arbeitsumfeld geschaffen, welches seinesgleichen sucht. Er hat mir die Freiheit gegeben eigene Ansätze zu verfolgen und mich so auch persönlich weiterzuentwickeln. Ich hätte nicht für möglich gehalten, wie weit mich diese Reise bringen würde.

Auch meinen Eltern und meiner Freundin Theresa die mir immer als Inspiration dienen, möchte ich Danke sagen. Sie haben mir während der Entstehungszeit dieser Arbeit viel Kraft und Motivation gespendet und mir nachgesehen, dass sie des öfteren auf mich verzichten mussten.

Zudem bedanke ich mich bei meinen Kollegen am Lehrstuhl für das positive und unterstützende Arbeitsklima. Hier möchte ich zuallererst Dr. Jochen Köbler, Dr. Harald Hofmann und Dr. Benno Lange nennen, die mir mit großer Hilfsbereitschaft und Unterstützung in allen organisatorischen und technischen Fragen zur Seite standen. Für die aufschlussreichen Diskussionen und für ihre Freundschaft möchte ich insbesondere Andreas Baumgardt, Adrian Patzak, Jan Richnow, Eva Knischourek und Sachar Spas danken.

Zu guter Letzt gilt mein Dank der Firma SIEMENS für den Forschungsauftrag als Grundlage für die vorliegende Arbeit. Vor allem möchte ich Dr. Ralf Gesslein, Dr. Peter Köllensperger, Martin Hilscher und Sebastian Semmler für die technischen Diskussionen und für ihre fachliche und persönliche Unterstützung danken.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	i
Kurzzusammenfassung	ii
Danksagung	iii
Inhaltsverzeichnis	iv
I Abkürzungs- und Variablenverzeichnis	vii
II Abbildungsverzeichnis	ix
III Tabellenverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
2 Eisenwerkstoffe in elektrischen Maschinen	3
2.1 Das Verhalten von Eisenwerkstoffen im magnetischen Feld	3
2.2 Modelle von Sättigung und Hysterese.....	5
2.2.1 Das Langevin-Modell der Sättigung.....	5
2.2.2 Das Hysteresemodell von Jiles und Atherton	6
2.2.3 Das Hysteresemodell nach Preisach	8
2.2.4 Nutzung des Equivalent-Elliptical-Loop-Modells zur Hysteresemodellierung.....	10
2.3 Modelle für die Berechnung der Eisenverluste.....	11
2.3.1 Das Eisenverlustmodell nach Steinmetz	11
2.3.2 Die Modified-Steinmetz-Equation (MSE).....	11
2.3.3 Die Improved-Steinmetz-Equation (ISE)	12
2.3.4 Das Jiles-Atherton- und das Preisach-Modell.....	12
2.3.5 Das Equivalent-Elliptical-Loop Modell.....	12
2.4 Zusammenfassung.....	14
3 Der Einfluss von Flussverdrängung auf den Ummagnetisierungsvorgang	15
3.1 Unter Vernachlässigung der Sättigung	16
3.2 Unter Berücksichtigung der Sättigung.....	26

3.3	Eigene Messungen mit unterschiedlichen Flussdichteverläufen und weitere Validierung der in 3.2 beschriebenen Methode.....	41
3.4	Zusammenfassung.....	47
4	Effiziente Simulation der Verteilung elektromagnetischer Größen in passiven Komponenten	48
4.1	Grundlagen.....	48
4.1.1	Das Maschenstromverfahren.....	48
4.1.2	Das Knotenpotenzialverfahren.....	49
4.1.3	Die Finite-Elemente-Methode.....	50
4.2	Aufbau eines Reluktanznetzwerks nach dem Knotenpotenzialverfahren.....	51
4.3	Ergebnisse und Validierung.....	57
4.4	Zusammenfassung.....	59
5	Abschätzung von Eisenverlusten unter nicht-sinusförmiger Belastung.....	61
5.1	Nicht-sinusförmige Belastung von geblechten Eisenkernen.....	61
5.2	Messung der Verluste bei nichtsinusförmiger Speisung.....	64
5.2.1	Aufbau im Labormaßstab.....	64
5.2.2	Bewertung möglicher Ursachen für die Abweichung zwischen Messwerten und Datenblattangaben.....	71
5.2.2.1	Bewertung der Messungenauigkeit.....	71
5.2.2.2	Bewertung des Proximity-Effekts.....	71
5.2.2.3	Wirbelstromverluste in Schrauben und Halblechen.....	75
5.2.2.4	Fertigungseinflüsse bei der Stahlbearbeitung.....	77
5.2.2.5	Zusammenfassung.....	77
5.2.3	Messungen bei nicht-sinusförmiger Belastung.....	77
5.2.4	Berechnung mittels variabler Exponenten.....	80
5.3	Zusammenfassung.....	83
6	Übertragung von hohen DC-Strömen in Fahrzeugbordnetzen	84
6.1	Auslegung eines Bordnetzes für das ISCAD-Antriebssystem.....	85
6.2	Magnetfeldschirmung für das ISCAD-Bordnetz.....	87
6.3	Zusammenfassung.....	94

7 Reduktion der erforderlichen Zwischenkreiskapazität in hochphasigen Antrieben durch Phasenverschiebung der Ansteuersignale	95
7.1 Aufgaben von Zwischenkreiskondensatoren.....	95
7.2 Analytische Berechnung des Zwischenkreisstroms.....	96
7.3 Numerische Berechnung des Zwischenkreisstroms.....	98
7.4 Evolutionäre Optimierung des Phasenversatzes.....	99
7.5 Zusammenfassung.....	103
8 Modellierung von Transformatoren mit einer großen Anzahl sekundärseitiger Anzapfungen	105
8.1 Multilevelumrichter für Hochleistungsantriebe.....	105
8.2 Übersetzungsverhältnisse und Phasenversätze in Y-D-verschwenkten Sekundärseiten	108
8.3 Simulation eines Modells des Transformators in Simplorer.....	110
8.3.1 Leerlaufversuch	110
8.3.2 Symmetrischer Kurzschluss	112
8.3.3 Kurzschluss von nur einer Sekundärwicklung	112
8.4 Entwicklung eines Ersatzschaltbildes für Kopplungen mit mehr als zwei Sekundärseiten	116
8.5 Spannungsüberhöhung im Kurzschlussfall	121
8.6 Analytische Bestimmung der Kopplungen zwischen Spulen	123
8.7 Zusammenfassung.....	126
9 Zusammenfassung und Ausblick	127
10 Quellenverzeichnis.....	129
11 Anhang.....	135
11.1 Lösung der Wellengleichung (3.16) aus Kapitel 3.1	135
11.2 Flussdichteverläufe aus Abschnitt 3.3	140
11.3 Ergebnis Simulation Kurzschlussversuch	144