

Direct Instantaneous Force Control

—

Key to Low-Noise Switched Reluctance Traction Drives

**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
Andreas Hofmann
aus Ochsenfurt

Berichter:
Univ.-Prof. Dr.-Ir. Dr.-h. c. Rik W. De Doncker
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralph Kennel

Tag der mündlichen Prüfung: 14.06.2016

Andreas Hofmann

Direct Instantaneous Force Control

**Key to Low-Noise
Switched Reluctance Traction Drives**

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.: 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 2016

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 978-3-8440-4715-8

ISSN 1437-675X

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

„DAS GEHEIMNIS DES KÖNNENS
LIEGT IM WOLLEN“

Giuseppe Mazzini

2K

Worte des Dankes. . .

Tja, wieviel Gedanken sollte man sich zu den vermutlich meistgelesenen Seiten dieser Arbeit machen? „Frei von der Leber weg“ ist es wohl am authentischsten. So möchte ich’s im Folgenden mal chronologisch versuchen.

Ich kam 2010 bildlich gesprochen weitgehend antriebslos in Aachen an und hatte so meine Schwierigkeiten fachlich, sowie im rheinländischen Ausland sozial Fuß zu fassen. Mein damaliger Bürokollege **Martin Hennen** hat mir in meiner Anfangszeit einerseits auf der antriebstechnischen Ebene unter die Arme gegriffen, mich andererseits aber vor allem auf der emotionalen Schiene abgeholt – ich wollte ja eigentlich gar nicht in dieses komische Aachen ziehen.

Ohne Dich, Martin, wäre ich womöglich nicht geblieben.

Next, I wanna thank **Mike Evans** who was a good teacher and a great friend. He managed to get me excited about the English language as none of my high-school teachers had before. Mike had put me in the place where I was able to present this thesis in decent English. Mike, I’ll have someone deliver you your signed sample of my book. . . May you rest in peace!

An dieser Stelle möchte ich diejenigen meiner Studenten erwähnen, die unmittelbar an meinem DIFC-Projektchen beteiligt waren. **Armands Senfelds** und **Ahmed Al-Dajani** haben während meiner ersten Jahre am ISEA einige meiner Ideen rund um die DIFC-Thematik simulativ untersucht und somit den Grundstein gelegt, in welche Richtung es mit der Arbeit mal gehen würde.

Philipp Butz hat DIFC im Anschluss erstmals am Prüfstand umgesetzt und dabei bereits im Frühstadium einige Problemchen aufgedeckt.

Matthias Bösing gilt mein besonderer Dank in mehrerer Hinsicht. Zunächst hat Matthias mir das vibro-akustische Erbe seiner ISEA-Zeit hinterlassen. Vor allem die Simulationstools waren während der simulativen Untersuchungen meiner Arbeit von unschätzbarem Wert. Daneben verdanke ich (und neben mir vermutlich auch viele andere ISEA-Absolventen) Matthias die ausgefeilte L^AT_EX-Vorlage für diese Arbeit.

Des Weiteren stand mir Matthias auch nach seiner aktiven ISEA-Zeit stets mit Rat, Tat und gelegentlich schonungsloser Kritik zur Seite. Über die Zeit, als ich mich irgendwann mit der Tatsache abgefunden hatte, dass Matthias ja doch meist Recht hat mit dem, was er so unverblümt kritisiert, ist für mich dabei neben der fachlichen Korrespondenz eine Freundschaft entstanden.

Zu guter Letzt hat Matthias es auch noch als einziger Kollege durchgezogen die Arbeit in Gänze zu lesen und fein säuberlich zu filetieren, auch wenn das traditionell eigentlich eher die Bringschuld der jüngeren Assistenten gewesen wäre.

So lass mich an dieser Stelle vielleicht einfach einmal generelles *Danke* sagen, Matthias!

Iliya Ralev und **Annegret Klein-Heßling** möchte ich danken für die unzähligen Stunden, die Ihr im Zuge des ODIN-Projektes im Antriebskeller verbracht habt, um verschiedene Maschinen in Betrieb zu nehmen, Software zu schreiben und Öl aufzuwischen.

Ohne Euch hätte ich hier sicher nicht die Messungen präsentieren können, wie es nun glücklicherweise der Fall ist.

Ähnliches gilt für **Tobi Lange** und **Andreas Bubert**, die zwar offiziell nicht im Projekt-Team beteiligt waren, aber dennoch außerordentlich viel Energie und Zeit in die Planung, Umsetzung und Instandhaltung des ODIN-Prüfstandes investiert haben. Ohne Euren selbstlosen Einsatz hätte wiederum das ODIN-Team nicht die Messungen präsentieren können, wie es schlussendlich glücklicherweise der Fall war.

Mareike Schenk möchte ich herzlich danken für ihre Verlustsimulationstools, die ich dankenswerter Weise nutzen durfte, um Verlust-Tendenzen von DIFC herauszufinden.

Vielen Dank für deine Unterstützung trotz des Umstandes, dass Du dich zuhause eigentlich um „Kind und Kegel“ hättest kümmern sollen.

I want to thank the **ODIN consortium** for their constant nagging to always keep in mind the system level of EVs. The *secondary evaluation aspects of DIFC* in Chapter 6 were pretty much inspired by the consortium.

Besides, also thank you guys for the opportunity to try out DIFC in the context of the ODIN project and for the chance to gain valuable experience how to handle such a large project with different parties and probably just as many, partly diverging interests.

Fang Qi hat mich so lange mit seinem stetigen Tenor „objektorientierte Programmierung in Matlab... bla... stundenlang... blubb... praktisch... bla... Schlittenfahren... blubb... mach doch auch mal... also das Programmieren... bla... die Teefrau spinnt... blubb...“ genervt, dass ich meine vielen kleinen Helfer-Skriptchen tatsächlich endlich mal in ein geschlossenes Tool gegossen habe, das während des Abfassens dieser Arbeit Gold wert war. Danke, dass Du so hartnäckig geblieben bist!

Danke auch für den Müßiggang und den ganzen Unfug, über den wir im Büro immer gequatscht haben. Deswegen bin ich morgens gerne ins Büro gekommen! Einen adäquaten Büropartner-Ersatz für Dich hab ich bisher leider nicht wieder gefunden.

Ich möchte **Steff Engel** gerne erwähnen, den ich in meinen letzten beiden ISEA-Jahren in seiner Funktion als Oberingenieur mit einer wahren Paperflut zum Gegenlesen überschüttet habe. Entgegen bisheriger Erfahrungen kam diese Welle allerdings stets prompt in reichlich rotem Gewand zurückgeschwappt. Auch wenn der ein oder andere Kommentar möglicherweise über den Bedarf hinaus gegangen sein mag, waren mir deine Anmerkungen eine große Hilfe und eine wunderbare Vorbereitung auf's Verfassen der Diss. Vielen Dank dafür, Steff.

Ich möchte **Jessy Maßen** explizit erwähnen, um Dir für die stets schnelle und zuverlässige Vermittlung von Informationen zwischen DD und mir zu danken. Das war während des Promotionsverfahrens eine große Erleichterung für mich.

Ich werde das ISEA als sicher arbeitsreichen und häufig aufreibenden, in Summe aber als schönen und gelungenen Lebensabschnitt in Erinnerung behalten. Für die Begleitung durch diese Zeit möchte ich ein *General-Danke* an alle **ISEAner** loswerden.

München, Juni 2016
andi

Abstract

Switched reluctance machines are appealing to the automotive industry due to their cost efficiency. However, automotive traction is a very noise sensitive application where the acoustic behavior of the power train may be the distinction between market success and market failure. Hence, much research has been carried out focusing on the acoustic behavior of this machine type but mostly on small laboratory prototypes. Results have been assumed to be generally valid also for larger-sized traction drives although their vibro-acoustic behavior essentially differs from that of small machines. In fact, mode 0 is typically the most crucial noise source of well-designed traction drives.

The aim of this thesis is to erase mode-0-borne noise of switched reluctance machines by means of *direct instantaneous force control*. The proposed control scheme uses the fact that holding the sum of all radial phase forces constant in time effectively eliminates the excitation of mode 0.

A PWM-based approach and a hysteresis-based approach are introduced and evaluated by simulation and test-bench measurements. Both methods are functional to reduce mode-0-borne vibration. Beyond that, the hysteresis-based approach avoids distinct supply harmonics and provides higher inverter efficiency than the PWM-based scheme.

The general direct-instantaneous-force-control concept proves competitive compared to standard hysteresis current control regarding the aspects of driving-cycle efficiency, torque ripple, and DC-link stress. Therefore, direct instantaneous force control is deemed to be one of the future keys to low-noise switched reluctance traction drives.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Scope of the Work	1
1.2	Structure of the Work	2
2	Fundamentals on Spatial and Temporal Harmonics in Electrical Machines	3
2.1	Modal Decomposition of Vibration	3
2.1.1	System Transformation to Modal Coordinates	4
2.1.2	Low-order Lumped-Parameter Approximation	8
2.1.3	Modal Properties	11
2.2	Spatial and Temporal Force Harmonics in Electrical Machines	15
2.2.1	Spatial Harmonics – Force Shapes	19
2.2.2	Temporal Harmonics of Force Shapes	23
2.2.3	Spatial and Temporal Harmonics in Multiphase Operation	27
2.2.4	Asymmetrical Force Distributions in Electrical Machines	33
2.2.5	Supply Harmonics	36
2.3	The Core Idea of DIFC	44
2.4	Conclusions	46
3	Mode-Shape Zero in Automotive Traction Drives	49
3.1	Mode-shape 0 in the Current Electric-Vehicle Market	50
3.1.1	Overview of the German Electric-Vehicle Market in 2014	51
3.1.2	BMW i3	52
3.1.3	VW e-up! and VW e-Golf	55
3.1.4	Smart Fortwo Electric Drive	55
3.2	Mode-shape 0 in automotive SRMs	57
3.2.1	This Thesis' SRM – SR-A	57
3.2.2	Further automotive SRMs	62
3.3	Conclusions	64
4	PWM-Based Direct Instantaneous Force Control	65
4.1	Control Algorithm	66
4.1.1	Force-Reference Generator	66
4.1.2	Force Controller	69
4.1.3	Discussion of PWM-based DIFC	71
4.2	Proof of Concept	74
4.2.1	Simulation Results	74
4.2.2	Practical Implementation	78
4.2.3	Measurement Results	79

4.3	Uncertainties in the DIFC Concept	82
4.3.1	Flux-Linkage Estimation	83
4.3.2	Position-Sensor Distortion	88
4.3.3	Machine Parameters	95
4.3.4	Rotor Eccentricity	104
4.4	Measurement Results with Tuned DIFC	110
4.5	Conclusions	115
5	Hysteresis-Based Direct Instantaneous Force Control	117
5.1	Control Algorithm	117
5.1.1	Force-Reference Generator	118
5.1.2	Hysteresis Force Controller	119
5.1.3	Force Estimator	122
5.2	Proof of Concept	124
5.2.1	Simulation Results	124
5.2.2	Measurement Results	128
5.3	Conclusions	132
6	Secondary Evaluation Aspects of Direct Instantaneous Force Control	133
6.1	Operating Range of DIFC	133
6.2	Losses and Efficiency	136
6.2.1	Simulative Loss Analysis	137
6.2.2	Measurement Confirmation	145
6.3	Torque Ripple	146
6.4	DC-Link Stress	150
6.5	Conclusions	155
7	Conclusions and Future Work	157
7.1	Summary and Conclusions	157
7.2	Future Work	159
7.2.1	Enhancements for Switched Reluctance Machines	160
7.2.2	DIFC for Permanently Excited Synchronous Machines	161
A	Supplements: Theory Validation	165
A.1	Validation of the Multiphase-Operation Theory	165
A.2	Validation of the Asymmetrical-Force Theory	166
A.3	Validation of the Theory Regarding Implementation-Caused Supply Harmonics	169
A.4	Validation of the Theory Regarding PWM-Supply Harmonics	171
B	Supplements: Theoretical Background on Temporal Modulation	173
B.1	Discrete Control Implementation	173
B.2	Single-phase PWM	175
C	Supplements: DIFC Implementation	181
C.1	Measuring Machine Parameters	181
C.1.1	Flux-Linkage Characteristic	181

C.1.2 Radial-Force Characteristic	185
C.2 Implementation Details on the Applied Position Filter	189
C.3 Discussion of Non-Functional Force-Range-Prediction Approaches for Hyst.- DIFC	191
D Fourier Series	193
D.1 Continuous-Time Fourier Series	193
D.2 Discrete-Time Fourier Series	195
E Data of the Investigated Electrical Machines	197
E.1 Switched Reluctance Machine SR-A	197
E.2 Switched Reluctance Machine SR-B	198
E.3 Switched Reluctance Machine SR-C	198
E.4 Permanent Magnet Synchronous Machine PM-A	199
F Data of the Applied Measurement Equipment	201
G German Summary (Deutsche Zusammenfassung)	205
Acronyms	209
Bibliography	211
Curriculum vitae	229