

Optimization-based robust control for high-performance torque vectoring in electric vehicles operated by induction traction motors

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-Informatiker Diplom-Wirtschaftsingenieur
Zheng Hu
aus Jiangsu Provinz in China

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens

Tag der mündlichen Prüfung: 08. Feb. 2017

Aachener Schriftenreihe zur
Elektromagnetischen Energiewandlung

Band 24

Zheng Hu

**Optimization-based robust control for high-
performance torque vectoring in electric vehicles
operated by induction traction motors**

Shaker Verlag
Aachen 2017

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, 2017)

Aachener Schriftenreihe zur Elektromagnetischen Energiewandlung

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Kay Hameyer
Institut für Elektrische Maschinen
RWTH Aachen
52056 Aachen

Copyright Shaker Verlag 2017

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 978-3-8440-5209-1

ISSN 1861-3799

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

Deutsche Kurzfassung

Aufgrund hoher Kundenanforderungen an den Sicherheitsgrad im Automobil haben Sicherheitsfunktionen in Fahrzeugen eine besondere Bedeutung. Dazu gehört die Torque-Vectoring-Funktion als eine aktive Sicherheitsfunktion, die mittels asymmetrischer Antriebskräfte an beiden Fahrzeugseiten ein zusätzliches Giermoment erzeugt, um das Lenkverhalten entweder zu verbessern oder zu korrigieren. Im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen haben Elektrofahrzeuge den Vorteil, dass diese Funktion ohne spezifisches Differentialgetriebe realisiert werden kann. Darüber hinaus zeichnet sich ein elektrisches Antriebssystem durch hochdynamische Drehmomenterzeugung aus. Die gesamte Torque-Vectoring-Funktion in Elektrofahrzeugen beinhaltet die Regelungen der elektrischen Antriebe, der mechanischen Antriebsstränge und der Fahrquerdynamik. Um eine leistungsstarke Applikation zu implementieren, ergeben sich die Herausforderungen, dass die physikalischen Begrenzungen und die Unsicherheiten des Systems berücksichtigt werden müssen und gleichzeitig die Regeldynamik gewährleistet wird. Um einen zufriedenstellenden Kompromiss zu erzielen, wird die modellbasierte Prädiktivregelung (MPC) als theoretische Grundlage für diese Dissertation ausgewählt, in der Anwendung untersucht und umgesetzt.

Die kritischen Regelungsprobleme in elektrischen Antriebssystemen, einschließlich der bei Asynchronmotoren (ASM), lassen sich durch die Parametervariation der ASM, die Totzeit und die Strom- und Spannungsbegrenzung des Systems darstellen. Um die Parametervariation zu behandeln, werden zwei Lösungsansätze implementiert. Im ersten Ansatz wird die Methodik der Min-Max-Regelung verwendet. Das Regelsystem wird als ein lineares parameter-variiertes (LPV) System mit polytopischen Unsicherheiten vorgesehen. Die Robustheit des Systems wird dadurch gewährleistet, dass das Optimierungsproblem des schlimmsten Falls (an einem Vertex des Polytopes) durch eine Lyapunov-Funktion begrenzt und behandelt wird. Um eine echtzeitfähige Anwendung zu realisieren, wird der Optimierungsvorgang durch multiparametrische semidefinite Programmierung (mp-SDP) offline durchgeführt. Online wird ein effizienter Suchvorgang durch den Quadtree-Search-Algorithmus vorgenommen. Der andere Ansatz basiert auf sogenannter Tube-MPC-Methodik. Statt eines LPV-Systems wird das lineare zeitinvariante (LTI) System verwendet. Die Abweichung zwischen dem LTI-System und dem realen System wird durch einen robusten positiven invarianten (RPI) Satz begrenzt. Durch die Bestimmung des minimalen RPI (mRPI) Satzes werden sowohl die Robustheit als auch die Optimalität erzielt. Neben den Parameterunsicherheiten werden die Systembegrenzungen behandelt. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen, in denen die Strom- und Spannungsbegrenzungen direkt als Nebenbedingung des Optimierungsproblems vorgegeben sind, werden in dieser Arbeit die Systembegrenzungen nach der Umformulierung durch das Drehmoment

repräsentiert. Der Vorteil besteht darin, dass keine Approximation für die Darstellung der Nebenbedingungen vorgenommen werden muss und dadurch die Optimalität des Systems erhöht wird. Im mechanischen Antriebsstrang wird die primäre Regelungsaufgabe durch aktive Drehschwingungsdämpfung des übertragenen Antriebsmomentes dargestellt. Durch einen MPC-Regler mit einer Feedback-Kompensation kann die Drehschwingung an der Seitenwelle wesentlich unterdrückt werden. Um die Torque-Vectoring-Funktion zu vervollständigen, werden die Gierratenregelung als Hauptkomponente und die Reifenschlupfregelung als Hilfskomponente implementiert. Durch die Reifenschlupfregelung kann das Durchdrehen der Räder reduziert werden. Darüber hinaus wird eine Betriebsstrategie implementiert, welche abhängig von Fahrbahnsituationen eine zuverlässige Soll-Gierrate vorgibt. Da im Fahrzeugsystem lediglich Standardsensoren verfügbar sind, wird eine Strategie implementiert, die die nicht messbaren Signale abschätzt und sie der Regelsoftware zur Verfügung stellt.

Die oben genannten Subsysteme werden integriert und an einem Hardware-in-the-Loop-Prüfstand (HiL) validiert. Dazu werden die in ISO 7401 spezifizierten Fahrmanöver durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die implementierte Funktion in der Lage ist, nicht nur das Lenkverhalten des Fahrzeugs zu verbessern, sondern auch die Fahrstabilität bis zu den Systembegrenzungen zu gewährleisten.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Maschinen der RWTH Aachen.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Instituts, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer, für die Betreuung dieser Arbeit und seine fördernde Unterstützung, sowie für den Freiraum, den er mir einräumte, bei der Bearbeitung des Themas. Als Nächstes bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens für seine engagierte Übernahme des Korreferats und das entgegengebrachte Interesse an dieser Arbeit.

Weiterhin gebührt mein Dank den Mitgliedern meiner Prüfungskommission, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes, und Herrn Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Renato Negra.

Mein Dank gilt auch allen Assistenten des Instituts sowie Frau Petra Jonas-Astor, Frau Isabel Mainz und Frau Denise Boukamp für Hilfe, Entlastung und Beistand.

Nicht vergessen will ich alle wissenschaftlichen Hilfskräften, Studien-, Bachelor- und Masterarbeiter, die stets engagiert zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Der mechanischen und elektrischen Werkstatt des Instituts danke ich für die Unterstützung beim Prüfstands Aufbau meiner Arbeit. Für die stete Hilfsbereitschaft und schnelle unkomplizierte Unterstützung danke ich besonders Herrn Jörg Paustenbach.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Freunden, Bekannten und Verwandten, die mich auf meinem Weg begleitet haben.

Schließlich bedanke ich mich noch ganz herzlich bei meinen Eltern für die Ermöglichung des Studiums nach Deutschland. Besonders hervorheben möchte ich hier noch meinen väterlichen Freund, Herrn Prof. Dr. Wolfgang Kaefer, der mir stets wertvolle Ratschläge für mein Leben und meine Karriere gegeben hat und leider im Februar 2014 verstorben ist. Ohne deren Unterstützung wäre ich nicht soweit gekommen. Dafür widme ich ihnen diese Arbeit.

Aachen, im März 2017

Zheng Hu

Contents

1	Introduction	1
1.1	Torque vectoring and E-mobility	1
1.2	Motivation	2
1.3	Outline of the work	3
2	Torque vectoring in electric vehicles	7
2.1	Functionality	7
2.2	Vehicle configuration	8
2.3	Requirements and specifications	10
2.3.1	Functional requirements and test standards	10
2.3.2	Boundary conditions	11
2.3.3	Software specifications	11
3	State of the art and novelties of the work	15
3.1	MPC history and concept	15
3.2	Technical reviews	17
3.2.1	Electrical drive control	17
3.2.2	Oscillation damping control	19
3.2.3	Vehicle dynamics control	20
3.3	Objectives and contributions	21
4	Theoretical backgrounds of model predictive control	23
4.1	Backgrounds	23
4.1.1	Standard convex optimization problems	23
4.2	Basic principles of model predictive control	25
4.2.1	MPC startup	25
4.2.2	State estimation and disturbance modeling	26
4.3	Constrained model predictive control	29
4.3.1	On-line optimization problem	30

4.3.2	Multi-parametric QP	31
4.4	Robust model predictive control	32
4.4.1	Min-max control	32
4.4.2	Tube-based MPC	38
4.5	Summary	47
5	Robust current control in induction machines	49
5.1	Dynamic modeling of electric drive system	49
5.1.1	Modeling of induction machines	49
5.1.2	Uncertainties	52
5.2	Classical control approach	53
5.3	Robust current control in consideration of parameter variation . . .	55
5.3.1	Min-max current control	55
5.3.2	Tube-based robust model predictive current control	63
5.4	Constraint handling for the electric drive systems	72
5.5	Overview of the control approach	76
5.6	Simulation and experimental results	76
5.6.1	Simulation results	77
5.6.2	Experimental results	82
5.7	Summary	88
6	Active damping control in the mechanical drivetrain	89
6.1	Modeling of elastic mechanical drivetrain	89
6.1.1	Mechanical structure	89
6.1.2	Oscillation analysis	90
6.1.3	Parameter variation	92
6.2	Dynamic active damping control	94
6.3	Simulative and experimental results	96
6.4	Summary	99

7	High-performance torque vectoring control	101
7.1	Vehicle modeling	101
7.1.1	Coordinate systems	101
7.1.2	Tire modeling	105
7.1.3	Linear single track model	111
7.1.4	Dual track model	115
7.2	Vehicle dynamics control	117
7.2.1	Tire slip control	117
7.2.2	Inversed tire model	119
7.2.3	Yaw rate control	121
7.3	Operation strategy	125
7.3.1	Determination of reference yaw rate	125
7.3.2	Cross slope correction	128
7.3.3	Friction limit	130
7.4	Parameter estimation	130
7.5	Summary	139
8	Integration and Validation of the entire application	141
8.1	Simulation approaches	141
8.2	Results and evaluations	143
9	Conclusions and perspectives	153
A	Definitions and notations of optimization problems	157
B	Technical data of electric drivetrain	160
C	Measurement of the characteristic curve of the stator inductance	164
D	Dynamic torque constraint calculation	165
E	Technical data of mechanical drivetrain	166

F	Technical data of the hypothetical vehicle	167
F.1	The Magic Formula Tire Model: Full Set of Equations	168
F.1.1	Longitudinal Tire Force	168
F.1.1.1	Main Equations	168
F.1.1.2	Main Parameters	168
F.1.1.3	Auxiliary Parameters	169
F.1.2	Lateral Tire Force	169
F.1.2.1	Main Equations	169
F.1.2.2	Main Parameters	170
F.1.2.3	Auxiliary Parameters	170
F.1.3	Scaling of the Friction Coefficient	170
G	Derivation of the computations in the operation strategy	172
G.1	Derivation of system matrices of the EKF	172
G.2	Analytical calculation of the vehicle lateral velocity $\hat{v}_y^V$	173
H	Test maneuvers	174
H.1	Lateral Transient Response Test (ISO 7401)	174
H.2	Sine-Steer Test (ISO 7401)	174
H.3	Sine-steer Test with dwell input (UN 13-H)	174
I	Estimation results	176
I.1	Lateral transient response test	176
I.2	Sine-steer test	177
I.3	Sine-steer with dwell test	179
J	Abbreviation	181
K	Nomenclature	185
	Bibliography	191
	Lebenslauf	211