Steuerungs- und Regelungstechnik

Bernhard Rolle

Model Predictive Energy Management for Induction Motor Drives and All-Wheel-Drive Battery Electric Vehicles

Band 57

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Model Predictive Energy Management for Induction Motor Drives and All-Wheel-Drive Battery Electric Vehicles

A Flatness Based Approach

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte
Abhandlung

Vorgelegt von

Bernhard Friedrich Karl Rolle

geboren in Johannesburg Südafrika

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Knut Graichen
Tag der mündlichen Prüfung:	21. Dezember 2020

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2020

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 57

Bernhard Rolle

Model Predictive Energy Management for Induction Motor Drives and All-Wheel-Drive Battery Electric Vehicles

A Flatness Based Approach

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021
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 978-3-8440-7897-8
ISSN 1863-9046

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit der Daimler AG.

Ich bedanke mich bei allen, die mich in dieser spannenden und überaus herausfordernden Zeit begleitet und unterstützt haben. In einem lebhaften und familiären Umfeld konnte ich von inspirierenden Menschen lernen, die alle in vielfältiger Art und Weise zum erfolgreichen Abschluss der Promotion beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Oliver Sawodny für die ausgezeichnete Betreuung und das entgegengebrachte Vertrauen. Herrn Prof. Knut Graichen danke ich für den anregenden und freundlichen Austausch sowie die schnelle Übernahme des Mitberichts. Außerdem danke ich Herrn Prof. Hans-Christian Reuss für die angenehme und beruhigende Atmosphäre, die im Vorsitz der Prüfungskommission ausgestrahlt wurde. Ebenfalls bedanke ich mich bei Herrn Prof. Michael Zeitz und Herrn Dr. Eckhard Arnold für ihr ermutigendes Interesse und die hilfreichen, fachlichen Diskussionen.

Im Weiteren bedanke ich mich herzlich bei allen Kolleginnen und -kollegen der Abteilung RD/EIC für die hilfsbereite Atmosphäre und die gute Zusammenarbeit. Speziell gilt mein Dank Herrn Ulrich Springer und Herrn Tobias Wolf für ihre umfangreiche Unterstützung und die vielen Möglichkeiten, die mir in einem exzellenten Projektrahmen geboten wurden.

Ich bin überaus dankbar am Institut, nicht nur tolle Kolleginnen und -kollegen, sondern auch gute Freunde gefunden zu haben. Euch danke ich für euren Rat und die vielen unvergesslichen Momente. Ein großes Dankeschön an das Sekretariat und die Werkstatt für ihr offenes Ohr und die bedingungslose Hilfsbereitschaft. Auch den Studierenden, denen ich in der Vorlesungsbetreuung und der Betreuung der Abschlussarbeiten begegnet bin, danke ich für die gewonnenen Ideen und Erfahrungen.

Mein ausdrücklicher Dank gilt meiner Familie für ihren beständigen Rückhalt. Besonders danke ich meiner Frau für ihre Geduld, ihr Verständnis und die hartnäckige Ermutigung mal abzuschalten und zu entspannen.

Stuttgart, Januar 2021 Bernhard Rolle

Abstract

Since emission and fuel economy standards have risen significantly, car manufacturers find themselves forced to invest in new battery and related technologies. Research on methods and technologies that improve the efficiency of both the battery and the electric powertrain, pose the greatest challenges of this technological transition. Therefore, software solutions for energy management and motion control as well as economic driving strategies are becoming more and more the focus of future developments. Software solutions allowing for potential economic savings are particularly appealing, since these do not require any structural or mechanical design changes.

With the main objective of increasing economic savings, this present work investigates analytical models of the electric powertrain for a battery electric vehicle with two drive modules on the front and rear axle. The modeling approach focuses on loss processes associated with the energy conversion of the voltage source inverters and induction motors. Due to a wide spectrum of involved time constants in the range of seconds to a few milliseconds, efficiency analyses of electric vehicles rarely follow model-based approaches and instead rely on characteristic loss maps, which neglect dynamic effects and physical limitations, for example, those resulting from the limited battery voltage. This widespread sespectrum comes from both the longitudinal dynamics of the vehicle and the voltage and current harmonics that result from high frequency switchings of the inverters' semi-conductors. New dynamical models are thus proposed that can be efficiently integrated into vehicle simulations and also be implemented online on embedded systems, such as the motor control unit of the investigated vehicle. In doing so, an average value model of the voltage source inverter is derived, based on a double Fourier integral analysis of the semi-conductor switching signals. Furthermore, a widely used model of the induction motor, applied for motor analysis and control design, is reformulated into an equivalent differential flat system based on the definition of a new flat output. Both component models are integrated into a vehicle simulation of a Mercedes Benz EQC prototype and are thoroughly validated through extensive simulative studies and experimental test series.

With the help of the newly introduced models and with the assistance of modern vehicle sensor systems, control strategies of the electric powertrain are investigated that aim for the most energy efficient operation. In a first step, decentralized optimal control approaches are proposed that improve the efficiency of the electric drive module, not

only during stationary operation, but also during transient torque con-ditions. This improvement is achieved by an appropriate field oriented control method. In a second step, optimization-based torque allocation strategies are investigated and evaluated experimentally. Finally, a centralized predictive control approach is presented that exploits all operational degrees of freedom, which are the variable torque allocation, the front and rear axle magnetic flux, and the adjustment of the vehicle speed according to topographical and traffic dependent conditions. Significant economic savings are demonstrated for the decentralized control methods as well as for the centralized control approach.

The high level of accuracy and performance that is achieved by the proposed model-based framework and predictive operational strategies are only made possible by exploiting the positive structural properties of the newly introduced differential flat system representation of the induction motor.

Kurzfassung

Durch die fortschreitende Verschärfung der gesetzlichen Anforderungen sehen sich Automobilhersteller gezwungen, in die zunehmende Verwendung von Batteriesystemen zu investieren. Die größte Herausforderung dieses technologischen Wandels stellen Verbesserungen im Bereich der Batterietechnologie mit dem Fokus einer effizienteren Energieumwandlung dar. In Anbetracht der Tatsache, dass in naher Zukunft keine disruptive neue Batterietechnologie erwartet wird, rücken softwaretechnische Lösungen im Energie- und Vortriebsmanagement und sogenannte Eco-Driving Assistenzsysteme immer weiter in den Vordergrund der Forschung und Entwicklung. Entsprechende Technologien sind von großem Interesse, da sie keine baulichen Änderungen erfordern.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der analytischen Modellbildung des elektrischen Antriebsstrangs eines batterieelektrischen Fahrzeugs mit zwei Antriebseinheiten auf der Vorder- und Hinterachse mit dem Ziel einer effizienteren Energiewandlung. Im Vordergrund der Modellierung stehen die Verlustprozesse der Wechselrichter und Asynchronmaschinen. Aufgrund des hohen Spektrums der dominanten Zeitkonstanten im Bereich von wenigen Millisekunden bis hin zu einigen Sekunden, hervorgerufen durch die Trägheit der Fahrzeuglängsdynamik sowie der Strom- und Spannungsoberwellen des Wechselrichters, finden dynamische Modelle der elektrischen Komponenten in Effizienzanalysen elektrischer Fahrzeuge selten Anwendung. So werden Verlustkennfelder gegenüber modellbasierten Ansätzen weitgehend bevorzugt. Stationäre Kennfelder sind jedoch nicht in der Lage, dynamische Verlusteffekte und Randbedingungen, die z.B. aus dem Abfall der Batteriespannung bei hohen Leistungsanforderungen resultieren, abzubilden. Diese Arbeit stellt neue dynamische Modellansätze vor, die nicht nur eine effiziente Integration in einer Gesamtfahrzeugsimulation ermöglichen, sondern aufgrund Ihrer Echtzeitfähigkeit auch auf der Motorsteuerung des betrachteten Versuchsfahrzeugs implementiert werden können. Die Modellierung des Wechselrichters erfolgt dabei im Frequenzbereich durch die Betrachtung einer zweidimensionalen Fourier-Entwicklung der Halbleiter-Schaltsignale. Ein in der feldorientierten Regelung häufig genutztes Modell der Asynchronmaschine wird durch die Definition eines neuen flachen Ausgangs in eine äquivalente differenzielle Form transformiert. Beide Teilmodelle werden in ein Fahrzeugmodell eines Versuchsträgers, der auf einem Mercedes Benz EQC basiert, integriert und durch umfangreiche Simulationen und Messungen validiert.

Die Betriebsstrategie des elektrischen Antriebsstrangs wird auf Basis der neu vorgestellten Modelle unter Berücksichtigung zusätzlicher Fahrzeugsensorik hinsichtlich der Energieeffizienz optimiert. Zunächst wird eine dezentrale Optimalsteuerung betrachtet, welche die Effizienz der Asynchronmaschine durch eine variable Feldstärke im stationären Betrieb wie auch bei dynamischen Momentenanforderungen steigert. Anschließend wird eine Optimalsteuerung für die Verteilung des Antriebsmoments implementiert und experimentell bewertet. Abschließend wird eine zentrale modellprädiktive Regelung untersucht, die alle verfügbaren Freiheitsgrade nutzt: die variable Momentenverteilung, die Feldstärke beider Antriebseinheiten und die Anpassung der Geschwindigkeit an die topographischen und verkehrsbedingten Gegebenheiten. Sowohl für das dezentrale als auch für das zentrale Reglungskonzept kann eine deutliche Verbesserung der Effizienz nachgewiesen werden.

Der wesentliche Beitrag dieser Arbeit ist die neue flache Darstellung der Asynchronmaschine, ohne die das modellprädiktive Regelungskonzept in dem vorgestellten Detaillierungsgrad nur mit sehr hohem rechentechnischem Aufwand umsetzbar wäre.

Contents

1 Introduction **1**
1.1 Battery Electric Vehicles . . . 4
1.2 Operational Strategies . . . 5
1.3 State-of-The-Art Review . . . 6
1.3.1 Economic Driving . . . 6
1.3.2 Optimal Torque Distribution . . . 9
1.3.3 Electric Drive Modeling and Control . . . 10
1.4 Goals and Contributions of this Dissertation . . . 13
1.5 Thesis Overview . . . 15

2 Electric Powertrain Modeling **19**
2.1 Voltage Source Inverter . . . 21
2.1.1 Pulse Width Modulation . . . 21
2.1.2 Conduction & Switching Losses . . . 24
2.1.3 Double Fourier Analysis . . . 25
2.1.4 Average Value Model . . . 27
2.2 Induction Motor . . . 30
2.2.1 Reference Frame Transformation . . . 32
2.2.2 State Space Model . . . 34
2.2.3 Core Losses & Saturation . . . 36
2.2.4 Steady State Equations . . . 37
2.2.5 Offline Identification . . . 38
2.2.6 Online Identification . . . 41
2.2.7 In-Vehicle Identification . . . 41
2.3 Drivetrain . . . 44
2.3.1 Regenerative Braking . . . 45
2.3.2 Friction Losses . . . 47
2.4 Electric Drive Module . . . 48
2.4.1 Block Diagram . . . 48
2.4.2 Operating Region . . . 50
2.5 Battery . . . 50
2.5.1 Circuit Model . . . 51
2.5.2 Electric Power Distribution . . . 52
2.6 Experimental Validation . . . 54
2.6.1 Electric Drive Module Components . . . 56

2.6.2 Comparison of Steady State and Transient Operation 60
2.6.3 Battery Voltage 62
2.7 Model Summary 64

3 Energy Management Strategies for Induction Motor Drives 67
3.1 Field Oriented Control 69
3.1.1 Flux Estimation 70
3.1.2 Current Control 71
3.1.3 Torque and Flux Control 75
3.2 Efficiency Optimized FOC 77
3.2.1 Loss Minimizing Control 78
3.2.2 Maximum Torque Per Ampere/Volt 83
3.2.3 Validation of BEV Control Strategies 85
3.3 Flatness Based Control 87
3.3.1 Two Degree of Freedom Control 91
3.4 Optimal Control for Transient Operation 94
3.4.1 Direct Multiple Shooting 96
3.4.2 Optimized Reference Governor 99
3.5 Comparison of EDM Control Strategies 105
3.6 Summary 107

4 Energy Management Strategies for All-Wheel-Drive BEVs 111
4.1 Model-Based Range Analyses 112
4.2 Torque Allocation Strategies for All-Wheel-Drive BEVs 117
4.2.1 Energy-Efficient Torque Allocation 118
4.2.2 Experimental Validation 123
4.3 Model Predictive Control Strategies for Economic Driving 127
4.3.1 Nonlinear Model Predictive Control 129
4.3.2 Simulative Evaluation 131
4.4 Summary 138

5 Conclusion 139

A Appendix 143
A.1 Reference Frame Transformation 143
A.1.1 dq0 Formulation 143
A.1.2 Space Vector Formulation 144
A.1.3 Induction Motor Reference Frames 144
A.2 Pulse Width Modulation 145
A.3 Algorithmic Development for Direct Multiple Shooting 146
A.3.1 Interiour Point Method 148
A.3.2 Integration and Differentiation 149

A.4 Experimental Study 151
A.4.1 Field Study 151
A.4.2 Powertrain Integration Center Test Series 151

Acronyms **161**

Notation **165**

List of Figures **175**

List of Tables **179**

Bibliography **181**