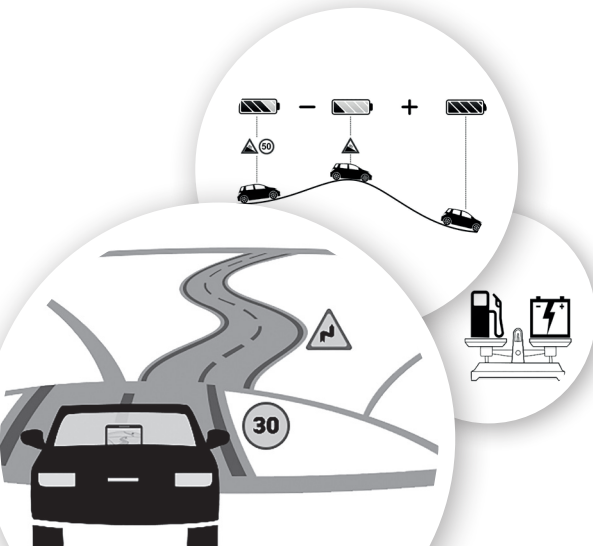


Predictive Multi-objective Operation Strategy Considering Battery Cycle Aging for Hybrid Electric Vehicles



Schriftenreihe des Instituts für
Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe
Prof. Dr. techn. Christian Beidl (Hrsg.)

Band 17

SHAKER
VERLAG

Predictive Multi-objective Operation Strategy Considering Battery Aging for Hybrid Electric Vehicles

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

M.Sc. Jiao Li

aus Shanxi, China

Berichterstatter:	Prof. Dr. techn. Christian Beidl
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Tag der Einreichung:	06.05.2020
Tag der mündlichen Prüfung:	30.06.2020

Darmstadt 2020



Schriftenreihe
des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe

Band 17

Jiao Li

**Predictive Multi-objective Operation Strategy Considering Battery
Aging for Hybrid Electric Vehicles**

D17 (Dissertation TU Darmstadt)

Shaker Verlag

Düren 2020

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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 978-3-8440-7605-9

ISSN 2365-3795

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand aus meiner Tätigkeit im Doktorandenprogramm der Robert Bosch GmbH in Schwieberdingen bei Stuttgart und als Doktorandin am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Darmstadt.

Meinem Doktorvater und Institutsleiter, Herrn Prof. Dr. techn. Christian Beidl, möchte ich für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit und seine Unterstützung besonders danken. Obwohl das Vorgaben hauptsächlich bei der Robert Bosch GmbH bearbeitet wurde, waren unsere Gespräche und Diskussionen immer hilfreich, um die wichtigsten Punkte herauszuarbeiten. Außerdem hat er den intensiven Austausch zwischen mir und den anderen Institutskollegen gefördert. Für die Übernahme des Korreferats und sein Interesse an der Arbeit bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Bargende vom Institut für Fahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart.

Die weitere Betreuung der Arbeit bei Bosch wurde von Dipl.-Ing. Thomas Huber übernommen, wofür ich ihm sehr herzlich danke. Er hat mich während der Promotion begleitet und durch unsere intensiven Diskussionen immer für neue Anregungen gesorgt. Seine langjährige Erfahrung im Bereich Betriebsstrategie hat zum Erfolg meiner Promotion beigetragen. Weiterhin möchte ich mich bei allen Kollegen und Studenten bedanken, die mich in vielfältiger Art und Weise bei dieser Arbeit unterstützt haben.

Zu guter Letzt danke ich in besonderem Maße meiner gesamten Familie und meinen Freunden. Ohne euer Verständnis und eure Unterstützung während des Studiums wäre das Vorhaben grundsätzlich nicht möglich gewesen. Der allergrößte Dank geht an mein Freund, Chenghao, der mich bei der Anfertigung dieser Arbeit trotz der Zeitverschiebung mit China stets motiviert hat. An dieser Stelle möchte ich noch meiner Nichte im Krankenhaus die Kraft, den Mut und die Zuversicht, die ich auf diesem Promotionsweg bekommen habe, weitergeben. Ich drücke dir ganz fest die Daumen!

Stuttgart, im April 2020

Jiao Li



Abstract

Due to the future CO_2 targets for vehicles, electrification of powertrains and operation strategies for electrified powertrains have drawn more attention. This work presents a predictive multi-objective operation strategy for Hybrid Electric Vehicles (HEVs), which simultaneously minimizes the fuel consumption and the cycle aging of traction batteries by using the predictive information.

In this work, the benefits of different operation strategies are demonstrated in a full HEV with P2-configuration. For the cycle aging of a lithium-ion battery, an empirical model is built up with Gaussian processes based on measurement data. Two different optimization algorithms, “Deterministic Dynamic Programming” (DDP) and extended “Multi-Objective Equivalent Consumption Minimization Strategy” (MO-ECMS), are carried out with a priori knowledge of cycle information, to obtain the Pareto front between fuel consumption and battery cycle aging. A meaningful weighting factor for battery cycle aging is chosen based on the Pareto front.

In order to achieve the maximal potential of the multi-objective operation strategy for in-vehicle optimization, a predictive operation strategy (pMO-ECMS) is further developed based on acausal MO-ECMS. Different methods are considered to incorporate predictive information into the operation strategy. For example, the navigation-based road information is used to modify parameters of the pMO-ECMS; a reference State of Charge (SoC) trajectory is generated with estimated vehicle velocity and road slope.

This predictive multi-objective operation strategy (pMO-ECMS) has been implemented in an experimental vehicle. It optimizes the torque split between Internal Combustion Engine (ICE) and Electric Drive (E-Drive) real-time. The measurements on a realistic driving cycle show that the developed multi-objective operation strategy can reduce the battery cycle aging significantly and the prediction makes sense to reduce the fuel consumption in real driving conditions.

In the end, this proposed strategy shows high robustness to inaccuracy of predictive information and wide application for other kinds of HEVs, e.g. with other topologies or for Plug-in HEV (PHEV).



Kurzfassung

Um zukünftige Anforderungen an CO_2 -Emissionen zu erfüllen, gewinnen die Elektrifizierung des Antriebsstrangs und die dafür benötigten Betriebsstrategien an Bedeutung. In der vorliegenden Arbeit wurde eine prädiktive multikriterielle Betriebsstrategie für Hybrid-Elektrofahrzeug (HEV) entwickelt, die den Kraftstoffverbrauch und die zyklische Alterung der Traktionsbatterie durch Nutzung von vorausschauenden Informationen gleichzeitig optimiert.

In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Betriebsstrategien in einem voll HEV mit P2-Topologie untersucht und bewertet. Für die zyklischen Alterung einer Lithium-Ionen-Batterie wurde ein empirisches Modell mit Gaußschen Prozessen aufgebaut, das auf Messdaten basiert. Zwei Optimierungsalgorithmen, „Deterministic Dynamic Programming“ (DDP) und die erweiterte „Multi-Objective Equivalent Consumption Minimization Strategy“ (MO-ECMS), wurden mit a-priori Information des Fahrprofils angewendet, um die Pareto-Front zwischen Kraftstoffverbrauch und zyklischer Alterung der Batterie zu ermitteln. Ein aussagekräftiger Gewichtungsfaktor für zyklische Batteriealterung im Vergleich zu Kraftstoffverbrauch wurde basierend auf der Pareto-Front ausgewählt.

Um das maximale Potenzial der multikriteriellen Betriebsstrategie auch im Fahrzeugeinsatz zu realisieren, wurde auf Basis der akausalen MO-ECMS eine prädiktive Betriebsstrategie (pMO-ECMS) entwickelt. Zur Nutzung der prädiktiven Informationen in der Betriebsstrategie wurden verschiedene Ansätze untersucht. Beispielsweise wurden navigationsbasierte Streckeninformationen verwendet, um Parameter in der pMO-ECMS zu modifizieren. Für den State-of-Charge (SoC) der Batterie wurde auf Basis der vorab geschätzten Fahrzeuggeschwindigkeit und der Straßensteigung eine Referenztrajektorie generiert.

Diese prädiktive multikriterielle Betriebsstrategie (pMO-ECMS) wurde in einem Versuchsfahrzeug implementiert. Sie optimiert die Drehmomentverteilung zwischen Verbrennungsmotor (ICE) und elektrischem Antrieb (E-Drive) in Echtzeit. Messungen in einem realistischen Fahrzyklus zeigen, dass die multikriterielle Betriebsstrategie ohne Prädiktion die zyklische Alterung der Batterie deutlich reduzieren kann. Die Prädiktion ist sinnvoll, um den Kraftstoffverbrauch im realen Fahrbetrieb weiter zu senken.

Zudem wurde gezeigt, dass die pMO-ECMS eine hohe Robustheit gegenüber Ungenauigkeiten von prädiktiven Informationen aufweist und daneben für eine breite Anwendung in HEV, z.B. mit anderen Topologien oder auch in Plug-in HEV (PHEV), geeignet ist.



Contents

List of Figures	V
List of Tables	X
List of Abbreviations	XI
List of Nomenclature	XIII
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Objectives, Research Questions and Approaches	2
1.3 Structure of the Thesis	3
2 State of the Art	6
2.1 HEV Powertrains	6
2.1.1 Features	6
2.1.2 HEV Powertrain Classifications	8
2.2 Optimal Control Theory and Operation Strategy	11
2.2.1 General OCP and Solving Methods	12
2.2.2 Application of Optimal Control in HEV Operation Strategy	15
2.3 Battery Aging Mechanisms and Estimation	21
2.3.1 Aging Events at Electrodes	21
2.3.2 Aging Modeling and Estimation	24
2.4 Predictive Data from Connectivity	25
2.4.1 Predictive Data	26
2.4.2 Data Sources	27
2.4.3 Applications	30
2.5 Technical Gap	33
2.5.1 Multi-objective Operation Strategy Considering Battery Cycle Aging	33
2.5.2 Predictive Operation Strategy	34

2.5.3	Highlights of this Work	35
3	Vehicle Model and Function Structure	36
3.1	Experimental Vehicle	36
3.2	Simulation Approaches	36
3.2.1	Forward Simulation	36
3.2.2	Co-simulation with GT-Suite and Simulink	38
3.3	Vehicle and Components Model	39
3.3.1	Driving Profile and Driver Model	39
3.3.2	Vehicle Dynamics	40
3.3.3	Friction-based Brake System	42
3.3.4	Dual-Clutch Transmission	43
3.3.5	ICE	45
3.3.6	E-Drive	46
3.3.7	Auxiliary System	47
3.3.8	High Voltage Battery	48
3.3.9	Torque and Angular Velocity Coordination	52
3.4	Validation Process and Results	53
3.4.1	Driver+Vehicle Dynamics+Transmission	54
3.4.2	ICE+E-Drive+Battery	55
3.4.3	Control Units	56
3.4.4	Final Validation Results	57
3.5	Function Structure	58
4	Multi-objective Operation Strategy	59
4.1	Backward Simulation	59
4.2	Optimal Control Problem Formulation	60
4.3	Deterministic Dynamic Programming	61
4.3.1	State and Control Variables Selection	62
4.3.2	Discretization Selection	63
4.3.3	Search for Feasible Solution Area Method Selection	66
4.4	Multi-Objective Equivalent Consumption Minimization Strategy	66
4.4.1	Mathematical Derivation	67
4.4.2	State and Control Variables Selection	68
4.4.3	Discretization Selection	69
4.5	Simulation Results and Analysis	71
4.5.1	Comparison between DDP and ECMS	71
4.5.2	Pareto Front based DDP and (MO-)ECMS	73
4.5.3	Meaningful Weighting Factor	75

5	Predictive Multi-objective Operation Strategy	77
5.1	From Backward Simulation to Forward Simulation	77
5.1.1	Difference for Simulink Model	77
5.1.2	Threshold Value in Simulink Model	80
5.1.3	Comparison between Backward and Forward Simulation	81
5.2	Adaptive and Predictive Multi-objective Operation Strategy	82
5.2.1	PI-controller and Parameter Selection	82
5.2.2	From Adaptive to Predictive	84
5.3	Principles of PSG	86
5.3.1	SoC_{des} Calculation according to Estimated Driving Profile v_{des}	86
5.3.2	Parameter Loop in the SoC_{des} Generation	89
5.3.3	s_0 Estimation according to Static Road Type Information	90
5.4	Simulation Results Analysis	90
5.4.1	Results from PSG	90
5.4.2	Parameter Selection and Results Analysis	92
5.4.3	Benefits from Prediction	94
5.4.4	Conclusions	96
6	Implementation and Evaluation of pMO-ECMS in Experimental Vehicle	97
6.1	Hardware Equipment in Experimental Vehicle	97
6.1.1	Additional Hardware Equipment	97
6.1.2	Implementation of Function Modules	98
6.2	Test Cycle Description	99
6.3	Overview about Different Evaluation Approaches	100
6.4	Vehicle Test Results Evaluation	102
6.4.1	Description of Raw Vehicle Test Results	103
6.4.2	Evaluation and Analysis of Vehicle Test Results	106
6.5	Simulation Results and Analysis	112
6.5.1	Comparison between aECMS and aMO-ECMS	113
6.5.2	Comparison between aMO-ECMS and pMO-ECMS	114
7	Requirements for Predictive Data and Methods to Ensure the Robustness	116
7.1	From Time Segment to Distance Segment	116
7.2	Issues and Approaches for Requirements	117
7.2.1	Influence Factors and Working Principle	117
7.2.2	Approaches to Make Requirements	120
7.3	Sensitivity Analysis Results	122
7.3.1	Function Parameter Analysis	122

7.3.2	Input Signals Analysis	124
7.3.3	Vehicle Parameters Analysis	125
7.3.4	PES Rules Analysis	126
7.3.5	Conclusions	128
7.4	Methods to Ensure the Robustness	128
7.4.1	PSG Algorithm Analysis	128
7.4.2	Requirements for Additional Features and Triggers	129
7.5	Suggestions for Improvement and Open Issues	130
8	Applicability and Expandability of pMO-ECMS	131
8.1	Applicability for Other Topologies and Other Degrees of Hybridization . .	131
8.1.1	Vehicle Model	131
8.1.2	Adaption of pMO-ECMS for Other Topologies	133
8.1.3	Adaption of pMO-ECMS for Other Degrees of Hybridization . . .	134
8.1.4	Simulation Results and Analysis	135
8.2	Expandability for Other Predictive Data	137
8.2.1	Dynamic Information	137
8.2.2	New Information	138
8.2.3	Same Information from Different Sources	138
8.3	Expandability for Other Optimization Criteria and Other Control Variables	139
8.3.1	Other Optimization Criteria	139
8.3.2	Other Control Variables	139
9	Conclusions and Outlook	142
9.1	Conclusions	142
9.2	Outlook	145
	Appendices	147
	Bibliography	152