

MAHLE Doktorandenprogramm
Schriftenreihe

10

Electric Five-Phase Actuators in Steering
Systems for Autonomous Driving

Tim Buchali

Electric Five-Phase Actuators in Steering Systems for Autonomous Driving

Der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
(abgekürzt: Dr.-Ing.)
vorgelegte Dissertation

von
Tim Buchali, M. Sc.

geboren am 25. Juni 1989
in Berlin

2021

1. Referent
2. Referent
Vorsitzender

Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens
Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour
Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick

Tag der Promotion (Datum der mündlichen Doktorprüfung):

13.10.2021

Schriftenreihe des MAHLE Doktorandenprogramms

Band 10

Tim Buchali

**Electric Five-Phase Actuators in Steering Systems
for Autonomous Driving**

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.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2021

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 978-3-8440-8314-9

ISSN 2195-4402

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

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was written during my PhD time at the MAHLE Group. I am grateful to have been part of a research project in the corporate research and advanced engineering department. An innovative idea grew into a great project that I was able to help shape. During the same time, I had the chance to work together with the team of the Institute for Drive Systems and Power Electronics of the Leibniz Universität Hannover. Many research stays gave me the opportunity to develop and create this work.

I would like to thank Professor Dr.-Ing. Axel Mertens for his encouragement and scientific help. He guided me with great advice and pushed the research topics significantly with his experience.

I am grateful to Professor Dr.-Ing. Nejila Parspour for the discussions about the topic and the efforts as a co-examiner.

Besides the support on the scientific side, I want to give thanks to my supervisors in the CRA, of the MAHLE Group. Dipl.-Ing. Markus Cramme and Dr.-Ing. Marco Warth, who supported my research ideas from the very beginning. Furthermore, I want to thank the whole team of the CRA in Stuttgart for the support and the positive collaboration. I also want to thank the MAHLE International GmbH for the opportunity to do my doctorate and to Ulrike Brand and Anja Ullrich for their support.

Additionally, I would like to thank the whole team of the Institute for Drive Systems and Power Electronics at the Leibniz University Hannover. The daily routine and many coffee breaks provided me with a pleasant and fruitful environment. I always felt welcome although I was only temporarily present.

Such a big work, however, can not be done without a strong base. This base was built and defended by my wife, Katrin. Thank you for your acceptance, your understanding and your support, even if I had to thwart your plans for evenings and weekends several times. For my whole educational life, I also want to say thank you to my parents and my grandparents. You challenged me in discussions, gave feedback on research approaches and accepted my decisions even though you did not always agree with it. Special thanks goes to my brother, who has supported me in many ways, often without anything in return.

Stuttgart, October 2021

Tim Buchali

ABSTRACT

The reliable operation of actuators is an important topic in automation. Particularly in the area of automotive traffic, the demand on reliability of actuators for driving increases significantly with an enhancing level of automation. Important actuator systems for driving are the steering, braking and accelerating systems. These systems must not fail totally in driverless scenarios. State-of-the-art steering actuators achieve the required reliability by doubling of common three-phase actuators. If the reliability has to increase further, this solution is no longer efficient in terms of installation space, weight, costs and energy consumption. This is where multi-phase machines step in. In this thesis, a five-phase actuator concept for a steering application is proposed which achieves a high safety level by using a single-phase control. Three main points are investigated - the requirements, the reliability and the fail-operational strategy.

The required torque of the actuator is defined by test drives. Different driving cycles are conducted to examine the steering rack forces. By analysing the system architecture, the steering rack forces are related to the required steering torque of the actuator.

A method for reliability analysis is developed and explained in general. According to results of this analysis, it is shown how reliability of an actuator system can be increased by an efficient use of redundancy. The methodology can also be transferred to other system architectures.

The use of a fail-operational strategy enables a post-fault operation. Starting with a basic consideration, concepts for torque production after a fault are developed. Different methods to design a post-fault operation are investigated. The result is an innovative post-fault control of the electric machine that can be adapted regarding various steering requirements on the basis of the investigation. The theoretical design of the post-fault operation is verified experimentally on the test bench for various operating points of a steering system. Results show that the theoretical consideration can be implemented to a large extent in reality. The fault management is documented in detail and, therefore, can be applied to other boundary conditions or other components.

With respect to the requirements, the presented five-phase actuator concept is compared with the conventional single three-phase and double three-phase actuators. The important parameters are reliability, which plays a major role in safety-critical applications, achievable torque in a post-fault operation and its torque quality where a high quality means that it is free from torque ripples. It is shown that, in contrast to the state-of-the-art, the presented concept is more reliable and provides multiple redundancy levels. This represents a significant improvement in reliability and user experience. Furthermore, it is proven that the proposed actuator concept is able to provide a significantly higher torque in post-fault operation compared to the state-of-the-art.

Keywords: multi-phase motor drive system, fault tolerance, redundancy, control reconfiguration, electric power steering

KURZFASSUNG

Der zuverlässige Betrieb von Aktoren ist ein wichtiges Thema in der Automatisierung. Insbesondere im Bereich des Straßenverkehrs steigen die Anforderungen an die Zuverlässigkeit von Aktoren mit zunehmendem Automatisierungsgrad deutlich an. Wichtige Aktorsysteme für das Fahren sind das Lenk-, Brems- und Antriebssystem. Diese Systeme dürfen in fahrerlosen Szenarien nicht vollständig ausfallen. Lenkaktoren, nach dem Stand der Technik, erreichen die geforderte Zuverlässigkeit durch eine Verdopplung der üblichen dreiphasigen Aktoren. Muss die Zuverlässigkeit weiter gesteigert werden, ist diese Lösung in Bezug auf Bauraum, Gewicht, Kosten und Energieverbrauch nicht mehr effizient. Hier kommen mehrsträngige Maschinen zum Einsatz. In dieser Arbeit wird ein fünfsträngiges Aktorkonzept für eine Lenkanwendung vorgestellt, dass durch die Nutzung einer Einzelstrangregelung ein hohes Sicherheitsniveau erreicht. Es werden drei Hauptpunkte untersucht: die Anforderungen, die Zuverlässigkeit und die fehlertolerante Strategie.

Das erforderliche Drehmoment des Aktors wird durch Testfahrten definiert. Es werden verschiedene Fahrzyklen durchgeführt, um die Zahnstangenkräfte zu untersuchen. Durch die Analyse der Systemarchitektur werden die Lenkkräfte in Zusammenhang mit dem benötigten Lenkmoment des Aktors gebracht.

Eine Methode zur Zuverlässigkeitsanalyse wird entwickelt und allgemein erläutert. Anhand der Ergebnisse dieser Analyse wird gezeigt, wie die Zuverlässigkeit eines Aktorsystems durch einen effizienten Einsatz von Redundanz erhöht werden kann. Die Methodik ist auch auf andere Systemarchitekturen übertragbar.

Der Einsatz einer fehlertoleranten Strategie ermöglicht einen Weiterbetrieb im Fehlerfall. Ausgehend von einer grundlegenden Betrachtung werden Konzepte für die Drehmomenterzeugung nach dem Auftritt eines Fehlers entwickelt. Es werden verschiedene Methoden zur Auslegung eines Weiterbetriebs untersucht. Auf Basis der Untersuchung ergibt sich eine innovative Regelung der elektrischen Maschine, die hinsichtlich verschiedener Anforderungen von Lenksystemen angepasst werden kann. Der theoretische Entwurf des Weiterbetriebs wird am Prüfstand für verschiedene Betriebspunkte eines Lenksystems experimentell verifiziert. Die Ergebnisse zeigen, dass die theoretische Betrachtung weitgehend in die Realität umgesetzt werden kann. Das Fehlermanagement ist detailliert dokumentiert und kann daher auf andere Randbedingungen oder andere Komponenten übertragen werden.

Im Hinblick auf die Anforderungen wird das vorgestellte fünfsträngige Aktorkonzept mit den konventionellen dreisträngigen und doppelt dreisträngigen Aktoren verglichen. Wichtige Parameter sind hierbei zum einen die Zuverlässigkeit, die bei sicherheitskritischen Anwendungen eine große Rolle spielt, das erreichbare Drehmoment im Fehler-

fall und die resultierende Drehmomentqualität, wobei eine hohe Qualität bedeutet, dass es frei von Drehmomentwelligkeit ist. Es wird gezeigt, dass das vorgestellte Konzept im Gegensatz zum Stand der Technik zuverlässiger ist und mehrere Redundanzstufen bietet. Dies stellt eine erhebliche Verbesserung der Zuverlässigkeit und des Benutzererlebnisses dar. Darüber hinaus wird nachgewiesen, dass das Aktorkonzept in der Lage ist, im Fehlerfall ein deutlich höheres Drehmoment im Vergleich zum Stand der Technik bereitzustellen.

Schlagworte: Mehrsträngiges Antriebssystem, Fehlertoleranz, Redundanz, Regelungsanpassung, Elektromechanische Servolenkung

TABLE OF CONTENTS

ACKNOWLEDGEMENTS	V
ABSTRACT	VII
KURZFASSUNG	IX
LIST OF FIGURES	XIV
LIST OF TABLES	XVIII
ABBREVIATIONS	XIX
NOMENCLATURE	XX
1 INTRODUCTION	1
1.1 Motivation	2
1.2 Objectives	3
1.3 Outline of this work	4
1.4 Scientific contribution	5
2 STEERING SYSTEM	7
2.1 Architecture	7
2.2 Steering rack forces	9
2.3 Requirements	12
2.3.1 SAE levels of automation	13
2.3.2 Automotive safety integrity level	14
2.3.3 Steering assistance function	16
2.3.4 Steering function for automated driving	17
2.3.5 Steer-by-wire	18
2.4 Steering torque study	19
2.4.1 Driving cycles	19
2.4.2 Post-fault torque	24
2.4.3 Torque ripple	26
3 STATE-OF-THE-ART AND FUNDAMENTALS OF STEERING ACTUATORS	29
3.1 Fundamental definitions	29
3.1.1 Mechanical system	29

TABLE OF CONTENTS

3.1.2	Electrical system	30
3.2	Three-phase steering actuator	36
3.2.1	Full bridge three-phase actuator	37
3.2.2	Fully redundant three-phase steering actuator	40
3.3	Double three-phase steering actuator	40
4	RELIABILITY	43
4.1	Fundamentals	43
4.2	Fault definitions	46
4.2.1	Machine faults	46
4.2.2	Inverter faults	47
4.2.3	ECU faults	47
4.2.4	Mechanical faults	48
4.2.5	Other faults	48
4.3	Failure rates	49
4.3.1	Component failure rates	49
4.3.2	Fault tree analysis	52
4.3.3	System failure rates	55
5	FIVE-PHASE STEERING ACTUATOR CONCEPT	57
5.1	Overview	57
5.2	Machine	58
5.2.1	Electrical model of the five-phase machine	60
5.2.2	Transformation	61
5.3	Inverter	65
5.4	ECU	67
5.4.1	Control schematic	68
5.4.2	Decoupling in the d-q-system	69
5.5	Fault management	70
5.6	Reliability	73
5.6.1	Architectural component failure rates	73
5.6.2	Fault tree analysis of the actuator concept	73
5.6.3	Actuator concept failure rates	75
6	POST-FAULT OPERATION	77
6.1	Basic consideration	77
6.1.1	Current and torque analysis in fault case	78
6.2	Control structure redesign	80
6.2.1	Compensation of the induced voltages	81
6.2.2	Compensation of the coupled voltages	81
6.3	Fundamental wave modification	82
6.3.1	Amplitude adjustment	84
6.3.2	Angle adjustment	87
6.3.3	Comparison and combination	89

6.3.4	Increasing torque by toleration of a higher torque ripple	95
6.4	Alternative modifications	97
6.4.1	Zero-sequence current reconfiguration	97
6.4.2	Star point reconfiguration	100
6.5	Two-phase fault	102
6.5.1	Adjacent fault	103
6.5.2	Non-adjacent fault	107
6.6	Three-phase Fault	111
6.6.1	Adjacent fault	112
6.6.2	Non-adjacent fault	114
6.7	Overview	116
7	EXPERIMENTAL VALIDATION	119
7.1	Experimental set-up, test bench and operating points	119
7.1.1	Steering rack force measurement	119
7.1.2	Test set-up for the actuator	121
7.2	Five-phase operation	124
7.3	Single-phase fault operation	126
7.3.1	Zero-sequence current reconfiguration	126
7.3.2	Angle adjustment	128
7.3.3	Operation between maximum torque and torque ripple-free reconfiguration	131
7.4	Two-phase fault operation	136
7.4.1	Adjacent fault	136
7.4.2	Non-adjacent fault	138
7.4.3	Overview	141
8	CONCLUSION AND OUTLOOK	143
	BIBLIOGRAPHY	XXV
	APPENDIX	XXXV
A	Steering system characteristics	XXXV
B	Machine characteristics	XXXVII
C	Driving scenarios	XLI
D	SAE levels of automated driving	XLIII
E	ASIL of functional safety	XLV
F	Reliability calculations	XLVII
F.1	Calculation of component failure rates	XLVII
F.2	Number of parts	LVI
	CURRICULUM VITAE	LVII