

Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme

Band 33

David Faustner

**Modeling and Optimal Torque Control of
Saturated Surface-Mounted Permanent
Magnet Synchronous Machines**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.: Wien, TU, Diss., 2016

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 978-3-8440-4939-8

ISSN 1866-2242

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

Meinen Eltern gewidmet

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik der Technischen Universität Wien im Rahmen einer Industriekooperation mit Bernecker + Rainer Industrie Elektronik GmbH. Im September 2016 wurde die Arbeit in ähnlicher Form als Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik an der Technischen Universität Wien eingereicht und erfolgreich verteidigt.

An dieser Stelle gilt mein besonderer Dank Herrn Univ.-Prof. Dr. techn. Andreas Kugi für die exzellente wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit. Seine Fähigkeit Potential zu erkennen und aktiv zu fördern und seine Interpretation einer fundierten wissenschaftlichen Arbeit lassen mich auf sehr fruchtbringende Jahre der Zusammenarbeit – sowohl in fachlicher als auch in persönlicher Hinsicht – zurückblicken. Im Speziellen möchte ich mich auch für sein Engagement abseits des universitären Alltags am Ende meiner Anstellung sowie die zahlreichen freundschaftlichen Ratschläge bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann danke ich für die Erstellung des Zweitgutachtens. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Gottfried Strasser für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Zu besonderem Dank bin ich auch Herrn Assistant Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kemmettmüller für die Projektleitung und die Durchsicht der Arbeit verpflichtet. Mit ihm kann ich auf viele Jahre der erfolgreichen Zusammenarbeit zurückblicken. Durch die gemeinsamen Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der elektrischen Antriebstechnik flossen auch zahlreiche Ideen und Lösungsvorschläge in diese Arbeit ein.

Seitens des Projektpartners Bernecker + Rainer Industrie Elektronik GmbH möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Alois Holzleitner für die Projektvergabe, das damit ausgesprochene Vertrauen und die damit verbundene Finanzierung bedanken. Im Besonderen möchte ich mich bei Herrn Dr.techn. Engelbert Grünbacher als unmittelbarem Ansprechpartner für die Projektkoordination und die technische

Unterstützung bei der praktischen Umsetzung der entwickelten Regelungskonzepte am Motorprüfstand bedanken. Ebenso danke ich Herrn Dipl.-Ing. Gerhard Mayrhofer für seine wertvollen Anregungen bei diversen Projektbesprechungen.

Allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts, insbesondere den Bürokollegen der letzten Jahre, gilt ein herzliches Dankeschön für das kollegiale und stets positive Arbeitsklima. Herrn Dipl.-Ing. Georg Stadler danke ich für seine Unterstützung bei kniffligen Textsetzungen mit \LaTeX .

Ein unermesslicher Dank gilt meinen Eltern Heidi und Heribert Faustner, ohne deren langjährige Unterstützung eine Promotion in dieser Form nicht möglich gewesen wäre. Sie haben mich stets in meinem Lebensweg bestätigt und sind einer höheren Ausbildung immer positiv gegenübergestanden. Durch perfekte Rahmenbedingungen konnte ich diesen akademischen Pfad fokussiert und zügig beschreiten. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei meinem Bruder Christoph Faustner mit Familie für den Rückhalt und das Verständnis für die oft begrenzte gemeinsame Zeit in den letzten Jahren.

Abschließend gilt ein ganz besonderer Dank meiner liebevollen Frau Marlene Faustner. Sie hat durch ihr großes Verständnis, ihren starken Rückhalt und vor allem durch ihre moralische Unterstützung und Motivation einen sehr großen Anteil bei der Entstehung dieser Arbeit geleistet.

Wien, im Oktober 2016

David Faustner

Abstract

Permanent magnet synchronous machines (PMSMs) are frequently operated in regimes where significant magnetic saturation occurs. In this operating range, the current-to-torque characteristics is nonlinear and the current supply is thermally limited. To achieve the increasing demands on the accuracy and the dynamics of the closed-loop system, the magnetic nonlinearities have to be considered in a systematic way in the controller design. In particular, the stability of the closed-loop system can only be assured in the entire operating range, if the nonlinearities are accounted for in the controller design.

This work deals with the mathematical modeling and the optimal torque control of a saturated surface-mounted PMSM. In the first part of this work, a magnetic equivalent circuit model of the PMSM is developed. The equations are derived using graph theory. The model inherently accounts for magnetic saturation, harmonics, and the electric interconnection of the stator coils. The system dynamics is given by Faraday's induction law. The model is calibrated by torque measurements and experimentally validated. It forms a solid basis for the controller design, where the focus is laid on torque control.

The second part of this work is concerned with the design of a nonlinear torque control strategy. In addition to overload operation (magnetic saturation), the considered operating range also includes high-speed operation. Thereby, the magnetic field of the permanent magnets has to be weakened to observe the voltage limits of the voltage source inverter. Based on optimal currents and flux linkages, which are derived for constant desired torque values, a simplified design model is derived. Based on this model, an approximation of the actual voltages at the machine terminals is derived to detect violation of the voltage limits. A control structure composed of a flatness-based feedforward controller and a time-variant feedback controller is presented. The feasibility of the proposed control strategy is demonstrated by means of simulation and experimental results. It is shown that the voltage limits are accurately respected also during high-speed

operation beyond the rated speed. In the lower speed range, the comparison of the control concept with a common vector control implementation shows a significant improvement with respect to the state of the art.

In the last part of this work, the experimental determination of the controller parameters by means of torque, current, and voltage measurements is investigated. In particular, the influence of the phase winding resistance on the identified parameters is discussed. The overall accuracy of the controlled system, using the identified system parameters, is finally demonstrated by means of simulation studies.

Kurzzusammenfassung

Permanenterregte Synchronmaschinen werden heutzutage oftmals auch im Überlastbereich betrieben. Dabei kommt es durch den zunehmenden Magnetisierungsbedarf der Blechpakete im Stator und Rotor der Maschine zu magnetischer Sättigung. Dies hat zur Folge, dass die Momentencharakteristik nichtlinear vom Strom abhängt. Die Dauer des Überlastbetriebes ist aufgrund der erhöhten thermischen Verluste zeitlich begrenzt. Um die steigenden Anforderungen an die Genauigkeit und die Dynamik des geschlossenen Regelkreises erfüllen zu können, müssen diese magnetischen Nichtlinearitäten systematisch im Reglerentwurf mitberücksichtigt werden. Nur dann ist es möglich, die Stabilität des geschlossenen Kreises in allen Betriebsbereichen zu gewährleisten und eine hohe Regelgüte zu erzielen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der mathematischen Modellierung und der optimalen Drehmomentenregelung einer permanenterregten Synchronmaschine mit Oberflächenmagneten und ausgeprägter magnetischer Sättigung. Im ersten Teil dieser Arbeit wird ein mathematisches Modell der Maschine vorgestellt, welches auf der Beschreibung des Magnetkreises durch ein Reluktanznetzwerk beruht. Die Gleichungen des Netzwerkes werden dabei effizient durch Anwenden der Graphentheorie berechnet. Das Modell berücksichtigt auf systematische Art und Weise magnetische Sättigung, höhere Harmonische und die elektrische Verschaltung der Statorwicklungen. Die Dynamik des Systems ist dabei durch das Faradaysche Induktionsgesetz gegeben. Das Modell wird mit Hilfe von Drehmomentenmessungen kalibriert, umfassend validiert und dient als Grundlage für den Reglerentwurf.

Der zweite Teil dieser Arbeit befasst sich mit dem Entwurf einer nichtlinearen Regelungsstrategie für das Drehmoment der Maschine. Der geforderte Betriebsbereich umfasst neben dem Überlastbetrieb (magnetische Sättigung) auch den Betrieb bei sehr hohen Drehzahlen, wo eine Schwächung des magnetischen Feldes der Permanentmagnete notwendig wird, um den beschränkten Spannungsbereich des Umrichters nicht zu überschreiten. Die Berechnung von optimalen Strömen und Verkettungsflüssen mit dem Ziel, annähernd konstante Drehmomente zu er-

zeugen, führt zu einem vereinfachten Entwurfsmodell. Dieses vereinfachte Modell erlaubt auch eine Abschätzung der Spannungen an den Maschinenklemmen. Dies ist notwendig, um eine Verletzung der Spannungsgrenze detektieren zu können. Eine Zwei-Freiheitsgrad-Regelkreisstruktur bestehend aus einer flachheitsbasierten Vorsteuerung und einem zeitvarianten Fehlerregler wird entwickelt. Umfangreiche Simulationen und experimentelle Versuche zeigen die hohe Güte der Regelung. Die Spannungsgrenze des Umrichters bei sehr hohen Drehzahlen wird durchwegs gut eingehalten. Im unteren Drehzahlbereich zeigt der Vergleich des vorgeschlagenen Regelungskonzeptes mit einem gängigen feldorientierten Regler eine deutliche Verbesserung gegenüber dem derzeitigen Stand der Technik.

Der letzte Teil dieser Arbeit behandelt die experimentelle Bestimmung der Reglerparameter auf Basis von Messungen des Drehmoments, der Ströme und der Spannungen. Dabei wird auch der Einfluss des Wicklungswiderstandes auf die identifizierten Parameter untersucht. Die Auswirkung der experimentell bestimmten Reglerparameter auf die Genauigkeit der Drehmomentenregelung wird abschließend anhand von Simulationsstudien untersucht.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Literature review and state of the art	3
1.2	Objectives and outline of the thesis	6
2	Modeling of saturated permanent magnet synchronous machines	11
2.1	Machine design	11
2.2	Finite element analysis	13
2.2.1	Basic principles of FEA	14
2.2.2	FEA model setup	16
2.2.3	Results of the FEA	19
2.3	Magnetic equivalent circuit modeling	25
2.3.1	Basic concepts of MEC modeling	26
2.3.2	Permeance network	28
2.3.3	Machine model with current input	34
2.3.4	Machine model with voltage input	39
2.3.5	Parameter identification and experimental validation	49
3	Optimal torque control	59
3.1	MTPA operating range	60
3.1.1	Calculation of optimal currents	60
3.1.2	Calculation of optimal flux linkages	64
3.1.3	Torque control in stator-fixed coordinates	68
3.1.4	Simulation results	73
3.1.5	Experimental results	77
3.2	Field weakening operating range	92
3.2.1	Fundamentals of FW operation	93
3.2.2	FW problem formulation and solution	96

3.2.3	Torque controller design	100
3.2.4	Simulation results	102
3.2.5	Experimental results	105
4	Experimental determination of the controller parameters	111
4.1	Concept and theory	111
4.1.1	Determination of the optimal currents	113
4.1.2	Determination of the optimal flux linkages	113
4.2	Experimental results	115
4.3	Simulation studies	119
5	Conclusions and outlook	125
A	Parameters of the MEC model	129
B	Compensation of the nonlinear inverter characteristics	135