Digital Control for Active Magnetic Bearings in High-Speed Permanent-Magnet Synchronous Machine with 40000 min⁻¹ and 40 kW

Dem Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

von **Dipl.-Ing. Chip Rinaldi Sabirin**, geboren am 21.04.1977 in Surabaya, Indonesia

Referent:	Prof. DrIng. habil. Dr. h.c. Andreas Binder
Korreferent:	Prof. DrIng. Ulrich Konigorski

Tag der Einreichung:	24.03.2014
Tag der mündlichen Prüfung:	17.09.2014

D17 Darmstadt, 2014

Berichte aus der Elektrotechnik

Chip Rinaldi Sabirin

Digital Control for Active Magnetic Bearings in High-Speed Permanent-Magnet Synchronous Machine with 40000 rpm and 40 kW

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag Aachen 2014

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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 978-3-8440-3277-2 ISSN 0945-0718

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 "One's today should be better than yesterday, one's tomorrow should be better than today"

ACKNOWLEDGEMENT

First of all, I want to thank Professor Andreas Binder for his support during my research work at the *Technische Universität Darmstadt*, *Institute for Electrical Energy Conversion*, and for his encouragement throughout all phases of this research work, during the designs and experiments until the finishing of this thesis.

I want also to thank Professor Ulrich Konigorski for giving his expertise inputs and opinions to improve this thesis.

I want to thank all the (former) colleagues at *Electrical Energy Conversion* for the fruitful discussions, either technical or even more about funny and interesting things of life.

want to thank especially the administrative Т and technical team of *Electrical Energy Conversion*, Mrs. Braun and Mrs. Anette Ptaschek, Mr. Renate Andreas Fehringer, Mr. Klaus Gütlich, Mr. Markus Lohnes and Mr. Herbert Moschko, for all their support on bringing the test bench of the magnetic-levitated PM-machine into life. I also want to thank all my former students for their contributions to the research work on the magneticlevitated PM-machine. Among the many to names be mentioned: Anastasios Chatzinikolau, Mehmet Cemil Kazanbas, Matthias Mrosek, Khrisna Mohan Ponnam, Daniel Popa and Alexandru Serbanescu.

And to the core team of my life: my parents, my wife and my son. Biggest thanks to my mother and father who have been showing me the way to get the best from yourself and supporting me all the time. Last but not least, greatest thanks to my lovely wife for her support and patience, for being understanding and listening through all the ups and downs during the progress of my research work and the writing of this thesis.

AUFGABENSTELLUNG

In Verarbeitungsprozessen, die von elektrischen Maschinen angetrieben werden, (z.B. Dreh-, Fräs- und Schleifvorgänge) nimmt die Verarbeitungsqualität mit der Prozessdrehzahl zu. Mit der höheren Drehzahl kann das Bauvolumen der zum Einsatz kommenden elektrischen Maschine bei gleicher Abgabeleistung verringert werden. Dies ist auch vorteilhaft für ihre Anwendungen in begrenztem Bauraum, z.B. in Elektrofahrzeugen. Besonders die elektrischen Permanentmagnet-Synchronmaschinen (PMSM) finden wegen hohen Wirkungsgrads und guter Dynamik immer mehr Anwendung als Antriebe in solchen Prozessen.

Es soll die Weiterentwicklung der magnetisch gelagerten PMSM verfolgt werden. In den Vorgängerarbeiten mit zwei Maschinen M1 und M2, die auf die Nennleistung 40 kW und Nenndrehzahl 40000 min⁻¹ ausgelegt sind, wurden bereits in den Experimenten mit kleinerer Leistung und Drehzahl die hohe Erwärmung festgestellt, die beim Nennbetrieb die Grenztemperatur der Wärmeklasse überschreiten würde. Aus diesem Grund wurden Vorschläge erarbeitet, um die elektrischen Verluste zu reduzieren. Es soll hier eine neue magnetisch gelagerte PM-Synchronmaschine M3 (gleiche Nennleistung und Nenndrehzahl) mit optimierter Auslegung gebaut und ihr thermisches Verhalten verifiziert werden.

Die Hauptaufgabe dieser Dissertation befasst sich dann mit der digitalen Regelung des magnetisch gelagerten Rotors der Maschine. Hier wird der Schwerpunkt auf die bestehende Maschine M2 gelegt. Die Auslegungsmethoden der Regelung werden dargestellt und ihre Ergebnisse in Bezug auf das Schwingverhalten des Rotors im stationären und dynamischen Zustand verifiziert. Für die o.g. thermische Untersuchung der Maschine M3 wurden zwei magnetisch gelagerte Rotoren M2 und M3 direkt gekoppelt und dies erforderte wesentliche Modifizierungen an deren Regelung. Die Ergebnisse werden abschließend auch präsentiert.

MOTIVATION

The quality of manufacturing process like milling, turning and polishing, which are driven by electrical machines, can be improved by increasing the rotational speed of the system. With the increasing rotational speed and same mechanical output power, the volume of the applied electrical machines can be reduced, which become its advantage in volume-limited applications, e.g. electric vehicles. The application of especially electrical permanent-magnet synchronous machine (PMSM) has been growing in the last decade due to its high efficiency and good system dynamic.

This thesis deals with the next development of magnetic levitated PMSM, which had been investigated in previous research works. There, two machines M1 and M2 with rated power of 40 kW and rated rotational speed of 40000 min⁻¹ were designed and built for this purpose. In the experiments of smaller power and lower speed, it was found out that the heating of the machine already reached a level, which would exceed the *Thermal Class* of the machine during the operation at the rated power and speed. Therefore, potential reduction of the electrical losses were investigated to be applied in the next machine M3 (with similar rated power and rotational speed), which will be presented. Its thermal behaviour will be verified in the experiments.

The main focus of this thesis is the digital control of the magnetic levitated rotor, especially of the machine M2. The design method of the control will be presented and its results will be verified by the measurement of the vibration of the levitated rotor during the rotation at steady-state and transients. During the aforementioned experiments on the thermal behaviour of M3, two magnetic-levitated rotors M2 und M3 were directly coupled to each other. Hence, significant changes of their levitation control were necessary. Their results will be also presented in this thesis.

ZUSAMMENFASSUNG

Magnetisch gelagerte rotatorische elektrische Permanentmagnet-Synchronmaschinen (PMSM) können durch die berührungslose Lagerung mit Magnetlagern eine hohe Drehzahl erreichen. Nur geringe Wartung der Maschine ist erforderlich aufgrund des Verzichts auf mechanische Lager mit entsprechender Lagerreibung und zugehöriges Schmiermittel. Vorteilhaft lässt sich die Dynamik des magnetisch gelagerten Rotors als MIMO-System (*Multiple Inputs, Multiple Outputs*), z.B. die Steifigkeit und die Dämpfung, einstellen.

Die elektrische Permanentmagnet-Synchronmaschine ist für ihren im Vergleich zu anderen elektrischen Maschinen relativ hohen Wirkungsgrad bekannt. Trotzdem entstehen Verluste in den verschiedenen Maschinenteilen, z.B. in den Statorwicklungen und den Eisenblechen. In einer früheren Dissertation wurden zwei magnetisch gelagerte PM-Synchronmaschinen M1 und M2 gebaut [30], um das thermische Verhalten zu untersuchen. Die Maschinen wurden jeweils auf eine Leistung von 40 kW und eine Drehzahl von 40000 min⁻¹ ausgelegt.

Hauptsächlich aus den Ergebnissen der Maschine M2 wurden die Möglichkeiten zur Reduzierung der elektrischen Verluste identifiziert. Ausgehend von deren Auslegung wurden die Statorwicklungen und Statorströme der in der vorliegenden Dissertation aufgebauten magnetisch gelagerten PM-Syncronmaschine M3 (gleiche spezifizierte Leistung 40 kW und Drehzahl 40000 min⁻¹) dahingehend modifiziert, um die Kupferverluste des Nennstroms und der Stromverdrängung zu reduzieren. Entsprechend wird die magnetische Flussdichte erhöht, damit die gleiche mechanische Abgabeleistung der Maschine erhalten bleibt. In den thermischen Dauerversuchen mit der Maschine M3 werden die Temperaturen an verschiedenen Stellen in der Maschine gemessen. Die Grenzen der zugelassenen Temperaturen sind durch die Wärmeklasse F 155°C der Wicklungs-Isolierung und die technische Grenztemperatur 170°C der Permanentmagnete gegeben.

Während den o.g. thermischen Dauerversuchen sind die Maschinen M2 und M3 direkt miteinander gekoppelt. Die aktiven Magnetlager der Maschine M2 werden durch entkoppelte analoge PID-Regler geregelt, deren Parameter-Einstellung mit hohem Aufwand verbunden ist. Dies motivierte die Realisierung einer digitalen Regelung für die aktiven Magnetlager der Maschine M3. Die klassiche digitale PID-Regelung wird auf der Maschine M3 eingesetzt, da an der kommerziellen Elektronik keine eigenständige Modifikation der Algorithmen möglich ist. Während den Dauerversuchen wurde das Schwingverhalten der Rotoren M2 und M3 im schwebenden Zustand untersucht, das sehr stark von den neu entstehenden Resonanzen der zwei gekoppelten Rotoren abhängt. Die Unterdrückung der Resonanz-Schwingungen konnte durch die Einfügung von Bandsperre-Filtern erzielt werden.

Der Schwerpunkt in dieser Dissertation wird auf die Untersuchung der digitalen Regelung der aktiven Magnetlager der Maschine M2 als Einzelmaschine gelegt, die dafür auf passende Signalverarbeitung aus selbstgebauten Modulen (Signal- und Leistungselektronik, Implementierung der Regelungsalgorithmen in C-Sprache auf μ C) und Zukauf-Teilen (Sensoren und Mikrocontroller) umgerüstet wurde. Die Auslegung der digitalen Regelung verwendet die Methode des Zustandsreglers in der LQR-Form, in der geeignete Gewichtungen auf die Zustands- und Eingangsgrößen des magnetgelagerten Rotors durchgeführt wurden. Das Ziel der Methode ist die Ermittlung eines Minimums für die Findung des optimalen Reglers. Die Schätzung der nicht gemessenen Zustandsgrößen erfolgt durch Luenberger-Beobachter bzw. Kalman-Filter. Die ausführlichen Experimente bis zur Drehzahl von 40000 min⁻¹ (≈ 667 Hz) dokumentieren die Eignung der digitalen Regelung, bestehend aus dem Zustandsregler, dem Zustandsschätzer und der Störungskompensation. Diese Ergebnisse, zusammen mit der o.a. optimierten elektromagnetischen und thermischen Auslegung des Antriebs, sollen die Nachweise über die praktische Anwendbarkeit von magnetisch gelagerten elektrischen PM-Synchronmaschinen mit hoher Leistung und hoher Drehzahl bringen und dadurch den Einsatz als kommerzielle Produkte unterstützen.

ABSTRACT

Magnetic levitated rotational electrical permanent-magnet synchronous machines (PMSM) can reach a high speed due to its contactless rotor suspension with active magnetic bearings. Less maintenance is necessary due to the absence of mechanical bearings and its corresponding lubricants. The rotor dynamic as a MIMO-system (*Multiple Inputs, Multiple Outputs*), e.g. its stiffness and damping, can also be adjusted by an appropriate controller.

The electrical PM synchronous machine is well-known for its higher efficiency, compared to other types of electrical machines. However, the losses, in the stator windings and the iron stack sheets, remain the main concern for its design. In a previous thesis, two magnetic levitated PM synchronous machines M1 and M2 were built [30], with rated power of 40 kW and rated speed of 40000 min⁻¹, to serve as devices under test on the thermal behaviours.

Mainly the results of machine M2 showed the potentials to further reduce the electrical losses. Based on the specifications of machine M2, a new machine M3 will be built, at same rated power and speed, with some modifications to reduce the copper losses due to the rated current and current displacement. In order to keep the same rated power, the magnetic flux density is designed with increased value. The machine M3 will be tested and its temperatures at different positions in the machine will be measured to verify its thermal behaviours. The technical limits of the temperatures are determined by the *Thermal Class* F 155°C of the winding insulations and the technical operation limit of the permanent magnets at 170°C.

During the test on the thermal behaviours, the rotors of machines M2 and M3 are directly coupled to each other. The active magnetic bearings of machine M2 are controlled by analogue PID controller, in which its control parameters can not be changed that easily. This is the motivation to apply a digital controller for the active magnetic bearings of machine M3. However, only classical decoupled PID control is implemented there, because the proprietary electronic does not allow modifications from outside on the control algorithms. During the test, the vibrations of the levitated rotor are measured, which depends strongly on the new resonance frequencies which correspond to the direct coupling of both rotors. Cascaded notch-filters are applied to attenuate the vibrations at those frequencies and thus to enable the stable rotor levitation.

The main focus of this thesis is the digital control of the active magnetic bearings of the single machine M2. For this purpose, the signal-processing electronic was newly built, that comprises of self-designed modules (low-volt-, power electronics and implementation of control algorithms in *C language* on μ C) and proprietary modules (sensors and μ C). The digital control is designed by the method of state-space control of the LQ regulator. It uses weighting factors on the state- and input variables of the magnetic levitated rotor to reach a minimum cost function to determine the optimum controller. The estimation of unmeasured state variables is executed by *Luenberger* observer or *Kalman* filter, respectively. The various experiments up to the speed of 40000 min⁻¹ verifies the good performance of the digital control, that comprises of the state-space LQ regulator, the state estimators and the disturbance compensation.

The results, of the vibration of the levitated rotor and of the tests on the thermal behaviours with optimized electromagnetic and thermal design of the machine, shall serve as scientific proofs for the application of magnetic levitated electrical PM synchronous machine in the real technical systems. Beyond that intention, this thesis shall contribute to the acceptance of magnetic levitated electrical machines as emerging commercial products.

CONTENT

CO	NTEN	NT	I
AB	BREV	TATIONS	V
INI	DEX C	DF VARIABLES	VI
INI	DEX C	DF FIGURES	XII
INI	DEX C	DF TABLES	XVI
1	IN	TRODUCTION	
	1.1	Active Magnetic Bearings in High-Speed Electrical Machines	
	1.2	Feedback Control of Active Magnetic Bearings	
	1.3	Substance of the Thesis	
2	PE	ERMANENT-MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE	5
	2.1	Machine Geometry	5
	2.2	Electromagnetic Behaviour of The Machine	
	2.3	Windings Inductance and Resistance	
	2.4	Specification of PM Synchronous Machine	
	2.5	Rotor Sleeve Design	
	2.6	Loss Reduction Related to Current-Displacement	
	2.7	On the Dynamics and Maximum Rotor Speed	
3	M	ODELLING THE MAGNETIC-LEVITATED ROTOR	
	3.1	Physical Principles of Electromagnets	
	3.2	Heteropolar 8-poles Radial Active Magnetic Bearing	
	3.3	Calculation of Elastic and Rigid Rotor Modes	
	3.4	Mathematical MIMO-Model of the Magnetic-Levitated Rotor	
	3.5	Effect of the Magnetic Saturation	
4	CO	ONTROL ELECTRONIC PLATFORM FOR THE MAGNETIC BEAF	RINGS 43
	4.1	Sensors	
	4.1	.1 Eddy-Current Position Sensors	
	4.1	.2 Transducer for the Coil Current of the Magnetic Bearings	
	4.2	Control Processing Electronic	
	4.2	2.1 Anti-Aliasing Filters	
	4.2	2.2 Microcontroller	
	4.2	2.5 Digital Notell Filler	
	 4 7	2.5 Pulse Width Modulation Signals	53
	4.2	2.6 Digital Inputs and Outputs (I/Os)	
	4.3	Power Amplifiers for Magnetic Bearings	
	4.3	3.1 Design and Manufacture of the Power Amplifier	
	4.3	B.2 Modelling for the Power Amplifier	
	4.4	Control Loop Timings	

5 EXPERIMENTS WITH THE INVERTER-FED PM-MACHINE	63
5.1 Construction and Test Rig	63
5.2 No-load Operation	65
5.3 Load Operation	68
6 CONTROL METHODS FOR THE MAGNETIC-LEVITATED ROTOR	73
61 Feedback Control	73
6.1.1 Classical PID Control	73
6.1.2 State-Based MIMO Control: Linear Quadratic (LO) Control	76
6.1.2.1 Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) State-Space Model	
6.1.2.2 Discrete State-Space Model	
6.1.2.3 Controllability	80
6.1.2.4 State-Feedback Control Design: LQ-Method	80
6.1.2.5 Practical Rules of the LQ-Method	82
6.1.2.6 Augmentation by Input Reference	85
6.1.2.7 Disturbance Compensation (Feedforward vs. Integrator)	85
6.2 State Estimations	90
6.2.1 Observability of the Magnetic-Levitated Rotor	91
6.2.2 Luenberger Observer	92
6.2.3 Full-Order vs. Reduced-Order Observer	94
6.2.4 <i>Kalman</i> Filter	95
6.3 Simulation Results	98
6.3.1 Rotor at Standstill	98
6.3.2 Rotor at Steady-State Speed	. 100
6.3.3 Rotor Run-Up	. 101
7 CONTROL SOFTWARE IMPLEMENTATION	103
7.1 Fixed-Point Microcontroller TMS320F2812	104
7.1.1 The Processing Unit	. 105
7.1.2 A/D-Converters and PWM-Generators On-Chip	. 106
7.2 <i>Time and Voltage Discretization</i>	109
7.3 Floating-Point Algorithms on Fixed-Point Microcontroller	111
7.4 Programming and Implementation on TMS320F2812	114
8 EXPERIMENTS OF THE MAGNETIC-I EVITATED ROTOR DYNAMICS	117
8.1 Start Up of the Rotor Levitation of Single Motor M?	121
8.1 Start-Op of the Kolor Levilation of Single Motor M2	121
8.2 Wildebaha Kolor Excitation of Single Motor M2	122
6.5 Steady-State Rotor Oscillations of Single Motor M2	123
8.3.1 Controller Sampling Time	123
8.3.2 Selection of Estimator	120
8.3.5 Distuibance Compensation	129
8.3.4 Full-order and Reduced-order Estimator	122
8.3.5 Blas Excitation	126
8.4 Kun-Op of Single Motor M2	127
0.3 Coupled Kolors of Molors M2 and M5	13/
6.5.1 The Analogue FID-Controller for the Magnetic Bearings of Motor M2	1139
6.3.2 The Digital PID-Controller for the Magnetic Bearings of Motor M3	, 144
9 CONCLUSIONS	149
REFERENCES	153
APPENDIX A	159

APPENDIX B	
APPENDIX C	
APPENDIX D	
APPENDIX E	
APPENDIX F	