

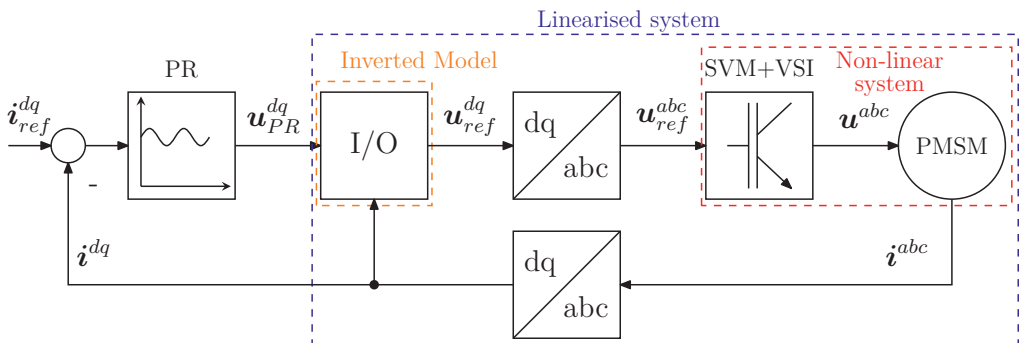
Forschungsberichte

Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

Michael Schreiber

Analysis and compensation of non-linearities of permanent magnet synchronous machines during active noise cancellation



Analysis and compensation of non-linearities of permanent magnet synchronous machines during active noise cancellation

Michael Schreiber

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

2. Prof. Dr.-Ing. Simon Hecker

Die Dissertation wurde am 06.03.2023 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektro- und Informationstechnik am 13.07.2023 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 10.10.2023 statt.

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 56

Michael Schreiber

**Analysis and compensation of non-linearities
of permanent magnet synchronous machines
during active noise cancellation**

Shaker Verlag
Düren 2024

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.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2024

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 978-3-8440-9356-8

ISSN 1863-0707

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

Abstract

The transition to electric mobility requires the original equipment manufacturer to revise the acoustic behaviour of their vehicles. On the one hand, the electric cars are too quiet so that pedestrians or cyclists can recognise them. On the other hand the noise from other machines, e.g. window lifter or air conditioning, can now be heard inside the car because there is no combustion engine any more that covers these noises.

Solving these problems can be very expensive, e.g. installing loudspeakers and damping material. A more efficient way to emit specific sound or to cancel unwanted noise is the technology of Active Sound Generation (ASG) or Active Noise Cancellation (ANC) with electric drives. These functions enable electric machines to generate sound or to reduce disturbing sound only with a few more cheap sensors installed. Only the existing infrastructure for driving the motors is needed with a few more lines of code in the field oriented control software of the electric control unit.

Since electric drives, however, are not ideal sound sources, additional harmonics arise when the machine is excited by a specific frequency. This work provides approaches for analysing, modelling and compensating the non-linear effects of a permanent magnet synchronous machine that lead to these harmonics.

Firstly some apparent non-linear effects, i.e. saturation and iron effects, are analysed and the identification methods, e.g. for flux maps, for the corresponding parameters are stated. Also the effects from the inverter are included in the investigations. In the end the so called extended high frequency model for modelling the harmonics when exciting the machine with a frequency of a few hundred Hertz is chosen.

With the help of this model a compensation scheme is developed which should reduce the arising harmonics. Therefore it is decided to linearise the non-linear system with the help of input/output linearisation for which the extended high frequency model is used. Also, for stability reasons, a proportional resonant controller is developed. In combination with the real system these implementations provide good reductions of the current harmonics in the machine. It is further analysed what effects different parameters of the linearisation model have on the compensation quality. As a conclusion, the reduction of harmonics is better the closer the behaviour of the extended high frequency model is to the real system.

Finally the effect of the currents in the machine on forces, accelerations and sound pressure level is evaluated. Therefore a test bench is constructed according to the blocked force method. The results show that in standstill the currents with its harmonics directly affect the torque, accelerations and sound pressure levels. Also the mechanical quantities are reduced when the compensation system is applied. During rotation, however, the effect of compensation is not that good.

In the end, some considerations are done how the harmonics can be further reduced by applying phase shifts between the d and q current.

Acknowledgements

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München.

Zu Anfang gilt mein besonderer Dank meinem Betreuer der Universität der Bundeswehr München, Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling. Bei meinen Besuchen an der Universität nahm er sich viel Zeit und hatte immer ein offenes und interessiertes Ohr, sodass seine Beiträge wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank geht an Prof. Dr.-Ing. Simon Hecker. Auf seine konstruktiven Ideen und Meinungen zum Fortgang meiner Arbeit im regelungstechnischen Umfeld war immer Verlass.

Ebenfalls gebührt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Stefan Sentpali, der die mechanische Seite der Arbeit mit begleitet hat und mir half, den Bogen von der Elektrotechnik in die Mechanik zu spannen.

Dem Team aus dem Labor für Akustik und Dynamik der Hochschule München möchte ich für den regen Austausch und die gute Zusammenarbeit danken.

Den Mitarbeiterinnen des Dekanats der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Hochschule München und des Sekretariats des Lehrstuhls für Elektrische Antriebstechnik und Aktorik der Universität der Bundeswehr danke ich sehr, dass sie mir ein angenehmes und produktives Umfeld für meine Arbeit geschaffen haben.

Ein ganz großes Dankeschön geht an die Graduate School der Hochschule München, insbesondere an Frau Dr. Manuela Tischler, die mich vor allem ideell während meiner Promotionszeit unterstützt hat.

Der Ausgleich zum wissenschaftlichen Arbeiten war mir während der Zeit dieser Arbeit besonders wichtig. Deshalb ergeht ein herzliches Dankeschön an alle meine Freunde und an meine Musikkolleginnen und -kollegen, insbesondere vom Jugendorchester Kronach und dem Blasorchester St. Michael Perlach.

Ich danke ganz herzlich meiner Familie, meinen Eltern und meinen Großeltern, meinem Bruder und seiner Frau und meinen Onkeln und Tanten, ob nah oder fern, die mich stets unterstützt haben.

Schließlich, aber nicht zuletzt, gilt mein größter Dank meiner Partnerin, ohne sie das hier alles nicht möglich gewesen wäre und die einfach immer für mich da war.

München, im März 2023

Contents

Abstract	III
Acknowledgements	V
Nomenclature	IX
1 Introduction	1
1.1 Current challenges	1
1.2 Motivation	3
2 Fundamentals	5
2.1 Permanent Magnet Synchronous Machine	6
2.1.1 Generic Model of a PMSM	6
2.1.2 Magnetic non-linear phenomena in a PMSM	7
2.2 Field Oriented Current Control	8
2.3 Active Sound Generation and Active Noise Cancellation	10
2.4 Electromagnetic Force generation	10
2.4.1 Forces based on the Maxwell stress tensor	11
2.4.2 Forces based on virtual work	12
3 Determining the origin of current harmonics	13
3.1 State of the art: current harmonics and their compensation	13
3.1.1 Current harmonics in electric machines	13
3.1.2 Current harmonics from inverter	14
3.1.3 Discussion of state of the art	15
3.2 Identification and modelling of current harmonics	15
3.2.1 Reproduction of harmonics at a test bench	16
3.2.2 Determination of flux linkage at a test bench	17
3.2.3 Reproduction of harmonics in a finite element model (FEM)	22
3.2.3.1 Toolchain	22
3.2.3.2 Construction of the machine	23
3.2.3.3 Harmonic behaviour	24
3.2.4 Possible approaches for modelling iron effects	24
3.2.5 Extended high frequency model	26
3.2.5.1 Model equation	27
3.2.5.2 Model identification	27
3.2.5.3 Model verification	33
3.2.5.4 Effect of different identification parameters	35
3.2.6 Discussion of the results regarding origin of current harmonics	38

4	Compensation of harmonics	41
4.1	Compensation of inverter harmonics	41
4.2	Model based compensation scheme	43
4.2.1	Input/output linearisation	43
4.2.2	Proportional resonant controller	45
4.3	Application at test bench	47
4.3.1	Verification of compensation methods	47
4.3.2	Sensitivity on parameter variations	50
4.3.3	Sensitivity on position	52
4.3.4	Behaviour in normal operation	54
4.3.5	Behaviour in combination with the ANC algorithm	57
5	Chain of effects during ANC	59
5.1	Transmission behaviour	59
5.1.1	FEM simulation	59
5.1.2	Test bench measurements	60
5.1.2.1	Test setup force measurements	60
5.1.2.2	Blocked force method	60
5.1.2.3	Test setup structure borne and airborne sound	63
5.1.3	Results	63
5.1.3.1	Validation of simulation and test bench	64
5.1.3.2	Effect of currents and forces on structure and air-borne sound without and with compensation	66
5.2	Further reduction measures for harmonics	72
6	Conclusion and future work	75
	Appendix	77
	List of Figures	81
	Bibliography	85