

Wirkungsgradoptimale Regelung von permanenterregten Synchronmotoren in automobilen Traktionsanwendungen unter Berücksichtigung der magnetischen Sättigung

**Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik
der Universität Paderborn**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Wilhelm Peters

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Januar 2015

Paderborn, 2015

Diss. EIM-E/310

Berichte aus dem Fachgebiet Leistungselektronik und
Elektrische Antriebstechnik

Band 5

Wilhelm Peters

**Wirkungsgradoptimale Regelung von
permanentenerregten Synchronmotoren
in automobilen Traktionsanwendungen
unter Berücksichtigung der magnetischen Sättigung**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3653-4

ISSN 1862-3492

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik (LEA) an der Universität Paderborn, wobei große Teile in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner entstanden sind.

Während der Anfertigung meiner Arbeit haben mich zahlreiche Menschen begleitet und unterstützt, denen ich von Herzen danken möchte. Diese Menschen haben großen Anteil am Gelingen meiner Arbeit.

Mein Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker für das entgegengebrachte Vertrauen, zahlreiche Hinweise und Anregungen sowie die Begutachtung meiner Arbeit. Ebenso möchte ich Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann für die Übernahme des Koreferats danken.

Bei allen Arbeitskollegen am Fachgebiet LEA bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit und das hervorragende Arbeitsklima. Besonders hervorheben möchte ich Dr.-Ing. Andreas Specht, Herrn Tobias Huber und Herrn Oliver Wallscheid, die mir als Diskussionspartner zur Verfügung standen und viele konstruktive Hinweise gaben. Beim Industriepartner möchte ich Dr.-Ing. Tobias Knoke und Dr.-Ing. Michael Meyer danken, die durch Formulierung von seriennahen Fragestellungen die Ausrichtung meiner Arbeit mitgeprägt und wertvolle Hinweise gegeben haben. Ich danke auch allen Studenten für die Beiträge im Rahmen von Abschlussarbeiten. Bei meiner Cousine Olga Kuckshaus bedanke ich mich für das Korrekturlesen des Manuskripts.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern und Geschwistern, die mich stets unterstützt und ermutigt haben. Ganz besonders möchte ich meiner Frau Margarete für die liebevolle Unterstützung, die Geduld und das Vertrauen in mich danken.

Wilhelm Peters
Schloß Holte-Stukenbrock, April 2015

Zusammenfassung

Permanenterregte Synchronmotoren mit eingebetteten Magneten, die für den Einsatz in automobilen Traktionsantrieben entwickelt wurden, weisen ein gegenüber Industrieantrieben deutlich anderes Betriebsverhalten auf. Charakteristisch sind ausgeprägte magnetische Sättigung, hohe elektrische Frequenzen der Grundschiwingung im Verhältnis zur Schaltfrequenz des speisenden Umrichters, ein weiter Konstantleistungsbereich und ein nichtlineares Reluktanzdrehmoment. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Realisierung einer Antriebsregelung unter Berücksichtigung dieser spezifischen Eigenschaften.

Für den Entwurf der Stromregelung wird ein zeitdiskretes Modell des Motors vorgestellt, das den Einfluss von Sättigungs- und Kreuzsättigungseffekten sowie einer geringen Anzahl an Abtastungen pro elektrischer Periode berücksichtigt. Das Modell beschreibt zudem die Wechselwirkung, die sich aus der zeitdiskreten Arbeitsweise der Regelung und der nichtlinearen Magnetisierungscharakteristik des Motors ergibt. Ausgehend von diesem Modell wird eine feldorientierte Stromregelung mit geeigneter Struktur zur Entkopplung der beiden Stromkomponenten realisiert. Anschließend wird sowohl der Entwurf von Stromreglern mit konstanten Parametern vorgestellt, die robust gegenüber einer sättigungsabhängigen Variation der Streckenzeitkonstanten sind, als auch der Entwurf einer adaptiven Regelung, deren Reglerparameter mittels eines vereinfachten Zusammenhangs an die Streckenzeitkonstante angepasst werden. Anhand von Messungen am Prüfstand wird gezeigt, dass der adaptive Regler in Arbeitspunkten mit geringer magnetischer Sättigung eine bessere Führungsdynamik und Störunterdrückung aufweist, als die robuste Regelung.

Ein wirkungsgradoptimaler Betrieb wird durch eine Arbeitspunktsteuerung sichergestellt, die der Stromregelung entsprechend des geforderten Drehmoments geeignete Stromsollwerte vorgibt. Es wird untersucht, inwieweit der Wirkungsgrad des Motors durch Einsatz der ME-Betriebsstrategie (Maximum Efficiency – das geforderte Drehmoment wird mit maximalem Wirkungsgrad gestellt) anstelle der MTPC-Betriebsstrategie (Maximum Torque per Current – das geforderte Drehmoment wird mit minimaler Stromamplitude gestellt) in der Arbeitspunktsteuerung erhöht werden kann. Die Wechselwirkungen zwischen der Verlustcharakteristik eines gegebenen Motors, der arbeitspunktabhängigen Einschränkungen durch die Strom- und Spannungsgrenze sowie der Relevanz einzelner Arbeitspunkte für den Fahrbetrieb werden dabei analysiert und dargestellt. Es wird gezeigt, dass sich bei mittleren bis hohen Drehzahlen und moderater Drehmomentanforderung das größte Potential zur Verlustreduktion ergibt. Voraussetzung ist jedoch, dass bei einem gegebenen Motor durch Auswahl von Arbeitspunkten mit geringeren Eisenverlusten auch die Gesamtverluste gesenkt werden können. Bei dem für diese Arbeit genutzten Motor ist dies nur bedingt der Fall, sodass sich lediglich moderate Verlustreduktionen erzielen lassen.

Abstract

The operating characteristics of interior permanent magnet synchronous motors designed for the application in automotive traction drives are considerably different compared to the ones of industrial drives. The main characteristics are high magnetic saturation, high electrical fundamental frequencies with respect to the converter switching frequency, a wide constant-power operation range and a nonlinear reluctance torque. This thesis deals with the drive controller realization considering these specific characteristics.

For the current controller design a suitable discrete-time motor model is presented considering the impact of saturation and cross-saturation effects and a small number of sampling instants per electrical fundamental period. Furthermore, the motor model describes the interaction between the discrete-time controller operation and the nonlinear magnetic motor characteristics. Based on that model, a field-oriented current controller with a suitable decoupling of the current components is realized. The design of current controllers with constant parameters, which are robust to varying plant time constants due to saturation effects, and the design of an adaptive controller, whose parameters are updated using a simplified computation method, are presented. It is shown by measurement results that the adaptive controller has a better reference response and disturbance reaction in operation points with low magnetic saturation.

To ensure a high efficiency, an operation point selection that provides appropriate current reference values with respect to the demanded torque is required. It is analyzed whether the application of an ME (Maximum Efficiency) operation strategy provides any substantial efficiency benefits over an MTPC (Maximum Torque per Current) operation strategy. The impact of the loss characteristics of a given motor, the restrictions due to current and voltage limits and the relevance of different operation points with respect to a specific driving cycle is investigated and depicted. It is shown, that the greatest loss reduction potential lies at medium to high speeds and moderate torque requests. However, this is only true if the total losses of a given motor can be reduced by selecting operating points with lower iron losses, as well. As for the motor used in this work, this is only true to a limited degree. In consequence, the resulting loss reduction is rather small.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Zusammenfassung	ii
Abstract	iii
1 Einleitung	1
2 Elektrische Antriebe im Antriebsstrang von Automobilen	5
2.1 Charakteristik von Verbrennungsmotoren und elektrischen Antrieben . . .	5
2.2 Fahrzeugkonzepte	11
2.2.1 Elektrofahrzeuge	11
2.2.2 Hybridantriebe	12
2.3 Berechnung des Energiebedarfs	16
3 Modellierung von permanenterregten Synchronmotoren	23
3.1 Koordinatensysteme	25
3.2 Spannungsgleichungen	27
3.3 Sättigungs- und Kreuzsättigungseffekte	29
3.4 Winkelabhängigkeit der Flussverkettung	34
3.5 Drehmomentbildung	37
3.6 Zeitkontinuierliche Modellierung	41
3.6.1 Lineare Stromdynamik	42
3.6.2 Berücksichtigung von Sättigungs- und Kreuzsättigungseffekten .	43
3.6.3 Berücksichtigung einer winkelabhängigen Flussverkettung	44
3.6.4 Vergleich der vorgestellten zeitkontinuierlichen Modelle	46
3.7 Zeitdiskrete Modellierung	46
3.7.1 Lineare Stromdynamik	52
3.7.2 Berücksichtigung von Sättigungs- und Kreuzsättigungseffekten .	53
3.7.3 Berücksichtigung einer winkelabhängigen Flussverkettung	57
3.7.4 Vergleich der vorgestellten zeitdiskreten Modelle	61
3.8 Zusammenfassung	62
4 Übersicht Regelungsstruktur	65
4.1 Anforderung an die Stromregelung	67
4.2 Anforderung an die Arbeitspunktsteuerung	69

4.3	Anforderung an die Aussteuerungsregelung	72
5	Feldorientierte Stromregelung	75
5.1	Stand der Technik	75
5.2	Regular Sampling	78
5.3	Entkopplungsmaßnahmen	79
5.4	Führungs- und Störübertragungsfunktion	80
5.5	Reglerauslegung mittels Polvorgabe	84
5.6	Regler mit definiertem dynamischen Verhalten	90
5.7	Stellgrößenbegrenzung und ARW-Maßnahme	92
5.8	Robustheit gegenüber einer Variation der Streckenzeitkonstante	98
5.9	Adaption der Reglerparameter	104
5.9.1	Kleinsignalverhalten	106
5.9.2	Großsignalverhalten	110
5.10	Exakte Linearisierung	114
5.11	Validierung durch Messungen am Prüfstand	120
5.11.1	Vergleich robuster und adaptiver Regler	121
5.11.2	Regler mit definiertem dynamischen Verhalten	130
5.12	Zusammenfassung	132
6	Wirkungsgradoptimale Arbeitspunktsteuerung	135
6.1	Stand der Technik	135
6.1.1	Arbeitspunktwahl mit minimalen Stromwärmeverlusten	139
6.1.2	Realisierung der kennfeldbasierten Arbeitspunktsteuerung	142
6.2	Betrieb des Motors mit minimalen Gesamtverlusten	143
6.2.1	Einfluss von Eisenverlusten auf das Betriebsverhalten	144
6.2.2	Bewertung des Verbesserungspotentials	154
6.2.3	Modifikation der kennfeldbasierten Arbeitspunktsteuerung	161
6.2.4	Bewertung der Wirkungsgradverbesserung im NEFZ	171
6.2.5	Vermessung der Verlustcharakteristik eines Prototypmotors	177
6.3	Zusammenfassung	194
7	Fazit	197
	Literaturverzeichnis	200
	Verzeichnis eigener wissenschaftlicher Publikationen und Präsentationen	210
	Verzeichnis der betreuten studentischen Arbeiten	212
A	Anhang	215
A.1	Zeitdiskrete Übertragungsfunktionen wichtiger Elemente	215
A.1.1	P-T ₁ -Element (Tiefpass 1. Ordnung)	216
A.1.2	D-T ₁ -Element (Hochpass 1. Ordnung)	217
A.1.3	P-T ₂ -Element (Tiefpass 2. Ordnung)	218

A.1.4	D- T_2 -Element (Bandpass 2. Ordnung)	219
A.1.5	D-D- T_2 -Element (Hochpass 2. Ordnung)	220
A.1.6	Parallelschaltung von Elementen 2. Ordnung	221
A.1.7	Verschiebung der Ausgangsfolge	222
A.2	Optimierung der Reglerparameter	223
A.2.1	Verstärkung des P-Anteils	224
A.2.2	Verstärkung des I-Anteils	225
A.3	Verlustleistung bei unterschiedlicher Zwischenkreisspannung	226
A.4	Drehmomentisolinien im motorischen und generatorischen Betrieb	227