Elektrotechnisches Institut
Lehrstuhl Elektrische Maschinen
und Antriebe

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann

Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und Antrieben

Thomas Windisch

Energieeffiziente Antriebsregelung für hochausgenutzte Drehstrommotoren in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen



SHAKER VERLAG

Band 16

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Elektrotechnisches Institut, Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe

Energieeffiziente Antriebsregelung für hochausgenutzte Drehstrommotoren in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen

Von: Dipl.-Ing. Thomas Windisch

Geboren am: 27.08.1983 in Dresden

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieurs

(Dr.-Ing.)

vorgelegte Dissertation

Promotionskommission:

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. habil. W. Schwarz
1. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann
2. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. J. Böcker
Beisitzer:	Prof. Dr.-Ing. S. Großmann

Tag der Einreichung: 30.08.2017
Tag der Verteidigung: 24.07.2018

Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und Antrieben

Band 16

Thomas Windisch

Energieeffiziente Antriebsregelung für hochausgenutzte Drehstrommotoren in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6164-2
ISSN 1869-8190

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

Danksagung

Die vor Ihnen liegende Dissertationsschrift entstand im Rahmen meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe der Technischen Universität Dresden. Zu ihrem Gelingen haben zahlreiche Personen in erheblichem Maße beigetragen, denen ich an dieser Stelle meinen besonderen Dank aussprechen möchte.

Ich danke meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof Dr.-Ing. Wilfried Hofmann für seine Anregungen, kritischen Nachfragen und Ideen zum Thema dieser Arbeit und für die sehr gute fachliche sowie projektbezogene Betreuung. Außerdem möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker für seine Arbeit als Zweitgutachter danken. Weiterhin bin ich Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Volkmar Müller sehr für die kollegiale Zusammenarbeit in der Errichtung des Antriebsversuchsstands dankbar. Herrn Dr.-Ing. Nicol Hildebrand danke ich für manche fachliche sowie praktische Anregung und Diskussion. Ausdrücklich erwähnen möchte ich meine *geschätzten* Kollegen, die Herren Dipl.-Ing. Stephan Tenner und Dipl.-Ing. Stephan Günther, denen ich sehr dankbar bin für vielen fachlichen Austausch und gute Zusammenarbeit. Zu guter Letzt danke ich allen von mir betreuten Studenten und Diplomanden, die mir sehr wertvolle Dienste geleistet haben.

Das Gelingen der Arbeit wäre nicht möglich gewesen ohne die motivierenden Worte und die Unterstützung meiner Frau, die stets zu mir hielt, so manche Unzulänglichkeit kompensierte, immer Verständnis hatte und mir die Kraft gab, das Werk zum Abschluss zu bringen. Danke!

Dresden, den 30.08.2017

Kurzfassung

Elektromotoren in Fahrzeugantrieben müssen möglichst kompakt sein und eine hohe Leistungsdichte bieten, weshalb sie besonders hoch ausgenutzt werden. Als Referenzfahrzeug dient in den Betrachtungen der Arbeit ein serieller Hybridbus, der im innerstädtischen Bereich verkehrt und Haltestellenbetrieb gewährleistet. Das bedingt wiederholtes Anfahren und hohe Rekuperation während Bremsvorgängen jeweils mit Maximalmoment durch die hohe Masse des Busses. Die Elektromaschine wird aus dem Hochvolt-Gleichspannungs-Bordnetz durch einen Wechselrichter gespeist, der eine feldorientierte Regelung implementiert. Es werden permanenterregte Synchronmotoren mit vergrabenen Magneten, sowie Asynchronmotoren mit Käfigläufer betrachtet. Für diese beiden Motorentypen wird ein wirkungsgradoptimaler Betrieb in allen auftretenden Arbeitspunkten durch eine verbesserte Antriebsregelung angestrebt, damit der Energieverbrauch pro gefahrener Wegstrecke minimiert wird.

Aufgrund der hohen Ausnutzung und kompakten Bauform der Maschinen muss das nichtlineare Sättigungsverhalten berücksichtigt werden. Zwei Besonderheiten der gewählten Maschinentypen kommen hinzu, die das Problem verkomplizieren. Die permanenterregte Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten weist ein Reluktanzmoment auf, welches von den wirksamen Induktivitäten in Längs- und Querrichtung abhängt. Diese ändern sich nichtlinear je nach resultierendem Fluss und sind miteinander verkoppelt, weshalb sich eine zweidimensionale Abhängigkeit ergibt, die in der Wirkungsgradoptimierung beachtet werden muss. Die Sättigungsabhängigkeit der Hauptinduktivität der Asynchronmaschine ist eindimensional darstellbar, jedoch unterliegt die Rotorzeitkonstante hohen Schwankungen aufgrund der Erwärmung, die wenn sie nicht kompensiert werden, eine Fehlorientierung und damit eine Abweichung im Drehmoment zur Folge haben. Beiden Besonderheiten wird durch genauere Maschinenmodelle Rechnung getragen.

Zur Identifizierung der energieoptimalen Steuergrößen der Regelung werden für beide Maschinentypen zwei Ansätze verfolgt. Zunächst wird eine modellbasierte Optimierung durchgeführt, die die Verluste des Antriebs bestehend aus Wechselrichter und Maschine für jeden gewünschten Arbeitspunkt minimiert. Diese muss vorab gelöst werden, woraufhin die optimalen Steuergrößen in Tabellen abgespeichert werden, aus denen zur Laufzeit interpoliert wird. Falls keine sättigungsabhängigen Maschinenmodelle vorhanden sind oder diese aufgrund von Toleranzen oder Temperatureinflüssen ungenau sind, kann ein Online-Suchverfahren den wahren sättigungsabhängigen Punkt während des Betriebs ohne Nutzung von Maschinenparametern finden. Dazu wird ein Ansatz vorgeschlagen, der sich in einem Zustandsautomaten programmieren lässt. Dieser Algorithmus wird für beide Maschinentypen getestet und jeweils mit einem bereits publizierten Verfahren verglichen. Messungen an einem Antriebsversuchsstand mit eigenem Wechselrichter validieren die Maschinen- und Verlustleistungsmodelle und zeigen, dass das entwickelte Online-Verfahren den tatsächlichen Optimalpunkt innerhalb einer für die Anwendung vertretbaren Konvergenzzeit findet.

Abstract

Electric motors in vehicle traction drives have to be most compact and must provide a very high power density. They are therefore highly utilized and operated in magnetic saturation. The reference vehicle is a serial hybrid bus, that runs within a city and ensures stop-and-go-operation. That requires repetitive acceleration and high recuperation during braking both with maximum torque due to the high vehicle mass. The electrical machine is fed from a high-voltage DC link by a voltage-source-inverter that implements a field-oriented control. Interior permanent magnet synchronous machines and induction motors with squirrel-cage rotor are considered. For both types an efficiency optimized operation is desired in all operating points using an improved drive control, so that the energy consumption per distance covered is minimized.

Due to the high utilization and compact construction of the machines the nonlinear saturation dependency has to be considered. Two particularities of the chosen machine types complicate the optimization problem. The interior permanent magnet synchronous machine provides a reluctance torque that depends on the effective inductances in direct and quadrature axis. They are subject to change in a nonlinear way depending on the resulting flux and they are cross-coupled which is why a two dimensional dependency results that has to be considered in the efficiency optimization. The saturation dependency of the main inductance of the induction machine can be depicted one-dimensional. The rotor time constant however is subject to variations due to temperature change. If this is not compensated a misorientation results and the machine torque deviates. Both particularities are taken into account by more accurate machine models.

To identify the energy optimized reference values of the control two approaches are pursued for both machine types. At first a model based optimization is carried out, that minimizes the losses of the inverter and the machine for every desired operating point. It has to be solved prior to operation and the resulting optimized reference values must be stored in look-up-tables on which interpolation is carried out during run-time. If no saturation dependent machine models are available or they are not accurate enough due to tolerances and temperature variation, an online-search algorithm can be used to track the true saturation dependent operating point during the operation without the use of machine parameters. For this purpose a novel approach is proposed that can be programmed in a state machine. This algorithm is tested for both machines and compared to an existing solution. Measurement results on a test bench with an experimental inverter validate the machine and loss models and show that the developed online method is able to track the true optimal point within a convergence time that is acceptable for the application.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
1.1 Transportsystem AutoTram® . . . 2
1.2 Gegenstand und Motivation . . . 4
1.2.1 Betrachtete Antriebssysteme . . . 4
1.2.2 Wissenschaftliche Fragestellung . . . 4

2 Stand der Technik **6**
2.1 Maschinenauslegung für das Referenzfahrzeug . . . 6
2.1.1 Prinzipielle Auslegung von Elektromotoren für Straßenfahrzeuge . . . 6
2.1.2 Modell der Fahrzeug-Längsdynamik . . . 7
2.1.3 Berechnung der benötigten Antriebsleistung . . . 9
2.2 Antriebsregelung für elektrische Fahrzeuge . . . 12
2.2.1 Direkte Regelverfahren . . . 13
2.2.2 Feldorientiertes Stromregelverfahren . . . 14
2.2.3 Sollgrößen für die Regelung . . . 15
2.2.4 Online-Optimierungsverfahren . . . 16

3 Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten **17**
3.1 Aufbau der prototypischen Maschine . . . 17
3.1.1 Statorgeometrie und -wicklung . . . 18
3.1.2 Rotorgeometrie und Magnetanordnung . . . 19
3.1.3 Sensorik . . . 20
3.1.4 Nenndaten . . . 21
3.2 Grundwellenmodell mit Sättigungseinfluss . . . 21
3.2.1 Lineare Theorie . . . 21
3.2.2 Sättigungsabhängige Theorie . . . 23
3.2.3 Definition der Induktivität . . . 24
3.3 Bestimmung der Sättigungscharakteristik mittels FEM . . . 25
3.3.1 Zweidimensionales magnetostatisches Modell . . . 26
3.3.2 Verteilung der Ströme in Umfangsrichtung . . . 27
3.3.3 Feldberechnung bei verschiedenen Rotorlagewinkeln . . . 28
3.3.4 Resultate in tabellarischer Form und Diskussion . . . 30
3.3.5 Approximation durch zweidimensionale Polynomfunktion . . . 31
3.4 Abschätzung des Temperatureinflusses . . . 32
3.4.1 Widerstand der Ständerwicklung . . . 33
3.4.2 Fluss der Permanentmagnete . . . 33

4 Optimierte Betriebsweise der permanenterregten Synchronmaschine **36**
4.1 Struktur der Regelung . . . 37
4.2 Standardoptimierungsverfahren . . . 37
4.2.1 Maximales Moment pro Ampere . . . 38
4.2.2 Maximales Moment pro Volt . . . 39
4.2.3 Anwendung auf die betrachtete Maschine . . . 40

4.3 Verlustleistungsberechnung . . . 42
4.3.1 Maschinenverluste bei Annahme sinusförmiger Speisung . . . 42
4.3.2 Verluste im Wechselrichter . . . 43
4.3.3 Bestimmung der Energieeffizienz im Fahrzyklus . . . 47
4.4 Modellbasierte Verlustminimierung . . . 48
4.4.1 Numerische Lösung nichtlinearer Optimierungsprobleme unter Nebenbedingungen . . . 48
4.4.2 Problemformulierung . . . 49
4.4.3 Lösung der Optimierungsaufgabe . . . 50
4.4.4 Simulativer Vergleich mit Standardoptimierung . . . 53
4.5 Online-optimale Betriebsweise . . . 57
4.5.1 Motivation für Online-Suchverfahren zur Verlustminimierung . . . 57
4.5.2 Methode mittels Signaleinprägung . . . 58
4.5.2.1 Prinzipielle Funktionsweise . . . 58
4.5.2.2 Analytische Berechnung . . . 60
4.5.2.3 Bestimmung des Drehmoments aus der Leistungsaufnahme 61
4.5.2.4 Umsetzung in der Antriebsregelung . . . 62
4.5.2.5 Simulationsresultate . . . 63
4.5.3 Diskretes Suchverfahren - Simplex-Verfahren . . . 65
4.5.3.1 Prinzipielle Funktionsweise . . . 65
4.5.3.2 Iterative Suche mittels Zustandsautomaten . . . 66
4.5.3.3 Umsetzung in der Antriebsregelung . . . 68
4.5.3.4 Vergleich mit Methode mittels Signaleinprägung . . . 69
4.6 Messtechnische Untersuchungen . . . 70
4.6.1 Antriebsversuchsstand . . . 70
4.6.2 Motorkennfelder . . . 72
4.6.3 Manuelle Stromwinkelsuche . . . 76
4.6.4 Ergebnisse des Simplex-Suchverfahrens . . . 79

5 Asynchronmaschine mit Käfigläufer 82
5.1 Aufbau der Serienmaschine . . . 83
5.2 Grundschwingungsmodell und Ersatzschaltbild . . . 84
5.2.1 Rotorflussorientiertes Maschinenmodell mit Spannungseinprägung . 84
5.2.2 Berücksichtigung von Sättigung im Modell . . . 89
5.2.3 Berücksichtigung von Ummagnetisierungsverlusten im Modell . . . 89
5.3 Bestimmung der Sättigungscharakteristik mittels FEM . . . 91
5.3.1 Zweidimensionales magnetostatisches Modell . . . 91
5.3.2 Sättigung der Hauptfeldrichtung . . . 92
5.3.3 Sättigung der Streupfade . . . 95
5.4 Abschätzung des Temperatureinflusses . . . 95
5.5 Sättigungs- und temperaturabhängiges transientes Maschinenmodell . . . 96

6 Optimierte Betriebsweise der Asynchronmaschine 98
6.1 Struktur der Regelung . . . 98
6.2 Standardverfahren zur Wahl der Steuergrößen . . . 100
6.2.1 Konstanter Fluss . . . 100

6.2.2 Optimierung mit linearem Maschinenmodell . . . 100
6.3 Verlustleistungsberechnung . . . 101
6.3.1 Maschinenverluste bei sinusförmiger Speisung . . . 101
6.3.2 Verluste im Wechselrichter . . . 102
6.4 Modellbasierte Verlustminimierung . . . 103
6.4.1 Optimierungsproblem und Nebenbedingungen . . . 103
6.4.2 Lösung der Optimierung . . . 104
6.4.3 Simulativer Vergleich mit Standardverfahren . . . 107
6.5 Online-optimale Betriebsweise . . . 108
6.5.1 Überblick zu vorhandenen Suchverfahren zur Verlustminimierung von Asynchronmaschinen . . . 108
6.5.2 Diskretes Suchverfahren - Goldener Schnitt . . . 108
6.5.3 Diskretes Suchverfahren - Simplex-Verfahren . . . 112
6.6 Messtechnische Untersuchungen . . . 113
6.6.1 Motorkennfelder . . . 113
6.6.2 Manuelle Stromwinkelsuche . . . 118
6.6.3 Ergebnisse der Online-Optimierung . . . 119

7 Zusammenfassung 121
7.1 Vergleich der beiden Antriebssysteme . . . 121
7.2 Bewertung der erzielten Ergebnisse . . . 122
7.3 Realisierbarkeit in Serienanwendungen . . . 123
7.4 Ausblick . . . 124

A Anhang 127
A.1 Datenblattangaben . . . 127
A.1.1 Permanentmagnete Vacodym 872 AP . . . 127
A.1.2 Elektroblech M330-50A . . . 128
A.1.3 Wechselrichtermodul Infineon FS450R12KE4 in der AutoTram . . . 128
A.1.4 Wechselrichtermodul Fuji 2MBI600VXA im Experimentierwechselrichter . . . 128
A.2 Berechnete Daten . . . 129
A.2.1 Grundwellenparameter der IPMSM . . . 129
A.2.2 Auslegungspunkt der IPMSM für Nennmoment laut MMPA . . . 129
A.2.3 Koeffizienten der Polynomapproximation des zweidimensionalen Sättigungskennfelds der IPMSM . . . 130
A.2.4 Grundwellenparameter der KL-ASM . . . 130
A.2.5 Auslegungspunkt der KL-ASM für Nennmoment laut MMPA . . . 131
A.2.6 Koeffizienten der Approximationsfunktion für die sättigungsabhängige Hauptfeldinduktivität der KL-ASM . . . 131
A.2.7 Parameter zum implementierten Downhill-Simplex-Algorithmus . . . 131
A.3 Analytische Berechnung zur Bestimmung der Konkavität der Zielfunktion . 131
A.4 Überblick und Daten zum Antriebsversuchsstand . . . 135
A.5 Messdaten zur manuellen Stromwinkelsuche an der IPMSM . . . 136
A.6 Fehlerbetrachtung zur Leistungsmessung . . . 137
A.7 Raumzeigermodulation . . . 140

Literaturverzeichnis **145**