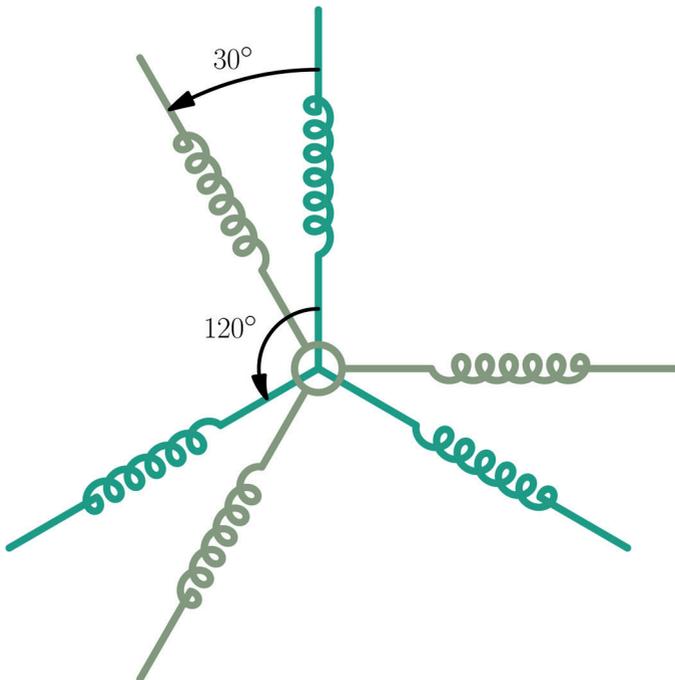


Modellbildung und Parameteridentifikation von Asynchronmaschinen mit zwei Statorwicklungssystemen

Moritz Haußmann



**Modellbildung und Parameteridentifikation
von Asynchronmaschinen mit zwei
Statorwicklungssystemen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
angenommene

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Moritz Haußmann

Tag der mündlichen Prüfung:

12.10.2020

Hauptreferent:

Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer

Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. Christian Klöffler

Berichte aus der Elektrotechnik

Moritz Haußmann

**Modellbildung und Parameteridentifikation
von Asynchronmaschinen mit zwei
Statorwicklungssystemen**

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7714-8

ISSN 0945-0718

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand im Team Leistungselektronik Vorentwicklung bei der Daimler AG in Kooperation mit der Professur für Hybridelektrische Fahrzeuge (HEV) des Elektrotechnischen Instituts (ETI) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Ich möchte mich auf diesem Wege bei allen herzlich bedanken, die zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer danke ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die fachliche und persönliche Unterstützung. Vielen Dank, dass Sie sich Zeit für einen regelmäßigen Austausch genommen haben. Dies trug maßgeblich zum Gelingen der Arbeit bei.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Klöffler für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferats. Auch für den regen fachlichen Austausch und die Unterstützung bereits während der Entstehung dieser Arbeit möchte ich mich an dieser Stelle bedanken.

Herrn Dr. Wolfgang Wondrak und Herrn Dr.-Ing. Jörg Weigold danke ich für die Unterstützung und Betreuung seitens der Daimler AG. Vielen Dank für die Freiheit, die mir bei der Themenwahl und auch fortlaufend während meiner Arbeit eingeräumt wurde.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Ammann bedanke ich mich für den ursprünglichen Denkanstoß zur Entstehung dieser Arbeit und für den fachlichen Austausch.

Auch bei meinen restlichen Kollegen, die mich während meiner Zeit als Doktorand begleitet haben und die mir immer mit Rat zur Seite standen, möchte ich mich herzlichst bedanken. Herrn Andreas Jung danke ich für die Unterstützung beim Aufbau des Umrichters. Bei Herrn Nis-Anton Möllgaard und Herrn Torben Schulze bedanke ich mich für die Auslegung und den Aufbau der Doppelsternasynchronmaschine.

Ebenso gilt mein Dank den anderen Doktoranden am ETI, über die auch der Kontakt zum KIT aufrecht erhalten wurde und die mich immer bei meiner Arbeit unterstützt haben. Insbesondere möchte ich hier Herrn Torsten Epskamp erwähnen.

Herrn Roland Dold danke ich für die freie Einteilung meiner Arbeitszeit während meiner Anschlussbeschäftigung. Hierdurch war es möglich, den schriftlichen Teil fertigzustellen.

Der größte Dank gilt meiner Familie. Meine Eltern haben mich bei all meinen Entscheidungen und bei meinem Weg über das Studium hin zur Promotion unterstützt und ermutigt. Nur durch ihre Unterstützung wurde mir all dies ermöglicht.

Moritz Haußmann,

Nürtingen, im Oktober 2020

Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit der Modellbildung und Parameteridentifikation von Asynchronmaschinen mit zwei Statorwicklungssystemen. In vielen Anwendungsfällen werden elektrische Maschinen drehmomentgeregelt betrieben. Ein Drehmomentsensor ist jedoch in den seltensten Fällen verbaut. Üblicherweise werden nur die Strangströme gemessen und geregelt. Das Drehmoment wird durch Maschinenmodelle aus den Strömen berechnet. Eine feldorientierte Regelung basiert ebenfalls auf Maschinenmodellen. Daher ist einerseits ein genaues Modell der Maschine wichtig. Zum Anderen müssen die Modellparameter möglichst exakt bestimmt werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass eine Regelung die Forderungen hinsichtlich Dynamik und Drehmomentgenauigkeit erfüllt. Aufgrund von äußeren Randbedingungen und dem Bestreben, auf seltene Magnetmaterialien zu verzichten, sollen vermehrt Asynchronmaschinen in elektrischen Fahrzeugen verwendet werden. Da der Maximalstrom der verfügbaren Wechselrichter die Leistung der Maschinen begrenzt, wird der Einsatz von Asynchronmaschinen mit zwei Statorwicklungssystemen diskutiert. Jedes Statorwicklungssystem wird von einem eigenen Wechselrichter versorgt. Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Beschreibung, Modellbildung sowie der Parameteridentifikation und schafft die Grundlagen zur Regelung solcher Maschinen.

Zunächst werden die Systemgleichungen ausgehend von physikalischen Grundlagen hergeleitet und in ein Modell überführt. In der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion gibt es zwei unterschiedliche Arten von Modellen zur Beschreibung solcher Maschinen. Es wird gezeigt, dass diese untereinander mathematisch äquivalent sind und sich ineinander überführen lassen.

Eine analytische Maschinenberechnung liefert theoretische Vergleichswerte für die Parameter. Anschließend werden gängige Verfahren von dreisträngigen Maschinen adaptiert, um die Modellparameter zu bestimmen. Dann wird ein neues Verfahren vorgestellt, mit welchem die Parameter noch exakter bestimmt werden können. Ein Versuchsaufbau, bestehend aus Maschine und Wechselrichter, wird zur praktischen Anwendung der Verfahren verwendet. Die Maschine wird sowohl mit den Verfahren der klassischen Charakterisierung, als auch der neuen Parameteridentifikation vermessen.

Anschließend werden die ermittelten Parameter in einem Simulationsmodell hinterlegt. Ein Vergleich von simulierten Betriebspunkten mit dem realen Maschinenverhalten zeigt, dass eine reine Vermessung der Maschine am Prüfstand nicht ausreichend ist. Insbesondere die Rotorparameter sind stark frequenz- und temperaturabhängig. Die Parameter ändern sich somit je nach Betriebspunkt. Das neue Verfahren wird entsprechend erweitert, so dass die kontinuierliche Bestimmung und Nachführung der Parameter während des Normalbetriebs möglich ist.

Das Ergebnis der Arbeit ist ein regelungstechnisch geeignetes Modell von Asynchronmaschinen mit zwei Statorwicklungssystemen und ein Verfahren zu fortlaufenden Bestimmung der wirksamen Parameter.

Abstract

This dissertation deals with modelling and parameter identification of induction machines with two stator winding systems. Typically, electric machines are operated in torque control mode. A torque sensor is rarely installed. Usually phase currents are measured and controlled. Torque is derived from the currents via a machine model. Also a field oriented control uses a model for its orientation. Therefore, it is important to have an accurate machine model. The model parameters must be identified precisely. This is the only way to ensure, that the control achieves the desired dynamics and torque accuracy. Due to the request to save rare earth magnets and to other constraints, usage of induction machines is considered for electric vehicles. Since maximum current in an inverter limits the machine power, the usage of induction machines with two stator winding systems is discussed. Each winding system is supplied from an individual inverter. This work contributes to modelling, parameter identification and lays groundwork for controls of such machines.

First, the system equations are derived from physical principles and formed into a model. A comparison with previous works on modelling shows two different models of such machines. They seem to be different at first. Nevertheless it is shown, that they are mathematically equivalent and that they can be transformed from one into the other.

An analytical calculation yields theoretical parameter values for comparison. After that, characterization methods from three phase machines are applied to determine the parameters. Then a new method is shown which is capable to determine the parameters more accurately. A hardware setup consisting of a dual stator induction machine and an inverter with measurement analysis is used to test those methods. The results from the test bench are presented and evaluated.

After that, the derived parameters are used within a machine simulation. A comparison between simulated and measured operating points shows, that a simple offline parameter identification is not accurate enough. Especially the rotor parameters depend on frequency and temperature. They are different for each operating point. The new method is adapted so that parameters can be identified and updated during normal operation.

The result of this work is a suitable model for induction machines with two stator windings and an online method to identify machine parameters.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Motivation	1
1.1. Elektrische Fahrzeugantriebe	3
1.2. Antriebe mit mehr als drei Strängen	6
1.2.1. Maschinen mit gemeinsamem Sternpunkt	6
1.2.2. Maschinen mit getrennten Sternpunkten	7
1.3. Stand der Technik	9
1.4. Ziele der Arbeit und Gliederung	13
2. Modellbildung	17
2.1. Aufbau und Funktionsweise einer Asynchronmaschine . . .	17
2.2. Elektromagnetische Systemgleichungen	19
2.2.1. Statorwicklungssystem I	19
2.2.2. Statorwicklungssystem II	26
2.2.3. Rotorwicklungssystem	30
2.3. Gemeinsames Koordinatensystem	31
2.4. Feldorientierte Gleichungen	41
2.4.1. Prinzip der Feldorientierung	42
2.4.2. Rotorflussorientierte Systemgleichungen	43
2.5. Statorfeste Gleichungen	46
2.5.1. Statorfestes elektrisches Ersatzschaltbild	46
2.5.2. Verschiedene Formen von Ersatzschaltbildern	49

3. Analytische Berechnung der Parameter	53
3.1. Prototypenmaschine	53
3.2. Statorwiderstand	57
3.3. Rotorwiderstand	59
3.4. Hauptinduktivität	62
3.5. Statorstreuinduktivität	71
3.6. Rotorstreuinduktivität	74
3.7. Zusammenfassung der berechneten Parameter	75
4. Messverfahren zur Parameteridentifikation	77
4.1. Klassische Charakterisierung	77
4.1.1. Gleichstrommessung	79
4.1.2. Blockiermessung	80
4.1.3. Gegendrehfeldmessung	82
4.1.4. Leerlaufmessung	85
4.2. Differenzstromverfahren	87
4.2.1. Bestimmung der Statorgrößen	88
4.2.2. Bestimmung der Rotorgrößen	90
5. Ergebnisse der Prüfstandsmessungen und Verifikation der Parameter	95
5.1. Temperatur- und Frequenzkorrektur	96
5.1.1. Temperaturkorrekturfaktor	97
5.1.2. Widerstandserhöhungs- und Induktivitätsverminderungs- faktor	97
5.1.3. Korrektur bei der klassischen Charakterisierung	100
5.1.4. Korrektur beim Differenzstromverfahren	101

5.2.	Wahl einer geeigneten Messfrequenz	102
5.3.	Ergebnisse der Prüfstandsmessungen	105
5.3.1.	Klassische Charakterisierung	106
5.3.2.	Differenzstromverfahren	114
5.3.3.	Bewertung der Messergebnisse	121
5.4.	Verifikation der Parameter	122
5.4.1.	Simulationsumgebung	123
5.4.2.	Exemplarischer Betriebspunkt	125
6.	Online-Messungen nach dem Differenzstromverfahren	131
6.1.	Online-Messverfahren	131
6.2.	Ergebnisse der Online-Messungen	135
6.2.1.	Exemplarischer Betriebspunkt	135
6.2.2.	Ergebnisse weiterer Betriebspunkte	139
7.	Zusammenfassung und Ausblick	141
A.	Anhang	145
A.1.	Versuchsaufbau	145
A.1.1.	Übersicht Prüfstand	145
A.1.2.	Sechphasenuniversalumrichter	148
A.2.	Nebenrechnungen	151
A.2.1.	Raumzeiger Kapitel 2	151
A.2.2.	Gemeinsames Koordinatensystem Kapitel 2	152
A.2.3.	Drehmoment Kapitel 2	155
A.2.4.	Stationäres elektrisches Ersatzschaltbild Kapitel 4	163
A.3.	Begründung der Grundwellenbetrachtung bei Sättigung des Eisens	164

Formelzeichenverzeichnis	169
Abbildungsverzeichnis	177
Tabellenverzeichnis	180
Eigene Veröffentlichungen	181
Betreute studentische Arbeiten	183
Allgemeine Literatur	185
Normen	189
Lebenslauf	191