**Untersuchungen an einem neuartigen
Antriebssystem, basierend auf dem
Reluktanzprinzip, mit vollständiger
Verlustmodellierung**

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität der Bundeswehr München
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Björn Weigold

Neubiberg
2011

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Klaus Landes
erster Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Rainer Marquardt
zweiter Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann
Tag der Promotion:	07.10.2011

Forschungsberichte Leistungselektronik und Steuerungen

Band 5

Björn Weigold

Untersuchungen an einem neuartigen Antriebssystem, basierend auf dem Reluktanzprinzip, mit vollständiger Verlustmodellierung

Shaker Verlag
Aachen 2011

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.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0597-4

ISSN 1867-5700

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 Lehrstuhl für Leistungselektronik und Steuerungen an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München im Zeitraum von Juli 2005 bis Dezember 2008.

Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Marquardt gilt mein besonderer Dank für die Verwendungsmöglichkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an seinem Lehrstuhl und die tatkräftige Unterstützung bei meiner Promotion. Weiterhin möchte ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen insbesondere bei der Projektbetreuung sowie grundsätzlich bei allen sonstigen Aufgaben am Lehrstuhl bedanken. Seine kreative Unterstützung beim Forschen und die lehrreichen Gespräche und fachlichen Diskussionen haben meinen elektrotechnischen Horizont stark erweitert.

Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferates. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Landes für die Übernahme des Vorsitzes und die Moderation der Prüfung. Durch seine begeisterte Art und die Unterstützung bei der Rückkehr als WiMi wurde bereits frühzeitig die Basis für den erfolgreichen Abschluss der Promotion gelegt.

Vielen Dank an alle Mitarbeiter, Kollegen, Kameraden, Freunde und Schmitti, mit denen ich Stress, aber auch viel Freude und tolle Augenblicke teilen durfte. Dank der guten Zusammenarbeit, der zahlreichen, technischen Gespräche und der vielseitigen Unterstützung konnte die vorliegende Arbeit erst in diesem Umfang entstehen. Besonders bedanken möchte ich mich auch beim Team um U. Bayerle, das mir immer mit schneller und praktischer Unterstützung unter die Arme griff.

Last but not least gilt mein herzlicher Dank meiner ganzen Familie, insbesondere meiner lieben Frau Katja und meiner Tochter Emilia, die stets Verständnis und Geduld während dieser Zeit zeigten und mir immer Ansporn und Motivationshilfe, aber auch Erdung bei geistigen Überschlügen waren.

Inhalt

1 EINFÜHRUNG UND STAND DER TECHNIK	1
1.1 <i>Elektrische Direktantriebe in der Werkzeugmaschinenindustrie.....</i>	<i>1</i>
1.1.1 Asynchronmaschine.....	4
1.1.2 Permanenterregte Synchronmaschine/ „Torquemotor“.....	7
1.2 <i>Einsatz Geschalteter Reluktanzmaschinen als Direktantrieb in der Werkzeugmaschinenindustrie</i>	<i>11</i>
2 HOCHDYNAMISCHES ANTRIEBSKONZEPT	15
2.1 <i>Maschinen.....</i>	<i>16</i>
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise Geschalteter Reluktanzmaschinen.....	16
2.1.2 Aufbau und Funktionsweise von Scheibenläufern, basierend auf dem Reluktanzprinzip mit transversaler Flussführung	24
2.1.3 Einführung eines neuartigen, hochpoligen Scheibenläufermotors	35
2.2 <i>Stromrichterkonzepte für Geschaltete Reluktanzmaschinen.....</i>	<i>44</i>
2.2.1 Asymmetrische Halbbrücke.....	45
2.2.2 Umrichter topologie mit zusätzlichen Freiheitsgraden für Antriebe mit Geschalteten Reluktanzmaschinen	51
2.3 <i>Mathematische Modelle und Regelungskonzepte für den Betrieb von Geschalteten Reluktanzmaschinen.....</i>	<i>62</i>
2.3.1 Mathematische Modelle.....	63
2.3.2 Gage – Curve - Modell.....	68
2.3.3 Anwendung des Gage - Curve – Modells in einer Online – Drehmomentregelung für hochdynamische Antriebe	90
3 NEUARTIGES REGELUNGSKONZEPT MIT VOLLSTÄNDIGER VERLUST- MODELLIERUNG.....	104
3.1 <i>Vorüberlegungen zur vollständigen Verlustmodellierung in einer Online – Drehmomentregelung.....</i>	<i>105</i>
3.2 <i>Einführung einer erweiterten Kennlinienmodellierung für Geschaltete Reluktanzmaschinen</i>	<i>112</i>
3.2.1 Betrieb im gesättigten Bereich bei festgebremster Maschine.....	114

3.2.2	Betrieb im ungesättigten Bereich bei festgebremster Maschine.....	120
3.2.3	Drehender Betrieb einer Maschine.....	132
3.3	<i>Einbindung der Verlustmodellierung in die Regelung</i>	143
3.3.1	Erweiterte Online - Regelung für den unteren Drehzahlbereich	144
3.3.2	Erweiterte Online - Regelung für den oberen Drehzahlbereich	153
4	SENSORLOSE ROTORPOSITIONSERFASSUNG FÜR DEN BETRIEB VON HOCHPOLIGEN SCHEIBENLÄUFERMOTOREN	170
4.1	<i>Mechanische Sensoren</i>	171
4.2	<i>Sensorlose Rotorpositionserfassung</i>	174
4.3	<i>Einführung einer neuartigen, sensorlosen Rotorpositionserfassung für den gesamten Drehzahlbereich hochpoliger Reluktanzmaschinen.....</i>	<i>180</i>
4.3.1	Sensorlose Bestimmung der Rotorposition im Stillstand und bei niedrigen Drehzahlen.....	181
4.3.2	Sensorloses Verfahren zur Rotorpositionserfassung bei höheren und höchsten Drehzahlen.....	191
5	ZUSAMMENFASSUNG.....	201
6	LITERATURVERZEICHNIS	205
7	ANHANG	210
7.1	<i>Maschinendaten der Testmaschine</i>	210
7.2	<i>Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen.....</i>	211