

Permanentmagneterregter Synchronmotor mit integrierter Energieübertragung in das Läufersystem

Dipl.-Ing. Markus Reinhard
geboren in Ludwigshafen am Rhein

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität Kaiserslautern zur Verleihung des akademischen
Grades Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte
Dissertation

D386

Tag der mündlichen Prüfung: 29.10.2008

Dekan: Prof. Dr.-Ing. Steven Liu

Promotionskommission:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Alexander Potchinkov

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Freise

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik

Band 2

Markus Reinhard

**Permanentmagneterregter Synchronmotor
mit integrierter Energieübertragung
in das Läufer-system**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Aachen 2009

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.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8170-0

ISSN 1866-5357

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

Präambel

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme der TU Kaiserslautern. Mein Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth für die engagierte Betreuung der Arbeit. Die gemeinsamen Diskussionen haben zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Für die Unterstützung der Arbeit bin ich der Siemens AG, Erlangen, verpflichtet. Insbesondere möchte ich Herrn Dr. Reinhard Maier danken.

Für die Übernahme des Koreferats und das der Arbeit entgegengebrachte Interesse danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Werner Freise.

Danken möchte ich auch allen Kollegen, die mit mir am Lehrstuhl gearbeitet haben. Ich verdanke ihnen viele fruchtbare Diskussionen.

Viele Studenten haben mit ihren Studien- und Diplomarbeiten oder ihrer Tätigkeit als wissenschaftliche Hilfskraft zum Gelingen dieses Projekts beigetragen. Ihnen allen gilt mein Dank.

Von ganzem Herzen danke ich meiner Mutter, die mir nicht nur meine Ausbildung ermöglichte, sondern auch stets an meiner Seite stand.

Vor allem aber möchte ich meiner Frau Melanie für ihre nie endende Geduld und Unterstützung während der Arbeit an dieser Dissertation herzlich danken.

Übersicht

Bei einer Vielzahl von Anwendungen ist es nötig, über elektrische Energie auf einem beweglichen, insbesondere rotierenden Bauteil zu verfügen. Denkbar ist beispielsweise die Versorgung einer Sensorik mit elektrischer Energie oder das Bereitstellen von elektrischer Energie zum Spannen oder Wechseln von Werkzeugen bei direktangetriebenen Werkzeugspindeln. Auch bei Industrierobotern mit Folgeachsen besteht das Problem, dass die nachgeordneten Motoren mit elektrischer Energie versorgt werden müssen.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der analytischen Untersuchung, der Optimierung, dem Bau und der messtechnischen Überprüfung eines permanentmagneterregten Elektromotors mit integrierter, kontaktloser Energieübertragung vom Ständer auf das Läuferssystem.

Beim bisherigen Stand der Technik werden zur Lösung dieser Probleme entweder Konstruktionen mit galvanischer Kopplung, wie Schleifringe und Schleppkabel oder kontaktlose Methoden, hauptsächlich Ferritübertrager, eingesetzt. Alle diese Methoden haben gemeinsam, dass eine weitere Baugruppe neben dem eigentlichen Antrieb in die Anlage eingebaut werden muss. Dadurch wird zum einen zusätzlicher Bauraum benötigt, zum anderen steigen der Konstruktionsaufwand und die Kosten.

Es ist daher geboten, Möglichkeiten zur integrierten und kontaktlosen Energieübertragung zu untersuchen. Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausgearbeitete Konzept integriert die kontaktlose, induktive Energieübertragung in das Aktivteil des Antriebsmotors. Probleme wie abgenutzte Kohlebürsten oder gebrochene Schleppkabel können so vermieden werden. Bei dem hier vorgestellten Motor handelt es sich um eine permanentmagneterregte Synchronmaschine mit je einer zusätzlichen Drehstromwicklung im Ständer und im Läufer zur Übertragung der elektrischen Energie in das Läuferssystem. Die beiden Funktionen Antrieb und Energieübertragung sind dabei voneinander unabhängig. Das bedeutet, dass beide Funktionen über getrennte Hardware verfügen. Es existieren also zwei Umrichter und zwei Wicklungen, die sich die Nuten von nur einem Aktivteil teilen. Die Unabhängigkeit beider Funktionen wird durch eine geeignete Wahl der

Wicklungsparameter erreicht. Auch die Regelung beider Funktionen ist unabhängig voneinander. Die Funktionen können parallel oder auch einzeln arbeiten. Die getrennte Realisierung der zwei Funktionen erleichtert zum einen die Dimensionierung der Maschine, da jede Funktion in bestimmten Grenzen für sich alleine optimiert werden kann. Außerdem erhöht sich die Betriebssicherheit durch die getrennte Ausführung beider Funktionen.

Summary

A variety of applications wants for electric power on a moving especially rotating part. One example is the power supply of a measurement device on a rotating or moving part. Another example is the supply of energy to clump a tool on a direct driven spindle. Also the subsequent electric machines of multi axis industrial robots have to be powered.

The thesis deals with the analysis, optimization, construction and measurement of a new electric machine with integrated contactless power transmission on the rotor system.

Today's technology uses contact or non-contact solutions. Contact solutions are slip rings and trailing cables. Non-contact solutions are ferrite transducers. These solutions have in common an additional component that has to be attached to the drive housing. Hence, additional construction space is necessary. In addition the complexity and the costs of the system will rise.

Therefore it is reasonable to investigate solutions with integrated non-contact power delivery. With this contribution a concept is elaborated that features a motor with integrated contactless inductive power transmission. Problems like brush wear and broken trailing cables can be overcome. Both functions, drive and energy transmission, are completely independent. The hardware of both functions is separated, which means both functions feature their own hardware. There are two inverters and two windings sharing the same stator slots. Above this, the control of both functions is independent. The two functions may operate at the same time or alternating. Through the separated realization, the design process of the machine is simplified, the optimization of both functions can be done independently within specific limits. Also the operational reliability increases.

The proposed motor is a permanent excited synchronous machine with one additional three-phase winding in the stator and one additional three-phase winding in the rotor for the energy transmission. The independence of both functions is gained by an appropriate choice of the winding parameters.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Konzept der integrierten kontaktlosen Energieübertragung	3
2.1. Anwendungen	3
2.2. Stand der Technik	5
2.3. Entkopplung von Antriebs- und Energieübertragungsfunktion	9
2.4. Mögliche Realisierungsformen der integrierten Energieübertragung	10
2.4.1. Allgemeine Informationen zu möglichen Realisierungen	10
2.4.2. Realisierung der Energieübertragung mit zwei getrennten Ständerwicklungen	10
2.4.3. Realisierung der Energieübertragung mit einem Strom in der d-Achse	15
2.4.4. Realisierung der Energieübertragung unter Ausnutzung subharmonischer Luftspaltfelder	20
2.4.5. Realisierung der Energieübertragung mittels eines Reluktanzmotors	21
2.5. Auswahl des weiter zu untersuchenden Konzepts	22
2.6. Schaltungsoptionen	26
3. Modellbildung und Simulation	29
3.1. Randbedingungen	29
3.2. Motorfunktion	30
3.2.1. Modellbildung der Motorfunktion und Aufbau der Simulation	30
3.2.2. Berechnung der Motorparameter	33
3.2.3. Momentenberechnung	39
3.2.4. Magnetkreisberechnung	40
3.3. Energieübertragungsfunktion	40
3.4. Verluste	45
3.4.1. Allgemeines zu den Verlusten	45
3.4.2. Verlustarten	46

3.4.2.1.	Kupferverluste	46
3.4.2.2.	Eisenverluste	46
3.4.2.3.	Mechanische Verluste	47
3.4.2.4.	Verluste in den Magneten	48
3.4.3.	Verlustmanagement	48
3.4.3.1.	Allgemeines zum Verlustmanagement	48
3.4.3.2.	Feste Aufteilung der zulässigen Verluste	49
3.4.3.3.	Variable Aufteilung der zulässigen Verluste	49
3.4.3.4.	Kurzzeitiger Betrieb einer Funktion	49
3.5.	Läuferspannungsregelung	50
3.5.1.	Allgemeines zur Spannungsregelung	50
3.5.2.	Nachführung der Leerlaufspannung	50
3.5.3.	Regelung der Sekundärspannung ohne Messung der Läufergrößen	52
3.5.4.	Regelung der Sekundärspannung mittels mitrotieren- dem Stellglied	54
4.	Auslegung des Funktionsmusters	57
4.1.	Auslegung und Optimierung eines Funktionsmusters mittels analytischer Ansätze	57
4.1.1.	Auslegung und Optimierung der Motorfunktion	57
4.1.2.	Auslegung und Optimierung der Energieübertragungs- funktion	67
4.2.	Überprüfung der Funktionsmustersauslegung mittels der Me- thode der Finiten Elemente	74
5.	Konstruktion und Bau des Funktionsmusters	81
5.1.	Allgemeines zur Konstruktion	81
5.2.	Kleben der Magnete	84
5.3.	Aufbringen der Bandage	86
6.	Erprobung des Funktionsmusters und Vergleich mit der Simu- lation	91
6.1.	Allgemeines zum Testprogramm	91
6.2.	Messung der Motorfunktion	91
6.2.1.	Bestimmung der Spannungskonstanten	91
6.2.2.	Bestimmung der Drehmomentenkonstanten	96
6.2.3.	Bestimmung der Nutrastmomente	98
6.2.4.	Bestimmung der Drehmoment-Drehzahl- Kennlinien	101
6.3.	Messung der Energieübertragungsfunktion	106

6.4. Gegenseitige Beeinflussung der Funktionen	112
6.5. Vergleich mit handelsüblichen Komponenten	112
7. Zusammenfassung	115
A. Symbolverzeichnis	I
Literaturverzeichnis	VII
Lebenslauf	XI

Abbildungsverzeichnis

2.1. Computertomograph der Firma Siemens	4
2.2. Galettenanordnung zum Führen eines Fadens	4
2.3. Vereinfachte Darstellung eines Ringkerntransformators	6
2.4. Prinzipdarstellung eines U-förmigen Pick-Ups	7
2.5. Schematischer Aufbau der Konzeptvariante auf Basis getrennter Ständerwicklungen sowie permanentmagneterregter Motorfunktion	11
2.6. Erläuterung zur Transformation in ein rotorfestes d-q-Koordinatensystem am Beispiel einer zweipoligen Maschine	17
2.7. Konzept der Energieübertragung mittels eines Stroms in der d-Achse	17
2.8. Schematischer Aufbau der Konzeptvariante auf Basis der d-q-Regelung am Beispiel einer 2p-poligen Maschine	19
2.9. Schematischer Aufbau der Konzeptvariante auf Basis subharmonischer Luftspaltfelder	21
2.10. Drehmoment-Leistungsübertragungs-Kennlinie der Variante auf Basis eines Reluktanzmotors	23
2.11. Aufbau mit zwei Einspeisemrichtern und zwei Spannungszwischenkreisen	26
2.12. Schaltung der Frequenzumrichter mit einem gemeinsamen Spannungszwischenkreis	26
2.13. Schaltung der d-q-Variante	27
3.1. Schematische Darstellung eines permanentmagneterregten AC-Servomotors mit zusätzlicher Energieübertragung	30
3.2. Einsträngiges Ersatzschaltbild der Motorfunktion	30
3.3. Ablaufdiagramm des Berechnungsgangs der Motorfunktion	32
3.4. Bezeichnung der geometrischen Größen bei einem Ständeraktivteil mit parallelfankigen Zähnen	37
3.5. Einsträngiges Ersatzschaltbild der Energieübertragungsfunktion	41
3.6. Schaltbild des Verfahrens der Läufer Spannungsnachführung	52

3.7.	Einsträngiges Ersatzschaltbild zur Herleitung der Spannungsregelung	53
3.8.	Technische Umsetzung der Spannungsregelung	54
3.9.	Mögliche leistungselektronische Elemente auf dem Läufer	55
4.1.	Blechschnitt des Ständeraktivteils	60
4.2.	Blechschnitt des Läuferaktivteils	60
4.3.	Geometrie der Magnetschalen	62
4.4.	S1-Kennlinie bei $z = 15$	64
4.5.	S1-Kennlinie bei $z = 20$	65
4.6.	S1-Kennlinie bei $z = 25$	65
4.7.	M(I)-Kennlinie bei $z = 20$	66
4.8.	Wirkungsgrad der Motorfunktion bei $z = 20$	66
4.9.	Dauerleistung bei $p_E = 1$	69
4.10.	Dauerleistung bei $p_E = 2$	69
4.11.	Maximal übertragbare Leistung bei $p_E = 1$	70
4.12.	Maximal übertragbare Leistung bei $p_E = 2$	71
4.13.	Dauerleistung bei $p_E = 2$ und $f_{1,E} = 150 \text{ V}$	71
4.14.	Wirkleistung über Laststrom in der Simulation	73
4.15.	Läuferspannung über Laststrom in der Simulation	73
4.16.	Primärstrom über Laststrom in der Simulation	74
4.17.	In Maxwell 2D hinterlegte Geometrie	75
4.18.	FEM-Simulation der Nutrastung des ungestaffelten Läufers	76
4.19.	FFT der Nutrastung des ungestaffelten Läufers	76
4.20.	FEM-Simulation der Nutrastung des gestaffelten Läufers	77
4.21.	FFT der Nutrastung des gestaffelten Läufers	78
4.22.	Induktionswerte ohne Stromeinprägung	78
4.23.	Induktionswerte bei 4 A Stromeinprägung in die Energieübertragungsfunktion	79
4.24.	Induktionswerte bei Betrieb beider Funktionen	80
5.1.	Wicklungsschema der achtpoligen Einschicht-Bruchlochwicklung für die Motorfunktion bei getrennten Ständerwicklungen	82
5.2.	Wicklungsschema der vierpoligen Ständerwicklung für die Energieübertragungsfunktion bei getrennten Ständerwicklungen	83
5.3.	Wicklungsschema der vierpoligen Läuferwicklung für die Energieübertragungsfunktion bei getrennten Ständerwicklungen	83
5.4.	Zeichnung der Schablone zum gestaffelten Kleben der Magnete	85
5.5.	Foto der Schablone zum gestaffelten Kleben der Magnete	85

5.6. Fertig beklebter Läufer	86
5.7. Läufer mit Kohlefaserroving	88
5.8. Frisch getränktes Glasfasergewebe	88
5.9. Fertig geschliffener Läufer	89
6.1. Prüfstand für die Bestimmung des Betriebsverhaltens bei höheren Drehzahlen	92
6.2. Prüfstand mit Getriebemotor zur Bestimmung des Betriebsverhaltens bei sehr kleinen Drehzahlen	92
6.3. Gemessene verkettete induzierte Spannungen bei 20 °C	93
6.4. FFT der verketteten induzierten Spannung bei 20 °C	94
6.5. Gemessene verkettete induzierte Spannungen bei 72 °C	95
6.6. FFT der verketteten induzierten Spannung bei 72 °C	95
6.7. Darstellung der Bestimmung des Winkels für DC-Bestromung	97
6.8. Schaltbild des Aufbaus zur Bestimmung der Drehmomentenkonstanten mit DC-Bestromung	97
6.9. M(I)-Kennlinie	99
6.10. Messung der Rastmomente des Funktionsmusters über dem Drehwinkel	100
6.11. FFT der gemessenen Rastmomente	100
6.12. Versuchsaufbau zur Aufnahme der M(n)-Kennlinien	101
6.13. M(n)-Kennlinie bei $\Delta T = 80\text{ K}$ Wicklungserwärmung <i>ohne</i> übertragene Energie bei Selbstkühlung	103
6.14. Wirkungsgrad bei $\Delta T = 80\text{ K}$ Wicklungserwärmung <i>ohne</i> übertragene Energie bei Selbstkühlung	103
6.15. Gemessene M(n)-Kennlinie bei $\Delta T = 60\text{ K}$ Wicklungserwärmung <i>ohne</i> übertragene Energie bei Eigenkühlung	104
6.16. Gemessener Wirkungsgrad bei $\Delta T = 60\text{ K}$ Wicklungserwärmung <i>ohne</i> übertragene Energie bei Eigenkühlung	104
6.17. M(n)-Kennlinie bei $\Delta T = 80\text{ K}$ Wicklungserwärmung <i>mit</i> 100 W in den Läufer übertragener Leistung bei Selbstkühlung	105
6.18. Gemessener Wirkungsgrad bei $\Delta T = 80\text{ K}$ Wicklungserwärmung <i>mit</i> 100 W in den Läufer übertragener Leistung bei Selbstkühlung	106
6.19. Versuchsaufbau zur Vermessung der Energieübertragungsfunktion	108
6.20. Läuferspannung über Laststrom	109
6.21. Wirkleistung über Laststrom	110
6.22. Wirkungsgrad der Energieübertragungsfunktion bei Stillstand	111

6.23. Gemessene Erwärmung bei 300 W übertragener Leistung bei verschiedenen Speisefrequenzen	111
---	-----

Tabellenverzeichnis

2.1. Vergleich von vier möglichen Konzepten	24
4.1. Motorabmessungen und Materialdaten des Funktionsmusters	59
6.1. Drehmomentmesswerte bei DC-Speisung	98
6.2. Ermittelte Werte für die Drehmomentenkonstante	98
A.1. Übersicht über die verwendeten lateinischen Formelzeichen	III
A.2. Übersicht über die verwendeten griechischen Formelzeichen	V
A.3. Übersicht über die verwendeten Indizes	VI