Technische Universität Kaiserslautern
Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme

Entwurf und Optimierung eines permanentmagneterregten Servoantriebs auf Basis des Doppelspulenaktors

Dipl.-Ing. Hayder Al-Khafaji

Geboren in Bagdad

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

Kaiserslautern, 2011

D386

Datum der mündlichen Prüfung: 21.06.2011

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. G. Huth
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. W. Freise
Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. R. Urbansky

Dekan des Fachbereichs: Prof. Dr.-Ing. N. Wehn

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik

Band 4

Hayder Al-Khafaji

Entwurf und Optimierung eines permanentmagneterregten Servoantriebs auf Basis des Doppelspulenaktors

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

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.: Kaiserslautern, TU, 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 978-3-8440-0363-5
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

Kurzfassung

Im Vergleich zu herkömmlichen PM-Synchronmaschinen entfallen bei eisenlosen PM-Synchronmaschinen die parasitären Eiseneffekte. Es entfallen außerdem die nichtlinearen Sättigungseffekte, die mit der Drehzahl deutlich steigenden Eisenverluste sowie die Rastmomente. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der grundsätzlichen Realisierung, dem optimierten Entwurf sowie der experimentellen Untersuchung einer eisenlosen PM-Synchronmaschine auf der Basis des „Doppelspulenaktors“. Die möglichen Konzepte werden zunächst analysiert und modelliert. Ein Simulationsprogramm zur Bestimmung des stationären Betriebsverhaltens wird basierend auf einem analytischen Berechnungsalgorithmus erstellt. Ein optimiertes Funktionsmuster wird als Doppelspulen-Servomotor gebaut und experimentell erprobt. Die Simulations- und Messergebnisse des Funktionsmusters werden im direkten Vergleich diskutiert. Ein Vergleich des Doppelspulen-Servomotors mit aktuellen eisenbehafteten PM Servomotoren rundet die Arbeit ab.

Abstract

The ironless PM-machines show in general a drop in the iron interference effects in comparison with conventional iron core PM-machines. This is attributed due to saturation effects, increase in the iron losses with increase of the motor speed as well as cogging torque. The present research includes investigation and study on the realization of an ironless PM-synchronous machine designed on the principle of the Double Coil Actuator. The steady state performance of the machine was analyzed in the next step to depict the possible concepts of this machine. A calculation model of a simulation program was written and utilized in the determination of the performance of a functional model of an ironless PM-synchronous machine. This functional model was built and operated as Double Coil Servo Motor. The model was optimized in order to reduce higher harmonics and ripple torque. The simulation and actual measurement results of the functional model are presented and compared. Finally a comparison between the Double Coil Servo Motor and the current iron core products are discussed.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Stand der Technik ... 1

2 Prinzip und Anwendung des Doppelspulenaktors ... 4

2.1 Grundprinzip des Tauchspulenaktors ... 4

2.2 Aufbau und Funktionsweise des Doppelspulenaktors ... 6

2.3 Ausführung der 3-strängigen Maschine ... 8

3 Modellierung ... 13

3.1 Modell zur Bestimmung des Betriebsverhaltens ... 13

3.1.1 Berechnung der elektromagnetischen Kraft ... 13

3.1.2 Berechnung der induzierten Spannung ... 18

3.1.3 Berechnung des Spulenwiderstandes ... 20

3.1.4 Berechnung der Spulenselbstinduktivität ... 21

3.2 Thermisches Modell ... 23

4 Stationäres Betriebsverhalten ... 28

4.1 Magnetische Feldberechnung ... 28

4.2 Induzierte Spannung ... 30

4.3 Drehmomentbildung ... 31

4.4 Drehmomentwelligkeit ... 33

4.5 Stromverlauf ... 37

4.6 M(n)-Kennlinienfeld ... 40

5 Optimierung des Funktionsmusters ... 44

5.1 Randbedingung für das Funktionsmuster ... 44

5.2 Optimierung des Oberschwingungsverhaltens ... 44

5.3 Optimierung der Drahtstärke ... 46

5.4 Optimierung von Spulenseiten- und Magnetlänge ... 48

5.5 Ausführung des Funktionsmusters ... 50

5.5.1 Doppelspulen-Servomotor ausgeführt mit drei Einzelstrangmodulen ... 50

5.5.2 Darstellung der Motorkomponenten ... 52

6 Simulation und Erprobung des Funktionsmusters ... 58

6.1 Wicklungsausführung des Funktionsmusters ... 58

6.2 Induzierte Spannungen ... 59

6.3 Drehmomentbildung ... 62

6.4 Drehmomentwelligkeit ... 65

6.5 Stromwelligkeit ... 68

6.6 M(n)-Kennlinienfeld 70
6.6.1 S1-Kennlinie 71
6.6.2 S3-Kennlinie 80
7 Doppelspulen-Servomotor als Dreistrangmodul 83
7.1 Abgeleitetes Funktionsmuster als Dreistrangmodul 83
7.2 Erprobung des Dreistrangmodul-Funktionsmusters 85
8 Vergleich des Doppelspulen-Servomotors mit aktuellen Produkten 87
9 Zusammenfassung 94
Anhang A Technische Daten i
Anhang B Formelzeichenverzeichnis iii
Literaturangabe v

Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1: Longitudinalfluß-Anordnung 2
Bild 1.2: Transversalfluß-Anordnung 2
Bild 1.3: Querschnitt eines AC-Servomotors 3
Bild 2.1: Anwendung eines Tauchspulenaktors bei 4
Bild 2.2: Prinzipanordnung des Tauchspulenaktors 5
Bild 2.3: Kraftwirkung am Tauchspulenaktor 6
Bild 2.4: Doppelspule von verschiedenen Ansichten 6
Bild 2.5: Doppelspule, ... 7
Bild 2.6: Grundprinzip des Doppelspulenaktors 8
Bild 2.7: 3-strängiger Doppelspulen-Servomotor a) drei Einzelstrangmodule 9
Bild 2.8 Zonenplan einer Zweischicht-Ganzlochwicklung über zwei Polteilungen 10
Bild 2.9: Anordnung der drei Strangmodule bei Versatz der Rotorscheiben 10
Bild 2.10: Überlappte Anordnung der drei Stränge 11
Bild 2.11: Ableitung des Dreistrangmoduls von einer Einschicht-Zahnspulenwicklung 12
Bild 2.12: Unsymmetrisches Dreistrangmodul am Beispiel 2p=6 12
Bild 3.1: Modellierung von Doppelspulenseite und Dauermagnet 14
Bild 3.2: Koordinatengrößen zur Beschreibung der Kraftwirkung 14
Bild 3.3: Koaxiale Anordnung eines Spulen-Kreisstromes 17
Bild 3.4: Modellierung von Doppelspulenseite und Dauermagnet 19
Bild 3.5: Skizzen einer Doppelspule 21
Bild 3.6: Korrekturfaktor für eine kurze einlagige Zylinderspule 22
Bild 3.7: Algorithmus des thermischen Modells 27
Bild 4.1: Radialkomponente der Induktion eines zylinderförmigen Dauermagneten am Beispiel des in Kapitel 5 ausgelegten Doppelspulen-Servomotors 28
Bild 4.2: Radialkomponente der Induktion von vier zylinderförmigen Dauermagneten am Beispiel des in Kapitel 5 ausgelegten Doppelspulen-Servomotors im Achsenabstand ρ=11mm 29
Bild 4.3: Doppelspulenaktor mit benachbarten Magneten 30
Bild 4.4: links: Verlauf der induzierten Strangspannung 31
Bild 4.5: links: Verlauf des inneren Drehmoments eines Strangmoduls 32
Bild 4.6: a) Ersatzschaltbild von Strangmodul A 34
Bild 4.7: Grundschwingung (f_1) und dominante Oberschwingungsspannungen in Abhängigkeit des Modulationsgrades A bei einer Zwischenkreisspannung von U_Z=575V 38
Bild 4.8: Einsträngiges Ersatzschaltbild 39
Bild 4.9: Exemplarische Darstellung des Stromverlaufs $i_A(t)$ und Stromspektrum des in Kapitel 5 betrachteten Mustermotors im Betriebspunkt n=800U/min., I_A=2,4A, A=0,923 39
Bild 4.10: M(n)-Kennlinie eines typischen permanentmagneterregten AC-Servoantriebs 40
Bild 4.11: Luftwiderstände eines zylindrischen Körpers 42
Bild 4.12: Prinzipieller Wirkleistungsfluss des Doppelspulen-Servomotors 43
Bild 5.1: Abhängigkeit der 5. und 7. Harmonischen der induzierten Spannung von den Parametern Spulenseiten- und Magnetlänge bezogen auf die Grundschwingungsspannung 45
Bild 5.2: Summenwirkung der 5. und 7. Harmonischen bezogen auf die Grundschwingung in Abhängigkeit der Parameter Spulenseitenlänge und Magnetlänge 46
Bild 5.3: Abmessung einer Doppelspulenseite 47
Bild 5.4: S1-Drehmoment (60K) für verschiedene Drahtradien 48
Bild 5.5: Wirkungsgrad entlang der S1-Kennlinie für verschiedene Drahtradien 48
Bild 5.6: Darstellung der „Talkurve“ von Bild 5.2 für 49
Bild 5.7: S1-Drehmoment (60K) in Abhängigkeit von Spulenseitenlänge 49
Bild 5.8: S1-Wirkungsgrad (60K) in Abhängigkeit von Spulenseitenlänge 50

Bild 5.9: Anordnung der drei Einzelstrangmodule 51
Bild 5.10: Rotorscheibe (Hauptmaße in mm) 52
Bild 5.11: Rotorscheibe mit abmontierbaren Segmenten..... 53
Bild 5.12: keilförmige Magnetscheibe (alle Maße in mm) 53
Bild 5.13: Mit Magneten bestückte Rotorscheibe 54
Bild 5.14: Herstellung einer Doppelspule 54
Bild 5.15: Ausgeformte Doppelspule mit Montageschuhen 55
Bild 5.16: Ständeraufbau des Funktionsmusters mit massiven Flanschen und massiver Grundplatte 55
Bild 5.17: optimierter Ständeraufbau 56
Bild 5.18: Doppelspulen-Servomotor mit drei Modulen 57
Bild 6.1: Schaltung der Doppelspulen pro Strangmodul..... 59
Bild 6.2: Zeitverlauf der induzierten Strangspannung 60
Bild 6.3: Frequenzanalyse der induzierten Strangspannung 60
Bild 6.4: Die induzierte Spannung über der Drehzahl 61
Bild 6.5: Der 3-phasige induzierte Spannungsverlauf 62
Bild 6.6: Schematischer Messaufbau für die Drehmomentbestimmung..... 63
Bild 6.7: Drehmoment eines Strangmoduls bei DC-Speisung von 0,6A in Abhängigkeit des Drehwinkels 63
Bild 6.8: Fourieranalyse des Drehmomentverlaufs a) Messung b) Simulation 64
Bild 6.9: verkettetes Drehmoment a) Zeitverlauf b) Fourieranalyse 65
Bild 6.10: Messaufbau zur Bestimmung der Drehmomentwelligkeit..... 66
Bild 6.11: Messergebnis für 0,2A Stromregelung..... 67
Bild 6.12: Messergebnis für 1,15A Stromregelung..... 68
Bild 6.13 links: Verlauf, rechts: Spektrum..... 69
Bild 6.14: Übersicht des Versuchsaufbaus..... 71
Bild 6.15: S1-Kennlinien des Funktionsmusters für 60K Wicklungsübertemperatur und Reihenschaltung (a=1)..... 72
Bild 6.16: Wirkungsgrad des Funktionsmusters bei 60K Wicklungsübertemperatur..... 73
Bild 6.17: Gemessene Verlustaufteilung entlang der S1-Kennlinie 74
Bild 6.18: M(I)-Kennlinie des Funktionsmusters (60K)..... 75
Bild 6.19: Gemessene Leistungen entlang der S1-Kennlinie (60K) 76
Bild 6.20: S1-Kennlinien (60K) des Funktionsmusters bei unterschiedlicher Spulenschaltung 77
Bild 6.21: Wirkungsgrad des Funktionsmusters bei 60K Wicklungsübertemperatur..... 77
Bild 6.22: S1-Kennlinien des Funktionsmusters für unterschiedliche Wicklungsübertemperturen 78
Bild 6.23: Kupferverluste des Doppelspule-Servomotors für unterschiedliche Übertemperaturen..... 79
Bild 6.24: Wirkungsgrad des Funktionsmusters für unterschiedliche Wicklungsübertemperaturen 79
Bild 6.25: Schematischer Messaufbau zur Bestimmung der S3-Kennlinie 80
Bild 6.26: S1- und S3 40%-Kennlinien des Funktionsmusters für $\Delta\vartheta_W$=60K..... 81
Bild 6.27: Drehzahlspiel für den S3 40%-Betrieb des Funktionsmusters..... 81
Bild 6.28: Drehmomentverlauf für S3-Betrieb des Funktionsmusters bei 800U/min..... 82
Bild 7.1: Phasenaufteilung des Funktionsmusters auf der Basis eines Einzelmoduls 83
Bild 7.2: Anordnung der Magnete und Doppelspulen beim 84
Bild 7.3: Vergleich der S1-Kennlinien zwischen 1-Modul und 3-Modul Aufbau der Funktionsmuster bei 60K Übertemperatur..... 85
Bild 7.4: Gemessener Wirkungsgrad des Dreistrangmodul-Funktionsmusters für die S1-Kennlinie bei 60K Übertemperatur 86

Bild 8.1: Funktionsmuster mit drei Einstrangmodulen 87
Bild 8.2: Stillstandsmoment in Abhängigkeit des gesamten Motorgewichtes 89
Bild 8.3: Bemessungsdrehmoment bei n_N=2000Upm in Abhängigkeit des gesamten Motorgewichtes 90
Bild 8.4: Stillstandsmoment in Abhängigkeit der Aktivteilmasse für den Doppelspulen-Servomotor sowie für klassische PM-Motoren 90
Bild 8.5: Stillstandsmoment in Abhängigkeit der Seltenerdmagnetmasse für das Funktionsmuster sowie für klassische PM-Motoren 91
Bild 8.6: Linearmotor auf Basis des Doppelspulenprinzips 92
Bild 8.7: Rastkraftfreier Linearmotor 92