

Redundanzkonzepte
für
Geschaltete Reluktanzantriebe

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. Andreas Schramm

der Bundeswehr
Universität  *München*

Neubiberg

2006

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Klaus Landes
erster Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling
zweiter Berichterstatter: Prof. DI Dr. sc. techn. Wolfgang Amrhein
Tag der Promotion: 06.06.2006

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 1

Andreas Schramm

**Redundanzkonzepte für
Geschaltete Reluktanzantriebe**

Shaker Verlag
Aachen 2006

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2006

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

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5260-6

ISBN-13: 978-3-8322-5260-1

ISSN 1863-0707

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling danke ich für seine jederzeit uneingeschränkte Unterstützung meiner Arbeit, für seine stete Diskussionsbereitschaft, wertvollen Anregungen und die äußerst interessante Gestaltung meiner recht kurzen Promotionszeit. Besonderer Dank gebührt ihm für sein Verständnis für die Belange eines Berufsoffiziers und seine zielgerichtete, rasche und unkomplizierte Abwicklung der Promotion.

Für die Mitberichterstattung und die damit verbundene intensive Durchsicht der Arbeit danke ich Herrn Prof. DI Dr. sc. techn. Wolfgang Amrhein von der Johannes Kepler Universität, Linz.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Landes danke ich ganz herzlich für seine Bereitschaft, den Vorsitz des Promotionsausschusses zu übernehmen. Er hat mich damit von Beginn meiner akademischen Laufbahn an – von der ersten Vorlesung bis heute – begleitet.

Besonderer Dank gilt auch meinen Kollegen Dr.-Ing. Hans-Joachim Köbler, ohne dessen Fürsprache sich die Möglichkeit zur Promotion hier am Institut für mich nicht ergeben hätte, und Dr.-Ing. Harald Hofmann, für seine zahlreichen praktischen Tipps und die Zählung meines Rechners.

Meinen Eltern danke ich dafür, mich ermutigt zu haben, diesen beruflichen Weg einzuschlagen und für die Schaffung der Voraussetzungen für meinen bisherigen Werdegang.

Meiner Frau danke ich für ihre Liebe und Unterstützung, ihr Verständnis und das Lektorat dieser Arbeit.

Andreas Schramm

| | | |
|----------------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 9 |
| Teil I | | 13 |
| 2 | Grundlagen Geschalteter Reluktanzmaschinen | 15 |
| 2.1 | Funktionsprinzip | 15 |
| 2.2 | Mathematische Modelle Geschalteter Reluktanzmaschinen | 20 |
| 2.2.1 | Allgemeines Modell | 23 |
| 2.2.2 | Lineares Modell | 25 |
| 2.3 | Drehmomentbildung | 27 |
| 2.4 | Statische Drehmomente | 29 |
| 2.5 | Betriebsarten | 32 |
| 2.5.1 | Gepulster Betrieb | 33 |
| 2.5.2 | Blockbetrieb | 38 |
| Teil II | | 41 |
| 3 | Das Magnetfeld im Stirnraum ungesättigter elektrischer Maschinen | 43 |
| 3.1 | Einführung | 43 |
| 3.2 | Luftspaltstreuung | 43 |
| 3.2.1 | Generelle Bemerkungen | 43 |
| 3.2.2 | Ermittlung der Feldliniengeometrie mittels Konformer Abbildung | 44 |
| 3.2.3 | Überprüfung der Ergebnisse mit FEM | 47 |
| 3.2.4 | Detaillierter Vergleich der Berechnungsmethoden | 48 |
| 3.3 | Wickelkopffeld | 51 |
| 3.4 | Resultierendes Magnetfeld im Stirnraum | 53 |
| 3.5 | Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Messungen | 54 |
| 3.6 | Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Literaturfunden | 56 |
| 3.7 | Folgerungen | 60 |
| 4 | Berechnung der Wickelkopfinduktivität bei beliebiger Rotorposition | 61 |
| 4.1 | Einführung | 61 |
| 4.2 | Beitrag der Luftspaltstreuung zur Wickelkopfinduktivität | 61 |
| 4.2.1 | Vorbemerkung | 61 |
| 4.2.2 | Koordinatensystem | 64 |
| 4.2.3 | Modellierung des Magnetfeldes für beliebige Rotorpositionen | 65 |
| 4.2.3.1 | d-Stellung | 65 |
| 4.2.3.2 | Rotorpositionen mit teilweise überlappenden Zähnen | 66 |
| 4.2.3.3 | Rotorpositionen ohne Überlappung der Zähne, q-Stellung | 67 |
| 4.2.4 | Berechnung des Streufeldes | 69 |
| 4.2.4.1 | Rotorpositionen mit überlappenden Zähnen | 69 |
| 4.2.4.2 | Rotorpositionen mit nicht überlappenden Zähnen | 71 |
| 4.2.5 | Berechnung des resultierenden Beitrags zur Wickelkopfinduktivität | 79 |
| 4.3 | Berechnung des Beitrags des Wickelkopffeldes zur Wickelkopfinduktivität | 80 |
| 4.3.1 | Vorbemerkung | 80 |
| 4.3.2 | Modell des Wickelkopfes | 80 |
| 4.3.3 | Berechnungsmethode | 83 |
| 4.3.4 | Lösung des Neumannintegrals für zwei sich nicht schneidende Stromfäden im dreidimensionalen Raum | 85 |
| 4.4 | Ergebnisse | 87 |
| 4.5 | Folgerungen | 91 |

| | |
|---|------------|
| Teil III | 93 |
| 5 Vermeidung von Netzrückwirkungen bei Geschalteten Reluktanzantrieben | 95 |
| 5.1 Aufbau des elektromechanischen Aktuators (EMA) | 95 |
| 5.2 Simulation des Aktuators am elektrischen Bordnetz | 98 |
| 5.2.1 Simulationsergebnisse und Problemstellung | 99 |
| 5.3 Möglichkeiten der Problemlösung | 101 |
| 5.3.1 Änderung der Ansteuerung (Optimierung der Schaltwinkel) | 101 |
| 5.3.2 Modifikation der Spindelübersetzung | 103 |
| 5.3.3 Änderung des mechanischen Aufbaus der Reluktanzmaschine | 108 |
| 5.3.3.1 Verminderung des Luftspalts | 108 |
| 5.3.3.2 Variation der Rotorzahnbreite | 110 |
| 5.3.4 Modifikation der Leistungselektronik | 115 |
| 5.3.5 Modifikation der Regelung | 116 |
| 5.4 Folgerungen | 118 |
| 6 Analytische Untersuchung zweier verschiedener Fehlerredundanz aufweisender Topologien Geschalteter Reluktanzmaschinen | 119 |
| 6.1 Einführung | 120 |
| 6.2 Berechnung der Variante 1: 6/4-Konfiguration | 122 |
| 6.2.1 Betrachtung des Drehmoments der Maschine | 122 |
| 6.2.2 Betrachtung der Verluste der Maschine | 127 |
| 6.2.3 Parametrische Optimierung | 134 |
| 6.2.4 Betrachtung der Klemmenspannung | 139 |
| 6.2.5 Ergebnisse | 139 |
| 6.3 Berechnung der Variante 2: 12/8-Konfiguration | 142 |
| 6.3.1 Berechnung und parametrische Optimierung analog zu Variante 1 | 142 |
| 6.3.2 Ergebnisse | 149 |
| 6.4 Vergleich von Variante 1 (6/4-Konfiguration) und Variante 2 (12/8-Konfiguration) | 152 |
| 7 Bewertung von alternativen, fehlertoleranten Reluktanzantrieben für einen Elektromechanischen Aktuator | 157 |
| 7.1 Überblick | 158 |
| 7.1.1 Summation von Drehzahlen (speed summing) | 159 |
| 7.1.2 Summation von Drehmomenten (torque summing) | 160 |
| 7.1.3 Dual-Coil-Prinzip | 161 |
| 7.1.4 Einkanaliger Aufbau, bedingte Redundanz | 162 |
| 7.2 Auswahl eines Maschinentyps | 163 |
| 7.3 Reluktanzmaschinen zum Antrieb des EMA | 164 |
| 7.3.1 Torque Summing mit zwei baugleichen Motoren auf einer Welle | 166 |
| 7.3.2 Dual-Coil-Prinzip | 171 |
| 7.3.3 Einkanaliger Aufbau, bedingte Redundanz | 174 |
| 7.4 Folgerungen | 177 |
| Teil IV | 179 |
| 8 Elektrische Antriebstechnik für die 270V_{DC}-Spannungsebene – Permanentmagnetmaschine vs. Geschaltete Reluktanzmaschine | 181 |
| 8.1 Mögliche Fehler an drehenden elektrischen Maschinen mit konzentrierten Wicklungen | 182 |
| 8.1.1 Wicklungsfehler bei PM-Maschinen | 182 |
| 8.1.2 Wicklungsfehler bei Geschalteten Reluktanzmaschinen | 188 |

| | |
|--|------------|
| 8.2 Überblick über verschiedene Bauformen von PM- und Geschalteten Reluktanzmaschinen | 193 |
| 8.2.1 Permanentmagneterregte Maschinen | 193 |
| 8.2.1.1 Strangzahl | 193 |
| 8.2.1.2 Bestromungsform – AC vs. DC | 194 |
| 8.2.1.3 Wicklungstyp – verteilte Wicklung vs. konzentrierte Wicklung | 195 |
| 8.2.1.4 Magnettyp – Ferrit, SmCo, NdFeB, AlNiCo | 197 |
| 8.2.1.5 Magnetaanordnung – Oberflächenmagnete vs. vergrabene Magnete | 199 |
| 8.2.2 Geschaltete Reluktanzmaschine | 201 |
| 8.2.2.1 Polzahl | 201 |
| 8.2.2.2 Strangzahl | 202 |
| 8.2.2.3 Wicklungstyp – Einzelzahnwicklung, Durchmesserwicklung, Jochwicklung | 203 |
| 8.2.2.4 Zahnform | 206 |
| 8.3 Fallstudien | 208 |
| 8.3.1 Auswahl der Maschinenbauform | 209 |
| 8.3.1.1 PM-Maschinen | 209 |
| 8.3.1.2 Reluktanzmaschinen | 210 |
| 8.3.2 Auslegungssoftware | 211 |
| 8.3.3 Auslegungsergebnisse und Vergleich | 211 |
| 8.3.3.1 Applikation 1: Kraftstoffpumpe | 212 |
| 8.3.3.2 Applikation 2: Elektromechanischer Stellantrieb (EMA) | 214 |
| 8.3.3.3 Applikation 3: Startergenerator | 216 |
| 8.3.4 Bewertung der Fallstudien | 218 |
| 8.4 Heutige und künftige Technologien im Bereich elektrischer Antriebe | 221 |
| 8.4.1 Steuerungs- und Leistungselektronik | 221 |
| 8.4.2 Stromrichtertopologien | 224 |
| 8.4.3 Leistungsgrenzen und Kühlkonzepte | 228 |
| 8.4.4 Elektromagnetische Verträglichkeit | 229 |
| 8.4.5 Folgerungen | 230 |
| 9 Zusammenfassung | 231 |
| Literaturverzeichnis | 233 |
| Formelzeichen und Abkürzungen | 239 |
| Lebenslauf | 243 |