

Thomas Hubert

Synchron-Reluktanzmaschine als dynamischer elektrischer Antrieb ohne Seltene Erden

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fachgebiet Energiewandlungstechnik

**Synchron-Reluktanzmaschine als dynamischer
elektrischer Antrieb ohne Seltene Erden**

Thomas Hubert

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog
2. Prof. Dr.-Ing. Andreas Kremser

Die Dissertation wurde am 01.03.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 08.09.2020 angenommen.

Berichte aus der Elektrotechnik

Thomas Hubert

**Synchron-Reluktanzmaschine als dynamischer
elektrischer Antrieb ohne Seltene Erden**

Shaker Verlag
Düren 2021

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, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7892-3

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

Die vorliegende Forschungsarbeit *Synchron-Reluktanzmaschine als dynamischer elektrischer Antrieb ohne Seltene Erden* entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Hochschule Nürnberg. Diese konnte ich nur durch die vielseitige und tatkräftige Unterstützung aus dem privaten und beruflichen Umfeld erfolgreich abschließen wofür ich mich bei allen Beteiligten herzlich bedanke.

Es ist mir ein ausdrückliches Anliegen, mich an dieser Stelle bei allen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen sowie der Leitung des Instituts für leistungselektronische Systeme, insbesondere bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Armin Dietz, für die sehr angenehme und immer kollegiale Arbeitsatmosphäre zu bedanken. Es soll nicht unerwähnt bleiben wie wichtig der offene und konstruktive Umgang und Austausch am Institut, besonders mit den HerreSc. Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Hörlin, M.Sc. Philipp Löhdefink und M.Eng. Michael Reinlein, für meine Forschung und meinen weiteren beruflichen Lebensweg waren.

Mein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog vom Fachgebiet Energiewandlungstechnik an der Technischen Universität München für die wissenschaftliche Betreuung der vorliegenden Arbeit, den konstruktiven und hoch geschätzten fachlichen Austausch der ein effektives und zielgerichtetes wissenschaftliches Arbeiten möglich gemacht hat, sowie sein entgegengebrachtes Vertrauen.

Ganz besonders danken möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Kremser für seine mitreißende Begeisterung gegenüber der Berechnung rotierender elektrischer Maschinen. Die vielen wertvollen Hinweise, Anregungen und Diskussionen während, aber auch abseits der eigentlichen wissenschaftlichen Arbeit, haben entscheidend zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Große Freude hat mir zudem das Arbeiten mit den Studierenden, sei es in Lehrveranstaltungen oder bei der Betreuung von Projekt- und Abschlussarbeiten bereitet. Im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten haben M.Sc. Richard Steckel, M.Sc. Tobias Gerlach und B.Eng. Stefan Schwarz wertvolle Beiträge zur vorliegenden Arbeit geleistet.

Der abschließende, gesonderte Dank sei meiner Familie und insbesondere meinen drei Geschwistern gewidmet. Sie haben mich in dieser Phase immer unterstützt und den Weg zu dieser Veröffentlichung vorbereitet.

Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation und Zielsetzung	1
1.2	Allgemeine Anforderungen und Kenngrößen elektrischer Maschinen	3
1.3	Einfache Abschätzung der Leistungsfähigkeit.....	9
1.3.1	Wirkungsgrad.....	9
1.3.2	Ausnutzung.....	10
1.3.3	Gewicht und Massenträgheit	14
2	Grundlagen zu Synchron-Reluktanzmaschinen.....	15
2.1	Systemgleichungen.....	15
2.1.1	Lineares Grundwellenmodell	18
2.1.2	Nichtlineares Grundwellenmodell mit Querkopplung	19
2.1.3	Berücksichtigung der Eisenverluste	24
2.1.4	Oberschwingungsersatzschaltbild	26
2.2	Feldorientierter Betrieb	27
2.2.1	Regelungsstruktur.....	27
2.2.2	Maximales Drehmoment pro Ampere.....	29
2.2.3	Maximales Drehmoment pro Spannung	30
2.2.4	Maximaler Leistungsfaktor.....	30
2.3	Auslegungskriterien	32
2.3.1	Grundlegende Rotorstrukturen	32
2.3.2	Flussbarrieren	33
2.3.3	Eisensegmente	37
2.3.4	Luft-Eisen-Verhältnis	39
2.3.5	Luftspaltdurchmesser	39
2.3.6	Geometrische Luftspalllänge	40
3	Elektromagnetische Modellierung	43
3.1	Kommutierungskurve	43
3.2	Eindimensionale Magnetkreisrechnung	44
3.2.1	Voraussetzungen und Vereinfachungen	45
3.2.2	Berechnung des magnetischen Kreises	46
3.2.3	Feld- und drehmomentbildende Stromkomponente	53
3.2.4	Hauptinduktivität	53
3.3	Magnetkreisrechnung auf Basis von nichtlinearen Reluktanznetzwerken	55
3.3.1	Modellierung als magnetische Netzwerke	55
3.3.2	Lösungsverfahren	58
3.3.3	Kopplung der Netzwerke	65
3.3.4	Vergleich zur Simulation	68
3.4	Verlustberechnung	71
3.4.1	Stromwärmeverluste	73
3.4.2	Ummagnetisierungsverluste	74
3.4.3	Reibverluste	79
3.5	Ergänzende Berechnungen zu den Ersatzschaltbildgrößen	80
3.5.1	Spulenkopflänge	80
3.5.2	Ständerstrangwiderstand.....	80
3.5.3	Streuinduktivitäten	81
3.5.4	Eisenfüllfaktor	84
3.6	Numerische Berechnung	84

3.6.1	Finite-Elemente-Methode und elektromagnetische Feldtheorie.....	85
3.6.2	Modellierung in Maxwell 2D.....	86
3.6.3	Verluste.....	88
4	Funktionsmusterentwurf.....	91
4.1	Randbedingungen.....	91
4.1.1	Anforderungen.....	91
4.1.2	Muster 0: Basismaschine.....	92
4.2	Festlegung der Polpaarzahl und des Statorinnendurchmessers.....	93
4.3	Optimierung des Statorblechschnitts und Wicklungsauslegung.....	97
4.3.1	Optimierung mittels Genetischer Algorithmen.....	97
4.3.2	Berechnungsergebnisse.....	102
4.4	Auslegung des Rotorblechschnitts.....	106
4.4.1	Position und Anzahl der Flussbarrieren.....	106
4.4.2	Luftspaltbreite.....	110
4.4.3	Stegbreiten.....	110
4.5	Festlegung der Rotorschrägung bzw. -staffelung.....	114
4.6	Daten der Funktionsmuster.....	118
4.6.1	Muster 1: Einfacher Maschinenentwurf.....	120
4.6.2	Muster 2: Optimierter Maschinenentwurf (M330-50A).....	121
4.6.3	Muster 3: Optimierter Maschinenentwurf (M270-35A).....	122
5	Messtechnische Untersuchungen.....	123
5.1	Ringmagnetisierungsmessung.....	123
5.1.1	Messaufbau.....	123
5.1.2	Magnetisierungsverhalten.....	126
5.1.3	Ummagnetisierungsverluste.....	127
5.2	Induktivitätsmessung.....	129
5.2.1	Messprinzip.....	129
5.2.2	Absolute Induktivität.....	130
5.2.3	Vergleich zur Simulation.....	131
5.2.4	Differentielle Induktivität.....	132
5.3	Messung am Motorenprüfstand.....	133
5.3.1	Prüfstands Aufbau.....	133
5.3.2	Stationäre Betriebskennlinien.....	134
5.3.3	Verluste und Wirkungsgrad.....	141
5.3.4	Umrichterbedingte Zusatzverluste.....	145
5.3.5	Vergleich zur Simulation.....	149
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	155
	Anhang.....	159
	Formel- und Abkürzungsverzeichnis.....	173
	Literaturverzeichnis.....	185