

Technische Universität Kaiserslautern
Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme

Entwurf und Optimierung von hochoberigen permanentmagneterregten Synchronmotoren in SMC-Technologie

Dipl.-Ing. Bernd Löhlein
geboren in Annweiler am Trifels

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

Kaiserslautern, 2012

D 386

Datum der mündlichen Prüfung: 24.05.2012

1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Matthias Nienhaus
Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow

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

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik

Band 6

Bernd Löhlein

**Entwurf und Optimierung von hochtourigen
permanentmagneterregten Synchronmotoren
in SMC-Technologie**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Aachen 2012

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., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1412-9

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

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Symbole und Abkürzungen	V
1. Einleitung	1
2. Materialien für PM AC-Servomotoren und PM-Spindeln	5
2.1. Klassifizierung der magnetischen Stoffe	5
2.1.1. Ferri- und ferromagnetische Stoffe	8
2.1.1.1. Hartmagnetische Werkstoffe	12
2.1.1.2. Weichmagnetische Werkstoffe	14
2.2. Verlustbetrachtung	15
2.2.1. Einteilung der Verluste	15
2.2.1.1. Hystereseverluste	17
2.2.1.2. Wirbelstromverluste	19
2.3. Anforderungen an den ferromagnetischen Werkstoff	22
2.4. Weichmagnetische Materialien	23
2.4.1. Elektrolech	25
2.4.2. Weichmagnetische Sintermaterialien	27
2.4.3. Metallpulverspritzgießen	28
2.4.4. Weichmagnetische Kompositmaterialien (SMC)	31
2.4.4.1. Somaloy Prototyping Material (SPM)	37
2.4.5. Weichmagnetische kunststoffgespritzte Materialien	38
2.4.6. Amorphe nichtkristalline und amorphe, nanokristalline Legierungen	40
2.5. Experimentelle Bestimmung der Werkstoffdaten	43
2.5.1. Messung der B(H)-Kurven	48
2.5.1.1. Messprinzip DC-Messung	48
2.5.1.2. Messergebnisse DC-Messung	48
2.5.1.3. Zusammenfassung und Beurteilung der DC-Messergebnisse	56
2.5.2. Bestimmung der Eisenverluste	58
2.5.2.1. Messprinzip AC-Messung	58
2.5.2.2. Messergebnisse AC-Messung	59

2.5.2.3.	Zusammenfassung und Beurteilung der AC-Messergebnisse	64
3.	Konzepte für hochtourige PM-Synchronmotoren	68
3.1.	AC-Servomotor mit Blechpaket	69
3.2.	Motorkonzepte aus Pulververbundwerkstoffen	72
3.2.1.	Konzept A: Aufrollständer	74
3.2.2.	Konzept B: Rohrkonzept mit Luftspaltwicklung	77
3.2.3.	Konzept C: Blisterständer	82
3.2.3.1.	Konzeptvariante C1: Blister-Faltständer	83
3.2.3.2.	Konzeptvariante C2: Modularer Blisterständer	84
3.2.3.3.	Konzeptvariante C3: Steckbarer, modularer Blisterständer	86
4.	Modellierung und Simulation	92
4.1.	Analytisches Modell	94
4.1.1.	Elektromagnetische Modellierung	95
4.1.2.	Elektrisches Ersatzschaltbild	96
4.1.3.	Wicklungssystem	97
4.1.3.1.	Berechnung der Größen für das elektrische Ersatzschaltbild	101
4.1.4.	Thermische Modellierung	120
4.1.5.	Simulationsprogramm und -algorithmus	126
4.2.	Numerisches Modell	137
5.	Entwurf der Funktionsmuster und Musterbau	143
5.1.	Festgelegte Konzepte und Werkstoffe	143
5.1.1.	Statorkonzepte und Werkstoffe	144
5.1.2.	Rotorkonzepte und Werkstoffe	148
5.2.	Auslegungsrandbedingungen und Anforderungsprofil	152
5.3.	Parameterstudien	155
5.4.	Optimierte Funktionsmustersauslegung	161
5.5.	Funktionsmusterbau	162
5.5.1.	Stator I und III	163
5.5.2.	Stator II, IV und V	171
5.5.3.	Rotorvariante R 1	173
5.5.4.	Rotorvariante R 2	174
5.5.5.	Lager und Gehäuse	178

6. Versuchsaufbau für die technische Erprobung	181
6.1. Zielsetzung der technischen Erprobung	181
6.2. Versuchsaufbau	182
6.2.1. Prüfstand mit Lastmaschine und Prüfling für den S1-Betrieb	183
6.2.2. Messaufbau für den generatorischen Betrieb	190
6.2.3. Frequenzumrichter und Regelung	192
6.2.3.1. Anforderungen	193
6.2.3.2. Entwicklungskonzept und Auswahl der Kom- ponenten	195
6.2.3.3. Erfassung der Rotorlage	209
6.2.4. Leistungsmessung und Wirkungsgradbestimmung .	214
7. Vergleich der Funktionsmuster mit der Simulation	218
7.1. Gleichstrommessung zur Bestimmung der Strangwiderstände	218
7.2. Generatorischer Betrieb	219
7.3. Motorischer Betrieb	223
7.3.1. Drehmoment im Bemessungspunkt	223
7.3.2. Wirkungsgrad im Bemessungspunkt	225
8. Zusammenfassung und Ausblick	228
A. Anhang	232
A.1. Präparation und Herstellung der Ringproben	233
A.2. Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Kennwerte .	234
A.2.1. Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Kenn- werte	234
A.2.2. Verfahren zur Bestimmung der Eisenverluste	237
Literaturverzeichnis	241

Verwendete Symbole und Abkürzungen

Formelzeichen

a	Anzahl paralleler Zweige
A	Fläche, Strombelag
AH	Achshöhe
A_L	Leiterquerschnitt, blank
b	Breite
b_S	Nutschlitzbreite
B	Magnetische Flussdichte
B_r	Remanenzinduktion
c	spezifische Wärmekapazität
d	Dicke
D	Durchmesser
E	Elektrische Feldstärke
f	Frequenz
g	Erdbeschleunigung, Stromdichte
h	Höhe
H	Magnetische Feldstärke
i	elektrische Stromstärke
I	elektrische DC-Stromstärke
J	magnetische Polarisierung
k	allgemeiner Faktor
k_C	Carter-Faktor
k_E	Spannungskonstante
k_M	Drehmomentkonstante
l	Länge
l_e	Aktivteillänge
L	Induktivität
m	Masse, Strangzahl

M	Drehmoment
M_i	inneres Drehmoment
n	Drehzahl, Nenner der Lochzahl
N_1	Ständernutzzahl
p	Polpaarzahl
P	Leistung
q	Lochzahl
R	Radius, elektrischer Widerstand
R_m	mittlerer Radius
S	Scheinleistung
t	Zeit, größter gemeinsamer Teiler von N_1 und $2p$
T	Temperatur
u	Spannung
U	DC-Spannung
U_P	Polradspannung
U_{ZK}	Zwischenkreisspannung
U_S	Spulenspannung
V	magnetischer Spannungsabfall
w	Windungszahl
W	Energie, Spulenweite
z	Leiterzahl, Zähler der Lochzahl
z_S	Leiterzahl pro Spulenseite
α	Temperaturkoeffizient, Winkel
α_p	Polbedeckungsfaktor
γ	Phasenwinkel zwischen Maschenspannungen
δ	Luftspaltweite
δ_E	Eindringtiefe
δ''	fiktive Luftspaltweite
η	Wirkungsgrad
κ	elektrische Leitfähigkeit
λ	Leitwert
μ	Permeabilität
ν	Drehfeld-Polpaarzahl
ξ	Wicklungsfaktor
ρ	Dichte
σ	Materialfaktor
τ_N	Nutteilung
τ_p	Polteilung

φ	Phasenwinkel
Φ	magnetischer Fluss
Ψ	Flussverkettung
ω	elektrische Kreisfrequenz
Ω	mechanische Winkelgeschwindigkeit

Indizes

0	Leerlauf
1	Stator
2	Rotor
<i>a</i>	außen
<i>ab</i>	abgegeben
<i>amb</i>	Umgebung
<i>AP</i>	Arbeitspunkt
<i>b</i>	Bogen
<i>Cu</i>	Kupfer
<i>Fe</i>	Eisen
<i>FU</i>	Frequenzumrichter
<i>g</i>	geometrisch
<i>grenz</i>	Grenze
<i>H</i>	Hysterese
<i>i</i>	Zählindex, innen
<i>J</i>	Joch
<i>L</i>	Last
<i>Lager</i>	Lager
<i>m</i>	mittel
<i>mag</i>	magnetisch
<i>mech</i>	mechanisch
<i>M</i>	Magnet
<i>Mot</i>	Motor
<i>n</i>	gerade
<i>N</i>	Bemessung, Nut
<i>p</i>	Grundfeld-Polpaarzahl
<i>PM</i>	Permanentmagnet
<i>r</i>	radial, relativ
<i>res</i>	resultierend
<i>R</i>	Rotor

Rb	Reibung
RMS	Effektivwert
St	Stirn
S	Spule, Stator
$Stirn$	Stirn
u	ungerade
V	Verbraucher, Verlust
W	Wickelkopf
Wb	Wirbelstrom
Z	Zahn

Allgemeine Konstanten

$e = 2,71828\dots$	Eulersche Zahl
$g = 9,81m/s$	Erdbeschleunigung
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	Permeabilität des Vakuums
$\pi = 3,14159\dots$	Kreiszahl

Symbolische Schreibweisen

div	Divergenz
\underline{x}	komplexe Größe
\hat{x}	Amplitude
\vec{X}	vektorielle Größe
dx	differentielle Größe
Δx	Differenz
$\frac{dx}{dy}$	Ableitung der Größe x nach y
$\frac{\delta x}{\delta y}$	partielle Ableitung der Größe x nach y

Abkürzungen

AC	alternating current
ES	Einschicht
FEM	Finite-Elemente-Methode
$IGBT$	Insulated Gate Bipolar Transistor
M	Motor

<i>NdFeB</i>	Neodym-Eisen-Bor
<i>PM</i>	Permanentmagnet
<i>SM</i>	Sintermaterial
<i>SMC</i>	soft magnetic composites
<i>PWM</i>	Pulsweitenmodulation
<i>SmCo</i>	Samarium-Cobalt
<i>ZS</i>	Zweischicht