Technische Universität Kaiserslautern
Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme

Modellierung, Simulation und Optimierung des Betriebsverhaltens von hocheffizienten PM-Synchronmotoren in Ferrittechnik

Dipl.-Ing. Frank Rettinger

geboren in Worms

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

Kaiserslautern, 2016

D 386

Datum der mündlichen Prüfung:	17.03.2016
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick
Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gerhard Fohler
Dekan des Fachbereichs:	Prof. Dr.-Ing. Hans D. Schotten

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik

Band 10

Frank Rettinger

Modellierung, Simulation und Optimierung des Betriebsverhaltens von hocheffizienten PM-Synchronmotoren in Ferrittechnik

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Aachen 2016

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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4439-3
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

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis **v**

1 Einleitung **1**
1.1 Motivation 1
1.2 Zielsetzung der Arbeit 2

2 Konzepte für Synchronmotoren in Ferrittechnik **5**
2.1 Eigenschaften der Ferritmagnete 5
2.1.1 Zusammensetzung und Herstellung von Ferritmagneten . 5
2.1.2 Magnetische und elektrische Eigenschaften 6
2.1.3 Temperaturverhalten von Ferritmagneten 8
2.2 Motorkonzepte ohne Ausnutzung der Flusskonzentration 10
2.2.1 Ferritmotor mit Luftspaltmagneten 10
2.2.2 Ferritmotor mit vergrabenen Blockmagneten 10
2.3 Motorkonzepte mit Ferritmagneten in Sammleranordnung 11
2.3.1 Im Rotorblechschnitt vergrabene Sternmagnete 11
2.3.2 Modularer Rotoraufbau 11
2.4 Motorkonzepte mit ausgeprägtem Reluktanzeffekt 12
2.5 Sonderkonzepte 13
2.6 Konzeptbewertung und Konzeptauswahl 14

3 Drehzahlveränderbare Hauptantriebe mit PM-Synchronmotoren **15**
3.1 Antriebsstruktur drehzahlveränderbarer Hauptantriebe 15
3.1.1 Drehzahlveränderbarer PM-Synchronmotor 15
3.1.2 Stromeingeprägter PM-Synchronmotor am UZK-Umrichter 16
3.2 Herleitung des Grundwellenmodells für PM-Synchronmotoren . . 17
3.2.1 Spannungsgleichung im abc-System 17
3.2.2 Spannungsgleichung im dq0-System 18
3.2.3 Drehmomentberechnung 21
3.2.4 Drehmomentberechnung aus Effektivwertgrößen 23
3.3 Feldorientierter Betrieb von PM-Synchronmotoren 23
3.3.1 dq-Regelungsstruktur 23
3.3.2 Spannungsvorsteuerung 25
3.3.3 MTPA-Regelung 27

3.3.4 Wirkungsgradmaximierung 30
3.3.5 Betriebskennlinie 30
3.3.6 Spannungsgrenze und Feldschwächbetrieb 31
3.4 Motorauslegung für drehzahlveränderbare Hauptantriebe 36
3.4.1 Designkriterien für drehzahlveränderbare Hauptantriebe . 36
3.4.2 Elektromagnetisches Design 37
3.4.3 Wicklungsauslegung 37

4 Analytische Modellierung und Simulation 39
4.1 Modellansatz und Algorithmus 39
4.2 Magnetkreisberechnung 39
4.2.1 Modellierung als magnetisches Netzwerk 39
4.2.2 Optimierungsalgorithmus 52
4.3 Stationäres Betriebsverhalten 59
4.3.1 Berechnung von Flussverkettung, EMK und Drehmoment 59
4.3.2 Berechnung der Ersatzschaltbildelemente 64
4.3.3 Berechnung der Induktivitäten in d- und q-Achse 68
4.3.4 Verlustberechnung 70
4.3.5 Berechnung der Betriebskennlinie 72
4.3.6 Wirkungsgrad, Spannungsbedarf und Leistungsfaktor . . 74

5 Thermische Modellierung im stationären Betrieb 76
5.1 Eigenkühlung bei variabler Drehzahl 76
5.2 Thermisches Modell 76
5.2.1 Modellierung als thermisches Netzwerk 76
5.2.2 Analytische Bestimmung der inneren thermischen Widerstände 78
5.3 Identifikation des äußeren thermischen Widerstands 82

6 Numerische Modellierung mittels FEM 85
6.1 Theoretische Grundlagen zur numerischen Berechnung 85
6.1.1 Elektromagnetische Feldtheorie 85
6.1.2 Finite-Elemente-Methode 89
6.2 Modellbildung 92
6.2.1 Modellierung in Maxwell 2D 92
6.2.2 Berücksichtigung von 3D-Effekten im 2D-Modell 96
6.2.3 Verlustberechnung 97
6.3 Vergleich mit dem analytischen Modell 99
6.3.1 Vergleich der Luftspaltinduktion 99
6.3.2 Vergleich der EMK 100

6.3.3 Vergleich im Lastfall 101
6.3.4 Vergleich bei variablem Stromwinkel 102
6.3.5 Vergleich der Eisenverlustberechnung 104

7 Funktionsmusterentwurf und Funktionsmusterbau 105
7.1 Randbedingungen für den Funktionsmusterentwurf 105
7.2 Optimierte Auslegung des Ferritmotors in Sammleranordnung . . 106
7.2.1 Streuflussminimierung durch Wechselstege 106
7.2.2 Auswahl Magnetmaterial 108
7.2.3 Auslegung des Rotorblechschnitts 108
7.2.4 Wicklungsauslegung 113
7.2.5 Spezifikation des Bemessungsbetriebspunkts 115
7.2.6 Entmagnetisierungsfestigkeit 116
7.2.7 Drehmomentenwelligkeit und Staffelung 117
7.2.8 Weiteres Optimierungspotential 121
7.2.9 Daten des Funktionsmusters 122
7.3 Funktionsmusterbau 124
7.3.1 Rotorfertigung 124
7.3.2 Statorfertigung 126

8 Funktionsmustererprobung im Vergleich zur Simulation 127
8.1 Prüfstandsaufbau und Messkonzept 127
8.1.1 Prüfstandsaufbau 127
8.1.2 Mess- und Auswertungskonzept 128
8.1.3 Verlustaufteilung 130
8.2 Messergebnisse im Vergleich zur Simulation 134
8.2.1 Vermessung des Magnetmaterials 134
8.2.2 Vermessung des Funktionsmusters im Leerlauf 137
8.2.3 Stationäre Betriebsgrößen 141
8.3 Vergleich mit dem Asynchron-Basismotor 150

9 Skalierbarkeit und Varianten des Motorkonzepts 154
9.1 Idee eines Reihenentwurfs 154
9.1.1 Randbedingungen für den Reihenentwurf 154
9.1.2 Ergebnisse des Reihenentwurfs 157
9.1.3 Optimierungspotential beim Reihenentwurf 159
9.2 Reduktion der Momentenwelligkeit durch interne Staffelung . . . 161
9.2.1 Drehmomentenwelligkeiten bei PM-Synchronmaschinen . 161
9.2.2 Schrägung und Staffelung 162
9.2.3 Welligkeitsreduktion durch interne Staffelung 164

10 Zusammenfassung **171**

A Anhang **173**
A.1 Herleitung der Induktivitätsmatrix 173
A.1.1 Hauptinduktivitätsmatrix im Originalsystem 173
A.1.2 Transformation in dq-Koordinaten 177
A.2 Allgemeine Zweischicht-Bruchlochwicklung 179
A.2.1 Grundlegende Zusammenhänge 179
A.2.2 Berechnung der Wicklungsfaktoren 180
A.3 Wicklungsfaktoren für Einschicht-Halblochwicklungen 183
A.4 Berechnung der axialen Streuflüsse 185
A.4.1 Homogenisierung der Blechkennlinien 185
A.4.2 Berechnung mittels ANSYS Maxwell 3D 186
A.5 Skalierung der Pulsungsverluste 189
A.5.1 Spannungsoberschwingungsgehalt durch PWM-Pulsmuster 189
A.5.2 Herleitung des Skalierungsfaktors 191
A.6 Ergebnisse des Reihenentwurfs 192

Literaturverzeichnis **197**

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen

Lateinische Formelzeichen

a	Anzahl paralleler Zweige
a_k, b_k	Fourierkoeffizienten
A	Strombelag
	Fläche
$\vec{A}$	magnetisches Vektorpotential
b	Breite
B	magnetische Induktion
B_r	Remanenzinduktion
d	Dicke
D	elektrische Flussdichte
	Durchmesser
D_A	Stator-Außendurchmesser
D_B	Stator-Bohrungsdurchmesser
E	elektrische Feldstärke
f	Frequenz
h	Höhe
H	magnetische Feldstärke
H_c	Koerzitivfeldstärke
i	Strom (Momentanwert)
I	Strom (Effektivwert)
$\hat{I}$	Strom (Scheitelwert)
J	Stromdichte
	magnetische Polarisation
$\underline{J}$	Jacobimatrix
k, l, m, n	allg. Zählvariable

k_c	carter'scher Faktor
k_E	Spannungskonstante
k_{fe}	Stapelfaktor Elektroblech
$k_{h,c,e}$	Verlustkoeffizienten Eisenverluste
k_u	Zuschlagsfaktor Eisenverluste
l	Länge
l_0	Modulzahl Staffelung
L	Induktivität
m	Strangzahl
	Masse
	Gruppenzahl (interne Staffelung)
M	Drehmoment
M_i	inneres Drehmoment
$\overline{M}$	mittleres Drehmoment
n	Drehzahl
n_1	synchrone Drehzahl
N_1	Statornutzahl
p	Polpaarzahl
	Wirkleistung (Momentanwert)
p_{fe}	spezifische Eisenverluste
$p_{h,c,e}$	spezifische Hysterese-, Wirbelstrom-, Zusatzverluste
P	Wirkleistung
q	Lochzahl
Q	Blindleistung
$\dot{Q}$	Wärmestrom
$r_{i,a}$	Innen-/ Außenradius
R	Widerstand (elektrisch/magnetisch/thermisch)
	Stator-Bohrungsradius
$\underline{R}_m$	Widerstandsmatrix
S	Scheinleistung
t	Zeit
T	Temperatur
$\underline{T}$	Transformationsmatrix

$\vec{T}$	elektrisches Vektorpotential
u	Spannung (Momentanwert)
U	Spannung (Effektivwert)
	Umfang
$\hat{U}$	Spannung (Scheitelwert)
V	Volumen
V_m	magnetische Spannung
w_1	Strangwindungszahl
w	Drehmomentenwelligkeit
W	Spulenweite
	Energie
$x_{1,2}$	Stator-/ Rotorkoordinate (Längenkoordinate)
x, y, z	kartesische Koordinaten
z_N	Leiterzahl pro Nut

Griechische Formelzeichen

α	linearer Temperaturkoeffizient
β_{el}	Bestromungswinkel
γ	Rotorlagewinkel elektrisch (Transformationswinkel)
γ_{mech}	Rotorlagewinkel mechanisch
γ_S	mittlerer Schrägungswinkel
$\gamma_{S,0}$	Staffelschritt
δ	Luftspaltweite
ε	Permittivität
ε_r	relative Permittivität
η	Wirkungsgrad
Θ	Durchflutung
κ	elektrische Leitfähigkeit
λ	relativer Streuleitwert
	Lagrangemultiplikator
	Wärmeleitfähigkeit
	Wellenlänge

Λ	Luftspaltleitwert
μ	Permeabilität
μ_r	relative Permeabilität
ν	Oberfeldpolpaarzahl
	Oberschwingungs-Ordnungszahl
ξ	Wicklungsfaktor
ρ	Ladungsdichte
τ_n	Nutteilung
τ_p	Polteilung
φ	Phasenwinkel / Winkel
φ_N	Nutfüllgrad
ϕ	magnetischer Fluss
	elektrisches Skalarpotential
Φ	Zweigfluss im magnetischen Netzwerk
ψ	Flussverkettung (Momentanwert)
$\hat{\Psi}$	Flussverkettung (Scheitelwert)
ω_{el}	elektrische Kreisfrequenz
ω_{mech}	Winkelgeschwindigkeit
Ω	magnetisches Skalarpotential

Indizes

0	Leerlauf
1	Stator
2	Rotor
a, b, c	Wicklungsstrang a,b,c
abc	abc-Koordinaten
ax	axial
AP	Arbeitspunkt
cu	Kupfer
$d, q, 0$	Komponentensystem d,q,0
$dq0$	dq0-Koordinaten
dv	doppelt verkettet

el	elektrisch
fe	Eisen
geo	geometrische Länge
$Grenz$	Spannungsgrenze
GS	Grundschwingung
GW	Grundwelle
h	Hauptfluss
	homogenisiert
J	Joch
L	Leiter
	Lufttasche
m	magnetisch
max	Maximalwert
$mech$	mechanisch
N	Nut
	Nutschlitzfaktor
p	Grundwellenpolpaarzahl
$puls$	Pulsfrequenz
$Puls$	Pulsation
PM	Permanentmagnet
r	relativ
$reib$	Reibung
Sch	Schrägung
$soll$	Sollwert
str	Stranggröße
S	Nutschlitz
	Sehnung
St	Staffelung
	Stirnstreuung
th	thermisch
Umg	Umgebung
v	verkettete Größe
V	Verlust

W	Wicklung
	Welle
WK	Wickelkopf
Z	Zahn
	Zwischenkreis
	Zonung
zul	zulässig
δ	Luftspalt
σ	Streuung

Konstanten

$c \approx 3 \cdot 10^8 \, \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	Lichtgeschwindigkeit
$\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \, \frac{\mathrm{A\,s}}{\mathrm{V\,m}}$	elektrische Feldkonstante
j	imaginäre Einheit
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \, \frac{\mathrm{V\,s}}{\mathrm{A\,m}}$	magnetische Feldkonstante
π	Kreiszahl

Mathematische Operatoren

div	Divergenz
ggT	größter gemeinsamer Teiler
grad	Gradient
Im	Imaginärteil
kgV	kleinstes gemeinsames Vielfaches
max	Maximum
min	Minimum
sinc	Sinus cardinalis ($\mathrm{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$)
Re	Realteil
rot	Rotation
$\angle$	Phasenwinkel komplexer Größe
∂	Differentialoperator
∇	Nabla-Operator

Abkürzungen

AlNiCo	Aluminium-Nickel-Kobalt
ASM	Asynchronmaschine
ESB	Ersatzschaltbild
EMK	elektromotorische Kraft
FEM	Finite-Elemente-Methode
GSM	Gleichstrommaschine
IE	Energieeffizienzniveau (International Efficiency)
MSR	Maschinenstromrichter
MTPA	Maximum Torque per Ampere
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
NSR	Netzstromrichter
PM	Permanentmagnet
PWM	Pulsweitenmodulation
RLG	Rotorlagegeber
SmCo	Samarium-Kobalt
SYM	Synchronmaschine
trms	true root-mean-square (Effektivwert)
UZK	Spannungszwischenkreis