

Technische Universität Kaiserslautern
Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme

Hocheffiziente PM Line-Start Motoren mit im Läufer integrierten Permanentmagneten

Dipl.-Ing. Patrick Hauck
geboren in Ludwigshafen am Rhein

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: 18.03.2016

1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer
Prüfungsvorsitzender:	Jun.-Prof. Dr.-Ing. Daniel Görge
Dekan des Fachbereichs:	Prof. Dr.-Ing. Hans D. Schotten

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik

Band 11

Patrick Hauck

**Hocheffiziente PM Line-Start Motoren
mit im Läufer integrierten Permanentmagneten**

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 978-3-8440-4638-0

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
2 Entwicklung und Einsatzgebiete von PM Line-Start Motoren	5
3 Aufbau von PM LS Motoren	7
3.1 Läufer mit am Luftspalt angeordneten Magneten	8
3.2 Läufer mit innenliegenden Magneten	9
3.2.1 Blockmagnete	9
3.2.2 Magnetanordnungen zur Flusskonzentration	10
3.2.3 U-Shape	11
4 Modellierung und Simulation des stationären synchronen Betriebs- verhaltens	13
4.1 Analytische Modellierung	13
4.1.1 Spannungsgleichungen	15
4.1.1.1 Transformation in läuferfeste Koordinaten	17
4.1.1.2 Beschreibung in Effektivwertgrößen	20
4.1.2 Magnetischer Kreis	21
4.1.2.1 Magnetisches Ersatznetzwerk	22
4.1.2.2 Einfluss ferromagnetischer Materialien	34
4.1.2.3 Newton-Raphson-Algorithmus	37
4.1.2.4 Luftspaltfeld	41
4.1.2.5 Hauptinduktivitäten von d- und q-Achse	44
4.1.3 Induzierte Spannung	45
4.1.4 Approximation der Eisenverluste	47
4.1.5 Betrieb bei offenen Anschlussklemmen	49
4.1.6 Drehmomentgleichung	51

4.1.7	Betrieb bei Stromeinprägung	53
4.1.8	Stationäres synchrones Betriebsverhalten am starren Netz	55
4.1.8.1	Downhill-Simplex-Verfahren	58
4.1.8.2	Koeffizienten der Spannungsgleichungen	61
4.1.8.3	Berechnung stationärer Betriebspunkte	63
4.2	Simulation nach der Methode der finiten Elemente	70
4.2.1	Aufbau des FEM Modells	72
4.2.2	FEM zur Kontrolle und Entwurfsunterstützung	75
4.2.2.1	Luftspaltfeld	75
4.2.2.2	Betrieb bei offenen Anschlussklemmen	76
4.2.2.3	Stromeingeprägter Betrieb	78
4.2.2.4	Stationäres Betriebsverhalten	79
5	Modellierung und Simulation des transienten Hochlauf- und Intrittfallverhaltens	83
5.1	FEM Simulation	84
5.1.1	Simulation von Hochlaufvorgängen	85
5.1.2	Eingrenzen der Intrittfallgrenzkennlinie	88
5.2	Analytische Approximation des transienten Betriebsverhaltens .	90
5.2.1	Randbedingungen des analytischen Modells	90
5.2.2	Spannungsdifferentialgleichungen	90
5.2.3	Bewegungsgleichungen	92
5.2.4	Koeffizienten des Differentialgleichungssystems	93
5.2.4.1	Ohm'sche Widerstände	93
5.2.4.2	Induktivitäten	95
5.2.4.3	PM-Flussverkettung	96
5.2.4.4	Massenträgheitsmomente	97
5.2.5	Transientes Betriebsverhalten als Anfangswertproblem . .	98
5.2.6	Lösungsalgorithmus für Anfangswertprobleme nach Runge-Kutta	100
5.2.7	Analytische Approximation eines Hochlaufvorgangs	101
5.2.8	Analytische Approximation der Intrittfallgrenzkennlinie .	103
6	Funktionsmusterentwurf	106
6.1	Basismotor	106
6.2	Vorgaben zur Auslegung des Funktionsmusters	109
6.2.1	Ständer des Funktionsmusters	110
6.2.2	Läufer des Funktionsmusters	110
6.3	Auslegungsstudien	114

7	Prüfstand für PM Line-Start-Motoren	118
7.1	Prüfstandsaufbau	118
7.2	Konzept für Messungen bei offenen Anschlussklemmen	121
7.3	Konzept zur Erprobung des stationären synchronen Betriebsverhaltens	121
7.4	Konzept zur Erprobung des transienten Betriebsverhaltens	122
8	Funktionsmusterbau und praktische Erprobung	125
8.1	Funktionsmusterbau	125
8.2	Unterschiede zwischen Auslegung und Prototyp	127
8.3	Betrieb bei offenen Anschlussklemmen	128
8.3.1	Induzierte Spannung	128
8.3.2	Eisen- und Reibungsverluste	131
8.4	Stationärer synchroner Betrieb	132
8.5	Hochlauf und Eintrittfall	139
8.6	Eintrittfallgrenze	144
9	Konzeptvergleich	146
10	Zusammenfassung	148
Anhang		150
A	Magnetische Widerstände	150
A.1	Magnetische Widerstände der Ständerzähne, des Luftspalts und der Läuferzähne	150
A.1.1	Zahn-Luft-Zahn-Widerstände der d-Achse	150
A.1.2	Zahn-Luft-Zahn-Widerstände der q-Achse	153
A.2	Ständerjochwiderstände	154
A.3	Magnetische Widerstände längs der q-Achse des Läufers	156
A.4	Magnetische Widerstände der Seitenmagnete und der Teilabschnitte quer zur q-Achse des Läufers	156
A.5	Magnetische Widerstände der Hauptmagnete	157
A.6	Magnetische Widerstände der Streustege	157
A.7	Magnetische Widerstände des Übergangs aus der q-Achse hin zu den an die Welle angrenzenden Teilabschnitten	157
A.8	Magnetische Widerstände der an die Welle angrenzenden Teilabschnitte	158
B	Streuinduktivitäten des Läuferkäfigs	161
B.1	Stirnstreuinduktivität	161

B.2	Nut-Zahnkopf-Streuinduktivität	162
B.2.1	Nutstreuung	162
B.2.1.1	Streuung im Leitergebiet	163
B.2.1.2	Nutschlitzstreuung	164
B.2.2	Zahnkopfstreuung	164
B.2.3	Gesamtstreuleitwert	164
B.3	Doppeltverkettete Streuung	165
C	Axialer Streufluss an den Läuferstirnseiten	166
D	Betrachtung der Gegenfeldstabilität	170
E	IE Grenzkennlinienfeld	174
	Literatur	175
	Eingesetzte Software	181
	Lebenslauf	182

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen

a	Anzahl paralleler Zweige
a	Fourierkoeffizient
a_{D}	Anzahl paralleler Drähte
a, b, c	Strangbezeichnungen einer Drehstromwicklung
A	Fläche, allgemein
A	Strombelag
\vec{A}	Vektorpotenzial (FEM)
b	Breite, allgemein
b	Fourierkoeffizient
B	magnetische Flussdichte (Induktion)
B_{r}	Remanenzinduktion
B_{δ}	Luftspaltinduktion
d	Dämpfung
d	Durchmesser, allgemein
D	elektrische Flussdichte
e	induzierte elektrische Spannung
f	Frequenz
f	Funktion, allgemein
f_z	Zielfunktion
g	ganze Zahl
g, G	Funktion, allgemein
h	Höhe, allgemein
H	magnetische Feldstärke
H_{cB}	Koerzitivfeldstärke

i, I	Stromstärke, allgemein
i	allgemeine Bezifferung
j	imaginäre Einheit
j	allgemeine Bezifferung
J	elektrische Stromdichte
J	magnetische Polarisation
J	Massenträgheitsmoment
\mathbf{J}	Jacobimatrix
k	ganze Zahl
k	Konstante, Faktor
k_c	Carter'scher Faktor
k_m	Drehmomentmultiplikator
k_n	Nutfüllfaktor
k_s	Schwungmassenmultiplikator
k_{Fe}	Eisenfüllfaktor (Stapelfaktor)
K	Anzahl von Netzwerkknoten
l	Länge, allgemein
l_m	mittlere Windungslänge
L	Induktivität
m	Drehmoment, allgemein
m_i, M_i	inneres Drehmoment
m_L, M_L	Lastdrehmoment
m_1	Strangzahl
m	Masse
M	Koppelinduktivität, allgemein
n	Drehzahl
n	Ordnungszahl, Dimension eines Systems
N	Anzahl von Nuten
p	Polpaarzahl
P	Leistung, allgemein

P_1	elektrische Leistung
P_2	mechanische Leistung
q	Lochzahl
r	Radius, allgemein
R	ohmscher Widerstand
R_m	magnetischer Widerstand
\mathbf{R}_m	Widerstandsmatrix
s	Strecke, Integrationsweg
t	Zeit
T	Temperatur
\mathbf{T}	Transformationsmatrix
u, U	elektrische Spannung, allgemein
v	spezifische Verluste
W	Wickelschritt
x	Abmessung, allgemein
x	ganze Zahl, Iterationschritt
x	Parameter, allgemein
x	Raumrichtung im kartesischen Koordinatensystem
x_1, x_2	Suchparameter (Downhill-Simplex-Verfahren)
y	Funktion, allgemein
y	Raumrichtung im kartesischen Koordinatensystem
z	Raumrichtung im kartesischen Koordinatensystem
z_n	Leiter pro Nut
Z	Anzahl von Netzwerkzweigen
α, β	Strangbezeichnungen einer zweisträngigen Ersatzwicklung
γ_{\ominus}	Bestromungswinkel
γ_1	mechanischer Umlaufwinkel im Ständerkoordinatensystem
γ'_1	mechanischer Umlaufwinkel im Ständerkoordinatensystem
γ_2	mechanischer Umlaufwinkel im Läuferkoordinatensystem
δ	elektrischer Polradwinkel

δ	Luftspaltlänge
δ'	fiktive Luftspaltlänge unter Berücksichtigung der Nutung
ε	Abweichung, Freimaß
η	Wirkungsgrad
ϑ	elektrischer Rotorlagewinkel
ϑ_{m}	mechanischer Rotorlagewinkel
$\Delta\vartheta_{\text{w}}$	Wicklungsübertemperatur
Θ	Durchflutung
κ	elektrische Leitfähigkeit
λ	Leistungsfaktor
λ	relativer Streuleitwert
μ	Permeabilität
μ_{r}	relative Permeabilität
ξ	Wicklungsfaktor
ξ_{n}	Nutschlitzwicklungsfaktor
ξ_{s}	Sehnungwicklungsfaktor
ξ_{z}	Zonungwicklungsfaktor
ρ	Werkstoffdichte
ρ	Raumladungsdichte
σ	materialspezifischer Verlustkoeffizient
σ	Streukoeffizient
τ	Teilung
τ_{n}	Nutteilung
τ_{p}	Polteilung
φ	Phasenwinkel
φ	elektrisches Potenzial (FEM)
ϕ	magnetischer Fluss
ψ	Flussverkettung
ω	Kreisfrequenz
Ω	mechanische Winkelgeschwindigkeit

Indizes

a	Anfangswert
a	Strangbezeichnung
ax	axial
äq	äquivalent
Al	Aluminium
b	Strangbezeichnung
B	Ständerbohrung
c	Strangbezeichnung
con	Kontraktion (Downhill-Simplex-Verfahren)
Cu	Kupfer
d	Längsachse, Längsfeldkomponente
D	Draht
e	Expansion (Downhill-Simplex-Verfahren)
end	Endwert
E	elektrische Feldstärke
Fe	Eisen, ferromagnetischer Werkstoff
fik	fiktiv
g	der Funktion g zugehörig
geo	geometrisch
ges	gesamt
h	Hauptfeld
h	Schrittweite
hom	homogenisiert
hyst	Hysterese
i	induziert
j	Joch
k	Kurzschluss, Anlauf
l	Leiter

L	Last
L	Läufer
m	mittlerer Bereich (Nutgeometrie)
max	maximal
mean	mittelwert
mess	Messgröße
min	minimal
mp	Mittelpunkt, Neutralleiter
mt	Magnettasche
M	Motor
n	Nut, Nutung
nosync	fehlgeschlagener Hochlauf
nz	Nut-Zahnkopf
o	Oberer Bereich (Nutgeometrie)
ow	Oberwellen
p	bezogen auf die Grundwelle
pm	Permanentmagnet
q	Querachse, Quersfeldkomponente
r	Bemessungsarbeitspunkt
r	Reflexion (Downhill-Simplex-Verfahren)
rb	Reibung
ri	Kurzschlussring
s	Nutschlitz
seg	Segment
st	Stab
sync	erfolgreicher Hochlauf mit Eintrittfall
S	Ständer
steg	den Streustegen zugehörig
th	thermisch
typ	typisch

u	Umgebung
u	Ummagnetisierung
u	Unterer Bereich (Nutgeometrie)
v	Verluste
verk	verkettete Größe (Klemme-Klemme-Wert)
w	Wicklung
wb	Wirbelstrom
wk	Wickelkopf
W	Welle
x	ganze Zahl, Iterationschritt
z	Zahn
z	Richtungskomponente im kartesischen Koordinatensystem
zu	Zusatz
α	Strangbezeichnung einer zweisträngigen Ersatzwicklung
β	Strangbezeichnung einer zweisträngigen Ersatzwicklung
ν	bezogen auf die ν . Harmonische
σ	Streuung, Streufeld
0	Leerlauf
0	Nullsystem
0	Startwert zum Zeitpunkt $t = 0$
1	Ständer
2	Läufer

Mathematische Operatoren und Symbole

rot	Rotation
grad	Gradient
div	Divergenz
∇	Nabla-Operator
Re	Realteil

Im	Imaginärteil
\hat{x}	Amplitude
\dot{x}	zeitliche Ableitung
\underline{x}	komplexe Größe
\vec{x}	Vektor
\vec{x}_{abc}	Vektor aus den Komponenten des ständerfesten a-b-c-Koordinatensystems
\vec{x}_{dq0}	Vektor aus den Komponenten des läuferfesten d-q-0-Koordinatensystems
$\vec{x}_{\alpha\beta 0}$	Vektor aus den Komponenten des ständerfesten α - β -0-Koordinatensystems
max	Maximum
Δ	Änderung, Differenz
$\frac{\Delta x}{\Delta y}$	Änderung von x bezogen auf die Änderung von y
$\frac{dx}{dy}$	Ableitung von x nach y
$\frac{\partial x}{\partial y}$	partielle Ableitung von x nach y

Konstanten

e	= 2,718 28	Euler'sche Zahl
μ_0	= $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am	Permeabilität des Vakuums
π	= 3,141 59	Kreiszahl

Abkürzungen

ASM	Asynchronmaschine
CAD	Computer-aided design
EG	Europäische Gemeinschaft
FEM	Finite-Elemente-Methode
IE	International Efficiency

IE1	Standard Efficiency
IE2	High Efficiency
IE3	Premium Efficiency
IE4	Super-Premium Efficiency
IEC	International Electrotechnical Commission
IPM	Interior Permanent Magnets (im Läuferblech integrierte Permanentmagnete)
IPM LS Motor	Permanentmagneterregter Line-Start Motor mit im Läuferblech integrierten Magneten
PM	Permanentmagnet
PM LS Motor	Permanentmagneterregter Line-Start Motor
S1-Betrieb	Dauerbetrieb elektrischer Maschinen (nach IEC 60034-1)
SMPM	Surface Mounted Permanent Magnets (am Luftspalt angeordnete Permanentmagnete)