

Technische Universität Kaiserslautern
Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme

Permanentmagneterregte Line-Start Motoren mit Luftspaltnagneten

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Ralf Fischer
geb. in Saarbrücken

Vom Fachbereich Elektrotechnik 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:	31.08.2012
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer
Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Alexander Potchinkov
Dekan des Fachbereichs:	Prof. Dr.-Ing. Norbert Wehn

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik

Band 7

Ralf Fischer

**Permanentmagneterregte Line-Start Motoren
mit Luftspaltnagneten**

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 978-3-8440-1440-2

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme der TU Kaiserslautern.

Aus diesem Grund gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Gerhard Huth, der mir unkompliziert die Möglichkeit eröffnet hat, mich innerhalb seiner Arbeitsgruppe mit dem Thema dieser Dissertation auseinander setzen zu können. Die gemeinsamen Diskussionen und die Betreuung mit wissenschaftlicher Methodik waren von unschätzbarem Wert.

Für die Übernahme des Koreferats, und das damit der Arbeit entgegengebrachte inhaltliche Interesse, danke ich Herrn Prof. Dr. Martin Doppelbauer.

Das Forschungsvorhaben wurde durch die KSB Stiftung gefördert. Hier möchte ich vor allem Dr. Sven Urschel danken, der die Arbeit während der gesamten Zeit begleitet hat.

Mein Dank gilt auch allen weiteren Mitarbeitern des Lehrstuhls, die es während meiner Tätigkeit dort verstanden, stets ein produktives Arbeitsklima und eine vorzügliche Atmosphäre zu schaffen. Ich habe von den vielen verständnisfördernden Diskussionen und der tatkräftigen Unterstützung im Labor sehr profitiert.

Meinen Eltern möchte ich meinen Dank aussprechen. Meinem Vater, der mein Interesse an der Elektrotechnik erst geweckt hat, und meiner Mutter, deren immense und geduldige Unterstützung in allen Belangen mir meine Ausbildung und meinen bisherigen Lebensweg ermöglicht hat.

Ganz besonders möchte ich mich bei Ute bedanken, die mich jederzeit begleitet und unermüdlich unterstützt hat. Auch in schwierigen Zeiten hat sie mir sehr viel Kraft geschenkt, was alles andere als selbstverständlich ist. Ihr sei diese Arbeit gewidmet.

Nürnberg, im September 2012

Ralf Fischer

Inhalt

INHALT	I
VERWENDETE FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN.....	III
1 EINLEITUNG.....	1
1.1 NUTZEN DER PM LINE-START TECHNIK	2
1.2 ZIELSETZUNG DER ARBEIT.....	3
2 BAUFORMEN VON PM LINE-START MOTOREN.....	5
2.1 KLASSISCHE FORM DER PM LINE-START MOTOREN	5
2.2 BAUFORM MIT LUFTSPALTMAGNETEN	7
3 MODELLIERUNG UND SIMULATION DES STATIONÄREN SYNCHRONEN BETRIEBSVERHALTENS	9
3.1 ANALYTISCHER MODELLANSATZ UND ERSATZSCHALTBILD.....	9
3.2 MAGNETKREISBERECHNUNG.....	10
3.3 BERECHNUNG DER GRÖßEN DES ERSATZSCHALTBILDES.....	13
3.4 BERECHNUNG VON STRANGSTROM UND DREHMOMENT	22
3.5 EINFLUSS DER ERWÄRMUNG UND BERECHNUNGSABLAUF	27
4 MODELLIERUNG DES TRANSIENTEN BETRIEBSVERHALTENS	31
4.1 DYNAMISCHES ERSATZSCHALTBILD UND DIFFERENTIALGLEICHUNGSSYSTEM	31
4.2 INNERES MOMENT UND MECHANISCHER ANTRIEBSSTRANG.....	38
4.3 ALTERNATIVE MODELLIERUNG MITTELS FEM SIMULATION.....	43
5 FUNKTIONSMUSTERENTWURF UND MUSTERBAU.....	46
5.1 DER BASISMOTOR.....	46
5.2 ENTWURFSKRITERIEN UND PARAMETERSTUDIE	48
5.3 BAU DER FUNKTIONSMUSTER	59
6 ERPROBUNG DES STATIONÄREN SYNCHRONEN BETRIEBSVERHALTENS	63
6.1 MESSAUFBAU ZUR MESSUNG DES STATIONÄREN WIRKUNGSGRADES	63
6.2 MESSWERTE AM FUNKTIONSMUSTER IM DIREKTEN VERGLEICH MIT DER BERECHNUNG.....	65
6.2.1 <i>Induzierte Spannung</i>	65
6.2.2 <i>Strangwiderstand und Erwärmung</i>	70
6.2.3 <i>Stromaufnahme und Wirkungsgrad im stationären synchronen Betrieb</i>	71

7	ERPROBUNG DES TRANSIENTEN BETRIEBSVERHALTENS	76
7.1	BESONDERHEITEN DES PM LINE-START MOTORS BEIM HOCHLAUFVORGANG	76
7.2	AUFGEZEICHNETE TRANSIENTE VORGÄNGE IM VERGLEICH MIT DEN BERECHNUNGSERGEBNISSEN	81
7.2.1	<i>Reiner Schwungmassenhochlauf</i>	<i>82</i>
7.2.2	<i>Hochlaufvorgang mit erhöhter Schwungmasse und Lastmoment.....</i>	<i>86</i>
7.3	ANWENDUNGEN DES TRANSIENTEN ANALYTISCHEN MODELLS	91
7.3.1	<i>Last-Schwungmassen-Grenzkennlinie.....</i>	<i>91</i>
7.3.2	<i>Parametersensibilität des Intrittfallverhaltens.....</i>	<i>96</i>
7.3.3	<i>Einschaltstöße in Netz und Wellenstrang.....</i>	<i>101</i>
7.3.4	<i>Magnetbeanspruchung bei Stoßströmen.....</i>	<i>108</i>
7.4	AUFGEZEICHNETE TRANSIENTE VORGÄNGE IM VERGLEICH MIT DER FEM SIMULATION	113
8	ZIELKONFLIKT ZWISCHEN WIRKUNGSGRADOPTIMIERUNG UND INTRITTFALLVERHALTEN	117
9	UNTERSUCHUNG DER SKALIERBARKEIT DES KONZEPTS	123
9.1	UNTERSUCHUNG ZWEIPOLIGER PM LINE-START MOTOREN	125
9.2	UNTERSUCHUNG VIERPOLIGER PM LINE-START MOTOREN.....	129
9.3	UNTERSUCHUNG SECHSPOLIGER PM LINE-START MOTOREN	132
9.4	SCHLUSSFOLGERUNGEN ZUR SKALIERBARKEIT UND REIHENFÄHIGKEIT DES KONZEPTEs	136
10	ZUSAMMENFASSUNG.....	139
A.	ANHANG	141
A.1	TECHNISCHE DATEN DES BASISMOTORS VON FUNKTIONSMUSTER 1 UND 2.....	141
A.2	ÜBERSICHT DER GEOMETRIEPARAMETER ALLER AUSLEGUNGEN DER SKALIERBARKEITSTUDIE.....	144
	LITERATURVERZEICHNIS.....	146

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

a	Anzahl der parallelen Zweige, Strombelag
A	Fläche, magnetisches Vektorpotenzial, Strombelag
A_L	Leiterquerschnittsfläche
b	Breite, magnetische Induktion
b_s	Nutschlitzbreite
B	magnetische Induktion
B_r	Remanenzinduktion
f	Frequenz
F	Kraft
g	Faktor
h	Höhe
H	magnetische Feldstärke
i, I	Strom
J	Massenträgheitsmoment
k	Faktor
k_c	Carter'scher Faktor
k_E	Spannungskonstante

k_{Fe}	Eisenfüllfaktor
k_s	Sättigungsfaktor
l	Länge
L	Induktivität
L_1	Drehfeldinduktivität
$L_{\sigma d}$	doppeltverkettete Streuinduktivität
m	Masse, Strangzahl, transientes Drehmoment
M	Drehmoment, Magnetisierung, Gegeninduktivität
M_i	inneres Drehmoment
n	Drehzahl
N_1	Ständernutzahl
p	Grundfeldpolpaarzahl
P	(Verlust-)Leistung
q	Lochzahl
R	Bohrungsradius
R_1	Ständerstrangwiderstand
R_{th}	thermischer Widerstand
s	Schlupf
t	Zeit
T	Temperatur
U	Spannung
U_p	Polradspannung
V	magnetischer Spannungsabfall, Volumen
w_1	Strangwindungszahl
W	Spulenweite, Lastmoment, Energie
x	Winkelkoordinate im Bogenmaß
Z_{Nut}	Leiterzahl in einer Nut

α	mechanischer (Umfangs-)Winkel, Winkelbeschleunigung
α_p	Polbedeckungsgrad
β	Polradwinkel, Staffelwinkel
γ	mittlerer Schrägungswinkel, transienter Rotorwinkel
δ	geometrische Luftspaltweite
δ''	fiktive (= magnetisch wirksame) Luftspaltweite
ϑ	Temperatur
θ	Durchflutung, Winkel
κ	elektrische Leitfähigkeit
μ	Permeabilität, Polpaarzahl
ν	Polpaarzahl
ξ	Wicklungsfaktor
σ	spezifischer Verlustfaktor
τ_N	Nutteilung
τ_P	Polteilung
φ	Phasenwinkel
Φ	magnetischer Fluss
Ψ	Flussverkettung
ω	elektrische Kreisfrequenz
Ω	mechanische Kreisfrequenz

Indizes

0	Leerlauf, Bezugsgröße
1	Stator
2	Rotor

Anz	Anzugs-(strom)
äq	äquivalent
asy	asynchron
ax	axial
A	Anfang
B	Bohrung
b	brems
Cu	Kupfer
eff	Effektivwert
elektr	Elektrisch
Fe	Eisen
Geh	Gehäuse
gen	generatorisch
h	Hysteresse
i	inneres, Zählindex
J	Joch
k	Kurzschluss, Kipp-
L	Luft
m	magnetisch, Mitkomponente, mittel
M	Magnet
mech	mechanisch
min	minimal
n	Zählindex
N	Nut, Nutschlitz
p	Grundfeldpolpaarzahl
R	Rotor
r	radial, relativ

Reib	Reibung
S	Sehnung, Stator, Steg, Strang
Schr	Schrägung
Staf	Staffelung
Stoß	Stoß-(strom)
syn	synchron
tan	tangential
th	thermisch
U	Umgebung
V	Verlust
verk	verkettet
W	Wickelkopf, Wicklung
x	x-Komponente
y	y-Komponente
z	z-Komponente
Z	Zahn, Zonung
δ	Luftspalt
σ	Streuung
μ	Drehfeldpolpaarzahl
ν	Drehfeldpolpaarzahl

Konstanten

$e = 2,71828$	Eulersche Zahl
$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{Vs/Am}$	Permeabilität des Vakuums
$\pi = 3,14159$	Kreiszahl

Mathematische Operatoren

div	Divergenz
rot	Rotation
$\text{Re}\{\underline{x}\}$	Realwert von \underline{x}
\hat{x}	Amplitude von x
\underline{x}	komplexe Größe
\underline{x}^*	komplex konjugierte Größe
\tilde{x}	transformierte Größe im Bildbereich
\vec{X}	Vektor
$\frac{dx}{dy}$	Ableitung von x nach y
$\frac{\partial x}{\partial y}$	partielle Ableitung von x nach y

Abkürzungen

AH	Achshöhe
ESB	Ersatzschaltbild
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FEM	Finite-Elemente-Methode
IPM	interior permanent magnet
KU	Kurzzeitunterbrechung
MTM	Massenträgheitsmoment
NFF	Nutzfällfaktor
PM	Permanentmagnet
SE	Seltenerd(-Magnet)