

Thomas Samuel

**Simulation des Hochlauf- und
Intrittfallverhaltens hocheffizienter
PM Line-Start Motoren mit im Läufer
integrierten Permanentmagneten**

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik
Band 17

**SHAKER
VERLAG**



Technische Universität Kaiserslautern
Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme

Simulation des Hochlauf- und Intrittfallverhaltens hocheffizienter PM Line-Start Motoren mit im Läufer integrierten Permanentmagneten

M.Sc. Thomas Samuel
geboren in Ruthweiler

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

Kaiserslautern, 2020

D 386

Datum der mündlichen Prüfung: 06.12.2019

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Götz

Prüfungsvorsitzende: Prof. Dr.-Ing. Ping Zhang

Dekan des Fachbereichs: Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik

Band 17

Thomas Samuel

**Simulation des Hochlauf- und Intrittfallverhaltens
hocheffizienter PM Line-Start Motoren mit im Läufer
integrierten Permanentmagneten**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Düren 2020

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., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7204-4

ISSN 1866-5357

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

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Aufbau und Vergleich von PM Line-Start Motoren	4
2.1 Aufbau des Ständers	4
2.2 Aufbau des Läufers	5
2.3 Konzeptstudie für das Läuferlayout	8
3 Elektromagnetische Modellierung	14
3.1 Elektrische Modellierung	14
3.1.1 Spannungsgleichungen des Ständers in Originalgrößen	14
3.1.2 Spannungsgleichungen in läuferfesten d-q-Koordinaten	16
3.1.3 Effektivwertgrößen	19
3.2 Modellierung des magnetischen Kreises	20
3.2.1 Ersatznetzwerk des magnetischen Kreises	20
3.2.2 Berechnung der magnetischen Widerstände	25
3.2.3 Berechnung der magnetische Durchflutungsquellen	31
3.2.4 Netzwerkgleichung des magnetischen Kreises	36
3.2.5 Lösungsalgorithmus für die nichtlineare Netzwerkgleichung	40
3.2.6 Analyse des Luftspaltfeldes	42
3.2.7 Berechnung der elektromotorischen Kraft	47
3.2.8 Stromeingepägter Betrieb	48
3.2.9 Kennfeld	49
4 Analytische Modellierung des transienten Betriebsverhaltens	51
4.1 Spannungsdifferentialgleichungen	52
4.1.1 Berechnung der Ohm’schen Widerstände	61
4.1.2 Berechnung der Streuinduktivitäten	63
4.1.3 Berechnung der partiellen Ableitungen	66

4.2	Bewegungsdifferentialgleichungen	68
4.2.1	Berechnung der Drehmomente	69
4.2.2	Berechnung der Massenträgheitsmomente	70
4.3	Algorithmus zum Lösen der Differentialgleichungen	71
4.4	Analytische Berechnung der Eintrittfallgrenze	73
4.5	Vergleich der Ergebnisse der transienten analytischen Berechnung	75
5	Analytische Modellierung des stationären Betriebsverhaltens	78
5.1	Lösungsverfahren zur Findung eines stationären Betriebspunktes	78
5.1.1	Berechnung des stationären inneren Drehmoments	80
5.1.2	Analyse der Ummagnetisierungsverluste	80
5.1.3	Analyse der Verluste durch Reibung	82
5.1.4	Thermische Modellierung	82
5.1.5	Downhill-Simplex-Verfahren	83
5.1.6	Berechnung der stationären Betriebspunkte	85
5.2	Verarbeitung der Ergebnisse des stationären Betriebsverhaltens	87
5.2.1	Berechnung des Wirkungsgrads	87
5.2.2	Berechnung des Leistungsfaktors	88
6	Numerische Simulation	89
6.1	Grundlagen der FEM in der elektromagnetischen Berechnung	89
6.2	Vorgehensweise bei der numerischen Simulation eines PM Line-Start Motors mittels FEM	91
6.3	Analyse des Luftspaltfelds	96
6.4	Simulation der induzierten Spannungen bei offenen Anschlussklemmen	97
6.5	Simulation des transienten Hochlaufs und der Eintrittfallgrenze	98
6.5.1	Numerische Rechnung	98
6.5.2	Numerisch-analytisch gekoppelte Rechnung	100
6.6	Simulation des stationären Betriebsverhaltens	106
7	Funktionsmusterentwurf und Funktionsmusterbau	107
7.1	Aufbau der Ständer	108
7.2	Aufbau der Läufer	109
7.2.1	U-Modell	111
7.2.2	V-Modell	113
7.3	Auslegung der Wicklung	115

7.4	Vorstellung der Funktionsmuster	117
8	Messtechnische Untersuchungen der Funktionsmuster und Vergleich mit der numerischen und analytischen Berechnung	119
8.1	Aufbau der Versuchsstände	119
8.1.1	Stationäre Messungen	119
8.1.2	Transiente Messungen	121
8.2	Spannungsvariation	122
8.3	Induzierte Spannung	124
8.4	Stationäres Betriebsverhalten	127
8.5	Anlaufdrehmoment und Anlaufstrom	133
8.6	Transientes Betriebsverhalten	134
8.6.1	Zeitliche Verläufe	134
8.6.2	Intrittfallverhalten	139
9	Reihentauglichkeit und Aussichten	141
9.1	U- und V-Funktionsmuster mit einem Käfig aus Aluminium	141
9.2	Untersuchungen bei höherer Bemessungsleistung	143
9.3	Untersuchungen der Skalierbarkeit	145
10	Zusammenfassung	147
A	Anhang	150
	Literatur	160