

Jingpeng Guan

**Einfluss der Energieeffizienzklasse
auf das Einschalt- und Hochlaufverhalten
von Drehstrom-Käfigläufermotoren**

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik
Band 14

**SHAKER
VERLAG**



Technische Universität Kaiserslautern
Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme

Einfluss der Energieeffizienzklasse auf das Einschalt- und Hochlaufverhalten von Drehstrom-Käfigläufermotoren

M.Sc. Jingpeng Guan
geboren in Shandong

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

Kaiserslautern, 2018
D 386

Datum der mündlichen Prüfung:	06.08.2018
1.Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth
2.Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Andreas Kremser
Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Steven Liu
Dekan des Fachbereichs:	Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik

Band 14

Jingpeng Guan

**Einfluss der Energieeffizienzklasse
auf das Einschalt- und Hochlaufverhalten
von Drehstrom-Käfigläufermotoren**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Aachen 2019

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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6583-1

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

0.1	Schreibweise der Formelzeichen	iv
0.2	Symbolverzeichnis	iv
1	Motivation und Zielsetzung der Arbeit	1
2	Entwicklung hocheffizienter Drehstromkäfigläufermotoren	7
2.1	Methode zur Effizienzsteigerung der Drehstromkäfigläufermotoren	7
2.2	Effizienzklassen der Versuchsmotoren	10
3	Modellierung des Asynchronmotors mit symmetrischer Speisung	13
3.1	Modellierung des Drehstromkäfigläufermotors	13
3.2	Berechnung der Motorparameter	17
3.2.1	Ständerstrangwiderstand R_1	17
3.2.2	Ständerstranginduktivität L_1	17
3.2.3	Die Gegeninduktivität M :	19
3.2.4	Läuferstrangwiderstand R_2	20
3.2.5	Läuferstranginduktivität L_2	21
3.3	Modellierung des mechanischen Systems	22
3.4	Lösen des Differentialgleichungssystems	24
4	Modellierung des Stromverdrängungseffekts	27
4.1	Stromverdrängungseffekt im Läufer	27
4.2	Berechnung der stationären Stromverdrängungskoeffizienten mittels des Teilleiterverfahrens	30
4.3	Modellierung des Stabs mit dem Ersatznetzwerk	32

5	Modellierung des Eisensättigungseffekts	35
5.1	Hauptflusssättigung	37
5.1.1	Motormodellanpassung für Hauptflusssättigung	37
5.1.2	Berechnung der Sättigungskennlinie $k_{sät} = f(I_\mu)$	38
5.2	Streuflusssättigung	42
5.2.1	Methode mit Nutschlitzfaktor	43
5.2.2	Methode von Norman	46
5.2.3	Motormodellanpassung für Streuflusssättigung	50
6	Parameter-Kennlinien mittels Finite-Element-Analyse	53
6.1	Berechnung der Hauptinduktivität	53
6.2	Bestimmung der Streuinduktivitäten und des Stabwiderstandes .	56
7	Prüfstandaufbau für die Betrachtung transienter Vorgänge	61
7.1	Messaufbau	61
7.2	Bestimmung der Parameter des mechanischen Systems	65
7.2.1	Bestimmung des Federdämpfersystems	65
7.2.2	Bestimmung des Trägheitsmomentes der Asynchronma- schine	66
7.2.3	Bestimmung des Trägheitsmomentes der Gleichstrom- maschine	66
8	Messtechnische Untersuchung der klassischen Anlaufverfah- ren	69
8.1	Direktanlauf	69
8.1.1	Simulation im Vergleich zu Messung	70
8.1.2	Messung des Anlaufmomentes durch den Reversiersuch .	75
8.2	Stern-Dreieck-Anlauf	78
8.2.1	Aufbau	79
8.2.2	Simulation und Vergleich zur Messung	81
8.2.3	Betrachtung der „günstigen“ und der „ungünstigen“ Schal- tungsvariante	89
8.3	Unterbrechungsloser Stern-Dreieck-Anlauf	90
8.3.1	Simulation des unterbrechungslosen Stern-Dreieck-Anlaufs	93

9	Anlauf mit Sanftstarter	97
9.1	Allgemeine Funktionsweise des Sanftstarters	98
9.2	Betrachtung des Sanftstarters im Betrieb	101
9.2.1	Bestimmung der Zündstrategie durch Messungen mit motorischer Last	103
9.2.2	Bestimmung des Verhältnisses zwischen Anfangsspannung und Stromlücke	106
9.3	Motormodelle mit unsymmetrischer Speisung	108
9.3.1	Allgemeines Modellierungsverfahren bei Motoren mit unsymmetrischer Speisung	109
9.3.2	Vorgehensweise beim Betrieb am Sanftstarter	110
9.4	Simulation des Sanftstarteranlaufs	116
9.4.1	Umschaltungsbedingungen zwischen den vier Betriebszuständen in der Simulation	117
9.4.2	Vergleich von Simulation und Messung	121
10	Zusammenfassung	127
A		129
A.1	Versuchsmotoren	129
A.2	Vorbereitung: $B_\delta \sim f(V_\delta + V_{z1} + V_{z2})$	136
A.2.1	Carterfaktor und magnetischer Spannungsabfall am Luftspalt	136
A.2.2	magnetischer Spannungsabfall im Zahnbereich	137
A.3	Berechnung des Spannungsabfalls am Joch	138
A.4	Variation von \hat{V}_p mit Intervalschachtelungsverfahren [Kan07]	139
A.5	Fourier-Zerlegung	140
A.6	Motormodellierung bei unsymmetrischer Speisung in Dreieckschaltung („günstig“)	142
A.7	Motormodellierung bei unsymmetrischer Speisung in Dreieckschaltung („ungünstig“)	143