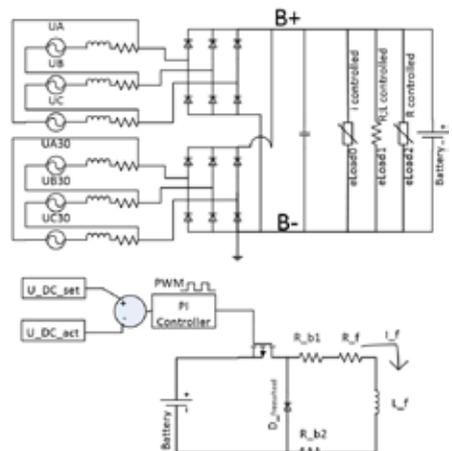
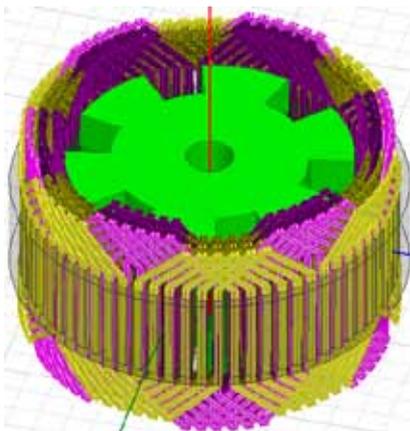


Dmytro Bilyi

Der Klauenpolgenerator im KFZ-Bordnetz: Modellierung, Parameterbestimmung, experimentelle Validierung



Der Klauenpolgenerator im KFZ-Bordnetz: Modellierung, Parameterbestimmung, experimentelle Validierung

Dmytro Bilyi

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling
2. Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog

Die Dissertation wurde am 24.11.2016 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektro- und Informationstechnik am 14.12.2016 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 27.11.2017 statt.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Weyh

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog

Tag der Promotion: 27.11.2017

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 29

Dmytro Bilyi

**Der Klauenpolgenerator im KFZ-Bordnetz:
Modellierung, Parameterbestimmung,
experimentelle Validierung**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5829-1

ISSN 1863-0707

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

Vorerst möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Forschung, Entwicklung und Ausführung dieser Dissertationsarbeit unterstützt haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber des Lehrstuhls "Elektrische Antriebstechnik und Aktorik" der Universität der Bundeswehr München Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling, der mich durch seine fachliche Kompetenz, seine allseitige Unterstützung, sein unbegrenztes Vertrauen und viele Freiheitsgrade in der wissenschaftlichen Tätigkeit stets unterstützt und motiviert hat.

Den EAA-Lehrstuhlkollegen Herrn Dr.-Ing. Harald Hofmann, Herrn Dr.-Ing. Benno Lange, Herrn Dr.-Ing. Hans-Joachim Köbler und Herrn Dr.-Ing. Johann Sebastian Mayer gilt für eine technische Unterstützung im Labor, organisatorische Unterstützung in alltäglichen Angelegenheiten sowohl innerhalb als auch außerhalb des Arbeitslebens und stetige wissenschaftliche Unterstützung ein großer herzlicher Dank.

Danken möchte ich meinem Bruder und Kollegen Herrn M.Sc. Volodymyr Bilyi, der mich immer wissenschaftlich und persönlich unterstützt hat.

Auch muss ich mich bei meinen Kollegen und jetzt auch Freunden Herrn M.Eng. Yevgen Polonskiy, M.Sc. Oleg Moros, M.Sc. Sachar Spas und Dr.-Ing. Hans-Christian Lahne für zahlreiche wissenschaftliche Gespräche und rege Diskussionen bedanken.

Meinen Eltern möchte ich für meine Geburt, Erziehung und dafür wie sie mich großgezogen haben, danken.

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation der Dissertation	10
1.1. Hauptanforderungen an Klauenpolgeneratoren mit Gleichrichtern	11
1.2. Herkömmliche Klauenpolgeneratoren.....	13
2. Parameterbestimmung des Klauenpolgenerators.....	16
2.1. Vermessungen und "lumped parameter"-Modell der Induktivität der elektrischen Maschine abhängig von Frequenz und Amplitude des Stroms	16
2.1.1. Bestimmung der Induktivität.....	19
2.1.2. Messungen am Prüfstand	19
2.1.3. Zeigerdiagramm für Testfall	20
2.1.4. Ersatzschaltbild für Testfall	21
2.1.5. Berechnung der Induktivität und Postprocessing	21
2.1.6. Validierung innerhalb des Modells und durch Messungen	25
2.1.7. Kapitelzusammenfassung	28
2.2. Bestimmung der Induktivitäten abhängig von Rotorposition	28
2.2.1. Abstrakt und Einführung.....	28
2.2.2. Analytisches Verfahren der Bestimmung und Modellierung der Induktivitäten 31	
2.2.3. FFT-Verfahren der Bestimmung und Modellierung der Induktivitäten	34
2.2.4. Kapitelzusammenfassung	35
2.3. Bestimmung der d- und q-Induktivitäten der Schenkelpol-Synchronmaschinen anhand des Stillstandfrequenzgangtests.....	36
2.3.1. Abstrakt.....	36
2.3.2. Einführung.....	36
2.3.3. SSFRT für sechsphasige doppel-dreieck-geschaltete Schenkelpol-Synchronmaschine	37
2.3.4. Ausrichtung des Rotors in d- und q-Positionen	42
2.3.5. Bestimmung der Induktivitäten	46

2.3.6.	Bestimmung der Induktivitäten in Zwischenpositionen.....	57
2.3.7.	Alternative Methode	57
2.3.8.	Kapitelzusammenfassung	60
3.	Mathematische Beschreibung des Klauenpolgenerators.....	61
3.1.	Abstrakt	61
3.2.	Einführung	61
3.3.	Stand der Technik und Vergleich der Methoden der mathematischen Beschreibung der mehrphasigen elektrischen Maschinen	62
3.4.	Entkoppelte dq-Modellierung eines Klauenpolgenerators.....	67
3.4.1.	Wichtige Begriffe und Eigenwertproblem	67
3.4.2.	Berechnung der Induktivitätsmatrix	71
3.5.	Kapitelzusammenfassung.....	74
4.	Modellierung in Simulink/MATLAB.....	75
4.1.	Verlustanalyse in der Leistungselektronik.....	75
4.1.1.	Berechnung der Verluste.....	79
4.1.2.	Vermessung einer Diode am Prüfstand und Berechnung der Verluste anhand von Messergebnissen. Verifikation des Modells	81
4.1.3.	Durchlassverluste in einigen Betriebspunkten und Vergleich mit Energiebedarf der verschiedenen Belastungen	84
4.1.4.	Kapitelzusammenfassung	85
4.2.	Modellbildung des KFZ-Bordnetzes in Simulink/MATLAB	85
4.2.1.	Modell des sechsphasigen Schenkelpolgenerators (KFZ-Klauenpolgenerator) mit Regelung	87
4.2.2.	Modell der Gleichrichterbrücken.....	90
4.2.3.	Restliche Komponenten des KFZ-Bordnetzes	91
4.2.4.	Verifizierung des Modells und Simulationsergebnisse	92
4.2.5.	Simulation des Testfalls „Einfluss der Lichtmaschine auf Startverhalten des Verbrennungsmotors“	94
4.2.6.	Messung des Testfalls „Einfluss der Lichtmaschine auf Startverhalten des Verbrennungsmotors“ im Labor	95

4.2.7. Kapitelzusammenfassung	95
5. Auslegung und Design eines sechsphasigen Klauenpolgenerators mit FEM	97
5.1. Einführung	97
5.2. Modellentwurf	99
5.3. Simulationsergebnisse.....	104
5.3.1. Zeitlicher Verlauf der induzierten Spannungen	104
5.3.2. Bordnetzspannung auf DC-Seite.....	106
5.3.3. Drehmomentverlauf.....	106
5.3.4. Rotorstrom und Laststrom auf DC-Seite	106
5.4. Kapitelzusammenfassung.....	108
6. Prüfstand	110
6.1. Beschreibung von Prüfstand und Komponenten	110
6.1.1. Komponenten des Prüfstandes im Detail und deren Inbetriebnahme	116
6.1.2. Inbetriebnahme der elektronischen Last	128
6.1.3. Inbetriebnahme des Stromumrichters	131
6.1.4. Kapitelzusammenfassung	136
6.2. Neuartiger Prüfstand für Fahrzeugbordnetz mit hervorragenden Genauigkeit, Auflösung und Datenrate.....	139
6.2.1. Abstrakt.....	139
6.2.2. Einführung.....	140
6.2.3. Konzept und Struktur des Prüfstandes.....	140
6.2.4. Aufteilung und Layouten der Hauptkomponenten innerhalb der Benutzeroberfläche.....	141
6.2.5. Verifikation des Prüfstands anhand spezielles Testfalls.....	150
6.2.6. Kapitelzusammenfassung	151
7. Zusammenfassung der Dissertation	154
Literaturverzeichnis.....	156
Abbildungsverzeichnis	167

Anhang A	175
Anhang B	177
Anhang C	178
Anhang D	179
Anhang E	180
Anhang F	181
Anhang G	182
Anhang H	183
Anhang I	185