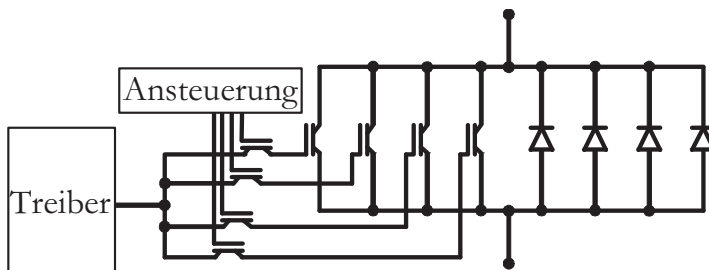


Forschungsberichte
Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

Klaus Mühlbauer

Regelung von Zwei-Generator- Bordnetzen und Wirkungsgradsteigerung der Leistungselektronik in Teillast



Regelung von Zwei-Generator-Bordnetzen und Wirkungsgradsteigerung der Leistungselektronik in Teillast

Klaus Mühlbauer

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

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling
2. Prof. Dr.-Ing. Thomas Dürbaum

Die Dissertation wurde am 20.09.2013 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 28.11.2013 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 13.12.2013 statt.

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 13

Klaus Mühlbauer

**Regelung von Zwei-Generator-Bordnetzen und
Wirkungsgradsteigerung der Leistungselektronik
in Teillast**

Shaker Verlag
Aachen 2014

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., 2013

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2765-5

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

Meinen Eltern

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der FEAAM GmbH und am Lehrstuhl für Elektrische Antriebstechnik und Aktorik der Universität der Bundeswehr München entstanden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling für die fachliche und persönliche Betreuung dieser Arbeit, für seinen steten Rückhalt, für sein großes Vertrauen sowie für das Ermöglichen der vielfältigen Weiterbildungsmaßnahmen. Ebenso möchte ich mich herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Dürbaum für die intensive Durchsicht und Korrektur der Arbeit sowie bei Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Mathias Richter für den Vorsitz des Promotionsausschusses bedanken.

Allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Elektrische Antriebstechnik und Aktorik und der FEAAM GmbH danke ich für die kreative, konstruktive und kollegiale Zusammenarbeit. Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Hans-Joachim Köbler für die unkomplizierte, verlässliche und warmherzige Unterstützung in organisatorischen Belangen, Herrn Dr.-Ing. Benno Lange für die unermüdliche und ideenreiche Unterstützung bei Auf- und Umbauten im Labor und Herrn Dr.-Ing. Harald Hofmann für die stets prompten und tatkräftigen Hilfsmaßnahmen in Sachen IT und Software. Vielen Dank auch an Dr.-Ing. Johannes Klötzl und an Dipl.-Ing. Johann S. Mayer für die gemeinsame Teilnahme an internationalen Konferenzen.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Studenten, die mich mit ihren Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten in den unterschiedlichen Projekten unterstützt haben, besonders bei Herrn M.Sc. Fabian Bachl sowie Herrn M.Sc. Michael Fuchs.

Ein großer Dank gilt meiner Freundin Kathrin für ihr unentwegtes Verständnis, ihre beständige Motivation und ihren beharrlichen Glauben an mich!

Von ganzem Herzen danke ich meinen Eltern, die mir die Ausbildung ermöglicht haben. Vielen Dank für die Förderung und Unterstützung sowie für ihr Verständnis!

Regensburg, im April 2014

Klaus Mühlbauer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	15
2	Regelung von Zwei-Generator-Bordnetzen	19
2.1	Elektrische Energieversorgung im konventionellen Flugzeug	22
2.2	Elektrische Energieversorgung eines More Electric Aircraft	23
2.3	Elektrische Energieerzeugung eines More Electric Aircraft	27
2.4	Die Zwei-Generatoren-Topologie	27
2.5	Regelung der Zwei-Generatoren-Topologie	30
2.5.1	Startergenerator	31
2.5.2	Generator	38
2.5.3	Regelungsstrategien für die Zwei-Generatoren-Topologie	58
2.6	Verifikation der Zwei-Generatoren-Topologie	71
2.6.1	Analyse der Spannungsregelung des Startergenerators	73
2.6.2	Analyse der Spannungsregelung des Generators	75
2.6.3	Analyse der Zwei-Generatoren-Topologie nach dem Konzept 1	77
2.6.4	Analyse der Zwei-Generatoren-Topologie nach dem Konzept 2	82
2.6.5	Analyse der Zwei-Generatoren-Topologie nach dem Konzept 3	83
2.6.6	Analyse der Zwei-Generatoren-Topologie nach dem Konzept 4	85
2.6.7	Analyse der Zwei-Generatoren-Topologie nach dem Konzept 5	89
2.6.8	Vergleich der Konzepte	93
2.7	Zusammenfassung und Ausblick	94
3	Wirkungsgradsteigerung der Leistungselektronik in Teillast	97
3.1	Aufbau elektrischer Antriebssysteme	98
3.2	Elektrischer Traktionsantrieb eines Elektrofahrzeugs	99

3.2.1	Elektrische Maschine	102
3.2.2	Inverter	109
3.3	Simulationsplattform	122
3.3.1	Aufgabe und Zielsetzung	123
3.3.2	Simulationssoftware	124
3.3.3	Struktur der Fahrzeugsimulationsplattform.....	126
3.3.4	Modell der Fahrwiderstände	128
3.3.5	Modell des elektrischen Traktionsantriebs.....	131
3.3.6	Modell des Derating.....	132
3.3.7	Modell der elektrischen Maschine.....	133
3.3.8	Modell des Inverters	136
3.4	Energieeffizienz der elektrischen Maschine	147
3.5	Energieeffizienz des Inverters	150
3.6	Steigerung der Energieeffizienz des Inverters in Teillast.....	162
3.6.1	Verfahren zur Verlustleistungsreduzierung	163
3.6.2	Optimierung der Verluste	165
3.6.3	Simulationsbasierte Verifikation.....	168
3.6.4	Thermik des Inverters.....	182
3.6.5	Lebensdauer des Inverters	184
3.7	Messtechnische Verifikation	191
3.8	Energieeffizienz des elektrischen Antriebs.....	199
3.9	Energieeffizienz-optimale Anpassung des Inverters	202
3.10	Zusammenfassung und Ausblick.....	205
4	Zusammenfassung	207
5	Anhang	209
5.1	Zwei-Generatoren-Topologie.....	209
5.2	Kennfelder der elektrischen Maschine	212
5.3	Algorithmus zur Temperaturzyklendetektion	219
5.4	Wirkungsgradsteigerung der Leistungselektronik in Teillast.....	222
	Variablen- und Parameterverzeichnis.....	225
	Abbildungsverzeichnis.....	233
	Tabellenverzeichnis.....	239

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	241
Literaturverzeichnis.....	243