

Manuel Fischer

Emulation elektrischer Maschinen mit exakter Nachbildung rippelbehafteter Phasenströme

Emulation elektrischer Maschinen mit exakter Nachbildung rippelbehafteter Phasenströme

Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Manuel Fischer, M.Sc.
geboren in Esslingen am Neckar

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Roth-Stielow
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Michael Braun
Tag der mündlichen Prüfung: 15.03.2023

Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe
der Universität Stuttgart

2023

Berichte aus der Elektrotechnik

Manuel Fischer

**Emulation elektrischer Maschinen mit exakter
Nachbildung rippelbehafteter Phasenströme**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2023

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9113-7

ISSN 0945-0718

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

Meiner Familie

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe der Universität Stuttgart.

Mein ganz besonderer Dank gilt Institutsleiter Herrn Professor Dr.-Ing. Jörg Roth-Stielow für die Betreuung und stete Förderung dieser Arbeit sowie für die zahlreichen fruchtbaren Diskussionen und wertvollen Ratschläge.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Braun danke ich für die freundliche Übernahme des Mitberichts und für das Interesse an dieser Arbeit.

Für die Anregung der Arbeit, die Kooperation und den interessanten Fachaustausch bedanke ich mich bei Herrn Jürgen Halfmann und seinen Mitarbeitern, die der Abteilung Electric Drives der Robert Bosch GmbH am Standort Bühl angehören.

Ein herzliches Dankeschön möchte ich an alle Kolleginnen und Kollegen des ILEA richten. Neben zahlreichen wertvollen und hilfreichen Fachdiskussionen und äußerst erinnerungswürdigen fachlichen und nichtfachlichen Aktivitäten sind Freundschaften entstanden, die unsere gemeinsame Dienstzeit lange überdauern mögen.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Frau Evelin Eiselt für die Erstellung der vielen Zeichnungen, bei den Mitarbeitern der mechanischen Werkstatt unter der Leitung von Herrn Hermann Kattner für die Umsetzung der mechanischen Aufbauten und bei Herrn Edmund Fridrich und Herrn Hamidullah Baray für die technische Unterstützung bei den Laboraufbauten.

Des Weiteren danke ich allen Studierenden, die im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Ganz herzlich möchte mich bei meiner Familie bedanken, die mir mein Studium ermöglicht hat und mich stets bei meiner Promotion ermutigt und unterstützt hat.

Stuttgart, im April 2023

Manuel Fischer

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	12
Formelzeichen	14
Kurzfassung	18
Abstract	20
1 Einleitung	22
1.1 Power Hardware-in-the-Loop Maschinenemulation	22
1.2 Stand der Technik	25
1.2.1 Leistungselektronische Stellglieder und deren Ansteuerung zur Nachbildung elektrischer Maschinen	26
1.2.2 Modellierung des Maschinenverhaltens einer permanentenerregten Synchronmaschine	35
2 Grundlagen zur Drehfeldmaschine und zum Antriebswechselrichter	43
2.1 Drehfeldmaschinen	43
2.2 Grundswingungsbetrachtung der PMSM	45
2.3 Nichtlinearitäten und Oberschwingungen	49
2.3.1 Maschinenkonstruktion und Material	49
2.3.2 Fertigungstoleranzen	53
2.4 Eigenschaften der Pilotmaschine	55
2.5 Eigenschaften und Regelung des Antriebswechselrichters	57
3 Funktionsweise und Ansteuerung des Maschinenemulators	61
3.1 Funktionsweise des Maschinenemulators	61
3.2 Berechnung der Gegenspannung	63
3.3 Anforderung an das leistungselektronische Stellglied	68
3.4 Realisierung der Emulator Ansteuerung	72
3.5 Auslegung der Koppeldrossel	75

4	Topologien leistungselektronischer Stellglieder	82
4.1	Vorüberlegungen zu den Messungen	83
4.2	Mehrzweiger Wechselrichter	84
4.2.1	Konzept des LESG	86
4.2.2	Ansteuerung des mehrzweigen Wechselrichters	88
4.2.3	Realisierung des mehrzweigen Wechselrichters	90
4.2.4	Messergebnisse	93
4.2.5	Ansatz zur Verringerung der zusätzlich eingebrachten Stromschwankung	97
4.3	Dreiphasiger Linearverstärker	100
4.3.1	Konzept des LESG	100
4.3.2	Ansteuerung des dreiphasigen Linearverstärkers	103
4.3.3	Realisierung des dreiphasigen Linearverstärkers	104
4.3.4	Messergebnisse	106
4.4	Wechselrichter mit Ausgangsfilter	108
4.4.1	Konzept des LESG	108
4.4.2	Ansteuerung des Wechselrichters mit Ausgangsfilter	109
4.4.3	Auslegung der Filterkomponenten	111
4.4.4	Realisierung des Wechselrichters mit Ausgangsfilter	114
4.4.5	Messergebnisse	115
4.5	Vierpunkt-Wechselrichter mit variabel einstellbaren Potenzialen	118
4.5.1	Konzept des LESG	118
4.5.2	Ansteuerung des Vierpunkt-Wechselrichters	119
4.5.3	Auslegung der Filterkomponenten	123
4.5.4	Realisierung des Vierpunkt-Wechselrichters	125
4.5.5	Messergebnisse	125
4.6	Vergleich der vorgestellten Topologien	128
4.6.1	Qualität der nachgebildeten Ströme	128
4.6.2	Hardwareaufwand	129
4.6.3	Ansteueraufwand	130
4.6.4	Schaltstörungen	131
4.6.5	Effizienz	131
4.6.6	Skalierbarkeit auf mehrere Phasen	132
4.6.7	Skalierbarkeit auf höhere Spannungen	133
4.6.8	Zusammenfassung	133

5	Echtzeitfähiges Maschinenmodell	134
5.1	Aufbau des Flussmodells	134
5.2	Verfahren zur Parametrierung des Flussmodells	136
5.3	Ausblick: Nachbildung der Prüfingmaschine	138
6	Zusammenfassung und Ausblick	142
A	Herleitungen verschiedener Rechnungen	145
A.1	Einstellparameter des DUT Stromreglers	145
A.2	Spannungsschwankungsbreite des Wechselrichters mit Ausgangsfilter	149
A.3	Minimale Zeitkonstante des Spannungsreglers beim Wechselrichter mit Aus- gangsfilter	155
A.4	Einstellparameter des zeitdiskreten Spannungsreglers beim Wechselrichter mit Ausgangsfilter	158
A.5	Einstellparameter des überlagerten Spannungsreglers beim Vierpunkt-Wech- selrichter	164
B	Realisierung der Koppeldrossel	167
C	Verwendete Bauelemente in den Hardwareaufbauten	169
C.1	DUT Maschinenwechselrichter	169
C.2	Mehrzweigiger Wechselrichter	170
C.3	Dreiphasiger Linearverstärker	171
C.4	Wechselrichter mit Ausgangsfilter	172
C.5	Vierpunkt-Wechselrichter mit variablen Ausgangspotenzialen	173
	Eigene Veröffentlichungen und studentische Arbeiten	174
	Literatur	178
	Lebenslauf	193