

Automatisierte Inbetriebnahme der Drehzahlregelung für rotierende Direktantriebe mit hohen Rundlaufanforderungen

Zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik
der Universität Paderborn
vorgelegte Dissertation
von
Dipl.-Ing. Harald Wertz
aus Soest

Referent: Prof. Dr.-Ing. H. Grotstollen
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. F. Dörrscheidt
Tag der mündlichen Prüfung: 28. Januar 2005

Paderborn 2005

D 14-206

Berichte aus der Steuerungs- und Regelungstechnik

Harald Wertz

**Automatisierte Inbetriebnahme
der Drehzahlregelung für rotierende Direktantriebe
mit hohen Rundlaufanforderungen**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2005

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2005

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4007-1

ISSN 0945-1005

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik der Universität Paderborn.

Dem Fachgebietsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Grotstollen, danke ich herzlich für die fachliche Betreuung, für die mir gewährten Freiräume sowie für die Begutachtung der Arbeit.

Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Dörrscheidt, der mir in seiner Funktion als Korreferent zahlreiche wertvolle Hinweise gegeben hat.

Während meiner Zeit am obengenannten Fachgebiet hatte ich das große Glück, in einem in jeder Hinsicht vorzüglichen Kollegium an vielen interessanten Themen arbeiten zu können. Allen ehemaligen Kollegen danke ich für die stets angenehme und fruchtbare Zusammenarbeit. Besonders erwähnen möchte ich die Herren Dr.-Ing. Frank Schütte, Dr.-Ing. Stephan Beineke und Dr.-Ing. Norbert Fröhleke, die mich bei meinem Einstieg und darüberhinaus besonders unterstützt haben. Auch den ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Markus Henke und Dr.-Ing. Thomas Schulte danke ich für die stets offene und gute Zusammenarbeit.

Mein Dank gilt ebenso den von mir betreuten Studenten, die mit ihren Studien- und Diplomarbeiten wertvolle Beiträge zum Gelingen der Arbeit geleistet haben.

Frau Silke Flächtig danke ich vielmals für das gründliche Korrekturlesen des Manuskriptes.

Der größte Dank gebührt allerdings meiner Frau Anke und meinen Töchtern Marlene und Paula, die mir stets verständnisvoll zur Seite standen und damit maßgeblich zur erfolgreichen Fertigstellung der Arbeit beigetragen haben.

Harald Wertz

Soest, im März 2005

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Anforderungen an rotierende Direktantriebe	5
2.1	Rundlaufgüte von permanenterregten Synchronmotoren	6
2.2	Konstruktive Besonderheiten von Direktantrieben	9
2.3	Direktantrieb mit Transversalflussmotor	10
3	Regelungstechnisches Modell des Synchron-Transversalflussmotors 11	
3.1	Begriffsdefinitionen	11
3.2	Theoretische Modellbildung	14
3.2.1	Flussverkettung eines Wicklungsstrangs	15
3.2.2	Raumzeiger der Polradflussverkettung	17
3.2.3	Spannungsgleichung und Drehmomentbildung	18
3.3	Experimentelle Bestimmung von Motorparametern und Kennlinien	23
3.3.1	Rastmomentkennlinie	24
3.3.2	Elektrische Motorparameter	26
3.3.3	Formfunktionen	28
4	Verbesserung des Rundlaufs durch regelungstechnische Maßnahmen	33
4.1	Stromregelung	33
4.1.1	Regelstrecke	34
4.1.2	Reglerentwurf	36
4.1.3	Störgrößenaufschaltung	40
4.1.4	Messergebnisse	41
4.2	Linearisierung der Drehmomentbildung	43
4.2.1	Stromsollwertrechner	44
4.2.2	Messergebnisse	45
4.3	Beschleunigungsregelung	46

5	Störmomentkompensation mit Beobachter	51
5.1	Beobachter-Entwurfsverfahren	52
5.2	Störmomentdämpfung	56
5.3	Übertragung des Lage-Quantisierungsfehlers auf die Stellgröße	57
5.4	Robustheit gegenüber Modellungenauigkeiten	60
6	Sensoren, Messfehler und Signalaufbereitung	67
6.1	Einfluss von Messfehlern bei der Strangstrommessung	68
6.1.1	Fehlerbehafteter Transformationswinkel	69
6.1.2	Messrauschen	70
6.1.3	Offset- und Verstärkungsfehler	70
6.2	Lagemessung mit hochauflösenden Inkrementalgebern	72
6.3	Messung der Winkelbeschleunigung	74
6.3.1	Messfehler	76
6.3.2	Korrektur des gemessenen Beschleunigungssignals	76
6.4	Drehzahlberechnung	80
7	Automatisierte Identifikation der Mechanik	83
7.1	Struktur der Regelstrecke	84
7.2	Systemanregung mit Zweipunkt-Drehzahlregler	86
7.3	Systemanregung zur Identifikation des Einmassensystems	89
7.4	Identifikation des Einmassensystems	91
7.5	Systemanregung für die Frequenzgangmessung	92
7.6	Identifikation des Zweimassensystems	96
8	Automatisierter Entwurf des Drehzahlreglers	107
8.1	Entwurf eines optimalen Störgrößenreglers	108
8.2	Formulierung der Regleranforderungen im Frequenzbereich	112
8.2.1	Hinreichendes Kriterium für robuste Stabilität	112
8.2.2	Berücksichtigung der Stellgrößenbegrenzung	114
8.2.3	Berücksichtigung des Messrauschens	114
8.3	Drehzahlreglerentwurf für Einmassensysteme	115

8.3.1 Analogie zum PI-Reglerentwurf nach dem Symmetrischen Optimum . . .	115
8.3.2 Allgemeiner Reglerentwurf auf optimales Störverhalten.	116
8.4 Drehzahlreglerentwurf für schwingungsfähige Zweimassensysteme	123
8.4.1 Optimierung des Störverhaltens für die Drehzahlregelung mit Zweimassensystem	126
8.4.2 Entwurfsbeispiel	127
9 Zusammenfassung	131
Anhang A	135
Anhang B	143
Anhang C	147
Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen	151
Literaturverzeichnis.	159