Modellprädiktive Optimierung drehzahlvariabler Verstellpumpen

Von der Fakultät Maschinenwesen

der Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation

Dipl.-Ing. Johannes Willkomm, MBA

geb. am 7. Juli 1986 in Saarburg

Tag der Einreichung:	03.02.2016
Tag der Verteidigung:	23.06.2016
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. J. Weber
	Prof. Dr.-Ing. R. Werner
Vorsitzender der Promotionskommission:	Prof. Dr.-Ing.habil T. Schmidt

Fluidmechatronische Systeme

Johannes Willkomm

Modellprädiktive Optimierung drehzahlvariabler Verstellpumpen

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4705-9
ISSN 2196-2340

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

Die vorliegende Arbeit ist in einer Zusammenarbeit des Institutes für Fluidtechnik an der Technischen Universität Dresden mit der Bosch Rexroth AG in Lohr am Main entstanden. Für diese Kooperation als Fundament meiner Promotion möchte ich besonders dem Institutsdirektor Prof. Dr.-Ing. Jürgen Weber sowie meinem Abteilungsleiter Matthias Wahler danken. Beide haben in den vergangenen Jahren meine wissenschaftliche Arbeit sehr interessiert und kritisch begleitet und mich in zahlreichen Diskussionen mit Ihrem fachlichen Rat unterstützt. Darüber hinaus möchte ich Prof. Dr.-Ing. Ralf Werner vom Institut für Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe an der Technischen Universität Chemnitz für sein Interesse an meiner Arbeit und die Begutachtung derselbigen danken.
Auf meinem Weg zur Promotion haben zahlreiche Kolleginnen und Kollegen aus dem universitärem wie aus dem industriellen Umfeld mit Ihren Beiträgen zum erfolgreichen Abschluss beigetragen. Besonders möchte ich mich an dieser Stelle bei Alexander Schmitt, Gerold Liebler und Stefan Rothenbücher bedanken, die immer ein offenes Ohr für meine Belange hatten und mich von den theoretischen Ansätzen über deren praktischen Nachweis bis hin zum Feinschliff dieser Schriftfassung unterstützt haben. Ebenso hervorheben möchte ich die Kollegen Ralf Bonefeld und Henno Buschmann mit denen ich in konstruktiven und zugleich amüsanten Diskussionsrunden die Fortschritte meiner Arbeit beleuchten konnte. Für die Unterstützung bei der mich all zeit begleitenden Literaturrecherche habe ich zahlreichen Dresdner Kollegen zu danken, deren Aufgeschlossenheit ich besonders auf der ein oder anderen Konferenz zu schätzen wusste. Nennenswert ist an dieser Stelle auch die Einführung von Tobias Radermacher in die Hohe Kunst der öffentlichen Projektanträge.
Für die Bereitstellung eines Prüfstandes zur Validierung der gewonnenen Erkenntnisse möchte ich Albert Köckemann danken. Für dessen Inbetriebnahme sowie die geduldige Unterstützung während den Messungen gilt mein besonderer Dank darüber hinaus den Kollegen Christian Lebert und Benjamin Schwenker. Daneben möchte ich mich bei den Studenten Josephine Stolze und Hamdi Choubani bedanken, die ich im Rahmen meiner Promotion betreuen durfte und, die mit Ihrer Begeisterung für die Aufgabenstellung fruchtbare Beiträge geleistet haben.

Nicht vergessen möchte ich in diesem Vorwort die beispielhafte Organisation des Bosch Doktorandenprogrammes und alle daran Beteiligten hinter den Kulissen. Ob interessante Konferenzen, spannende Workshops oder die vielen Freizeitevents, es gab tolle Möglichkeiten über den eigenen Tellerrand hinaus zu schauen.
Zu guter Letzt möchte ich ein besonders großes Dankeschön an meine Frau May aussprechen, die mir in den Jahren der Promotion stets mit Geduld und Nachsicht für deren zeitintensive Bearbeitung zur Seite stand. Bei meinen Eltern und meiner Familie möchte ich mich für den gewährten Rückhalt und die Förderung meiner akademischen Ausbildung bedanken.

Aschaffenburg, im Herbst 2015 Johannes Willkomm

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Stand der Technik **4**

2.1 Ventilsteuerung 4

2.2 Verdrängersteuerung 6

2.2.1 Verstellpumpen mit variablem Fördervolumen 7

2.2.2 Konstantpumpen mit variabler Drehzahl 11

2.3 Drehzahlvariable Verstellpumpen 12

2.3.1 Hydromechanische Regelung 13

2.3.2 Elektrohydraulische Regelung 15

2.4 Optimierung der Energieeffizienz 16

2.5 Steigerung der Prozessdynamik 21

3 Ableitung der Zielstellung **23**

3.1 Einschränkungen der bekannten Lösungen 23

3.2 Anforderungen an neue Betriebsstrategien 26

4 Modellprädiktive Optimierung **27**

4.1 Grundlagen und Vorteile modellprädiktiver Regelung 28

4.1.1 Definition individueller Zielfunktionen 30

4.1.2 Integration von System- und Prozessgrenzen 31

4.2 Adaption für drehzahlvariable Verstellpumpen 32

4.2.1 Energieeffizienz 33

4.2.2 Prozessdynamik 33

4.2.3 Applikationen - Potentiale und Einsatzbedingungen 34

5 Modellbildung und -validierung **36**

5.1 Frequenzumrichter 36

5.2 Elektrischer Antrieb 39

5.2.1 Drehmomentbildung eines permanentmagneterregten Synchronmotors 40

5.2.2 Elektrische Verluste 42
5.2.3 Lastabhängigkeit des Beschleunigungsvermögens 43
5.3 Verstellpumpe 44
5.3.1 Modellierung der Leckageverluste 45
5.3.2 Modellierung der Reibungsverluste 47
5.3.3 Modellierung der Verstellverluste 49
5.3.4 Druckabhängigkeit der Verstelldynamik 52
5.4 Prüfstandskonzept 54
5.5 Modellvalidierung 58

6 Das Antriebssystem als Optimierungsaufgabe 63
6.1 Ableitung der Optimierungsaufgabe 63
6.2 Integration der Systemgrenzen 65
6.2.1 Drehzahl 65
6.2.2 Fördervolumen 66
6.2.3 Drehmoment und Motordynamik 66
6.2.4 Verstelldynamik der Schwenkscheibe 68
6.2.5 Leistungsbegrenzung des Antriebssystems 69
6.3 Transformation der Optimierungsaufgabe 70
6.3.1 Quadratische Optimierung 71
6.3.2 Prinzip des gleitenden Horizonts 76

7 Optimierung der Energieeffizienz 81
7.1 Betrieb mit rückspeisefähigem Frequenzumrichter 81
7.1.1 Ableitung der Zielfunktion 82
7.1.2 Diskussion der Ergebnisse 88
7.1.3 Berücksichtigung von Systemgrenzen 101
7.2 Betrieb mit nicht-rückspeisefähigem Frequenzumrichter 104
7.2.1 Ableitung der Zielfunktion 105
7.2.2 Diskussion der Ergebnisse 106
7.3 Diskussion des zeitlichen Horizontes für die modellprädiktive Optimierung 112

8 Optimierung der Prozessdynamik 115
8.1 Prädiktive Dynamikoptimierung 116
8.2 Zweipunkt-Optimierung 117
8.2.1 Maximale Schwenkdynamik als Optimalitätsbedingung 119
8.2.2 Ableitung der Optimierungsaufgabe 122

8.2.3 Iterativer Lösungsalgorithmus 125
8.3 Diskussion der Ergebnisse 129

9 Zusammenfassung und Ausblick **141**

10 Formelzeichen und Abkürzungen **144**