

Technische Universität Dresden

**Analyse und Auslegung
energieeffizienter Servoantriebssysteme**
- am Beispiel von Punkt-zu-Punkt-Bewegungsaufgaben -

Kenneth Benath

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. Klaus Röbenack

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann Tag der Einreichung: 03.12.2016

Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker Tag der Verteidigung: 15.06.2017

Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und
Antrieben

Band 11

Kenneth Benath

**Analyse und Auslegung energieeffizienter
Servoantriebssysteme**

Am Beispiel von Punkt-zu-Punkt-Bewegungsaufgaben

Shaker Verlag
Aachen 2017

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5414-9

ISSN 1869-8190

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

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Im Rahmen meiner Arbeit sind die Veröffentlichungen [3-6; 12; 25; 52; 79; 81-83; 90] entstanden, von denen auch Auszüge in die vorliegende Arbeit eingeflossen sind. Bei der Korrektur des Manuskriptes habe ich die Unterstützung von den Herren Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann, Dipl.-Ing. Jörg Schützhold und Achim Wolf Sperling erhalten. Die Voruntersuchungen zu den Verlustmodellen wurden in Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Ing. Jörg Schützhold erstellt. Die Grundlagen zum Thema Querschneider beruhen auf dem geistigen Austausch mit Herrn Dipl.-Ing. Chris Evers, der seine Diplomarbeit [1] zu diesem Thema angefertigt hat. Weitere Personen waren an der Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Mir ist bekannt, dass die Nichteinhaltung dieser Erklärung zum nachträglichen Entzug des Dokortitels führen kann.

Dresden, den 24. Dezember 2015

Danksagung

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann danke ich für Betreuung meiner Promotion, für die Chance am Lehrstuhl für Elektrische Maschinen und Antriebe arbeiten zu dürfen und für mehr als fünf Jahre gute Zusammenarbeit.

Bei Herrn Dr.-Ing. Volkmar Müller und Herrn Dr.-Ing. Nicol Hildebrand möchte ich mich für jedes konstruktive Gespräch bedanken.

Ein Großteil dieser Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsvorhabens „Auswahlkriterien für eine energieeffiziente Antriebstechnik“, das von der „Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.“ (FVA) unter der Projektnummer 673 aus Eigenmitteln gefördert wurde. Hierbei danke ich vor allem Herrn Dr. Krätzschar (Siemens AG) und Herrn Ehlich (Lenze SE) für die gute Führung des Projektausschusses und für die vielen kritischen Hinweise.

Besonderen Dank schulde ich natürlich auch meinem Kollegen Jörg Schützhold für die gute Zusammenarbeit, die besonders durch die gegenseitige Motivation und viel konstruktive Kritik geprägt war.

Meiner Freundin Julia Runge möchte ich von ganzem Herzen für ihre Unterstützung und die gemeinsame Zeit in den letzten Jahren danken.

Vor allem danke ich meiner Mutter und meinem Vater, die mich stets bei meinen Vorhaben unterstützt haben und mir die besten Voraussetzungen mitgaben.

Zuletzt danke ich meinen Kollegen und Freunden Stephan Günther, Jakob Jung, Frederik Klenke, Jörg Schützhold, Stephan Tenner und Daniel Wöhner für die schöne Zeit.

Abstract

A comprehensive analysis of the main degrees of freedom to design a servo drive system for point-to-point motions will show the possible improvements in energy efficiency. Therefore, the analysis covers not only single components but the interaction of all degrees of freedom and components within the whole servo drive system.

An analytical loss model will be developed that can be used to calculate the losses at each operating point only by parameterizing the loss model with data sheet values. The significant degrees of freedom that are being part of the loss models are parameters of motion control, the choice of gear ratio, the size of the DC-link capacitor as well as the dimensioning and utilization of the motor, gear box and frequency inverter.

The investigation results in common design rules and a design flow chart.

This addresses people who are concentrated on designing servo drive systems. Furthermore, the results are useful to those that develop servomotor series as well as to mechanic system engineers which have an impact on the motion process and drive system requirements.

Kurzfassung

Für die Steigerung der Energieeffizienz von Servoantriebssystemen für Punkt-zu-Punkt Bewegungsaufgaben werden Freiheitsgrade für die Projektierung analysiert. Dabei ist es besonders wichtig nicht nur einzelne Komponenten, sondern das Zusammenspiel aller Komponenten und Freiheitsgrade zu berücksichtigen.

Es wird ein analytisches Verlustleistungsmodell entwickelt, das allein mit Datenblattangaben parametrierbar ist und womit die Verluste abhängig vom Arbeitspunkt und den Projektierungsfreiheitsgraden berechenbar sind. Die wesentlichen Projektierungsfreiheitsgrade sind Parameter der Bewegungssteuerung, die Wahl der Getriebeübersetzung, die Größe der Zwischenkreiskapazität sowie die Dimensionierung und Ausnutzung von Motor, Getriebe und Umrichter.

Die Ergebnisse der Untersuchung zur Energieeffizienz werden in Form von Projektierungsregeln und einem Projektierungsschema zusammengefasst. Diese Ergebnisse sind vor allem für Ingenieure interessant, die sich mit der Projektierung von Servoantriebssystemen beschäftigen. Die Erkenntnisse dieser Arbeit zeigen auch, wie bereits beim Motordesign sowie der Konstruktion der Mechanik und Bewegungsplanung die Energieeffizienz beeinflusst wird.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Formulierung der Antriebsaufgabe	5
3	Antriebsanforderungen und Projektierungsgrößen	9
3.1	Servomotor mit Getriebe	10
3.1.1	Thermische Beanspruchung	11
3.1.2	Erforderliche Überlastfähigkeit	14
3.1.3	Drehzahlanforderungen	15
3.2	Direktantrieb	16
3.3	Umrichter	17
3.4	Getriebe	18
3.5	Projektierungsablauf	18
4	Verlustmodellierung	21
4.1	Mechanische Arbeit	21
4.2	Getriebeverluste	22
4.3	Motorverluste	26
4.4	Umrichterverluste	30
4.5	Energiebilanz von Servoantriebssystemen	38
4.6	Zusammenfassung	41
5	Entwicklung von Wachstumsgesetzen	43
5.1	Verlustkoeffizienten und Auswahlkriterien von Servomotoren	43
5.1.1	Drehmomentabhängige Wicklungsverluste	44
5.1.1.1	Drehmomentkonstante	44
5.1.1.2	Wicklungswiderstand	45
5.1.1.3	Rotorträgheitsmoment	50
5.1.1.4	Wicklungsverlustkoeffizient	50
5.1.2	Drehzahlabhängige Ummagnetisierungs- und Reibungsverluste	51
5.1.3	Vereinfachtes Motorverlustmodell auf Basis von Datenblattangaben	54
5.1.4	Drehmoment- und Drehzahl-Kriterium	56
5.2	Verlustkoeffizienten und Auswahlkriterien des Umrichters	61
5.3	Trägheitsmoment von Planetengetrieben	65

6	Analyse von Freiheitsgraden bei der Projektierung	69
6.1	Synthese der Bewegungssteuerung	69
6.2	Analyse der energieoptimalen Geschwindigkeitsbegrenzung und Getriebeübersetzung	78
6.2.1	Energieoptimale Geschwindigkeitsbegrenzung	78
6.2.2	Energieoptimale Getriebeübersetzung	85
6.2.3	Kombination von energieoptimaler Geschwindigkeitsbegrenzung und Getriebeübersetzung	90
6.2.4	Zusammenfassung	93
6.3	Allgemeine Optimalitätsbedingungen	96
6.3.1	Erforderliche Zwischenkreiskapazität	102
6.3.2	Vergleich Polynom 2. und 3. Grades	104
6.3.3	Einfluss der Ausnutzung der Antriebskomponenten	105
6.3.4	Einfluss der relativen Positionierzeit	107
6.3.5	Einfluss des effektiven Widerstandsanteils	112
6.3.6	Zusammenfassung	113
6.4	Energieoptimale Dimensionierung des Servomotors	115
6.4.1	Anpassung von Auswahlkriterien und Antriebsanforderungen	115
6.4.2	Auswirkungen der Auswahlmöglichkeiten auf die Energieeffizienz	118
6.4.3	Auswirkungen von Getriebestufungen auf die Energieeffizienz	128
6.5	Vergleich von Direkt- und Getriebemotor	130
6.5.1	Grenze für Verbesserungspotenzial mit mechanischer Anpassung	131
6.5.2	Vergleich von Hauptabmessungen und Motorvolumen	132
6.5.3	Elektrische Speisefrequenz	135
6.5.4	Vergleich der erforderlichen Umrichterbaugröße	135
6.5.5	Vergleich der Verlustenergie	136
6.6	Prozessvorgaben und mechanische Konstruktionsparameter	139
7	Experimentelle Untersuchungen zur Energiebilanz von Servoantriebssystemen	151
7.1	Auswertung der Versuchsreihen ohne Rückspeiseeinheit	155
7.2	Auswertung der Versuchsreihen mit Rückspeiseeinheit	157
7.3	Energieeinsparung durch Rückspeiseeinheit	159
7.4	Vergleich von Verlustleistungsmodell und Messergebnissen	161
7.5	Zusammenfassung	167

8	Entwicklung von Projektierungsmethoden	169
9	Zusammenfassung	177
	Literaturverzeichnis	181
	Anhang	189
I	Auswertung von Motorbaureihen	190
I.1	Datenblattangaben	190
I.2	Abschätzung der aktiven Luftspaltlänge	195
I.3	Fehlerbetrachtung der Wachstumsbeziehungen	195
II	Datenblattangaben Wechselrichtermodule	199
III	Analytische Berechnungen	201
III.1	Berechnungsvorschriften für die Bewegungskenngrößen	201
III.2	Effektivwertberechnung des elektrischen Motormoments	202
III.3	Ableitung der mechanischen Anpassung	204
III.4	Zulässiger Bereich der Getriebeübersetzung	204
III.5	Analytische Berechnung von Bewegungsgrößen und -Kennwerten	205
IV	Vergleichsbasis und Formelwerk für die Analyse der Projektierungsfreiheitsgrade	208
IV.1	Berechnung der Prozess- und Bewegungsvorgaben für die Analyse	208
IV.2	Antriebsanforderungen abhängig von Projektierungsfreiheitsgraden	209
IV.3	Verlustenergie abhängig von Projektierungsfreiheitsgraden, Nenndaten und Hauptabmessungen des Motors	210
V	Aufteilung der Verlustenergie abhängig von Ruck, Geschwindigkeitskennwert und Getriebeübersetzung	213
VI	Verlustenergie in Abhängigkeit der Motorauswahl	216
VII	Formelanhang Querschneiderantrieb	217
VIII	Aufbau und Daten der Experimentieranordnung	221
IX	Datenaufbereitung und Messunsicherheiten	225
IX.1	Elektrische Leistung	225
IX.2	Verluste im Bremswiderstand	225
IX.3	Wicklungsverluste	226
IX.4	Mechanische Leistung und Getriebeverluste	227

X	Parameter der Versuchsreihen	228
	Abbildungsverzeichnis	230
	Tabellenverzeichnis	236
	Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	238