



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Elektrotechnisches Institut

Prof. Dr.–Ing. W. Hofmann

JAHRESBERICHT ANNUAL REPORT	2015
--	-------------

Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe

Inhalt

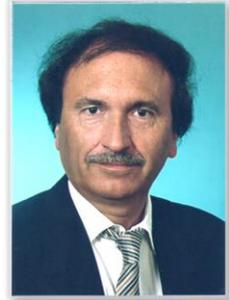
1	Vorwort.....	5
2	Lehraufgaben.....	6
2.1	Lehraufgaben im Grund- und Hauptstudium der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik.....	6
2.2	Lehraufgaben im Grund- und Hauptstudium für andere Fakultäten	11
2.3	Abgeschlossene Diplom- und Studienarbeiten	12
2.4	Exkursionen	14
2.5	Preise.....	14
3	Öffentlichkeitsarbeit	15
3.1	Veröffentlichungen	15
3.2	Vorträge und Berichte.....	17
3.3	Kooperation	22
4	Forschung.....	25
4.1	Forschungsprofil – Schwerpunkt Energieforschung	25
4.2	Forschungsprojekte.....	25
4.3	Dissertationen	28
4.4	Ausgewählte Forschungsergebnisse in Kurzform.....	30
5	Ausstattung des Lehrstuhls	57
5.1	Versuchsstände für die Forschung.....	58
5.2	Versuchsstände für die Lehre	60
5.3	Sonderausstattungen	60
5.4	Förderungen	60
6	Personelle Besetzung.....	61
7	Anschrift	63
8	Impressum	65
9	Lageplan	67

1 VORWORT

Liebe Kollegen, Mitarbeiter und Freunde,

Ein arbeitsreiches und erfolgreiches Jahr liegt hinter den Mitarbeitern des Lehrstuhls, über das in gewohnter Form berichtet werden soll.

An erster Stelle sei die erfolgreiche Übergabe und Inbetriebnahme des 200 kW-Antriebsprüfstands genannt, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und vom Freistaat Sachsen zu gleichen Teilen finanziert worden ist, durch zahlreiche kleinere und größere Baumaßnahmen vonseiten der TU Dresden unterstützt und schließlich durch den Hauptauftragnehmer, die Firma Berghof, technisch umgesetzt wurde. Allen Beteiligten sei hiermit für ihre Unterstützung herzlich gedankt, insbesondere dem leitenden Oberassistenten PD



Dr. Müller für seine unermüdliche und umsichtige Projektleitung.

Der Lehrstuhl verfügt damit über einen leistungsfähigen Versuchsstand, der eine gute Experimentierbasis für viele zukünftige Forschungs- und Dissertationsarbeiten bietet.

Im letzten Jahr konnten mehrere langjährige Forschungsprojekte, die von der Industrie, vom BMBF sowie von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik gefördert worden sind, abgeschlossen werden, die nun noch in Form von Dissertationschriften verteidigt werden. Der damit einhergehende Wechsel in der langjährigen Mitarbeiterschaft stellt neue Herausforderungen an den Lehrstuhl bei der Bewältigung der vielfältigen Aufgaben in Lehre und Forschung.

Im Bereich der Lehre konnten im letzten Jahr neue Praktika für zwei Lehrveranstaltungen aufgebaut und Demonstrationsversuche für die Vorlesung beschafft werden.

Für die geleistete Arbeit der Mitarbeiter und Studenten, die kollegiale Zusammenarbeit im Institut und in der Fakultät sowie die Unterstützung von vielen Seiten, insbesondere von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Ihr

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'W. Hofmann', written in a cursive style.

Wilfried Hofmann

2 LEHRAUFGABEN

2.1 Lehraufgaben im Grund- und Hauptstudium der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann

Elektrische Maschinen 1 (3/1/1), WS

Pflichtfach Elektroenergietechnik (EET), Wirtschaftsingenieure (WING), Regenerative Energiesysteme (RES)

Mechatronik (2/1/0), WS, Wahlpflichtfach Mechatronik (MT)

Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung; Einphasen-Transformator; Drehstrom- und Spezialtransformatoren; Grundlagen der Drehfeldmaschinen; Induktionsmaschinen; Stromortskurve der Käfigläufermaschine; Betriebsverhalten der Käfigläufermaschine; Betriebsverhalten der Schleifringläufermaschine; Wechselstrom-Induktionsmaschinen; Synchronmaschinen; Vollpolläufer-Synchronmaschinen; Schenkelpolläufer-Synchronmaschine; Spezielle Synchronmaschinen; Grundlagen der Gleichstrommaschinen; Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine; Linearmotoren und Sonderbauformen; Wachstumsgesetze und Maschinenausnutzung; Maschinenprüfung.

Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann

Elektrische Antriebe (3/1/1), SS

Pflichtfach Elektroenergietechnik (EET), Wahlpflichtfach mit (2/1/0) Mechatronik (MT), Wirtschaftsingenieure (WING)

Grundlagen und Dimensionierung elektrischer Antriebe:

Einführung; Elektromechanische Energiewandlung; Erwärmungsvorgänge; Bewegungsvorgänge; Lösungen und Anwendungen der Bewegungsgleichung; Arbeitsmaschinen; Bewegungswandler; Motorauswahl für stationären Betrieb; Motorauswahl für dynamischen Betrieb

Drehzahl- und Drehmomentsteuerung von Antrieben:

Stromrichter gespeiste Gleichstromantriebe; Pulstellerspeiste Gleichstromantriebe; Drehzahlsteuerung von Drehstrom-Asynchronantrieben; Spannungsgesteuerte Drehstrom-Asynchronantriebe; Frequenzgesteuerte Drehstrom-Asynchronantriebe; Steuerung von Drehstrom-Synchronantrieben; Stell- und Schrittantriebe

Regelung von Antrieben:

Antriebsregelungen; Geregelte Gleichstromantriebe, Geregelte Drehstromantriebe; Anwendungen: Fahrzeugantriebe; Werkzeugmaschinenantriebe, Mechatronische Systeme.

Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann

Elektromaschinendynamik (2/1/0), WS

Wahlpflichtfach Elektroenergietechnik (EET), Regenerative Energiesysteme (RES)

Einführung in das Theoriegebäude; Dynamisches Verhalten der Gleichstrommaschine; Dynamisches Verhalten von Wicklungsanordnungen; Kraft- und Drehmomentbildung in Maschinen; Grundlagen der Raumzeigertheorie; Rechengesetze für Raumzeigergrößen; Raumzeigertheorie der Induktionsmaschine; Dynamische Betriebszustände der Induktionsmaschine; Übertragungsverhalten der Induktionsmaschine; Raumzeigertheorie der Synchronmaschine; Dynamische Betriebszustände der Synchronmaschine; Übertragungsverhalten von Synchronmaschinen; Nullsystem elektrischer Maschinen; Elektromagnetische Wellenvorgänge in Maschinen.

Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann

Geregelte Energiesysteme (2/0/0), SS

Wahlpflichtfach Regenerative Energiesysteme (RES), Wirtschaftsingenieure

Einführung in die Modellierung der Regelstrecken moderner elektrischer Energieanlagen und deren Regelung, insbesondere Leistungsregelung.

Energie- und Leistungsgrundbegriffe; Synchronmaschine als Energiewandler; Modellierung von Synchrongeneratoren; Vereinfachtes Übertragungsverhalten von Synchrongeneratoren; Regelung von Synchrongeneratoren; Beispielregelung eines Turbogenerators; Asynchronmaschine als Energiewandler; Modellierung des einfach gespeisten Asynchrongenerators; Modellierung des doppelt gespeisten Asynchrongenerators; Regelung von Asynchrongeneratoren; Beispielregelung einer Windkraftanlage, Netzregelung; FACTS.

Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann

Entwurf und Berechnung elektrischer Maschinen (2/1/0), SS

Wahlpflichtfach Elektroenergietechnik (EET), Regenerative Energiesysteme (RES)

Wicklungen elektrischer Maschinen; Wicklungsentwurf; Wicklungsaufbau und -herstellung; Magnetischer Kreis; Magnetkreis mit Permanentmagneten; Magnetkreisentwurf; Stromwindung; Berechnung von Induktivitäten und Reaktanzen; Verluste elektrischer Maschinen; Erwärmung und Kühlung, Kräfte und Drehmomente; Prinzipieller Entwurfsgang; Optimierung; Entwurf einer Asynchronmaschine; Entwurf einer Synchronmaschine.

Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann

Direktantriebe und Magnetlagertechnik (2/0/1), WS

Wahlpflichtfach Elektroenergietechnik (EET)

Direktantriebe:

Einleitung, Torquemotoren, Hochgeschwindigkeitsantriebe, Linearantriebe, Anwendungen

Magnetlagertechnik:

Einleitung, aktive Magnetlagerung, passive Magnetlagerung, Auslegung von Magnetlagern, Dynamik magnetgelagerter Rotoren, Regelung eines Magnetlagers, lagerlose Maschinen, Anwendungen

Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann

Elektrische Fahrzeug- und Traktionsantriebe (2/0/1), WS

Wahlpflichtfach Elektroenergie-technik (EET), Mechatronik (MT)

Traktionsantriebe:

Grundlagen, Mechanik der Zugförderung, Fahrmotoren, Stromrichtertechnik, Regelung von Fahrmotoren und Netzstromrichter, bahntechnische Regelkreise

Fahrzeugantriebe:

Hybrid-/Elektroantriebsstrukturen, Antriebsanforderungen, Fahrmotoren, Stromversorgung, Stromrichter, Antriebsregelung

Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann

Automatisierte Antriebe (2/1/2), SS

Wahlpflichtfach Mechatronik (MT), Elektroenergie-technik (EET), Wirtschaftsingenieure (WING)

Elemente des Antriebssystems

Energetische Komponenten; Informationstechnische Komponenten des Antriebssystems; Signalverarbeitungseinheiten.

Automatisierte Drehstromantriebe

Umrichterspeisung frequenzgesteuerter Antriebe; Pulssteuerverfahren zur Umrichterspeisung; Steuerverfahren für umrichter gespeiste Asynchronantriebe; Dynamisches Verhalten von Asynchronantrieben; Feldorientierte Regelung einer Asynchronmaschine; Dynamisches Verhalten von Synchronantrieben; Steuerung und Regelung umrichter gespeister Synchronantriebe; Wechselwirkungen von Stellglied und Motor.

Systemintegration automatisierter Antriebe

Antriebe in Systemlösungen; Antriebssysteme mit komplexer Mechanik; Regelung von Antriebssystemen mit komplexer Mechanik; Funktionsintegrierte und Kombi-nationsantriebe.

Prof. Dr.-Ing. P. Schegner/ Prof. Dr.-Ing. St. Bernet/ Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann

Elektroenergie-technik (2/1/0), WS

Pflichtfach Elektrotechnik (ET), Mechatronik (MT), Regenerative Energiesysteme (RES)

Grundlagen zu Aufbau und Wirkungsweise elektromagnetischer Energiewandler;

Elektromagnetische Energiewandlung (Durchflutungsgesetz, Flussgesetze, Magnetwerkstoffe, Magnetfelder, Induktionsgesetz, Kraft- und Drehmomentbildung, Leis-

tungsbilanz); Leistungstransformatoren (Wechselfelder, Spannungsinduktion, Einphasen-, Drehstromtransformator, Anwendungen); Gleichstrommaschinen, Synchronmaschinen (Magnetfelder, Spannungsinduktion, Drehmoment, Ersatzschaltbild, Betriebsverhalten, Anwendungen); Asynchronmaschinen (Magnetfelder, Schlupf, Spannungsinduktion, Drehmoment, Ersatzschaltbild, Betriebsverhalten, Anwendung).

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. V. Müller

Schaltungstechnik (2/1/0), SS

Pflichtfach Mechatronik (MT), Regenerative Energiesysteme (RES)

Bauelementmodelle und Verstärker, Analoge Grundsaltungen mit Bipolar- und Feldeffekttransistoren; Stromquellen und Stromspiegel, Referenzquellen; Differenzverstärker; Leistungsverstärker; Operationsverstärker; Aktive Filter; Signalgeneratoren; Digitale Grundsaltungen; Kombinatorische und sequentielle Schaltungen.

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. V. Müller

Entwurf von Antriebssystemen (2/1/0), WS

Wahlpflichtfach Mechatronik (MT: Makromechatronik), Elektroenergie-technik (EET)

Grundlagen und Komponenten, Mechanisches Übertragungssystem; Auswahl und Dimensionierung elektrischer Antriebe; Stellantriebe und Schrittantriebe; Netzrückwirkungen von elektrischen Antrieben; Bewegungssteuerung und Technologiefunktionen; Informationsverarbeitung in Umrichtern; Feldbusse für elektrische Antriebe; Hard- und Softwarestruktur digitaler Reglerbaugruppen; Modellbildung und numerische Algorithmen; Methoden der Systemsimulation; Rechnergestützter Entwurf (Rapid Prototyping); Modelle der Elektroenergie-technik; Entwurf und Simulation des Bandantriebs einer Gurtbandförderanlage.

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. G.-H. Geitner

Leistungsflussorientierte Modellbildung (1/1/0), WS

Wahlpflichtfach Mechatronik (MT: Makromechatronik), Elektroenergie-technik (EET), Regenerative Energiesysteme (RES)

Grundlagen leistungsflussorientierter Modelle, Einführung in Bondgraphen, POG und EMR, SIMULINK Erweiterungsblockbibliothek BG V2.1, skalare und vektorielle Modelle, Zustandsdarstellung mit Energie- und Leistungsmatrix, Modellvereinfachungen auf Basis von Leistungsfluss, Modelle elektrischer Maschinen, Ableitung von Modellen für Umlaufrädergetriebe, Systematisierung der Modellbildung, Faltung und Ketten, nichtlineare Modelle, modellbasierte Optimierung von Reglern.

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. G.-H. Geitner

Aktorik (2/0/2), SS

Pflichtfach Mechatronik (MT), Wahlpflichtfach Studienrichtung Automatisierungs-, Mess- und Regeltechnik (ART)

Elektrische Aktoren als Elemente zur Bewegungssteuerung, ausgewählte Grundprinzipien gesteuerter Aktoren, Grundlagen der Projektierung, Grundlagen geregelter Aktoren, Einführung in die leistungsflussbasierte Modellbildung.

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. G.-H. Geitner

Digitale Antriebsregelung (2/1/0), SS

Wahlpflichtfach Mechatronik (MT: Makromechatronik), Elektroenergietechnik (EET), Regenerative Energiesysteme (RES)

Ableitung von Differenzgleichungen, Quasikontinuierlicher Reglerentwurf, Grundlagen des Entwurfs diskontinuierlicher Regler, Angewandte Z-Transformation, Abtastsignalflussplanmethode, das Digitale Betragsoptimum (BOD), schnelle Regler auf EEZ-Basis, Modellbildung, Nichtlinearitäten, Begrenzungsvarianten, graphische Programmierung des Reglers, Einführung in Bondgraphen als Streckenmodelle.

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. G.-H. Geitner

Regelung elektrischer Systeme (2/1/0), WS

Wahlpflichtfach Regenerative Energiesysteme (RES), Wirtschaftsingenieure (WING)

Signalflusspläne als dynamische Modelle elektrischer Antriebe, Normierung, Anwendung von Laplace- und Z-Transformation, Elementar- und Grundglieder, Umformungsregeln, Regelstrukturen, Näherungen für Modellelemente, Definition, Optimierung und Realisierung von kontinuierlichen, quasikontinuierlichen und diskontinuierlichen Reglern für elektrische Systeme, Grundlagen zur Berücksichtigung von Begrenzungen, Nichtlinearitäten und Verkopplungen, Anwendung von ingenieurtechnischer Software, alternative dynamische Modelle.

Dr.-Ing. N. Hildebrand

Transformatoren (2/0/0), WS

Modul „Vertiefung Elektrische Maschinen“ Studienrichtung Elektroenergietechnik

Leistungstransformatoren in der Elektroenergietechnik, Wachstumsgesetze und TK-Zahl; Aufbau, Ausführungsformen, stationärer Betrieb, nichtstationärer Betrieb; Wicklungsaufbau, Wicklungsausführungen; Begriffe, Isoliersysteme, Isolierstoffe für Transformatoren; Entwurf von Transformatoren: Kernausslegung, Wicklungsauslegung, Isolierungsgestaltung; Begriffe, Prinzipien, Materialien; Auslegung der Schenkelpresselemente, Kesselgestaltung; Zusatzverluste; Modellierung elektromagnetischer Felder.

2.2 Lehraufgaben im Grund- und Hauptstudium für andere Fakultäten

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. V. Müller

- Elektrische Antriebe für Maschinenbauer (2/1/0), WS
Pflicht- und Wahlpflichtfach - Lehrexport für Fakultät Maschinenwesen
- Elektrotechnik für Fernstudium Maschinenbau (1/0/0), WS und SS
Lehrexport für Fakultät Maschinenwesen

Dr.-Ing. N. Hildebrand

- Elektrotechnisches Praktikum (0/0/2), WS und SS
Lehrexport für Fakultät Maschinenwesen

2.3 Abgeschlossene Diplom- und Studienarbeiten

Diplom- und Masterarbeiten

M. Frydetski / Betreuer: J. Jung

„Inbetriebnahme eines Motorprüfstands zur messtechnischen Bestimmung der Parameter einer permanentenerregten Synchronmaschine.“

Ch. Gerber / Betreuer: Th. Windisch

„Modellbildung für einen Asynchron-Fahrmotor unter Berücksichtigung der sättigungsabhängigen Induktivität des Haupt- und Streuflusses.“

R. Henning / Betreuer: St. Ulbrich

„Entwurf von schnelldrehenden permanentmagnetisch erregten Außenläufer-Synchronmaschinen mit eisenlosem Stator.“

T. Micklitz / Betreuer: N. Hildebrand

„Erweitertes Berechnungsmodell für die Verluste von Ständerstäben großer Synchrongeneratoren unter Berücksichtigung der Verdrillung im Wicklungskopf.“

F. Mäge / Betreuer: Th. Windisch

„Suchverfahren zur energieeffizienten Drehmomentsteuerung für eine Asynchronmaschine als Fahrzeugantrieb.“

P. Piskun / Betreuer: St. Günther

„Entwurf von synchronen Fahrmotoren mit vergrabenen Ferritmagneten.“

M. Stübzig / Betreuer: M. Leubner

„Untersuchung eines aktiven Dämpfungsverfahrens für das Netzfilter des direkten Matrixumrichters.“

R. Aschmoneit / Betreuer: N. Remus

„Simulative Untersuchung der Halbleiterverluste eines V-Brücken-AC-Choppers als Wechselspannungshochsetzer bezüglich der Kommutierungsverfahren.“

Q. Cao / Betreuer: Y. Zhang

„Untersuchung zum Aufbau einer hocheffizienten Kühlung einer hochdynamisch betriebenen Asynchronmaschine.“

F. Geisse / Betreuer: N. Remus

„Neue Betriebsstrategie der Crowbar als Schutzschaltung eines doppelt gespeisten Asynchrongenerators.“

St. Michel / Betreuer: St. Tenner

„Untersuchungen zur energieoptimalen Regelung eines elektrischen Fahrantriebs mit einem Z-Source Inverter.“

J. Minner / Betreuer: F. Bahr

„Entwurf eines Auslegungs- und Optimierungswerkzeuges für Radialmagnetlager.“

A. Thomas / Betreuer: St. Tenner

„Untersuchung der Oberschwingungsverluste eines Z-Source Inverters im elektrischen Antriebsstrang von Straßenfahrzeugen.“

Studienarbeiten

D. Bernet / Betreuer: Th. Windisch

„Untersuchung der Oberschwingungsverluste eines Z-Source Inverters im elektrischen Antriebsstrang von Straßenfahrzeugen.“

P. Burkhardt / Betreuer: J. Döring

„Bestimmung des magnetischen Luftspalt- und Zahnkopfwiderstandes einer Transversalfeldreluktanzmaschine mit Hilfe der FEM.“

Y. Liu / Betreuer: Y. Zhang

„Untersuchung der Online-Parameteridentifikation einer Asynchronmaschine mit häufigen Drehmomentwechseln.“

M. Olbrich / Betreuer: Ch. Evers, J. Schützhold

„Aufbau eines mobilen Messsystems zur berührungslosen Bestimmung des Lastprofils von Servoantrieben in Verpackungsmaschinen.“

P. Pechmann / Betreuer: N. Hildebrand

„Experimentelle Untersuchung des Luftspaltfeldes einer speziellen Drehstromasynchronmaschine.“

M. Rothe / Betreuer: St. Günther

„Automatisierte Berechnung von synchronen Fahrtrieben mittels magnetischer und thermischer Netzwerke.“

J. Vick / Betreuer: N. Remus, M. Leubner

„Entwicklung einer Schaltung zur Messung der UCE-Spannungen von IGBT-Halbleiterventilen in bidirektionalen Schaltermodulen.“

P. Bellmann / Betreuer: K. Benath, Ch. Evers

„Implementierung der optimalen Steuerung einer stufenlos variablen Getriebeübersetzung mit einem Servoantrieb und Messung des Leistungsflusses.“

A. Günther / Betreuer: N. Hildebrand

„Vergleichende Betrachtungen zu den Feldkomponenten im Wickelkopfraum des Generators WEHR.“

D. Kranz / Betreuer: St. Ulbrich

„Ermittlung der Temperaturverteilung im thermischen Beharrungszustand einer permanenterregten Außenläufer-Synchronmaschine.“

M. Pfetzing / Betreuer: A. Brix

„Untersuchung der rotorseitigen Streufelder in Asynchronmaschinen mit Kurzschlussläufer.“

St. Schwarz / Betreuer: A. Brix

*„U Vergleichende Untersuchungen zu Schaltungen eines bidirektionalen und potenti-
algetrennten DC/DC-Wandlers“*

2.4 Exkursionen

Folgende Exkursionen wurden den Studenten angeboten:

- VEM Sachsenwerk GmbH, Dresden; 16.01.2015
- WITTUR Electric Drives GmbH, Dresden; 30.01.2015
- Transformatorenwerk der Siemens AG, Dresden; 10.12.15 und 17.12.15

2.5 Preise

HANS-PUNDT-PREIS 2015

Anlässlich der VDE-Jahresvollversammlung erhielt M. Sc. Tobias Micklitz (Professur Elektrische Maschinen und Antriebe) für seine Masterarbeit mit dem Titel „Erweitertes Berechnungsmodell für die Verluste von Ständerstäben großer Synchrongeneratoren unter Berücksichtigung der Verdrillung im Wicklungskopf“ den Hans-Pundt-Preis 2015 des VDE Dresden.

HIGHVOLT-Preis 2015

Dipl.-Ing. Robert Seifert erhielt am 02.10.2015 für die beste Diplomarbeit auf dem Gebiet der Elektroenergietechnik mit dem Titel „Untersuchung der Eisenkreiszeitkonstante eines axialen Magnetlagers“, den von der Highvolt GmbH gestifteten HIGH-VOLT-Preis.

3 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

3.1 Veröffentlichungen

- [1] C. Evers, J. Schützhold, K. Benath, R. Blümel, V. Müller, W. Hofmann: Projektierungsregeln für energieeffiziente Servoantriebssysteme am Beispiel einer Quersiegeleinheit von Verpackungsmaschinen, VDI/VDE-Tagung Antriebssysteme 2015 Elektrik, Mechanik Fluidtechnik in der Anwendung, VDI-Berichte 2268, Aachen, Deutschland, pp. 157 - 168, 2015.
- [2] V.D. Nguyen, Hofmann, W.: Experimentelle Untersuchungen am synchronisierten doppelgespeisten Asynchrongenerator bei Spannungsfehlern. VDI/VDE-Tagung Antriebssysteme 2015 Elektrik, Mechanik Fluidtechnik in der Anwendung, VDI-Berichte 2268, Aachen, Deutschland, pp. 89 - 104, 2015.
- [3] J. Doering, W. Hofmann: Design of a Transverse Flux Reluctance Machine with Mutual Flux Paths and Disc Rotors, European Power Electronics and Applications - EPE, Geneva, Switzerland, 2015.
- [4] J. Doering, W. Hofmann: Comparison of magnetic circuit design methods of transverse flux reluctance machines, IEEE IEMDC, 2015.
- [5] J. Doering, W. Hofmann: Torque, Power, Losses and Heat Calculation of a Transverse Flux Reluctance Machine With Soft Magnetic Composite Materials and Disc-Shaped Rotor, IEEE Transactions on Industry Applications , vol. 51, no. 2, pp. 1494 - 1504, 2015.
- [6] C. Evers, J. Schützhold, K. Benath, R. Blümel, V. Müller, W. Hofmann: Design Rules for Energy Efficient Servo Drives and Mechanical Systems on the Example of Cross Cutting Machines, European Power Electronics and Applications - EPE, Geneva, Switzerland, 2015.
- [7] G.-H. G.-H. Geitner. Komurgoz: Power flow modelling of dynamic systems - introduction to modern teaching tools, 2015.
- [8] S. Günther, W. Hofmann: Multi-Objective Tradeoffs in the Design Optimization of Synchronous Reluctance Machines for Electric Vehicle Application, IEEE International Electric Machines and Drives Conference – IEMDC, Coeur d'Alene, USA, pp. 1715 - 1721, 2015.
- [9] J. Jung, W. Hofmann: Comparison of two Concentrated Winding Topologies applied on an Axial Flux Permanent Magnet Machine, European Power Electronics and Applications - EPE, Geneva, Switzerland, 2015.
- [10] I. Mönch, F. Bahr, M. Melzer, D. Karnaushenko, D. Makarov, W. Hofmann, O. G. Schmidt: Flexible Hall Sensorics for Flux Based Control of Magnetic Levitation, IEEE Trans. Magn., DOI: 10.1109/TMAG.2015.2438232, 2015.
- [11] C. D. Nguyen, W. Hofmann: Model-Based Loss Minimization Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors, IEEE International Conference on Industrial Technology - ICIT, Sevilla, 2015.
- [12] N. Remus, M. Leubner: Direct Control Method for Matrix Converter with Stabilisation of the Input Current, European Power Electronics and Applications - EPE, Geneva, Switzerland, 2015.

- [13] R. Seifert, F. Bahr, W. Hofmann: Modellierung axialer Magnetlager aus Stahl- und SMC-Komponenten mit Wirbelstromeffekten, 10. Workshop Magnetlagertechnik, Tagungsband, Zittau, pp. 5 - 11, 2015.
- [14] R. Suryana, W. Hofmann: Wind Farm Contribution to Primary Frequency Control, European Power Electronics and Applications - EPE, Geneva, Switzerland, 2015.
- [15] T. Windisch, W. Hofmann: A Comparison of a Signal-Injection Method and a Discrete-Search Algorithm for MTPA Tracking Control of an IPM Machine, European Power Electronics and Applications - EPE, Geneva, Switzerland, 2015.
- [16] R. Suryana, W. Hofmann: Experimental investigation of network frequency controlled by wind power plants with doubly fed induction generators, IECON 2015, Yokohama
- [17] T. Windisch, W. Hofmann: Loss Minimizing and Saturation Dependent Control of Induction Machines in Vehicle Applications. IECON 2015, Yokohama

3.2 Vorträge und Berichte

Vorträge ohne Publikation

W. Hofmann

„Elektromaschinen – die Arbeitspferde in der modernen Industriegesellschaft“. Vortrag zur Öffentlichen Frühjahrssitzung der Sächs. Akad. d. Wiss., Leipzig, 10.04.2015

„Synchron- und Asynchrongeneratoren für Windkraftwerke im Vergleich“. 3. Workshop Materialien für die Energietechnik „Magnetwerkstoffe, Dresden, 22.04.2015

„Auswahlkriterien für energieeffiziente Ein- und Mehrachsen-Servoantriebe“. Technischer Tag, VEM, Wernigerode 15.09.2015

Forschungsvorträge

30.01.2015

Y. Zhang

„Transiente Stromverdrängung im dynamischen Betrieb von ASM großer Leistung.“

31.01.2015

N. Remus

„Regelung des Direkten Matrixumrichters mit Eingangsseitigem AC-Chopper.“

12.02.2015

C.D. Nguyen

„Modellbasierte Minimierung der Verluste eines PMSM mit Parameterabschätzung.“

06.03.2015

N. Van Binh

„Emulation von Netzspannungsfehlern zur Untersuchung eines doppeltgespeisten synchronisierten Asynchrongenerators.“

20.03.2015

F. Bahr

„Magnetlager mit integrierter Flussdichtesensorik - Vision und Realität.“

H. Barth

„Messung der Schaltverlustenergie bei Siliziumkarbid-Bipolartransistoren.“

08.05.2015

Th. Windisch

„Wirkungsgradoptimaler Betrieb der Asynchronmaschine in einem Fahrtrieb unter Berücksichtigung magnetischer Sättigung.“

22.05.2015

L. Silas

„Study of the Harmonics and Interharmonics in Doubly-Fed Induction Generators“

St. Tenner

„Vergleich zwischen der energieoptimalen Regelung eines elektrischen Fahrantriebs mit Z-Source Inverter und alternativen Betriebsstrategien.“

05.06.2015

S. Bosch

„Hybridfilter zur Kompensation von Grundschiwungsblindleistung und Verzerrungsblindleistung in Niederspannungsnetzen - Aufbau und Inbetriebnahme des passiven und aktiven Filters sowie Regelung des passiven Filters.“

19.06.2015

St. I. Meier

„Das mechatronische System der Wirbelstrombremse.“

St. Staudt

„Optimaler Betrieb einer Synchron-Reluktanzmaschine als Traktionsantrieb.“

03.07.2015

A. Brix

„Untersuchungen zum Streufeld des Kurzschlussrings im Stirnraum von Asynchronmaschinen mit Käfigläufer.“

17.07.2015

St. Günther

„Untersuchungen zur Auslegung hochausgenutzter synchroner Reluktanzmotoren.“

30.09.2015

C. D. Nguyen

„Modellbasierte Minimierung der Verluste eines Asynchronmotors.“

27.11.2015

G. Steinborn

„Energieoptimaler Beschleunigungsantrieb.“

Doktorandenseminar (23.08.-28.08.15), Hirschegg/Kleinwalsertal

Das alljährlich durchgeführte gemeinsame Doktorandenseminar mit der TU Darmstadt fand im 25. Jahr seines Bestehens im Darmstädter Haus statt. Wie immer gab es ausreichend Gelegenheiten für die Doktoranden beider Lehrstühle ihre Forschungsergebnisse in Vorträgen vorzustellen und anschließend zu diskutieren.

Das im Besitz der TU Darmstadt befindliche Haus wurde in den letzten Jahren ständig erweitert und modernisiert und bietet 62 Personen eine angenehme und für Seminarveranstaltungen bestens geeignete Herberge mitten im schönen Kleinwalsertal/Österreich nahe Oberstdorf.

Familie Flachsmann ist der gute Geist im Haus und kümmert sich neben der hervorragenden Verpflegung auch um die Versorgung mit allen wichtigen Informationen und Geheimtipps für herrliche Wanderungen und viele andere sportliche oder kulturelle Aktivitäten in der Bergwelt rund um das Tal. Von der sehr schön angelegten Veranda kann man bereits beim Frühstück das wunderbare Panorama aus Bergen und Bauernhöfen genießen. Und wenn das Wetter mitspielt, ist vom Hohen Iven (2230 m) sogar der ca. 100 km entfernte Bodensee erkennen.



Quelle: Lehrstuhlarchiv

Vorträge TU Darmstadt

- An, Jeongki:
Design and measurement of the interior permanent magnet synchronous machine for a hybrid vehicle.
- Deusinger, Björn:
Indirect efficiency determination of permanent magnet synchronous machines for sine wave and inverter operation.
- Erd, Nicolas:
Numerische Simulation von Fehlerzuständen bei segmentierten Ringmotoren.
- Gemeinder, Yves:
Lagerströme – Eine Übersicht der Einflüsse durch die Betriebsparameter.
- Lehr, Marcel:
Vergleich verschiedener elektrischer Maschinen mit Permanentmagneten im Stator.
- Li, Xing:
Flywheel Energy Storage System Design for Residential Photovoltaic Systems.
- Messenger, Gael:
Evaluation of a Dual Half-Pitched Three-Phase Bearingless High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor Prototype.
- Neusüs, Sascha:
Auslegung und parametrische Modellierung einer synchronen Reluktanzmaschine
- Schuster, Martin:
Die doppelt gespeiste Asynchronmaschine – parasitäres Ersatzschaltbild und Lagerströme.

Vorträge TU Dresden

- Döring, Jan:
Transversalfeldreluktanzmaschine mit Scheibenläufer.
- Günther, Stephan:
Untersuchungen zur Auslegung hochausgenutzter synchroner Reluktanzmotoren.
- Brix, Arne:
Prädiktive Antriebsregelung im geplanten Projekt KLEE (Kombinierte Logik für Energieeffiziente Elektromobilität)
- Eckart, Martin:
Ableitung der Generatorbelastung aus der Betriebsführung kleiner Windenergieanlagen.
- Miersch, Sören:
Berücksichtigung von Nutschlitz und Pollücken bei der Berechnung des Luftspaltwärmewiderstandes permanentmagneterregter Außenläufermaschinen.

- Barth, Henry:
Vergleich der Halbleitermaterialien Silizium und Siliziumkarbid am Beispiel des Bipolartransistors.
- Schützhold, Jörg:
Auswahlkriterien für energieeffiziente elektrische Antriebe.
- Arias, Arturo:
Berechnung des stationären Vorganges im Z-Source Wechselrichter.
- Zhang, Yuanpeng:
Asynchronantrieb bei hoher Drehmomentdynamik und transientser Stromverdrängung.
- Bosch, Swen:
Hybridfilter zur Blindleistungskompensation - Regelung des aktiven Filters
- Michel, Stephan:
Untersuchungen zur energieoptimalen Regelung eines elektrischen Fahrentriebs mit einem Z-Source Inverter.
- Evers, Chris:
Auswahlkriterien und Designvorgaben für energieeffiziente Sevoantriebssysteme.
- Staudt, Stefan:
Optimaler Betrieb einer Synchron-Reluktanzmaschine als Traktionsantrieb.
- Leubner, Martin:
Netzblindstromregelung am direkten Matrixumrichter.
- Windisch, Thomas:
Leistungsmessung am neuen universellen Antriebsversuchsstand der Professur EMA.
- Seifert, Robert:
Modellierung axialer Magnetlager aus Stahl- und SMC-Komponenten mit Wirbelstromeffekten.
- Steinborn, Gunar:
Energieoptimaler Beschleunigungsantrieb.

3.3 Kooperation

IAESTE – Praktikanten

Nasser Al Busafi, Oman / Betreuer: Ch. Evers

„Simulative comparison of gears with linear and non-linear transmission ratio in servo drive systems.“

Serhan Baykul, Türkei / Betreuer: G. Steinborn

„SIMULINK-model of induction machine and controller design“

Nassim Arrouji, Tunesien / Betreuer: Th. Windisch

„Discrete Current and Flux Control for an Induction Machine in a Vehicle Application.“

Asem Ahmed Khattab, Katar / Betreuer: F. Bahr

„Safety and Reliability of Magnetically Suspended Systems“

Saran Mahapun, Thailand / Betreuer: St. Günther

„Magnetic Reluctance- and Thermal Resistance Network Models for Electrical Machines.“

Amer Alrashdan, Jordanien / Betreuer: H. Barth

„Optimizing of SiC-BJT driver“

Srdjan Boskovic, Serbien und Montenegro / Betreuer: J. Döring

„FEM modulation of asynchronous machines.“

Dennis Honkanen, Schweden / Betreuer: St. Tenner

„Investigation of Power-Losses in Lithium-Ion Batteries“

Boting Li, China / Betreuer: Y. Zhang

„Electromagnetic thermal coupled field analysis of induction motors“

José Miguel Luzuriaga Merlo, Ecuador / Betreuer: St. Ulbrich

„Analysis of the mechanical stress in a high speed machine“

Nantanee Nanthawatthana, Thailand / Betreuer: A. Brix

„Simulation of the Field Oriented Control for Three-Phase AC Machines“

Kizito Nnaemeka Onyema, Nigeria / Betreuer: A. Arias

„Calculations and measurements from Z-Source Inverter“

Barbara Posavac, Kroatien / Betreuer: G. Steinborn

„Heat transfer, friction losses and vibration in an induction motor“

Ana Luiza Zaroni Consentino, Brasilien / Betreuer: J. Schützhold

„Simulative comparison of gears with linear and non-linear transmission ratio in servo drive systems“

Gremien und Gutachten

Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann

- Ordentliches Mitglied der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech)
- Ordentliches Mitglied der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig (Technikwissenschaftliche Klasse)
- Mitglied des Präsidiums der Sächs. Akademie der Wissenschaften und Sekretär der Technikwissenschaftlichen Klasse
- Member of Editorial Board of European Transaction on Electrical Power (ETEP) Wiley & Sons
- Member of Editorial Board of Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik), Springer Verlag

- VDE: Mitglied des ETG-Fachbereiches A1: Elektrische Maschinen und Antriebe, Mechatronik; Mitglied im VDE Dresden AK19 Elektrische Maschinen und Antriebe; Mitglied im ETG-Fachbereich Q1: Leistungselektronik; Mitglied der Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik
- VDI
- EPE-Association, International Steering Committee
- IEEE: Senior Member; Industry Application Society; Power Electronics Society; Industrial Electronics Society; Reviewer IEEE Transaction on Industrial Electronics/Mechatronics
- Sondergutachter DFG, VW-Stiftung.

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. G.-H. Geitner

- Reviewer IEEE Industrial Electronics Society Conference
- Reviewer IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference.

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. V. Müller

- VDE
VDI-FA 823 Motion Control.

Dr.-Ing. N. Hildebrand

- VDE
VDE-Arbeitskreis 19 "Elektrische Maschinen und Antriebe".

Prof. Dr.-Ing. Heinz-Dieter Eberhardt

- VDE
VDE-Arbeitskreis 19 „Elektrische Maschinen“.

4 FORSCHUNG

4.1 Forschungsprofil – Schwerpunkt Energieforschung

Das Forschungsprofil des Lehrstuhles Elektrische Maschinen und Antriebe ist geprägt durch Grundlagen und Anwendungen folgender Forschungsgebiete:

- Methodik, Modellbildung, Simulation und Werkzeuge für Maschinen und Antriebe
- Industrieelektronik und Stromrichter
- Magnetlager und Mechatronik
- Regenerative Energiequellen
- Hybrid- und Elektrofahrzeuge
- Kühlung elektrischer Maschinen

4.2 Forschungsprojekte

DFG-Projekte

1. Verlustarmer Umrichter mit SiC-Bipolartransistoren durch angepasstes Treiberdesign und Schätzung des Laststromverlaufs.
DFG – HO 1483/62-1+2, 2015 - 2017
2. Energieoptimale Drehmomentsteuerung und Auslegung von hochdynamischen Asynchronantrieben unter besonderer Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung.
DFG – HO 1483/60-1+2, 2011 - 2016
3. Generalized Space Vector Modulation for Impedance Source Inverters Applied to Fuel-Cell-Based Isolated Electric Power Generation.
DFG - HO 1483/53-1+2, 2008 - 2016
4. Energieoptimaler Beschleunigungsantrieb und Downsizing-Schleifen.
DFG - HO 1483/57-1+2, 2009 - 2016
5. Diagnose von Mikrobürstenfeuer bei Reibkontaktierung von Graphit/Graphit-Bürsten/Schleifringssystemen.
DFG - HO 1483/54-1+2, 2009 - 2016
6. Verlustarme magnetische Radial-/Axiallagerung unter Verwendung von Pulververbundwerkstoffen
DFG - HO 1483/55-1, 2009 - 2015
7. Direkte Regelung der Netz- und Lastgrößen eines Matrixumrichters mit optimalen netz- und lastseitigen Filtern.
DFG - HO 1483/59-1 2010 – 2015

8. Aktive Dämpfung filterbedingter eingangsseitiger Oberschwingungen am Matrixrichter als Antriebsrichter für direkte und PWM-basierte Regelverfahren
DFG - HO 1483/59-2, 2013 - 2016
9. Hochausgenutzte synchrone Reluktanzmotoren durch lokale Beeinflussung der magnetischen Eigenschaften des Elektrolechs beim Laserschneiden
DFG - HO 1483/69 BE 1875/32, 2013 - 2016
10. On-line Verfahren zur energieeffizienten Betriebsweise von hochausgenutzten elektrischen Antrieben
DFG - HO 1483/67-1, 2014 – 2016
11. Maschinenwicklungen in Kombinationsschaltung
DFG - HO 1483/71, 2014 – 2016
12. Theoretische Grundlagen zur Verknüpfung von thermohydraulischer und thermoelektrischer Leistungswandlung in einem Aggregat - Thermohydraulischer Linear-generator
DFG - HO 1483/72, 2015 – 2017
13. Neue Generatoranordnung mit der doppelgespeisten Asynchronmaschine für besseres Verhalten beim Durchfahren von Netzfehlern
DFG - HO 1483/74, 2015 – 2018

Industrieprojekte

1. F/E-Arbeiten zur intensiven Kühlung von Transnormmotoren
2010 - 2016
2. Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet Wasserkraftgeneratoren.
2003 - 2015
3. F/E-Arbeiten auf dem Gebiet der Stromrichtererregung von Generatoren
2012 - 2015
4. Pedelec-antrieb
2011 – 2016

FVA Forschungsvereinigung Antriebstechnik

1. Auswahlkriterien für energieeffiziente elektrische Mehrachsen-Servoantriebe
2015 - 2016
2. Auswahlkriterien für energieeffiziente elektrische Stellantriebe
2014 - 2015

BMBF

1. Wachstumskern Auto-Tram – Verbundprojekt: Verkehrssystemtechnik für hochkapazitive, nachhaltige Transportsysteme zwischen Bus und Bahn.
2008 – 2011

2. Wachstumskern LEANTEC-Antrieb - Verbundprojekte: Grundlagen und Untersuchung zu Rotor und Stator; Auslegung, Optimierung und Prüftechnik; Anwendungsspezifische Antriebsregelung und Motorerprobung.
2011 – 2014
3. Elektrifiziertes Lastenrad für urbanen Wirtschaftsverkehr
2013 – 2015
4. Rotierender aktiver Gleichrichter
2013 - 2015
5. Schaufenster Elektromobilität
2013 – 2015

ZIM

1. Bidirektionales Ladegerät
2015 – 2017
2. Entwicklung eines energieeffizienten Steuerungsverfahrens für maschinelle Verpackungsvorgänge
2014 – 2016

4.3 Dissertationen

Nguyen van Binh

Control of synchronized doubly-fed induction generator under grid conditions.

Summary:

The doubly-fed induction generators (DFIG) operating at synchronous speed offers some advantages. At this working mode, the power flowing in the rotor is not significant and thus the converter rating is reduced considerably. This research work develops control techniques which combine feedback and feedforward topologies to reduce oscillations in the electromagnetic torque, load angle, as well as the reactive power. According to the critical damping method, the damping torque is controlled to maintain the critical state of the entire system. This method is based on the dynamic analysis of torque components in the machine. As a consequence, an additional damping torque is fed to the control loop to eliminate the vibration of the variables during the alteration of operating parameters. The other method, namely coupling approach, is based on the analysis of the vibration components of the variables. Thus, the oscillation parts are provided simultaneously at their set values and the vibration is eliminated. On the other hand, as the share of wind energy in the power network increases, the generators are required to stay connected in cases of voltage depression. This work introduces control methods to ride-through the temporary low voltage for both symmetrical and asymmetrical voltage dip. For symmetrical dip, a rotor voltage control method is proposed with a determination of transient stator flux linkage. Under asymmetrical dip, the electromagnetic vibrations are dealt with by controlling the positive and negative sequence separately. Optimal methods to determine the reference values of the negative sequence controller are proposed to eliminate the oscillations simultaneously. The control methods are presented with selected simulation and experimental results.

Marco Festa

Berechnung elektrischer Maschinen auf gekoppelten elektromagnetischen und kühltechnischen Modellebenen am Beispiel quergekühlter Motoren.

Zusammenfassung:

An moderne elektrische Maschinen werden hohe Anforderungen gestellt, die oft nur dann erfüllt werden können, wenn die Materialien für die konkrete Anwendung optimal ausgenutzt werden. Im Zuge einer möglichst genauen und somit optimal auf die Antriebsaufgabe abgestimmten Berechnung müssen mehrere physikalische Disziplinen betrachtet werden. Um die physikalischen Vorgänge zu systematisieren, werden Modellebenen eingeführt, auf denen jeweils eine Disziplin zur Anwendung kommt. Eine entscheidende Rolle spielen die Art und der Grad der Kopplung zwischen den Ebenen. Die Systematik der Modellebenen wird um eine Diskussion der anwendbaren Berechnungsmethoden bereichert. Im zweiten Teil der Arbeit wird gezeigt, wie die interdisziplinäre Berechnungsmethodik in der Praxis angewendet wird, indem am

Beispiel quergekühlter Maschinen Auslegungsgleichungen entwickelt werden, welche die elektrischen, magnetischen, thermischen und strömungsmechanischen Vorgänge beschreiben. Die Anwendung dieser Gleichungen wird im dritten Teil der Arbeit demonstriert. Dort wird ein kompakter, quergekühlter Traktionsmotor ausgelegt und messtechnisch untersucht, wobei eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Berechnung und der Messung festgestellt wird. Am Ende der Arbeit wird kurz die Studie eines innovativen Asynchronmotors vorgestellt, um zu zeigen, dass die Querkühlung nicht nur zu besonders hohen Ausnutzungsgraden führen kann, sondern bei entsprechender Auslegung auch zu sehr hohen Wirkungsgraden. Bei allen Überlegungen wird großer Wert auf technologische Realisierbarkeit gelegt, sodass die Arbeit viel mehr ist als eine Reihe theoretischer Lösungsansätze, sondern als Leitfaden dienen kann, quergekühlte Maschinen für weitere Anwendungen zu entwickeln.

Henning Kasten

Verbesserung der Betriebseigenschaften elektrischer Maschinen durch den Einsatz kombinierter Wicklungen.

Zusammenfassung:

Einsetzen lassen sich kombinierte Wicklungen als Ankerwicklungen in Drehfeldmaschinen. Die Idee dieser Wicklungsart ist schon alt (1918). Trotzdem sind diese Wicklungen bisher kaum zum praktischen Einsatz gekommen, weshalb sie auch relativ unbekannt, und auch nicht weiter theoretisch untersucht worden sind. Die kombinierten Wicklungen wurden im Rahmen dieser Arbeit hinsichtlich verschiedener Eigenschaften untersucht und mit konventionellen Wicklungen verglichen.

Besondere Beachtung fanden dabei folgende Teilgebiete:

- Herleiten der Grund- und Oberwellenwicklungsfaktoren
- Berechnung der Wirkungsgradsteigerung durch Verwenden von kombinierten Wicklungen bei gleichem Materialeinsatz
- Praktische Ausführbarkeit der Wicklungen bei verteilten Wicklungen und bei Zahnspulenwicklungen
- Verkleinerung des notwendigen Materialbedarfs an Wicklungsisolierung bei Mittelspannungsmaschinen
- Gestaltungsmöglichkeiten von Käfigwicklungen sowie elektrisch und permanent erregter Rotoren
- Auswirkungen auf Oberwellenmomente und Geräusche
- Vergleichsmessungen von zwei Motoren, bei dem der eine mit einer kombinierten und der andere mit einer konventionellen Wicklung ausgerüstet worden ist. Es wurde dabei besonders auf den Wirkungsgrad eingegangen.

4.4 Ausgewählte Forschungsergebnisse in Kurzform

Dipl.-Ing. Gunar Steinborn

Minimierung der Verlustenergie eines Stellantriebs

Im Rahmen des von der DFG geförderten Projektes „Energieoptimaler Beschleunigungsantrieb und Downsizing-Schleifen“ sollen für verschiedene Servomotoren und Antriebskonfigurationen Potentiale für die Minimierung der gesamten Antriebsverlustenergie E_V über einem Lastspiel ermittelt werden. Ein Lastspiel ist durch den Zielweg Φ_z , die Zielzeit t_z , möglichen Begrenzungen für Ruck r , Drehzahl ω und Beschleunigung α , sowie ein gegebenenfalls wirksames Lastmoment m_W gekennzeichnet. Freiheitsgrade für die Optimierung sind der Bewegungsverlauf selbst und die das Motordrehmoment m_M bestimmenden elektrischen Größen Rotorflussverkettung ψ_{rd} und Statorstromkomponenten i_{sd} und i_{sq} . Die Optimierung erfolgt in zwei Schritten, wobei Ziel jedes Optimierungsschrittes immer die Minimierung von E_V ist. Im ersten Schritt erfolgt eine Optimierung des Bewegungsverlaufes mit den Stellgrößen ω_M und m_M . Zunächst als fest angenommen werden dabei ψ_{rd} und i_{sd} . Mit der so optimierten Bewegungstrajektorie können in einem zweiten Schritt die elektrischen Größen so optimiert werden, dass der vorgegebene Drehzahl-/Drehmomentverlauf mit minimalem Energieaufwand erreicht wird. Insbesondere bei Teillast ist eine Reduzierung der Rotorflussverkettung effektiv. Das nachfolgende Beispiel illustriert Optimierungsergebnisse für einen Drehstromasynchronantrieb ohne Getriebe. Die Bewegungstrajektorie unterliegt Begrenzungen für r_{max} und ω_{max} . Ein externes Lastmoment greift nicht an. In Fig. 1 sind die Verläufe von ω_M und m_M sowie der zurückgelegte Weg Φ_M dargestellt. Vor allem drehzahlabhängige Verluste können durch den optimierten Verlauf reduziert werden. In Fig. 2 sind ψ_{rd} sowie i_{sd} und i_{sq} dargestellt. Die deutliche Reduktion von ψ_{rd} und i_{sd} führt zu einer Verringerung aller elektrischer Verluste. Im Vergleich zur zeitoptimalen Bewegungstrajektorie mit konstantem Rotorfluss, die üblicherweise für die Auslegung von Antrieben verwendet wird, kann für das konkrete Beispiel eine Einsparung der Verlustenergie von ca. 10 % im gesamten Antriebsstrang erreicht werden.

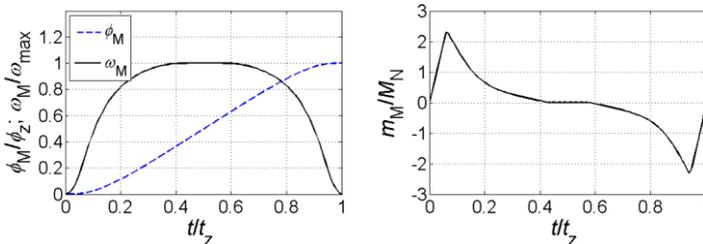


Fig. 1: Motordrehwinkel/Motorwinkelgeschwindigkeit (links) und Drehmoment (rechts) für Bewegungsprofile mit Ruck- und Geschwindigkeitsbegrenzung
Angular position / angular velocity of the motor (left) and motor torque (right) for a movement pattern with constrained jerk and velocity

Minimization of loss energy of a servo drive

Some potential for the minimization of loss energy E_V over a load cycle for different servo drives are evaluated in the DFG-funded project „Energy optimal acceleration drive and downsizing loop“. A load cycle is characterized through the target distance Φ_z , the target time t_z , possible constraints for jerk r , angular velocity ω and acceleration α , as well as a possible load torque m_M . Degrees of freedom for the optimization are the movement trajectory itself and the electrical parameters rotor flux linkage ψ_{rd} and stator current components i_{sd} and i_{sq} which determine the motor torque m_M .

For the optimization two steps are applied. The goal of each step is always the minimization of E_V . During the first step the motion trajectory with the actuating variables ω_M and m_M is optimized. Rotor flux linkage ψ_{rd} and current i_{sd} are assumed to be fix for now. In a second step the now optimized motion trajectory is used for the optimization of the electrical parameters so that the given velocity and torque profiles are met with minimal energy demand. Particularly, a reduction of ψ_{rd} at partial load conditions is effective.

The following example illustrates optimization results for an asynchronous drive without separate gearing. The motion trajectory is constrained by r_{max} and ω_{max} . No external load torque is applied. Fig. 1 shows the graphs of ω_M and m_M as well as the covered angular distance Φ_M . Especially speed dependent losses can be reduced by the optimized trajectory. Fig. 2 shows graphs for ψ_{rd} as well as i_{sd} and i_{sq} . The distinct reduction of ψ_{rd} and i_{sd} leads to a reduction of all electrical losses. Compared to the time optimal motion trajectory with constant rotor flux linkage, which is commonly used for the design of servo drives, a reduction of loss energy of about 10 % for this particular example can be achieved.

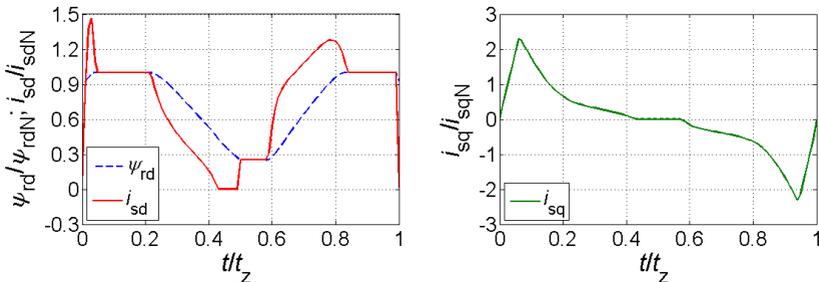


Fig. 2: Rotorflussverkerkung und flussbildender Statorstrom (links); q-Statorstrom (rechts) für das Bewegungsprofil nach Fig.1

Rotor flux and corresponding stator-d-current of the motor (left); stator-q-current (right) for the movement pattern from Fig. 1

Entwicklung eines Werkstattladegeräts mit NetZRückspeisung für das intelligente Laden von Kfz-Kleinspannungsbatterien

Die voranschreitende Elektrifizierung des automobilen Antriebsstrangs führt zu deutlich gestiegenen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Batterien, sodass diese in modernen Fahrzeugen großen Belastungen ausgesetzt sind. Dadurch kommt es zu erhöhten Ausfallraten der eingesetzten Batterien. In manchen Fällen lassen sich die defekten Batterien durch eine Abfolge von Lade- und Entladeströmen regenerieren. Um diese regenerierende Konditionierung zu ermöglichen und den Austausch defekter Batterien schnell und unkompliziert zu gestalten, wird ein bidirektionales Ladegerät für Kfz-Werkstätten benötigt. Die rauen Umgebungsbedingungen im Werkstatteinsatz erfordern ein robustes und leichtes Ladegerät mit passiver Kühlung. Daraus leitet sich die Forderung nach einem hohen Wirkungsgrad und kompakten Filterelemente ab.

Fig.1 zeigt die Struktur des Ladegeräts. Das Ladegerät soll am einphasigen Stromnetz betrieben werden und eine variabel einstellbare Ausgangsspannung im Bereich von 7 bis 70 V aufweisen. Dadurch wird es ermöglicht sowohl Bordnetz Batterien als auch einzelne Module der Traktionsbatterien zu laden.

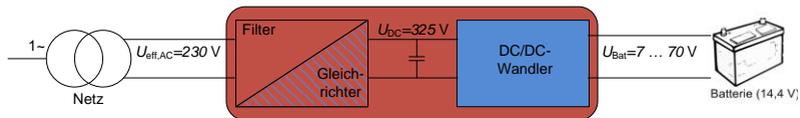


Fig. 1: Struktur des Batterieladegeräts, Structure of the Battery Charger

Im Rahmen des ZIM-geförderten Projektes wird am Lehrstuhl für Elektrische Maschinen und Antriebe der potentialgetrennte DC/DC-Wandler für das Ladegerät entwickelt. Um die Zielsetzungen hinsichtlich Effizienz und geringer Gesamtmasse zu erreichen, werden Modulationsverfahren für weichschaltende Vollbrückenwandler und der Einsatz moderner Wide-Band-Gap Leistungshalbleiter untersucht. Dadurch soll der Betrieb mit Schaltfrequenzen über 100 kHz bei gleichzeitig geringen Schaltverlusten ermöglicht werden.

Erste Untersuchungen zum Vergleich geeigneter Topologien der DC/DC-Wandler zeigten, dass sich die bereits vielfach eingesetzte Dual-Active-Bridge in der einphasigen Ausführung in besonderem Maße für diese Anwendung eignet. Sie besteht aus zwei Vollbrücken, die über einen Transformator zur Potentialtrennung miteinander verbunden sind (Fig. 2). Durch eine kombinierte Nutzung verschiedener Modulationsverfahren lässt sich ein verlustfreies Ausschalten der Leistungshalbleiter in einem großen Arbeitsbereich realisieren. Dadurch ist die Dual-Active-Bridge vor allem für Anwendungen mit einem großen Ausgangsspannungsbereich geeignet.

Development of a battery charger with bidirectional energy flow for intelligent charging of automotive low-voltage batteries in garages

The advanced electrification of the automobile powertrain leads to significantly higher demands on the performance of batteries. Thus onboard energy storage systems are exposed to high loads in modern cars. This leads to increased failure rates of the installed batteries. Sometimes, the defective batteries could be regenerated by a specific sequence of charging and discharging. To enable these regenerating processes and accelerate the replacement of defective batteries, a bidirectional charger for use in garages is needed. The harsh environmental conditions for use in garages require a robust and lightweight charger with passive cooling. Therefore, the request for high efficiency and compact filter elements results from the use case.

Figure 1 shows the structure of the battery charger. The charger needs to operate on single-phase AC power and provide a fully adjustable output voltage in the range from 7 to 70 V. This enables both the charging of onboard power supply batteries as well as individual modules of the traction batteries.

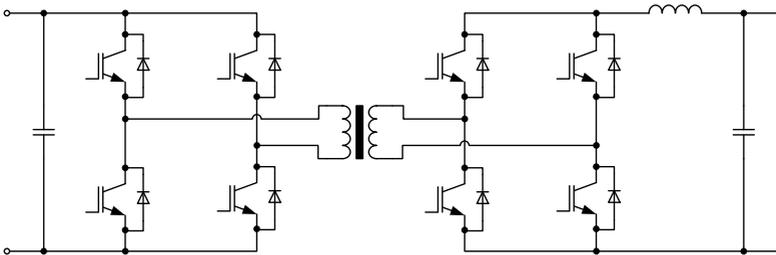


Fig. 2: Aufbau der Dual-Active-Bridge, Topology of the Dual-Active-Bridge

In the context of the ZIM-supported project a galvanically isolated DC/DC-converter for use in the battery charger is being developed at the chair of Electrical Machines and Drives. In order to achieve the requirements in terms of efficiency and low total weight, modulation methods for soft-switching full-bridge converter and the use of modern wide-band-gap power semiconductors are investigated. In this case an operation with switching frequencies of more than 100 kHz and simultaneously low switching losses has to be accomplished. Initial studies on the comparison of suitable topologies of DC/DC-converters have shown that the already widely used Dual-Active-Bridge in the single-phase version is exceedingly suitable for this application. The Dual-Active-Bridge consists of two full bridges which are connected to each other via a transformer for potential separation (Fig. 2). Through a combined use of different modulation schemes a Zero-Voltage-Switching of the power semiconductors can be realized in a large operating range. Thereby, the Dual Active Bridge is especially suitable for applications requiring a large output voltage range.

Aktive Stabilisierung des Netzfilters am direkten Matrixumrichter

Der direkte Matrixumrichter (DMC) aus der Familie der Direktumrichter ist seit vielen Jahren Gegenstand der Vorlauforschung. Wie Zwischenkreisumrichter kann er einen bidirektionalen Energiefluss realisieren, den Leistungsfaktor am Eingang frei einstellen und sowohl sinusförmige Ausgangsströme als auch Netzströme erzeugen. Vor allem letzteres ist Bestandteil aktueller Forschung [1], [2].

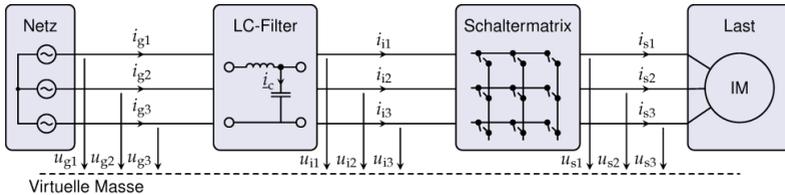


Fig. 1: Aufbau der DMC-Anordnung / Setup of the DMC installation

Aufgrund der Arbeitsweise des DMC entstehen am Eingang der Schaltermatrix gepulste Ströme. Diese müssen durch ein LC-Filter den Netzanschlussbedingungen angepasst werden (Fig.1). Das LC-Filter stellt ein schwingungsfähiges System zweiter Ordnung dar, welches eine ausgeprägte Resonanzstelle besitzt. Die durch Resonanzen entstehenden Oberschwingungen müssen dabei passiv durch Widerstände oder durch aktive Verfahren, die vom DMC selbst ausgehen, gedämpft werden.

Das an der Professur realisierte Verfahren zur aktiven Stabilisierung des eingangsseitigen Filters beim Betrieb des DMC mit Pulsweitenmodulation basiert auf dem gezielten Austausch von Energie zwischen der Statorflussverkettung einer Käfigläufer-Asynchronmaschine und dem Filterkondensator. Die dabei anzuwendende Momentanleistungstheorie nach [3] führt zusammen mit der feldorientierten Regelung (FOC) für Käfigläufer zu einer kaskadierten und durch Linearisierung geprägten Regelstruktur. Die neue Methode unterscheidet sich von der klassischen FOC vor allem durch die Regelung der Rotorflussverkettung. Der dort wirksame Regelkreis muss jetzt zusätzlich die Bedingung an die Dämpfung des LC-Filters erfüllen. Zusätzlich kann auf Basis der Momentanleistungstheorie eine Netzblindstromregelung erfolgen, wie in Fig. 2 dargestellt.

Active stabilisation of the input filter of a direct matrix converter

The direct matrix converter (DMC) is a part of academic research for many years. Like dc-link converters it can realize a bidirectional energy flow, an arbitrary power factor at the input side and sinusoidal currents at the output as well as the grid. Especially the grid side is focused in recent publications [1], [2].

Due to the way the DMC works it creates pulsed currents at the input of the switch matrix. These pulses have to be filtered by a LC filter to serve the local codes for grid power restrictions (Fig.1). The filter itself is second order system with a distinct resonance frequency. Current harmonics have to be damped that are induced by this resonance behaviour. One way would be a passive damping with a resistor in parallel to the filter inductor. Another option is an active damping strategy that will be realised by the DMC itself.

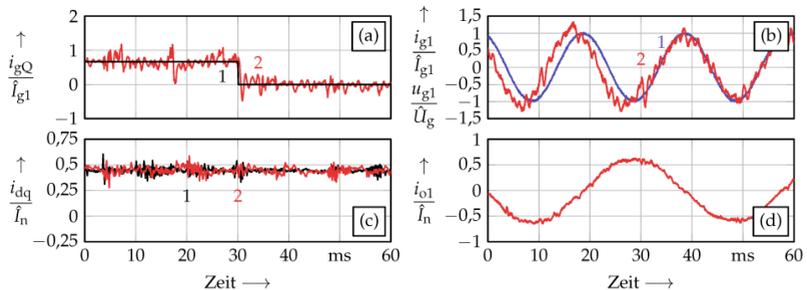


Fig. 2: Netzblindstromänderung ohne passive Dämpfung / Reactive grid current step without passive damping

At the professorship an active stabilisation strategy is researched using the DMC in combination with pulse width modulation. The systematic exchange of energy between the stator flux of a squirrel cage induction machine and the filter capacitor will reduce the harmonic content in the grid current without additional passive damping. This exchange is based on the instantaneous power theory in [3] and together with field oriented control (FOC) it leads to cascaded control structure which is based on Taylor linearization. The new technique differs from the classic FOC in the way to control the of rotor flux linkage. This control loop will additionally serve the needs for a low harmonic content in the grid current stabilizing the LC filter. Additionally, a reactive grid current control can be used to adjust the power factor of the grid current, which is shown in fig. 2.

Literaturverzeichnis / Bibliography

- [1] J. Lei, B. Zhou, X. Qin, J. Wei und J. Bian, „Active damping control strategy of matrix converter via modifying input reference currents,“ *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Bd. 30, Nr. 9, pp. 5260-5271, 2015.
- [2] M. Rivera, C. Rojas, J. Rodríguez, P. Wheeler, B. Wu und J. Espinoza, „Predictive Current Control With Input Filter Resonance Mitigation for a Direct Matrix Converter,“ *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Bd. 26, Nr. 10, pp. 2794-2803, 2011.
- [3] H. Akagi, E. H. Watanabe und M. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, Wiley Interscience, 2007.

Direktes Regelungsverfahren für den Matrixumrichter mit aktiver Stabilisierung des Netzfilters

Der direkte Matrixumrichter (DMC – Direct Matrix Converter) zeichnet sich durch eine besonders hohe Leistungsdichte aus, da der Zwischenkreis entfällt. Es ist lediglich ein eingangsseitiges Netzfilter nötig, um den pulsformigen Eingangsstrom zu glätten. Die einfachste Filtertopologie ist hierbei das LC Filter. Bei Anwendung der direkten Regelungsverfahren ergibt sich jedoch ein breites Frequenzspektrum des Eingangsstromes, wodurch das Filter zum Schwingen angeregt wird. Die Folge ist ein stark ober-schwingungsbehafteter Netzstrom. Stand der Technik ist die passive Dämpfung des LC-Filters durch Widerstände, die parallel zur Filterdrossel geschaltet sind. Durch diese Widerstände wird jedoch die Dämpfung der Frequenzanteile nahe der Schaltfrequenz des Umrichters im Netzstrom verschlechtert.

Das neu erarbeitete direkte Regelungsverfahren kombiniert die direkte Momentenregelung (DTC – Direct Torque Control) für Asynchronmaschinen mit der direkten Spannungsregelung (DVC - Direct Voltage Control) der eingangsseitigen Filterkondensatoren [1]. Der neue Regelungsansatz soll als direkte Momenten- und Spannungsregelung (DTVC – Direct Torque and Voltage Control) bezeichnet werden. Mit Hilfe der Regelung der Kondensatorspannung des Filters gelingt es, das Filter zu stabilisieren, ohne dass eine passive Dämpfung benötigt wird.

In Fig. 1 sind die Messergebnisse der konventionellen DTC mit passiver Dämpfung und der neuen DTVC ohne passive Dämpfung gegenübergestellt. Die Käfigläufer-Asynchronmaschine wird bei halber Nenndrehzahl und vollem Nennmoment betrieben. Die netzseitige Stromqualität unter Anwendung der DTVC ohne passive Dämpfung (Fig. 1-(e)) scheint vergleichbar mit der Stromqualität mit DTC und passiv gedämpften Filter (Fig. 1-(a)) zu sein. Das zeigen auch die ermittelten THD-Werte von $THD_{DTC} = 11,4 \%$ und $THD_{DTVC} = 11,1 \%$ des jeweiligen Netzphasenstromes. Hervorzuheben ist, dass die Amplituden der Harmonischen im Frequenzspektrum des Netzstromes bei der DTVC (Fig. 1-(f)) ab 2 kHz stärker gedämpft werden, als es bei DTC mit passiver Dämpfung der Fall ist (Fig. 1-(b)). Grund ist der wegfallende Widerstand parallel zu den Filterdrosseln. Dieser Vorteil wird durch die Berechnung des THDs bis zur 40. Harmonischen nicht mit abgebildet.

Direct control method for matrix converter with stabilization of the grid current

The direct matrix converter (DMC) has a high power density caused by the omitted DC link. Only a grid filter is necessary to smooth the pulsed input current. The simplest filter topology is the LC filter. But by using a direct control method for the DMC a wide frequency spectrum of the input current occurs which excites oscillation of the electrical filter values. The consequences are high harmonic amplitudes of the grid current. Prior art is the passive damping of the LC filter with resistors parallel to the

inductors. But these damping resistors cause poorer damping of the harmonic amplitudes near the switching frequency of the converter.

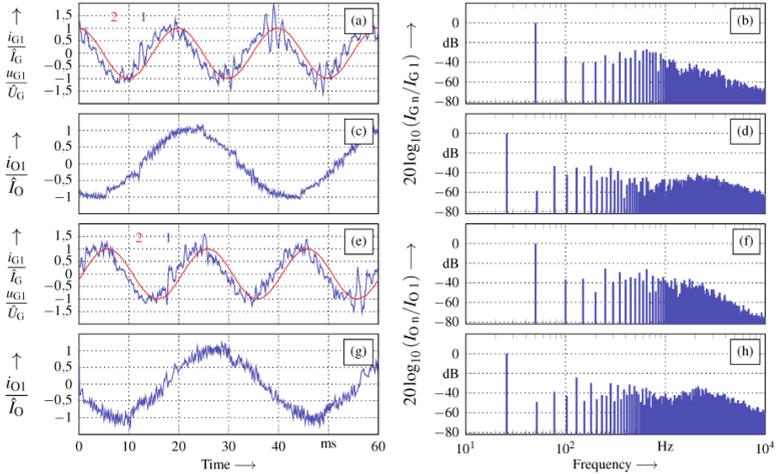


Fig. 1: Experimentelle Ergebnisse von Netz- und Ausgangsstrom bei DTC mit passiver Dämpfung ((a) bis (d)) und bei DTVC ohne passiver Dämpfung ((e)-(h)) bei Nennmoment und halber Nenndrehzahl: (a)/(e)-1 Netzstrom; (a)/(e)-2 Netzspannung; (b)/(f) Frequenzspektrum des Netzstroms; (c)/(g) Ausgangsstrom; (d)/(h) Frequenzspektrum des Ausgangsstroms

The new acquired direct control method combines the direct torque control (DTC) of induction machines with the direct voltage control (DVC) of the input side filter capacitors [1]. The new control approach is called direct torque and voltage control (DTVC). With the aid of controlling the capacitor voltage, the stabilisation of the LC filter without need of passive damping is succeed. Fig. 1 compares the experimental results of the conventional DTC with passive damping and the new DTVC without passive damping. The induction machine is driven with half rated speed and full rated torque. The grid side current quality of the DTVC without passive damping (fig. 1-(e)) seems to be nearly the same as with DTC with passive damping (fig. 1-(a)). This is what also the THD values with $THD_{DTC} = 11,4 \%$ and $THD_{DTVC} = 11,1 \%$ of the grid current show, respectively. It is to highlighted, that the harmonic amplitudes in the frequency spectrum of the grid current with DTVC (fig. 1-(f)) is better damped for frequencies higher than 2 kHz compared to the DTC with passive damping (fig. 1-(b)). The reason is the omitting resistors parallel to the filter inductors. This advantage is not figured by the calculation of the THD up to the 40th order of the fundamental wave.

Literatur/ Literature

- [1] N. Remus, M. Leubner: Direct Control Method for Matrix Converter with Stabilisation of the Input Current, European Power Electronics and Applications - EPE, Geneva, Switzerland, 2015.

Modellierung axialer Magnetlager aus Stahl- und SMC-Komponenten mit Wirbelstromeffekten

Die elektromagnetische Dynamik von axialen Magnetlagern ist im besonderen Maße von den eingesetzten Materialien abhängig. Axiale Flussverläufe machen eine Blechung von Stator und Rotor unwirksam und hohe induzierte Spannungen rufen im Magnetkreis wirbelstrombedingte Gegenfelder hervor. Zusätzliche kompensierende Magnetisierungsströme lassen den messbaren Gesamtstrom der Steuerspule dem kraftbildenden Hauptfluss vorseilen. Steigende Anforderungen an die Regeldynamik erfordern daher den Einsatz schwach elektrisch leitfähiger Kernmaterialien (Soft Magnetic Composites - SMC), welche den Phasenversatz im Vergleich zu konventionellen Stahlscheiben um bis zu 90% senken können. Die geringere Sättigungsinduktion und die stark verminderte mechanische Festigkeit von SMC verhindern jedoch zurzeit einen industriellen Einsatz für rotierende Magnetlagerbestandteile. Ein zweiter Ansatz ist die exakte analytische Beschreibung des axialen Magnetkreises mit Differentialgleichungen für den Fall großer Flussanstiege und hoher Beanspruchung durch Wirbelströme. Nach hinreichender Vereinfachung des Modells ist so eine Kompensation der Hauptfeldverzögerung durch die Regelung theoretisch möglich. Statt des vorseilenden gesamten Spulenstroms wird eine Regelung der magnetischen Flussdichte bzw. des kraftbildenden Magnetisierungsstroms angestrebt. Das analytische Modell, welches auf einer Beschreibung der mechanischen Lageregelstrecke und Stromregelstrecke mit Verzögerungsgliedern fraktionaler Ordnung basiert, dient dabei als Schätzer für die Ermittlung des Istwerts aus dem messbaren Spulenstrom (Fig. 1). Für SMC nicht gültige Vereinfachungen und die Beschränkung auf identische Materialien zu beiden Seiten des axialen Luftspalts machten bestehende Modelle nur bedingt einsetzbar für die hier untersuchte Konfiguration (Fig. 2). Im Zuge dieses Projekts ist es gelungen das Streckenmodell für den vorliegenden unsymmetrischen Fall zu erweitern sowie messtechnisch und simulativ zu validieren. Die Diskretisierung des Reglers sowie die hardwareseitige Implementierung des Schätzers sind Bestandteil fortführender Arbeiten. Durch den Einsatz von PID-Reglern fraktionaler Ordnung ist zudem eine weitere Verbesserung des Regelverhaltens zu erwarten.

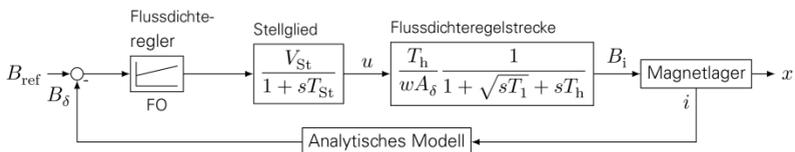


Fig. 1: Signalflussplan einer unterlagerten Flussdichteregelung mit Strommessung, Regler und Regelstrecke fraktionaler Ordnung, Signal flow diagram of subsidiary flux density control with current measurement, Controller and control plant of fractional order

Modeling of Active Magnetic Thrust Bearings Consisting of Steel- and SMC-Components Including Eddy-Current Effects

The electromagnetic dynamics of active magnetic thrust bearings are characterized by an above-average dependency on the used materials. Axially directed fields render laminated stators and rotors ineffective. High induced voltages inside the magnetic core evoke eddy currents and opposing fields, which are compensated by an additional magnetizing current. Therefore a significant delay between the measurable coil current and the force-related magnetic flux is observed. Increasing demand on control dynamics require the application of less electrically conductive materials, like Soft Magnetic Composites (SMC), which can reduce the phase delay by 90% in comparison to conventional steel disks. However, the lower saturation flux density and weak mechanical strength currently disqualify SMC as material for rotating components in industrial applications. A second approach is the exact analytical modeling of the axial magnetic circuit with differential equations for the case of high flux gradients and eddy current loads. By sufficient simplification of the model a compensation of the main flux delay within the closed-loop control is theoretically possible. Instead of the coil current, the control of the magnetic flux density respectively the force generating magnetizing current is intended. The analytical models of the current and position plants are based on fractional order systems and can serve as estimators for the determination of the actual value from the measured coil current (Fig. 1). In case of SMC invalid simplifications and the assumption of identical materials on both sides of the air-gap virtually disable established models for the probed configuration (Fig 2.). During this project the refinement of the plant models for the asymmetrical case was accomplished and validated by measurements and FE-analysis. The discretization of the controller and hardware implementation of the estimator is part of future studies. Besides, by application of fractional order controllers a further improvement of the closed loop dynamics is to be expected.

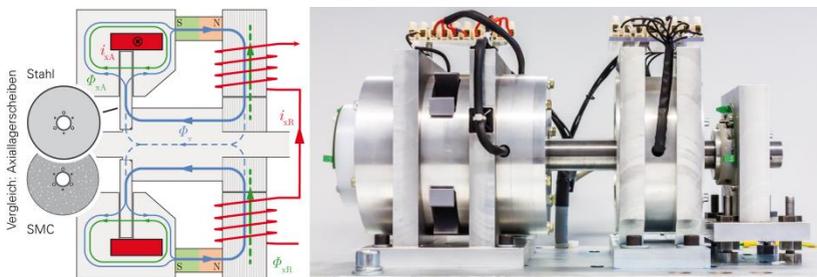


Fig. 2: Querschnitt des kombinierten Axial-Radial-Magnetlagers und vollständiger Messaufbau mit zusätzlichem Unipolarlager (5-achsige Lagerung des Rotors), Cross section of combined axial-radial magnetic bearing and complete test setup with additional unipolar 5 axes rotor bearing

Rotierender Aktiver Gleichrichter für Turbogeneratoren

Zur Liberalisierung der Strommärkte in Deutschland verlangt das Energiewirtschaftsgesetz von 1994 die organisatorische und wirtschaftliche Trennung der Energieerzeugung und –verteilung. Aus diesem Grund müssen die Netzbetreiber den Zugang zum deutschen Verbundnetz durch ein Regelwerk festlegen. Dieses Regelwerk beschreibt technische Anforderungen und Verfahrensweisen für alle Anschlussnehmer. Dadurch soll die Netzstabilität und die Zuverlässigkeit trotz der dezentralen Organisation gewährleistet werden. In den Anschlussbedingungen ist unter anderem der Beitrag der Energieerzeugeranlagen zur Spannungs- bzw. Blindleistungsregelung definiert. Die Regelung bei Turbogeneratoren erfolgt durch das Erregersystem.

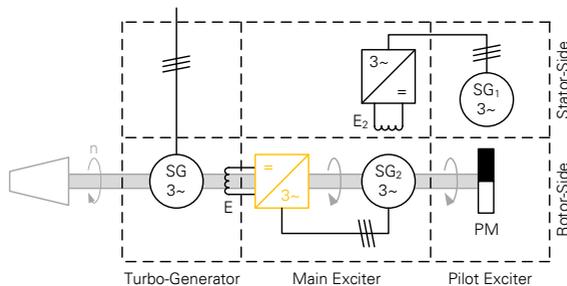


Fig. 1: Bürstenlose Erregung von Turbogeneratoren, Brushless excitation in turbogenerators

Entsprechend Fig. 1 besteht die bürstenlose Erregung in Turbogeneratoren aus einer Haupterreger- und einer Hilferregermaschine. In der Haupterregermaschine ist die Feldwicklung des Turbogenerators über einen rotierenden Diodengleichrichter mit den Läuferwicklungen der Außenpolmaschine verbunden. Die Außenpolwicklungen werden über ein Thyristor-Stellglied aus einem permanentregten Drehstrom-Synchrongenerator der Hilferregermaschine gespeist. Der Feldstrom wird über das ständerseitige Thyristor-Stellglied geregelt. Das Nachführen des Generatorfeldstromes bei schnellen Wechslen des Betriebszustandes ist sehr träge aufgrund der großen Erregerzeitkonstante. Den stetig steigenden Minimalanforderungen der Netzbetreiber bezüglich Dynamik und Zuverlässigkeit bei kurzzeitigen Störungen werden Turbogeneratoren mit bürstenloser Erregung deshalb immer weniger gerecht.

Im Zuge eines BMBF-Projekts wird ein neuartiges Erregersystem in Zusammenarbeit mit dem Siemens Generatorenwerk Erfurt und dem mittelständischen Unternehmen CE-SYS Engineering entwickelt, das auf der bürstenlosen Erregung basiert. Der Ansatz besteht im Nachführen des Generatorfeldstromes durch den rotierenden steuerbaren Gleichrichter. Die Erregungsgeschwindigkeit wird im Vergleich zum bisher

eingesetzten Sechspuls-Diodengleichrichter gesteigert, da die Zeitkonstante der Außenpolmaschine für die Regelung nicht mehr wirksam ist. Zusätzlich wird mit dem rotierenden aktiven Gleichrichter eine aktive Entregung ermöglicht. Dabei wird die in der Feldwicklung gespeicherte Energie entnommen und motorisch über den Erreger in eine Wellenbeschleunigung übertragen. Durch die hohe Trägheit des Stranges wird die Generatorwelle nur unwesentlich beschleunigt. Mit diesem Ansatz wird eine wesentlich höhere Dynamik der bürstenlosen Erregung erzielt.

Entsprechend der Anschlussbedingungen wird ein Sollwertsprung des Feldstroms um 10 % vorgegeben. Die Sprungantwort eines Erregersystems mit rotierendem Diodengleichrichter ist in Fig. 2 a) und mit einem rotierenden Thyristorsteller in Fig. 2 b) dargestellt. Als Referenz ist die durch Fin-Grid gestellte Mindestanforderung dargestellt. Entsprechend der Fin-Grid-Vorgaben ist eine Anregelzeit von 800 ms vorgesehen, um den Sollwertsprung zu erreichen. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz eines rotierenden aktiven Thyristorstellers die Regelgeschwindigkeit des Erregersystems erheblich gesteigert werden kann. Die erzielte Dynamik entspricht der statischen Erregung. Durch den Verzicht auf Bürsten ist das neu entwickelte Erregersystem deutlich wartungsärmer.

Rotating Active Rectifier in Turbo-Generators

For liberalization of the electricity market in Germany, the German Energy Industry Act from 1994 requires an organizational and economic separation of energy production and distribution. For this reason, network operators have to define the access to the German power grid by a set of rules. This framework describes the technical requirements and procedures for all energy generation systems. This is intended to ensure network stability and reliability, despite the decentralized organization. In the connection conditions, the contribution of energy generation systems to voltage and reactive power control is defined. The control of turbo-generators is performed by the excitation system.

According to fig. 1, the brushless excitation in turbo-generators consists of a main exciter and a pilot exciter. In the main exciter, the field winding of the turbo-generator is connected to armature windings of the external-pole machine through the rotating diode rectifier. The external-pole windings are fed via a thyristor rectifier from a permanent-magnet three-phase synchronous generator of the pilot exciter. The field current of the turbo-generator is regulated by the thyristor rectifier on the stator-side. The tracking of the generator field current during rapid change of the operating state is very slow due to the large excitation time constant. Turbo-generators with brushless excitation are therefore incapable to meet increasing requirements with respect to dynamics and reliability.

In cooperation with Siemens Generatorenwerk Erfurt and CE-SYS Engineering, a new excitation system is developed that is based on the brushless excitation. The approach consists in tracking the generator field current through the rotating rectifier. The excitation dynamics is increased with respect to the previously used six-pulse diode, since the time constant of the external-pole machine is no longer effective for the control. Furthermore, an active de-energizing of the generator field winding is realized by the rotating active rectifier. In this case, the stored energy in the field winding is taken out and transferred to shaft acceleration by the exciter machine. The high inertia leads to an insignificantly small acceleration of the generator shaft. With this approach, a much higher dynamics of brushless excitation is achieved.

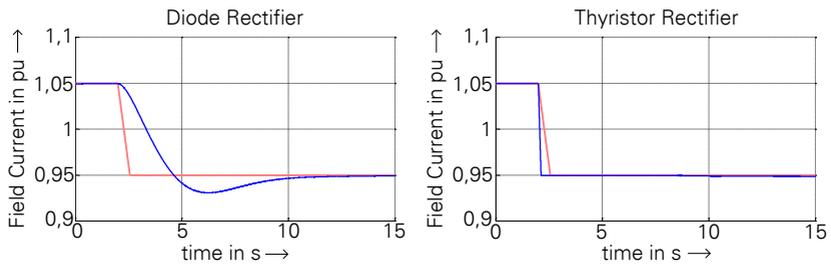


Fig. 2: Dynamisches Verhalten von Erregersystemen (links: mit Diodengleichrichter, rechts: mit Thyristorstromrichter, Dynamic behavior of exciter system (left: diode rectifier, right: thyristor rectifier)

The step responses of an excitation system with rotating diode rectifier and a rotating thyristor rectifier are shown in Fig. 2 a) and b), respectively. Additionally, the minimum Fin Grid requirements are shown as reference. According to the specifications, a maximum rise time of 800 ms is allowed in order to change the field current by 10%. Simulation results suggest that the control speed of the excitation system can be significantly increased through the use of a rotating active thyristor rectifier. The dynamic behavior corresponds to the static excitation. By eliminating brushes, the newly developed excitation system requires considerably less maintenance.

Energieoptimaler Betrieb von Windkraftanlagen mit doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren unter besonderer Berücksichtigung gesetzlicher Randbedingungen

Windkraftanlagen werden eine Hauptrolle bei der Einhaltung der Klimaziele spielen. Die Verringerung des Anteils klassischer Kraftwerke verringert aber die Fähigkeit zur Stabilisierung der Netzfrequenz. Deshalb wurde die Netzfrequenzregelung von Windkraftanlagen mit doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren untergesucht. Die vorgeschlagene Frequenzregelung basiert auf der Kombination von Entladung kinetischer Rotationsenergie und Pitch-Regelung. Der Beitrag der Windkraftanlagen zur Netzspannungsregelung wurde ebenso untergesucht. Das Zusammenspiel von konventionellen Kraftwerken und Windparks der MW-Klasse wurde simuliert. Danach wurde das Verfahren im Labor an einem Netzmodell unter Verwendung einer 4 kW doppelt gespeisten Induktionsgenerator und einer 15 kW-Induktionsmotor als Windturbinenmodell experimentell untersucht. Die experimentelle Methode wurde auf Personal-Computer mit dSPACE Controller entwickelt. Fig.1 und Fig. 2 zeigen Messungen der Netzfrequenz und Netzspannung, die beide von der Windkraftanlage geregelt werden.

Der optimale Betrieb von Windkraftanlagen durch Maximum Power Point Tracking (MPPT) Methode wurde implementiert und untersucht. Der Betrieb der Windkraftanlage wurde unter dem Gesichtspunkt minimaler Generatorverluste bei der Blindleistungsverteilung durchgeführt. Fig. 3 und Fig. 4 zeigen die Wirkungsgrade des Generators bei verschiedenen Steuermethoden im Phasenschieberbetrieb.

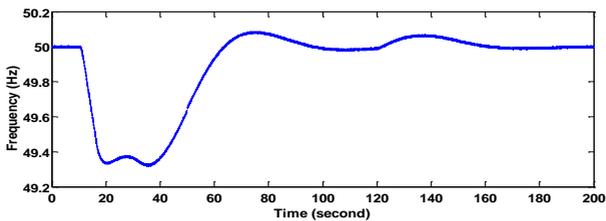


Fig. 1: Frequenzregelgröße der Windkraftanlage, Measured frequency controlled by wind power plant

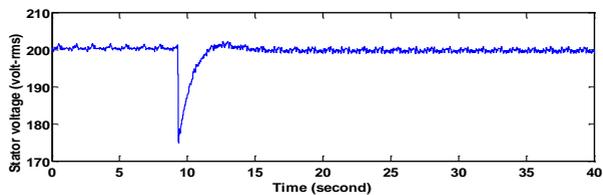


Fig. 2: Spannungsregelgröße der Windkraftanlage, Measured voltage controlled by wind power plant

Optimum operation of wind turbines with doubly fed induction generator with consideration to the network operator regulations

Wind power plants will play the major role for getting the COP21 goals. However, the reducing of fossil power plants decrease power system capability to the network frequency control because the conventional power plants have natural capability to the frequency control, where the network frequency is coupled to the generator speed. In other side, the network frequency is decoupled from speed of wind power generator. Relating to this case, the network frequency controlled by wind power plants with doubly fed induction generators was investigated in this research. The new frequency control method was developed from frequency control based on kinetic energy and pitch control methods published in several literatures. Moreover, the wind power plants contribution to the network voltage control was investigated as well. The power system model consisting of several conventional power plants and wind farm with MW-class wind turbines was simulated. Then, the method was investigated in laboratory scale by using a 4 kW doubly-fed induction generator coupled to a 15 kW induction motor as a wind turbine model. The experiment method was developed online and interactively by using personal computer with dSPACE controller board. Beside of that, the regulation of network operator for the wind power plants operation was studied and implemented in developed control method. Fig. 1 shows the measured frequency controlled by wind power plant. Then, Fig. 2 shows the measured voltage controlled by wind power plant with consideration to the network operator code.

The optimum operation of wind power plants based on maximum power point tracking (MPPT) method was implemented and investigated. Then, the minimum power losses operation of wind power generator based on reactive power distribution was implemented and investigated in this research as well.

Fig. 3 shows the simulated efficiency of 4 kW wind power plants in several reactive power generation methods. The reactive power sharing ratio (RPSR) method shows the best performance compared to other reactive power generation methods including the stator unity power factor method. The efficiency difference of RPSR to other methods is shown in Fig. 4.

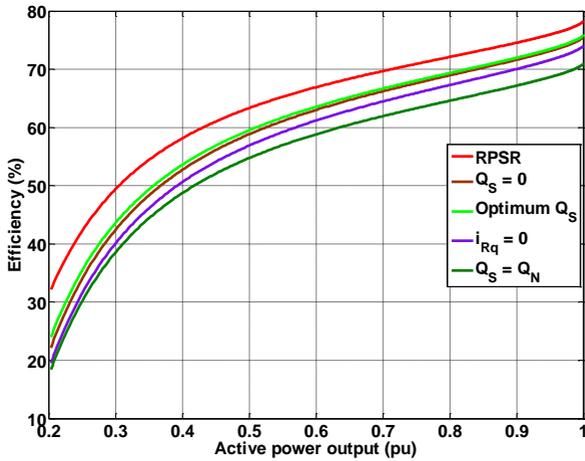


Fig. 3: Wirkungsgrade, Efficiencies

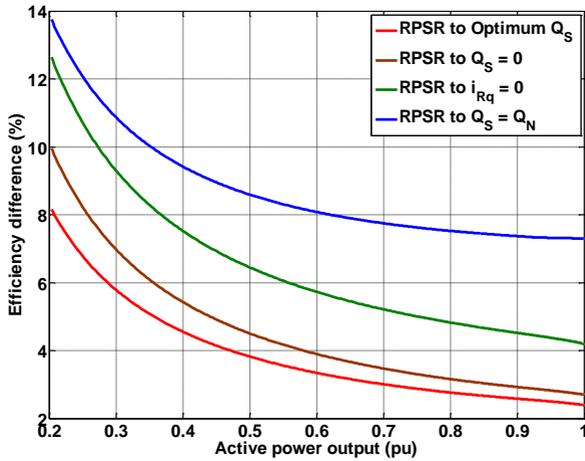


Fig. 4: Wirkungsgraddifferenzen, Efficiency differences

Flussbasierte Regelung aktiver Magnetlager

Aktive Magnetlager verzeichnen aufgrund der Bewegungsfreiheit mit einstellbarer Positionierungsmöglichkeit allgemein und speziell im Fachbereich Fertigungstechnik eine wachsende Akzeptanz. Die vergleichsweise geringe Steifigkeit führt bei hochgenauen Positionierungs- und Präzisionsbearbeitungsanforderungen zu Einschränkungen. Zur Verbesserung der dynamischen Steifigkeit und der Positioniergenauigkeit aktiver Magnetlager wurden flussbasierte Regelstrategien mehrfach vorgeschlagen. Dabei besteht für einen Großteil der magnetgelagerten Antriebe die Schwierigkeit, konventionelle Magnetfeldsensoren in den kleinen Luftspalten von typischerweise 500 μm zu integrieren. Extrem dünne Sensorelemente zur Flussdichtemessung mit höchsten Zuverlässigkeits- und Lebensdaueranforderungen gilt es zu realisieren. Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden flexibel verformbare Wismut-Hall-Sensoren mit einer Gesamtbauhöhe bis hin zu $< 150 \mu\text{m}$ entwickelt und deren Leistungsfähigkeit zur Messung zeitveränderlicher Magnetfelder untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse werden direkt genutzt, um ein Demonstrationslager mit Hilfe integrierter Flussdichtesensorik auszurüsten und flussbasiert geregelt zu betreiben.

Gemeinsam mit dem Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik IAVT (Prof. T. Zerna) und dem Institut für Integrative Nanowissenschaften (IFW Dresden, Prof. O. G. Schmidt) wurden ultradünne Wismut-Hall-Sensoren (Fig. 1a,b) mit einem Messbereich bis $2,3\text{T}$ entwickelt, aufgebaut und anschließend in einem aktiven Radiallager eines zweiachsig magnetisch gelagerten Rotors (Fig. 1c) integriert. Die mechanisch flexiblen Sensoren wurden auf dem Statorpol (Fig. 1a) eines Heteropolarlagers mit homopolarer, permanentmagnetischer Vormagnetisierung montiert.

Die neue Sensortechnologie ist neben der Zustandsüberwachung (Monitoring) insbesondere zur avisierten direkten Feldregelung einsetzbar: Erstmals gelang die Implementierung einer Magnetlagerregelung mit unterlagerter Flussdichteregelung (Fig. 2) unter Einsatz der Wismut-Hall-Sensoren. Im Ergebnis wurde die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems durch das erfolgreiche Aufstarten und die vollständige Stabilisierung des Rotors (Fig.

3) eines industrietypischen Radiallagers demonstriert. Im Fokus fortsetzender Arbeiten stehen die Untersuchung positionensorloser Regelungen sowie die Entwicklung von Sensoren $< 100 \mu\text{m}$.

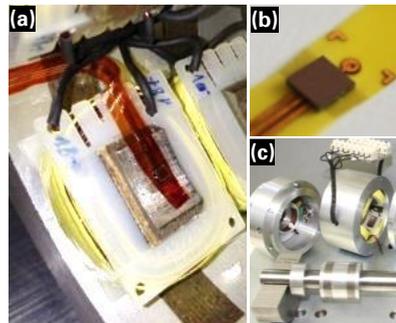


Fig. 1: (a) Bi Hall sensor mounted onto the stator pole of typical radial bearing. (b) Stud bump bonded Bi sensor incl. cabling. (c) AMB system: stator, rotor, measurement systems.

Flux Based Control of Active Magnetic Bearings

Within the last years magnetic bearing technology has been pushed by a significant upturn in oil & gas industry as well as in machining applications. Nowadays, specific high speed spindles are equipped with industrially standardized active magnetic bearing systems (AMB) allowing for highly precise rotor positioning due to their contact-free and low-maintenance operation. However, compared to conventional ball bearings well-established AMB systems are limited by their relatively low stiffness. In order to improve dynamic performance flux based control algorithms have been suggested for the last decades already. The main challenge is how to integrate commercially available magnetic field sensors into the tiny air gap of typically 500 μm . Therefore, ultra-thin and preferably even flexible sensor elements meeting the strong requirements in lifetime and reliability are needed essentially. Within this project ultra-thin Bismuth Hall sensors with a total thickness down to less than 150 μm are under development. After fabrication the sensor functionality and suitability for detection of time-varying magnetic fields are to be investigated intensely. Finally the sensor signal is intended to be used as direct feedback for flux based AMB control strategies.

In close collaboration with both the Electronic Packaging Laboratory IAVT (Prof. Zerna) and the Institute for Integrative Nanosciences (IFW Dresden, Prof. Schmidt) we developed ultra-thin and flexible Bismuth Hall sensors (Fig. 1a,b) characterized by a measurement range of up to 2.3 T. After fabrication the sensors were successfully integrated into a typical radial AMB providing a two-axes rotor suspension (Fig. 1c). The mechanically bendable Bi sensors were mounted directly onto the curved stator pole (Fig. 1a). Besides permanent condition monitoring the new sensor platform allows for realization of the foreseen magnetic field control. For the first time we successfully implemented a flux based AMB control loop by using the Bi sensorics (Fig. 2): Operational capability was demonstrated in proper rotor liftoff as well as stable operation and accurate positioning of the test system (Fig. 3) designed similar to typical AMBs in industry. Future steps focus on further reduction in sensor height and investigations on position sensorless algorithm.

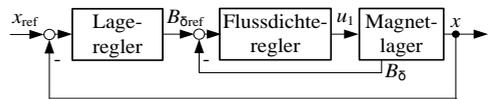


Fig.2: Kaskadierter Lage/Flussdichteregelkreis, Cascaded position / flux density loop.

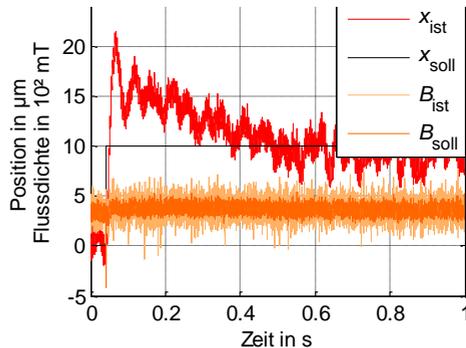


Fig.3: Sprungantworten zum flussdichtegeregelten AMB, Step response: Flux based controlled AMB (see Fig. 2). Proper stabilization and rotor positioning using flux density feedback

Konzentration des Permanentmagnetflusses durch Segmentierung des Stators am Beispiel der TORUS-Maschine

Unter der TORUS-Maschine versteht man eine permanenterrechte Axialflussmaschine mit innenliegendem Stator und zwei außenliegenden Rotorscheiben. Die Bauform eignet sich insbesondere bei flachen, scheibenförmigen Bauräumen sowie hohen Drehmomentanforderungen. Da die Luftspaltfläche lediglich von Außen- und Innenradius abhängt, fokussiert man eine Minimierung der axialen Ausdehnung. Dazu bietet sich die Kombination von Oberflächenmagneten und hohen Polpaarzahlen an.

Als mögliches Anwendungsbeispiel wurde der Einsatz der TORUS-Maschine im Antrieb eines Pedelecs untersucht. Die schlanke Außengeometrie gestattet eine Integration an der Pedalwelle neben dem Kettenblatt. An dieser Position unterstützt die Maschine den Pedaltritt des Fahrers. Verzichtet man auf ein zusätzliches Getriebe, muss der Direktantrieb bei geringer Drehzahl (ca. 60/min) hohe Spitzendrehmomente (bis 65 Nm) erbringen. Der gefertigte Prototyp weist eine Masse von 6,5 kg auf und erfüllt die Anforderungen. Die gravimetrische Drehmomentdichte beträgt demnach 10 Nm/kg.

Als Material für den Eisenkreis kommt SMC (Soft Magnetic Composite) zum Einsatz. Der Pulververbundwerkstoff wird unter hohen Drücken (≥ 800 MPa) in die gewünschte Form gepresst. Da herkömmliche Presswerkzeuge meist nur auf eine äquivalente Gewichtslast von 200 t ausgelegt sind, ist die Fertigung einer geschlossenen Statorkontur nicht zielführend. Stattdessen bietet es sich an, den Stator aus einzelnen Segmenten zusammensetzen. Das Vorgehen bietet darüber hinaus die Gelegenheit, den Effekt der Permanentflusskonzentration auszunutzen.

Wie in

Fig. 1 dargestellt, besteht der segmentierte Stator aus einzelnen H-förmigen Weicheisensegmenten, die jeweils von einer Jochspule umwickelt sind. Fig. 2 zeigt den Verlauf der Feldlinien innerhalb einer Statorhälfte. Man erkennt, dass zwischen den Segmenten freigelassene Luftspalte als Flussbarrieren wirken. Die Folge ist, dass sich der Permanentmagnetfluss auf die verbleibenden U-förmigen Weicheisenpfade konzentriert. Dadurch verbessert sich die Kopplung zwischen den Jochspulen und dem Rotorfluss, weshalb der Wicklungsfaktor auf einen Wert >1 ansteigt. Insgesamt ergeben sich durch die Segmentierung mit dazwischenliegenden Luftspalten verringerte Kupferverluste. Gleichzeitig gelingt eine wirksame Unterdrückung globaler Wirbelströme, sofern die Flussbarrieren geringe elektrische Leitfähigkeit aufweisen.

Ein weiterer Vorteil der segmentierten Topologie betrifft die Wicklung. Die Jochspulen weisen im Vergleich zu Zahnspulen eine rechteckige Form und somit konstante Biegeradien auf. Zudem sind infolge der H-Segmentierung weniger Spulen notwendig, da sich die Lochzahl im Bereich von $q \approx 1/6$ bewegt. Im Vergleich zu Zahnspulen, bei denen im dreisträngigen Fall $q \approx 1/3$ gilt, halbiert sich somit der Wickelaufwand.

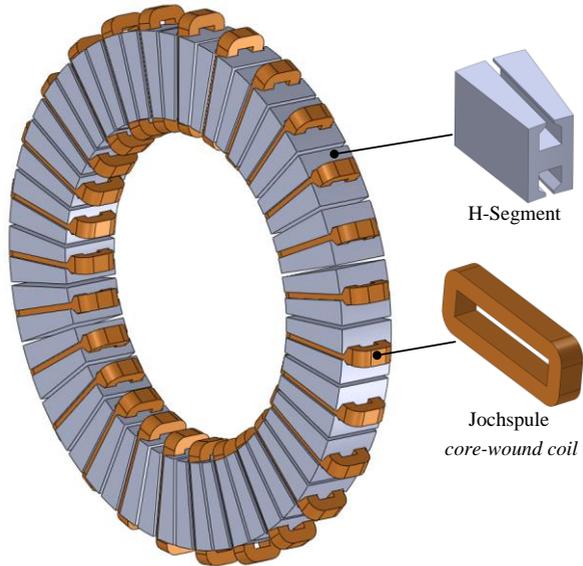


Fig. 1: Stator der segmentierten TORUS-Maschine, Stator of the segmented TORUS machine

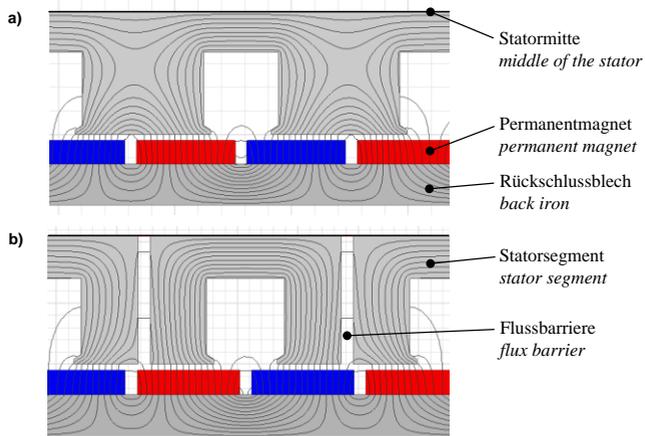


Fig. 2: Verlauf der Feldlinien, a) unsegmentierter Stator, b) bei H-Segmentierung
 Course of the flux lines, a) unsegmented stator, b) stator with H-segmentation

Auswahlkriterien für eine energieeffiziente elektrische Antriebstechnik

Die Lebenszykluskosten von Antriebssystemen werden durch die Energiekosten dominiert. Eine kostenminimale Anlage erfordert daher stets eine gesteigerte Energieeffizienz. Um das vorhandene Energiesparpotenzial auszuschöpfen, wurden in diesem Forschungsvorhaben Methoden erarbeitet, die Antriebssysteme unter besonderer Berücksichtigung des bedienten Prozesses energieeffizient auszulegen. Beispielanwendungen sind dabei Pumpen- und Förderantriebssysteme. Das Ergebnis der Arbeit sind praktikable Projektierungshinweise sowie prozessspezifische Auswahlkriterien zur Auswahl von energieeffizienten Antriebssystemen.

Es wird gezeigt, wie bereits in einem frühen Projektierungsstadium auf der Grundlage von einem gegebenen Lastprofil ein energieeffizientes Antriebssystem projiziert werden kann. Für die Abschätzung des Energieverbrauchs mit den vereinfachten Verlustmodellen sind wenig Detailwissen und keine Energiemessungen erforderlich. Die Modelle basieren auf frei zugänglichen Datenblattangaben und wurden in einem benutzerfreundlichen Projektierungs-Tool mit grafischer Oberfläche implementiert.

Der Vergleich der vielen möglichen Antriebskonfigurationen und der Systemfreiheitsgrade führt zu einem Auswahldiagramm, welches die Auswahl eines energieeffizienten Antriebssystems mit wenigen Auswahlkriterien ermöglicht. Die Auswahlkriterien basieren auf dem bekannten Lastprofil einer Anlage. Die in Fig. 1 und Fig. 2 dargestellten Auswahldiagramme gelten für die Anwendungsbeispiele der Pumpen- und Förderantriebe. Durch die schnell zu berechnenden Auswahlkriterien wird in Fig. 1 das energieeffiziente System einer drehzahlgeregelten Pumpenkaskade mit 2 Pumpen gewählt.

Auswahldiagramm für energieeffiziente Pumpenantriebe mit Beispiel

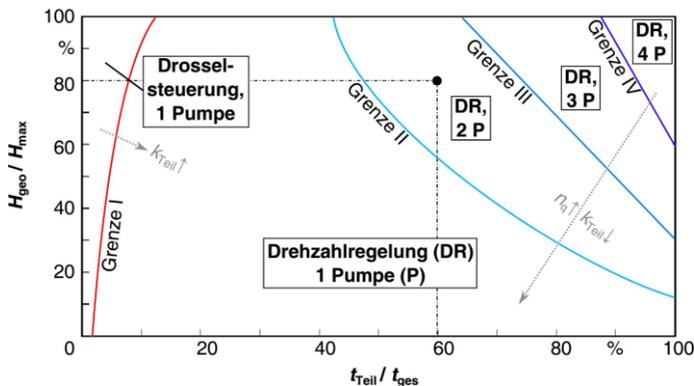


Fig.1: Auswahldiagramm Pumpenantriebe mit eingezeichnetem Projektierungsbeispiel, Selection diagram for pump drives with example

Design Criteria for Energy Efficient Drive Systems

The life cycle costs of drive systems are dominated by their energy costs. Therefore, a low cost system always requires increased energy efficiency. In order to exploit the energy saving potential, a method to design an energy-efficient drive system with special consideration of the mechanical process underneath has been developed in this research project. Example applications are pump drive and conveyor drive systems. The results of the work are feasible design rules as well as process-specific selection criteria for the selection of energy-efficient drive systems.

It is shown, how at an early stage of project planning an energy-efficient drive system can be configured on the basis of a given load profile. The simplified loss models require little detailed knowledge and no energy measurements in order to estimate the electric energy consumption. The models are based on freely accessible data-sheet specifications and have been implemented in a user-friendly drive design tool with a graphical interface.

The comparison of the many possible configurations due to the various degrees of freedom in system design leads to a selection chart. The selection charts shown in Figures 1 and 2 apply to pumps and conveyor drives. They are feasible for selecting an energy-efficient drive system with few selection criteria. The selection criteria are based on the known load profile of a drive system. Using the calculated selection criteria of an exemplary pump system, the energy-efficient system in Figure 1 would be a variable speed pump cascade with 2 pumps.

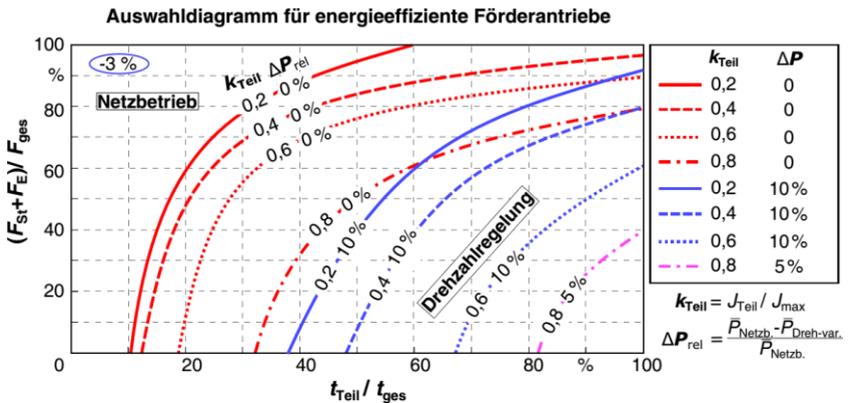


Fig.2: Auswahldiagramm für energieeffiziente Förderantriebe, Selection diagram for energy efficient conveyor belt drives

Projektierungsregeln für energieeffiziente Servoantriebssysteme am Beispiel einer Quersiegeleinheit von Verpackungsmaschinen

Das Einsatzgebiet von Servoantrieben erstreckt sich über das gesamte produzierende Gewerbe von Verpackungsmaschinen über Industrieroboter bis hin zu Werkzeugmaschinen, weshalb es sich lohnt die Energieeffizienz dieser Antriebe genauer zu untersuchen. In vielen Fällen kann die Energieeffizienz durch vergleichsweise einfache Maßnahmen verbessert werden. Eine Steigerung der Energieeffizienz führt neben geringeren Energiekosten zusätzlich auch zu einer Verringerung des Kühlaufwands sowie sinkenden Investitionskosten bei der Verkleinerung der Motorgröße oder zu einer erhöhten Produktivität bei gleicher Motorgröße. Dazu werden in diesem Forschungsvorhaben die Verlustursachen und deren Wechselwirkungen in einem elektrischen Servoantriebssystem mit besonderer Berücksichtigung des mechanischen Prozesses analysiert. Die darauf aufbauenden Energieeffizienzmaßnahmen werden mit ihren konkreten Energieeinspareffekten diskutiert. Als eine dynamische Beispielanwendung dient eine Quersiegeleinheit. Das Energiesparpotenzial wird an dieser Anwendung veranschaulicht und durch Leistungsmessungen an einem aufgebauten Versuchsstand validiert. Unter Einbeziehung der Ergebnisse erfolgen Regeln zur Projektierung energieeffizienter Servoantriebssysteme. Fig.1 zeigt die wesentlichen Elemente zur Modellierung des Leistungsflusses und der Verluste in einem Servoantriebssystem. Die Berechnung der genannten Verluste basiert auf Datenblattangaben und wird in [1] näher erläutert. Obwohl sich die berechneten Verluste geringfügig von den gemessenen Verlusten unterscheiden, so eignen sie sich dennoch gut zur Abschätzung der relativen Energieeinsparpotentiale.

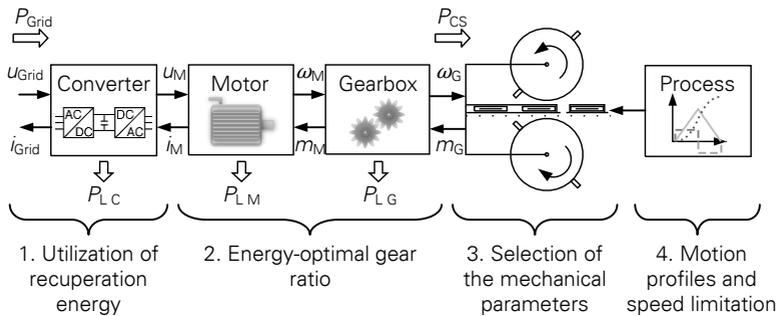


Fig.1: Energieeffizienzmaßnahmen am Leistungsflussmodell eines Servoantriebssystems mit einer Quersiegeleinheit, Energy efficiency methods in the power flow model of a servo drive system with cross cutting unit)

Die Energieeffizienzmaßnahmen werden am Beispiel der Quersiegeleinheit einer Verpackungsmaschine zum Verschweißen von endlosen Folienbahnen analysiert. Der damit verbundene Siegelprozess ist durch eine dynamische Punkt-zu-Punkt-Bewegung einer rotierenden Masse mit dem Trägheitsmoment beschreibbar. Fol-

gende Einzelmaßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz aus Fig.1 wurden untersucht und haben einen Energieeinspareffekt von über 30 % bewirkt.

1. Optimale Ausnutzung der Rekuperationsenergie im Frequenzumrichter
2. Auswahl der energieoptimalen Getriebeübersetzung, wie in [2] beschrieben
3. Entwurf der mechanischen Anwendung in Bezug auf Energieeffizienz
4. Anwendung neuer Bewegungsprofile mit Drehzahlbegrenzung.

Design Rules for Energy Efficient Servo Drives and Mechanical Systems on the Example of Cross Cutting Machines

Electrical servo drive systems are indispensable in manufacturing industry. Their application ranges from packaging machinery and industrial robots to machine tools. The energy consumption of those drives can often be significantly reduced. Additionally, an increased energy efficiency leads to smaller drives and cooling systems reducing the investment cost or to increased productivity at the same drive size. In order to increase the energy efficiency, this research project contributes by analysing the losses in an electrical servo drive system including the mechanical application. As a dynamic example application a cross cutting unit is chosen. The energy saving methods are explained using this application and verified with power measurements at a test bench for servo drives. To this end, the methods will be concluded in a set of design rules for energy efficient servo drives.

Figure shows the essential subsystems for modeling the power flow and the losses in a servo drive system. All mentioned loss models are based on data sheet values and were described in [1]. Although the calculated losses differ slightly from the measured losses, the loss models are well suited for estimating the relative energy saving potentials. As a mechanical application a cross cutting unit for cutting and sealing sheets around a product in packaging machines is analysed in this paper. The cutting unit can be described as a cylinder with a constant moment of inertia and the work process is a single-axis rotation of this cylinder. Changes in the process have a high impact on the losses of the entire drive system. The following approaches to improve energy efficiency from Fig.1 were considered and have caused an energy savings of more than 30 %.

1. Use of recuperation energy in the frequency converter
2. Choosing the energy-optimal gear ratio, as derived in [2]
3. Design of the mechanical application regarding energy efficiency
4. Application of new energy-optimal motion profiles with speed limitation.

Literaturverzeichnis/Bibliography

- [1] J. Schützhold, K. Benath, and W. Hofmann, "Calculation of the Speed- and Load-dependent Efficiency of Electrical Machines using Data Sheet Parameters," ETG-Fachbericht 139 (in German), Int. ETG-Kongress, Berlin, 2013.
- [2] K. Benath, J. Schützhold, and W. Hofmann, "Advanced Design Rules for the Energy Optimal Motor-Gearbox Combination in Servo Drive Systems," International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2014.

M. Sc. Arturo A. Arias M.

Analyse von pulswertenmodulierten Signalen mittels erzeugender Funktion

Die Ansteuerung eines Wechselrichters wird über Pulsweitenmodulation (PWM) realisiert. Zur Generierung des PWM wird ein dreieckförmiges Trägersignal der Frequenz f_{carrier} mit einem sinusförmigen Referenzsignal der Frequenz f_{ref} verglichen. Alle Spannungen und Ströme des Wechselrichters sind von der PWM beeinflusst. Wenn f_{carrier} (typ. 10 kHz) viel größer ist als f_{ref} (typ. 50 Hz), sind die PWM-Signale unübersichtlich, z.B. auf einem Oszilloskop. Die Frage lautet: wie können PWM-Signale (Ströme und/oder Spannungen) in einer einfachen Form dargestellt werden?

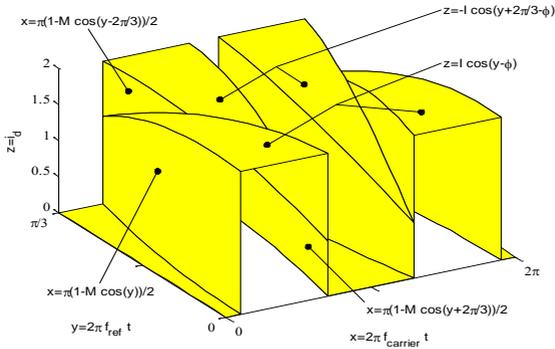
In der Nachrichtentechnik ist das PWM-Verfahren für die Nachrichtenübertragung seit langem bekannt. Um das Spektrum von Nachrichten analytisch zu berechnen, wurde eine Fläche in Form einer geöffneten Schale definiert. Als zweites wurde die doppelte Fourier-Reihe von der Fläche entwickelt. In den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde diese Technik auf Wechselrichter angewandt, um das Spektrum der PWM-Pulse analytisch zu berechnen. Die Pulse können zwei bis drei Spannungs-Pegel haben.

Für die Darstellung der PWM-Signale wurde eine Fläche oder ein Funktionsgebirge entwickelt, welche erzeugende Funktion genannt wird. Die Wände sind Funktionen von x und y , d.h. sie sind senkrecht auf der xy -Ebene, und sind vom Modulationsverfahren bestimmt. Die Deckel sind Funktionen von y und z , d.h. sie sind senkrecht auf der yz -Ebene, und sind vom Laststrom bestimmt. Die erzeugende Funktion ist periodisch mit der Periode 2π . Zeit und x - bzw. y -Achse verhalten sich direkt proportional zueinander, allerdings mit unterschiedlichen Proportionalitäten: $2\pi f_{\text{carrier}}$ bzw. $2\pi f_{\text{ref}}$. Fig. 1a zeigt ein Sechstel einer Periode von der erzeugenden Funktion des Zwischenkreisstroms i_d eines dreiphasigen Wechselrichters.

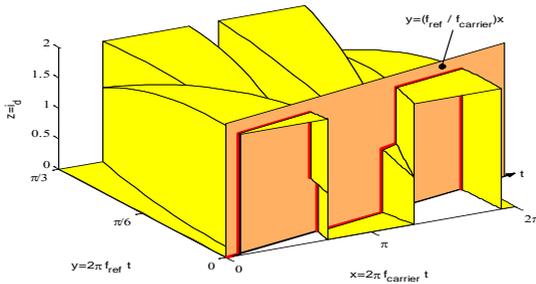
Das PWM-Signal als Funktion der Zeit entsteht aus der Intersektion der erzeugenden Funktion mit der Ebene $y=(f_{\text{ref}}/f_{\text{carrier}})x$. Die Zeitachse liegt auf der Intersektion zwischen der schneidenden Ebene und der xy -Ebene, siehe Fig. 1b. Für die weitere Analyse eines PWM-Signals wird nur die erzeugende Funktion verwendet und nicht mehr das PWM-Signal als Funktion der Zeit. Beispiele dafür sind die Berechnung des Mittelwerts oder der Vergleich des PWM-Signals mit unterschiedlichen Modulationsverfahren.

Analysis of Pulse Width Modulated Waveforms with the Auxiliary Function

The control of power converters normally is implemented using pulse width modulation (PWM). To generate PWM, a triangle waveform, or carrier, is compared with a sinusoidal waveform, or reference. Voltages and currents in the power converter are influenced by PWM. Because the frequency of the carrier ($f_{\text{carrier}}=10$ kHz) is much greater than the reference ($f_{\text{ref}}=50$ Hz), PWM waveforms are difficult to recognize, for example on the oscilloscope. The question is how PWM waveforms can be easily represented?



a



b

Fig. 1: Erzeugende Funktion des Zwischenkreisstroms i_d eines dreiphasigen Wechselrichters. Parameter: Amplitude der Drehstromlast $l=2$ A, Phasenverschiebungswinkel $\varphi = \pi/24$ rad, Modulationsgrad $M=0.8$, $f_{ref}=50$ Hz und $f_{carrier}=500$ Hz, Auxiliary Function of the dc link current i_d of a three phase inverter. Parameters: Amplitude of the three-phase current load $l=2$ A, phase shift between voltage and current $\varphi = \pi/24$ rad, modulation index $M=0.8$, $f_{ref}=50$ Hz, and $f_{carrier}=500$ Hz.

In Telecommunications, PWM is known for the transmission of signals. To calculate analytically the spectrum of PWM signals, a surface was defined. Afterwards the double Fourier series of the surface was developed. This technique was employed to calculate analytically the spectrum of PWM pulses. The pulses have two and three voltage levels.

For the representation of PWM waveforms, a surface called auxiliary function is introduced. The walls are function of x and y , i.e. they are perpendicular to the xy -plane; and they are determined by the modulation. The ceilings are function of y and z , i.e. they are perpendicular to the yz -plane; and they are determined by the load

current. The auxiliary function is periodic with period 2π . Time and x-axis are proportional, as well as time and y-axis. But the proportionalities are different: $2\pi f_{\text{carrier}}$ and $2\pi f_{\text{ref}}$, respectively. Figure 1a shows one-sixth of a period of the auxiliary function of the dc link current i_d of a three phase inverter.

The PWM waveform as function of time is the intersection of the auxiliary function with the plane $y=(f_{\text{ref}}/f_{\text{carrier}})x$. The time axis is the intersection of the cut plane and the xy-plane, see fig. 1b. From now on for the analysis of the PWM waveforms, only the auxiliary function is applied and no longer the PWM waveform in function of time. The auxiliary function simplifies the analytic calculation of the average value, or the rms value, of PWM waveforms. It also allows the ease comparison of different modulation techniques.

5 AUSSTATTUNG DES LEHRSTUHLS

Neben Arbeitsräumen für Diplomanden, Studienarbeiter, Gastwissenschaftler, IAESTE-Studenten, die mit modernster Büro- und Rechentechnik ausgestattet sind, verfügt der Lehrstuhl über eine Vielzahl von Versuchsständen für Forschung und Lehre.

- Lichthof (354 qm)
- 7 Forschungslabore (400 qm)
- 3 Labore für Praktika (112 qm)
- 1 PC-Pool (14+1 Rechner)



Lichthof des Instituts



Übergabe Antriebsprüfstand durch Fa. Berghof



Schaltschrankbatterie Antriebsprüfstand

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Volkmar Müller

Neuer Antriebsprüfstand am Elektrotechnischen Institut der TU Dresden übergeben

Im September 2015 wurde am Elektrotechnischen Institut der TU Dresden, Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe (Leitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann), im Lichthof des Görgesbaus ein Prüfstand für elektrische Maschinen und Antriebe durch die Fa. Berghof übergeben. Damit steht ein wichtiges Werkzeug zur realitätsnahen Optimierung, Analyse und Validierung von Elektromotoren und der zugehörigen Leistungselektronik im Leistungsbereich bis 200 kW zur Verfügung. Die Konzeption unterstützt insbesondere Forschungs- und Entwicklungsaufgaben auf den Gebieten der Elektromobilität sowie der Energieeffizienz stationärer und mobiler Antriebe. Der Prüfstand wurde im Rahmen eines Großgeräteantrags je zur Hälfte durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und den Freistaat Sachsen finanziert im Werte von ca. 1 Mio. €. Die Planung und Bauüberwachung erfolgte unter Leitung von Privatdozent Dr. Ing. habil. Volkmar Müller.

Die Prüfanlage ist mit rückspeisefähigen Netzstromrichtern auf der Belastungs- und Prüflingsseite ausgerüstet, so dass ein drehzahl- oder drehmomentgeregelter Betrieb des Maschinensatzes in allen vier Quadranten möglich ist. Gegenwärtig sind eine hochtourige Belastungseinheit (106 Nm, 13.500 min⁻¹) und eine niedertourige Belastungseinheit (1010 Nm, 1.750 min⁻¹) zur Aufnahme der mechanischen Leistungen der Prüflingsmotoren verfügbar. Eine Besonderheit ist die Bereitstellung einer variablen Zwischenkreisspannung für die Maschinenstromrichter auf der Prüflingsseite (10...800 VDC, ± 600 ADC). Damit ist die Anpassung an verschiedene Gleichspannungsebenen für EV/HEV-Antriebe und stationäre Industrieantriebe ausführbar. Zur Untersuchung neuer stromrichternaher Steuer- und Regelalgorithmen ist zusätzlich ein Experimentierstromrichter in Kombination mit einem universellen Mikrorechner-system als Rapid Control Prototyping System der Fa. dSpace installiert. Wegen der hohen Anforderungen an den Lärmschutz im Görgesbau wurden alle Umrichter und Motoren wassergekühlt ausgeführt und mit einer zusätzlichen Schutzhülse ausgerüstet.

Die Mess- und Automatisierungstechnik der Prüfanlage ist vor allem auf die lückenlose Erfassung von Leistungen, Effizienz- und Wirkungsgrade von der elektrischen Einspeisung bis zur Motorwelle im stationären bzw. dynamischen Betrieb des Antriebsstrangs ausgerichtet. Wesentliche Elemente der Messtechnik sind Leistungsmessgeräte WT 3000 und WT 1800 (Fa. Yokogawa) zur Messung von gepulsten Spannungen und überschwingungsbehafteten Strömen sowie Messflansch T12 (Fa. HBM) zur Drehzahl- und Drehmomentmessung. Die Messmittel besitzen die notwendige Messgenauigkeit, um auch im Teillastbereich auf der Grundlage von Differenzmessungen Aussagen zur Effizienz einer untersuchten Komponente zu treffen. Alle Vorgaben zur Messgenauigkeit bei der Bestimmung von Verlusten und Wirkungsgraden elektrischer Maschinen nach der Norm DIN EN 60034-2 werden eingehalten.

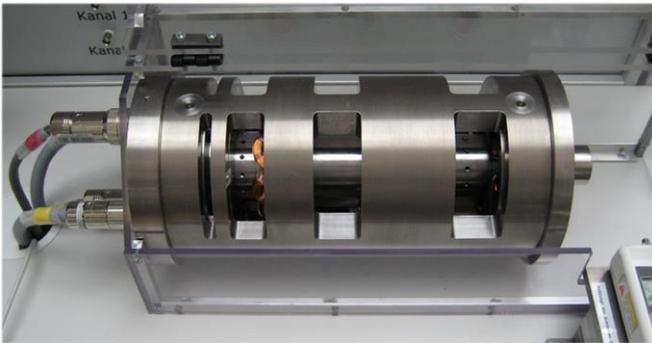
In unmittelbarer Nachbarschaft des Prüfstandes steht eine Druck-Volumenstrom-Messeinrichtung zur experimentellen Bestimmung thermischer und strömungstechnischer Eigenschaften elektrischer Maschinen. Die Kombination beider Anlagen kann Entwicklungsreserven bei der Erhöhung der Effektivität der Motorkühlung aufzeigen

5.1 Versuchsstände für die Forschung

- Labor Energiesystemtechnik mit Netznachbildung, Filtertechnik und Modellanlage für Windenergie und zur Untersuchung von Netzurückwirkungen
- Optimale Bewegungssteuerung mit Rotations- und Linearantrieben
- Matrixumrichter, Z-Source-Inverter
- Rechnergestützte Bewegungssteuerung: automatisierter Entwurf des Programm-kodes für Steuergeräte
- Messeinrichtungen zur Feld- und Wirbelstromverteilung
- Aktive Magnetlager
- Schleifringprüfstand



- Arbeitsplatz FEM-Modell der Vollpolmaschine
- Magnetlagerversuchsstand für die Lehre
- Hochgeschwindigkeitsmagnetlager für Forschung,



- Versuchsstand zur Messung des Wärmewiderstands von Wälzlagern
- Versuchsstand zur Messung der Verluste im quergekühlten Statorblechpaket
- Motorenprüfstand für Luftkühlung



5.2 Versuchsstände für die Lehre

- Schrittmotoren, geschalteter Reluktanzmotor
- Binäre Steuerungen in der elektrischen Antriebstechnik
- Antriebsregelung, Buskommunikation, technologisch verkettete Antriebe am Netz (4 stromrichter gespeiste Antriebssätze Gleichstrommotor - Drehstrommotor (je 10 kW)
- Praktikum „Analyse des Betriebsverhaltens und Messung des Leistungsflusses im Antriebsstrang von Elektrofahrzeugen“ am Versuchsstand Elektromobilität - Förderung im Rahmen der akademischen Bildungsinitiative im Schaufenster Elektromobilität
- Drehstromtransformator
- Feldorientierte Regelung (sensorloser Betrieb)
- Stoßkurzschluss bei Synchronmaschinen
- Gleichstrom- und Drehstromstellantriebe
- Bewegungssteuerung, graphische Programmierung, Echtzeitcodegenerierung, Profibus (3 Drehstromstellantriebe)
- Weitere Versuchsstände zur Vertiefungsbildung elektrische Maschinen und Antriebe in den Studiengängen Elektroenergietechnik und Mechatronik

5.3 Sonderausstattungen

- Separate Netzeinspeisung 0...400V über Stelltransformator, 100A
- Zwei Umformersätze 3x400V, 190kVA (bis 400Hz) und 120 kVA (50Hz / 60Hz)
- Schwerlastversuchsfläche mit Zufahrt und Hallenkran (3t)
- Pendelmaschinen zur Motorenprüfung
- Hochwertige Speicheroszilloskope (Bandbreite 600 MHz), Drehmomentmesswellen (2Nm ... 200Nm), Power-Analyzer, Echtzeitrechensysteme (Fa. dSpace)

5.4 Förderungen

Der Antriebsprüfstand wurde im Rahmen eines Großgeräteantrags je zur Hälfte durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und den Freistaat Sachsen finanziert.

6 PERSONELLE BESETZUNG

Lehrstuhlinhaber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann

Emeriti:

Prof. (i.R.) Dr.-Ing. habil. Peter Büchner

Prof. (i.R.) Dr.-Ing. Manfred Liese

Prof. (i.R.) Dr.-Ing. habil. Germar Müller

Sekretariat

Peggy Martin

Wissenschaftliche Mitarbeiter

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Gert-Helge Geitner

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Volkmar Müller

Dr.-Ing. Nicol Hildebrand

M. Sc. Arturo Arias

Dipl.-Ing. Falk Bahr

Dipl.-Ing. Henry Barth

Dipl.-Ing. Dipl.-Kfm. Kenneth Benath (bis 08/2015)

Dipl.-Ing. Arne Brix

Dipl.-Ing. Jan Döring

Dipl.-Ing. Chris Evers

Dipl.-Ing. Stephan Günther

Dipl.-Ing. Jacob Jung (bis 10/2015)

Dipl.-Ing. Martin Leubner

Dipl.-Ing. Stephan Michel

M. Sc. Tobias Micklitz

M. Sc. E.E. Chi Dung Nguyen

M. Sc. Van Binh Nguyen (bis 06/2015)

Dipl.-Ing. Nico Remus

Dipl.-Ing. Jörg Schützhold

Dipl.-Ing. Robert Seifert

Dipl.-Ing. Gunar Steinborn

M. Sc. Rahmat Suryana

Dipl.-Ing. Stephan Tenner

Dipl.-Ing. Stefan Ulbrich

Dipl.-Ing. Thomas Windisch

Dipl.-Ing. Yuanpeng Zhang

Freie Mitarbeiter

Prof. (i.R.) Dr.-Ing. Heinz-Dieter Eberhardt

Fachpersonal

Sylvia Schad

Kathleen Nagler (09-11/2015)

Dipl.-Ing. Axel Rusch

Doktoranden

M. Sc. Sven Bosch
Dipl.-Ing. (FH) Martin Eckart
Dipl.-Ing. Erik Fleischer
Dipl.-Ing. A.T. Hermann Houenouvo
M. Sc. Sören Miersch
Dipl.-Ing. Philipp Miska
Dipl.-Ing. (FH) Johann Pecho
Dipl.-Ing. Ludwig Schlegel
Dipl.-Ing. Stefan Staudt

Studentische Hilfskräfte:

Bil, Alexander
Fast, Alexander
Gerber, Christoph
Gutman, Leonid
Günther, Andy
Kunze, Christoph
Kunze, David
Senf, Johannes
Wappler, Patrick
Wolff, Julia

7 ANSCHRIFT

Postanschrift:

Technische Universität Dresden
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Elektrotechnisches Institut
01062 Dresden

Sitz:

Helmholtzstr. 9
Görgesbau, Raum 206/207
01069 Dresden

Telefon, Fax, E-Mail:

Lehrstuhlinhaber: 0351-463-37634
wilfried.hofmann@tu-dresden.de
Sekretariat: 0351-463-33223
peggy.martin@tu-dresden.de

Fax: 0351-463-33655

Website: <http://ema.et.tu-dresden.de>

8 IMPRESSUM

Anbieter:

Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Elektrotechnisches Institut
01062 Dresden

Kontakt:

Telefon: 0351-463-33186
Telefax: 0351-463-33655
e-Mail: sylvia.schad@tu-dresden.de

Verantwortlich:

Redaktion: Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. G.-H. Geitner
Gestaltung und Betreuung: Kathleen Nagler

9 LAGEPLAN

Lageplan des Campus (Südvorstadt)

Stand: 31. Juli 2011

