

Control of renewable energy systems

Christoph Hackl

Technische Universität München (TUM)
Munich School of Engineering (MSE)
Research group "Control of Renewable Energy Systems (CRES)"

www.cres.mse.tum.de

20.10.2015

2. Status Quo-Treffen Energy Valley Bavaria

TU München, Garching

Gliederung

- 1 Wer sind wir?
- 2 Was machen wir?
- 3 Was haben wir bisher erreicht?
- 4 Was wollen wir in Zukunft erreichen?

Gliederung

- 1 Wer sind wir?
 - Team
 - Forschungskonzept
 - Interdisziplinärer Ansatz

Gliederung

- 1 Wer sind wir?
 - Team
 - Forschungskonzept
 - Interdisziplinärer Ansatz

Wer sind wir?

Team "Control of renewable energy systems"



H. Eldeeb, M.Sc.
(CRES/EAL,09/2015)



C. Dirscherl, M.Sc.
(CRES,01/2014)



C. Hackl, Dr.-Ing.
(CRES,01/2014)



J. Kullick, M.Sc.
(CRES,10/2015)



K. Schechner, M.Sc.
(CRES,01/2014)



Z. Zhang, M.Sc.
(CRES/EAL,07/2015))

... darüberhinaus Leitung der Forschergruppe "Renewable energy systems" am EAL (Prof. Kennel)



F. Bauer, M.Sc.
(EAL)



M. Abdelrahem,
M.Sc. (EAL)

... und fünf weitere Doktoranden
(mit anderen Forschungsschwerpunkten)

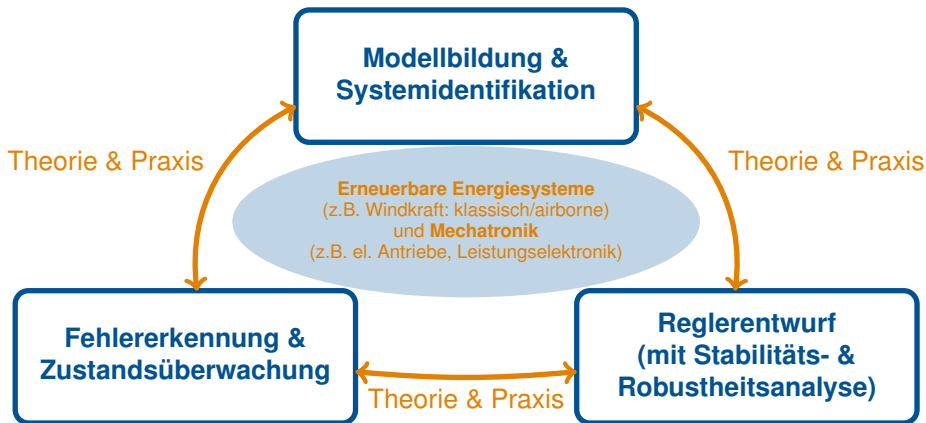
Gliederung

1 Wer sind wir?

- Team
- **Forschungskonzept**
- Interdisziplinärer Ansatz

Wer sind wir?

Forschungskonzept

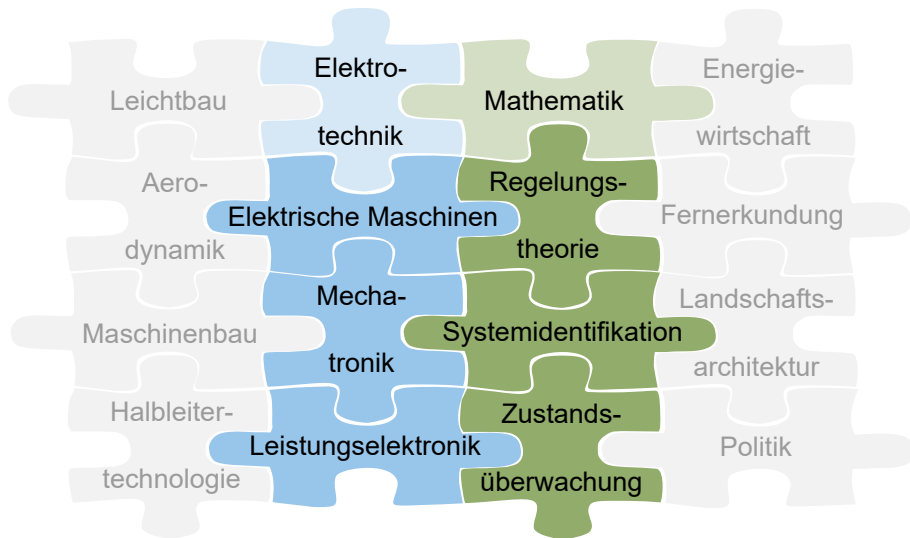


Gliederung

- 1 Wer sind wir?
 - Team
 - Forschungskonzept
 - Interdisziplinärer Ansatz

Wer sind wir?

Interdisziplinärer Ansatz



Gliederung

2 Was machen wir?

- Forschung
 - Forschungsschwerpunkt
 - Forschungsblickwinkel
 - Motivation
- Lehre

Gliederung

2 Was machen wir?

■ Forschung

- Forschungsschwerpunkt
- Forschungsblickwinkel
- Motivation

■ Lehre

Gliederung

2 Was machen wir?

- Forschung
 - Forschungsschwerpunkt
 - Forschungsblickwinkel
 - Motivation
- Lehre

Was machen wir?

Forschungsschwerpunkt: Modellierung und Regelung von **Windkraftanlagen (WKA)**

Klassische Windkraftanlagen



⇒ Ziel: Erhöhen der Zuverlässigkeit

Flugwindkraftanlagen



⇒ Ziel: Fehlertolerante Regelung

Kleinwindkraftanlagen (≤ 50 kW)



⇒ Ziel: Einsatz von Reluktanz-Synchrongeneratoren

Gliederung

2 Was machen wir?

■ Forschung

- Forschungsschwerpunkt

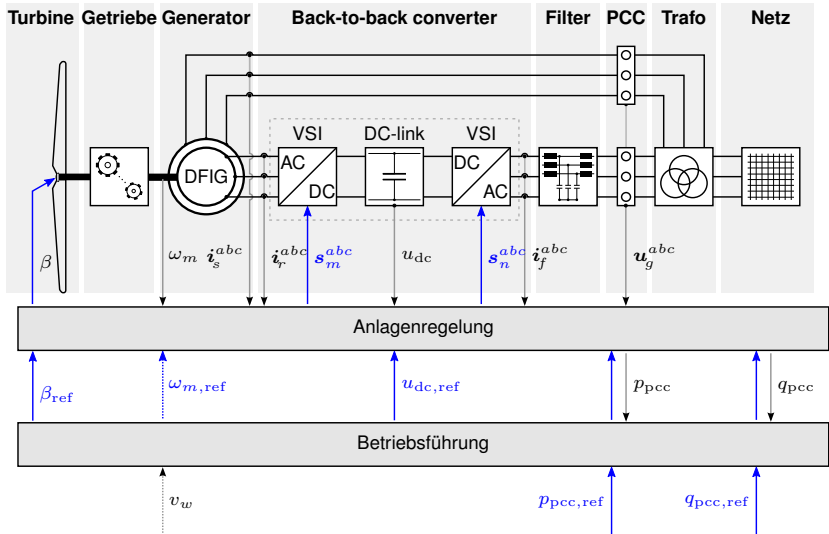
- Forschungsblickwinkel

- Motivation

- Lehre

Wer sind wir?

Forschungsblickwinkel: **Elektrische** Komponenten von Windkraftanlagen



Gliederung

2 Was machen wir?

■ Forschung

- Forschungsschwerpunkt

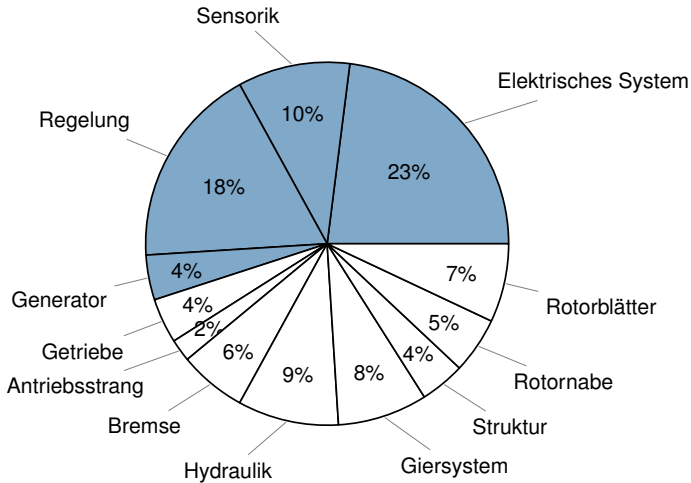
- Forschungsblickwinkel

■ Motivation

- Lehre

Was machen wir?

Motivation: WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern



(basiert auf Abb. 2 in [1])

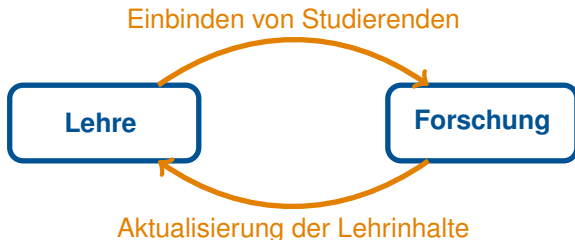
Gliederung

2 Was machen wir?

- Forschung
 - Forschungsschwerpunkt
 - Forschungsblickwinkel
 - Motivation
- Lehre

Was machen wir?

Lehre



- Lehrveranstaltungen
 - Regelung von regenerativen Energiesystemen (WS, 3SWS)
 - Non-identifier based adaptive control in mechatronics (SS, 4SWS)
- Betreuung von studentischen Arbeiten (auch internationale Studenten)
 - Hauptseminare (HS)
 - Projektpraktika (PP), Ingenieurspraxis (IP) und Forschungspraxis (FP)
 - Bachelorarbeiten (BA)
 - Masterarbeiten (MA)

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

- Lehre
 - Unterrichtete und betreute Studierende
 - 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”
- Forschung
 - Laufende Drittmittelprojekte
 - Laboraufbau
 - Publikationen
- Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt
 - Vorarbeiten
 - Reluktanz-Synchronmaschine
 - Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
 - Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [2]
 - Gesamtsimulation
 - Projektfortschritt

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

■ Lehre

- Unterrichtete und betreute Studierende
- 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”

■ Forschung

- Laufende Drittmittelprojekte
- Laboraufbau
- Publikationen

■ Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

- Vorarbeiten
- Reluktanz-Synchronmaschine
- Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
- Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [2]
- Gesamtsimulation
- Projektfortschritt

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

■ Lehre

■ Unterrichtete und betreute Studierende

- 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”

■ Forschung

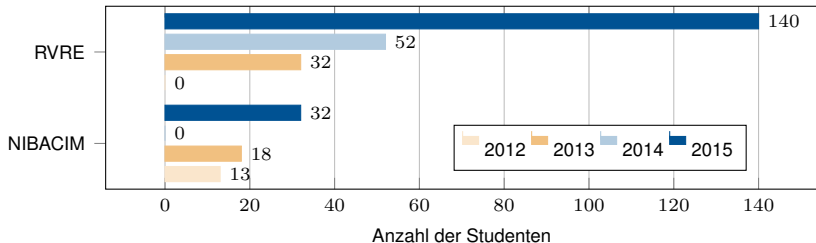
- Laufende Drittmittelprojekte
- Laboraufbau
- Publikationen

■ Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

- Vorarbeiten
- Reluktanz-Synchronmaschine
- Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
- Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [2]
- Gesamtsimulation
- Projektfortschritt

Was haben wir bisher erreicht?

Lehre (01.01.2014-20.10.2015): Unterrichtete und betreute Studierende



- Vorlesungen/Übungen
 - “**R**egelung von regenerativen **E**nergiesystemen” (WS, 3SWS)
 - “**N**on-identifier **b**ased **a**ddaptive **c**ontrol in **m**echatronics” (SS, 4SWS)
- “Projektstudium Antriebstechnik (EOF Lehrpreis 2013, WS1415): **13**”
- Betreute studentische Arbeiten: **36**
(3(+5) MA, 1 BA, 7 HS, 5(+2) FP, 13 PP)

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

■ Lehre

- Unterrichtete und betreute Studierende
 - 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”

■ Forschung

- Laufende Drittmittelprojekte
- Laboraufbau
- Publikationen

■ Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

- Vorarbeiten
- Reluktanz-Synchronmaschine
- Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
- Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [2]
- Gesamtsimulation
- Projektfortschritt

Was haben wir bisher erreicht?

MSE Winter School "Holistic Modelling and Control of Energy Systems" (02.-06.02.2015)



- *Future of the power system: how can we keep it simple?* (T. Hamacher, TUM)
- *Renewable Energy Systems* (C. Hackl, TUM)
- *Dynamics & Operation of Smart Grids* (F. Dörfler, ETH Zürich)
- *Market-based Power Regulation* (A. Jokić, University of Zagreb)

⇒ 45 internationale Teilnehmer (Doktoranden, Post-Docs und Juniorprofessoren)

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

■ Lehre

- Unterrichtete und betreute Studierende
- 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”

■ Forschung

- Laufende Drittmittelprojekte
- Laboraufbau
- Publikationen

■ Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

- Vorarbeiten
- Reluktanz-Synchronmaschine
- Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
- Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [2]
- Gesamtsimulation
- Projektfortschritt

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

■ Lehre

- Unterrichtete und betreute Studierende
- 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”

■ Forschung

- Laufende Drittmittelprojekte
- Laboraufbau
- Publikationen

■ Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

- Vorarbeiten
- Reluktanz-Synchronmaschine
- Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
- Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [2]
- Gesamtsimulation
- Projektfortschritt

Was haben wir bisher erreicht?

Laufende Drittmittelprojekte (01.01.2014-20.10.2015)

Computationally-efficient
direct MPC for WTS
(172.000 EUR)



Robust and fault-tolerant low-level
control of the electrical drive system
(250.000 EUR)



Klein-Windkraftanlagen mit
Reluktanz-Synchrongenerator
(20.000 EUR)



Bund der Freunde der
Technischen Universität München e.V.

- DFG-Projekt (PI mit Prof. Kennel)
“Computationally-efficient direct MPC of 3L-NPC back-to-back converters for WTS with PMSGs”
- EU H2020 ITN-Projekt (PI mit Prof. Kennel)
“Airborne Wind Energy System Modelling, Control and Optimisation (AWESCO)”
- Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt
“Klein-Windkraftanlagen mit effizienter und kostengünstiger Generatortopologie für Micro-Grids – Eine Voruntersuchung”

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

■ Lehre

- Unterrichtete und betreute Studierende
- 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”

■ Forschung

- Laufende Drittmittelprojekte
- **Laboraufbau**
- Publikationen

■ Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

- Vorarbeiten
- Reluktanz-Synchronmaschine
- Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
- Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [2]
- Gesamtsimulation
- Projektfortschritt

Was haben wir bisher erreicht?

Laboraufbau (aktueller Stand)

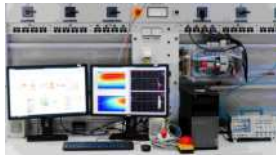
Reluktanz- und Permanentmagnet-Synchronmaschine



Realzeitsystem und Umrichter



Host PC und Sicherheitsbox



Doppelt-gepeiste ASM



Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

■ Lehre

- Unterrichtete und betreute Studierende
- 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”

■ Forschung

- Laufende Drittmittelprojekte
- Laboraufbau

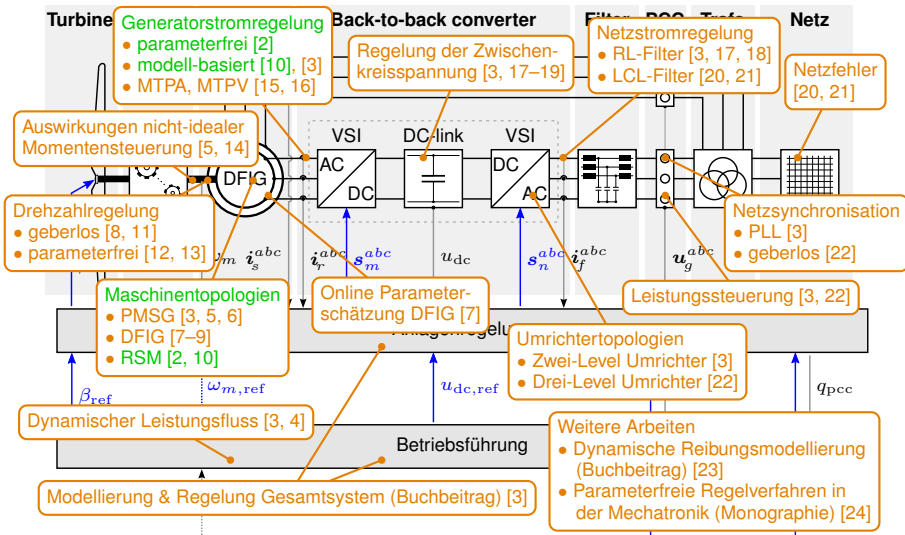
■ Publikationen

■ Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

- Vorarbeiten
- Reluktanz-Synchronmaschine
- Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
- Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [2]
- Gesamtsimulation
- Projektfortschritt

Was haben wir bisher erreicht?

Forschung (01.01.2014-20.10.2015): Publikationen



Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

- Lehre
 - Unterrichtete und betreute Studierende
 - 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”
- Forschung
 - Laufende Drittmittelprojekte
 - Laboraufbau
 - Publikationen
- Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt
 - Vorarbeiten
 - Reluktanz-Synchronmaschine
 - Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
 - Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [2]
 - Gesamtsimulation
 - Projektfortschritt

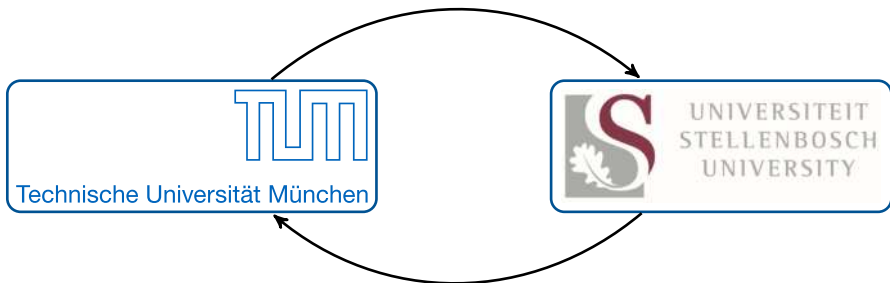
Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

Internationale Kooperation mit der University of Stellenbosch, Südafrika



Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

Projektpartner



CRES (Dr.-Ing. C. Hackl)

- Dynamische Modellierung
- Regelung
- Experimentelle Validierung (Laboraufbau)

EMLab (Prof. M. Kamper)

- Modellierung (FEM)
- Maschinendesign
- Maschinenfertigung

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

■ Lehre

- Unterrichtete und betreute Studierende
- 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”

■ Forschung

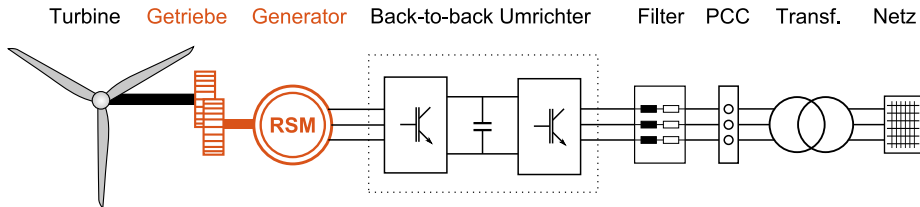
- Laufende Drittmittelprojekte
- Laboraufbau
- Publikationen

■ Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

- Vorarbeiten
- Reluktanz-Synchronmaschine
- Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
- Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [2]
- Gesamtsimulation
- Projektfortschritt

Vorarbeiten

Modellierung, Regelung und Simulation von Klein-Windkraftanlagen mit RSM [15]



- Stromregelung (generatorseitig)
- Maximum Torque per Ampere (MTPA)
- Geschwindigkeitsregelung (Maximum Power Point Tracking (MPPT))
- Stromregelung (netzseitig)
- Spannungszwischenkreis-Regelung
- Blindleistungssteuerung

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

- Lehre
 - Unterrichtete und betreute Studierende
 - 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”
- Forschung
 - Laufende Drittmittelprojekte
 - Laboraufbau
 - Publikationen
- Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt
 - Vorarbeiten
 - Reluktanz-Synchronmaschine
 - Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
 - Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [2]
 - Gesamtsimulation
 - Projektfortschritt

Reluktanz-Synchronmaschine

Ein Blick in die Maschine

http://www.youtube.com/watch?v=69mtuom774E&index=4&list=PLg4s1do3XuVlwclLnpyZgvfjd_o4wtA_D (cut version/duration: 0:26 min)

Reluktanz-Synchronmaschine

Eine brauchbare Alternative?



Traditional IE2 induction motor



IE4 SynRM motor



<http://www.abb.com>

Vorteile [25–27]:

- (sehr) günstig
- hohe Effizienz möglich (IE4)
- hohe Leistungsdichte und hohes Verhältnis Moment-zu-Volumen
- Geberlose Regelung möglich

Nachteile:

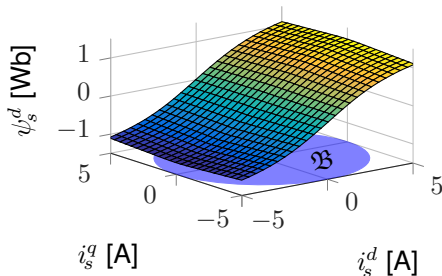
- niedriger Leistungsfaktor
- hochgradig nichtlinear
- Umrichter nötig
- (komplexe/nichtlineare Regelverfahren nötig)

Reluktanz-Synchronmaschine

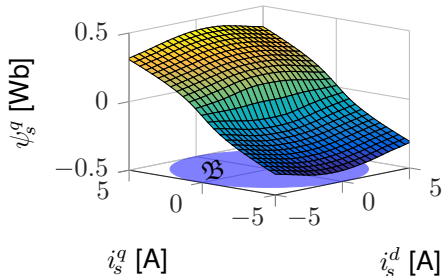
Modell mit nichtlinearer Flussverkettung (ohne Eisenverluste)

$$\mathbf{u}_s^k(t) = R_s \mathbf{i}_s^k(t) + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}_s^k(\mathbf{i}_s^k(t)) + \omega_k(t) \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}}_{=: \mathbf{J}} \boldsymbol{\psi}_s^k(\mathbf{i}_s^k(t)),$$

$$m_m(t) = \frac{3}{2} p \boldsymbol{\psi}_s^k(\mathbf{i}_s^k(t))^\top \mathbf{J} \mathbf{i}_s^k(t)$$



(a) d-flux linkage

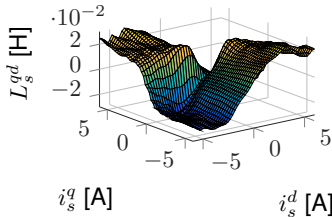
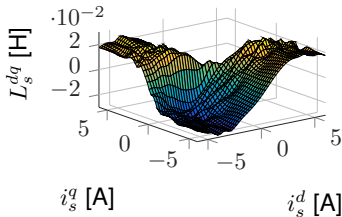
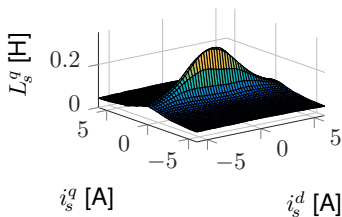
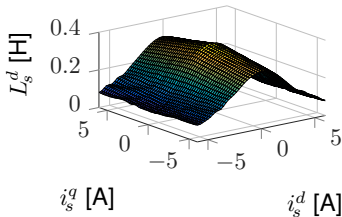


(b) q-flux linkage

⇒ **Nichtlineares dynamisches System!**

Reluktanz-Synchronmaschine

Nichtlineare Induktivitäten $L_s^d := \frac{\partial \psi_s^d}{\partial i_s^d}$, $L_s^q := \frac{\partial \psi_s^q}{\partial i_s^q}$, $L_s^{dq} := \frac{\partial \psi_s^d}{\partial i_s^q} = \frac{\partial \psi_s^q}{\partial i_s^d} =: L_s^{qd}$



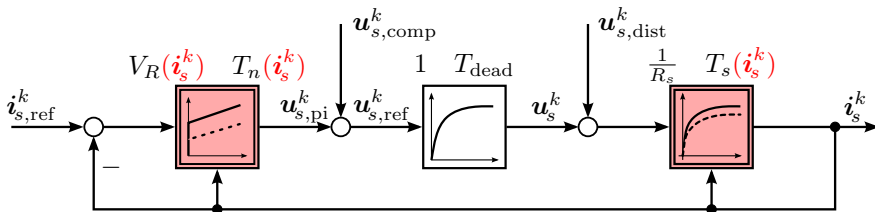
Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

- Lehre
 - Unterrichtete und betreute Studierende
 - 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”
- Forschung
 - Laufende Drittmittelprojekte
 - Laboraufbau
 - Publikationen
- Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt
 - Vorarbeiten
 - Reluktanz-Synchronmaschine
 - **Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM**
 - Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [2]
 - Gesamtsimulation
 - Projektfortschritt

Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM

Regelkreis (mit Umrichterapproximation) und PI-Reglerentwurf



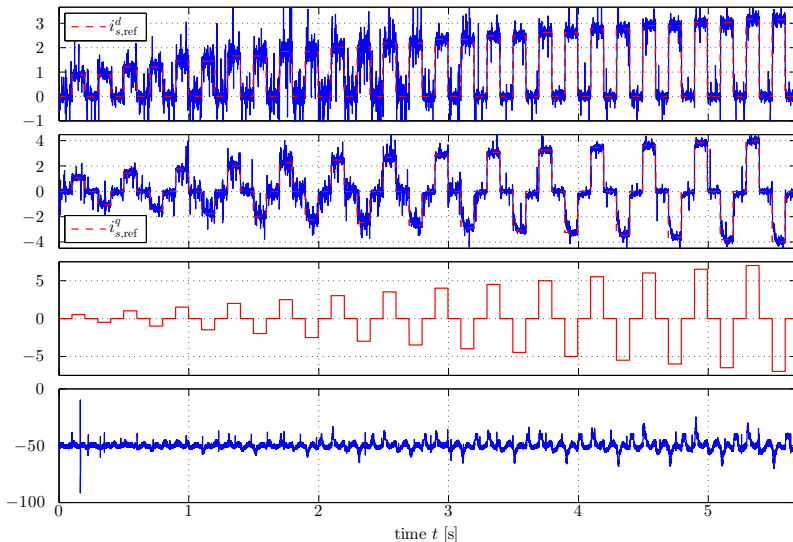
... bei **nichtlinearem** Verhalten [10, 15]

- $T_s = T_s(L_s^{dd}(i_s^k), L_s^{dq}(i_s^k), L_s^{qd}(i_s^k), L_s^{qq}(i_s^k))$
- $T_{\text{dead}} \propto f_{\text{pwm}}$
- $u_{s,\text{comp}}^k = u_{s,\text{dist}}^k$ (ideale Entkopplung)
- Reglerentwurf nach **Betragsoptimum** [28]:

$$\text{Verstärkung: } V_R(i_s^k) = \frac{T_s(i_s^k) R_s}{2T_{\text{dead}}} \quad [\Omega] \quad \wedge \quad \text{Zeitkonstante: } T_n(i_s^k) = T_s(i_s^k) \quad [\text{s}]$$

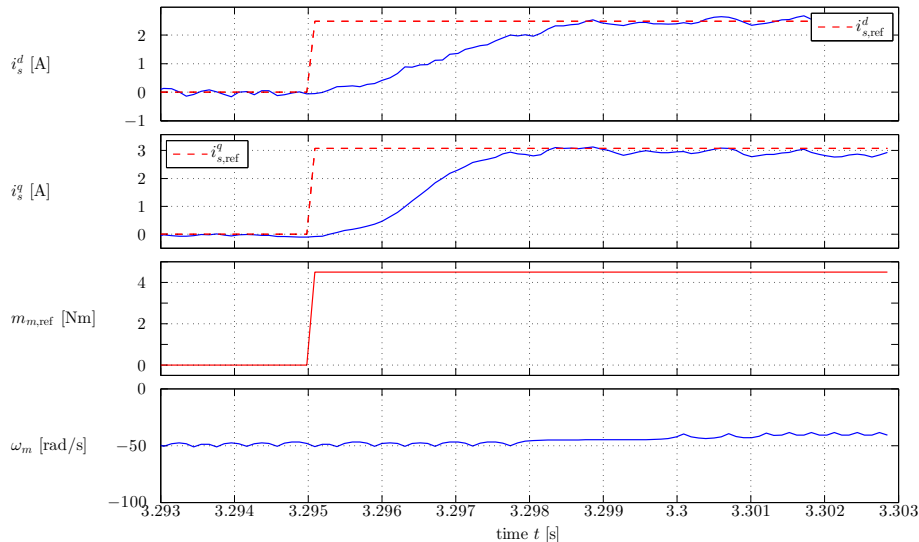
Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM

Messergebnisse für 1,1 kW RSM



Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM

Messergebnisse für 1,1 kW RSM (Zoom)



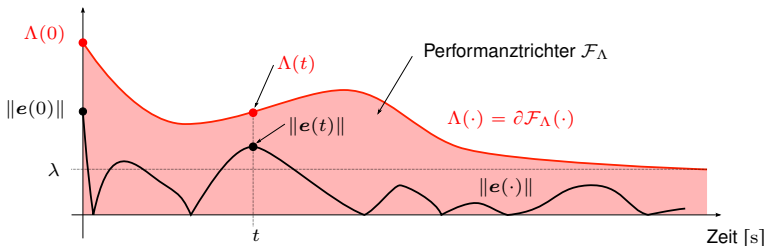
Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

- Lehre
 - Unterrichtete und betreute Studierende
 - 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”
- Forschung
 - Laufende Drittmittelprojekte
 - Laboraufbau
 - Publikationen
- Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt
 - Vorarbeiten
 - Reluktanz-Synchronmaschine
 - Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
 - Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [2]
 - Gesamtsimulation
 - Projektfortschritt

Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [2]

Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")



Regelgesetz:

$$u_{\text{fc}}(t) = k(t)e(t)$$

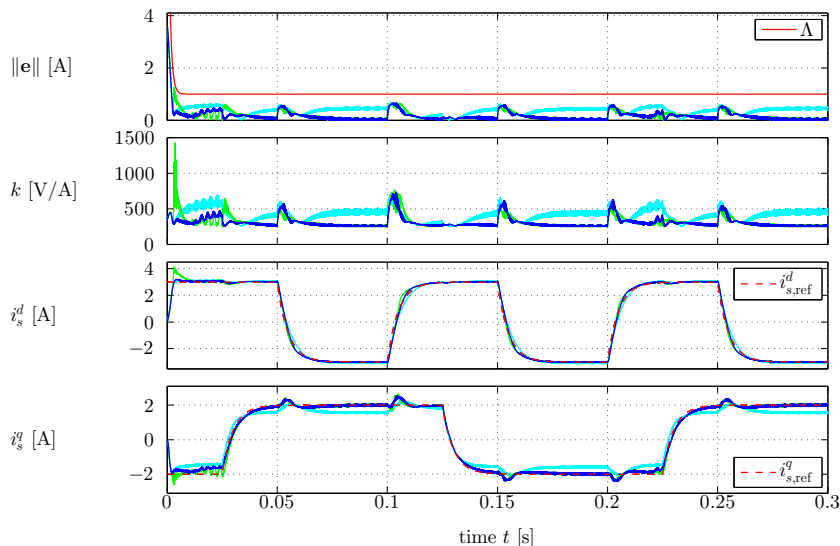
(FC $_{i_s^k}$)

wobei

- $e(t) = (e_s^d(t), e_s^q(t))^T = i_{s,\text{ref}}^k(t) - i_s^k(t)$
- $k(t) = \frac{1}{\Lambda(t) - \|e(t)\|} \geq \frac{1}{\Lambda(t)}$ mit $\|e(t)\| = \sqrt{e_s^d(t)^2 + e_s^q(t)^2}$

Modell-freie PI-Stromregelung von RSM

Simulationsergebnisse (1.1 kW RSM): — FC, — FC+PI and — FC+PI^{aw}



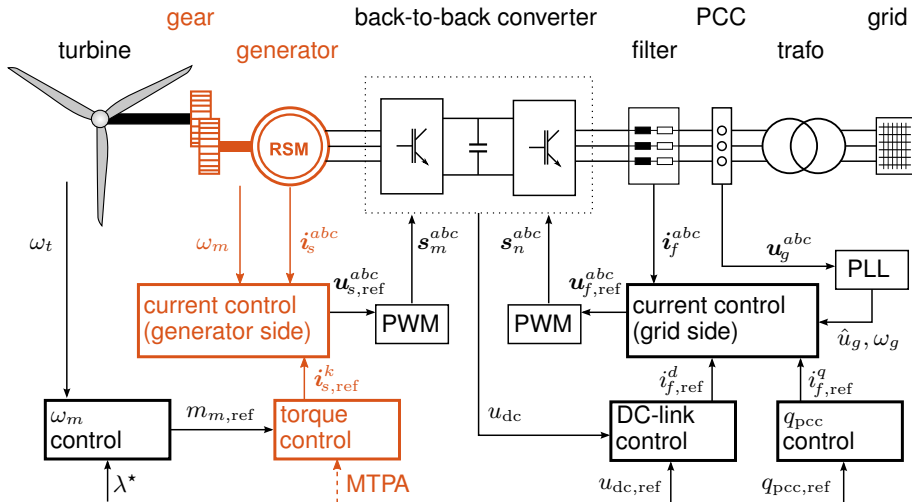
Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

- Lehre
 - Unterrichtete und betreute Studierende
 - 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”
- Forschung
 - Laufende Drittmittelprojekte
 - Laboraufbau
 - Publikationen
- Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt
 - Vorarbeiten
 - Reluktanz-Synchronmaschine
 - Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
 - Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [2]
 - **Gesamtsimulation**
 - Projektfortschritt

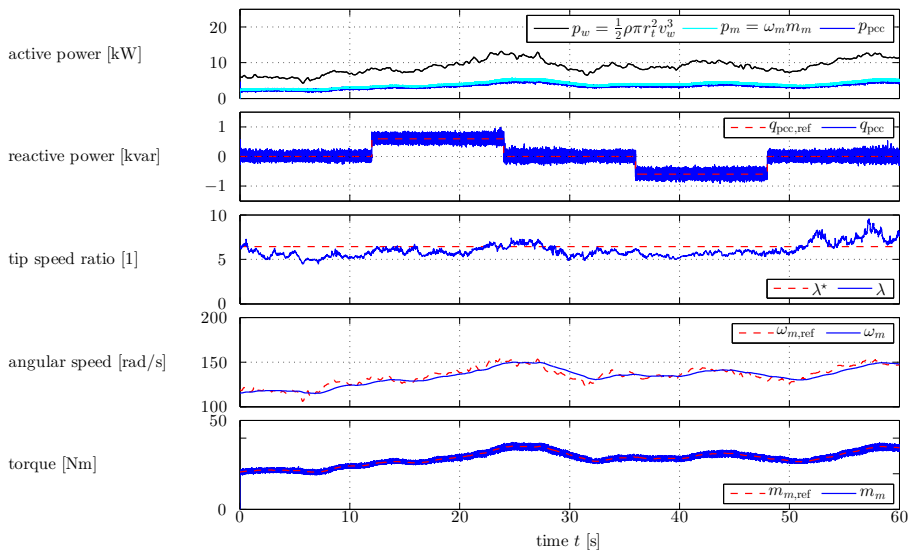
Gesamtsimulation

Klein-Windkraftanlagen mit Reluktanz-Synchronmaschine (Betriebsbereich II)



Gesamtsimulation

Klein-Windkraftanlagen mit Reluktanz-Synchronmaschine (Betriebsbereich II)



Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

- Lehre
 - Unterrichtete und betreute Studierende
 - 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”
- Forschung
 - Laufende Drittmittelprojekte
 - Laboraufbau
 - Publikationen
- Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt
 - Vorarbeiten
 - Reluktanz-Synchronmaschine
 - Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
 - Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [2]
 - Gesamtsimulation
 - Projektfortschritt

Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

Projektfortschritt



- Modellierung [3, 15] ✓
- Austausch ✓
CRES → EMLab
- Regelung [2, 10, 15] ✓
- Simulation [3, 15] ✓
- Laboraufbau
 - Spezifikation ✓
 - Aufbau (✓)
 - Messungen [10] (✓)
 - Validierung (✓)
(Regelung, Effizienz, Optimierung)
- Maschinen-Redesign (FEM)
- Austausch
EMLab → CRES (✓)
- Iteration(en)
 - Modellierung
 - Regelung
 - Simulation
 - Validierung
- Forschungsantrag (✓)
- Prototype
- Langzeit-Test
(Stellenbosch / CleanTechCampus)

Gliederung

4 Was wollen wir in Zukunft erreichen?

Was wollen wir in Zukunft erreichen?

Zukünftige Herausforderungen für regenerative Energiesysteme (siehe auch [29])

- Erhöhen der Zuverlässigkeit / Effizienz
(v.a. Regelung und Leistungselektronik fehleranfällig)
 - Robustheit & Systemanalyse ^{CRES}
 - Zustandsüberwachung / Fehlererkennung ^{CRES}
- Robustifizierung/Flexibilisierung der Netzanbindung
 - Anlagenschutz (z.B. bei asymmetrischen Netzen) ^(CRES)
 - Netzanschlussbedingungen (z.B. LVRT) ^{CRES}
 - Dezentrale Einspeisung (z.B. Micro-Grids ohne Trägheit) ^(CRES)
 - Netzanbindung von Windkraftwerken / Windparks ^(CRES)
- Einbinden neuer Technologien
 - Neue Generatortopologien ^{CRES}
 - Neue Umrichtertopologien (Mehrlevel) ^{CRES}
 - Konfigurationen ohne/kleinere Transformatoren ^(CRES)

Was wollen wir in Zukunft erreichen?

Zukünftige Schritte bzw. geplante Projekte/Kooperationen

- Fertigstellung und Erweiterung des Laboraufbaus
- Einwerben weiterer Drittmittel
 - CleanTechCampus-Teilprojekt “Stromnetz”: *ca. 175.000 EUR*
(eingereichter Antrag, Koordination: Dr. Vandersickel)
 - Geothermie-Allianz-Bayern-Teilprojekt “Tauchkreiselpumpe”: *192.000 EUR*
(eingereichter Antrag, Koordination: Hr. Wieland)
 - WindForS Graduiertenkolleg-Teilprojekt “Effects of and compensation for non-ideal electro-mechanical interactions in modern wind turbine systems”: *2 Doktorandenstellen geplant* (eingereichte Projektskizze mit Prof. Bottasso)
 - DFG-Projekt “Reluktanz-Synchronmaschinen für Windkraftanlagen: Modellierung, Regelung und Effizienzanalyse”: *ca. 160.000 EUR*
(in Vorbereitung)
- Ausbau internationaler Kooperationen
- Anstreben von Industriekooperationen



(www.spiegel.de; bearbeitet)

Es gibt noch viel zu tun ... und wir haben große Lust darauf!

Weitere Informationen online unter:

www.cres.mse.tum.de

Literaturliste I

- [1] B. Hahn, M. Durstewitz, and K. Rohrig, "Reliability of wind turbines, experiences of 15 years with 1500 WTs," in *Wind Energy* (J. Peinke, P. Schaumann, and S. Barth, eds.), Proceedings of the Euromech Colloquium, pp. 329–332, Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [2] C. M. Hackl, "Current PI-funnel control with anti-windup for synchronous machines," in *Proceedings of the 54th IEEE Conference on Decision and Control*, p. (to be published), 2015.
- [3] C. Dirscherl, C. Hackl, and K. Schechner, "Modellierung und Regelung von modernen Windkraftanlagen: Eine Einführung (*available at the authors upon request*)," in *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen* (D. Schröder, ed.), ch. 24, pp. 1540–1613, Springer-Verlag, 2015.
- [4] C. Dirscherl and C. M. Hackl, "Dynamic power flow in wind turbine systems with doubly-fed induction generator," *IEEE Transactions on energy conversion (in preparation)*, 2015.
- [5] C. M. Hackl and K. Schechner, "Non-ideal torque control of wind turbine systems: Impacts on annual energy production," in *Proceedings of the IEEE International Energy Conference (submitted)*, 2016.
- [6] Z. Zhang, C. Hackl, T. Sun, and R. Kennel, "Computationally efficient DMPC for three-level NPC back-to-back converters in wind turbine systems with PMSG," *submitted to IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015.
- [7] M. Abdelrahem, C. M. Hackl, and R. Kennel, "Application of extended Kalman filter to parameter estimation of doubly-fed induction generators in variable-speed wind turbine systems," in *Proceedings of the 5th International Conference on Clean Electrical Power*, pp. 236–243, 2015.
- [8] M. Abdelrahem, C. M. Hackl, and R. Kennel, "Sensorless control of doubly-fed induction generators in variable-speed wind turbine systems," in *Proceedings of the 5th International Conference on Clean Electrical Power*, pp. 423–430, 2015.

Literaturliste II

- [9] C. Dirscherl and C. M. Hackl, "Dynamic power flow in wind turbine systems with doubly-fed induction generator," in *submitted to 2016 IEEE International Energy Conference*, 2016.
- [10] C. M. Hackl, M. J. Kamper, J. Kullick, and J. Mitchell, "Nonlinear PI current control of reluctance synchronous machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics (submitted)*, 2015.
- [11] Z. Zhang, C. Hackl, F. Wang, Z. Chen, and R. Kennel, "Encoderless model predictive control of back-to-back converter direct-drive permanent-magnet synchronous generator wind turbine systems," in *Proceedings of 15th European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1–10, 2013.
- [12] C. M. Hackl, "Funnel control for wind turbine systems," in *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 1377–1382, 2014.
- [13] C. M. Hackl, "Speed funnel control with disturbance observer for wind turbine systems with elastic shaft," in *Proceedings of the 54th IEEE Conference on Decision and Control*, p. (to be published), 2015.
- [14] C. M. Hackl and K. Schechner, "Non-ideal torque control in wind turbine systems: Causes and impacts," in *Proceedings of the 5th MSE-Kolloquium on "Innovations for Energy Systems, Mobility, Buildings and Materials"*, 2015.
- [15] J. Kullick, "Simulation and control of a small-scale wind turbine system with reluctance synchronous generator," Master's thesis, Technische Universität München, MSE Research Group "Control of renewable energy systems", 2015.
- [16] L. Horlbeck, M. Lienkamp, and C. Hackl, "Analytical solution for the MTPV hyperbola including the stator resistance," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (submitted)*, 2016.

Literaturliste III

- [17] C. Dirscherl, C. Hackl, and K. Schechner, "Explicit model predictive control with disturbance observer for grid-connected voltage source power converters," in *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 999–1006, 2015.
- [18] C. Dirscherl, C. M. Hackl, and K. Schechner, "Pole-placement based nonlinear state-feedback control of the DC-link voltage in grid-connected voltage source power converters: A preliminary study," in *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Control Applications*, p. (to be published), 2015.
- [19] F. Bauer, C. M. Hackl, and K. Schechner, "DC-link control for airborne wind energy systems during pumping mode," in *Proceedings of the Airborne Wind Energy Conference 2015*, 2015.
- [20] C. M. Hackl, "MPC with analytical solution and integral error feedback for LTI MIMO systems and its application to current control of grid-connected power converters with LCL-filter," in *Proceedings of the 3rd Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE 2015)*, p. (to be published), 2015.
- [21] C. Dirscherl, J. Fessler, C. M. Hackl, and H. Ipach, "State-feedback controller and observer design for grid-connected voltage source power converters with LCL-filter," in *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Control Applications*, p. (to be published), 2015.
- [22] Z. Zhang, H. Xu, M. Xue, Z. Chen, T. Sun, R. Kennel, and C. Hackl, "Predictive control with novel virtual flux estimation for back-to-back power converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 5, pp. 2823–2834, 2015.
- [23] C. M. Hackl, "Dynamische Reibungsmodellierung: Das Lund-Grenoble (LuGre) Reibmodell (*available at the authors upon request*)," in *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen* (D. Schröder, ed.), ch. 25, pp. 1615–1657, Springer-Verlag, 2015.

Literaturliste IV

- [24] C. M. Hackl, *Non-identifier based adaptive control in mechatronics: Theory and Application*. Lecture Notes in Control and Information Sciences, Berlin: Springer-Verlag, 2015 (accepted; final version in preparation).
- [25] M. J. Kamper, F. van der Merwe, and S. Williamson, "Direct finite element design optimisation of the cageless reluctance synchronous machine," *IEEE Transactions on Power Conversion*, vol. 11, no. 3, pp. 547–555, 1996.
- [26] T. A. Lipo, "Synchronous reluctance machines – A viable alternative for AC drives?," *Electric Machines & Power Systems*, vol. 19, no. 6, pp. 659–671, 1991.
- [27] A. Vagati, "The synchronous reluctance solution: A new alternative in AC drives," in *Proceedings of the 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, pp. 1–13, 1994.
- [28] D. Schröder, *Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen (3., bearb. Auflage)*. Berlin: Springer-Verlag, 2009.
- [29] F. Blaabjerg and K. Ma, "Future on power electronics for wind turbine systems," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 3, 2013.