

Moderne Regelungsverfahren in der Energiewandlung

Christoph Hackl

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

13.05.2015

Technische Universität Dortmund

MSE Forschergruppe (seit Januar 2014)

“Control of renewable energy systems (CRES)”



C. Dirscherl, M.Sc.



C. Hackl, Dr.-Ing.

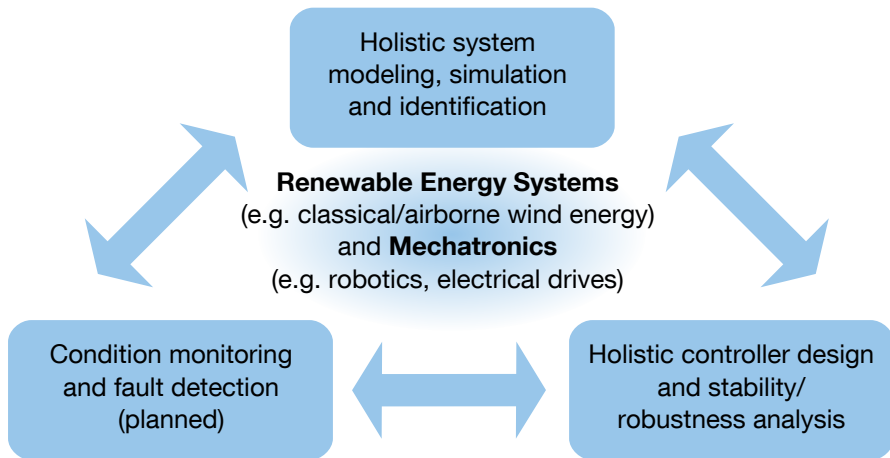


K. Schechner, M.Sc.

Kontakt und nähere Informationen

- Telefon: (+49) (0)89 289 16688
- email: christoph.hackl@tum.de
- WWW: <http://www.cres.mse.tum.de>
- Drei weitere Doktoranden ab Juli bzw. September 2015:
 - TUMCreate Singapore “Energy Management in Micro-grids”,
 - H2020 ITN-Projekt “Airborne Wind Energy” (mit R. Kennel),
 - DFG-Projekt “Computationally-efficient direct model predictive control of 3L-NPC back-to-back converters for WTS with PMSGs” (mit R. Kennel)

CRES Forschungsschwerpunkte



Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Modell-basierte Regelverfahren
- 3 Modell-freie Regelverfahren
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

Gliederung

1 Motivation

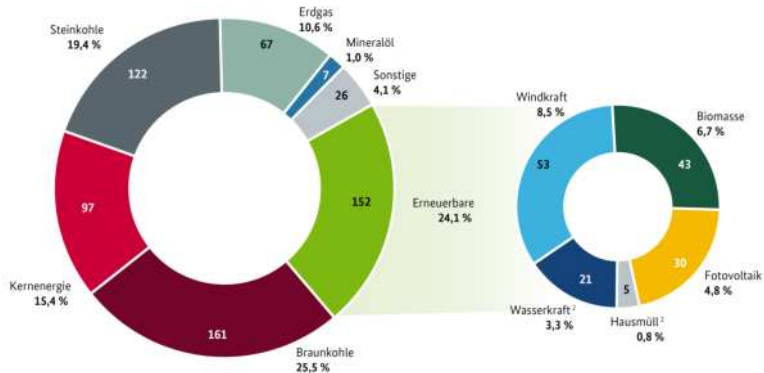
- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- Stromgestehungskosten in Deutschland
- Moderne Windkraftanlagen (WKA)
- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Bisherige CRES Forschungsbeiträge

Gliederung

1 Motivation

- **Bruttostromerzeugung in Deutschland**
- Stromgestehungskosten in Deutschland
- Moderne Windkraftanlagen (WKA)
- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Bisherige CRES Forschungsbeiträge

Bruttostromerzeugung* in Deutschland 2013 (insgesamt $631 \text{ TW h}^1 = 631 \cdot 10^9 \text{ kW h}$, aus [1])



1 Vorläufig
2 Regenerativer Anteil

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB)

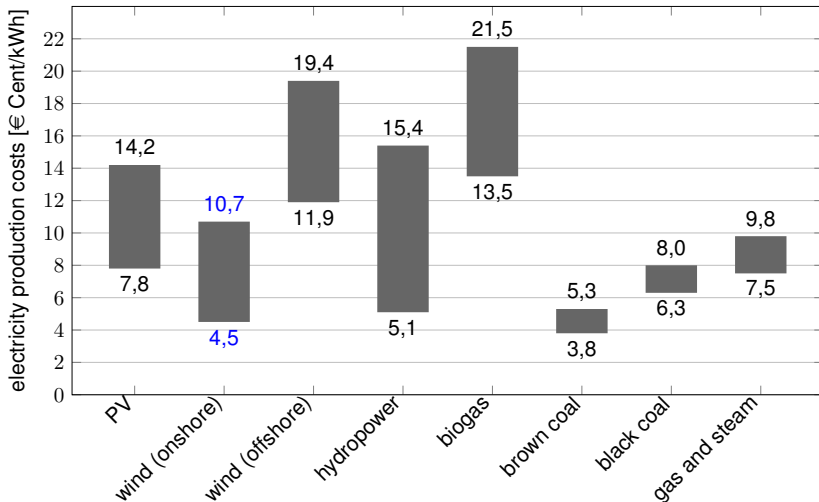
(* Nettostromerzeugung = Bruttostromerzeugung – Eigenenergieverbrauch des Kraftwerks)

Gliederung

1 Motivation

- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- **Stromgestehungskosten in Deutschland**
- Moderne Windkraftanlagen (WKA)
- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Bisherige CRES Forschungsbeiträge

Stromgestehungskosten in Deutschland 2013



(basiert auf Abb. 1 in [2] and Tab. 4.12 (> 500 kW) in [3]).

Gliederung

1 Motivation

- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- Stromgestehungskosten in Deutschland
- **Moderne Windkraftanlagen (WKA)**
- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Bisherige CRES Forschungsbeiträge

Moderne Windkraftanlagen zur Stromerzeugung



(<http://www.siemens.com/>)



(<http://www.ge.com/>)



(<http://www.enercon.de/>)

Kernkomponenten

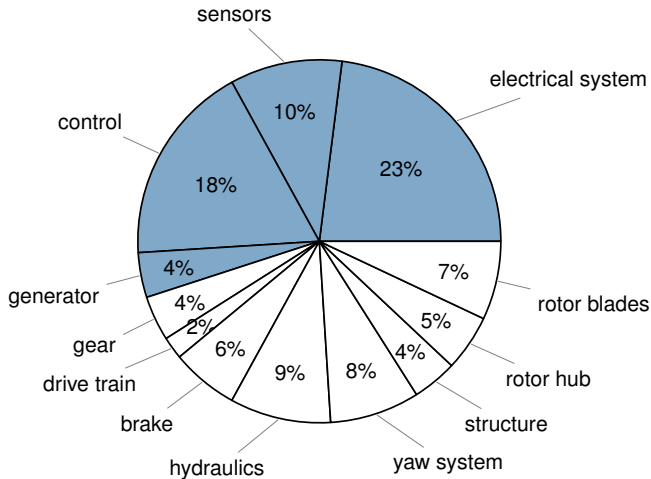
- drei Rotorblätter / Auftriebsprinzip / Luv-Rotor mit horizontaler Achse
- Leistungselektronik (back-to-back converter)
- dominierende Generatortopologien:
 - Synchrongenerator *ohne* Getriebe (“direct drive”)
 - Doppelt-gespeister Asynchrongenerator *mit* Getriebe

Gliederung

1 Motivation

- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- Stromgestehungskosten in Deutschland
- Moderne Windkraftanlagen (WKA)
- **WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern**
- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Bisherige CRES Forschungsbeiträge

WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern



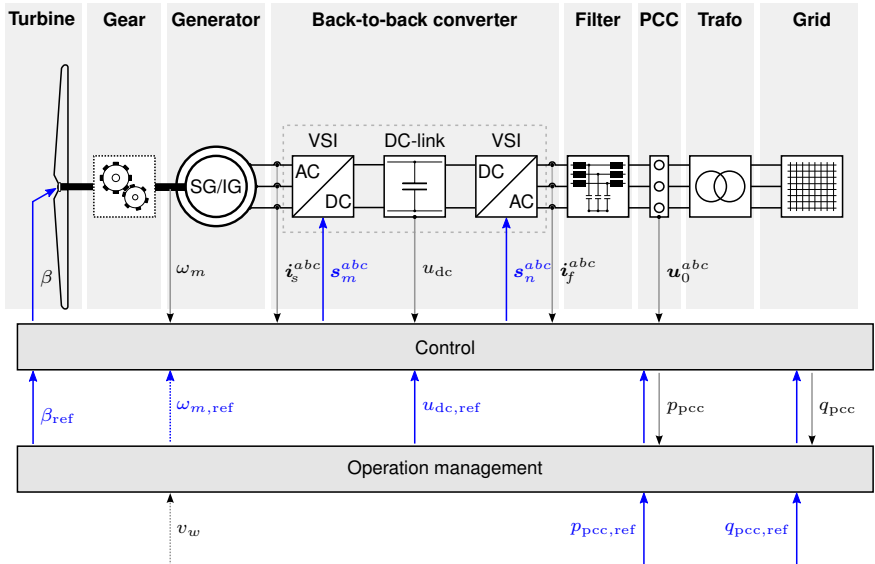
(basiert auf Abb. 2 in [4])

Gliederung

1 Motivation

- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- Stromgestehungskosten in Deutschland
- Moderne Windkraftanlagen (WKA)
- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
- **Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator**
- Bisherige CRES Forschungsbeiträge

WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator



Gliederung

1 Motivation

- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- Stromgestehungskosten in Deutschland
- Moderne Windkraftanlagen (WKA)
- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Bisherige CRES Forschungsbeiträge

Bisherige CRES Forschungsbeiträge

Regenerative Energiesysteme

- Grundlagen und Regelung von modernen Windkraftanlagen: [5]
- Modellprädiktive Regelung von Generator und Netzseite: [6–8], [9, 10]¹
- Geberlose Regelung von PMSG und DFIG: [6, 11]
- Parameterschätzung von DFIG (Extended Kalman Filter): [12]
- **Modell-basierte Stromregelung bei Netzanbindung über LCL-Filter: [13]**
- Sensorlose Netzsynchronisation (Virtual Flux): [14]
- Zwischenkreisspannungsregelung: [8, 15], [16]
- Modell-freie Generatorgeschwindigkeitsregelung: [17], [18]

Mechatronik:

- Dynamische Reibungsmodellierung: [19]
- **Modell-basierte und modell-freie Stromregelung von RSM: [20, 21]**
- **(Fast) Modell-freie Positions- und Geschwindigkeitsregelung von Robotern: [22, 23]**
- **(Fast) Modell-freie Pfadverfolgungsregelung von Robotern: [24]**

¹submitted/under review

Gliederung

2 Modell-basierte Regelverfahren

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [20, 25]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse

Gliederung

2 Modell-basierte Regelverfahren

■ Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]

- Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
- Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
- Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
- Simulationsergebnisse

■ Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [20, 25]

- Generisches RSM-Modell
- Stromregelung: Lineare RSM
- Stromregelung: Nichtlineare RSM
- Messergebnisse

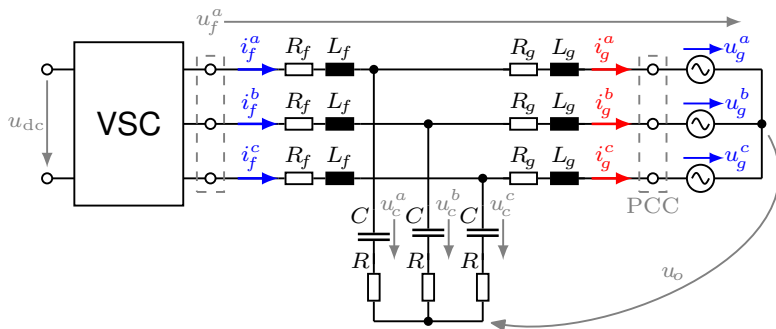
Gliederung

2 Modell-basierte Regelverfahren

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [20, 25]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse

Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]

Elektrisches Netzwerk und Problemstellung



- Regelung der **netzseitigen Ströme** i_g^{abc} (Wirk- und Blindleistung)
- Messung von **umrichterseitigen Strömen** i_f^{abc} und **Netzspannung** u_g^{abc}
- aktive Dämpfung der Resonanzfrequenz $\omega_{\text{res}} = \sqrt{\frac{L_f + L_g}{C L_f L_g}}$ des LCL-Filters

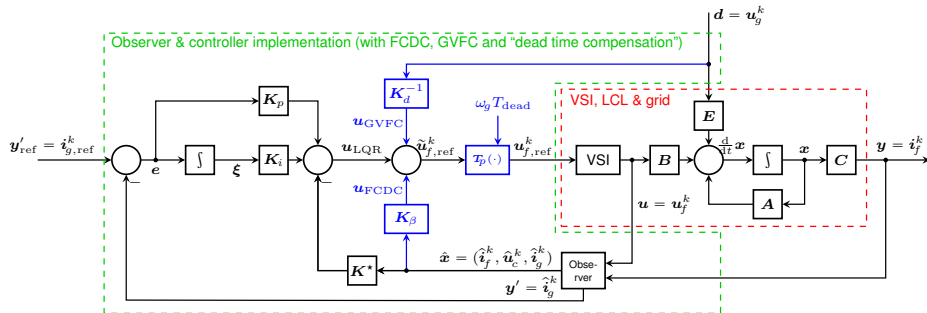
Gliederung

2 Modell-basierte Regelverfahren

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [20, 25]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse

Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]

Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen



- PI-Zustandsregler: $u_{LQR}(t) = K^* \hat{x}(t) + K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$
- Zustandsbeobachter für $\hat{x}(t)$ (Rekonstruktion aus i_f^k , u_f^k & u_g^k)
- Störgrößenaufschaltung: $u_{GVFC}(t) = K_d^{-1} u_g^k(t)$ (u_g^k aus PLL)
- Stromdynamikentkopplung: $u_{FCDC}(t) = K_\beta \hat{x}(t)$
- Totzeitkompensation: $u_{f,ref}^k(t) = T_p(\omega_g T_{dead}) \tilde{u}_{f,ref}^k(t)$ (ω_g aus PLL)

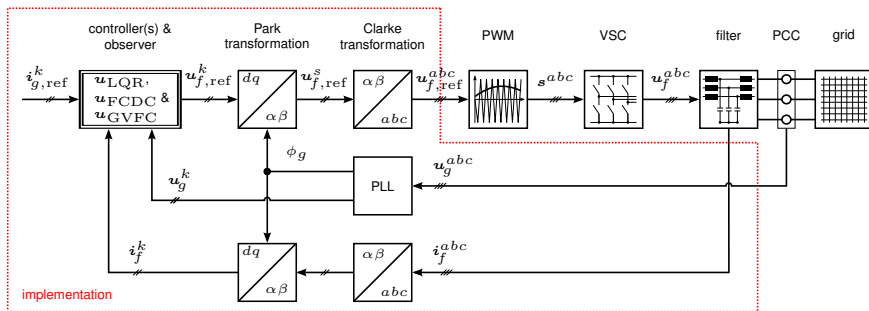
Gliederung

2 Modell-basierte Regelverfahren

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [20, 25]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse

Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]

Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung



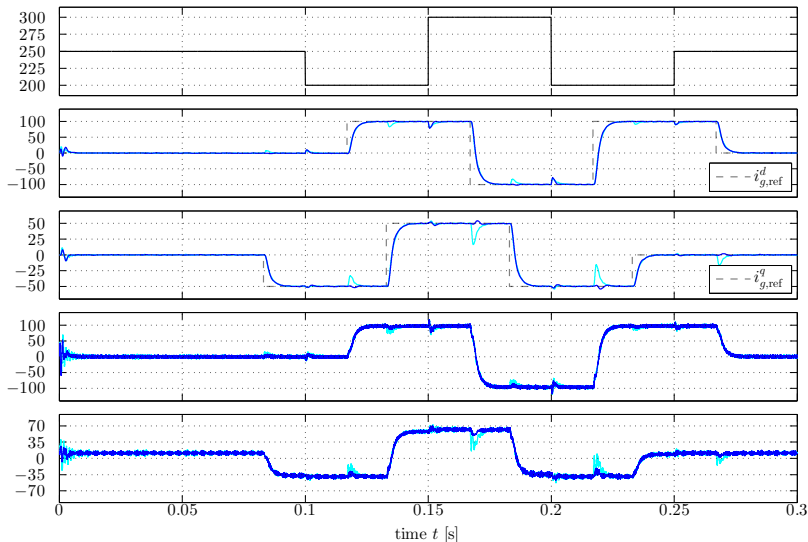
Gliederung

2 Modell-basierte Regelverfahren

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [20, 25]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse

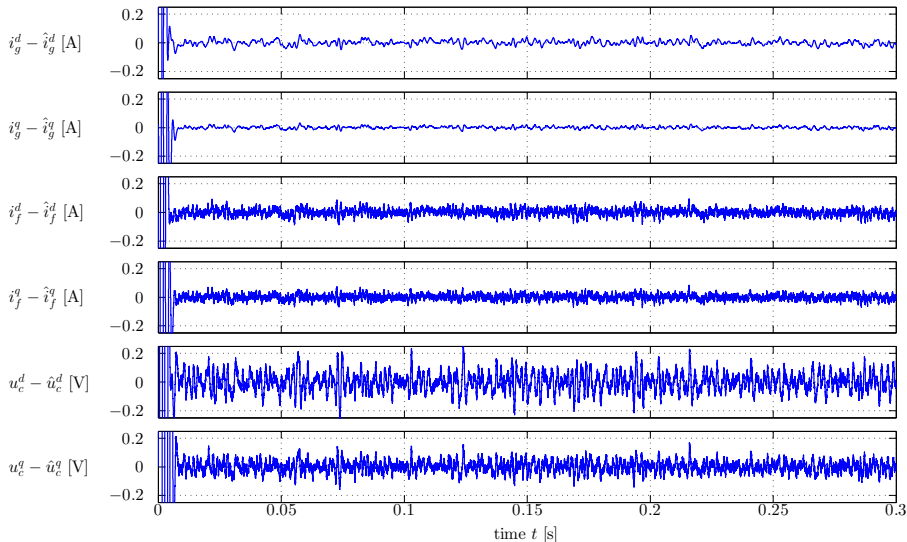
Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]

Simulationsergebnisse: Reglerperformanz für PI-SF mit — und ohne — FCDC



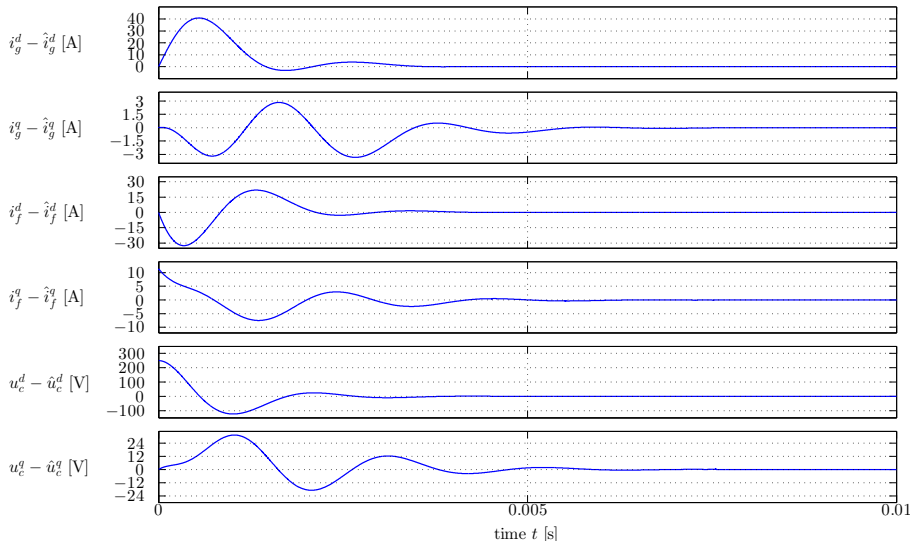
Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]

Simulationsergebnisse: Beobachterfehler für PI-SF mit — FCDC



Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]

Simulationsergebnisse: Beobachterfehler für PI-SF mit — FCDC (Zoom)



Gliederung

2 Modell-basierte Regelverfahren

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [20, 25]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse

Gliederung

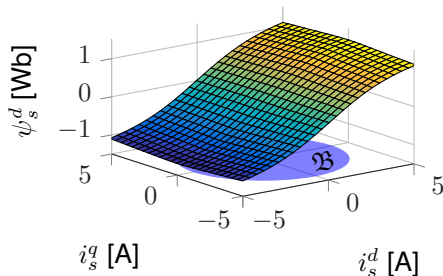
2 Modell-basierte Regelverfahren

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [20, 25]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse

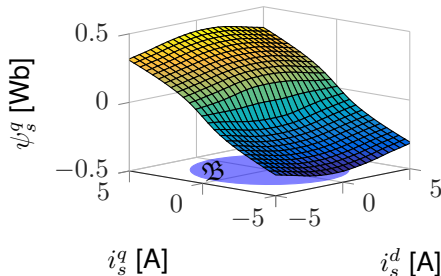
Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

Generisches Modell mit nichtlinearer Flussverkettung (ohne Eisenverluste)

$$\mathbf{u}_s^k(t) = R_s \mathbf{i}_s^k(t) + \frac{d}{dt} \psi_s^k(t) + \underbrace{\omega_k(t) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}}_{=: \mathbf{J}} \psi_s^k(t), \quad \psi_s^k(0) = \psi_{s,0} \quad [\text{Wb}]^2 \quad (1)$$



(a) *d*-Flussverkettung



(b) *q*-Flussverkettung

⇒ **Nichtlineares dynamisches System!**

Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

Generisches Modell: Nichtlineare Stromdynamik

Zeitliche Ableitung der Flussverkettung (Kettenregel) gegeben durch:

$$\frac{d}{dt} \psi_s^k(\mathbf{i}_s^k(t)) = \frac{\partial \psi_s^k(\mathbf{i}_s^k(t))}{\partial \mathbf{i}_s^k(t)} \frac{d}{dt} \mathbf{i}_s^k(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} L_s^{dd}(\mathbf{i}_s^k) & L_s^{dq}(\mathbf{i}_s^k) \\ L_s^{qd}(\mathbf{i}_s^k) & L_s^{qq}(\mathbf{i}_s^k) \end{bmatrix}}_{=: \mathbf{L}_s^k(\mathbf{i}_s^k(t))} \frac{d}{dt} \mathbf{i}_s^k(t) \quad (2)$$

Einsetzen von (2) in (1) ergibt **nichtlineare Stromdynamik**:

$$\boxed{\begin{aligned} \frac{d}{dt} \mathbf{i}_s^k(t) &= \mathbf{L}_s^k(\mathbf{i}_s^k(t))^{-1} \left[\mathbf{u}_s^k(t) - R_s \mathbf{i}_s^k(t) - \omega_k(t) \mathbf{J} \psi_s^k(\mathbf{i}_s^k(t)) \right] \\ \mathbf{i}_s^k(0) &= \mathbf{i}_{s,0}^k [\text{A}]^2 \end{aligned}} \quad (3)$$

Gliederung

2 Modell-basierte Regelverfahren

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [20, 25]
 - Generisches RSM-Modell
 - **Stromregelung: Lineare RSM**
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse

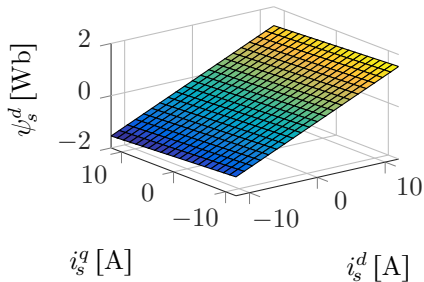
Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

Lineare Flussverkettung

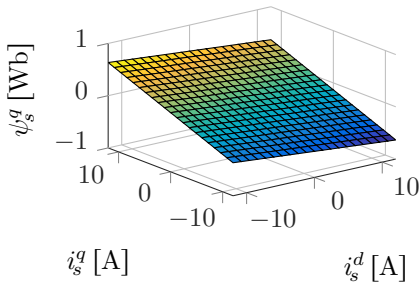
Fall 1

ψ_s^k ist eine **lineare** Funktion der Statorströme i_s^k , d.h.

$$L_s^k(i_s^k) = L_s^k = \begin{bmatrix} L_s^{dd} & L_s^{dq} \\ L_s^{qd} & L_s^{qq} \end{bmatrix} = \text{const.} \quad \text{und} \quad \psi_s^k(i_s^k) = L_s^k i_s^k. \quad (4)$$



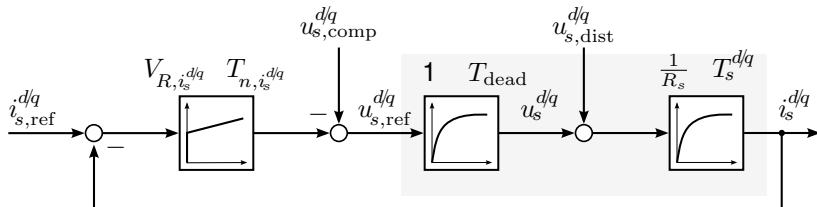
(a) *d*-Flussverkettung (linear)



(b) *q*-Flussverkettung (linear)

Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

Regelkreis (mit Umrichterapproximation) und PI-Reglerauslegung



wobei

- $T_s^{d/q} = T_s^{d/q}(L_s^{dd}, L_s^{dq}, L_s^{qd}, L_s^{qq}) = T_s^{d/q}(L_s^{dd}, L_s^c, L_s^{qq})$ mit $L_s^c := L_s^{dq} = L_s^{qd}$
- $T_{\text{dead}} \propto f_{\text{pwm}}$
- $u_{s,\text{comp}}^{d/q} = u_{s,\text{dist}}^{d/q}$ (ideale Entkopplung)
- Reglerauslegung nach **Betragsoptimum** [26]:

$$\text{Verstärkung: } V_{R, i_s^{d/q}} = \frac{T_s^{d/q} R_s}{2T_{\text{dead}}} [\Omega] \quad \wedge \quad \text{Zeitkonstante: } T_{n, i_s^{d/q}} = T_s^{d/q} \quad [\text{s}]$$

Gliederung

2 Modell-basierte Regelverfahren

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [20, 25]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse

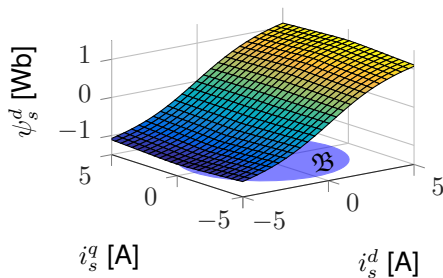
Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

Nichtlineare Flussverkettung

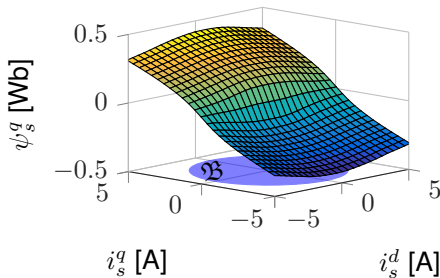
Fall 2

ψ_s^k ist eine **nichtlineare** Funktion der Statorströme i_s^k , d.h.

$$\mathbf{L}_s^k(i_s^k) = \begin{bmatrix} L_s^{dd}(i_s^k) & L_s^{dc}(i_s^k) \\ L_s^{cd}(i_s^k) & L_s^{cc}(i_s^k) \end{bmatrix} \neq \text{const.} \quad \text{und} \quad \psi_s^k(i_s^k). \quad (5)$$



(a) *d*-Flussverkettung



(b) *q*-Flussverkettung

Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

PI-Reglerauslegung nach Betragsoptimum mit *online Parameteranpassung*

- Induktivitäten sind zustands(strom)-abhängig

$$L_s^{dd}, L_s^c, L_s^{qq} \Rightarrow L_s^{dd}(\mathbf{i}_s^k), L_s^c(\mathbf{i}_s^k), L_s^{qq}(\mathbf{i}_s^k)$$

- Statorzeitkonstanten sind zustands(strom)-abhängig

$$T_s^{d/q} = T_s^{d/q}(L_s^{dd}, L_s^c, L_s^{qq}) \Rightarrow T_s^{d/q}(\mathbf{i}_s^k) := T_s^{d/q}(L_s^{dd}(\mathbf{i}_s^k), L_s^c(\mathbf{i}_s^k), L_s^{qq}(\mathbf{i}_s^k))$$

⇒ **Online Anpassung** der Reglerparameter in jedem Sampling-Schritt:

Verstärkung: $V_{R, \mathbf{i}_s^{d/q}}(\mathbf{i}_s^k) = \frac{T_s^{d/q}(\mathbf{i}_s^k) R_s}{2T_{\text{dead}}} [\Omega]$

Zeitkonstante: $T_{n, \mathbf{i}_s^{d/q}}(\mathbf{i}_s^k) = T_s^{d/q}(\mathbf{i}_s^k)$

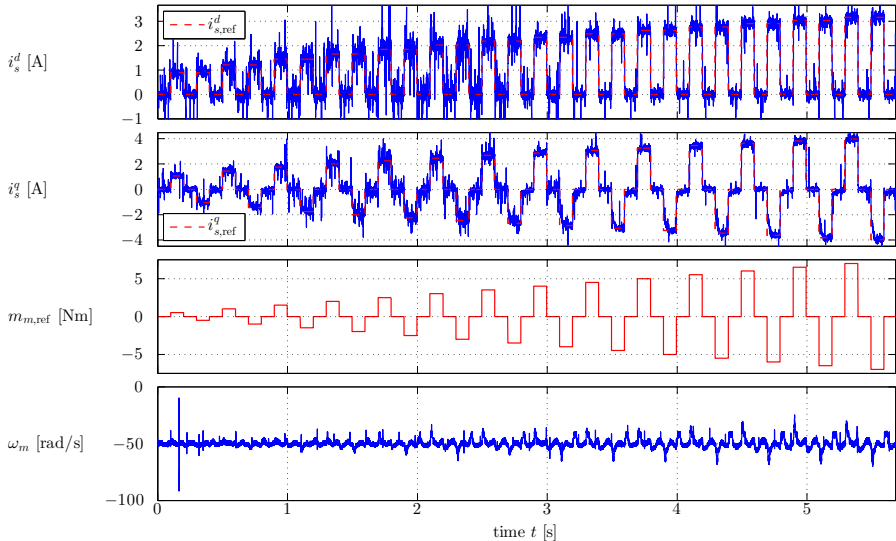
Gliederung

2 Modell-basierte Regelverfahren

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [13]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [20, 25]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse

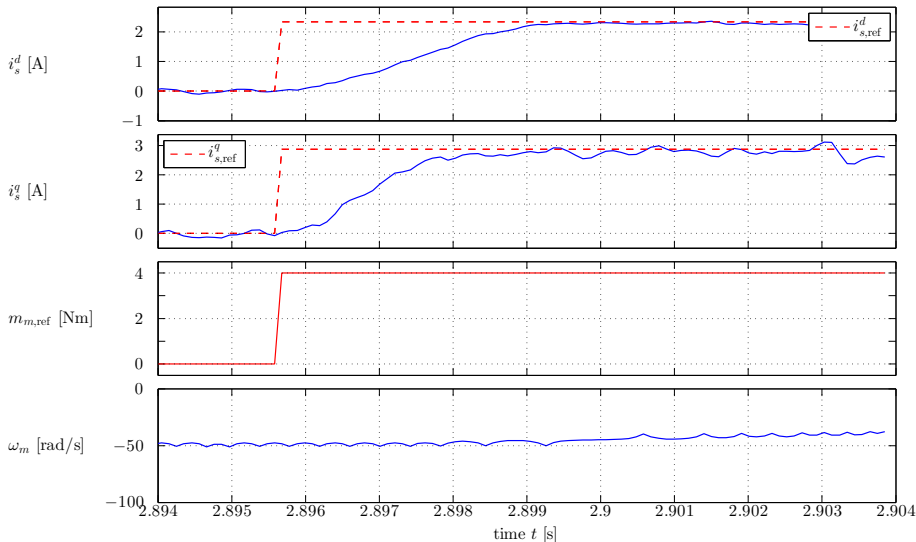
Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

Messergebnisse für 1,1 kW RSM



Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

Messergebnisse für 1,1 kW RSM (Zoom)



Gliederung

3 Modell-freie Regelverfahren

- Strom-Trichter-Regelung von RSM [21]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse
- Funnel Control für Roboter [22, 23]
 - Problemstellung
 - Regelziel und Regelgesetz
 - Verwendung und Design von Internen Modellen
 - Implementierung und Simulationsergebnisse für planaren (2DOF) Roboter
 - Messergebnisse für KUKA KR16-2 (Gelenk 1)

Gliederung

3 Modell-freie Regelverfahren

■ Strom-Trichter-Regelung von RSM [21]

- Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
- PI-Funnel Control mit Anti-Windup
- Regelkreis und Implementierung
- Simulationsergebnisse

■ Funnel Control für Roboter [22, 23]

- Problemstellung
- Regelziel und Regelgesetz
- Verwendung und Design von Internen Modellen
- Implementierung und Simulationsergebnisse für planaren (2DOF) Roboter
- Messergebnisse für KUKA KR16-2 (Gelenk 1)

Gliederung

3 Modell-freie Regelverfahren

■ Strom-Trichter-Regelung von RSM [21]

■ Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")

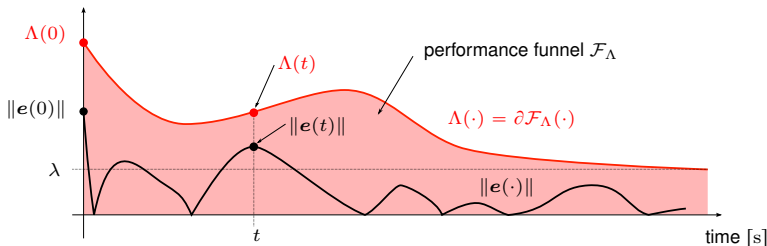
- PI-Funnel Control mit Anti-Windup
- Regelkreis und Implementierung
- Simulationsergebnisse

■ Funnel Control für Roboter [22, 23]

- Problemstellung
- Regelziel und Regelgesetz
- Verwendung und Design von Internen Modellen
- Implementierung und Simulationsergebnisse für planaren (2DOF) Roboter
- Messergebnisse für KUKA KR16-2 (Gelenk 1)

Strom-Trichter-Regelung von RSM [21]

Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")



Regelgesetz:

$$\mathbf{u}_{\text{fc}}(t) = k(t)e(t)$$

(FC $_{i_s^k}$)

wobei

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

Gliederung

3 Modell-freie Regelverfahren

■ Strom-Trichter-Regelung von RSM [21]

- Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")

■ PI-Funnel Control mit Anti-Windup

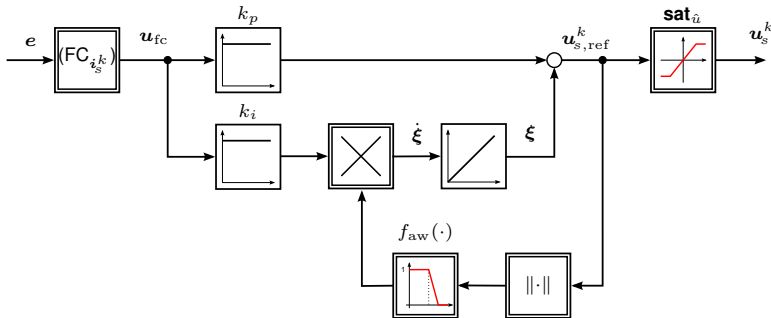
- Regelkreis und Implementierung
- Simulationsergebnisse

■ Funnel Control für Roboter [22, 23]

- Problemstellung
- Regelziel und Regelgesetz
- Verwendung und Design von Internen Modellen
- Implementierung und Simulationsergebnisse für planaren (2DOF) Roboter
- Messergebnisse für KUKA KR16-2 (Gelenk 1)

Strom-Trichter-Regelung von RSM

PI-Funnel Control mit Anti-Windup als Stromregler



$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \boldsymbol{\xi}(t) &= k_i f_{aw} \left(\boldsymbol{\xi}(t) + k_p \mathbf{u}_{fc}(t) \right) \mathbf{u}_{fc}(t), & \boldsymbol{\xi}(0) &= \boldsymbol{\xi}^0 \in \mathbb{R}^n \\ \mathbf{u}_{s,ref}^k(t) &= \boldsymbol{\xi}(t) + k_p \mathbf{u}_{fc}(t), & \text{mit } k_p &> 0, k_i \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{PI}^{aw})$$

Gliederung

3 Modell-freie Regelverfahren

■ Strom-Trichter-Regelung von RSM [21]

- Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
- PI-Funnel Control mit Anti-Windup

■ Regelkreis und Implementierung

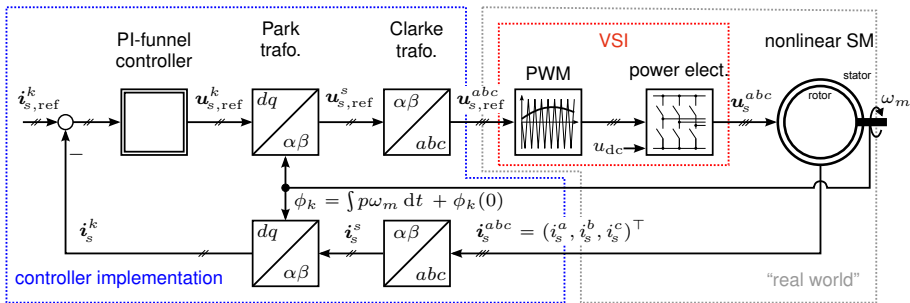
- Simulationsergebnisse

■ Funnel Control für Roboter [22, 23]

- Problemstellung
- Regelziel und Regelgesetz
- Verwendung und Design von Internen Modellen
- Implementierung und Simulationsergebnisse für planaren (2DOF) Roboter
- Messergebnisse für KUKA KR16-2 (Gelenk 1)

Strom-Trichter-Regelung von RSM

Regelkreis und Implementierung



Gliederung

3 Modell-freie Regelverfahren

■ Strom-Trichter-Regelung von RSM [21]

- Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
- PI-Funnel Control mit Anti-Windup
- Regelkreis und Implementierung

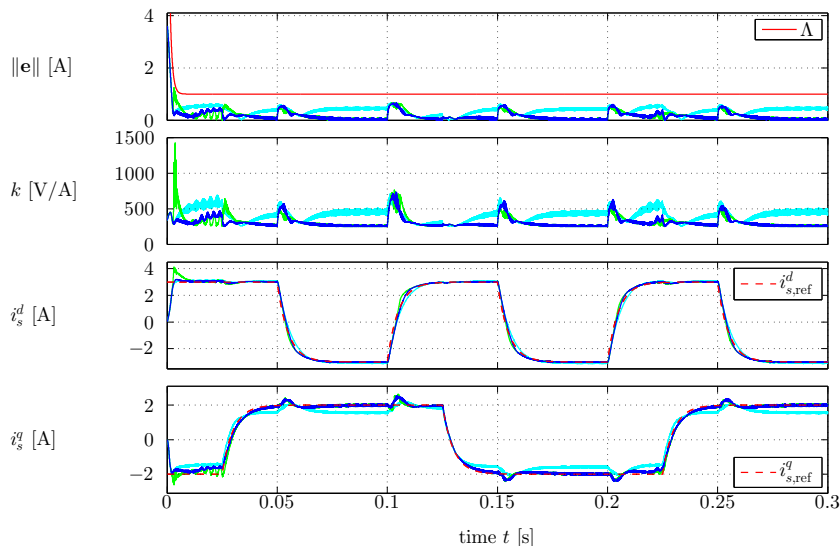
■ Simulationsergebnisse

■ Funnel Control für Roboter [22, 23]

- Problemstellung
- Regelziel und Regelgesetz
- Verwendung und Design von Internen Modellen
- Implementierung und Simulationsergebnisse für planaren (2DOF) Roboter
- Messergebnisse für KUKA KR16-2 (Gelenk 1)

Strom-Trichter-Regelung von RSM

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



Gliederung

3 Modell-freie Regelverfahren

- Strom-Trichter-Regelung von RSM [21]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse
- Funnel Control für Roboter [22, 23]
 - Problemstellung
 - Regelziel und Regelgesetz
 - Verwendung und Design von Internen Modellen
 - Implementierung und Simulationsergebnisse für planaren (2DOF) Roboter
 - Messergebnisse für KUKA KR16-2 (Gelenk 1)

Gliederung

3 Modell-freie Regelverfahren

- Strom-Trichter-Regelung von RSM [21]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse
- Funnel Control für Roboter [22, 23]
 - Problemstellung
 - Regelziel und Regelgesetz
 - Verwendung und Design von Internen Modellen
 - Implementierung und Simulationsergebnisse für planaren (2DOF) Roboter
 - Messergebnisse für KUKA KR16-2 (Gelenk 1)

Funnel Control für Roboter

Problemstellung



Kuka KR 150-2 (Series 2000)
(<http://www.kuka-robotics.com>)

Anwendungen

- (Punkt-)Schweißen
- Lackieren/Emallieren
- Montage
- Einlegen/Bestücken
- Laserschneiden
- ...

Ziele:

- Genaue Positionsregelung des Endeffektors, d.h. für gegebenes $\lambda > 0$:

$$\forall t \geq t_0: \quad \|e_E(t)\| = \|\mathbf{y}_{\text{ref},E}(t) - \mathbf{y}_E(t)\| \leq \lambda.$$

- Regler: einfach, 'intuitiv' parametrierbar und (möglichst) *modell-frei*

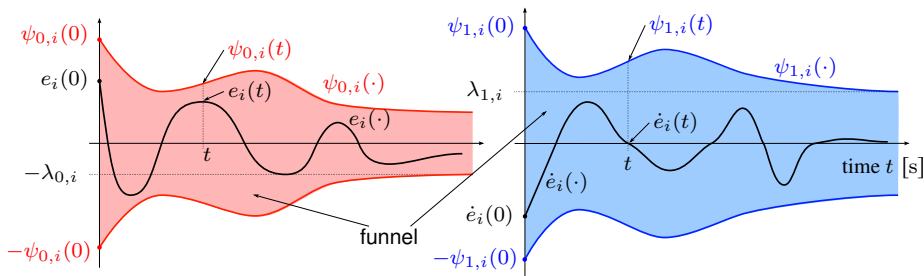
Gliederung

3 Modell-freie Regelverfahren

- Strom-Trichter-Regelung von RSM [21]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse
- Funnel Control für Roboter [22, 23]
 - Problemstellung
 - Regelziel und Regelgesetz
 - Verwendung und Design von Internen Modellen
 - Implementierung und Simulationsergebnisse für planaren (2DOF) Roboter
 - Messergebnisse für KUKA KR16-2 (Gelenk 1)

Funnel Control für Roboter

Regelziel: Positionsregelung mit “*vorgegebener transienter Genauigkeit*” für jedes Gelenk

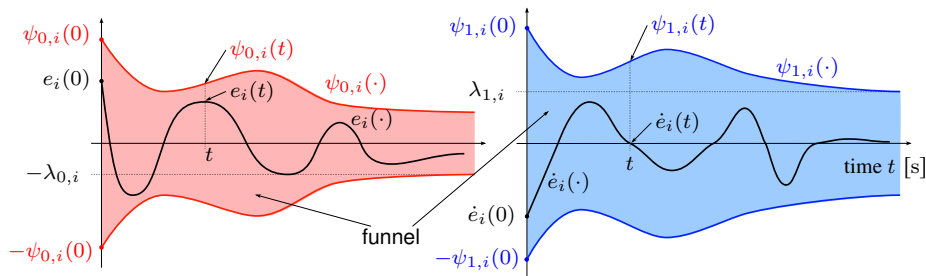


Für alle Positionsfehler e_i mit $i \in \{1, \dots, n\}$ soll gelten:

$$\forall t \geq 0: \quad |e_i(t)| = |y_{\text{ref},i}(t) - y_i(t)| < \psi_{0,i}(t) \quad \text{und} \quad |\dot{e}_i(t)| < \psi_{1,i}(t)$$

Funnel Control für Roboter

Regelgesetz (fast modell-frei) und Online-Regleranpassung



$$\mathbf{u}(t) = \widehat{\mathbf{M}}(\mathbf{y}(t)) \left(\underbrace{\mathbf{K}_0(t)^2 \mathbf{e}(t)}_{\mathbf{P}} + \underbrace{\mathbf{K}_0(t) \mathbf{K}_1(t) \dot{\mathbf{e}}(t)}_{\mathbf{D}} + \mathbf{u}_{FF}(t) \right) \quad (\text{FC}_n)$$

- $\mathbf{K}_0(t) = \text{diag} \{k_{0,1}(t), \dots, k_{0,n}(t)\} \wedge \mathbf{K}_1(t) = \text{diag} \{k_{1,1}(t), \dots, k_{1,n}(t)\}$
- $\forall i \in \{1, \dots, n\}: \quad k_{0,i}(t) = \frac{1}{\psi_{0,i}(t) - |e_i(t)|} \wedge k_{1,i}(t) = \frac{1}{\psi_{1,i}(t) - |\dot{e}_i(t)|}$

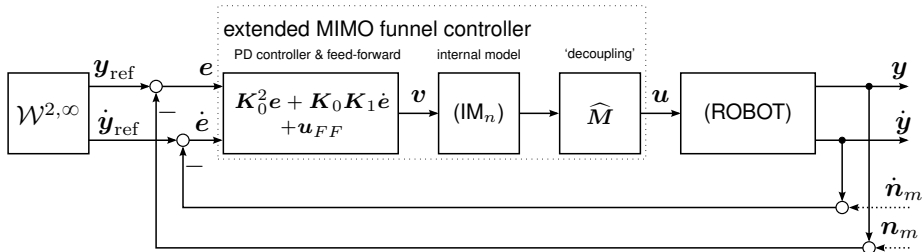
Gliederung

3 Modell-freie Regelverfahren

- Strom-Trichter-Regelung von RSM [21]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse
- Funnel Control für Roboter [22, 23]
 - Problemstellung
 - Regelziel und Regelgesetz
 - Verwendung und Design von Internen Modellen
 - Implementierung und Simulationsergebnisse für planaren (2DOF) Roboter
 - Messergebnisse für KUKA KR16-2 (Gelenk 1)

Funnel Control für Roboter

Verwendung und Design von Internen Modellen



- Beispielhafte Sollverläufe (für jedes Gelenk $i \in \{1, \dots, n\}$)

$$y_{ref,i}: \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}, \quad t \mapsto y_{ref,i}(t) := a_i \sin(2\pi f_i t) + b_i, \quad a_i > 0, b_i \neq 0$$

- Design und Hintereinanderschaltung von Internen Modellen (SISO)

$$F_{IM_i}(s) = \frac{k_{P,i} s + k_{I,i}}{s} \cdot \frac{(s + \gamma_i)^2}{s^2 + (2\pi f_i)^2}, \quad k_{P,i}, k_{I,i}, \gamma_i, f_i > 0 \quad (IM)$$

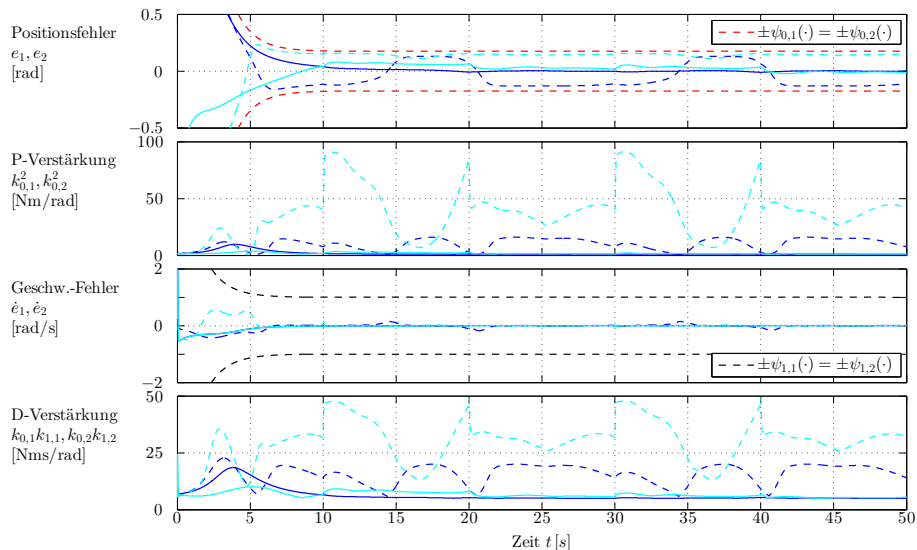
Gliederung

3 Modell-freie Regelverfahren

- Strom-Trichter-Regelung von RSM [21]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse
- Funnel Control für Roboter [22, 23]
 - Problemstellung
 - Regelziel und Regelgesetz
 - Verwendung und Design von Internen Modellen
 - Implementierung und Simulationsergebnisse für planaren (2DOF) Roboter
 - Messergebnisse für KUKA KR16-2 (Gelenk 1)

Funnel Control für Roboter

Simulationsergebnisse für 2DOF-Rob. (— #1 FC+IM, - - - #1 FC, — #2 FC+IM, - - - #2 FC)



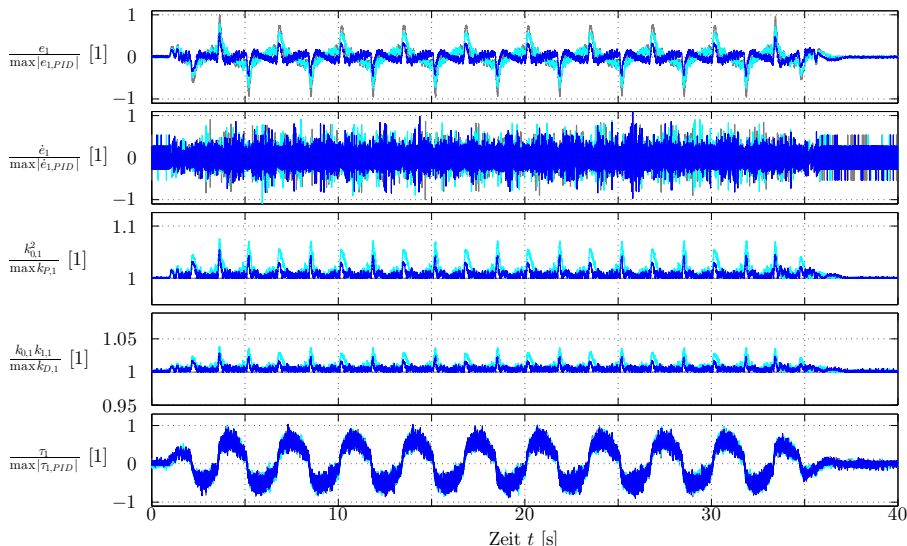
Gliederung

3 Modell-freie Regelverfahren

- Strom-Trichter-Regelung von RSM [21]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse
- Funnel Control für Roboter [22, 23]
 - Problemstellung
 - Regelziel und Regelgesetz
 - Verwendung und Design von Internen Modellen
 - Implementierung und Simulationsergebnisse für planaren (2DOF) Roboter
 - Messergebnisse für KUKA KR16-2 (Gelenk 1)

Funnel Control für Roboter

Messergebnisse für KUKA KR16-2 Gelenk 1 (— PID, — FC, — FC+IM; alles normiert)

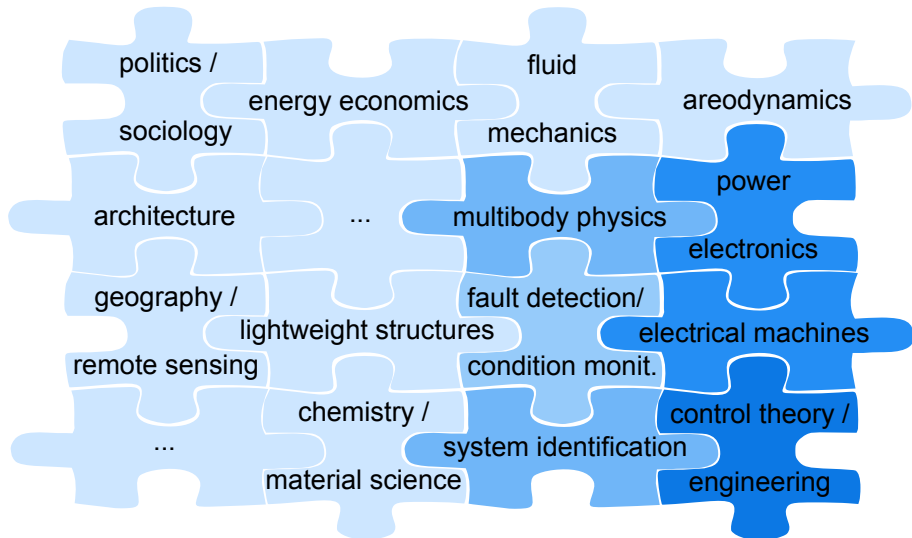


Gliederung

4 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

(Energie-)Forschung = Interdisziplinarität



Ausblick

Zukünftige Herausforderungen im Bereich “Regenerative Energie Systeme”

- **Senkung der Stromgestehungskosten**
 ⇒ **Wirtschaftliche Machbarkeit der Energiewende?!**
- **Erhöhung der Zuverlässigkeit**
 (v.a. Regelung und Leistungselektronik fehleranfällig)
 - Robustheit
 - Systemanalyse
 - Reduktion der Wartungskosten (Condition monitoring / fault detection)
- **Flexibilisierung/Robustifizierung der Netzanbindung**
 - Anlagenschutz
 - Grid code requirements (z.B. LVRT, frequency/voltage support)
 - Dezentrale Einspeisung (z.B. islanding/micro grid operation, etc.)
 - “Windkraftwerke” (Wind farms, Anbindung, Verschattung/Wake)
- **Neue Technologien**
 - Neue Generatortopologien
 - Neue Umrichtertopologien (Mehrlevel)
 - Neue Getriebetopologien (“single-stage”)
 - Konfigurationen ohne/kleinere Transformatoren
 - Neue leistungselektronische Bauteile

Literaturliste I

- [1] Energiedaten: Gesamtausgabe (Stand: Juli 2014). Technical report, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2014.
- [2] Christoph Kost, Johannes N. Mayer, Jessica Thomsen, Nikias Hartmann, Charlotte Senkpiel, Simon Philipps, Sebastian Nold, Simon Lude, and Thomas Schlegl. Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien. Technical report, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), 2013.
- [3] Ulrich Dumont and Rita Keuneke. Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichtes 2011 gemäß §65 EEG – Vorhaben Ild spartenspezifisches Vorhaben Wasserkraft. Endbericht, Ingenieurbüro Floecksmühle, 2011.
- [4] Berthold Hahn, Michael Durstewitz, and Kurt Rohrig. Reliability of wind turbines, experiences of 15 years with 1500 WTs. In Joachim Peinke, Peter Schaumann, and Stephan Barth, editors, *Wind Energy*, Proceedings of the Euromech Colloquium, pages 329–332. Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [5] Christian Dirscherl, Christoph Hackl, and Korbinian Schechner. Modellierung und Regelung von modernen Windkraftanlagen: Eine Einführung (*available at the authors upon request*). In Dierk Schröder, editor, *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen*, chapter 24. Springer-Verlag, 2015.
- [6] 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*, pages 1–10, 2013.
- [7] Christoph M. Hackl, Florian Larcher, Alexander Dötlinger, and Ralph. M. Kennel. Is multiple-objective model-predictive control “optimal”? In *Proceedings of the 2013 IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives and Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics*, pages 1–8, 2013.

Literaturliste II

- [8] Christian Dirscherl, Christoph Hackl, and Korbinian 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*, pages 999–1006, 2015.
- [9] Christoph 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 *submitted to PRECEDE 2015, 3rd Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics*, 2015.
- [10] Zhenbin Zhang, Christoph Hackl, Tongjing Sun, and Ralph 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.
- [11] Mohamed Abdelrahem, Christoph M. Hackl, and Ralph 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*, 2015.
- [12] Mohamed Abdelrahem, Christoph M. Hackl, and Ralph 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*, 2015.
- [13] Christian Dirscherl, Josef Fessler, Christoph M. Hackl, and Hanko Ipach. State-feedback controller and observer design for grid-connected voltage source power converters with LCL-filter. In *submitted to 2015 IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, 2015.
- [14] Zhenbin Zhang, Hue. 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*, PP(99):1 (IEEE Early Access Article), 2014.

Literaturliste III

- [15] Florian Bauer, Christoph M. Hackl, and Korbinian Schechner. Dc-link control for airborne wind energy systems during pumping mode. In *to be published in the Proceedings of the Airborne Wind Energy Conference 2015*, 2015.
- [16] Christian Dirscherl, Christoph M. Hackl, and Korbinian Schechner. Pole-placement based nonlinear state-feedback control of the DC-link voltage in grid-connected voltage source power converters: A preliminary study. In *submitted to 2015 IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, 2015.
- [17] Christoph Michael Hackl. Funnel control for wind turbine systems. In *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Control Applications (Part of the IEEE Multi-Conference on Systems and Control)*, pages 1377–1382, 2014.
- [18] Christoph M. Hackl. Speed funnel control with disturbance observer for wind turbine systems with elastic shaft. In *submitted to 54th IEEE Conference on Decision and Control*, 2015.
- [19] Christoph M. Hackl. Dynamische Reibungsmodellierung: Das Lund-Grenoble (LuGre) Reibmodell (*available at the authors upon request*). In Dierk Schröder, editor, *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen*, chapter 25. Springer-Verlag, 2015.
- [20] Christoph M. Hackl, Maarten J. Kamper, Julian Kullick, and Joshua Mitchell. Nonlinear PI current control of reluctance synchronous machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics (in preparation)*, 2015.
- [21] Christoph M. Hackl. Current PI-funnel control with anti-windup for synchronous machines. In *submitted to 54th IEEE Conference on Decision and Control*, 2015.
- [22] Christoph Michael Hackl and Ralph M. Kennel. Position funnel control for rigid revolute joint robotic manipulators with known inertia matrix. In *Proceedings of the 20th Mediterranean Conference on Control and Automation*, pages 615–620, 2012.

Literaturliste IV

- [23] Christoph Michael Hackl. 'Funnel control' zur Positionsregelung von starren Drehgelenkrobotern mit grob bekannter Trägheitsmatrix. In *Tagungsband des GMA-Fachausschuss 1.40*, pages 302–310, 2012.
- [24] Timm Faulwasser and Christoph M. Hackl. Path-following funnel control for rigid-link revolute-joint robotic systems. In *Proceedings of the 21st International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*, pages 1044–1051, 2014.
- [25] Julian 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.
- [26] Dierk Schröder. *Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen (3., bearb. Auflage)*. Springer-Verlag, Berlin, 2009.