

Moderne Verfahren zur Regelung und Parameterschätzung von Windkraftanlagen

Christoph Hackl

Technische Universität München (TUM)
Munich School of Engineering (MSE)
Research group "Control of Renewable Energy Systems (CRES)"
www.cres.mse.tum.de

16.10.2015

Bachmann electronic GmbH, Feldkirch, Österreich

Gliederung

- 1 Vorstellung
- 2 Moderne Verfahren für regenerative Energiesysteme
- 3 Zusammenfassung und Ausblick

Gliederung

1 Vorstellung

- TUM Munich School of Engineering (MSE)
 - Integrative Research Center: Gebündelte Expertise in “Energieforschung”
 - Aktuelle Forschungsschwerpunkte
- MSE Forschergruppe “Control of renewable energy systems (CRES)”
 - Team und Fakten
 - Forschungsansatz
 - Forschungsblickwinkel
 - Laboraufbauten
 - Bisherige Forschungsbeiträge

Gliederung

1 Vorstellung

- TUM Munich School of Engineering (MSE)
 - Integrative Research Center: Gebündelte Expertise in “Energieforschung”
 - Aktuelle Forschungsschwerpunkte
- MSE Forschergruppe “Control of renewable energy systems (CRES)”
 - Team und Fakten
 - Forschungsansatz
 - Forschungsblickwinkel
 - Laboraufbauten
 - Bisherige Forschungsbeiträge

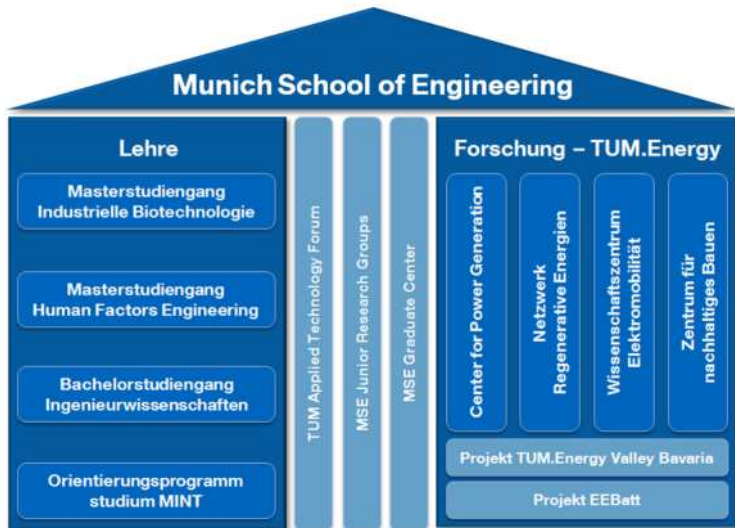
Gliederung

1 Vorstellung

- TUM Munich School of Engineering (MSE)
 - Integrative Research Center: Gebündelte Expertise in “Energieforschung”
 - Aktuelle Forschungsschwerpunkte
- MSE Forschergruppe “Control of renewable energy systems (CRES)”
 - Team und Fakten
 - Forschungsansatz
 - Forschungsblickwinkel
 - Laboraufbauten
 - Bisherige Forschungsbeiträge

Munich School of Engineering (MSE)

Integrative Research Center: Gebündelte Expertise der TUM in "Energieforschung"



Gliederung

1 Vorstellung

- TUM Munich School of Engineering (MSE)
 - Integrative Research Center: Gebündelte Expertise in “Energieforschung”
 - Aktuelle Forschungsschwerpunkte
- MSE Forschergruppe “Control of renewable energy systems (CRES)”
 - Team und Fakten
 - Forschungsansatz
 - Forschungsblickwinkel
 - Laboraufbauten
 - Bisherige Forschungsbeiträge

Munich School of Engineering (MSE)

Aktuelle Forschungsschwerpunkte

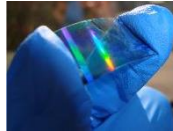
CPG Center for Power Generation

- flexible power plant technologies
- synthetic energy carriers
- technologies for energy storage
- energy studies and concepts
- solarthermal power plants



NRG Network for Renewable Energy

- carbon neutral energy generation
- novel energy materials
- conversion of raw materials to energy sources
- local energy storage



TUM.Energy



- interdisciplinary development of electric vehicles
- investigation of mobility behavior
- development of new mobility concept



Science Center for Electromobility

ENPB Center for Sustainable Building

- sustainable urban development
- sustainable buildings
- energy optimized building envelopes
- energy efficient building technology

Gliederung

1 Vorstellung

- TUM Munich School of Engineering (MSE)
 - Integrative Research Center: Gebündelte Expertise in “Energieforschung”
 - Aktuelle Forschungsschwerpunkte
- MSE Forschergruppe “Control of renewable energy systems (CRES)”
 - Team und Fakten
 - Forschungsansatz
 - Forschungsblickwinkel
 - Laboraufbauten
 - Bisherige Forschungsbeiträge

Gliederung

1 Vorstellung

- TUM Munich School of Engineering (MSE)
 - Integrative Research Center: Gebündelte Expertise in “Energieforschung”
 - Aktuelle Forschungsschwerpunkte
- MSE Forschergruppe “Control of renewable energy systems (CRES)”
 - Team und Fakten
 - Forschungsansatz
 - Forschungsblickwinkel
 - Laboraufbauten
 - Bisherige Forschungsbeiträge

Control of renewable energy systems (CRES)

Team und Fakten

■ Team



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



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



C. Hackl, Dr.-Ing.
(Head of CRES)



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



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



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

- seit Januar 2014
- Interdisziplinärer Ansatz
(Regelungstheorie & Erneuerbare Energiesysteme)
- Kontakt
 - Telephon: (+49) (0)89 289 16688
 - Email: christoph.hackl@tum.de
 - WWW: <http://www.cres.mse.tum.de>

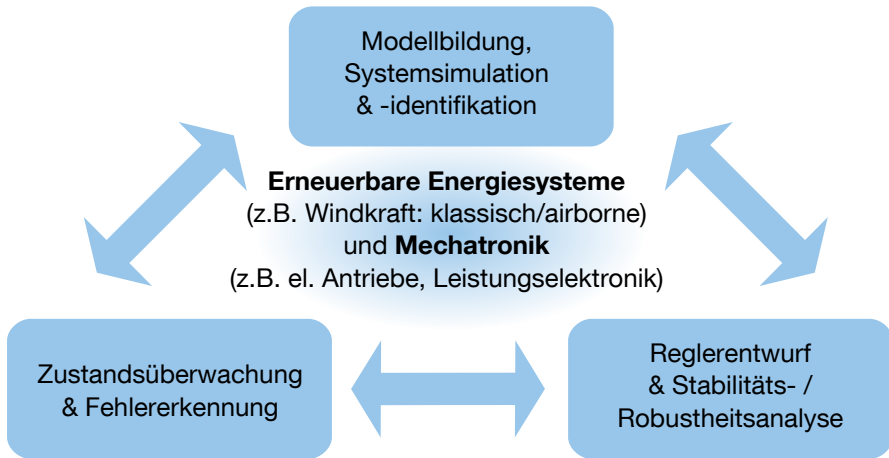
Gliederung

1 Vorstellung

- TUM Munich School of Engineering (MSE)
 - Integrative Research Center: Gebündelte Expertise in “Energieforschung”
 - Aktuelle Forschungsschwerpunkte
- MSE Forschergruppe “Control of renewable energy systems (CRES)”
 - Team und Fakten
 - Forschungsansatz
 - Forschungsblickwinkel
 - Laboraufbauten
 - Bisherige Forschungsbeiträge

Control of renewable energy systems (CRES)

Forschungsansatz



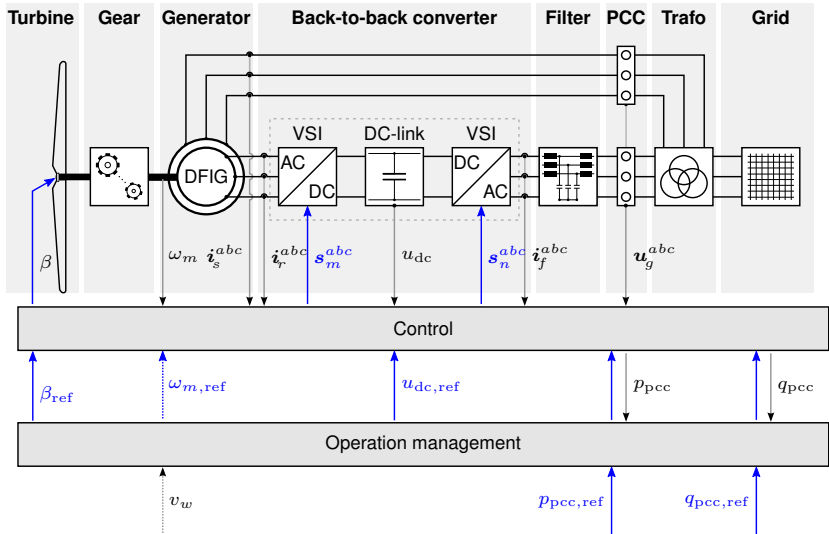
Gliederung

1 Vorstellung

- TUM Munich School of Engineering (MSE)
 - Integrative Research Center: Gebündelte Expertise in “Energieforschung”
 - Aktuelle Forschungsschwerpunkte
- MSE Forschergruppe “Control of renewable energy systems (CRES)”
 - Team und Fakten
 - Forschungsansatz
 - **Forschungsblickwinkel**
 - Laboraufbauten
 - Bisherige Forschungsbeiträge

Control of renewable energy systems (CRES)

Forschungsblickwinkel: Elektrische Sub-Systeme, z.B. WTS mit DFIG



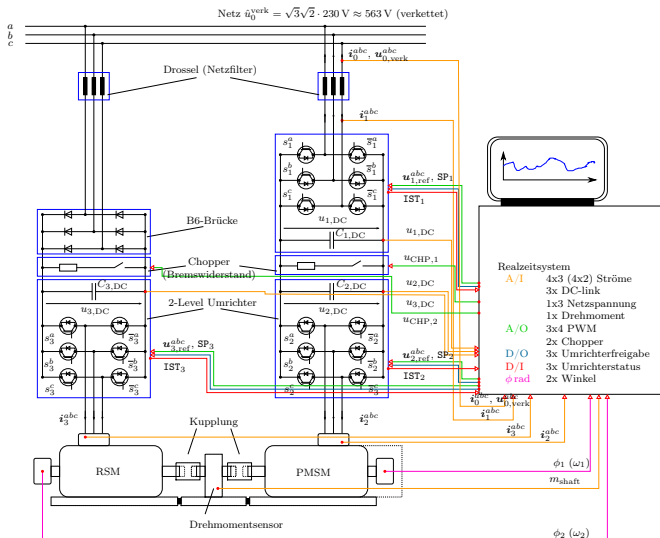
Gliederung

1 Vorstellung

- TUM Munich School of Engineering (MSE)
 - Integrative Research Center: Gebündelte Expertise in “Energieforschung”
 - Aktuelle Forschungsschwerpunkte
- MSE Forschergruppe “Control of renewable energy systems (CRES)”
 - Team und Fakten
 - Forschungsansatz
 - Forschungsblickwinkel
 - **Laboraufbauten**
 - Bisherige Forschungsbeiträge

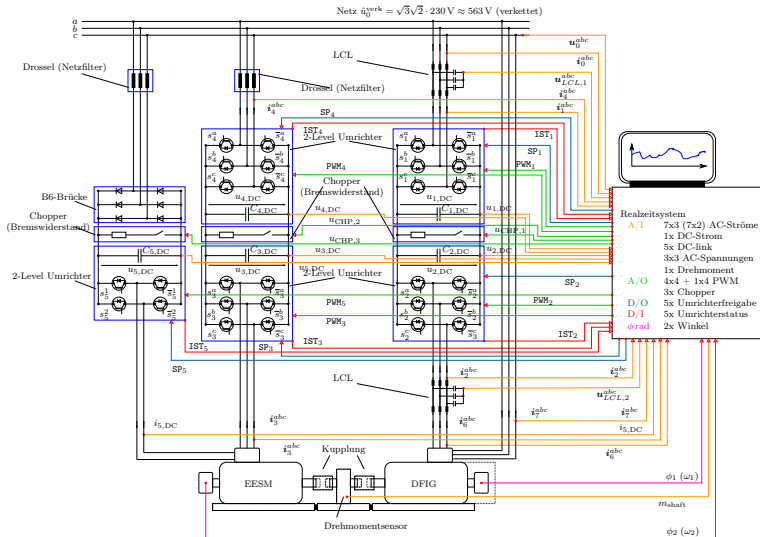
Control of renewable energy systems (CRES)

Laboraufbau 1: Reluktanz-Synchronmaschine und Permanent-Magnetsynchronmaschine



Control of renewable energy systems (CRES)

Laboraufbau 2: Elektrisch-erregte Synchronmaschine und doppelt-gepeiste Asynchronmaschine



Control of renewable energy systems (CRES)

Laboraufbau (aktueller Stand)

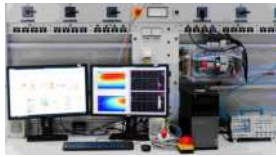
Reluktanz- und Permanentmagnet-Synchronmaschine



Realzeitsystem und Umrichter



Host PC und Sicherheitsbox



Doppelt-gespeiste ASM



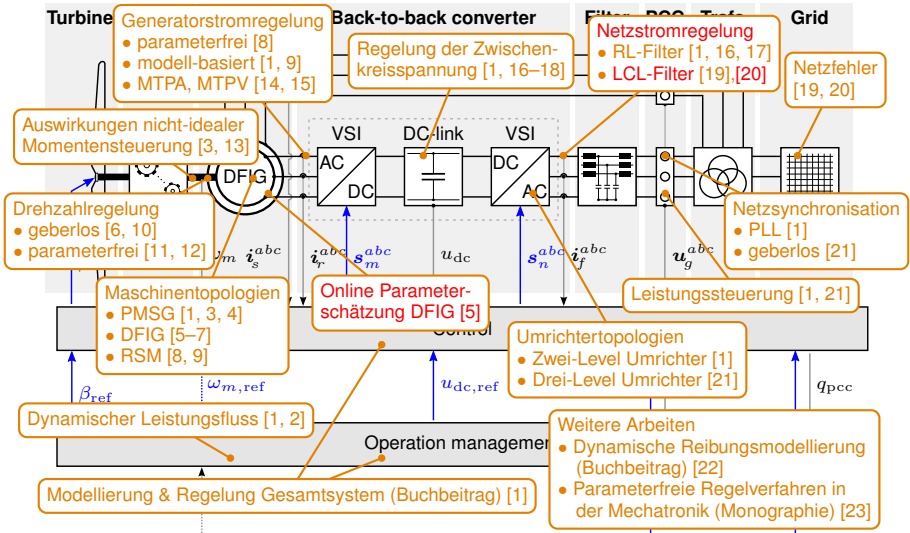
Gliederung

1 Vorstellung

- TUM Munich School of Engineering (MSE)
 - Integrative Research Center: Gebündelte Expertise in “Energieforschung”
 - Aktuelle Forschungsschwerpunkte
- MSE Forschergruppe “Control of renewable energy systems (CRES)”
 - Team und Fakten
 - Forschungsansatz
 - Forschungsblickwinkel
 - Laboraufbauten
 - Bisherige Forschungsbeiträge

Control of renewable energy systems (CRES)

Bisherige Forschungsbeiträge



Gliederung

2 Moderne Verfahren für regenerative Energiesysteme

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]
 - Modellierung der DFIG
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Gliederung

2 Moderne Verfahren für regenerative Energiesysteme

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]
 - Modellierung der DFIG
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

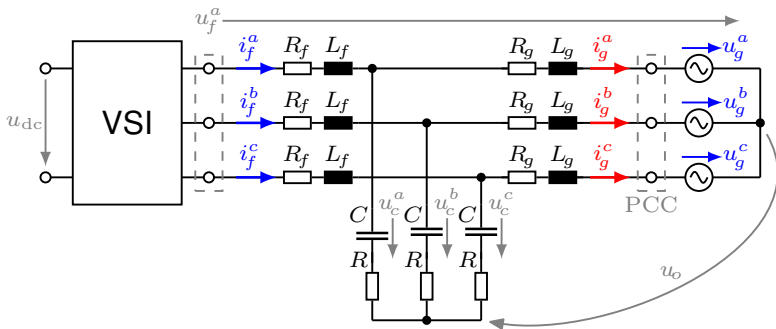
Gliederung

2 Moderne Verfahren für regenerative Energiesysteme

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]
 - Modellierung der DFIG
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]

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

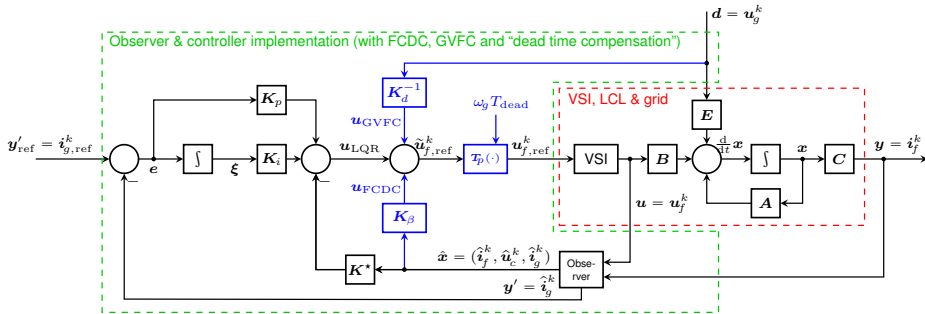
Gliederung

2 Moderne Verfahren für regenerative Energiesysteme

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]
 - Modellierung der DFIG
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]

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)

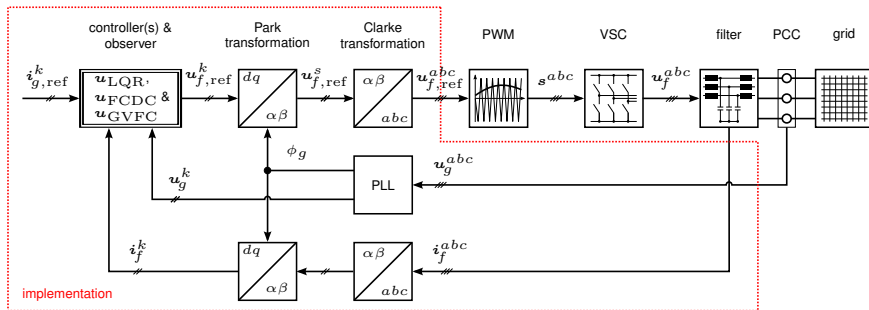
Gliederung

2 Moderne Verfahren für regenerative Energiesysteme

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - **Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung**
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]
 - Modellierung der DFIG
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]

Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung



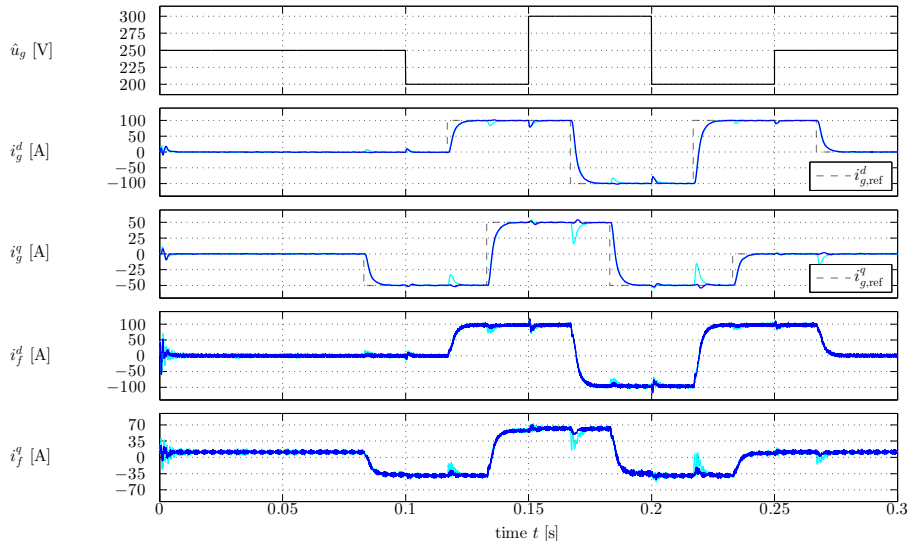
Gliederung

2 Moderne Verfahren für regenerative Energiesysteme

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
- Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]
 - Modellierung der DFIG
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

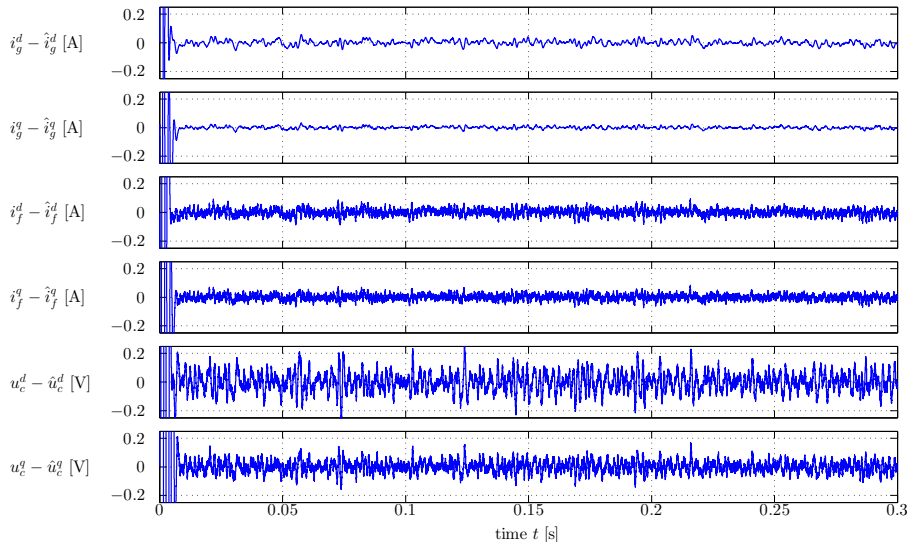
Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]

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



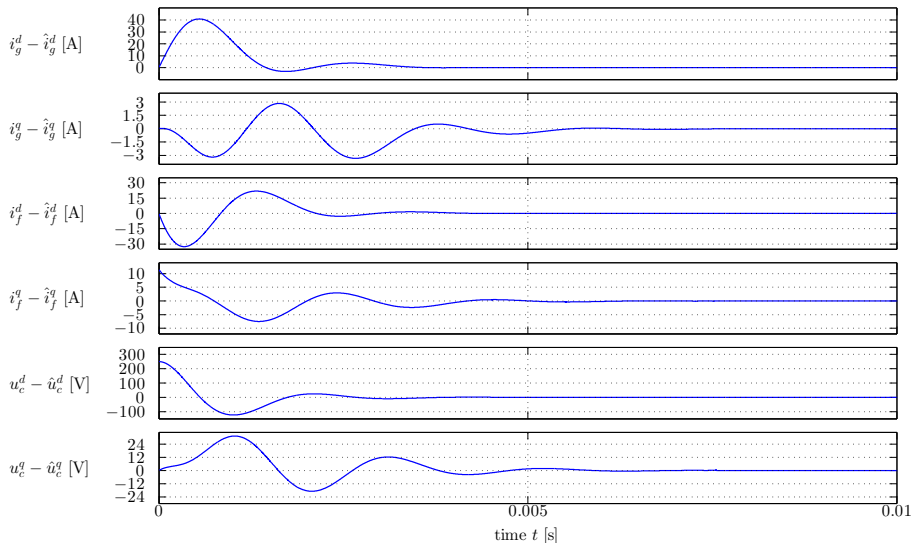
Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]

Simulationsergebnisse: Beobachterfehler für PI-SF mit — FCDC



Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]

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



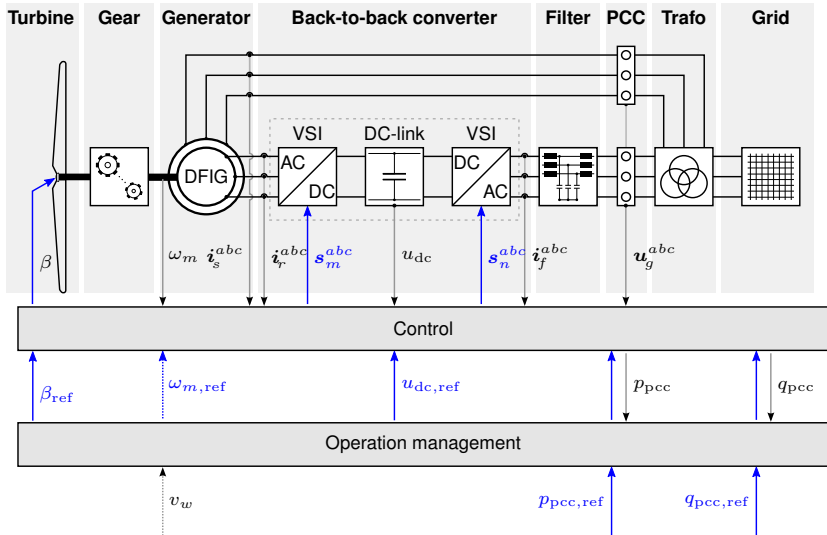
Gliederung

2 Moderne Verfahren für regenerative Energiesysteme

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]
 - Modellierung der DFIG
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Überblick und Modellierungstiefe

Windkraftanlage (WKA) mit doppelt-gepeistem Asynchrongenerator (DFIG)



Gliederung

2 Moderne Verfahren für regenerative Energiesysteme

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]
 - Modellierung der DFIG
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

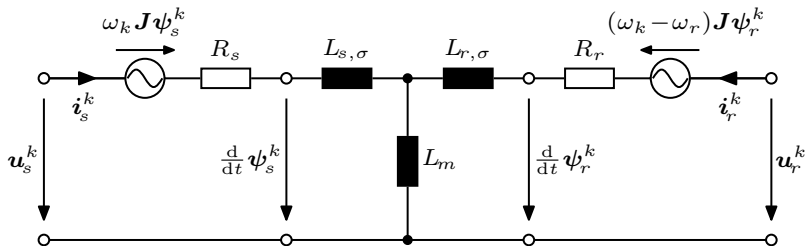
Generator

Generisches, dynamisches Modell (nach Clarke Transformation)

$$\left. \begin{array}{ll}
 \text{Stator:} & \mathbf{u}_s^s(t) = R_s \mathbf{i}_s^s(t) + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}_s^s(t), & \boldsymbol{\psi}_s^s(0) = \boldsymbol{\psi}_s^{s,0} \\
 \text{Rotor:} & \mathbf{u}_r^r(t) = R_r \mathbf{i}_r^r(t) + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}_r^r(t), & \boldsymbol{\psi}_r^r(0) = \boldsymbol{\psi}_r^{r,0} \\
 \\
 \text{Flussverk.:} & \boldsymbol{\psi}_s^s(t) = \boldsymbol{\psi}_s^s(\mathbf{i}_s^s(t), \mathbf{i}_r^s(t), \phi_m(t)) \\
 \text{(allgemein)} & \boldsymbol{\psi}_r^r(t) = \boldsymbol{\psi}_r^r(\mathbf{i}_r^r(t), \mathbf{i}_s^r(t), \phi_m(t)) \\
 \\
 \text{Mechanik:} & \frac{d}{dt} \omega_m(t) = \frac{1}{\Theta} \left(m_m(t) + \frac{m_t(t)}{g_r} - (\mathfrak{F} \omega_m)(t) \right), & \omega_m(0) = \omega_m^0 \\
 & \frac{d}{dt} \phi_m(t) = \omega_m(t), & \phi_m(0) = \phi_m^0 \\
 \\
 \text{Moment:} & m_m(t) = \frac{3}{2} p \boldsymbol{\psi}_s^s(t)^\top \mathbf{J} \mathbf{i}_s^s(t), & \mathbf{J} := \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\
 & & \text{(DFIG)}
 \end{array} \right\}$$

Generator

Äquivalentes elektrisches Netzwerk (lineare Flussverkettung)



$$\left. \begin{array}{l} \text{Stator: } u_s^s(t) = R_s i_s^s(t) + \frac{d}{dt} \psi_s^s(t), \quad \psi_s^s(0) = \psi_s^{s,0} \\ \text{Rotor: } u_r^r(t) = R_r i_r^r(t) + \frac{d}{dt} \psi_r^r(t), \quad \psi_r^r(0) = \psi_r^{r,0} \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Flussverk.: } \psi_s^s(t) = L_s i_s^s(t) + L_m i_r^r(t), \quad L_s = L_{s,\sigma} + L_m \\ \text{(linear) } \psi_r^r(t) = L_r i_r^r(t) + L_m i_s^s(t), \quad L_r = L_{r,\sigma} + L_m \end{array} \right\} \quad (1)$$

Gliederung

2 Moderne Verfahren für regenerative Energiesysteme

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]
 - Modellierung der DFIG
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]

Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG

Nichtlineares Modell der DFIG mit

- Elektrischen Parametern als zusätzliche Zustände
- Modell- w und Messungenauigkeit v

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) + \mathbf{w}(t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^{10} \quad (2)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{v}(t), \quad (3)$$

wobei

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x} &= \left((\boldsymbol{\psi}_s^k)^\top, (\boldsymbol{\psi}_r^k)^\top, \omega_m, R_s, R_r, L_{s,\sigma}, L_{r,\sigma}, L_m \right)^\top \in \mathbb{R}^{10}, \\ \mathbf{y} &= \left((\mathbf{i}_s^k)^\top, (\mathbf{i}_r^k)^\top, \omega_m \right)^\top \in \mathbb{R}^5, \\ \mathbf{u} &= \left((\mathbf{u}_s^k)^\top, (\mathbf{u}_r^k)^\top \right)^\top \in \mathbb{R}^4. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

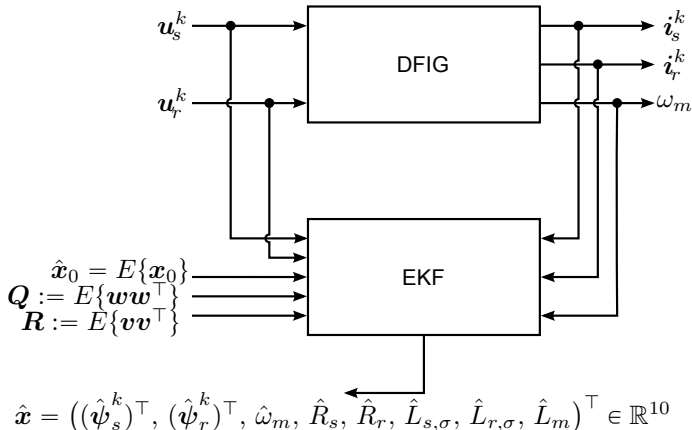
Gliederung

2 Moderne Verfahren für regenerative Energiesysteme

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]
 - Modellierung der DFIG
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]

Implementierung: Signalflossplan mit DFIG und Extended Kalman Filter (EKF)



Gliederung

2 Moderne Verfahren für regenerative Energiesysteme

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]
 - Modellierung der DFIG
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]

Algorithmus: Extended Kalman Filter (EKF)

Step I: Initialization for $k = 0$:

$$\hat{\mathbf{x}}[0] = E\{\mathbf{x}_0\}, \mathbf{P}_0 := \mathbf{P}[0] = E\{(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}[0])(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}[0])^\top\},$$

$$\mathbf{K}_0 := \mathbf{K}[0] = \mathbf{P}[0]\mathbf{C}[0]^\top (\mathbf{C}[0]\mathbf{P}[0]\mathbf{C}[0]^\top + \mathbf{R})^{-1}$$

where, for $k \geq 0$, $\mathbf{C}[k] := \left. \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}^-[k]}$

Step II: Time update ("a priori prediction") for $k \geq 1$:

(a) State prediction

$$\hat{\mathbf{x}}^-[k] = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}[k-1], \mathbf{u}[k-1])$$

(b) Error covariance matrix prediction

$$\mathbf{P}^-[k] = \mathbf{A}[k]\mathbf{P}[k-1]\mathbf{A}[k]^\top + \mathbf{Q}$$

where $\mathbf{A}[k] := \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}^-[k]}$

Step III: Verification of (local) observability $k \geq 1$:

$$n_o[k] := \text{rank}(\mathbf{S}_o[k]) \text{ with } \mathbf{S}_o[k]$$

Step IV: Computation of Kalman gain for $k \geq 1$

$$\mathbf{K}[k] = \mathbf{P}^-[k]\mathbf{C}[k]^\top (\mathbf{C}[k]\mathbf{P}^-[k]\mathbf{C}[k]^\top + \mathbf{R})^{-1}$$

Step V: Measurement update ("correction") for $k \geq 1$:

(a) Estimation update with measurement

$$\hat{\mathbf{x}}[k] = \hat{\mathbf{x}}^-[k] + \mathbf{K}[k](\mathbf{y}[k] - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^-[k]))$$

(b) Error covariance matrix update

$$\mathbf{P}[k] = \mathbf{P}^-[k] - \mathbf{K}[k]\mathbf{C}[k]\mathbf{P}^-[k]$$

Step V: Go back to Step II (use $\mathbf{C}[k]$).

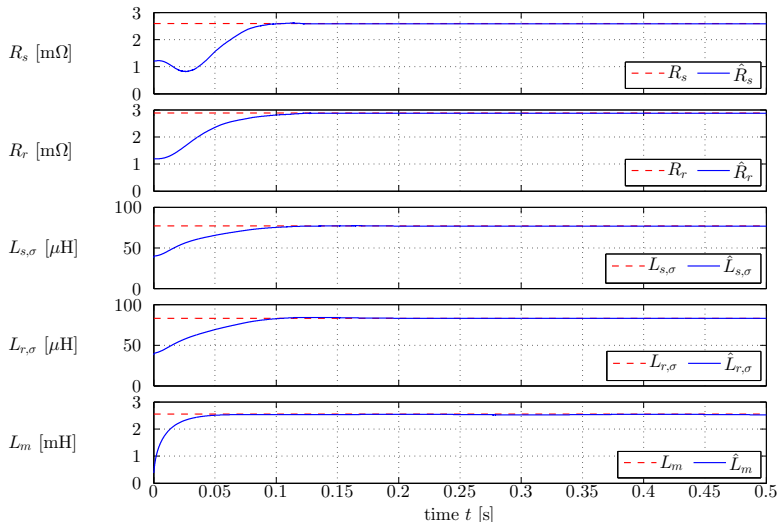
Gliederung

2 Moderne Verfahren für regenerative Energiesysteme

- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [20]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]
 - Modellierung der DFIG
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

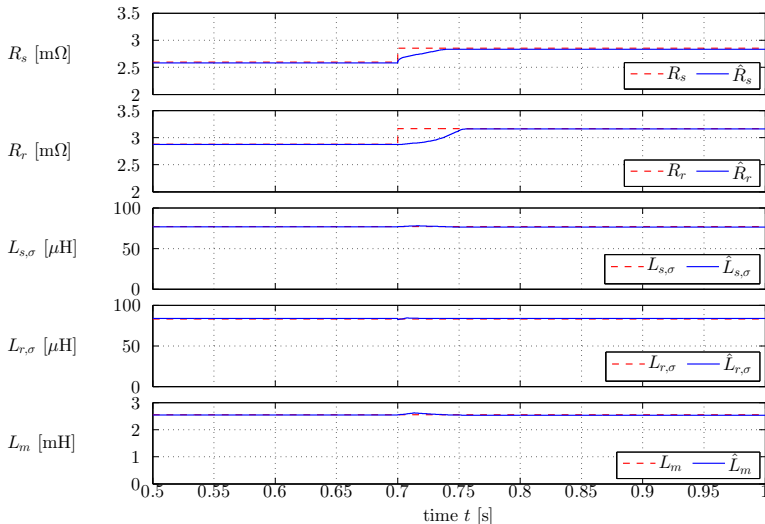
Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]

Simulationsergebnisse: Parameterschätzung der Nominalwerte



Online-Schätzung der DFIG-Parameter [5]

Simulationsergebnisse: Parameterschätzung bei Änderung der Widerstandswerte um +10%



Gliederung

3 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick

Zukünftige Herausforderungen (siehe auch [24])

- Weitere Senkung der Stromgestehungskosten
 ⇒ Wirtschaftliche Machbarkeit der Energiewende? (!)
- Erhöhung der Zuverlässigkeit / Effizienz
 (v.a. Regelung und Leistungselektronik fehleranfällig)
 - Robustheit & Systemanalyse ^{CRES}
 - Zustandsüberwachung / Fehlererkennung ^{CRES}
 - Dynamischer Leistungsfluss / Nichtideale Momentenregelung ^{CRES}
- Flexibilisierung / Robustifizierung 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)
- Neue Technologien
 - Neue Generatortopologien ^{CRES}
 - Neue Umrichtertopologien (Mehrlevel) ^{CRES}
 - Neue Getriebetopologien ("single-stage")
 - Konfigurationen ohne/kleinere Transformatoren ^(CRES)
 - Neue leistungselektronische Bauteile

Zusammenfassung und Ausblick

Offene Fragen

- Reale Anforderungen an ... ?
 - Regelkreisdynamik
 - Effizienz
 - Robustheit (Parameteränderungen/-unsicherheiten)
 - Anlagenwartung
- Reale Probleme? Wo könnte CRES unterstützen?
 - Laboraufbau mit allen vier Generatortopologien
 - "nicht-ideale" Momentenregelung (kein Momentensensor)
 - Elastischer Antriebsstrang (Schwingungen)
 - Schaltfrequenzen / "Optimale Pulsmuster"
 - Neue Topologien / Multi-Level Umrichter
 - Modellierung / Parameteridentifikation
- Allgemein?
 - Interesse an Zustandsüberwachung / Fehlererkennung
 - Interesse an Reluktanz-Synchronmaschine (in der Windindustrie)
 - Ausgestaltung einer möglichen Kooperation

Literaturliste I

- [1] 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, pages 1540–1613. Springer-Verlag, 2015.
- [2] Christian Dirscherl and Christoph M. Hackl. Dynamic power flow in wind turbine systems with doubly-fed induction generator. *IEEE Transactions on energy conversion (in preparation)*, 2015.
- [3] Christoph M. Hackl and Korbinian Schechner. Non-ideal torque control of wind turbine systems: Impacts on annual energy production. In *Proceedings of the IEEE International Energy Conference (submitted)*, 2016.
- [4] 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.
- [5] 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*, pages 236–243, 2015.
- [6] 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*, pages 423–430, 2015.
- [7] Christian Dirscherl and Christoph M. Hackl. Dynamic power flow in wind turbine systems with doubly-fed induction generator. In *submitted to 2016 IEEE International Energy Conference*, 2016.
- [8] Christoph M. Hackl. Current PI-funnel control with anti-windup for synchronous machines. In *Proceedings of the 54th IEEE Conference on Decision and Control*, page (to be published), 2015.

Literaturliste II

- [9] Christoph M. Hackl, Maarten J. Kamper, Julian Kullick, and Joshua Mitchell. Nonlinear PI current control of reluctance synchronous machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics (submitted)*, 2015.
- [10] 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.
- [11] Christoph M. Hackl. Funnel control for wind turbine systems. In *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Control Applications*, pages 1377–1382, 2014.
- [12] Christoph 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*, page (to be published), 2015.
- [13] Christoph M. Hackl and Korbinian 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.
- [14] 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.
- [15] Lorenz Horlbeck, Markus Lienkamp, and Christoph Hackl. Analytical solution for the MTPV hyperbola including the stator resistance. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (submitted)*, 2016.
- [16] 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.

Literaturliste III

- [17] 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 *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Control Applications*, page (to be published), 2015.
- [18] Florian Bauer, Christoph M. Hackl, and Korbinian Schechner. DC-link control for airborne wind energy systems during pumping mode. In *Proceedings of the Airborne Wind Energy Conference 2015*, 2015.
- [19] 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 *Proceedings of the 3rd Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE 2015)*, page (to be published), 2015.
- [20] 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 *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Control Applications*, page (to be published), 2015.
- [21] Zhenbin Zhang, Hue Xu, M. Xue, Z. Chen, T. Sun, Ralph Kennel, and Christoph Hackl. Predictive control with novel virtual flux estimation for back-to-back power converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(5):2823–2834, 2015.
- [22] 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, pages 1615–1657. Springer-Verlag, 2015.
- [23] Christoph M. Hackl. *Non-identifier based adaptive control in mechatronics: Theory and Application*. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer-Verlag, Berlin, 2015 (accepted; final version in preparation).
- [24] Frede Blaabjerg and Ke Ma. Future on power electronics for wind turbine systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1(3), 2013.