

Modellierung und Regelung von Windkraftanlagen (WKA) mit doppelt-gespeistem Asynchrongenerator (DFIG)

Christian Dirscherl, Christoph Hackl und Korbinian Schechner

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

22.06.2015

Nordex Energy GmbH, Engineering / Electrical & Software Engineering, Hamburg

Gliederung

- 1 Vorstellung der CRES Forschergruppe
- 2 Modellierung von WKA mit DFIG
- 3 Regelung von WKA mit DFIG
- 4 Offene Fragen und weiteres Vorgehen

Gliederung

1 Vorstellung der CRES Forschergruppe

- Team
- Forschungsschwerpunkte
- Interdisziplinarität
- Bisherige Arbeiten
- Laboraufbau

Gliederung

1 Vorstellung der CRES Forschergruppe

- Team
- Forschungsschwerpunkte
- Interdisziplinarität
- Bisherige Arbeiten
- Laboraufbau

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

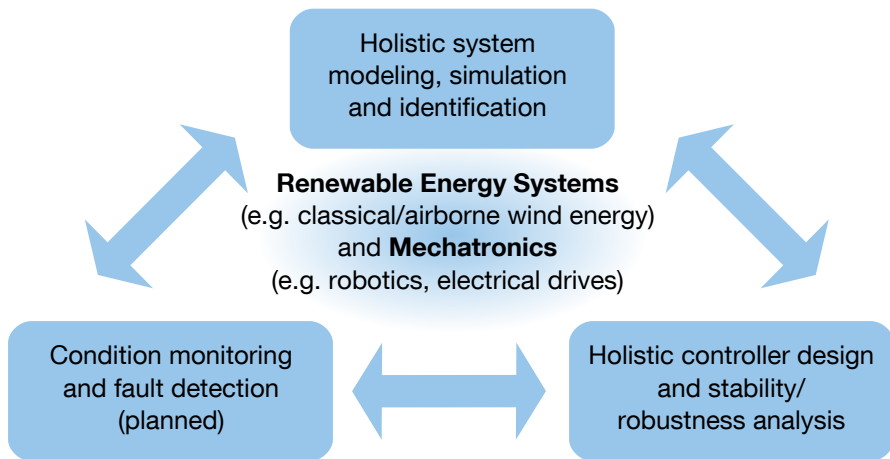
- Telefon: (+49) (0)89 289 16688
- email: christoph.hackl@tum.de
- WWW: <http://www.cres.mse.tum.de>
- Zwei weitere Doktoranden ab Juli bzw. September 2015:
 - H2020 ITN-Projekt “Airborne Wind Energy”
 - DFG-Projekt “Computationally-efficient direct model predictive control of 3L-NPC back-to-back converters for WTS with PMSGs”
- Ungekennzeichnete Inhalte sind aus [1] (Buchbeitrag)

Gliederung

1 Vorstellung der CRES Forschergruppe

- Team
- **Forschungsschwerpunkte**
- Interdisziplinarität
- Bisherige Arbeiten
- Laboraufbau

CRES Forschungsschwerpunkte

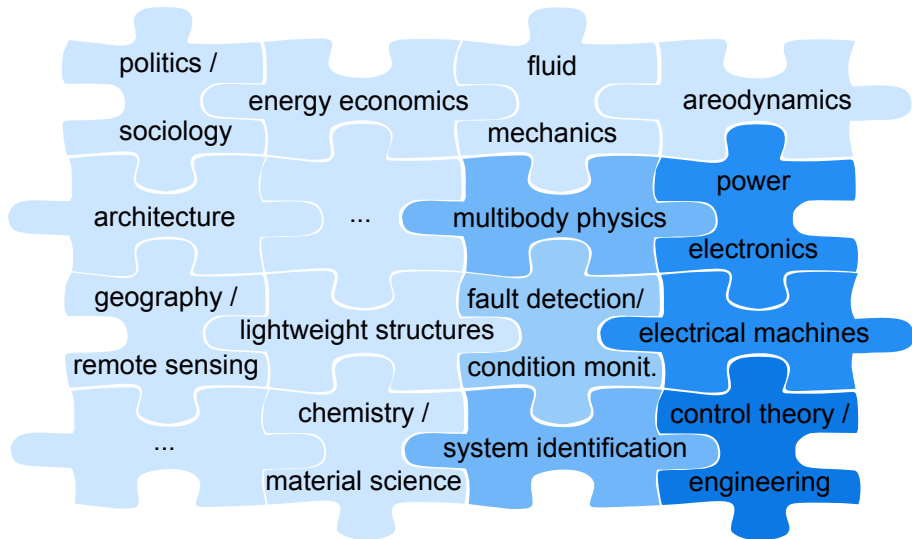


Gliederung

1 Vorstellung der CRES Forschergruppe

- Team
- Forschungsschwerpunkte
- **Interdisziplinarität**
- Bisherige Arbeiten
- Laboraufbau

(Energie-)Forschung = Interdisziplinarität



Gliederung

1 Vorstellung der CRES Forschergruppe

- Team
- Forschungsschwerpunkte
- Interdisziplinarität
- Bisherige Arbeiten
- Laboraufbau

CRES Forschungsbeiträge

Regenerative Energiesysteme

- Buchbeitrag über Modellierung und Regelung von modernen Windkraftanlagen: [1]
- Modellprädiktive Regelung von PMSG und Netzseite: [2–4], [5, 6]¹
- Geberlose Regelung von PMSG und DFIG: [2, 7]
- Parameterschätzung von DFIG (Extended Kalman Filter): [8]
- Modell-basierte Stromregelung bei Netzanbindung über LCL-Filter: [9]
- Sensorlose Netzsynchrosation (Virtual Flux): [10]
- Zwischenkreisspannungsregelung: [4, 11], [12]
- Modell-freie Generatorgeschwindigkeitsregelung: starr [13], elastisch [14]
- Modell-basierte *und* modell-freie Stromregelung von RSM: [15, 16]
- Nicht-ideale Momentenregelung in Windkraftanlagen: Gründe und Auswirkungen [17]
- Dynamischer Leistungsfluss in WTS mit DFIG [18]

Mechatronik:

- Buchbeitrag über dynamische Reibungsmodellierung: [19]
- Modell-freie Positions- und Geschwindigkeitsregelung von Antrieben/Robotern: [20–27]
- Monographie über modell-freie (adaptive) Regelverfahren in der Mechatronik [28]

¹submitted/under review/in preparation

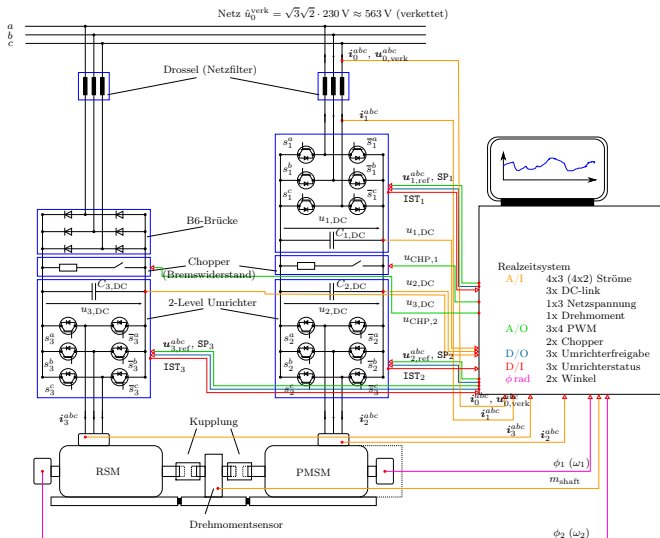
Gliederung

1 Vorstellung der CRES Forschergruppe

- Team
- Forschungsschwerpunkte
- Interdisziplinarität
- Bisherige Arbeiten
- **Labora Aufbau**

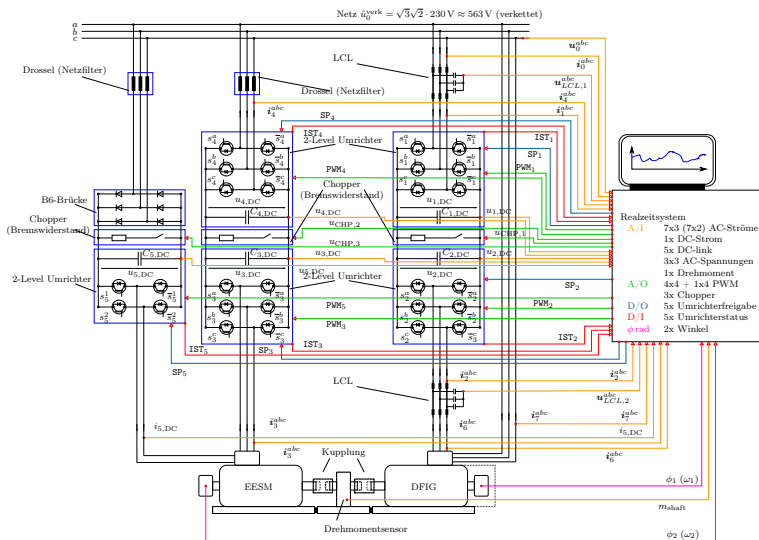
Laboraufbau

Aufbau 1: Reluktanz-Synchronmaschine und Permanentmagnet-Synchronmaschine



Laboraufbau

Aufbau 2: Fremd-erregte Synchronmaschine und doppelt-gepumte Asynchronmaschine



Gliederung

2 Modellierung von WKA mit DFIG

- Überblick und Modellierungstiefe
- Generator
- Umrichter
- Dynamischer Leistungsfluss [18]

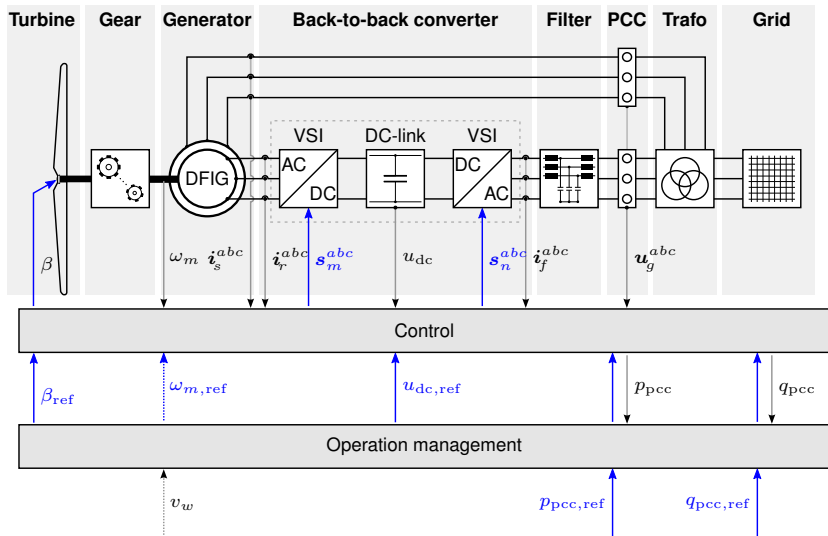
Gliederung

2 Modellierung von WKA mit DFIG

- Überblick und Modellierungstiefe
- Generator
- Umrichter
- Dynamischer Leistungsfluss [18]

Überblick und Modellierungstiefe

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



Gliederung

2 Modellierung von WKA mit DFIG

- Überblick und Modellierungstiefe
- **Generator**
- Umrichter
- Dynamischer Leistungsfluss [18]

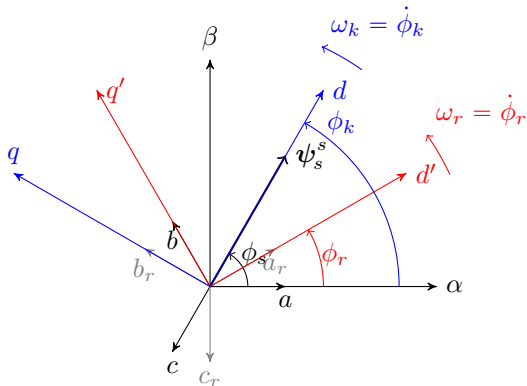
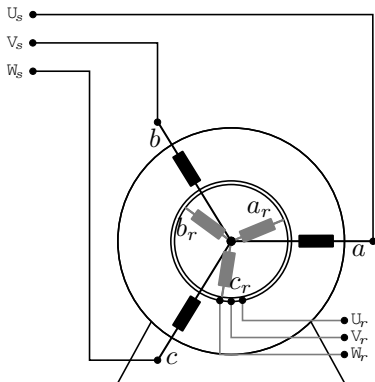
Generator

Doppelt-gespeiste Asynchronmaschine



Generator

Zeigertheorie und Feldorientierung (z.B. Statorflussorientierung)



$s = (\alpha, \beta)$ Koordinatensystem

$r = (d', q')$ Koordinatensystem

$k = (d, q)$ Koordinatensystem

Generator

Generisches, dynamisches Modell (nach Clarke Transformation)

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Stator:} & \mathbf{u}_s^s(t) = R_s \mathbf{i}_s^s(t) + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}_s^s(t), \\ \text{Rotor:} & \mathbf{u}_r^r(t) = R_r \mathbf{i}_r^r(t) + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}_r^r(t), \end{array} \right\} \begin{array}{l} \boldsymbol{\psi}_s^s(0) = \boldsymbol{\psi}_s^{s,0} \\ \boldsymbol{\psi}_r^r(0) = \boldsymbol{\psi}_r^{r,0} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Flussverk.:} & \boldsymbol{\psi}_s^s(t) = \boldsymbol{\psi}_s^s(\mathbf{i}_s^s(t), \mathbf{i}_r^r(t), \phi_m(t)) \\ \text{(allgemein)} & \boldsymbol{\psi}_r^r(t) = \boldsymbol{\psi}_r^r(\mathbf{i}_r^r(t), \mathbf{i}_s^s(t), \phi_m(t)) \end{array} \right\}$$

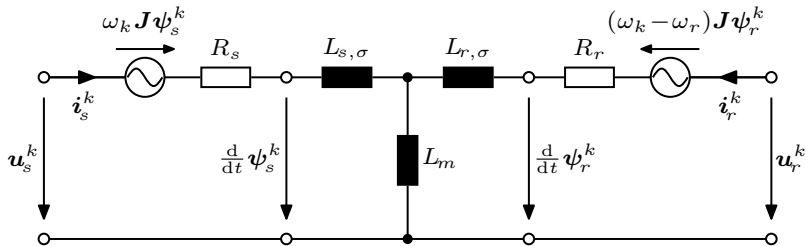
$$\left. \begin{array}{ll} \text{Mechanik:} & \frac{d}{dt} \omega_m(t) = \frac{1}{\Theta} \left(m_m(t) + \frac{m_t(t)}{g_r} - (\mathfrak{F} \omega_m)(t) \right), \quad \omega_m(0) = \omega_m^0 \\ & \frac{d}{dt} \phi_m(t) = \omega_m(t), \quad \phi_m(0) = \phi_m^0 \end{array} \right\}$$

$$\text{Moment:} \quad m_m(t) = \frac{3}{2} p \boldsymbol{\psi}_s^s(t)^\top \mathbf{J} \mathbf{i}_s^s(t)$$

(DFIG)

Generator

Äquivalentes elektrisches Netzwerk (lineare Flussverkettung)



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

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

(1)

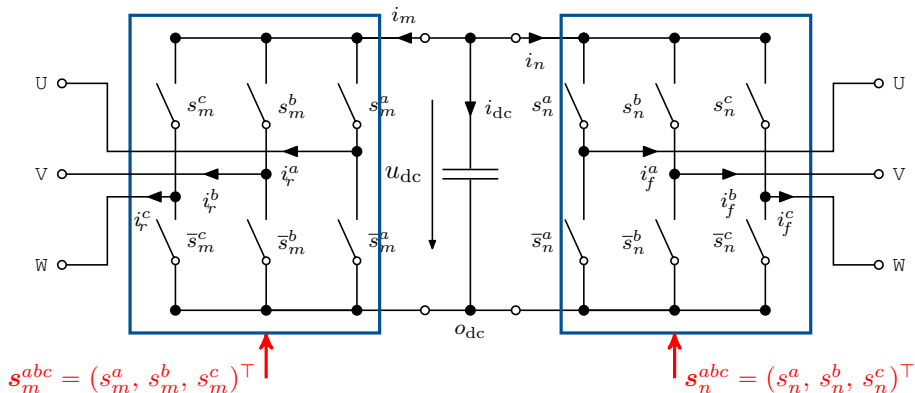
Gliederung

2 Modellierung von WKA mit DFIG

- Überblick und Modellierungstiefe
- Generator
- **Umrichter**
- Dynamischer Leistungsfluss [18]

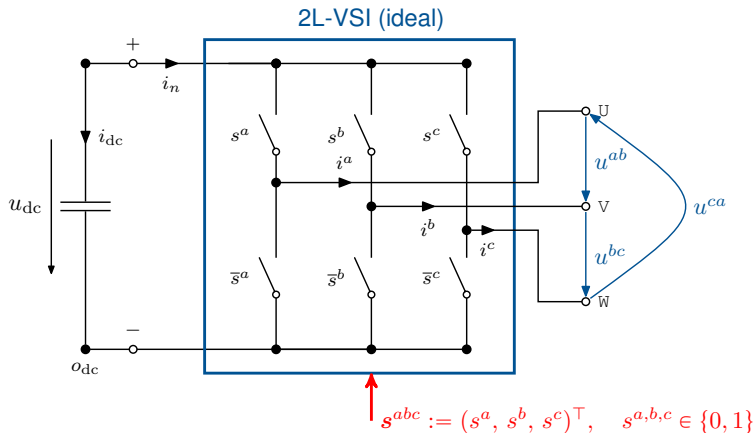
Back-to-Back Umrichter

Elektrisches Netzwerk



2-Level Umrichter

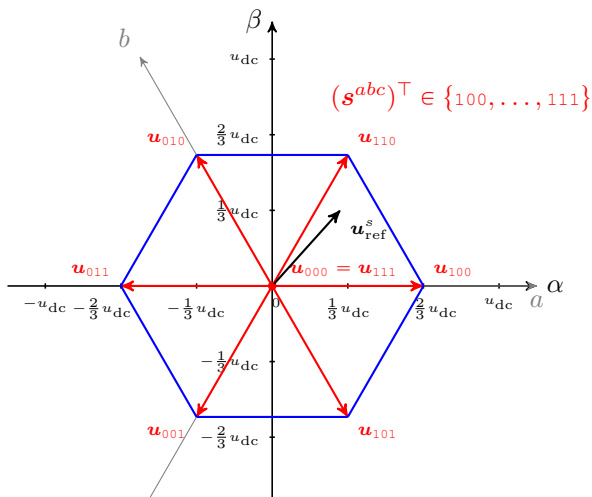
Elektrisches Netzwerk und Modellierung



$$\Rightarrow \text{Ausgangsspannungen } \mathbf{u}_{\text{Itl}}^{abc} = (u^{ab}, u^{bc}, u^{ca})^\top = \mathbf{f}(\mathbf{s}^{abc}, u_{\text{dc}})$$

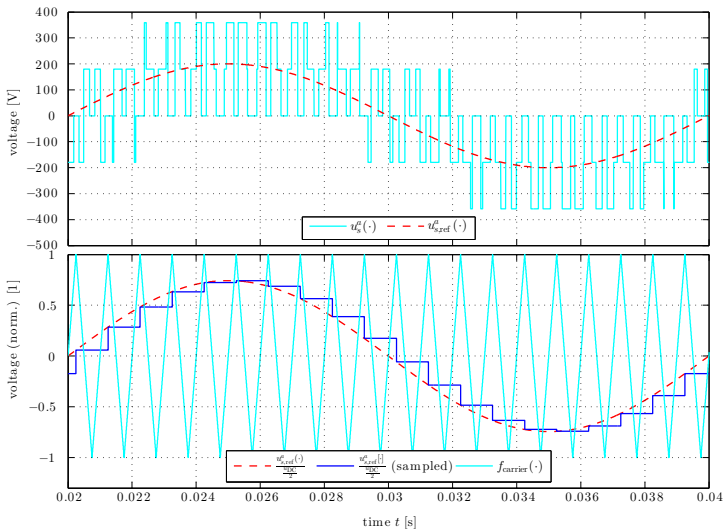
Umrichter

Spannungshexagon



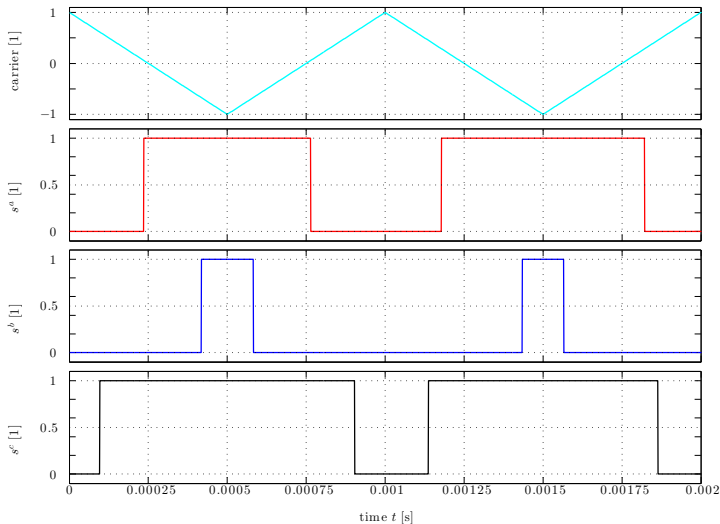
Umrichter

Pulsweitenmodulation (PWM): Symmetrische PWM



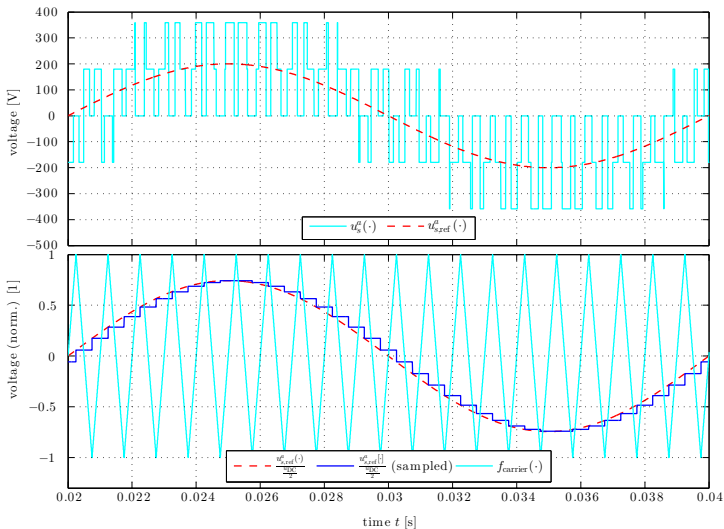
Umrichter

Pulsweitenmodulation (PWM): Symmetrische PWM



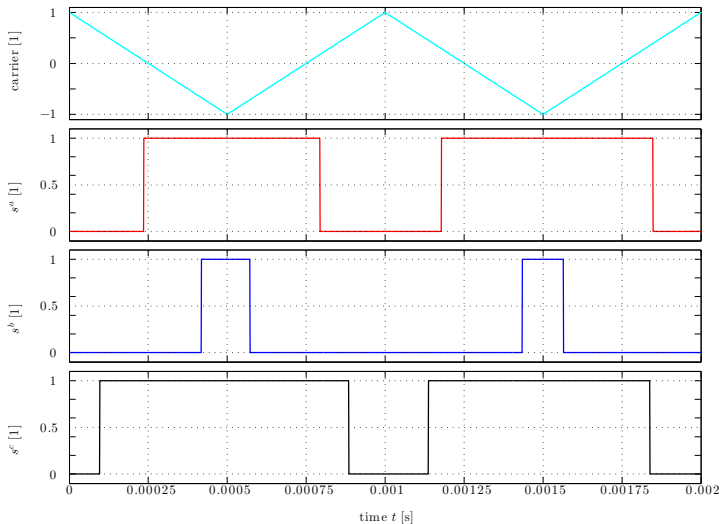
Umrichter

Pulsweitenmodulation (PWM): Asymmetrische PWM



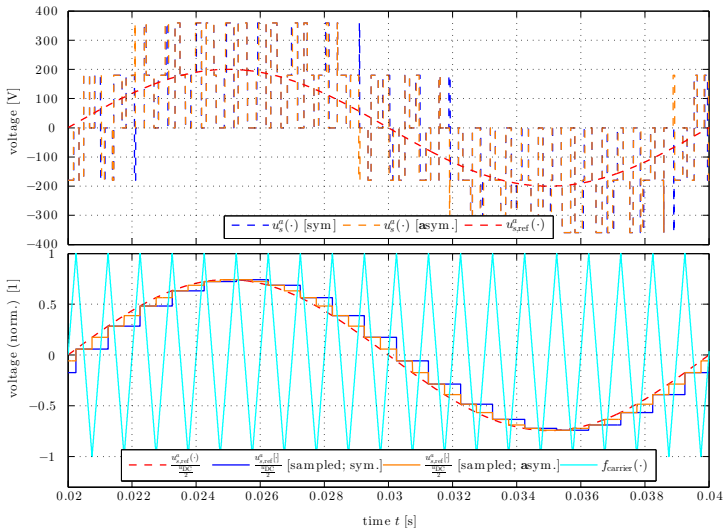
Umrichter

Pulsweitenmodulation (PWM): Asymmetrische PWM



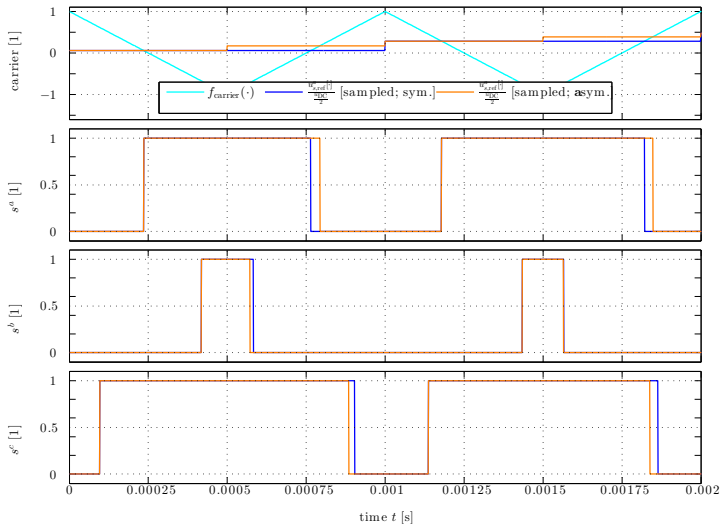
Umrichter

Vergleich symmetrische & asymmetrische PWM



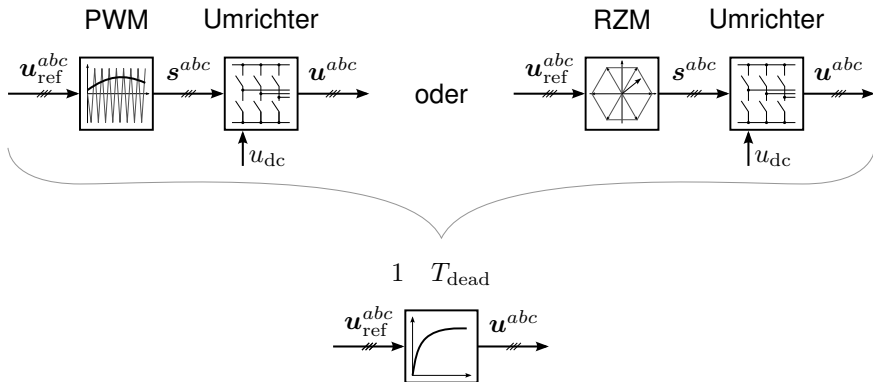
Umrichter

Vergleich symmetrische & asymmetrische PWM



Umrichter

Dynamisches Verhalten



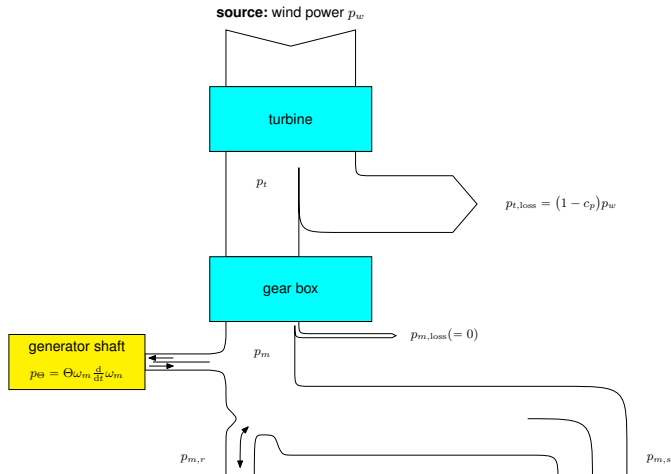
Gliederung

2 Modellierung von WKA mit DFIG

- Überblick und Modellierungstiefe
- Generator
- Umrichter
- Dynamischer Leistungsfluss [18]

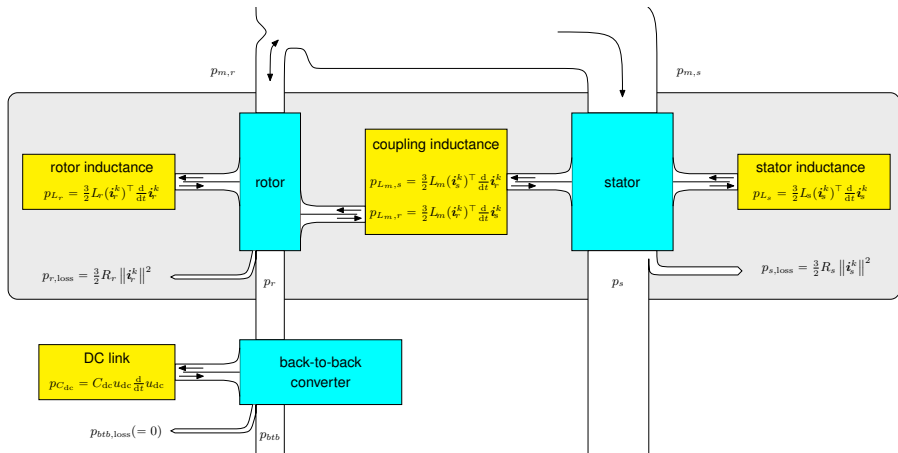
Dynamischer Leistungsfluss [18]

Teil 1



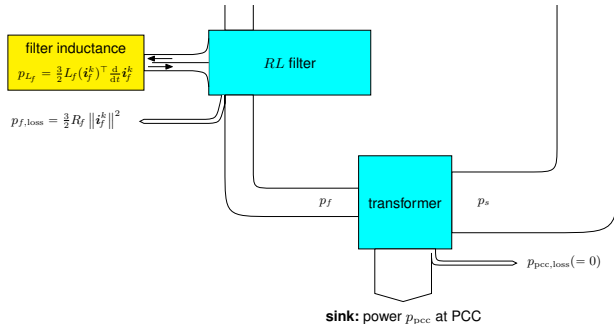
Dynamischer Leistungsfluss [18]

Teil 2



Dynamischer Leistungsfluss [18]

Teil 3



Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

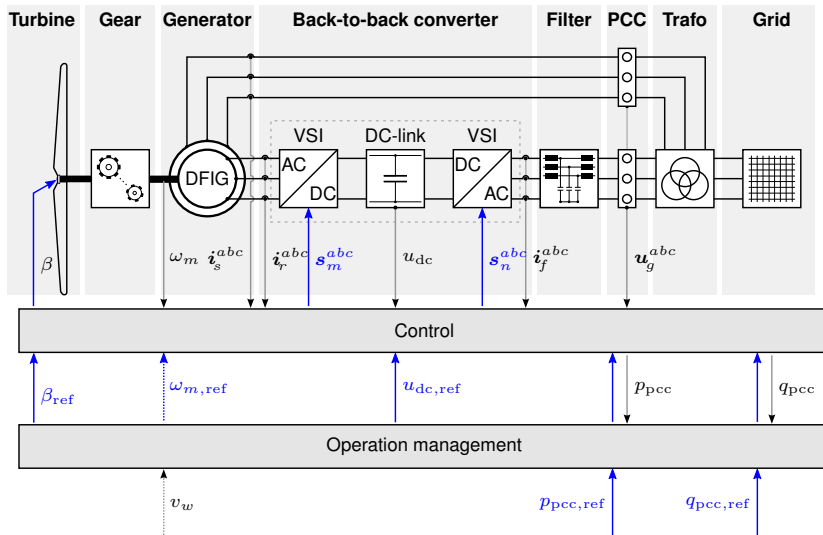
Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

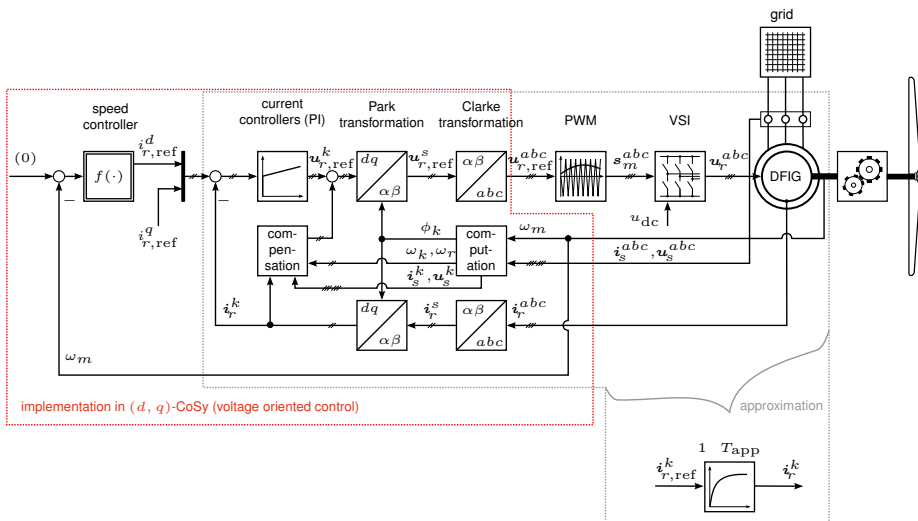
Überblick über die Regelkreisstrukturen

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



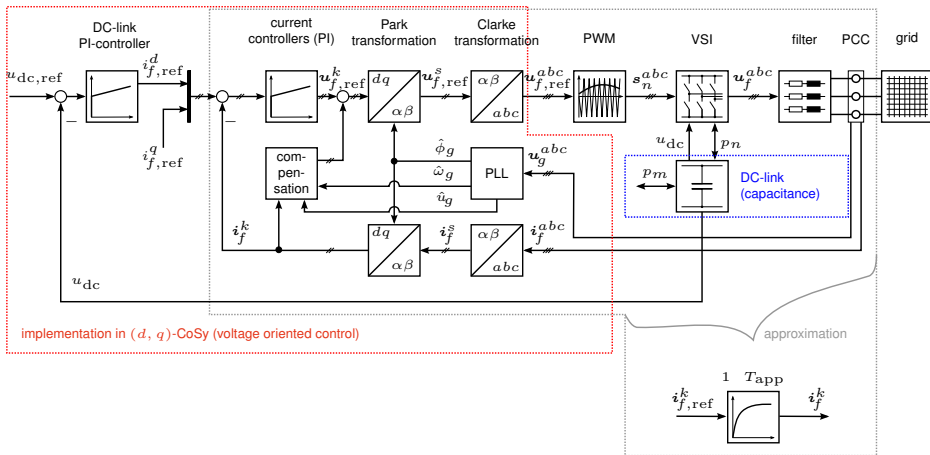
Überblick über die Regelkreisstrukturen

Rotorseitige Regelkreisstruktur



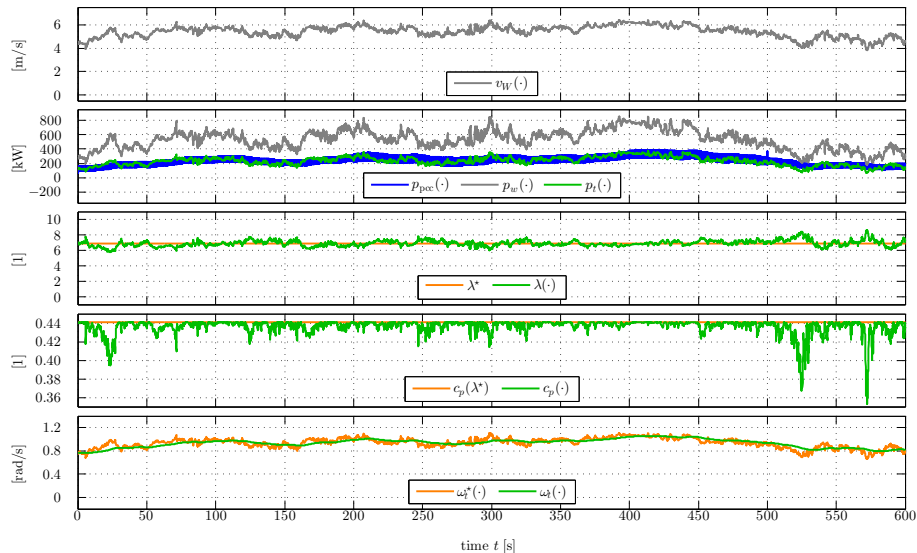
Überblick über die Regelkreisstrukturen

Netzseitige Regelkreisstruktur



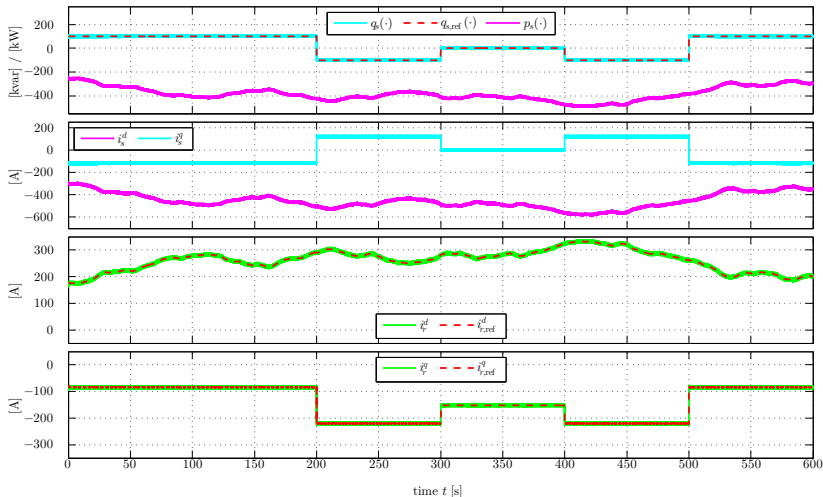
Überblick über die Regelkreisstrukturen

Simulationsergebnisse



Überblick über die Regelkreisstrukturen

Simulationsergebnisse



Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

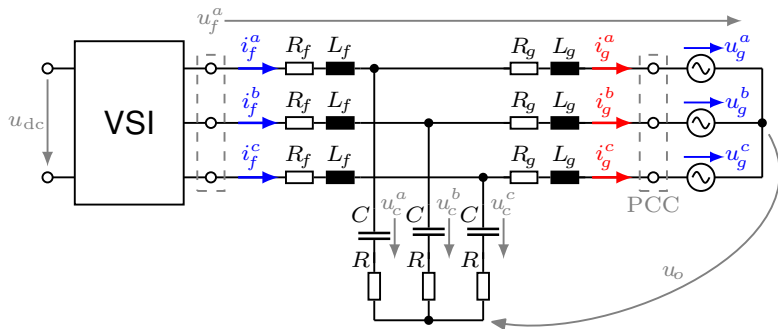
Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]

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

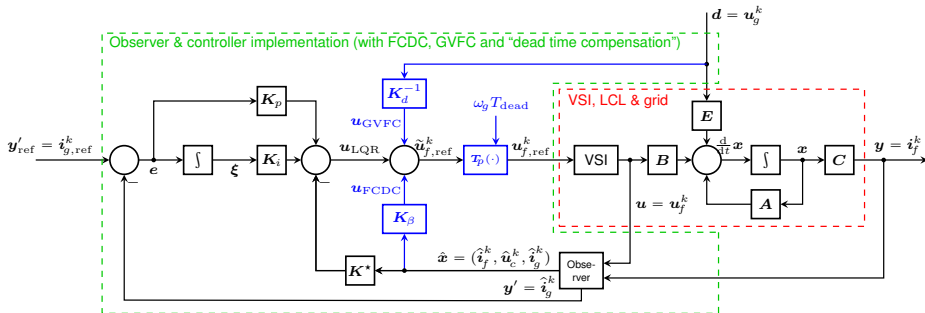
Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]

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)

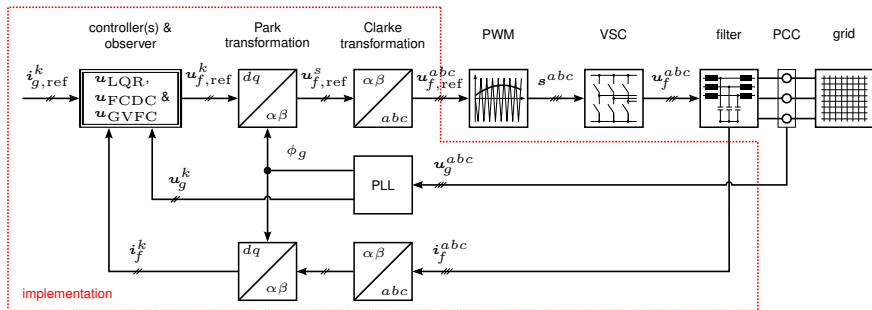
Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]

Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung



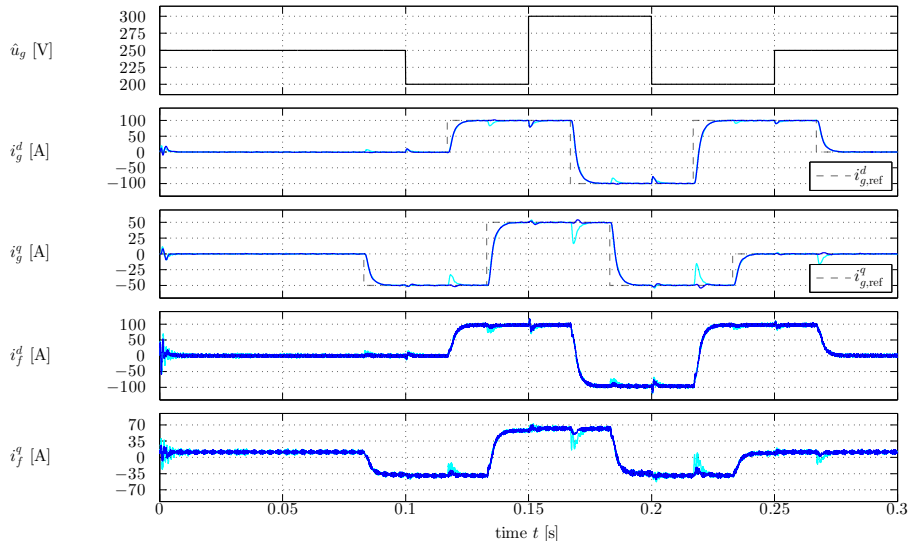
Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

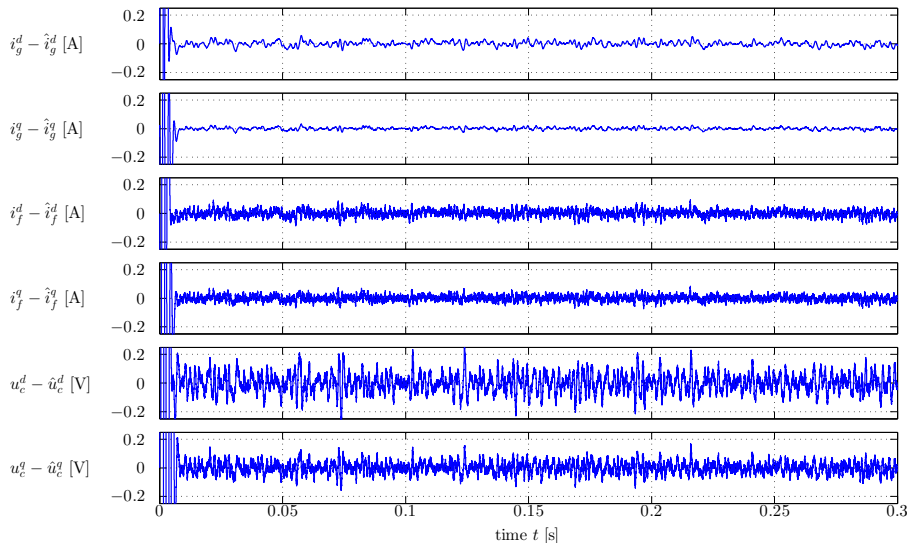
Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]

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



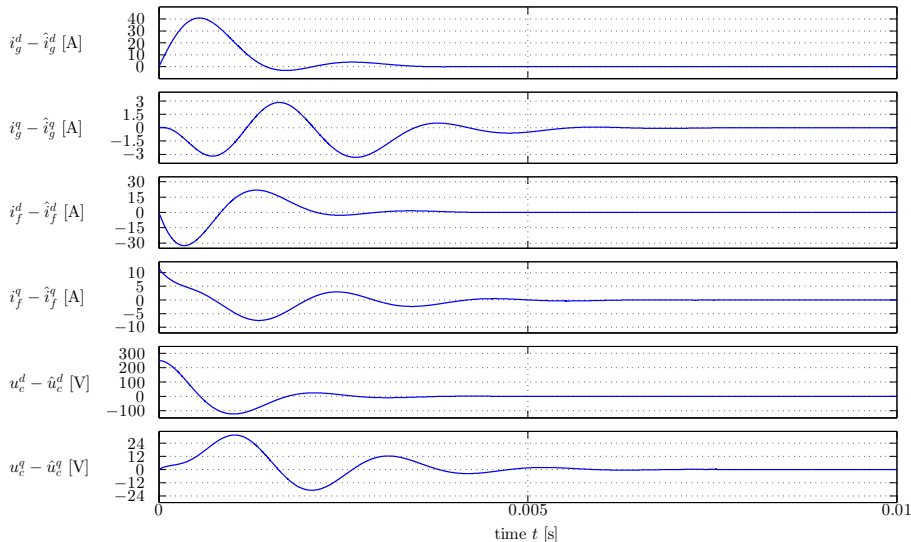
Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]

Simulationsergebnisse: Beobachterfehler für PI-SF mit — FCDC



Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]

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



Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- **Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]**
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

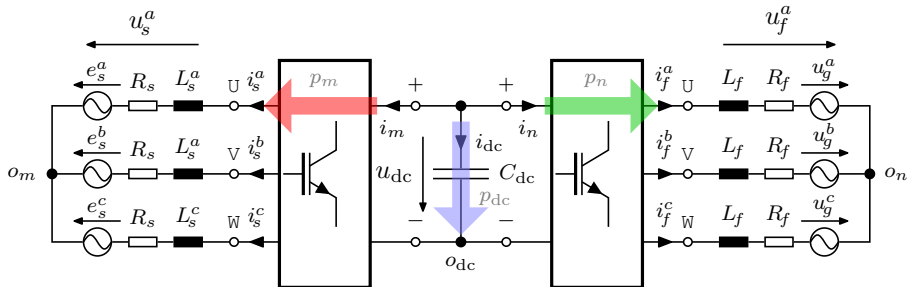
Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- **Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]**
 - **Dynamik des Spannungszwischenkreises**
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]

Elektrisches Netzwerk und Dynamik des Spannungszwischenkreises



$$\blacksquare p_{dc} = u_{dc} C_{dc} \frac{d}{dt} u_{dc} = -p_m - p_n \implies$$

$$\frac{d}{dt} u_{dc} = \frac{1}{u_{dc} C_{dc}} (-p_m - p_n)$$

$$\blacksquare p_m = \underbrace{\frac{3}{2} R_s \left\| \mathbf{i}_s^k \right\|^2}_{p_{m, \text{loss}}} + \underbrace{\frac{3}{2} p (\psi_{pm} i_s^q + (L_s^d - L_s^q) i_s^d i_s^q) \omega_m}_{p_{\text{mech}} = m \omega_m} + \underbrace{\frac{3}{2} \frac{d}{dt} (\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{L}_s^k \mathbf{i}_s^k}_{p_{L_s^k}}$$

$$\blacksquare p_n = \underbrace{\frac{3}{2} R_f \left\| \mathbf{i}_f^k \right\|^2}_{p_{pcc, \text{loss}}} + \underbrace{\frac{3}{2} \frac{d}{dt} L_f (\mathbf{i}_f^k)^\top \mathbf{i}_f^k}_{p_{L_f}} + \underbrace{\frac{3}{2} \hat{u}_g i_f^d}_{p_{pcc}}$$

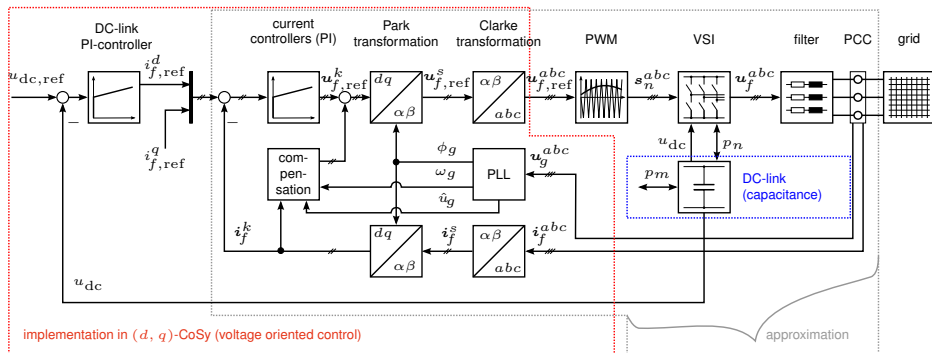
Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- **Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]**
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - **Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler**
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]

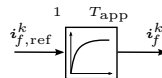
Regelkreis in Spannungsorientierung mit **linearem** PI-Regler



Konstanter PI-Regler für Zwischenkreisspannung:

$$e(t) := u_{dc,ref}(t) - u_{dc}(t)$$

$$i_{f,ref}^d(t) = V_R e(t) + \frac{V_R}{T_n} \int e(\tau) d\tau$$



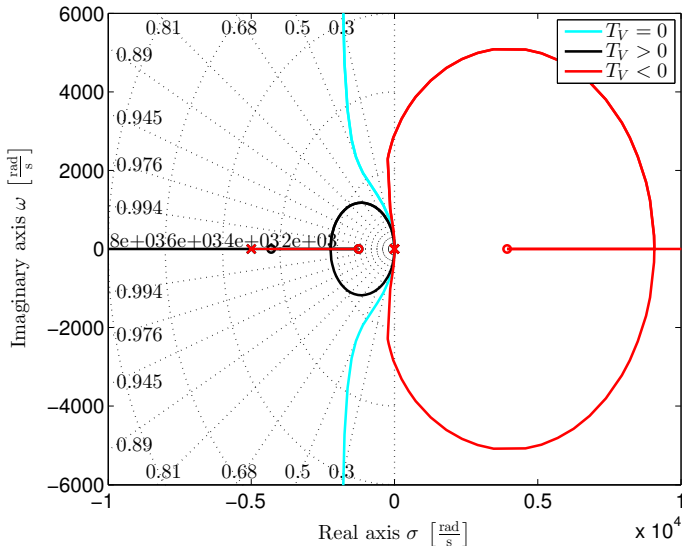
Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- **Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]**
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - **Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems**
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]

WOK für Fälle: $p_n = 0 \Rightarrow T_V = 0$, $p_n > 0 \Rightarrow T_V > 0$, $p_n < 0 \Rightarrow T_V < 0$ (nicht minimalphasig!)



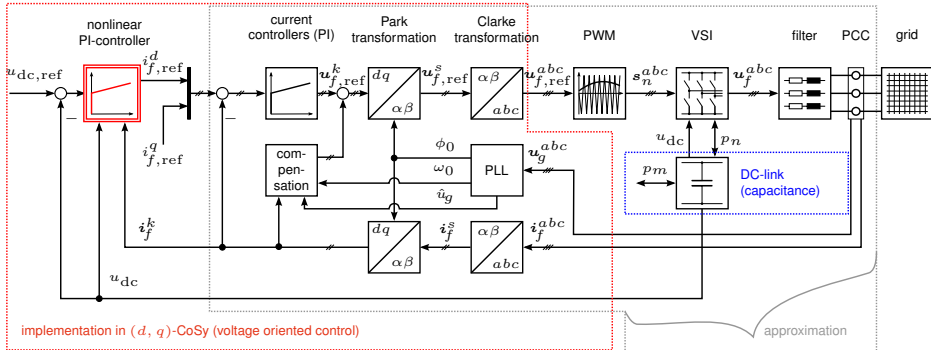
Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- **Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]**
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - **Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler**
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]

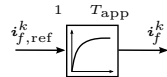
Regelkreis in Spannungsorientierung mit **nichtlinearem** PI-Regler



Nichtlinearer PI-Regler für Zwischenkreisspannung:

$$e(t) := u_{dc,ref}(t) - u_{dc}(t)$$

$$i_{f,ref}^d(t) = V_R(i_f^k, u_{dc}) e(t) + \frac{V_R(i_f^k, u_{dc})}{T_n(i_f^k, u_{dc})} \int_0^t e(\tau) d\tau$$



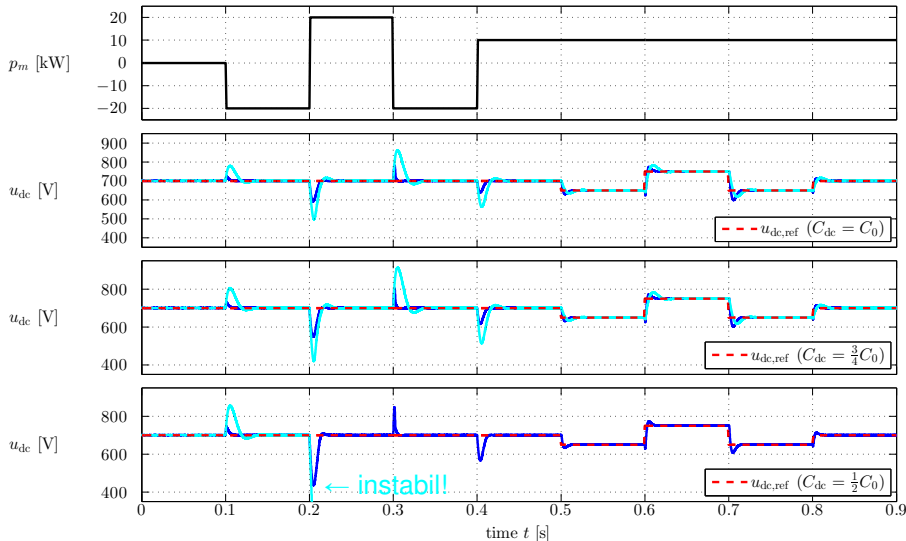
Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- **Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]**
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - **Simulationsergebnisse**
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]

Simulationsergebnisse für 20 kW AWE System: — konstanter PI, — nichtlinearer PI



Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]

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

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

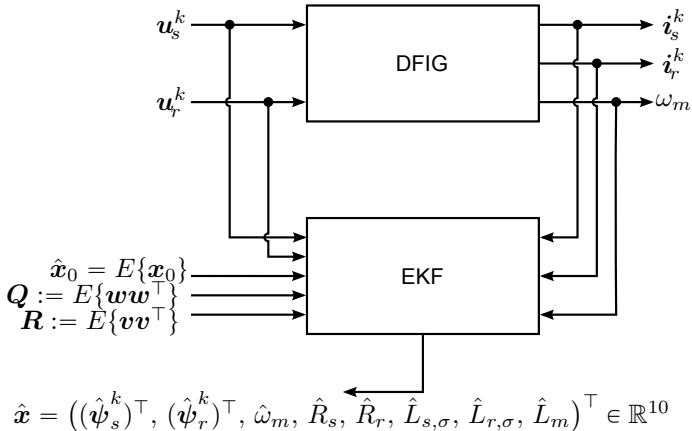
Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]

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



Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]

Algorithmus: Extended Kalman Filter (EKF)

Step I: Initialization for $k = 0$:

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

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

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

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

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

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

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 $\mathbf{C}[k]$).

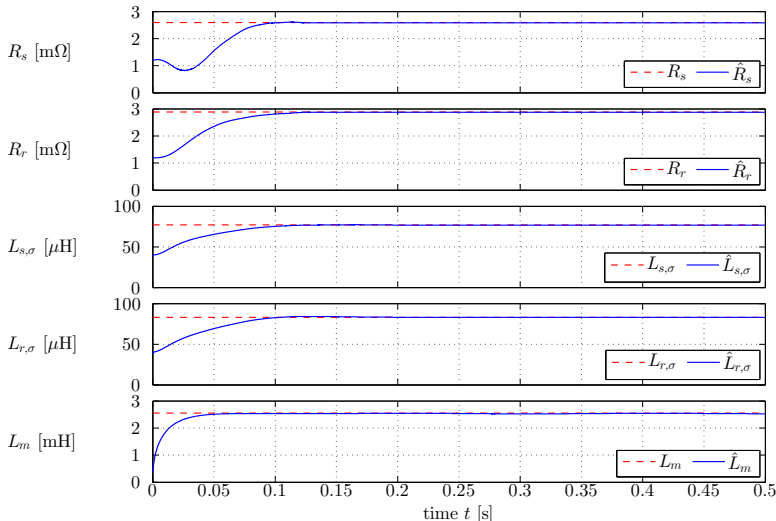
Gliederung

3 Regelung von WKA mit DFIG

- Überblick über die Regelkreisstrukturen
- Zustandsstromregelung für LCL-Filter [9]
 - Elektrisches Netzwerk und Problemstellung
 - Blockschaltbild: Regelkreis mit Beobachter und Vorsteuerungen
 - Simulation: Regler- und Beobachterimplementierung
 - Simulationsergebnisse
- Nichtlineare Zwischenkreisspannungsregelung [11]
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit linearem PI-Regler
 - Wurzelortskurve (WOK) des linearisierten Systems
 - Regelkreis in Spannungsorientierung mit nichtlinearem PI-Regler
 - Simulationsergebnisse
- Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]
 - Erweitertes nichtlineares Modell der DFIG
 - Implementierung
 - Algorithmus
 - Simulationsergebnisse

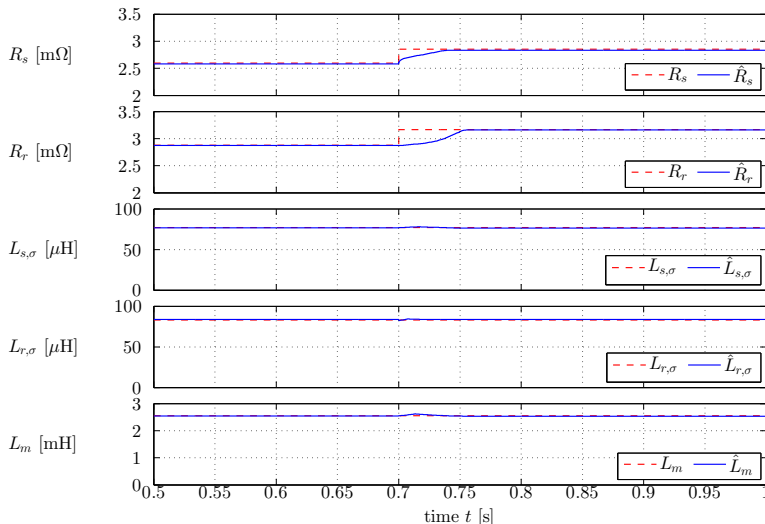
Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]

Simulationsergebnisse: Parameterschätzung der Nominalwerte



Online-Schätzung der DFIG-Parameter [8]

Simulationsergebnisse: Parameterschätzung bei Änderung der Widerstandswerte um +10%



Gliederung

4 Offene Fragen und weiteres Vorgehen

Offene Fragen

- Reale Parameter (Größenordnungen)?
 - Massen / Trägheiten
 - Elektrische Parameter (Widerstände, Induktivitäten, Trafo, ...)
 - Filter auch zwischen Umrichter und Maschine
 - Dynamikanforderungen
 - Effizienzanforderungen
- Reale Probleme? Wo könnte CRES unterstützen?
 - HiL-System
 - "nicht-ideale" Momentenregelung (kein Momentensensor)
 - 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] 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, Springer-Verlag, 2015.
- [2] 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.
- [3] C. M. Hackl, F. Larcher, A. Dötlinger, and R. 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*, pp. 1–8, 2013.
- [4] 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.
- [5] 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 *submitted to PRECEDE 2015, 3rd Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics*, 2015.
- [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, "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.

Literaturliste II

- [8] 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*, 2015.
- [9] 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 *submitted to 2015 IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, 2015.
- [10] 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.
- [11] F. Bauer, C. M. Hackl, and K. 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.
- [12] 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 *submitted to 2015 IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, 2015.
- [13] C. M. 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)*, pp. 1377–1382, 2014.
- [14] C. 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.
- [15] C. M. Hackl, M. J. Kamper, J. Kullick, and J. Mitchell, "Nonlinear PI current control of reluctance synchronous machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics (in preparation)*, 2015.

Literaturliste III

- [16] C. M. Hackl, "Current PI-funnel control with anti-windup for synchronous machines," in *submitted to 54th IEEE Conference on Decision and Control*, 2015.
- [17] C. M. Hackl and K. Schechner, "Non-ideal torque control in wind turbine systems: Causes and impacts," in *to be published in the Proceedings of the 5th MSE-Kolloquium on "Innovations for Energy Systems, Mobility, Buildings and Materials"*, 2015.
- [18] 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.
- [19] 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, Springer-Verlag, 2015.
- [20] C. M. Hackl, A. G. Hofmann, R. W. De Doncker, and R. M. Kennel, "Funnel control for speed & position control of electrical drives: A survey," in *Proceedings of the 19th Mediterranean Conference on Control and Automation*, pp. 181–188, 2011.
- [21] C. M. Hackl, A. G. Hofmann, and R. M. Kennel, "Funnel control in mechatronics: An overview," in *Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, pp. 8000–8007, 2011.
- [22] C. M. Hackl, "High-gain adaptive position control," *International Journal of Control*, vol. 84, no. 10, pp. 1695–1716, 2011.
- [23] C. M. Hackl and R. 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*, pp. 615–620, 2012.

Literaturliste IV

- [24] C. M. Hackl, “‘Funnel control’ zur Positionsregelung von starren Drehgelenkrobotern mit grob bekannter Trägheitsmatrix,” in *Tagungsband des GMA-Fachausschuss 1.40*, pp. 302–310, 2012.
- [25] C. M. Hackl, “Funnel control with disturbance observer for two-mass systems,” in *Proceedings of the 52nd IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 6244–6249, 2013.
- [26] C. M. Hackl, N. Hopfe, A. Ilchmann, M. Mueller, and S. Trenn, “Funnel control for systems with relative degree two,” *SIAM Journal on Control and Optimization*, vol. 51, no. 2, pp. 965–995, 2013.
- [27] T. Faulwasser and C. 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*, pp. 1044–1051, 2014.
- [28] C. M. Hackl, *Non-identifier based adaptive control in mechatronics: Theory and Application*. Lecture Notes in Control and Information Sciences, Berlin: Springer-Verlag, 2015 (in preparation).