

Die regelungstechnische Einbindung ins Stromnetz

Christoph Hackl

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

14.07.2015

Bayern Innovativ Clustertreffen – Forschung für die Windenergie an der TUM
TU München, Garching

Gliederung

- 1 Vorstellung der CRES Forschergruppe
- 2 Einführung und Motivation
- 3 Modellierung und Regelung von Windkraftanlagen (WKA)
- 4 Zukünftige Herausforderungen

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

“Control of renewable energy systems (CRES)”



C. Dirscherl, M.Sc.



C. Hackl, Dr.-Ing.



K. Schechner, M.Sc.

Kontakt und nähere Informationen

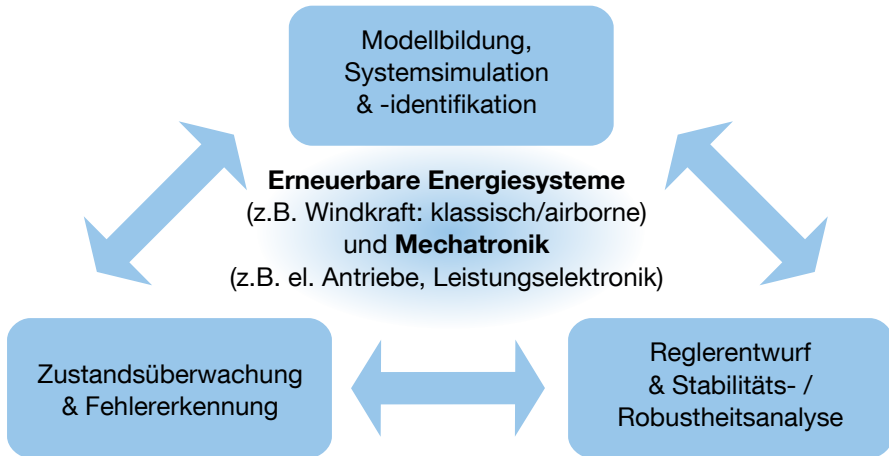
- Telefon: (+49) (0)89 289 16688
- email: christoph.hackl@tum.de
- WWW: <http://www.cres.mse.tum.de>
- Zwei weitere Doktoranden ab Juli bzw. September 2015:
 - H2020 ITN-Projekt “Airborne Wind Energy”
 - DFG-Projekt “Computationally-efficient direct model predictive control of 3L-NPC back-to-back converters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

Gliederung

1 Vorstellung der CRES Forschergruppe

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

CRES Forschungsschwerpunkte

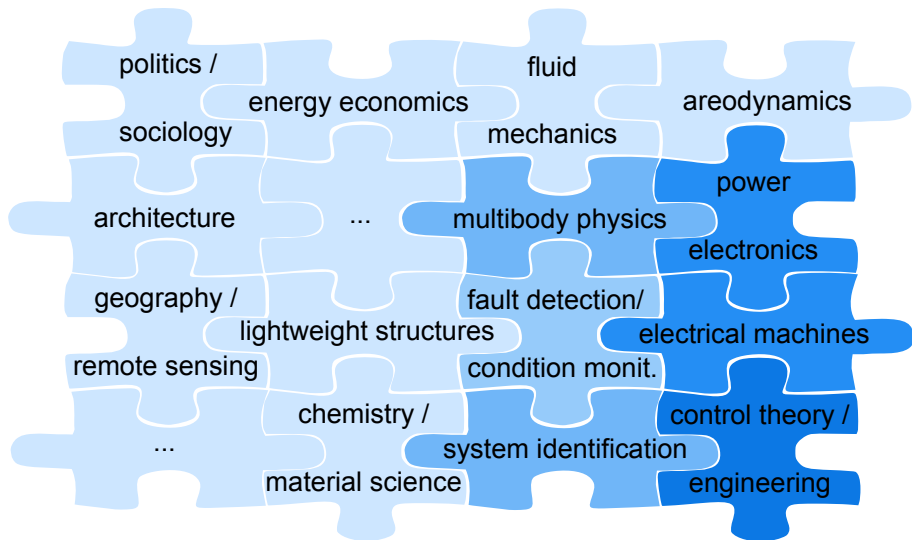


Gliederung

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: [2–5], [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 PMSG [1] und 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

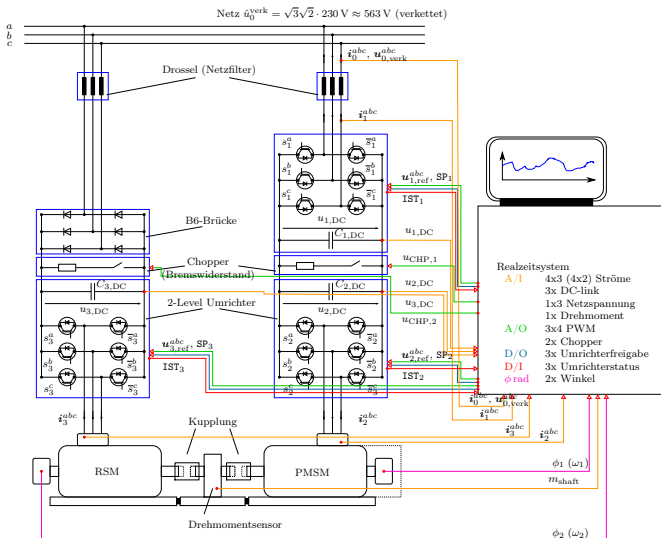
Gliederung

1 Vorstellung der CRES Forschergruppe

- Team
- Forschungsschwerpunkte
- Interdisziplinarität
- Bisherige Arbeiten
- Laboraufbau

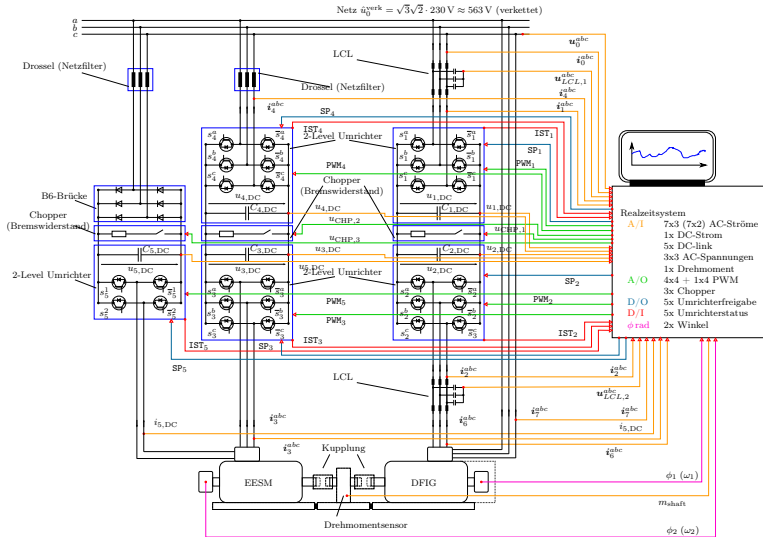
Laboraufbau

Aufbau 1: Reluktanz-Synchronmaschine und Permanentmagnet-Synchronmaschine



Laboraufbau

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



Gliederung

2 Einführung und Motivation

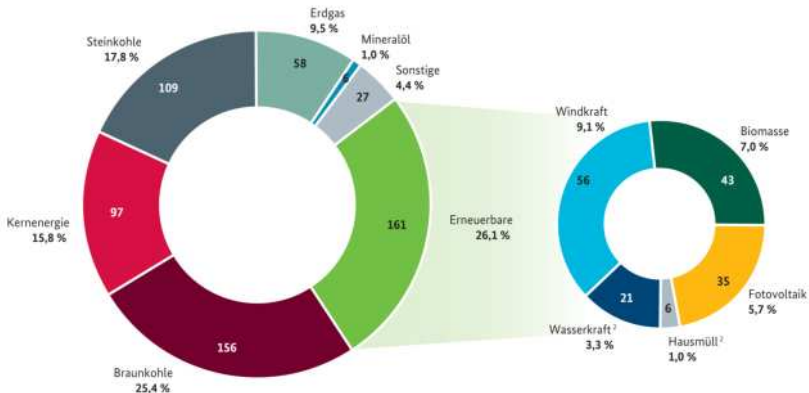
- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- Stromgestehungskosten in Deutschland
- Moderne Windkraftanlagen (WKA)
- Elektrische Kernkomponenten
- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern

Gliederung

2 Einführung und Motivation

- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- Stromgestehungskosten in Deutschland
- Moderne Windkraftanlagen (WKA)
- Elektrische Kernkomponenten
- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern

Bruttostromerzeugung* in Deutschland 2014 (insgesamt $614 \text{ TW h}^1 = 614 \cdot 10^9 \text{ kW h}$, aus [29])



1 Vorläufig

2 Regenerativer Anteil

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Stand: Februar 2015

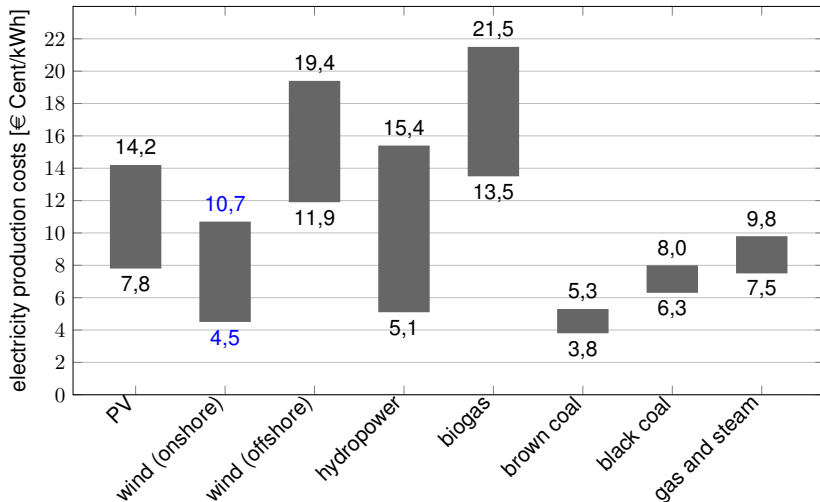
(* Nettostromerzeugung = Bruttostromerzeugung – Eigenenergieverbrauch des Kraftwerks)

Gliederung

2 Einführung und Motivation

- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- **Stromgestehungskosten in Deutschland**
- Moderne Windkraftanlagen (WKA)
- Elektrische Kernkomponenten
- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern

Stromgestehungskosten in Deutschland 2013



(basiert auf Abb. 1 in [30] and Tab. 4.12 (> 500 kW) in [31]).

Gliederung

2 Einführung und Motivation

- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- Stromgestehungskosten in Deutschland
- **Moderne Windkraftanlagen (WKA)**
- Elektrische Kernkomponenten
- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern

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
- dominierende Generatortopologien:
 - Synchrongenerator *ohne* Getriebe (“direct drive”)
 - Doppelt-gespeister Asynchrongenerator *mit* Getriebe
- Leistungselektronik (back-to-back converter)
- Netzanbindung (Filter & Transformator)

Gliederung

2 Einführung und Motivation

- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- Stromgestehungskosten in Deutschland
- Moderne Windkraftanlagen (WKA)
- Elektrische Kernkomponenten
- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern

Generatoren

Doppelt-gespeister
Asynchrongenerator
(DFIG, z.B. ABB)



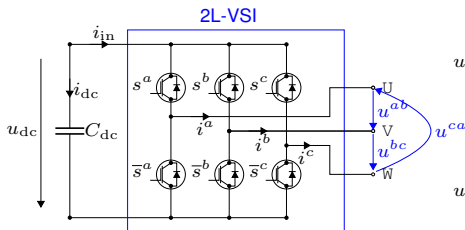
Fremderregter
Synchrongenerator
(EESG, z.B. Enercon)



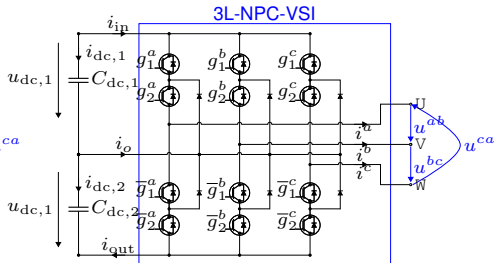
Permanentmagnet
Synchrongenerator
(PMSG, z.B. Siemens)



Umrichter (Leistungselektronik)

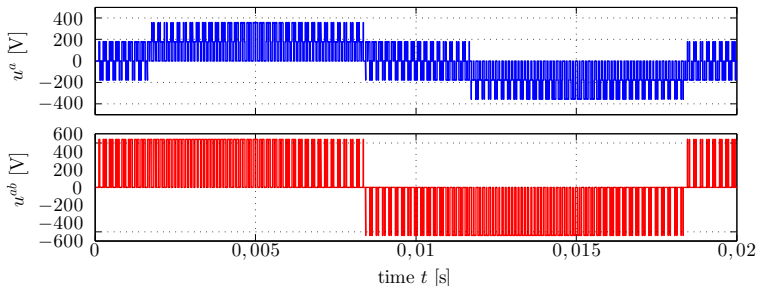


Two-level voltage source inverter (2L-VSI)

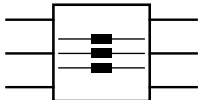


Three-level neutral-point-clamped voltage source inverter (3L-NPC-VSI)

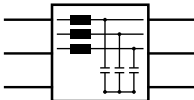
Filter



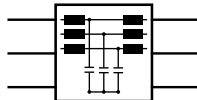
L-Filter
(Stromregelung)



LC-Filter
(Spannungsregelung)



LCL-Filter
(Stromregelung)

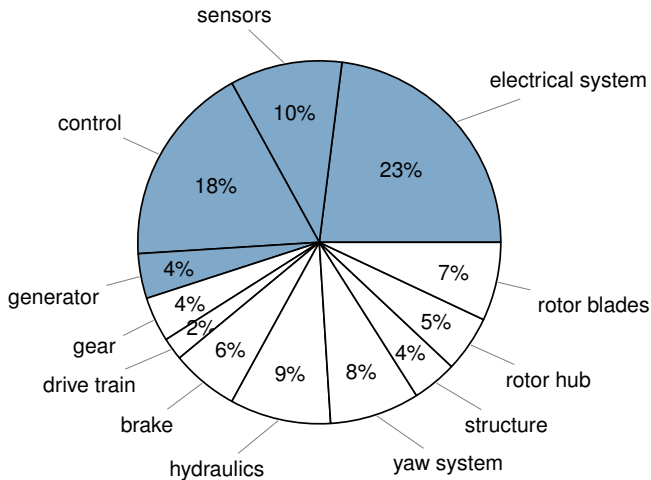


Gliederung

2 Einführung und Motivation

- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- Stromgestehungskosten in Deutschland
- Moderne Windkraftanlagen (WKA)
- Elektrische Kernkomponenten
- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern

WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern



(basiert auf Abb. 2 in [32])

Gliederung

- 3 Modellierung und Regelung von Windkraftanlagen (WKA)**
 - WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator (PMSG)
 - Überblick und Modellierungstiefe
 - Dynamischer Leistungsfluss
 - Regelkreisstrukturen
 - Simulationsergebnisse

Gliederung

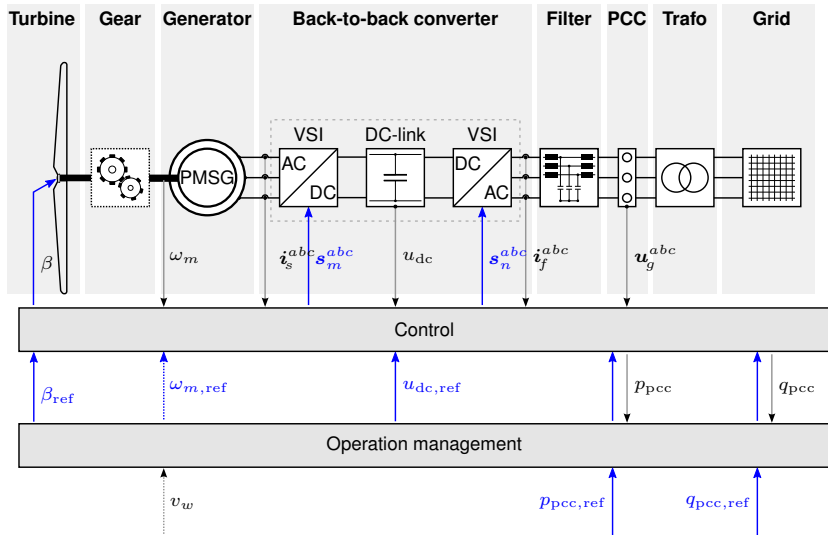
- 3 Modellierung und Regelung von Windkraftanlagen (WKA)**
 - WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator (PMSG)
 - Überblick und Modellierungstiefe
 - Dynamischer Leistungsfluss
 - Regelkreisstrukturen
 - Simulationsergebnisse

Gliederung

- 3** Modellierung und Regelung von Windkraftanlagen (WKA)
 - WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator (PMSG)
 - Überblick und Modellierungstiefe
 - Dynamischer Leistungsfluss
 - Regelkreisstrukturen
 - Simulationsergebnisse

WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator

Überblick und Modellierungstiefe

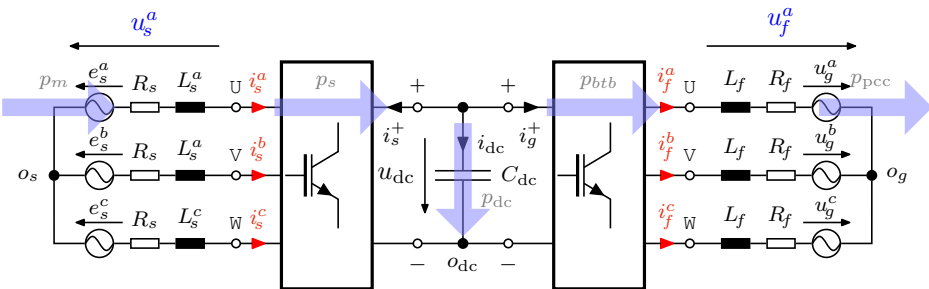


Gliederung

- 3** Modellierung und Regelung von Windkraftanlagen (WKA)
 - WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator (PMSG)
 - Überblick und Modellierungstiefe
 - Dynamischer Leistungsfluss
 - Regelkreisstrukturen
 - Simulationsergebnisse

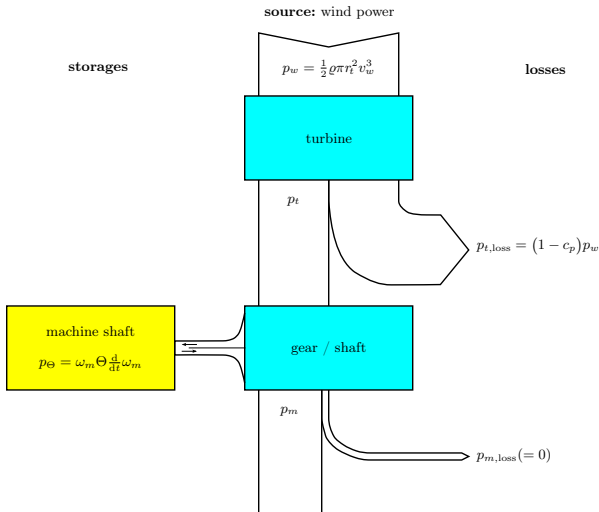
WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator

Überblick: Dynamischer Leistungsfluss im elektrischen System



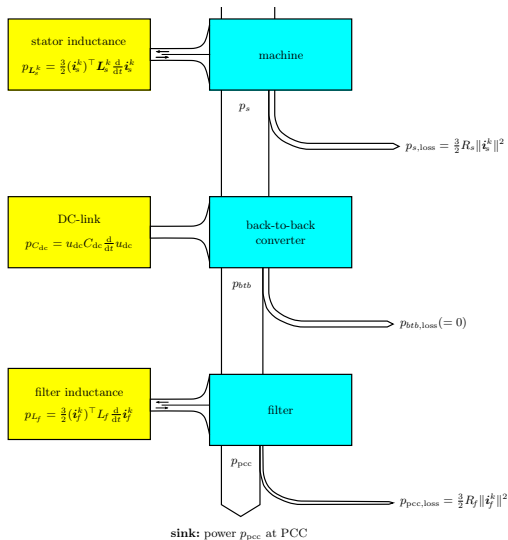
WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator

Dynamischer Leistungsfluss (Teil 1)



WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator

Dynamischer Leistungsfluss (Teil 2)

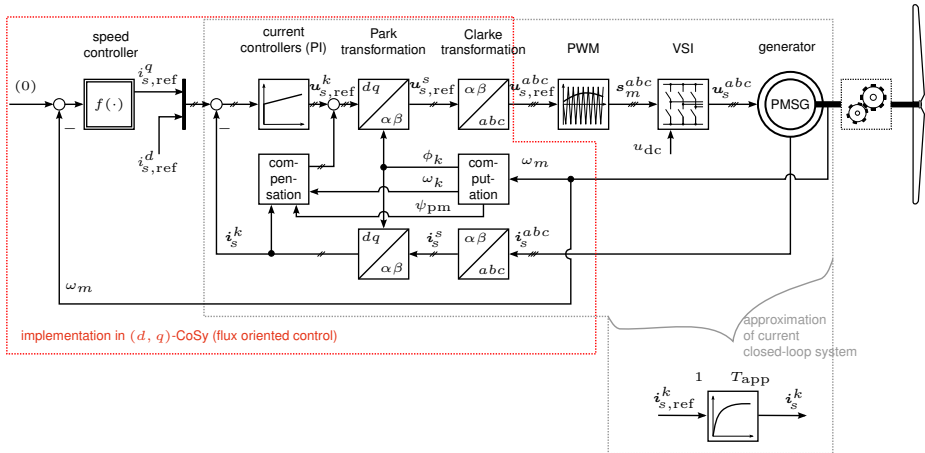


Gliederung

- 3** Modellierung und Regelung von Windkraftanlagen (WKA)
 - WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator (PMSG)
 - Überblick und Modellierungstiefe
 - Dynamischer Leistungsfluss
 - Regelkreisstrukturen
 - Simulationsergebnisse

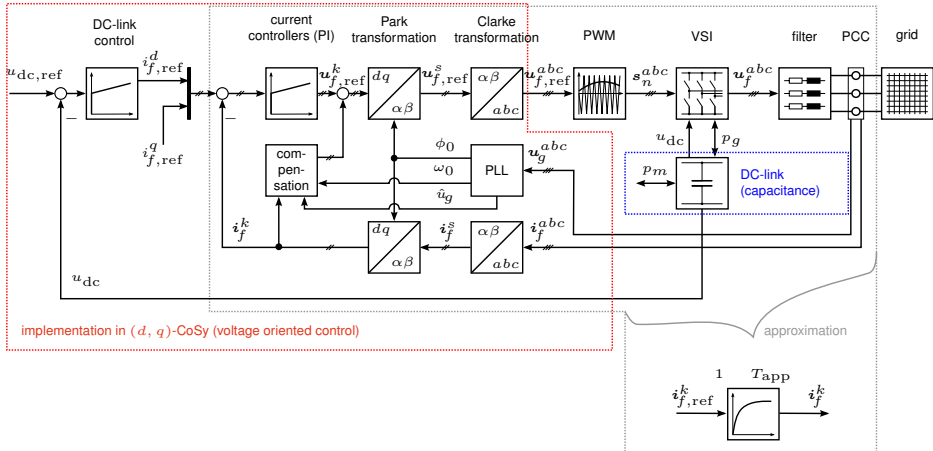
WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator

Generatorseitige Regelkreisstruktur



WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator

Netzseitige Regelkreisstruktur

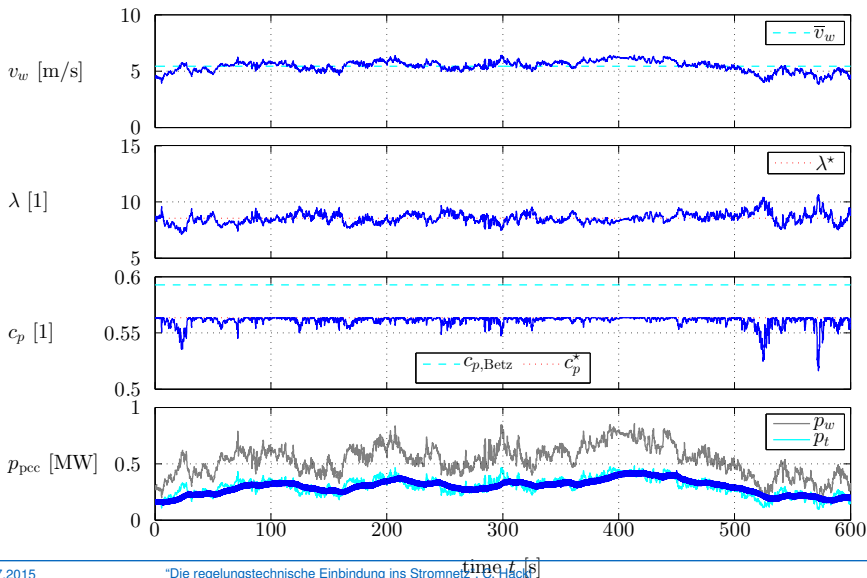


Gliederung

- 3** Modellierung und Regelung von Windkraftanlagen (WKA)
 - WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator (PMSG)
 - Überblick und Modellierungstiefe
 - Dynamischer Leistungsfluss
 - Regelkreisstrukturen
 - Simulationsergebnisse

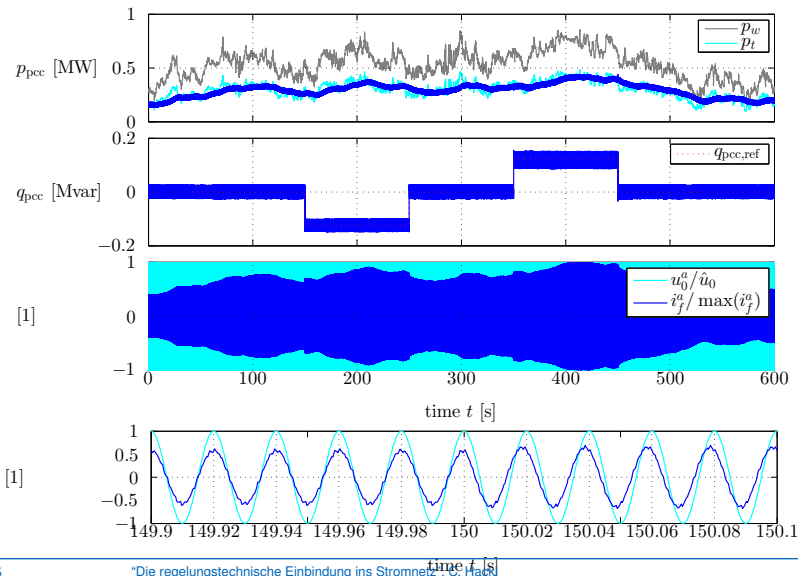
WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator

Simulationsergebnisse: Generatorseitige Regelung (1)



WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator

Simulationsergebnisse: Generatorseitige Regelung (2)



Gliederung

4 Zukünftige Herausforderungen

Zukünftige Herausforderungen (siehe auch [33])

- 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

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. Abdelrahman, 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 *to be published in the Proceedings of the 2015 IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, pp. xxx–xxx, 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 *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 *to be published in the Proceedings of the 2015 IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, pp. xxx–xxx, 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 (accepted; final version in preparation).
- [29] “Energiedaten: Gesamtausgabe (Stand: April 2015),” tech. rep., Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2015.
- [30] C. Kost, J. N. Mayer, J. Thomsen, N. Hartmann, C. Senkpiel, S. Philipps, S. Nold, S. Lude, and T. Schlegl, “Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien,” tech. rep., Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), 2013.
- [31] U. Dumont and R. Keuneke, “Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichtes 2011 gemäß §65 EEG – Vorhaben Ild spartenspezifisches Vorhaben Wasserkraft,” endbericht, Ingenieurbüro Floecksmühle, 2011.

Literaturliste V

- [32] B. Hahn, M. Durstewitz, and K. Rohrig, "Reliability of wind turbines, experiences of 15 years with 1500 WTs," in *Wind Energy* (J. Peinke, P. Schaumann, and S. Barth, eds.), Proceedings of the Euromech Colloquium, pp. 329–332, Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [33] F. Blaabjerg and K. Ma, "Future on power electronics for wind turbine systems," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 3, 2013.