

Regelung von regenerativen Energiesystemen: Wie und warum?

Christoph Hackl

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

27.06.2015

TUM – Lange Nacht der Wissenschaft, Garching

MSE Forschergruppe (seit Januar 2014)

“Control of renewable energy systems (CRES)”



C. Dirscherl, M.Sc.



C. Hackl, Dr.-Ing.

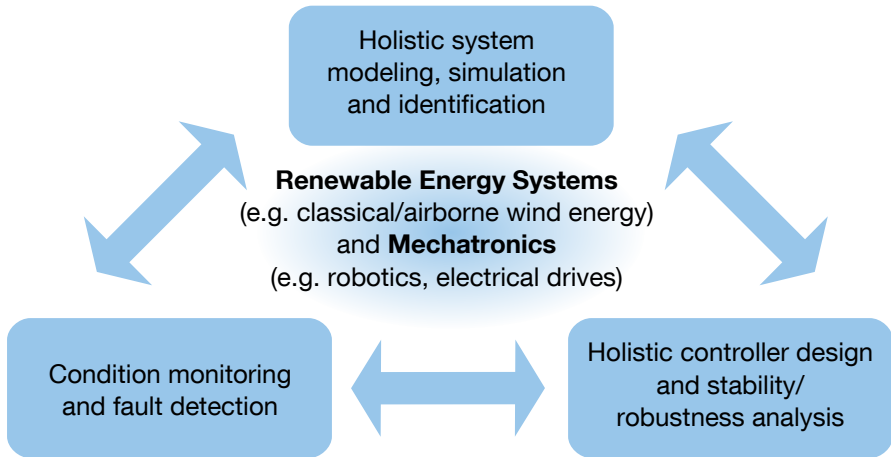


K. Schechner, M.Sc.

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]

CRES Forschungsschwerpunkte



Gliederung

- 1 Motivation und Einführung
- 2 Regelung der elektrischen Komponenten: Warum und wie?
- 3 Zusammenfassung und Ausblick
- 4 Anhang

Gliederung

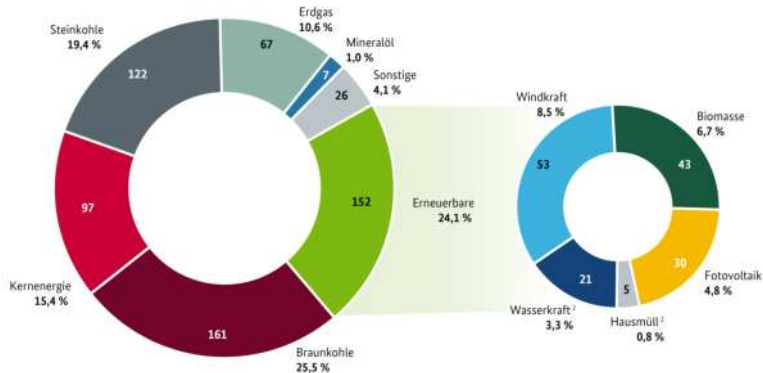
- 1** Motivation und Einführung
 - Bruttostromerzeugung in Deutschland
 - Stromgestehungskosten in Deutschland
 - Moderne Windkraftanlagen (WKA)
 - Elektrische Kernkomponenten

Gliederung

1 Motivation und Einführung

- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- Stromgestehungskosten in Deutschland
- Moderne Windkraftanlagen (WKA)
- Elektrische Kernkomponenten

Bruttostromerzeugung* in Deutschland 2013 (insgesamt $631 \text{ TW h}^1 = 631 \cdot 10^9 \text{ kW h}$, aus [2])



1 Vorläufig
2 Regenerativer Anteil

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB)

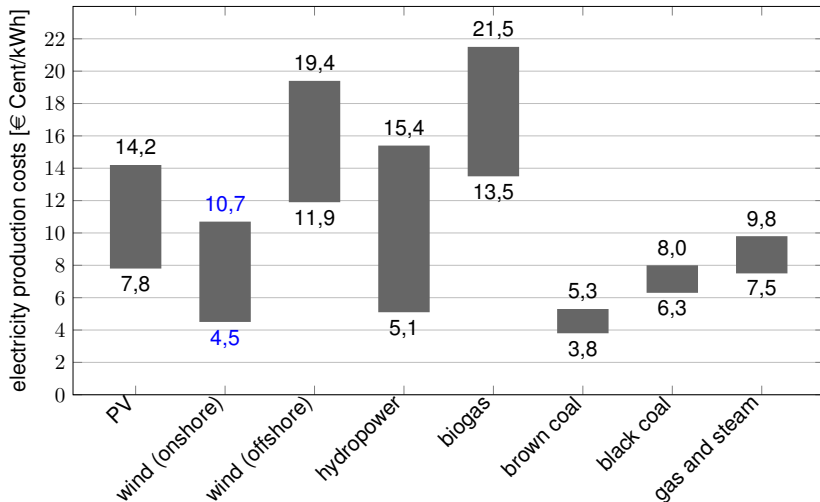
(* Nettostromerzeugung = Bruttostromerzeugung – Eigenenergieverbrauch des Kraftwerks)

Gliederung

1 Motivation und Einführung

- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- **Stromgestehungskosten in Deutschland**
- Moderne Windkraftanlagen (WKA)
- Elektrische Kernkomponenten

Stromgestehungskosten in Deutschland 2013



(basiert auf Abb. 1 in [3] and Tab. 4.12 (> 500 kW) in [4]).

Gliederung

1 Motivation und Einführung

- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- Stromgestehungskosten in Deutschland
- Moderne Windkraftanlagen (WKA)
- Elektrische Kernkomponenten

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 und Einführung

- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- Stromgestehungskosten in Deutschland
- Moderne Windkraftanlagen (WKA)
- Elektrische Kernkomponenten

Generatoren

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



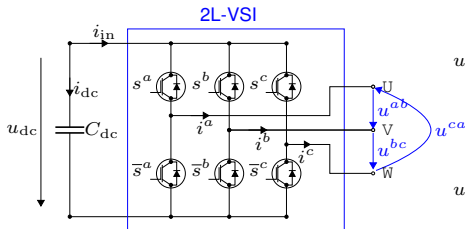
Fremderregter
Synchrongenerator
(FESG, z.B. Enercon)



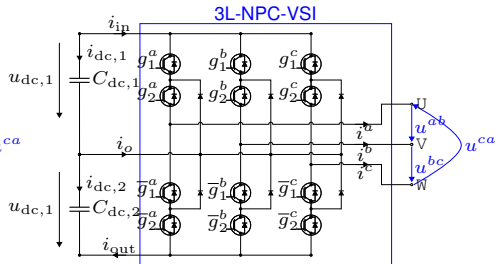
Permanentmagnet
Synchrongenerator
(PMSG, z.B. Siemens)



Umrichter (Leistungselektronik)

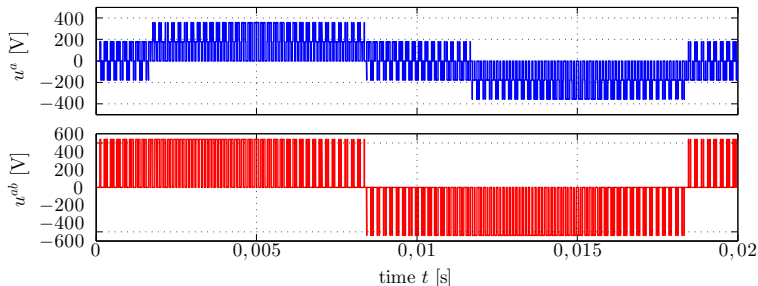


Two-level voltage source inverter (2L-VSI)

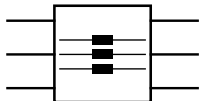


Three-level neutral-point-clamped voltage source inverter (3L-NPC-VSI)

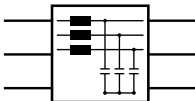
Filter (netzseitig)



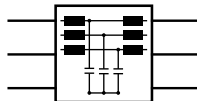
L-Filter
(Stromregelung)



LC-Filter
(Spannungsregelung)



LCL-Filter
(Stromregelung)



Gliederung

2 Regelung der elektrischen Komponenten: Warum und wie?

■ Warum?

- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Maximum power point tracking und Drehzahlregelkreis
- Simulationsergebnisse

Gliederung

2 Regelung der elektrischen Komponenten: Warum und wie?

■ Warum?

- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Maximum power point tracking und Drehzahlregelkreis
- Simulationsergebnisse

Gliederung

2 Regelung der elektrischen Komponenten: Warum und wie?

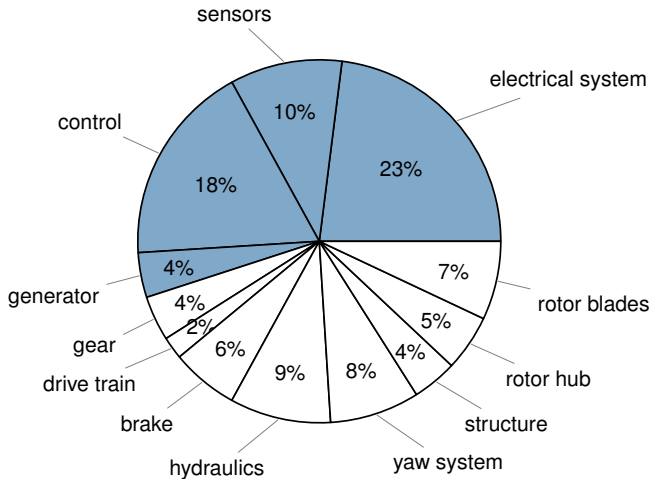
■ Warum?

- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
 - Leistungsbetrachtung
 - Betriebsbereiche
 - Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Maximum power point tracking und Drehzahlregelkreis
- Simulationsergebnisse

WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern



(basiert auf Abb. 2 in [5])

Gliederung

2 Regelung der elektrischen Komponenten: Warum und wie?

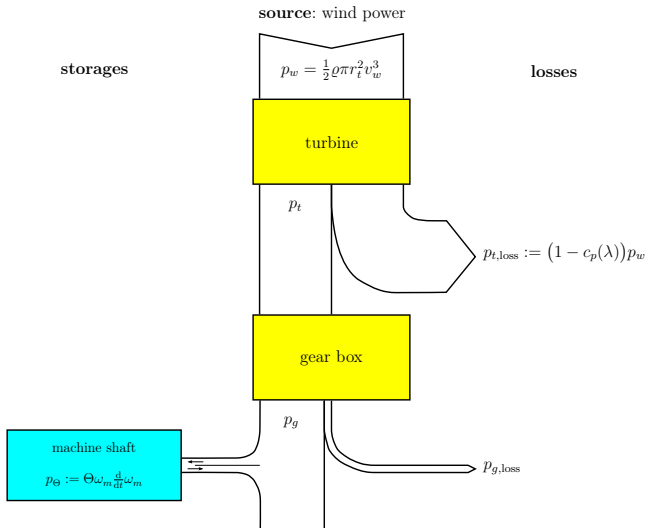
■ Warum?

- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

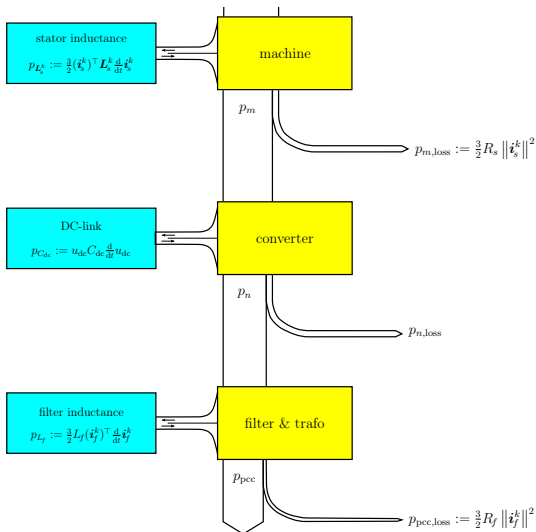
■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Maximum power point tracking und Drehzahlregelkreis
- Simulationsergebnisse

Leistungsfluss für WKA mit PMSG (Teil 1)



Leistungsfluss für WKA mit PMSG (Teil 2)



sink: point of common coupling (PCC)

Gliederung

2 Regelung der elektrischen Komponenten: Warum und wie?

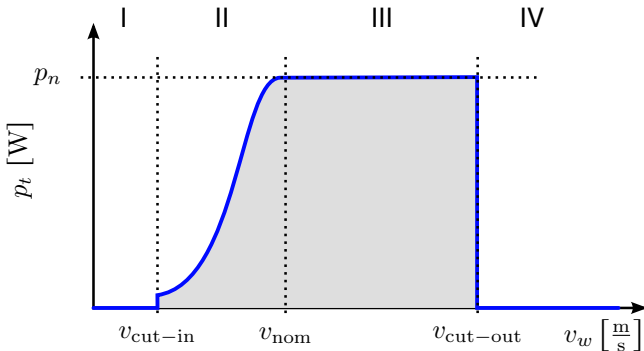
■ Warum?

- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
- Leistungsbetrachtung
- **Betriebsbereiche**
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Maximum power point tracking und Drehzahlregelkreis
- Simulationsergebnisse

Betriebsbereiche für versch. Windgeschwindigkeiten



- **Bereich I:** Stillstand. Keine Ausgangsleistung, d.h. $p_t = 0$.
- **Bereich II:** Betrieb unterhalb des Nennpunktes. Variable Ausgangsleistung, d.h. $0 < p_t < p_n$ (Ziel: Maximum power point tracking).
- **Bereich III:** Nennbetrieb. Nennausgangsleistung, d.h. $p_t = p_n$.
- **Bereich IV:** Stillstand (Sicherheitsabschaltung), d.h. $p_t = 0$.

Gliederung

2 Regelung der elektrischen Komponenten: Warum und wie?

■ Warum?

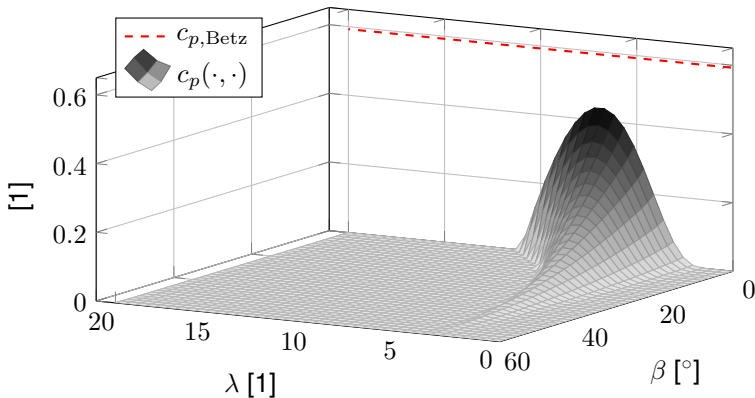
- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche

■ Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Maximum power point tracking und Drehzahlregelkreis
- Simulationsergebnisse

Leistungsbeiwert und Turbinenleistung



Turbinenleistung

$$p_t(t) = c_p(\lambda, \beta) p_w(t) = c_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho \pi r_t^2 v_w(t)^3 < c_{p,Betz} \frac{1}{2} \rho \pi r_t^2 v_w(t)^3 \quad (1)$$

Gliederung

2 Regelung der elektrischen Komponenten: Warum und wie?

■ Warum?

- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Maximum power point tracking und Drehzahlregelkreis
- Simulationsergebnisse

Gliederung

2 Regelung der elektrischen Komponenten: Warum und wie?

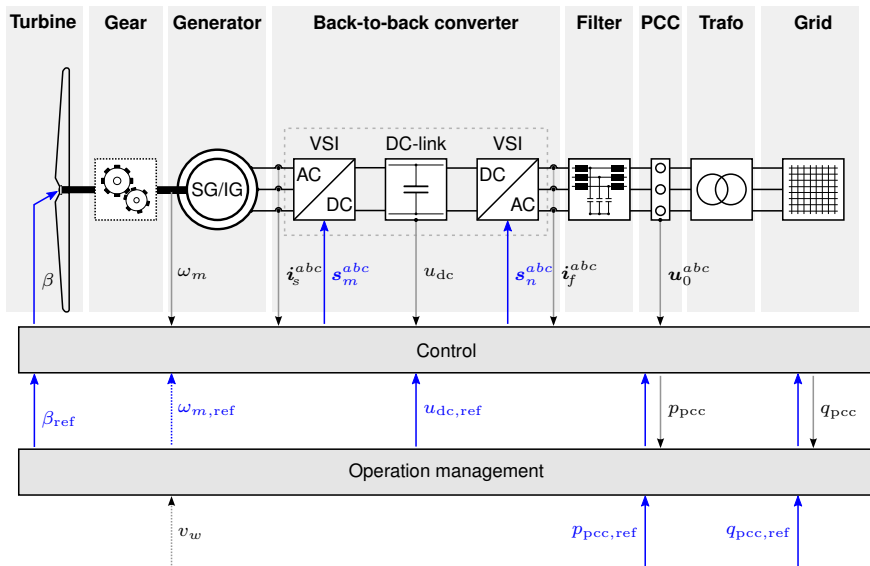
■ Warum?

- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Maximum power point tracking und Drehzahlregelkreis
- Simulationsergebnisse

WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator



Gliederung

2 Regelung der elektrischen Komponenten: Warum und wie?

■ Warum?

- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- **Generatorseitige Regelkreisstruktur**
- Maximum power point tracking und Drehzahlregelkreis
- Simulationsergebnisse

Gliederung

2 Regelung der elektrischen Komponenten: Warum und wie?

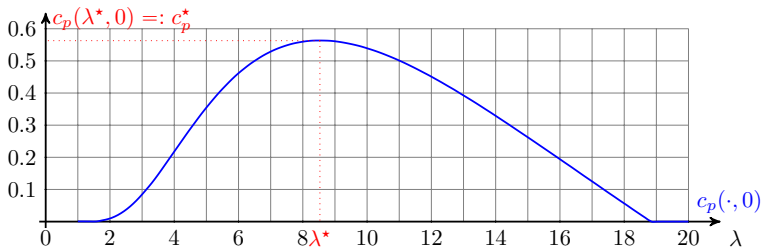
■ Warum?

- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

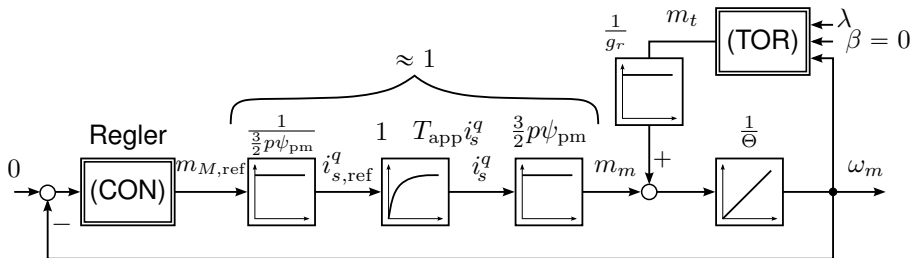
- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- **Maximum power point tracking und Drehzahlregelkreis**
- Simulationsergebnisse

Betriebsbereich II: Maximum power point tracking



⇒ Regelziel: $\lambda \rightarrow \lambda^*$ (bzw. $\omega_m \rightarrow \omega_m^*$) für konstanten Wind $v_w > 0$.

Drehzahlregelkreis



Turbinenmoment $m_t(\lambda, \omega_m) = c_0 \frac{c_{p,1}(\lambda)}{\lambda^3} \omega_m^2$ mit $\lambda = \frac{r_t \omega_m}{g_r v_w}$ (TOR)

Generatormoment: $m_{m,ref} = -k_p^* \omega_m^2 \approx m_m$ mit $k_p^* = c_0 \frac{c_{p,1}(\lambda^*)}{(\lambda^*)^3}$ (CON)

Gliederung

2 Regelung der elektrischen Komponenten: Warum und wie?

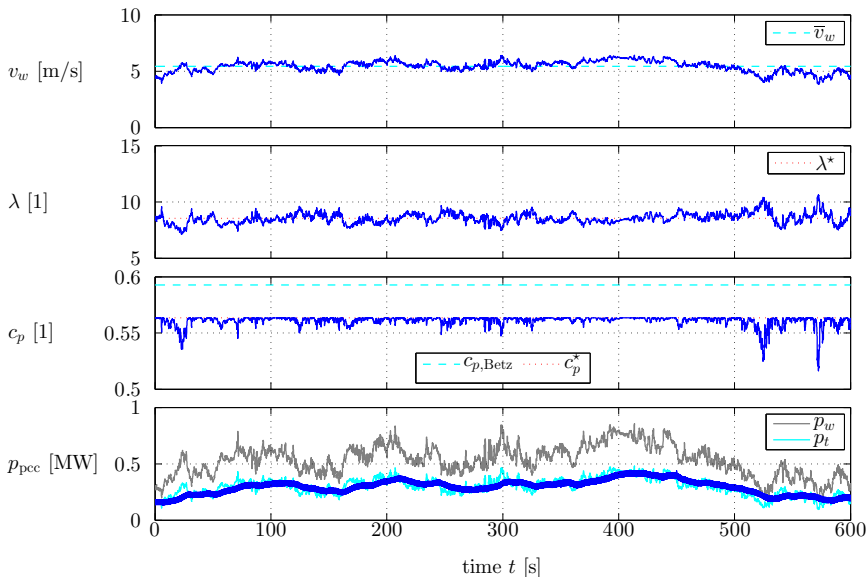
■ Warum?

- WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

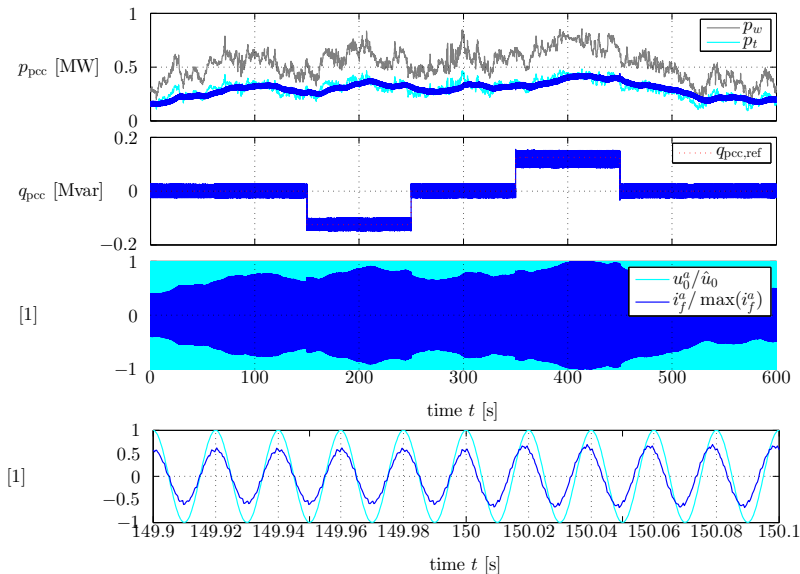
■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Maximum power point tracking und Drehzahlregelkreis
- Simulationsergebnisse

Simulationsergebnisse: Generatorseitige Regelung (1)



Simulationsergebnisse: Generatorseitige Regelung (2)



Gliederung

3 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick

Regelung ist

- essentiell
- steigert die Effizienz
- garantiert optimalen Betrieb in unterschiedlichen Bereichen
- schützt die Anlage (zusammen mit Betriebsführung)

Zukünftige Herausforderungen im Bereich “Regenerative Energiesysteme”

- **Senkung der Stromgestehungskosten**
⇒ **Wirtschaftliche Machbarkeit der Energiewende?**
- Erhöhung der Zuverlässigkeit
(v.a. Regelung und Leistungselektronik fehleranfällig)
- Flexibilisierung/Robustifizierung der Netzanbindung
- Neue Technologien (z.B. Generator-, Umrichtertopologien)

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] "Energiedaten: Gesamtausgabe (Stand: Juli 2014)," tech. rep., Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2014.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] B. Hahn, M. Durstewitz, and K. Rohrig, "Reliability of wind turbines, experiences of 15 years with 1500 WT's," in *Wind Energy* (J. Peinke, P. Schaumann, and S. Barth, eds.), Proceedings of the Euromech Colloquium, pp. 329–332, Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [6] 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.
- [7] J. Kullick, "Simulation and control of a small-scale wind turbine system with reluctance synchronous generator," Master's thesis, Technische Universität München, MSE Research Group "Control of renewable energy systems", 2015.
- [8] 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.