

Regelung von regenerativen Energiesystemen – am Beispiel von Windkraftanlagen –

Christoph Hackl

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

www.cres.mse.tum.de

18.01.2016
MSE Ringvorlesung “Welt der Ingenieurwissenschaften”
Technische Universität München, Garching

Gliederung

- 1 Vorstellung: CRES Forschergruppe
- 2 Einführung
- 3 Regelung der elektrischen Komponenten [1]
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

Gliederung

1 Vorstellung: CRES Forschergruppe

- Tätigkeitsfelder
- Forschungskonzept
- Interdisziplinärer Ansatz
- Forschungsblickwinkel
- Laboraufbau

Vorstellung

MSE Forschergruppe "Control of Renewable Energy Systems (CRES)"

CRES Team



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



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



C. Hackl, Dr.-Ing.
(CRES,01/2014)



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



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



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

Externe Doktoranden bzw. Kollaborationen



S. Krüner, M.Sc.
(SINN Power GmbH)



F. Bauer, M.Sc.
(EAL)



M. Abdelrahem,
M.Sc. (EAL)

... Sie?

Gliederung

1 Vorstellung: CRES Forschergruppe

- Tätigkeitsfelder
 - Forschungskonzept
 - Interdisziplinärer Ansatz
 - Forschungsblickwinkel
 - Laboraufbau

Vorstellung

Tätigkeitsfelder

Klassische Windkraftanlagen



Ziel: Erhöhen der Zuverlässigkeit

Flugwindkraftanlagen



Ziel: Fehlertolerante Regelung

Kleinwindkraftanlagen



Ziel: Einsatz von RSM (≤ 50 kW)

Wellenkraftwerke (mit SINN Power GmbH)



Ziel: Energieeffiziente und robuste Regelung

Geothermieranlagen



Ziel: Fehlertolerante Regelung

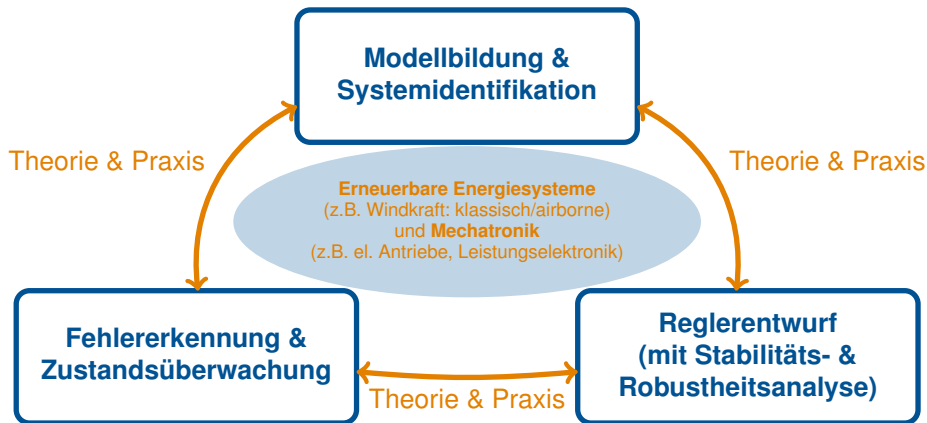
Gliederung

1 Vorstellung: CRES Forschergruppe

- Tätigkeitsfelder
- **Forschungskonzept**
- Interdisziplinärer Ansatz
- Forschungsblickwinkel
- Laboraufbau

Vorstellung

Forschungskonzept



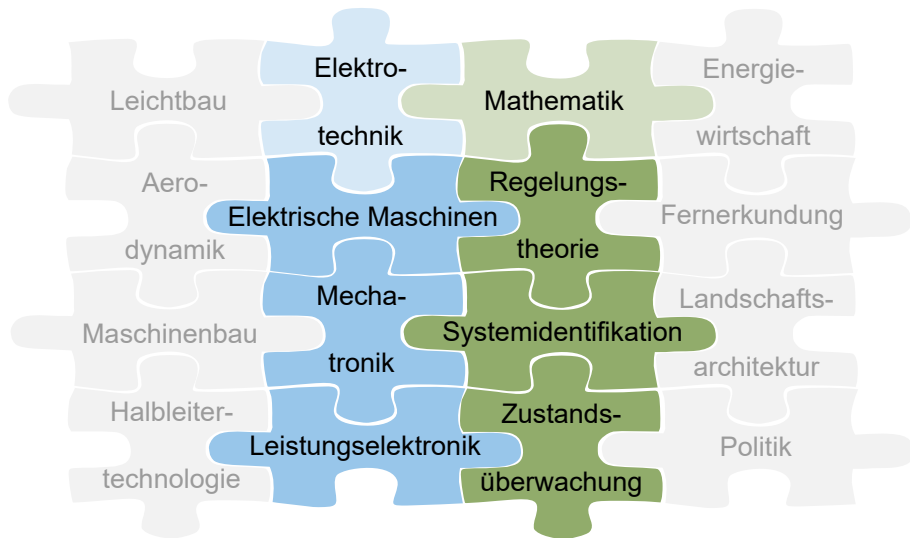
Gliederung

1 Vorstellung: CRES Forschergruppe

- Tätigkeitsfelder
- Forschungskonzept
- **Interdisziplinärer Ansatz**
- Forschungsblickwinkel
- Laboraufbau

Vorstellung

Interdisziplinärer Ansatz



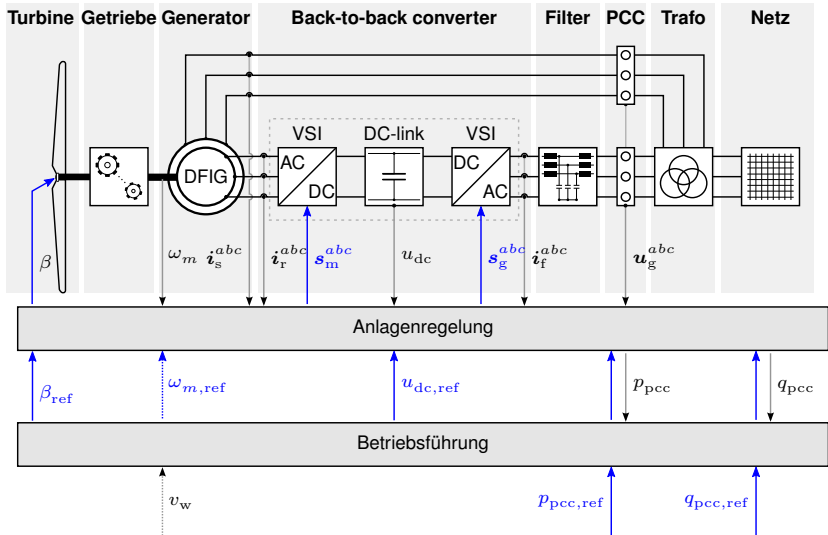
Gliederung

1 Vorstellung: CRES Forschergruppe

- Tätigkeitsfelder
- Forschungskonzept
- Interdisziplinärer Ansatz
- Forschungsblickwinkel
- Laboraufbau

Vorstellung

Forschungsblickwinkel: **Elektrische** Komponenten (von z.B. Windkraftanlagen)



Gliederung

1 Vorstellung: CRES Forschergruppe

- Tätigkeitsfelder
- Forschungskonzept
- Interdisziplinärer Ansatz
- Forschungsblickwinkel
- Laboraufbau

Vorstellung

Laboraufbau

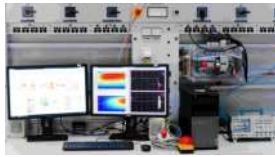
Reluktanz- und Permanentmagnet-Synchronmaschine



Realzeitsystem und Umrichter



Host PC und Sicherheitsbox



Doppelt-gepeiste ASM



Gliederung

2 Einführung

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

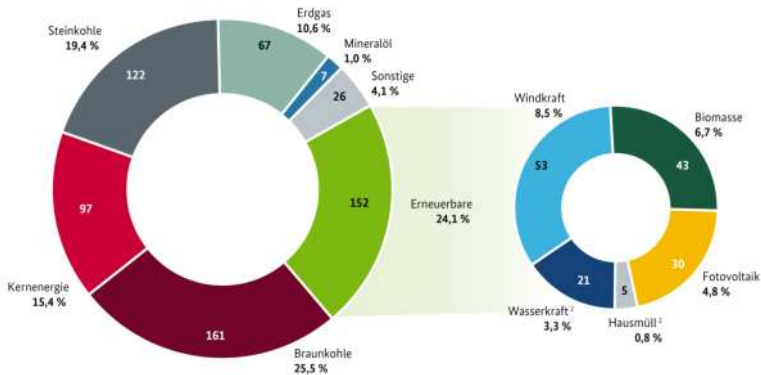
Gliederung

2 Einführung

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

Einführung

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)

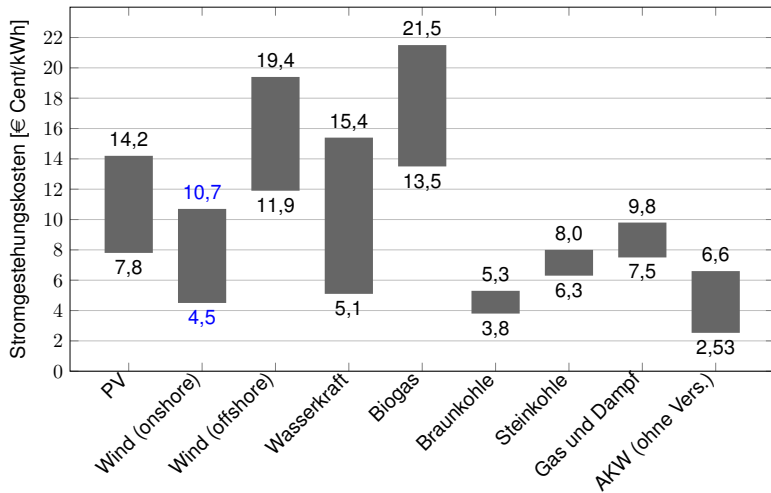
Gliederung

2 Einführung

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

Einführung

Stromgestehungskosten in Deutschland 2013



(basiert auf Abb. 1 in [3], Tab. 4.12 (> 500 kW) in [4], and [5]).

Gliederung

2 Einführung

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

Einführung

Moderne Windkraftanlagen zur Stromerzeugung



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



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



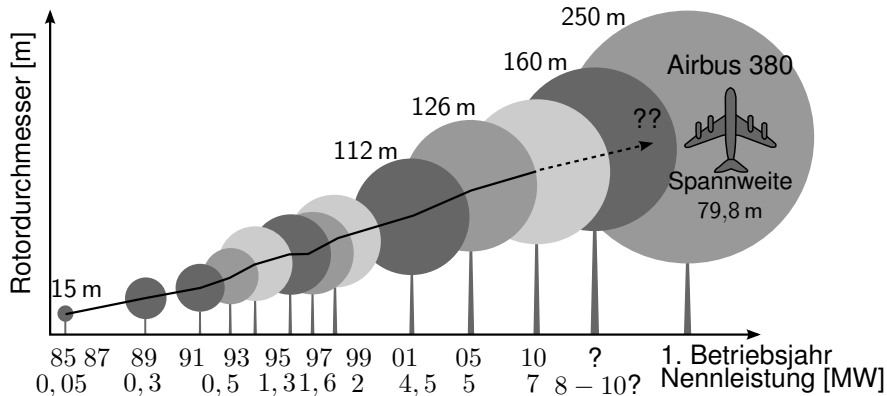
(<http://www.enercon.de/>)

Kernkomponenten

- drei Rotorblätter / Auftriebsprinzip / Luv-Rotor mit horizontaler Achse
- Leistungselektronik (z.B. Back-to-back Converter)
- dominierende Generatortopologien:
 - Synchrongenerator z.B. *ohne* Getriebe (“direct drive”)
 - Doppelt-ge-speister Asynchrongenerator *mit* Getriebe

Einführung

Größenentwicklung von Windkraftanlagen



(based on p. 17 in [6])

Gliederung

2 Einführung

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

Einführung

Innenleben einer Windkraftanlage



(<http://www.youtube.com/watch?v=NG1uGt6qUfM>; Länge: 7:16 min)

Gliederung

2 Einführung

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

Einführung

Elektrische Kernkomponenten: Generatoren

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



Fremderregter
Synchrongenerator
(FESG, z.B. Enercon)

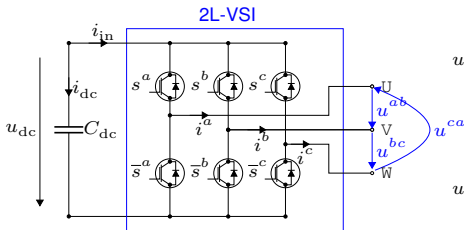


Permanentmagnet
Synchrongenerator
(PMSG, z.B. Siemens)

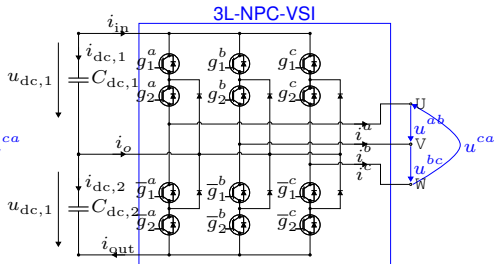


Einführung

Elektrische Kernkomponenten: Umrichter (Leistungselektronik)



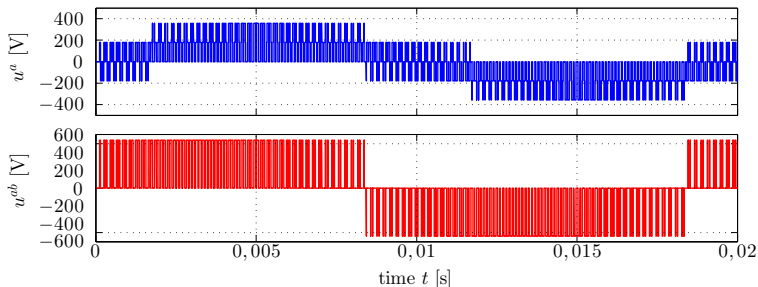
Two-level voltage source inverter (2L-VSI)



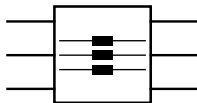
Three-level neutral-point-clamped voltage source inverter (3L-NPC-VSI)

Einführung

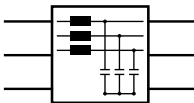
Elektrische Kernkomponenten: Filter (netzseitig)



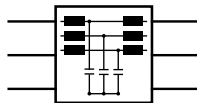
L-Filter
(Stromregelung)



LC-Filter
(Spannungsregelung)



LCL-Filter
(Stromregelung)



Gliederung

3 Regelung der elektrischen Komponenten [1]

■ Warum?

- WKA-Ausfälle
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Netzseitige Regelkreisstruktur
- Simulationsergebnisse

Gliederung

3 Regelung der elektrischen Komponenten [1]

■ Warum?

- WKA-Ausfälle
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Netzseitige Regelkreisstruktur
- Simulationsergebnisse

Gliederung

3 Regelung der elektrischen Komponenten [1]

■ Warum?

■ WKA-Ausfälle

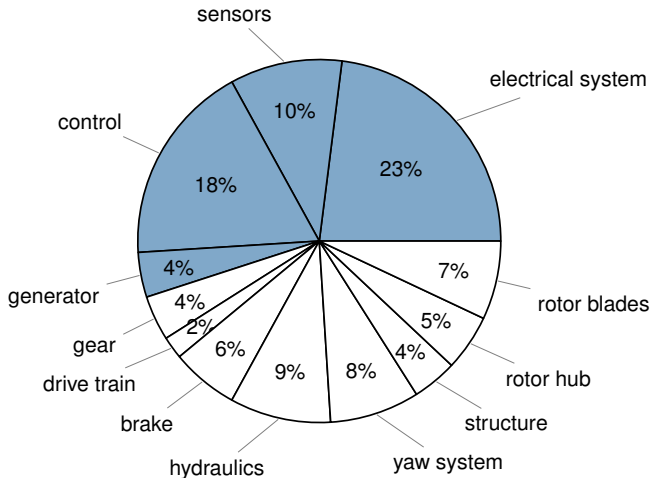
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Netzseitige Regelkreisstruktur
- Simulationsergebnisse

WKA-Ausfälle

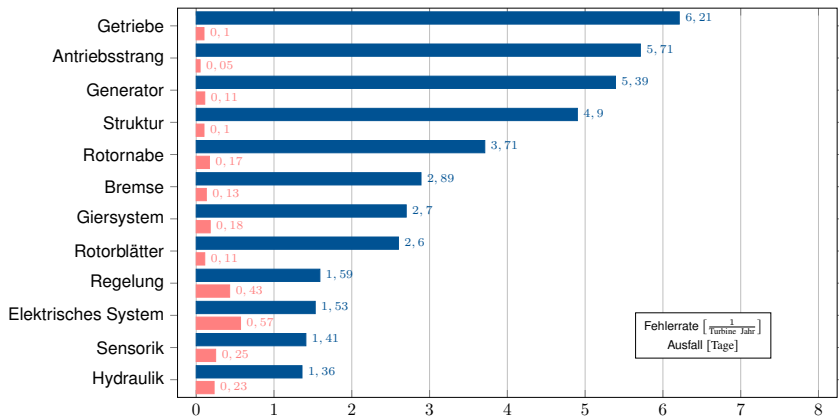
Teilsystemfehler



(basiert auf Abb. 2 in [7])

WKA-Ausfälle

Ausfallrate und Stillstandszeiten



Durchschnittliche Stillstandszeit (über 20 Jahren):

(basierend auf Abb. 2 in [8])

- Elektrisches System: 18,9 Tage
- Regelung: 16,7 Tage
- Getriebe: 13,6 Tage

Gliederung

3 Regelung der elektrischen Komponenten [1]

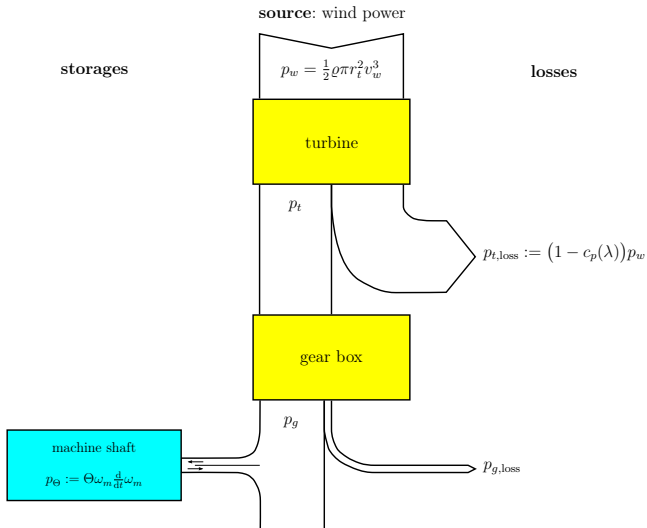
■ Warum?

- WKA-Ausfälle
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

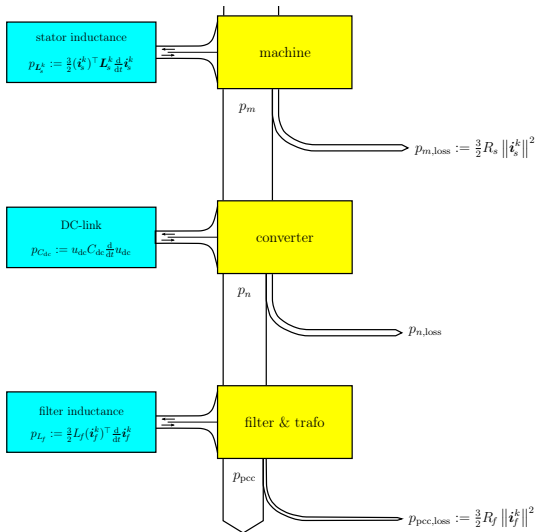
■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Netzseitige Regelkreisstruktur
- Simulationsergebnisse

Leistungsfluss für WKA mit PMSG (Teil 1)



Leistungsfluss für WKA mit PMSG (Teil 2)



Gliederung

3 Regelung der elektrischen Komponenten [1]

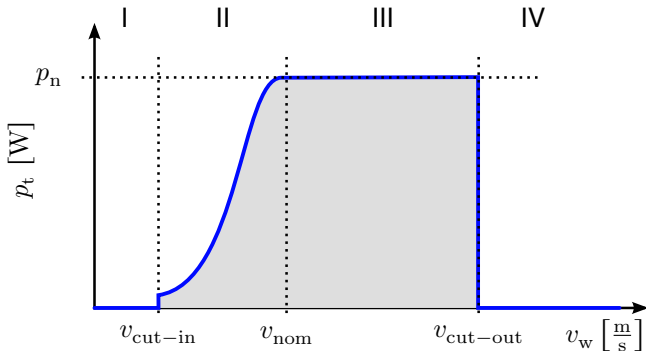
■ Warum?

- WKA-Ausfälle
- Leistungsbetrachtung
- **Betriebsbereiche**
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Netzseitige Regelkreisstruktur
- 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

3 Regelung der elektrischen Komponenten [1]

■ Warum?

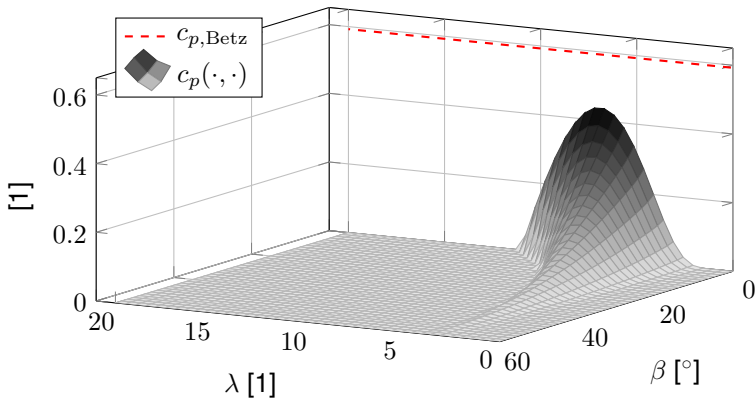
- WKA-Ausfälle
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche

■ Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Netzseitige Regelkreisstruktur
- 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

3 Regelung der elektrischen Komponenten [1]

■ Warum?

- WKA-Ausfälle
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Netzseitige Regelkreisstruktur
- Simulationsergebnisse

Gliederung

3 Regelung der elektrischen Komponenten [1]

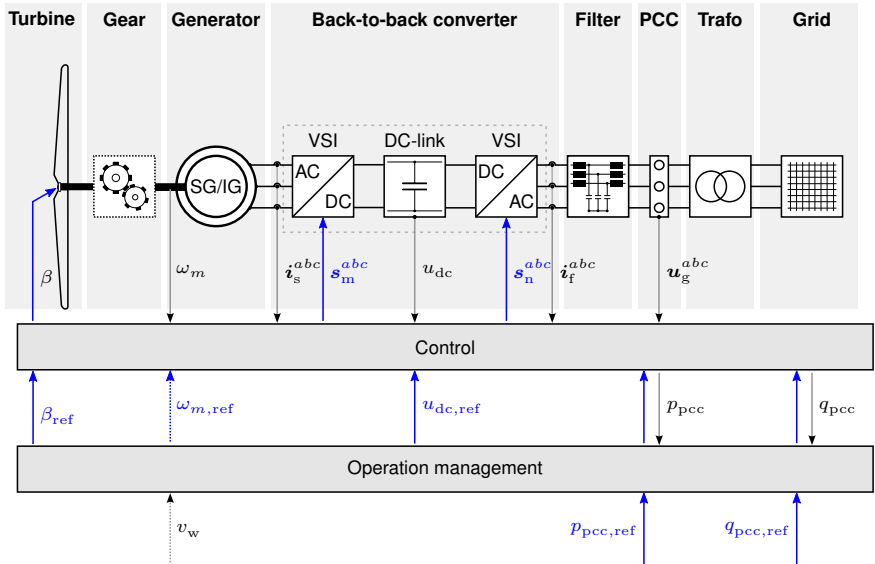
■ Warum?

- WKA-Ausfälle
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Netzseitige Regelkreisstruktur
- Simulationsergebnisse

WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator



Gliederung

3 Regelung der elektrischen Komponenten [1]

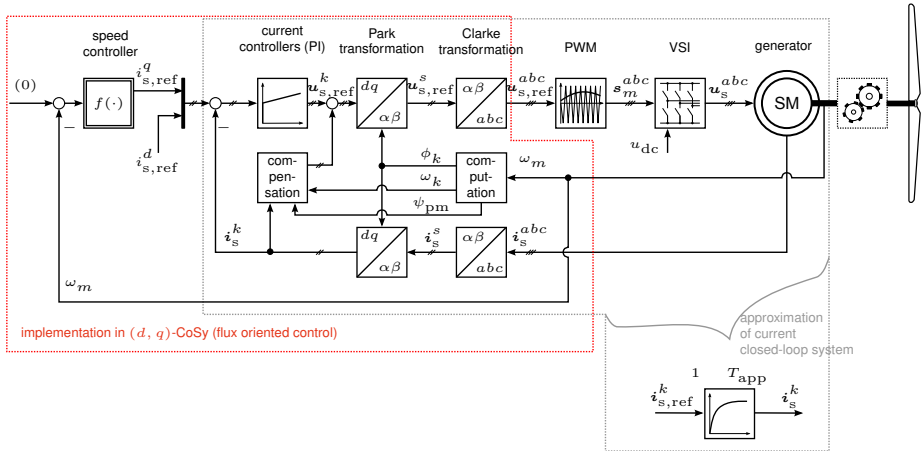
■ Warum?

- WKA-Ausfälle
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- **Generatorseitige Regelkreisstruktur**
- Netzseitige Regelkreisstruktur
- Simulationsergebnisse

Generatorseitige Regelkreisstruktur



Gliederung

3 Regelung der elektrischen Komponenten [1]

■ Warum?

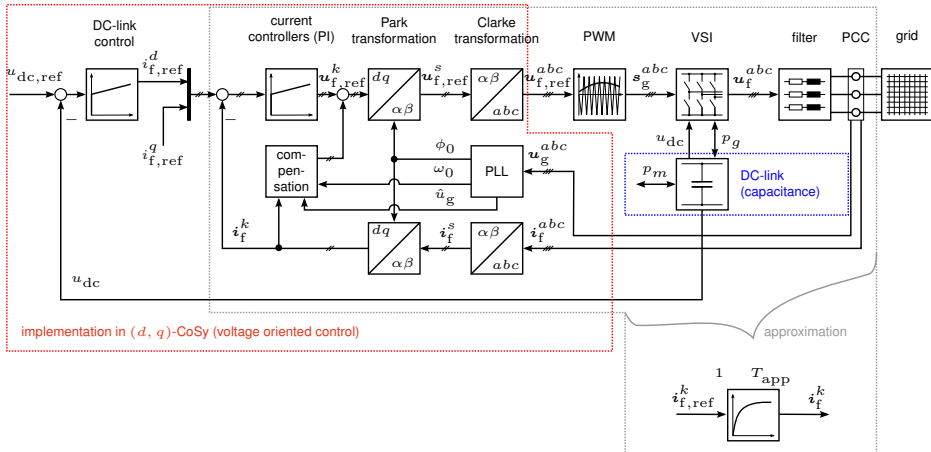
- WKA-Ausfälle
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- **Netzseitige Regelkreisstruktur**
- Simulationsergebnisse

WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator

Netzseitige Regelkreisstruktur



Gliederung

3 Regelung der elektrischen Komponenten [1]

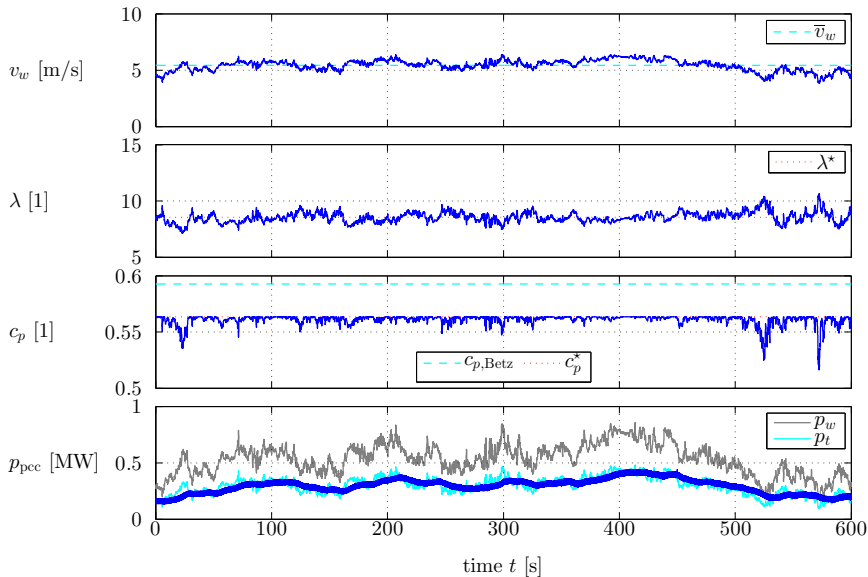
■ Warum?

- WKA-Ausfälle
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert und Turbinenleistung

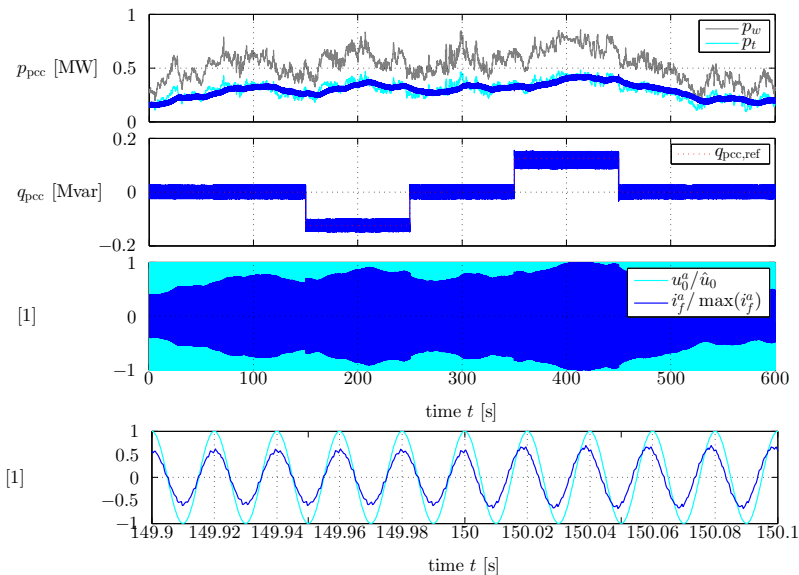
■ Wie?

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Generatorseitige Regelkreisstruktur
- Netzseitige Regelkreisstruktur
- Simulationsergebnisse

Simulationsergebnisse: Generatorseitige Regelung (1)



Simulationsergebnisse: Generatorseitige Regelung (2)



Gliederung

4 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, pp. 1540–1614, 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] A. Hiesl, "Zur aktuellen Wirtschaftlichkeit von Atomkraftwerken anhand von ausgewählten Beispielen," in *Proceedings of the 8. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien*, pp. 1–17, 2013.
- [6] N. Fichaux, J. Beurshens, P. Jensen, J. Wilkes, *et al.*, "Upwind; design limits and solutions for very large wind turbines, a 20 mw turbine is feasible," *European wind energy association. Report*, 2011.
- [7] B. Hahn, M. Durstewitz, and K. Rohrig, "Reliability of wind turbines, experiences of 15 years with 1500 WTs," in *Wind Energy* (J. Peinke, P. Schumann, and S. Barth, eds.), Proceedings of the Euromech Colloquium, pp. 329–332, Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [8] B. T. P. J. Faulstich, S.; Hahn, "Wind turbine downtime and its importance for offshore deployment," *Wind Energy*, vol. 14, pp. 327–337, 2011.