

Nicht-ideale Momentenregelung in Windkraftanlagen

Christoph Hackl

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

24.02.2015

Bayern Innovativ, Nürnberg

MSE Forschergruppe

“Control of renewable energy systems (CRES)”



C. Dirscherl, M.Sc.



C. Hackl, Dr.-Ing.

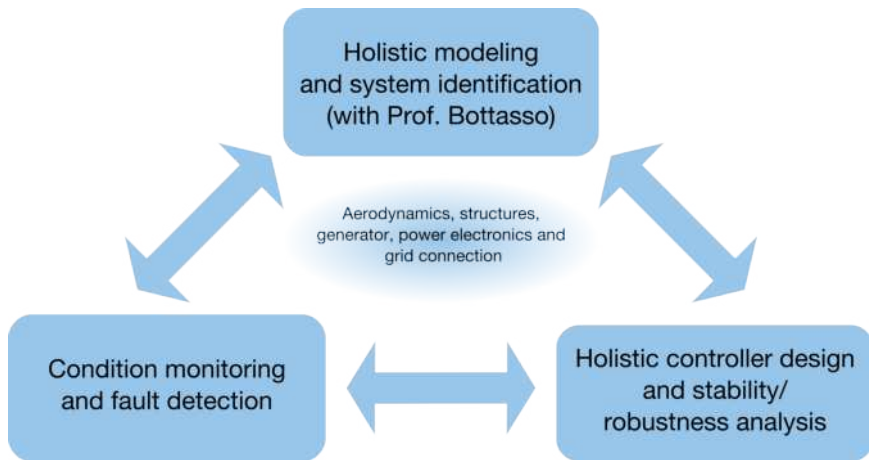


K. Schechner, M.Sc.

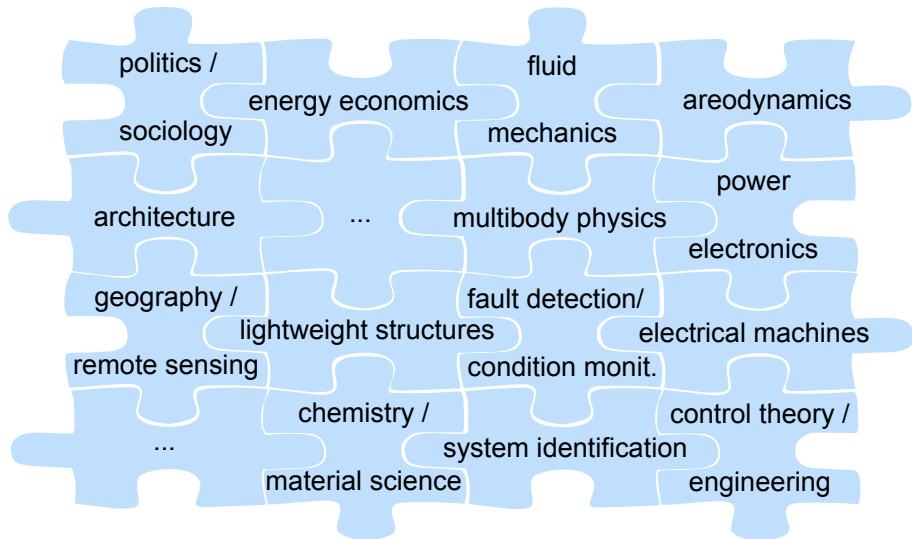
Kontakt und nähere Informationen

- Telefon: (+49) (0)89 289 16688
- email: christoph.hackl@tum.de
- WWW: <http://www.cres.mse.tum.de>
- Die meisten Inhalte sind aus: *C. Dirscherl, C. Hackl, K. Schechner, “Modellierung und Regelung von modernen Windkraftanlagen: Eine Einführung”, Kapitel 24 in D. Schröder, “Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen”, Springer-Verlag, Berlin, 2014 (siehe [1])*

CRES – aktuelle Forschungsschwerpunkte



Energieforschung = Interdisziplinarität



Gliederung

- 1 Motivation und Fakten
- 2 Moderne Windkraftanlagen
- 3 Nicht-ideale Momentenregelung

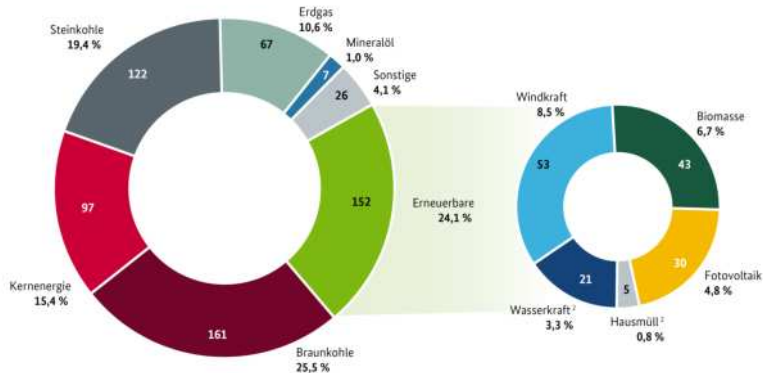
Gliederung

- 1 Motivation und Fakten
 - Bruttostromerzeugung in Deutschland
 - Windkraft in Deutschland
 - Stromgestehungskosten in Deutschland

Gliederung

- 1 Motivation und Fakten
 - Bruttostromerzeugung in Deutschland
 - Windkraft in Deutschland
 - Stromgestehungskosten in Deutschland

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)

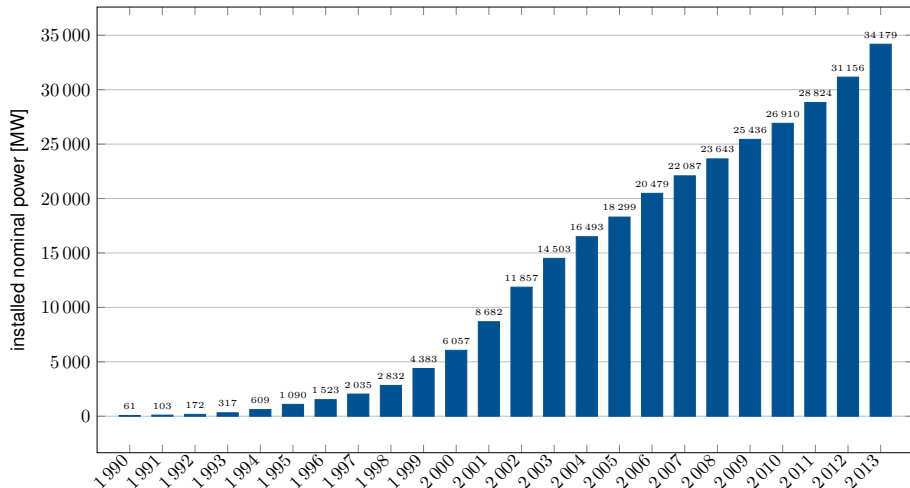
(* Nettostromerzeugung = Bruttostromerzeugung – Eigenenergieverbrauch des Kraftwerks)

Gliederung

1 Motivation und Fakten

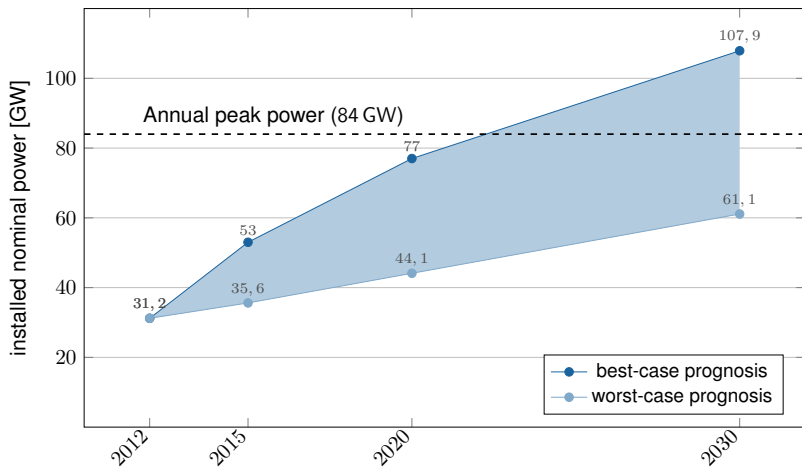
- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- Windkraft in Deutschland
- Stromgestehungskosten in Deutschland

Installierte Windnennleistung in Deutschland 1990-2013



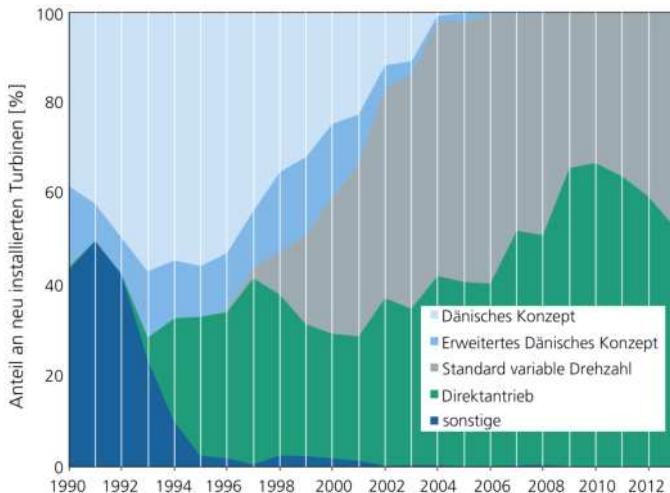
(basiert auf Abb. 4 in [3])

Prognose über Verlauf der installierten Windnennleistung in Deutschland 2030

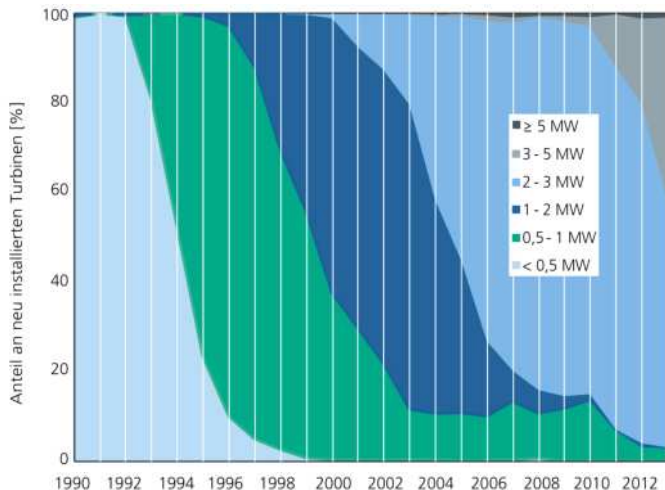


(Abb. basiert auf S. 6 in [4])

Installierte **Generatortopologien** in Deutschland 1990-2013 (aus [3])



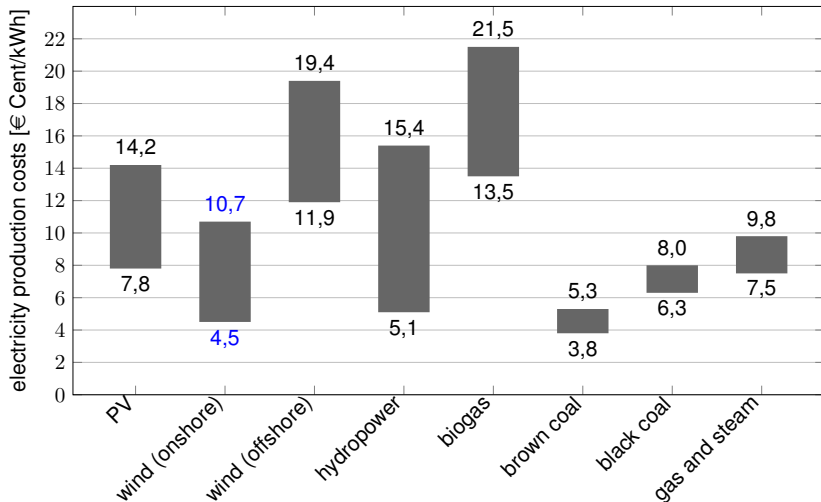
Installierte **Turbinengrößen** in Deutschland 1990-2013 (aus [3])



Gliederung

- 1** Motivation und Fakten
 - Bruttostromerzeugung in Deutschland
 - Windkraft in Deutschland
 - Stromgestehungskosten in Deutschland

Stromgestehungskosten in Deutschland 2013



(basiert auf Abb. 1 in [5] and Tab. 4.12 (> 500 kW) in [6]).

Gliederung

2 Moderne Windkraftanlagen

- Kernkomponenten und Entwicklung
- Konfigurationen von Windkraftanlagen (WKA)
- Verfügbarkeit und Anlagenfehler
- Betriebsbereiche
- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
 - Leistungsfluss
 - Leistungsbeiwert
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich II)
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich III)

Gliederung

2 Moderne Windkraftanlagen

- Kernkomponenten und Entwicklung
- Konfigurationen von Windkraftanlagen (WKA)
- Verfügbarkeit und Anlagenfehler
- Betriebsbereiche
- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
 - Leistungsfluss
 - Leistungsbeiwert
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich II)
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich III)

Moderne Windkraftanlagen zur Stromerzeugung



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



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

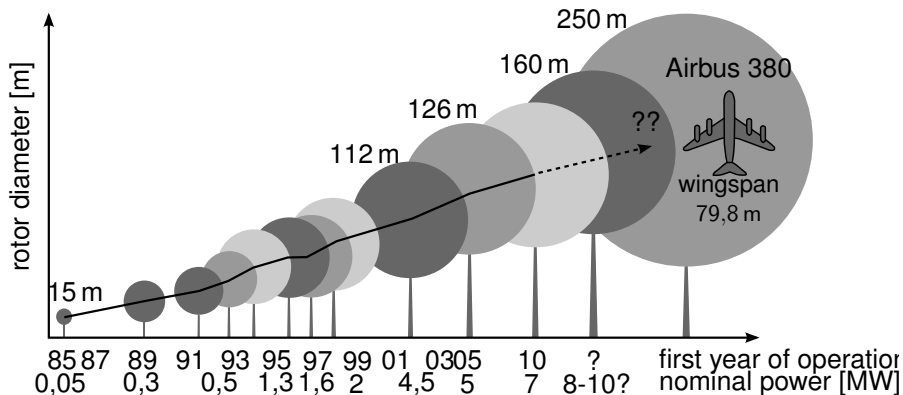


(<http://www.enercon.de/>)

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

Entwicklung der Windkraftanlagen



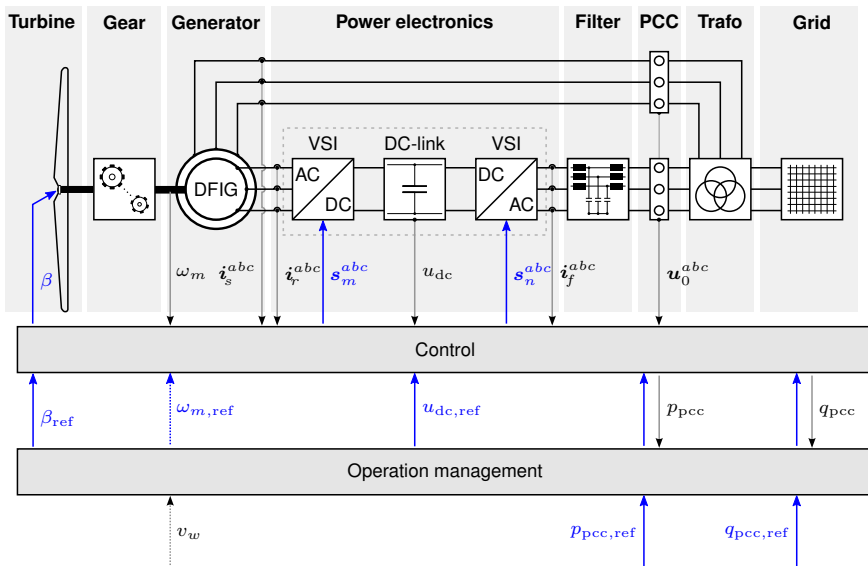
(basiert auf p. 17 in [7])

Gliederung

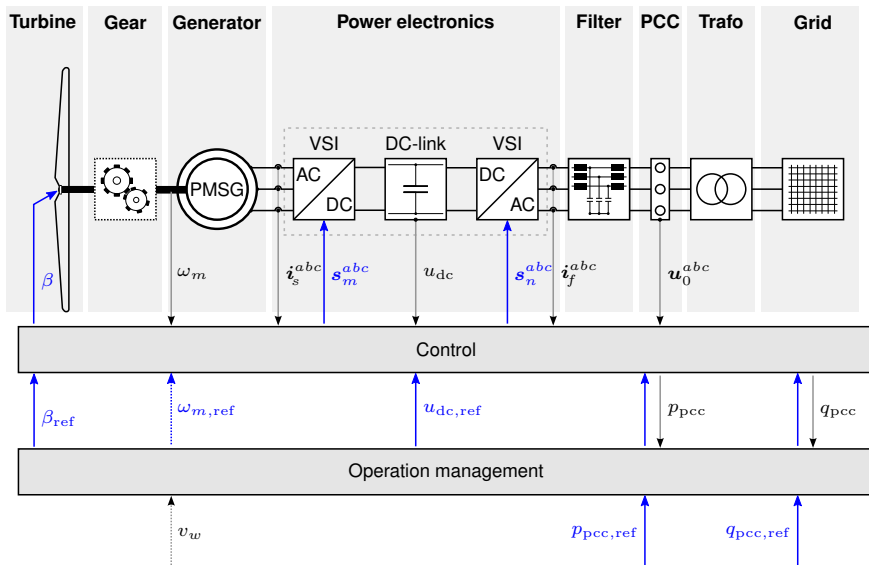
2 Moderne Windkraftanlagen

- Kernkomponenten und Entwicklung
- **Konfigurationen von Windkraftanlagen (WKA)**
- Verfügbarkeit und Anlagenfehler
- Betriebsbereiche
- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
 - Leistungsfluss
 - Leistungsbeiwert
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich II)
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich III)

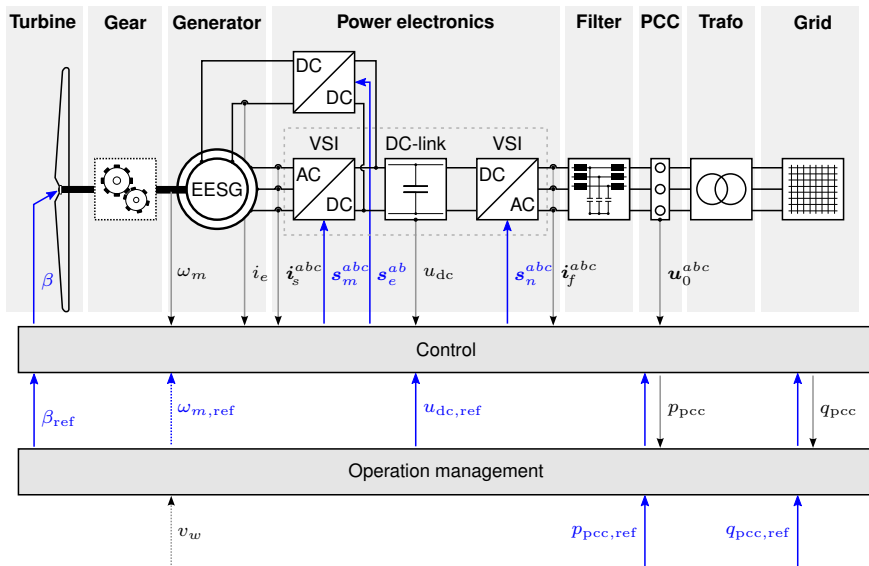
WKA mit doppelt-gespeistem Asynchrongenerator



WKA mit Permanentmagnet-Synchronousgenerator



WKA mit fremderregtem Synchrongenerator

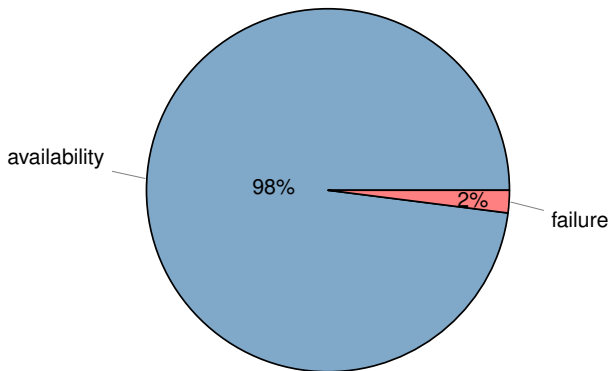


Gliederung

2 Moderne Windkraftanlagen

- Kernkomponenten und Entwicklung
- Konfigurationen von Windkraftanlagen (WKA)
- **Verfügbarkeit und Anlagenfehler**
- Betriebsbereiche
- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
 - Leistungsfluss
 - Leistungsbeiwert
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich II)
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich III)

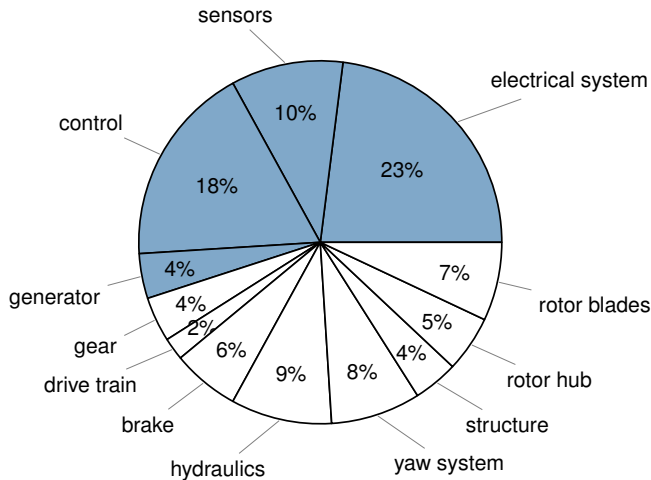
Verfügbarkeit (aus einer Studie mit 1 500 WT, [8])



Während einer durchschnittlichen Lebensdauer von 20 Jahren (=7 400 Tage):

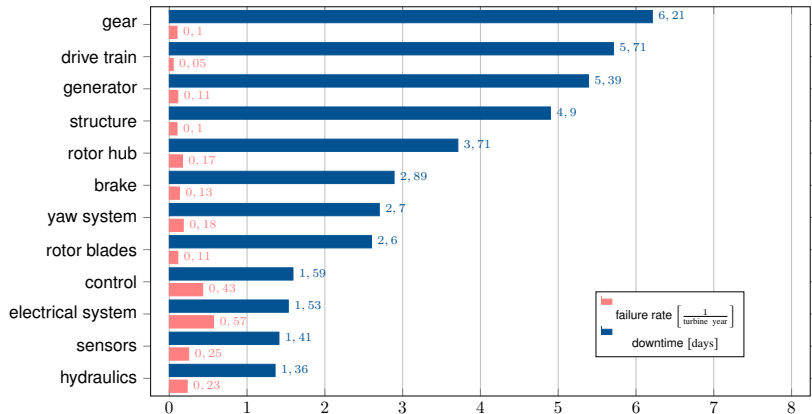
- Verfügbarkeit: 7 154 Tage
- Fehler: 146 Tage (Ausfall)

Anteil der Fehlerursachen verschiedener Teilsysteme



(basiert auf Abb. 2 in [8])

Fehlerraten und Stillstandzeiten



Durchschnittliche Ausfallzeit aufgrund von (während 20 Jahren): (basiert auf Abb. 2 in [9])

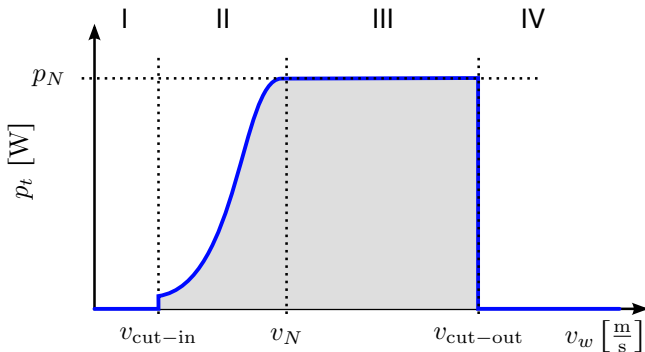
- Elektrisches System: 18,9 Tage
- Regelung: 16,7 Tage
- Getriebe: 13,6 Tage

Gliederung

2 Moderne Windkraftanlagen

- Kernkomponenten und Entwicklung
- Konfigurationen von Windkraftanlagen (WKA)
- Verfügbarkeit und Anlagenfehler
- **Betriebsbereiche**
- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
 - Leistungsfluss
 - Leistungsbeiwert
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich II)
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich III)

Betriebsbereiche für unterschiedliche 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 Moderne Windkraftanlagen

- Kernkomponenten und Entwicklung
- Konfigurationen von Windkraftanlagen (WKA)
- Verfügbarkeit und Anlagenfehler
- Betriebsbereiche
- **Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator**
 - Leistungsfluss
 - Leistungsbeiwert
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich II)
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich III)

WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator

Windturbine SWT-2.3-113



<http://www.siemens.com/press/de/pressebilder/>

Permanentmagnet-
synchrongenerator (PMSG)



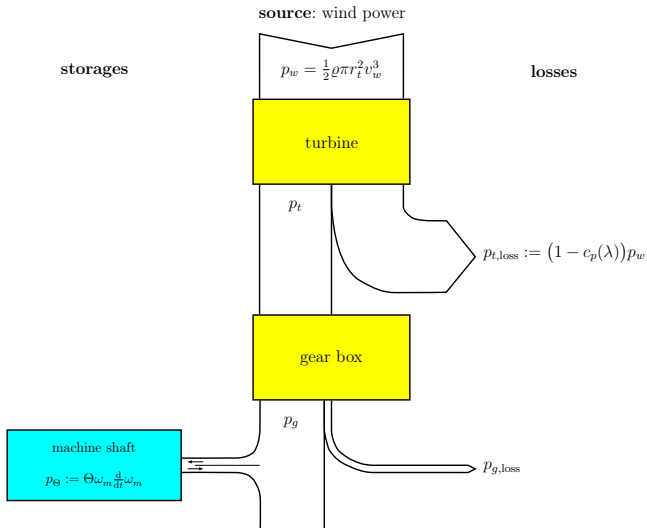
<http://www.siemens.com/press/de/pressebilder/>

Gliederung

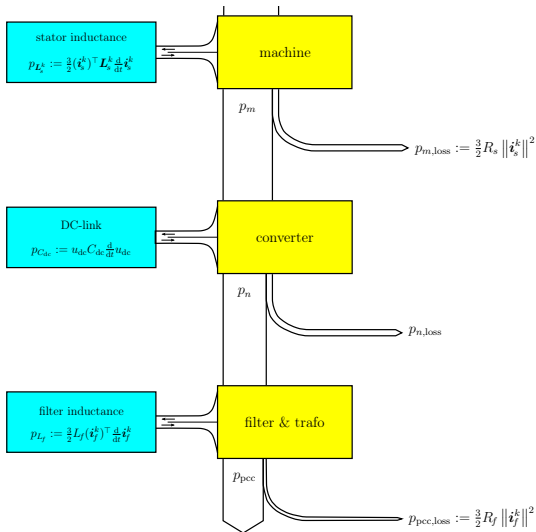
2 Moderne Windkraftanlagen

- Kernkomponenten und Entwicklung
- Konfigurationen von Windkraftanlagen (WKA)
- Verfügbarkeit und Anlagenfehler
- Betriebsbereiche
- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
 - Leistungsfluss
 - Leistungsbeiwert
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich II)
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich III)

Leistungsfluss (Teil 1)



Leistungsfluss (Teil 2)



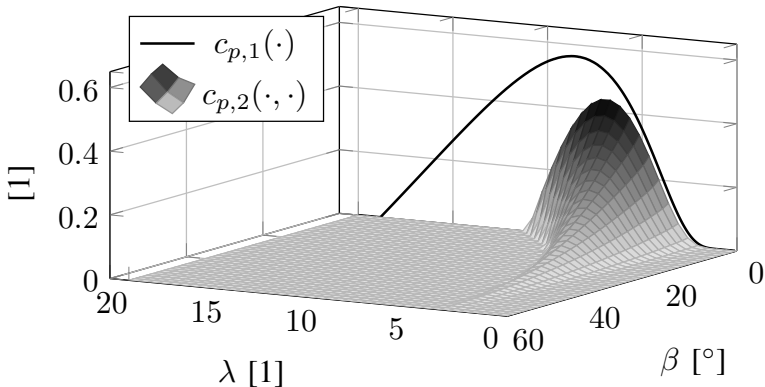
sink: point of common coupling (PCC)

Gliederung

2 Moderne Windkraftanlagen

- Kernkomponenten und Entwicklung
- Konfigurationen von Windkraftanlagen (WKA)
- Verfügbarkeit und Anlagenfehler
- Betriebsbereiche
- **Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator**
 - Leistungsfluss
 - **Leistungsbeiwert**
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich II)
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich III)

Leistungsbeiwert



Turbinenleistung

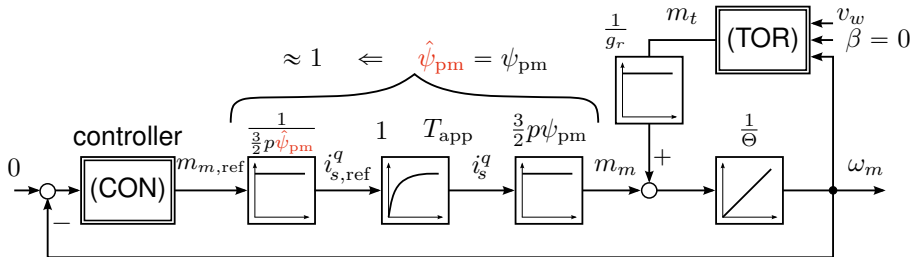
$$p_t(t) = c_{p,2}(\lambda, \beta) p_w(t) = c_{p,2}(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho \pi r_t^2 v_w(t)^3 \leq c_{p,\text{Betz}} \frac{1}{2} \rho \pi r_t^2 v_w(t)^3 \quad (1)$$

Gliederung

2 Moderne Windkraftanlagen

- Kernkomponenten und Entwicklung
- Konfigurationen von Windkraftanlagen (WKA)
- Verfügbarkeit und Anlagenfehler
- Betriebsbereiche
- **Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator**
 - Leistungsfluss
 - Leistungsbeiwert
 - **Geschwindigkeitsregelung (Bereich II)**
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich III)

Bereich II: Geschwindigkeitsregelung



Turbinenmoment: $m_t(v_w, 0, \omega_m) = c_0 \frac{c_P(v_w, 0)}{\lambda^3} \omega_m^2$ mit $\lambda = \frac{r_t \omega_m}{g_r v_w}$ (TOR)

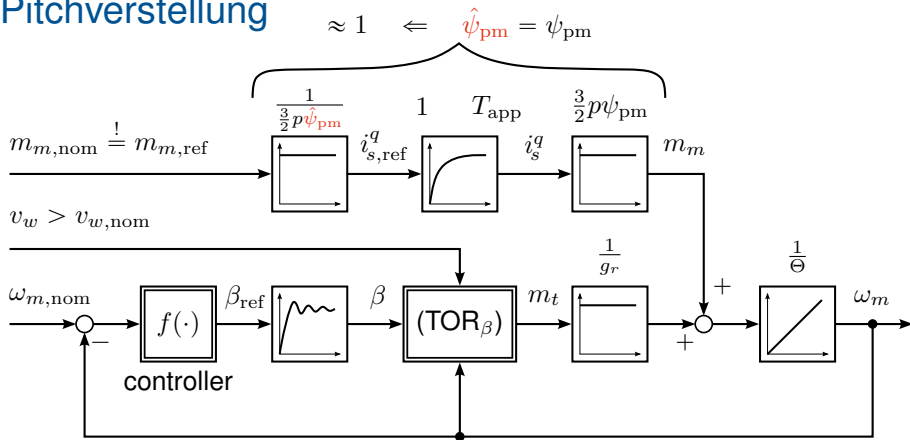
Generatormoment: $m_{m,ref} = -k_p^* \omega_m^2 \approx m_m$ mit $k_p^* = c_0 \frac{c_P(\lambda^*, 0)}{(\lambda^*)^3}$ (CON)

Gliederung

2 Moderne Windkraftanlagen

- Kernkomponenten und Entwicklung
- Konfigurationen von Windkraftanlagen (WKA)
- Verfügbarkeit und Anlagenfehler
- Betriebsbereiche
- **Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator**
 - Leistungsfluss
 - Leistungsbeiwert
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich II)
 - Geschwindigkeitsregelung (Bereich III)

Bereich III: Geschwindigkeitsregelung durch Pitchverstellung



Turbinenmoment: $m_t(v_w, \beta, \omega_m) = c_0 \frac{c_P(v_w, \beta)}{\lambda^3} \omega_m^2$ mit $\lambda = \frac{r_t \omega_m}{g_r v_w}$ (TOR _{β})

Gliederung

3 Nicht-ideale Momentenregelung

- Ursachen
- Auswirkungen
- Lösungsvorschläge

Gliederung

3 Nicht-ideale Momentenregelung

- Ursachen
- Auswirkungen
- Lösungsvorschläge

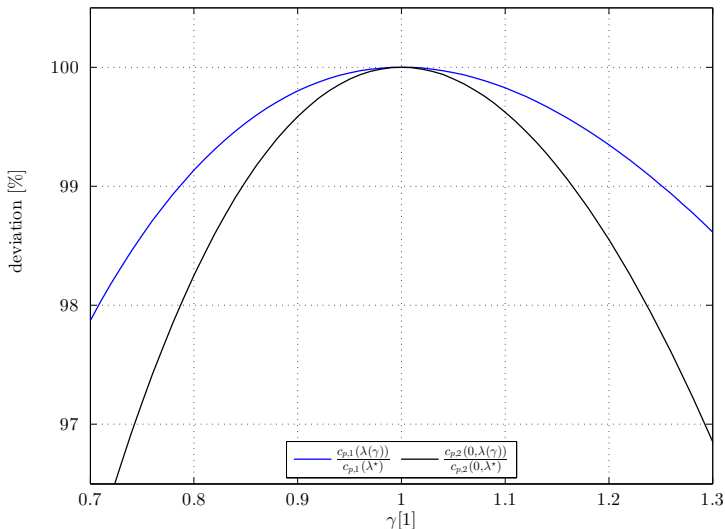
Ursachen

... für nicht ideale "Momentenregelung" (statische Betrachtung):

$$m_{m,\text{ref}} = \gamma m_m, \text{ mit } \gamma \neq 1 \implies \begin{cases} \text{Be. II:} & c_p(\beta, \lambda(\gamma)) \neq c_p(\beta, \lambda^*) \\ \text{Be. III:} & m_{m,\text{ref}} = m_{m,\text{nom}} = \gamma m_m \end{cases}$$

- Parameterunsicherheiten
- Nichtlinearitäten in der Flusserzeugung
- Reluktanzeffekte
- Fehler in Strommessung (z.B. Offset)
- ...

Auswirkungen auf Leistungsbeiwert (Bereich II)

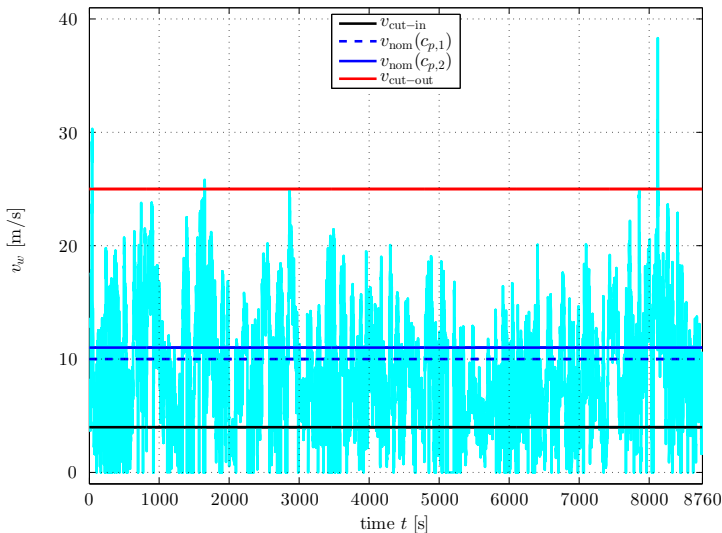


Gliederung

3 Nicht-ideale Momentenregelung

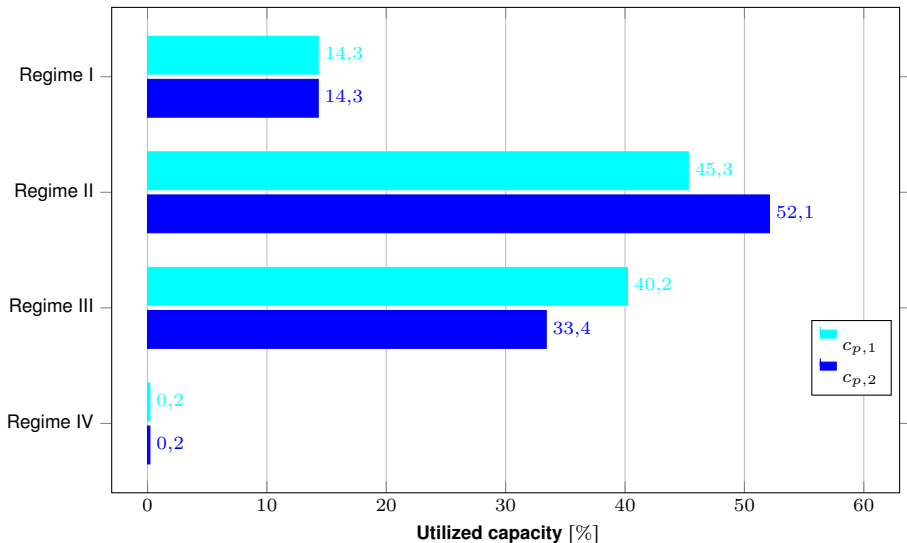
- Ursachen
- Auswirkungen
- Lösungsvorschläge

Simulationsszenario für WKA mit $c_{p,1}(\beta, \lambda)$ o. $c_{p,2}(\beta, \lambda)$

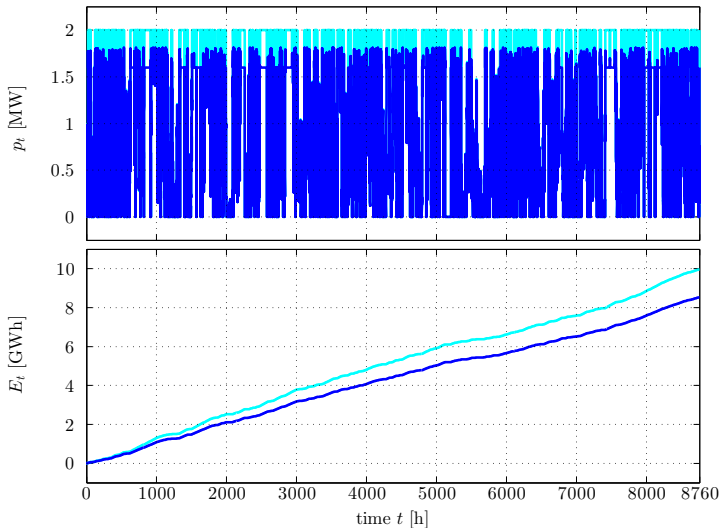


(FINO1: Jahreswinddaten vom 24.11.2012–24.11.2013)

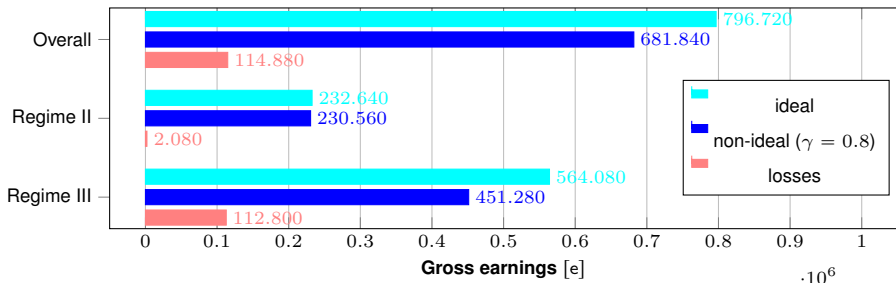
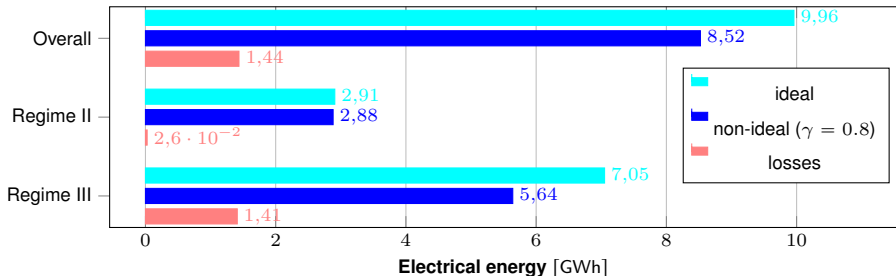
Auslastung der WKA mit $c_{p,1}(\beta, \lambda)$ o. $c_{p,2}(\beta, \lambda)$



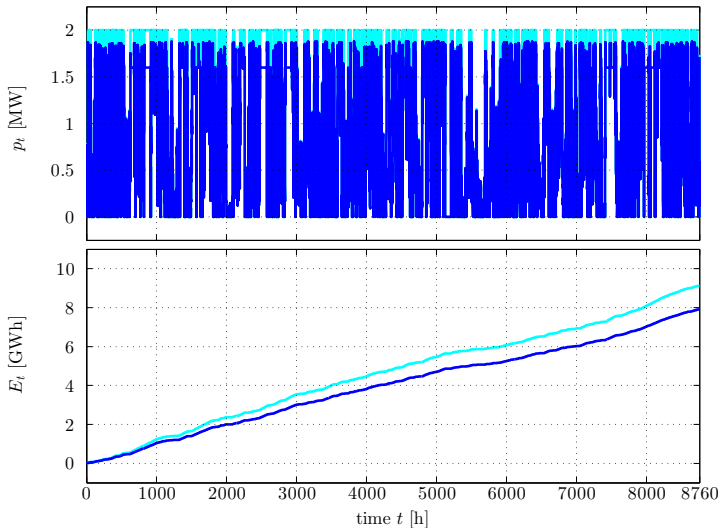
Auswirkungen auf WKA mit $c_{p,1}(\beta, \lambda)$: 14,5 % Verlust



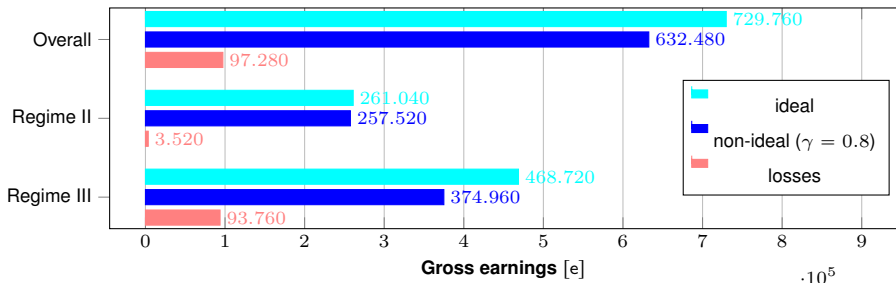
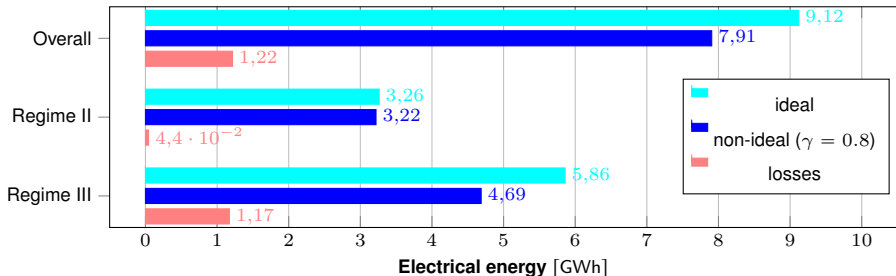
Auswirkungen auf WKA mit $c_{p,1}(\beta, \lambda)$: 14,5 % Verlust



Auswirkungen auf WKA mit $c_{p,2}(\beta, \lambda)$: 13,4 % Verlust



Auswirkungen auf WKA mit $c_{p,2}(\beta, \lambda)$: 13,4 % Verlust



Gliederung

3 Nicht-ideale Momentenregelung

- Ursachen
- Auswirkungen
- Lösungsvorschläge

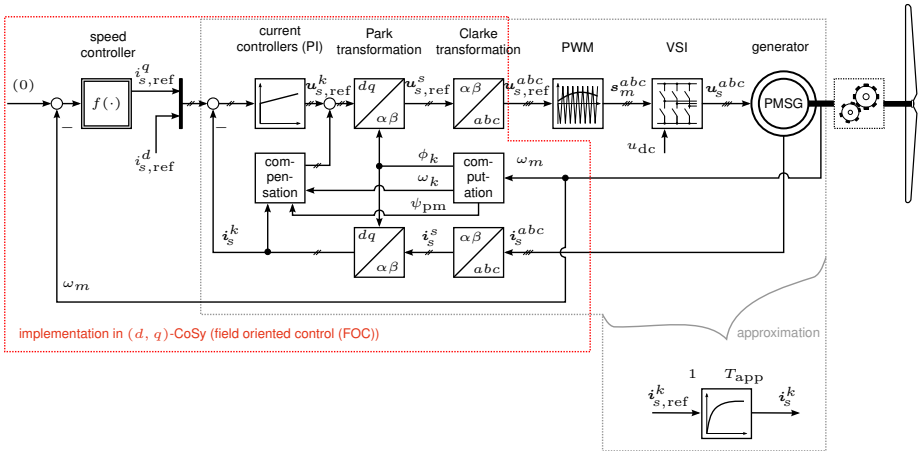
Lösungsvorschläge

- “Flache” c_p -Kurve ($\rightarrow$ Aerodynamik) [$\rightarrow$ Forschungsaufgabe]
- Überlagerter Regelkreis mit Geschwindigkeitsreferenz (genaue Windmessung nötig) $\rightarrow$ Forschungsaufgabe
- Momentensensor (teuer!)
- Leistungsmessung und Rückführung (genaue Systemkenntnis notwendig) $\rightarrow$ Forschungsaufgabe
- Online -Parameterschätzung $\rightarrow$ Forschungsaufgabe

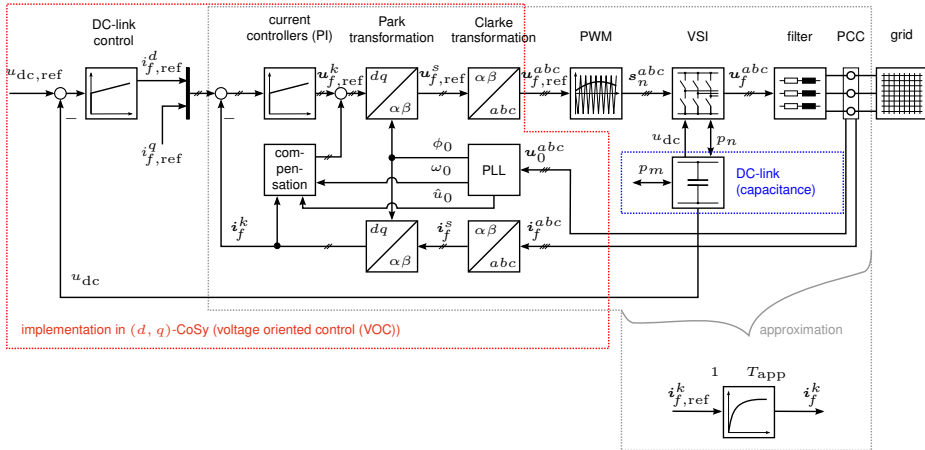
Gliederung

4 Anhänge

Generatorseitige Regelung von Windkraftanlagen



Netzseitige Regelung von Windkraftanlagen



Literaturliste

- [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] V. Berkhout, S. Faulstich, P. Görg, B. Hahn, K. Linke, M. Neuschäfer, S. Pfaffel, K. Rafik, K. Rohrig, R. Rothkegel, and M. Zieße, "Windenergiereport Deutschland 2013," tech. rep., Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), 2014.
- [4] "dena-Verteilnetzstudie – Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030," tech. rep., Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2012.
- [5] C. Kost, J. N. Mayer, J. Thomsen, N. Hartmann, C. Senkpiel, S. Philipps, S. Nold, S. Lude, and T. Schlegel, "Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien," tech. rep., Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), 2013.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] B. T. P. J. Faulstich, S.; Hahn, "Wind turbine downtime and its importance for offshore deployment," *Wind Energy*, vol. 14, pp. 327–337, 2011.