

Modellierung und Regelung von Windkraftanlagen

— Eine Einführung —

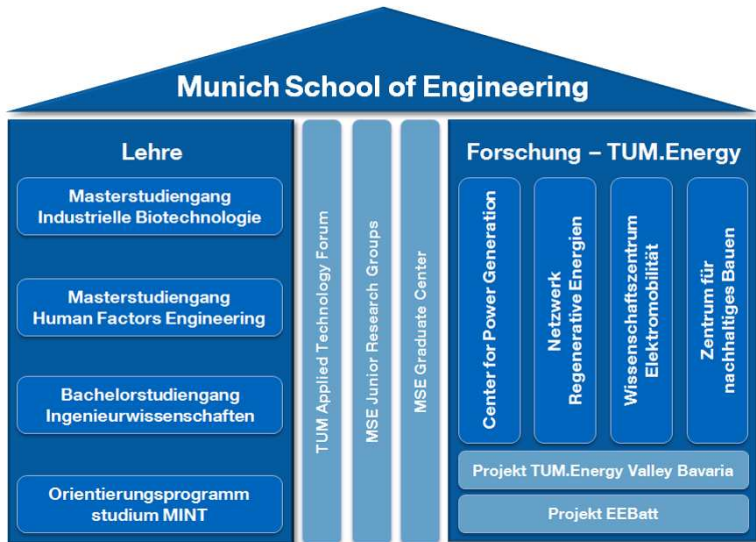
Christoph Hackl

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

02.04.2015

Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik, TU Ilmenau

Munich School of Engineering (MSE)



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])*

Gliederung

- 1 Motivation und Fakten
- 2 Moderne Windkraftanlagen
- 3 Modellierung und Regelung
- 4 Betriebsführung und Ausblick

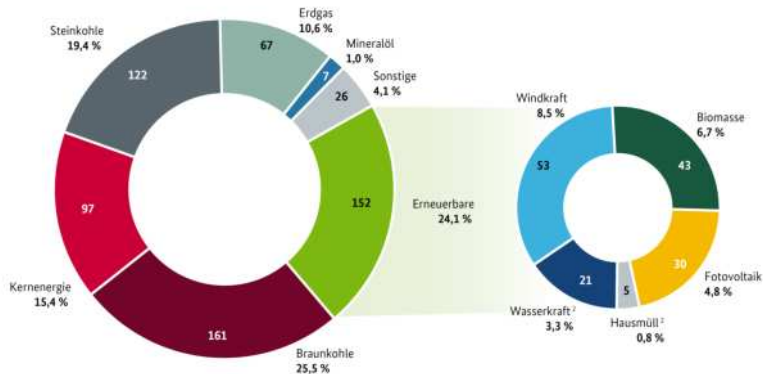
Gliederung

- 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)

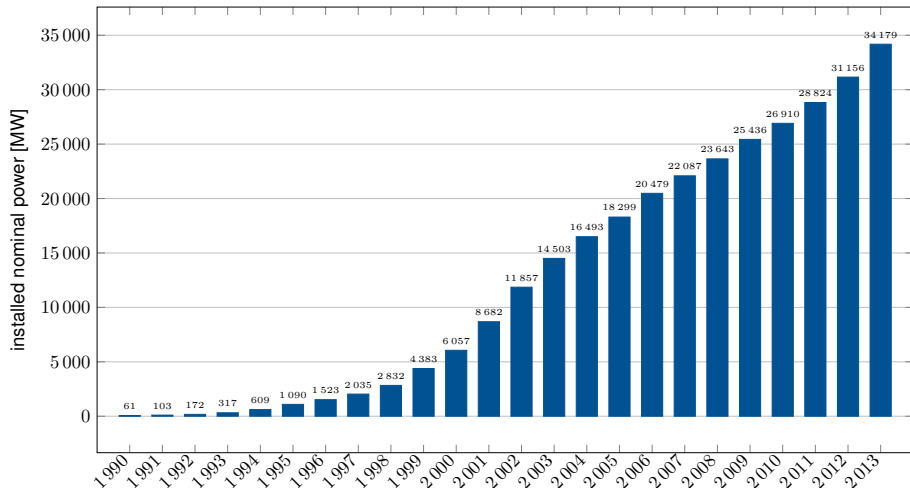
(* Nettostromerzeugung = Bruttostromerzeugung – Eigenenergieverbrauch des Kraftwerks)

Gliederung

1 Motivation und Fakten

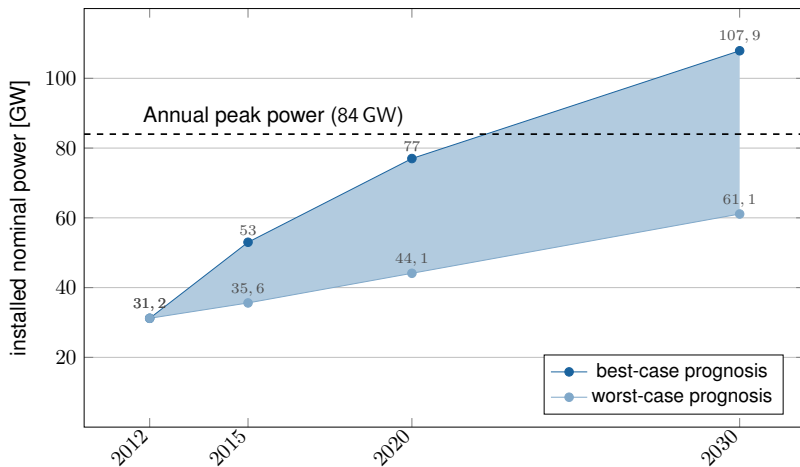
- Bruttostromerzeugung in Deutschland
- Windkraft in Deutschland
- Stromgestehungskosten in Deutschland

Installierte Windnennleistung in Deutschland 1990-2013



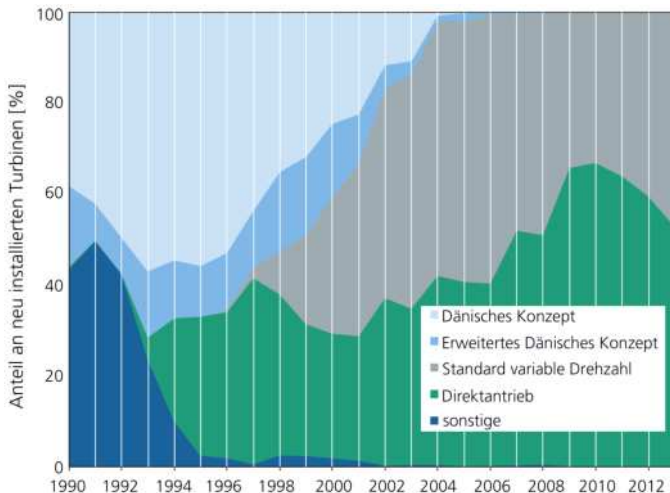
(basiert auf Abb. 4 in [3])

Prognose über Verlauf der installierten Windnennleistung in Deutschland 2030

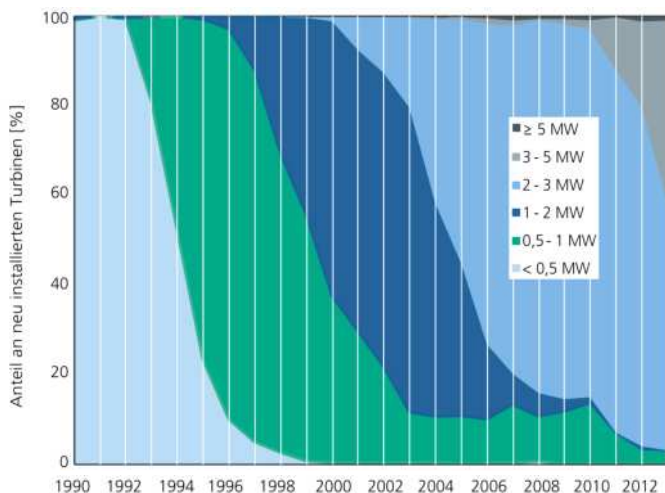


(Abb. basiert auf S. 6 in [4])

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



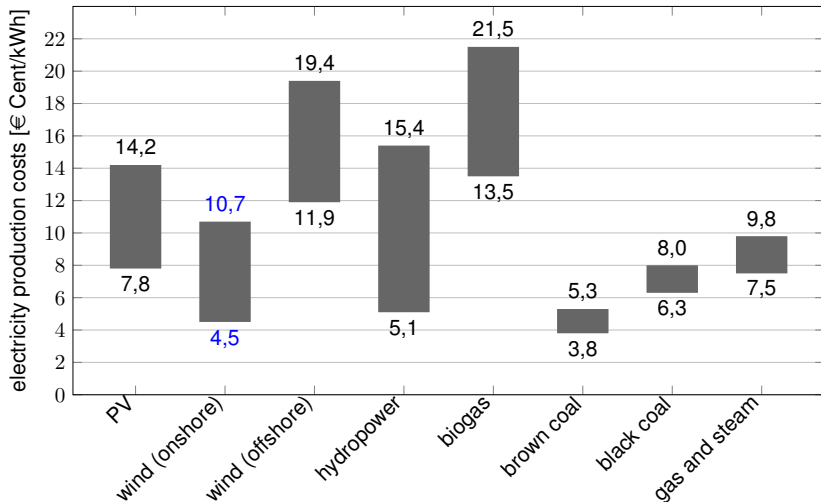
Installierte **Turbinengrößen** in Deutschland 1990-2013 (aus [3])



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

Gliederung

- 2** Moderne Windkraftanlagen
 - Kernkomponenten und Entwicklung
 - Konfigurationen von Windkraftanlagen (WKA)
 - Verfügbarkeit und Anlagenfehler
 - Betriebsbereiche

Moderne Windkraftanlagen zur Stromerzeugung



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



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

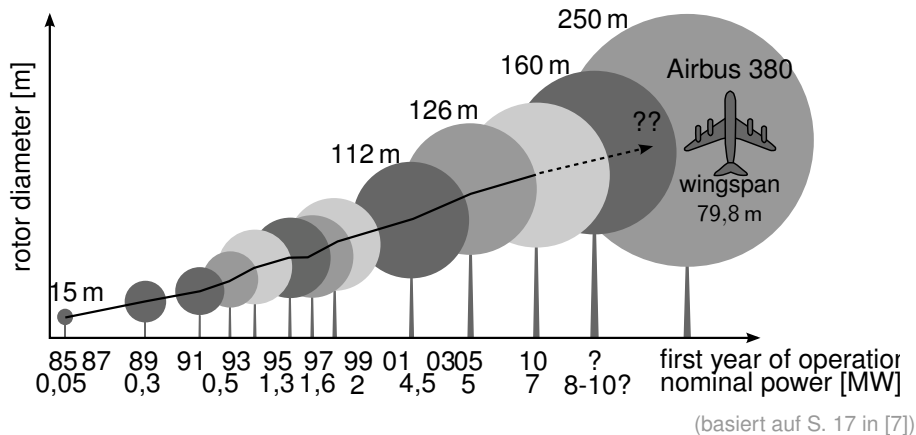


(<http://www.enercon.de/>)

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

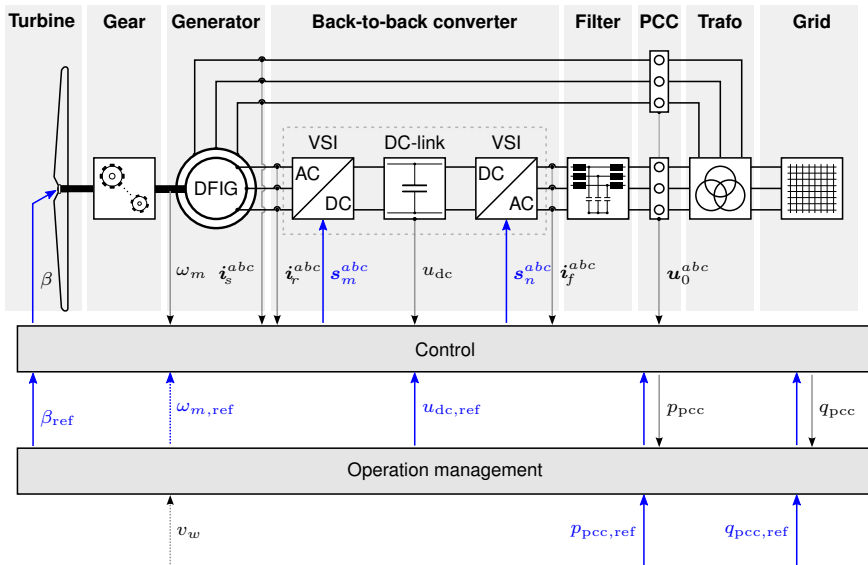


Gliederung

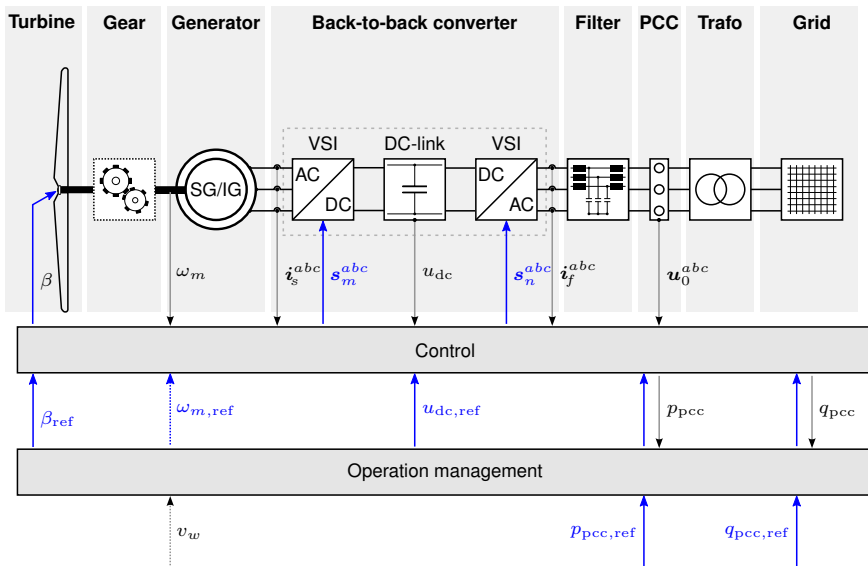
2 Moderne Windkraftanlagen

- Kernkomponenten und Entwicklung
- Konfigurationen von Windkraftanlagen (WKA)
- Verfügbarkeit und Anlagenfehler
- Betriebsbereiche

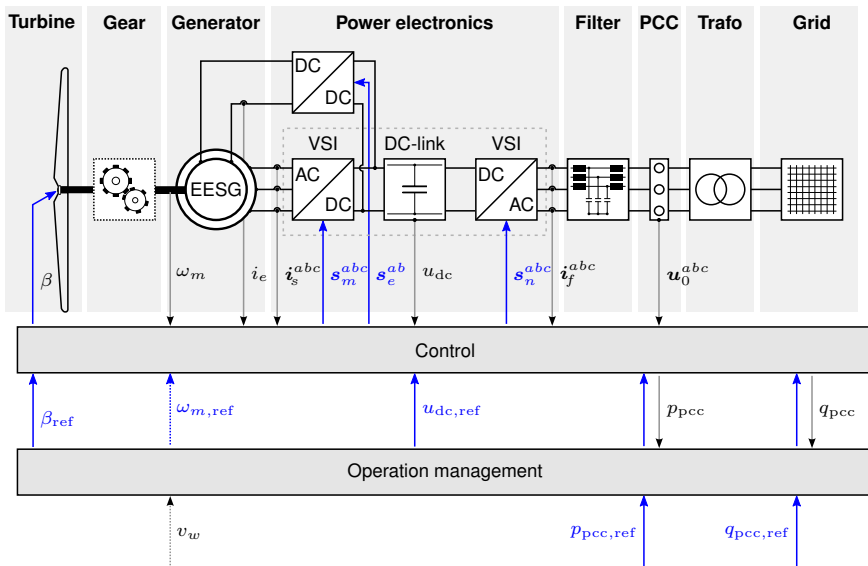
WKA mit doppelt-gespeistem Asynchrongenerator



WKA mit Permanentmagnet-Synchronousgenerator

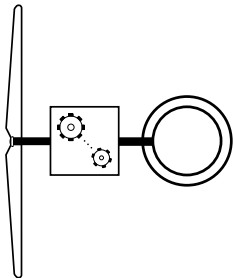


WKA mit fremderregtem Synchrongenerator

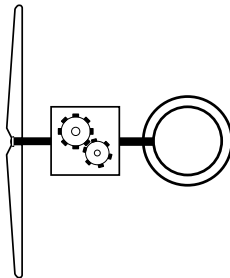


Getriebe

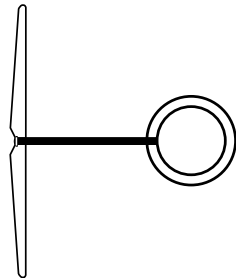
mehrstufiges Getriebe



einstufiges Getriebe



Direktantrieb
(ohne Getriebe)



Generatoren

Doppelt-gespeister
Asynchrongenerator
(z.B. ABB)



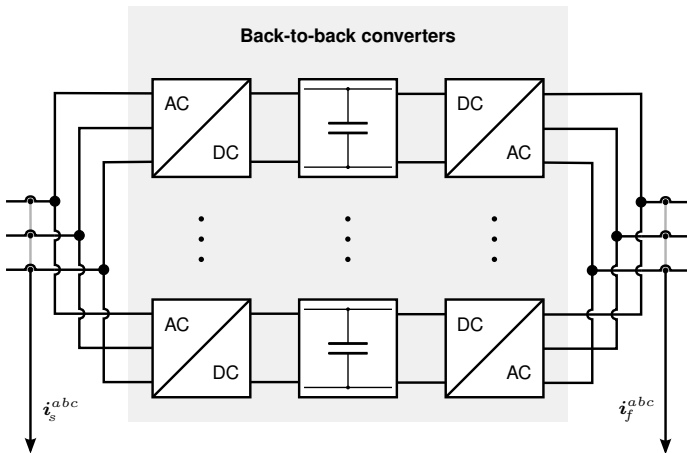
Fremderregter
Synchrongenerator
(z.B. Enercon)



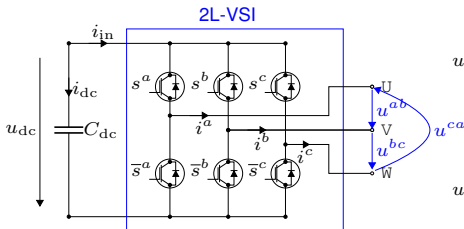
Permanentmagnet
Synchrongenerator
(z.B. Siemens)



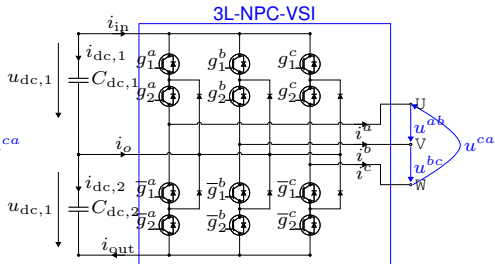
Parallelschaltung von Back-to-Back Umrichtern



Umrichter

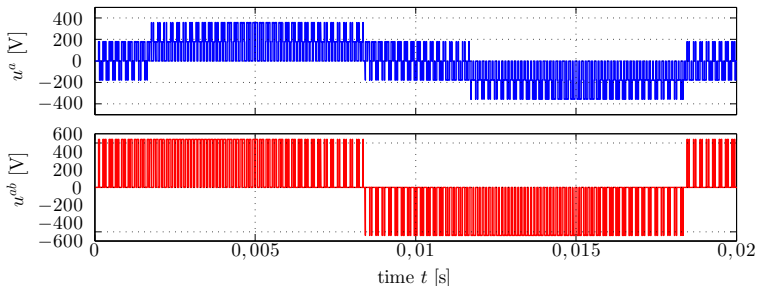


Two-level voltage source inverter (2L-VSI)

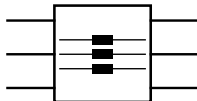


Three-level neutral-point-clamped voltage source inverter (3L-NPC-VSI)

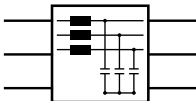
Filter



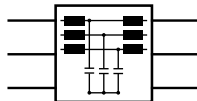
L-filter
(current control)



LC-filter
(voltage control)



LCL-filter
(current control)

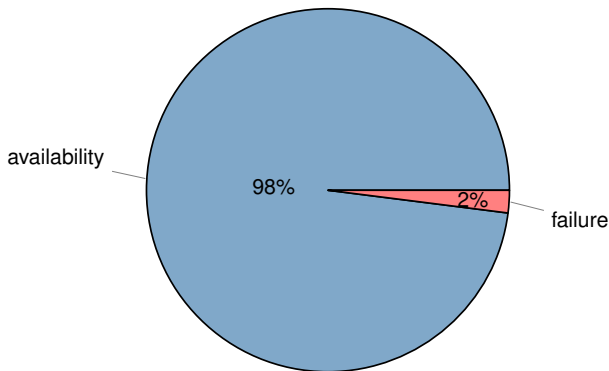


Gliederung

2 Moderne Windkraftanlagen

- Kernkomponenten und Entwicklung
- Konfigurationen von Windkraftanlagen (WKA)
- **Verfügbarkeit und Anlagenfehler**
- Betriebsbereiche

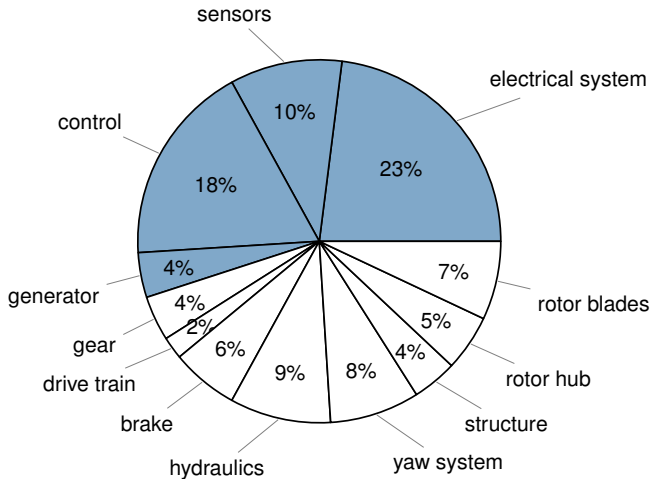
Verfügbarkeit (aus einer Studie mit 1 500 WT, [8])



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

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

Anteil der Fehlerursachen verschiedener Teilsysteme



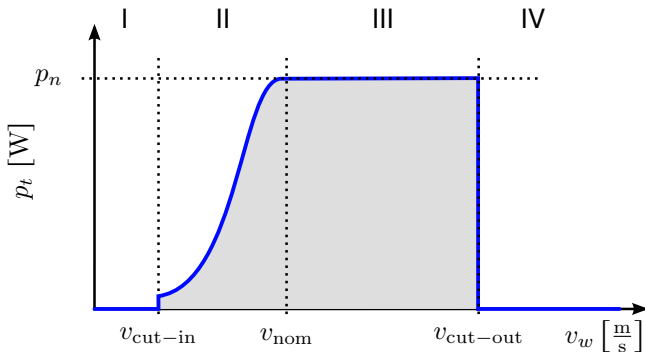
(basiert auf Abb. 2 in [8])

Gliederung

2 Moderne Windkraftanlagen

- Kernkomponenten und Entwicklung
- Konfigurationen von Windkraftanlagen (WKA)
- Verfügbarkeit und Anlagenfehler
- Betriebsbereiche

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 Modellierung und Regelung

- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Aerodynamik und Leistungsbeiwert
 - Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit
 - Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert
 - Leistungsbeiwert
- Regelung der Turbinendrehzahl
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)
 - Drehzahlregelkreis
 - Simulationsergebnisse
- Regelung der Zwischenkreisspannung
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Spannungsorientierung
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Linearisierung und "strukturvariante" Strecke
 - Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse
 - Simulationsergebnisse

Gliederung

3 Modellierung und Regelung

■ Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator

■ Aerodynamik und Leistungsbeiwert

- Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit
- Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert
- Leistungsbeiwert

■ Regelung der Turbinendrehzahl

- Überblick und Regelkreisstruktur
- Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)
- Drehzahlregelkreis
- Simulationsergebnisse

■ Regelung der Zwischenkreisspannung

- Überblick und Regelkreisstruktur
- Spannungsorientierung
- Dynamik des Spannungszwischenkreises
- Linearisierung und "strukturvariante" Strecke
- Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse
- Simulationsergebnisse

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

3 Modellierung und Regelung

■ Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator

■ Aerodynamik und Leistungsbeiwert

- Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit
- Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert
- Leistungsbeiwert

■ Regelung der Turbinendrehzahl

- Überblick und Regelkreisstruktur
- Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)
- Drehzahlregelkreis
- Simulationsergebnisse

■ Regelung der Zwischenkreisspannung

- Überblick und Regelkreisstruktur
- Spannungsorientierung
- Dynamik des Spannungszwischenkreises
- Linearisierung und "strukturvariante" Strecke
- Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse
- Simulationsergebnisse

Gliederung

3 Modellierung und Regelung

■ Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator

■ Aerodynamik und Leistungsbeiwert

■ Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit

■ Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert

■ Leistungsbeiwert

■ Regelung der Turbinendrehzahl

■ Überblick und Regelkreisstruktur

■ Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)

■ Drehzahlregelkreis

■ Simulationsergebnisse

■ Regelung der Zwischenkreisspannung

■ Überblick und Regelkreisstruktur

■ Spannungsorientierung

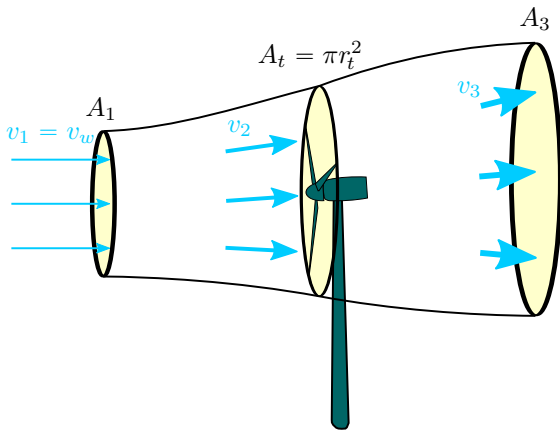
■ Dynamik des Spannungszwischenkreises

■ Linearisierung und "strukturvariante" Strecke

■ Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse

■ Simulationsergebnisse

Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit



$$p_w(t) = \frac{1}{2} \rho \pi r_t^2 v_w(t)^3 \Rightarrow p_t(t) = c_p(\cdot, \cdot) p_w(t) \leq \underbrace{c_{p, \text{Betz}}}_{=16/27 \approx 0,59} p_w(t) \quad (1)$$

Gliederung

3 Modellierung und Regelung

■ Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator

■ Aerodynamik und Leistungsbeiwert

■ Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit

■ Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert

■ Leistungsbeiwert

■ Regelung der Turbinendrehzahl

■ Überblick und Regelkreisstruktur

■ Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)

■ Drehzahlregelkreis

■ Simulationsergebnisse

■ Regelung der Zwischenkreisspannung

■ Überblick und Regelkreisstruktur

■ Spannungsorientierung

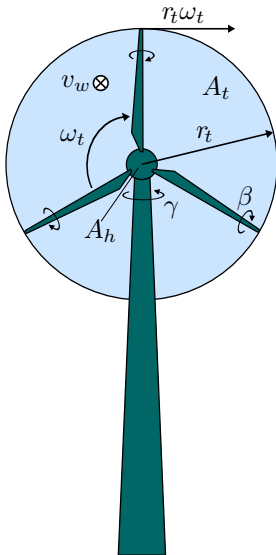
■ Dynamik des Spannungszwischenkreises

■ Linearisierung und "strukturvariante" Strecke

■ Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse

■ Simulationsergebnisse

Schnellaufzahl und Leistungsbeiwert



Schnellaufzahl (tip speed ratio)

$$\lambda := \lambda(\omega_m, v_w) := \frac{r_t \omega_m}{g_r v_w} [1], \quad \omega_m = g_r \omega_t. \quad (2)$$

Leistungsbeiwert

$$c_p: \overline{\mathcal{D}} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}, \quad (\beta, \lambda) \mapsto c_P(\beta, \lambda) := c_1 [c_2 f(\beta, \lambda) - c_3 \beta - c_4 \beta^x - c_5] e^{-c_6 f(\beta, \lambda)}$$

mit $\mathcal{D} := \{ (\beta, \lambda) \in \mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \mid c_P(\beta, \lambda) > 0 \}$ (3)

Gliederung

3 Modellierung und Regelung

■ Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator

■ Aerodynamik und Leistungsbeiwert

- Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit
- Schnellaufzahl und Leistungsbeiwert

■ Leistungsbeiwert

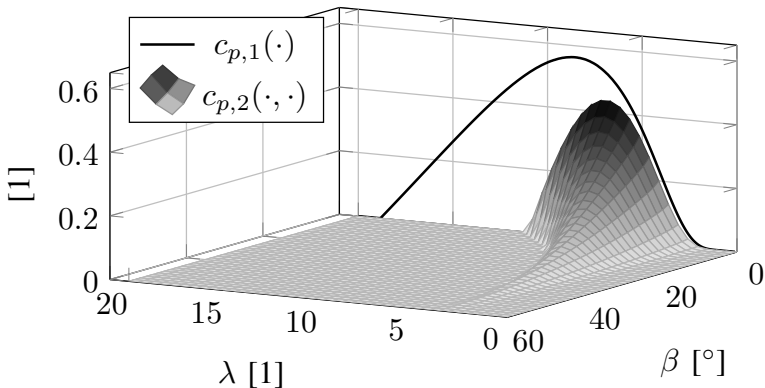
■ Regelung der Turbinendrehzahl

- Überblick und Regelkreisstruktur
- Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)
- Drehzahlregelkreis
- Simulationsergebnisse

■ Regelung der Zwischenkreisspannung

- Überblick und Regelkreisstruktur
- Spannungsorientierung
- Dynamik des Spannungszwischenkreises
- Linearisierung und "strukturvariante" Strecke
- Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse
- Simulationsergebnisse

Leistungsbeiwert



Turbinenleistung

$$p_t(t) = c_p(\lambda, \beta) p_w(t) = c_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho \pi r_t^2 v_w(t)^3 \leq c_{p, \text{Betz}} \frac{1}{2} \rho \pi r_t^2 v_w(t)^3 \quad (4)$$

Gliederung

3 Modellierung und Regelung

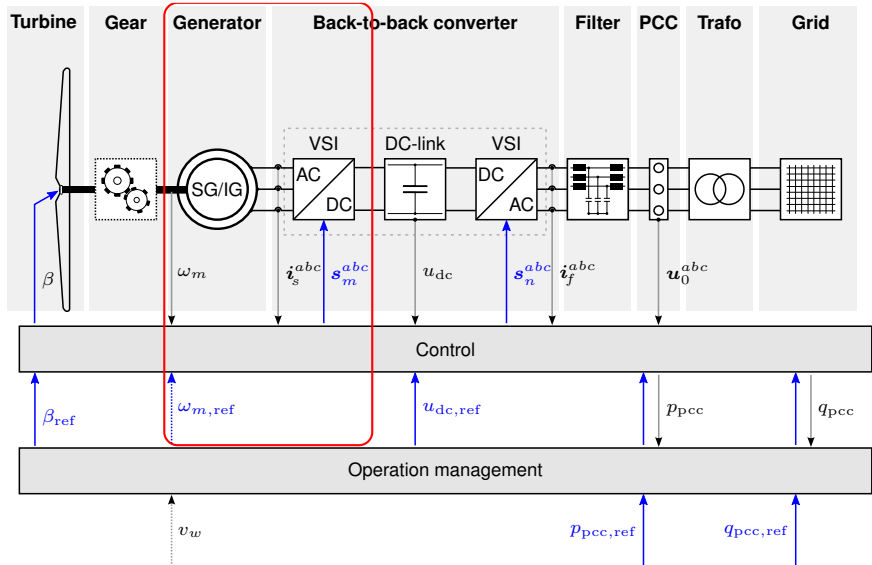
- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Aerodynamik und Leistungsbeiwert
 - Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit
 - Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert
 - Leistungsbeiwert
- Regelung der Turbinendrehzahl
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)
 - Drehzahlregelkreis
 - Simulationsergebnisse
- Regelung der Zwischenkreisspannung
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Spannungsorientierung
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Linearisierung und "strukturvariante" Strecke
 - Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse
 - Simulationsergebnisse

Gliederung

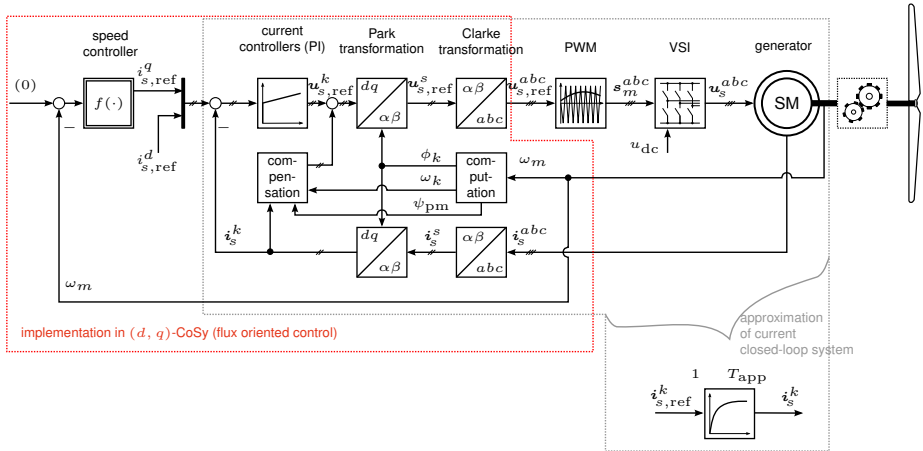
3 Modellierung und Regelung

- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Aerodynamik und Leistungsbeiwert
 - Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit
 - Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert
 - Leistungsbeiwert
- Regelung der Turbinendrehzahl
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)
 - Drehzahlregelkreis
 - Simulationsergebnisse
- Regelung der Zwischenkreisspannung
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Spannungsorientierung
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Linearisierung und "strukturvariante" Strecke
 - Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse
 - Simulationsergebnisse

Generatorseitige Regelung: Überblick



Generatorseitige Regelkreisstruktur

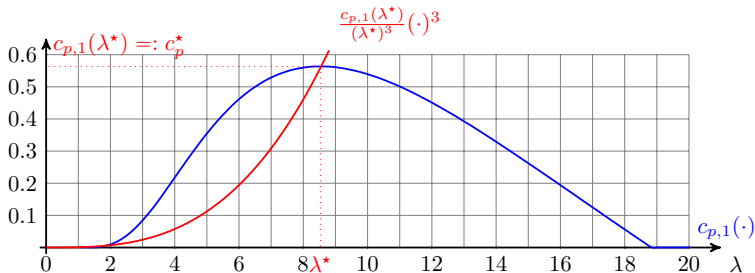


Gliederung

3 Modellierung und Regelung

- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Aerodynamik und Leistungsbeiwert
 - Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit
 - Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert
 - Leistungsbeiwert
- Regelung der Turbinendrehzahl
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)
 - Drehzahlregelkreis
 - Simulationsergebnisse
- Regelung der Zwischenkreisspannung
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Spannungsorientierung
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Linearisierung und "strukturvariante" Strecke
 - Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse
 - Simulationsergebnisse

Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)



$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{\Theta} \left(\underbrace{c_0 \frac{c_{p,1}(\lambda)}{\lambda^3}}_{=m_t/g_r} \omega_m^2 + m_{m,\text{ref}} \right), \quad c_0 := \frac{g r_t^5 \pi}{2 g_r^3} > 0 \quad \wedge \quad \Theta := \Theta_m + \frac{\Theta_t}{g_r^2}$$

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

Analyse der Drehzahlregelung

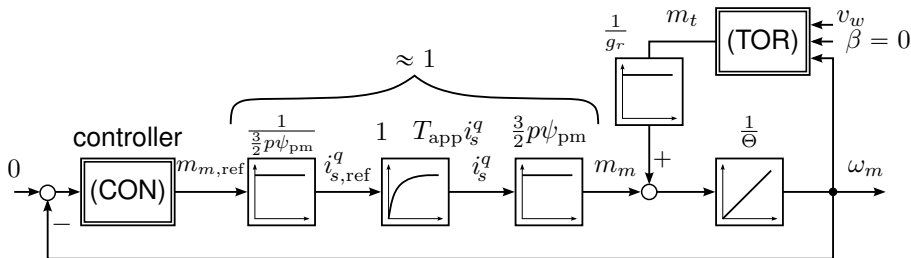
... Diskussion auf der Tafel ...

Gliederung

3 Modellierung und Regelung

- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Aerodynamik und Leistungsbeiwert
 - Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit
 - Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert
 - Leistungsbeiwert
- Regelung der Turbinendrehzahl
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)
 - Drehzahlregelkreis
 - Simulationsergebnisse
- Regelung der Zwischenkreisspannung
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Spannungsorientierung
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Linearisierung und "strukturvariante" Strecke
 - Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse
 - Simulationsergebnisse

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)

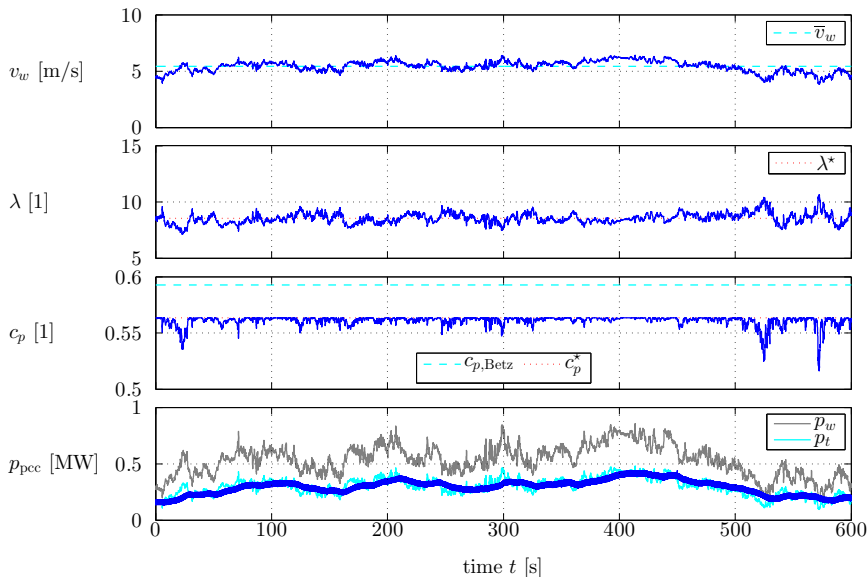
Generatormoment: $m_{m,ref} = -k_p^* \omega_m^2 \approx m_m$ mit $k_p^* = c_0 \frac{c_{p,1}(\lambda^*)}{(\lambda^*)^3}$ (CON)

Gliederung

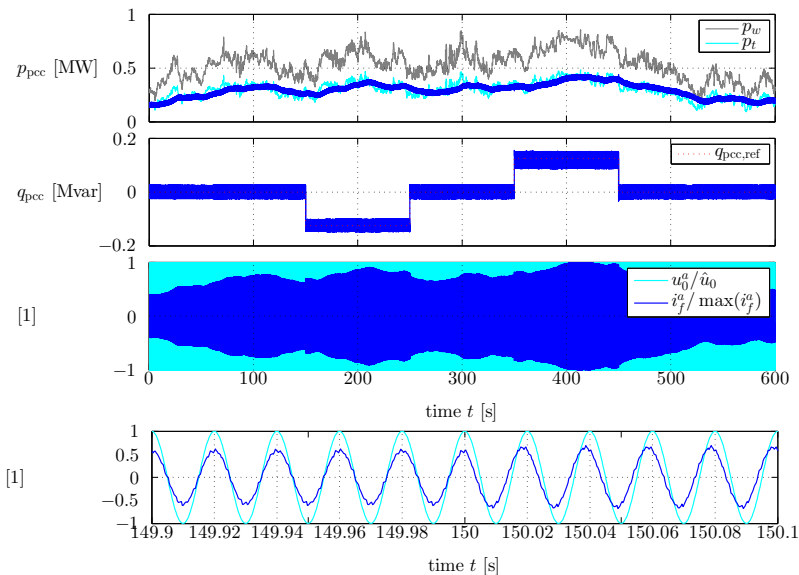
3 Modellierung und Regelung

- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Aerodynamik und Leistungsbeiwert
 - Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit
 - Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert
 - Leistungsbeiwert
- Regelung der Turbinendrehzahl
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)
 - Drehzahlregelkreis
 - **Simulationsergebnisse**
- Regelung der Zwischenkreisspannung
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Spannungsorientierung
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Linearisierung und "strukturvariante" Strecke
 - Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse
 - Simulationsergebnisse

Simulationsergebnisse: Generatorseitige Regelung (1)



Simulationsergebnisse: Generatorseitige Regelung (2)



Gliederung

3 Modellierung und Regelung

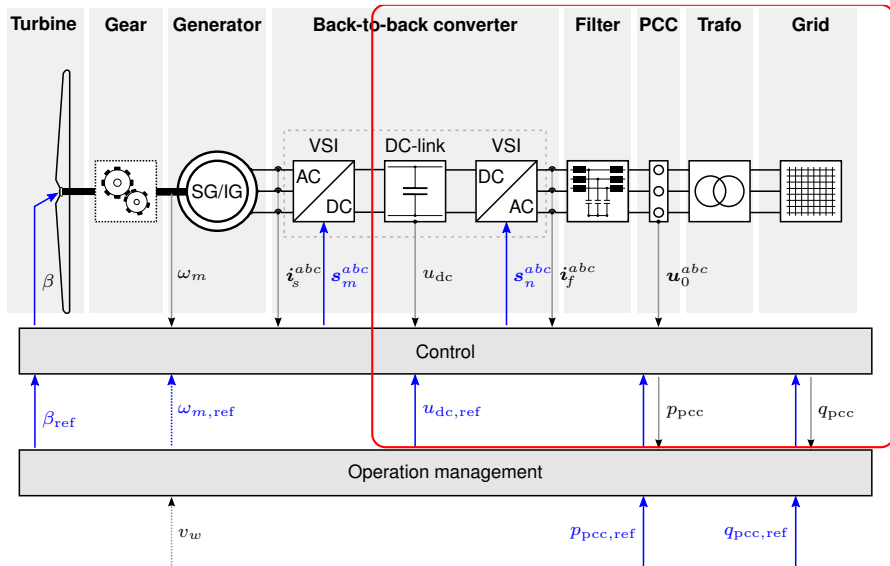
- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Aerodynamik und Leistungsbeiwert
 - Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit
 - Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert
 - Leistungsbeiwert
- Regelung der Turbinendrehzahl
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)
 - Drehzahlregelkreis
 - Simulationsergebnisse
- Regelung der Zwischenkreisspannung
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Spannungsorientierung
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Linearisierung und "strukturvariante" Strecke
 - Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse
 - Simulationsergebnisse

Gliederung

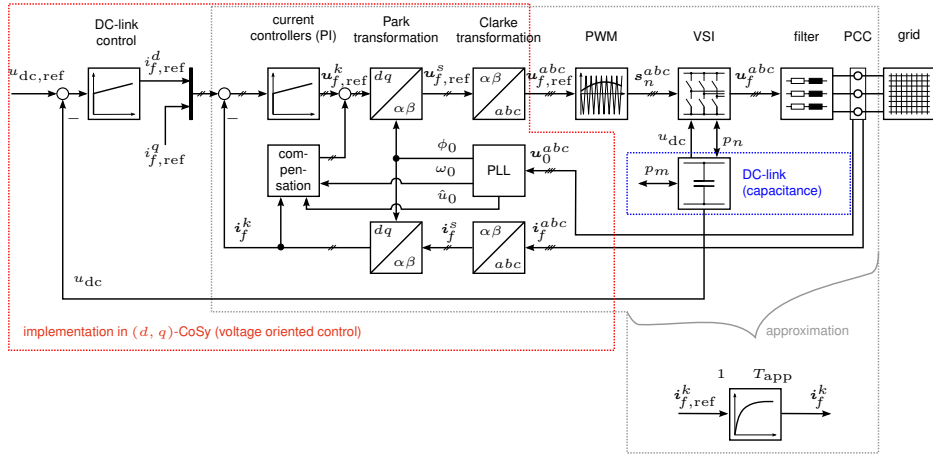
3 Modellierung und Regelung

- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Aerodynamik und Leistungsbeiwert
 - Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit
 - Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert
 - Leistungsbeiwert
- Regelung der Turbinendrehzahl
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)
 - Drehzahlregelkreis
 - Simulationsergebnisse
- Regelung der Zwischenkreisspannung
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Spannungsorientierung
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Linearisierung und "strukturvariante" Strecke
 - Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse
 - Simulationsergebnisse

Netzseitige Regelung: Überblick



Netzseitige Regelkreisstruktur

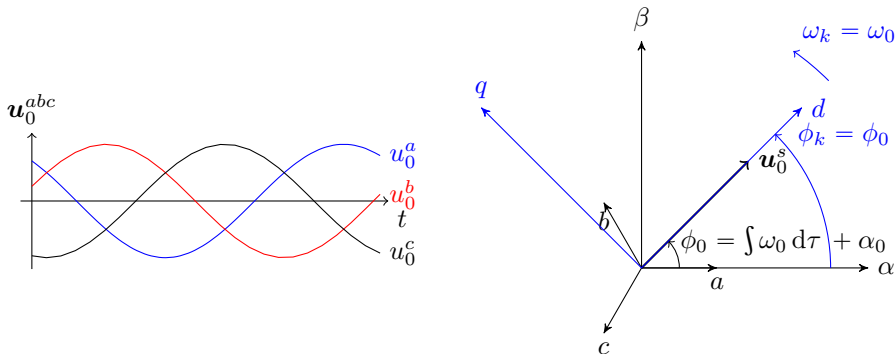


Gliederung

3 Modellierung und Regelung

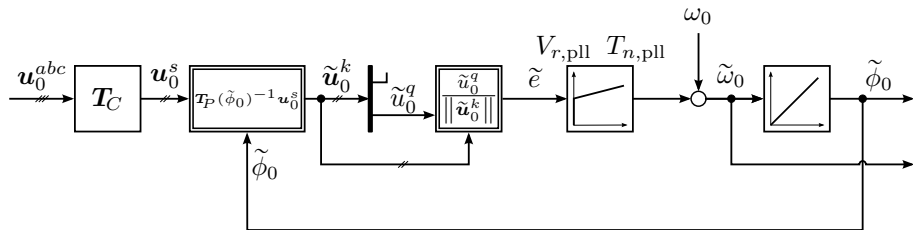
- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Aerodynamik und Leistungsbeiwert
 - Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit
 - Schnellaufzahl und Leistungsbeiwert
 - Leistungsbeiwert
- Regelung der Turbinendrehzahl
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)
 - Drehzahlregelkreis
 - Simulationsergebnisse
- Regelung der Zwischenkreisspannung
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Spannungsorientierung
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Linearisierung und "strukturvariante" Strecke
 - Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse
 - Simulationsergebnisse

Spannungsorientierung: Idee (für sym. Netze)



- $u_0^k = \begin{pmatrix} \hat{u}_0 \\ 0 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_P(\phi_0)^{-1} u_0^s = \mathbf{T}_P(\phi_0)^{-1} \mathbf{T}_C u_0^{abc}$
- Netzsynchronisation (phase-locked loop)

Phase-locked loop (PLL): Block diagram



Regelziel:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u_0^q(t) = 0 \quad \implies \quad \lim_{t \rightarrow \infty} (\phi_0(t) - \tilde{\phi}_0(t)) = 0$$

Verwendung:

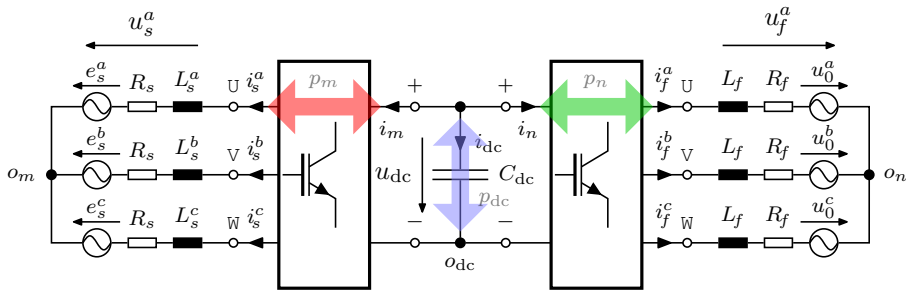
$\tilde{\phi}_0$ & $\tilde{\omega}_0$ zur Spannungsorientierung (& Störgrößenaufschaltung)

Gliederung

3 Modellierung und Regelung

- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Aerodynamik und Leistungsbeiwert
 - Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit
 - Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert
 - Leistungsbeiwert
- Regelung der Turbinendrehzahl
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)
 - Drehzahlregelkreis
 - Simulationsergebnisse
- Regelung der Zwischenkreisspannung
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Spannungsorientierung
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Linearisierung und "strukturvariante" Strecke
 - Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse
 - Simulationsergebnisse

Dynamik des Spannungszwischenkreises



- $$p_{dc} = u_{dc} C_{dc} \frac{d}{dt} u_{dc} = -p_m - p_n \implies \frac{d}{dt} u_{dc} = \frac{1}{u_{dc} C_{dc}} (-p_m - p_n)$$
- $$p_m = \underbrace{\frac{3}{2} R_s \left\| \dot{\mathbf{i}}_s^k \right\|^2}_{p_{m, \text{loss}}} + \underbrace{\frac{3}{2} p (\psi_{pm} \dot{i}_s^q + (L_s^d - L_s^q) \dot{i}_s^d \dot{i}_s^q) \omega_m}_{p_{\text{mech}} = m_m \omega_m} + \underbrace{\frac{3}{2} \frac{d}{dt} (\dot{\mathbf{i}}_s^k)^\top \mathbf{L}_s^k \dot{\mathbf{i}}_s^k}_{p_{L_s^k}}$$
- $$p_n = \underbrace{\frac{3}{2} R_f \left\| \dot{\mathbf{i}}_f^k \right\|^2}_{p_{pcc, \text{loss}}} + \underbrace{\frac{3}{2} \frac{d}{dt} L_f (\dot{\mathbf{i}}_f^k)^\top \dot{\mathbf{i}}_f^k}_{p_{L_f}} + \underbrace{\frac{3}{2} \hat{u}_0 \dot{i}_f^d}_{p_{pcc}}$$

Gliederung

3 Modellierung und Regelung

- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Aerodynamik und Leistungsbeiwert
 - Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit
 - Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert
 - Leistungsbeiwert
- Regelung der Turbinendrehzahl
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)
 - Drehzahlregelkreis
 - Simulationsergebnisse
- Regelung der Zwischenkreisspannung
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Spannungsorientierung
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Linearisierung und "strukturvariante" Strecke
 - Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse
 - Simulationsergebnisse

Linearisierung/Analyse im Arbeitspunkt (mit $p_m(t)$)

... Diskussion auf der Tafel ...

Linearisierte Strecke

Für Kleinsignale $\tilde{x} := x - x^*$, $\tilde{u} := u - u^*$, $\tilde{d} := d - d^*$, wobei

$$x := \begin{pmatrix} u_{dc} \\ i_f^k \end{pmatrix}, \quad u := i_{f,\text{ref}}^k = \begin{pmatrix} i_f^d \\ i_f^q \end{pmatrix}, \quad d := p_m \quad \text{und} \quad \begin{pmatrix} x^* \\ u^* \\ d^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{dc}^* \\ i_f^{k,*} \\ i_{f,\text{ref}}^{k,*} \\ p_m^* \end{pmatrix}, \quad (5)$$

gilt [9]

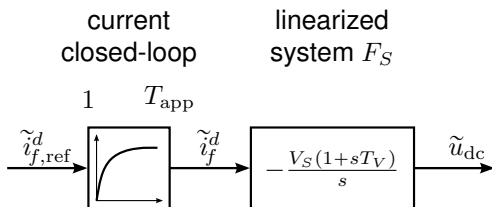
$$\frac{d}{dt} \tilde{x}(t) = A \tilde{x}(t) + B \tilde{u}(t) + b_d \tilde{d}(t)$$

mit

$$A := \left. \frac{\partial f(x, u, d)}{\partial x} \right|_{(5)}, \quad B := \left. \frac{\partial f(x, u, d)}{\partial u} \right|_{(5)} = [b_1, b_2] \quad \text{und} \quad b_d := \left. \frac{\partial f(x, u, d)}{\partial d} \right|_{(5)}.$$

$$\Rightarrow \frac{\tilde{u}_{dc}(s)}{\tilde{i}_{f,\text{ref}}^d(s)} = (1, 0, 0) (sI_3 - A)^{-1} b_1 = - \underbrace{\frac{3(\hat{u}_0 + 2R_f i_f^{d,*})}{2C_{dc} u_{dc}^*}}_{=: V_S} \frac{1 + s \overbrace{\left(\frac{L_f i_f^{d,*}}{\hat{u}_0 + 2R_f i_f^{d,*}} \right)}^{=: T_V}}{s(1 + sT_{\text{app}})}$$

“Strukturvariante” Strecke



$$(S_1) \quad i_f^{d,*} = 0 \implies T_V = 0 \implies \frac{\tilde{u}_{dc}(s)}{\tilde{i}_{f,\text{ref}}^d(s)} = \frac{V_S}{s(1+sT_{\text{app}})} \quad (IT_1)$$

$$(S_2) \quad i_f^{d,*} > 0 \implies T_V > 0 \implies \frac{\tilde{u}_{dc}(s)}{\tilde{i}_{f,\text{ref}}^d(s)} = \frac{V_S(1+sT_V)}{s(1+sT_{\text{app}})}$$

(IT₁ + PD, minimalphasig)

$$(S_3) \quad i_f^{d,*} < 0 \implies T_V < 0 \implies \frac{\tilde{u}_{dc}(s)}{\tilde{i}_{f,\text{ref}}^d(s)} = \frac{V_S(1-s|T_V|)}{s(1+sT_{\text{app}})}$$

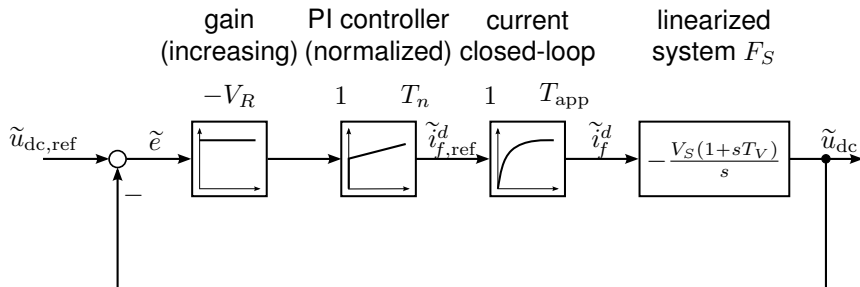
(IT₁ + PD, **nicht**-minimalphasig)

Gliederung

3 Modellierung und Regelung

- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Aerodynamik und Leistungsbeiwert
 - Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit
 - Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert
 - Leistungsbeiwert
- Regelung der Turbinendrehzahl
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)
 - Drehzahlregelkreis
 - Simulationsergebnisse
- Regelung der Zwischenkreisspannung
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Spannungsorientierung
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Linearisierung und "strukturvariante" Strecke
 - Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse
 - Simulationsergebnisse

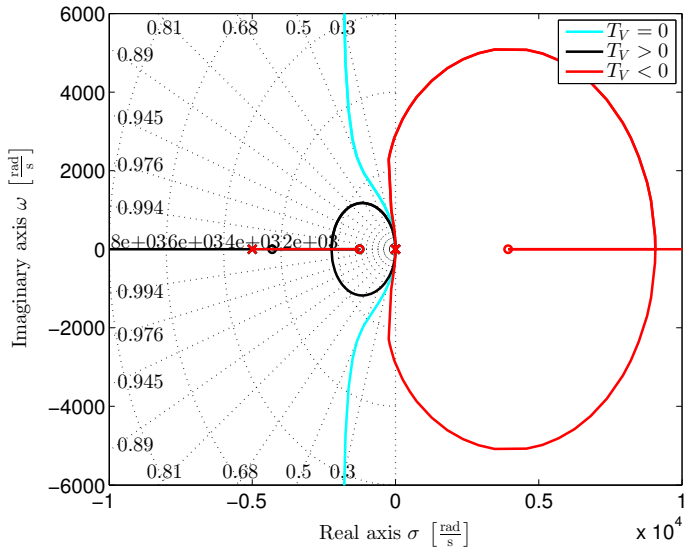
Wurzelortskurve des linearisierten Systems



offener Kreis der linearisierten Strecke

$$\frac{\tilde{u}_{dc}(s)}{\tilde{e}(s)} = \frac{V_R V_S (1 + sT_n)(1 + sT_V)}{s^2 T_n (1 + sT_{app})}, \quad \begin{cases} T_{app}, T_n > 0, V_S > 0 \\ T_V \in \mathbb{R} \text{ (arbeitspunktabhängig!)} \\ V_R \rightarrow \infty \end{cases}$$

Wurzelortskurve (abhängig vom Arbeitspunkt)



Stabilitätsanalyse (Hurwitz-Kriterium)

Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises

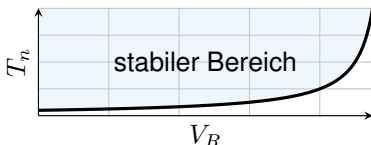
$$F_{CL}(s) = \frac{u_{dc}(s)}{u_{dc,ref}(s)} = \frac{V_R V_S (1 + sT_{app})(1 + sT_V)}{s^3 \underbrace{T_n T_{app}}_{=:a_3} + s^2 \underbrace{T_n (1 + T_V V_S V_R)}_{=:a_2} + s \underbrace{(T_V + T_n) V_S V_R}_{=:a_1} + \underbrace{V_R V_S}_{=:a_0}}$$

Hinreichende Bedingungen für Stabilität (*lokales Resultat*)

(B₁) $0 < V_R < \frac{1}{|T_V| V_S}$

(B₂) $T_n > \frac{T_{app}}{1 - V_R V_S |T_V|} + |T_V| > 0$

$\implies a_0, a_1, a_2, a_3 > 0$ und $D_2 := a_2 a_1 - a_3 a_0 > 0$.

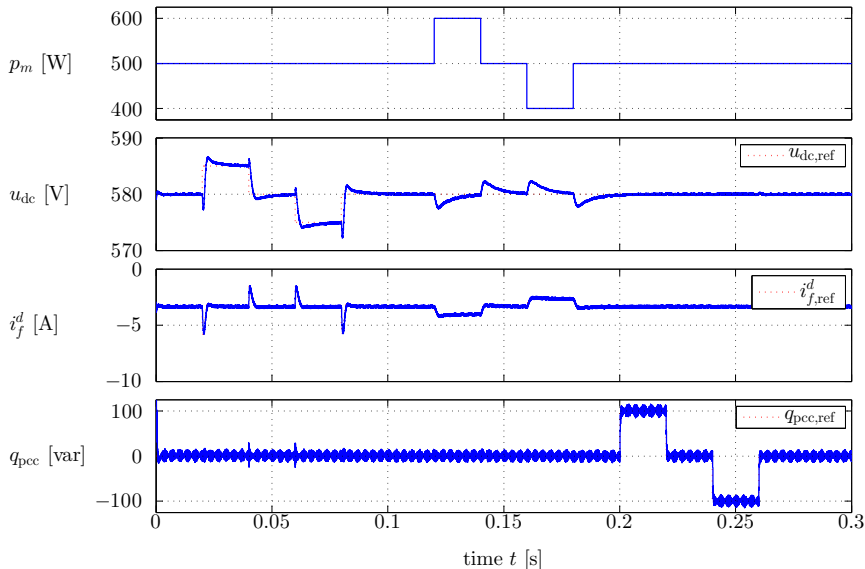


Gliederung

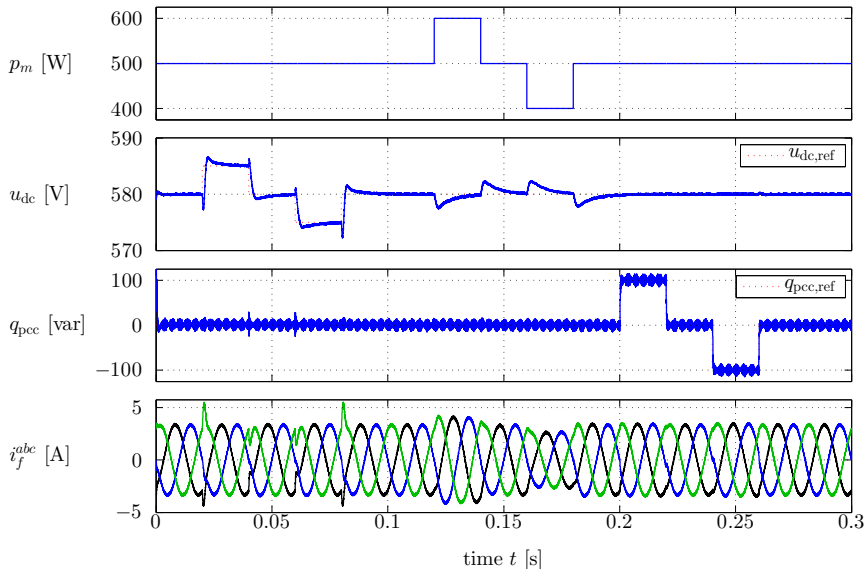
3 Modellierung und Regelung

- Beispiel: WKA mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Aerodynamik und Leistungsbeiwert
 - Windleistung, Turbinenleistung und Betz-Limit
 - Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert
 - Leistungsbeiwert
- Regelung der Turbinendrehzahl
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Regelziel: Maximum power point tracking (MPPT)
 - Drehzahlregelkreis
 - Simulationsergebnisse
- Regelung der Zwischenkreisspannung
 - Überblick und Regelkreisstruktur
 - Spannungsorientierung
 - Dynamik des Spannungszwischenkreises
 - Linearisierung und "strukturvariante" Strecke
 - Wurzelortskurve und Stabilitätsanalyse
 - Simulationsergebnisse

Simulationsergebnisse (1): Netzseitige Regelung



Simulationsergebnisse (2): Netzseitige Regelung



Gliederung

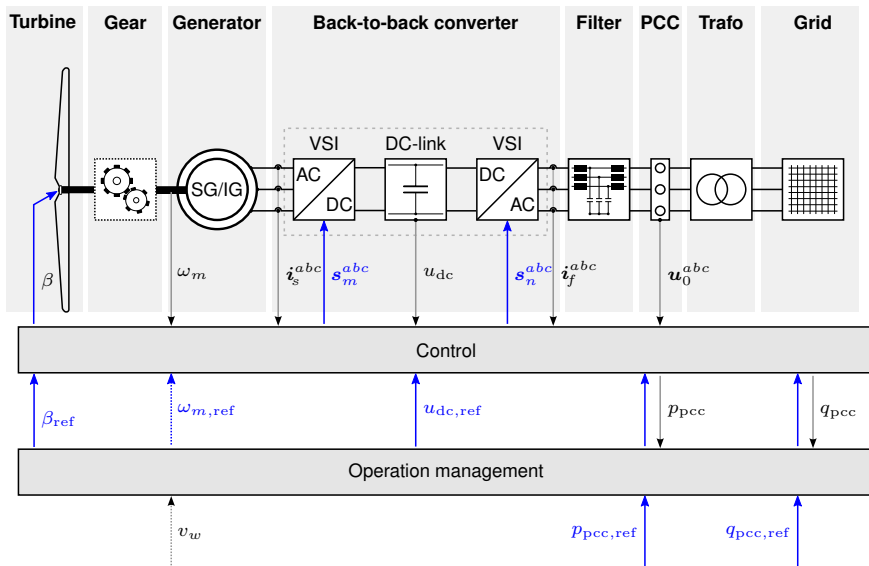
- 4 Betriebsführung und Ausblick**
 - Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
 - Leistungsbetrachtung
 - Betriebsbereiche
 - Leistungsbeiwert (mit Pitchregelung)
 - Bereich II: Drehzahlregelkreis
 - Bereich III: Drehzahlregelkreis mit Pitchverstellung
 - Ausblick: Zukünftige Forschungsaufgaben

Gliederung

4 Betriebsführung und Ausblick

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
 - Leistungsbetrachtung
 - Betriebsbereiche
 - Leistungsbeiwert (mit Pitchregelung)
 - Bereich II: Drehzahlregelkreis
 - Bereich III: Drehzahlregelkreis mit Pitchverstellung
 - Ausblick: Zukünftige Forschungsaufgaben

Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung

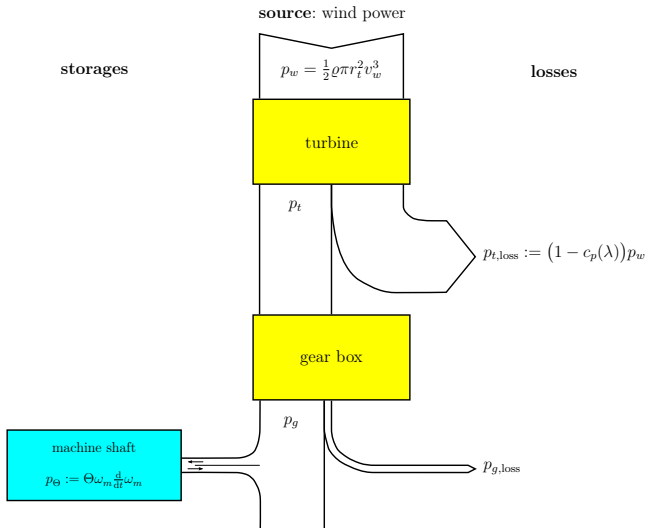


Gliederung

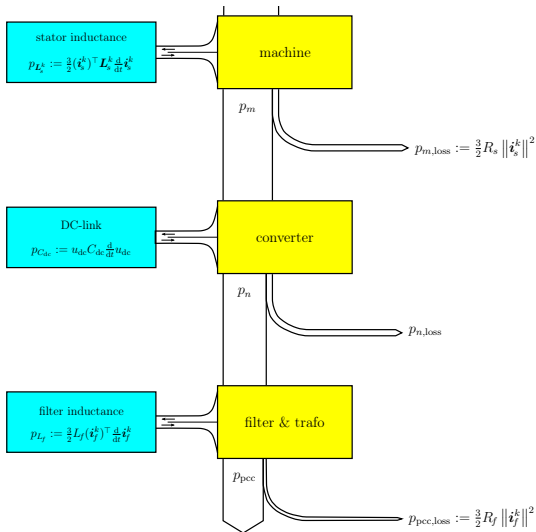
4 Betriebsführung und Ausblick

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- **Leistungsbetrachtung**
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert (mit Pitchregelung)
- Bereich II: Drehzahlregelkreis
- Bereich III: Drehzahlregelkreis mit Pitchverstellung
- Ausblick: Zukünftige Forschungsaufgaben

Leistungsfluss (Teil 1)



Leistungsfluss (Teil 2)



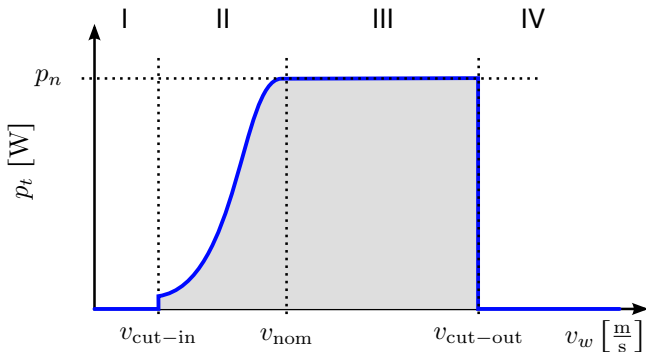
sink: point of common coupling (PCC)

Gliederung

4 Betriebsführung und Ausblick

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Leistungsbetrachtung
- **Betriebsbereiche**
 - Leistungsbeiwert (mit Pitchregelung)
 - Bereich II: Drehzahlregelkreis
 - Bereich III: Drehzahlregelkreis mit Pitchverstellung
 - Ausblick: Zukünftige Forschungsaufgaben

Betriebsbereiche für versch. Windgeschwindigkeiten



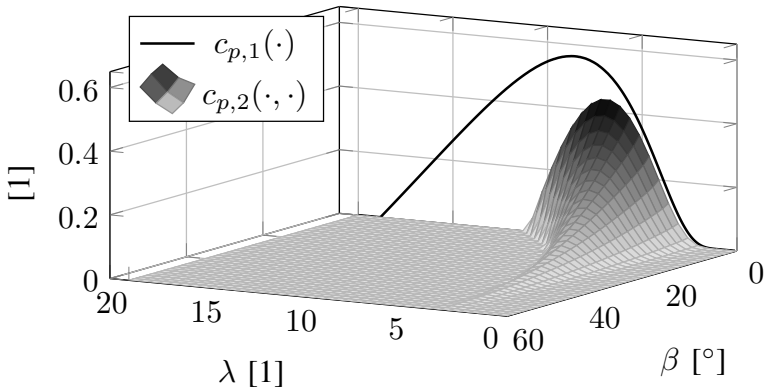
- **Bereich I:** Stillstand. Keine Ausgangsleistung, d.h. $p_t = 0$.
- **Bereich II:** Betrieb unterhalb des Nennpunktes. Variable Ausgangsleistung, d.h. $0 < p_t < p_n$ (Ziel: Maximum power point tracking).
- **Bereich III:** Nennbetrieb. Nennausgangsleistung, d.h. $p_t = p_n$.
- **Bereich IV:** Stillstand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

Gliederung

4 Betriebsführung und Ausblick

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- **Leistungsbeiwert (mit Pitchregelung)**
- Bereich II: Drehzahlregelkreis
- Bereich III: Drehzahlregelkreis mit Pitchverstellung
- Ausblick: Zukünftige Forschungsaufgaben

Leistungsbeiwert (mit Pitchregelung)



Turbinenleistung (Leistungsaufnahme/-umsetzung)

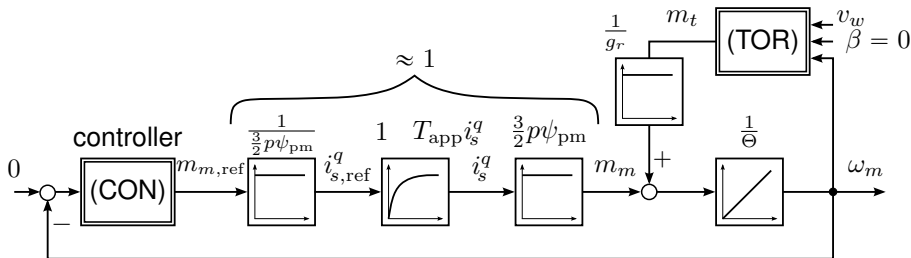
$$p_t(t) = c_p(\lambda, \beta) p_w(t) = c_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho \pi r_t^2 v_w(t)^3 \leq c_{p, \text{Betz}} \frac{1}{2} \rho \pi r_t^2 v_w(t)^3 \quad (6)$$

Gliederung

4 Betriebsführung und Ausblick

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert (mit Pitchregelung)
- **Bereich II: Drehzahlregelkreis**
- Bereich III: Drehzahlregelkreis mit Pitchverstellung
- Ausblick: Zukünftige Forschungsaufgaben

Bereich II: Drehzahlregelkreis



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)

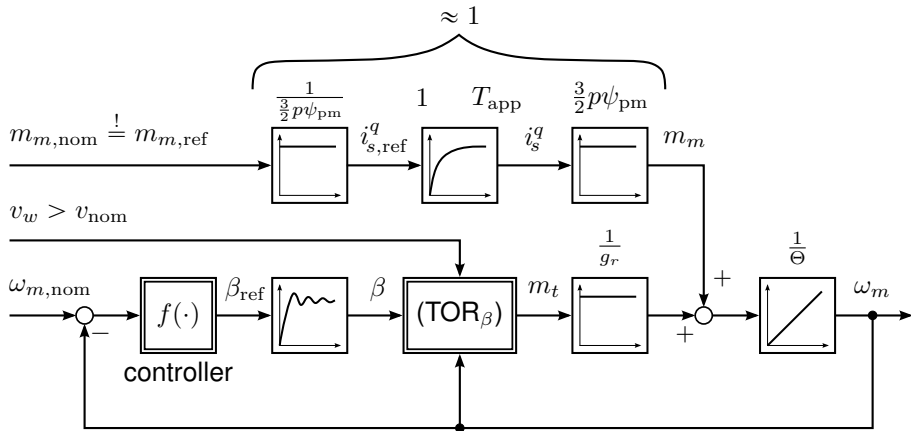
Generatormoment: $m_{m,ref} = -k_p^* \omega_m^2 \approx m_m$ mit $k_p^* = c_0 \frac{c_p(\lambda^*, 0)}{(\lambda^*)^3}$ (CON)

Gliederung

4 Betriebsführung und Ausblick

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert (mit Pitchregelung)
- Bereich II: Drehzahlregelkreis
- **Bereich III: Drehzahlregelkreis mit Pitchverstellung**
- Ausblick: Zukünftige Forschungsaufgaben

Bereich III: Drehzahlregelkreis mit Pitchverstellung



Turbinenmoment:
$$m_t(v_w, \beta, \omega_m) = c_0 \frac{c_p(v_w, \beta)}{\lambda^3} \omega_m^2 \quad \text{mit} \quad \lambda = \frac{r_t \omega_m}{g_r v_w} \quad (TOR_\beta)$$

Gliederung

4 Betriebsführung und Ausblick

- Eingriffsmöglichkeiten zur Anlagensteuerung
- Leistungsbetrachtung
- Betriebsbereiche
- Leistungsbeiwert (mit Pitchregelung)
- Bereich II: Drehzahlregelkreis
- Bereich III: Drehzahlregelkreis mit Pitchverstellung
- **Ausblick: Zukünftige Forschungsaufgaben**

Zukünftige Herausforderungen (siehe auch [10])

- **Senkung der Stromgestehungskosten**
 ⇒ **Wirtschaftliche Machbarkeit der Energiewende?!**
- **Erhöhung der Zuverlässigkeit**
 (v.a. Regelung und Leistungselektronik fehleranfällig)
 - Robustheit
 - Systemanalyse
 - Reduktion der Wartungskosten (Condition monitoring / fault detection)
- **Flexibilisierung/Robustifizierung der Netzanbindung**
 - Anlagenschutz
 - Grid code requirements (z.B. LVRT, frequency/voltage support)
 - Dezentrale Einspeisung (z.B. islanding/micro grid operation, etc.)
 - "Windkraftwerke" (Wind farms, Anbindung, Verschattung/Wake)
- **Neue Technologien**
 - Neue Generatortopologien
 - Neue Umrichtertopologien (Mehrlevel)
 - Neue Getriebetopologien ("single-stage")
 - Konfigurationen ohne/kleinere Transformatoren
 - Neue leistungselektronische Bauteile
 (SiC Mosfet, IGBT/IGCT press-pack, etc.)

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. Schlegl, "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] 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.
- [10] 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.