

Dreiphasiger gepulster Stromrichter am Netz

Funktion und Modellierung am Beispiel einer Windkraftanlage

Christoph Hackl

IEEE Senior Member

19.06.2019

Technische Universität Ilmenau

Gliederung I

1 Motivation

2 Modellierung

3 Netzsynchronisation

4 Regelung

Gliederung I

1 Motivation

- Beispiel: Windkraftanlage mit Direktantrieb
- Blockdiagramm einer Windkraftanlage mit Permanentmagnet-Synchrongenerator
- Leistungsfluss im elektrischen System

Motivation

Beispiel: Windkraftanlage mit Direktantrieb

Windturbine SWT-2.3-113



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

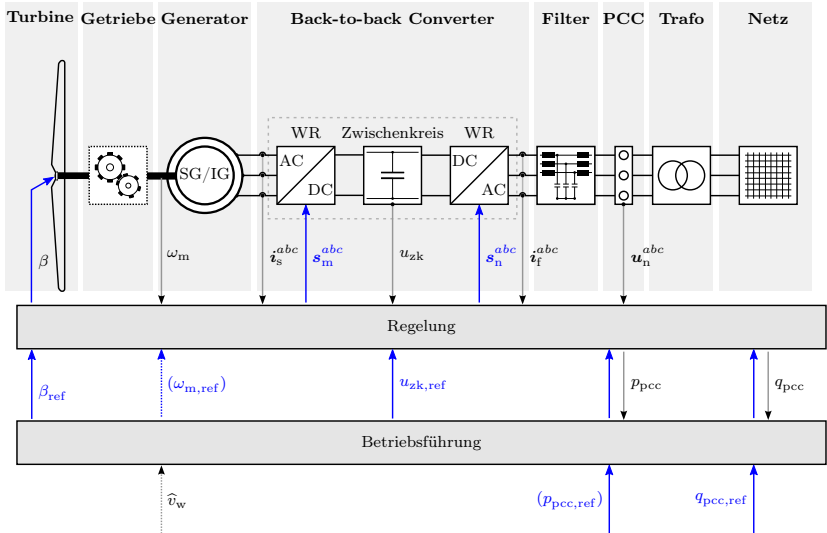
Direktantrieb
(Permanentmagnet
Synchrongenerator (PMSG))



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

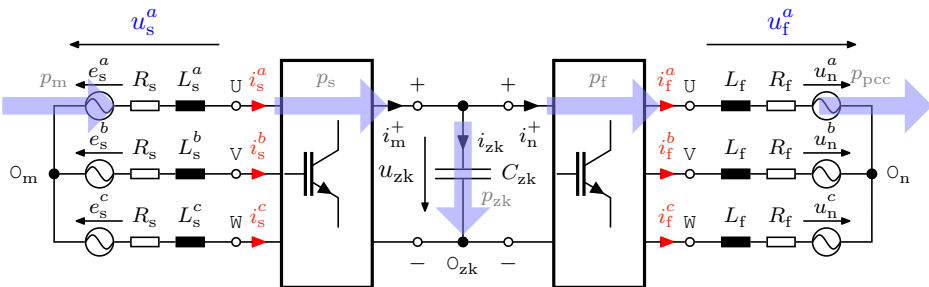
Motivation

Blockdiagramm einer Windkraftanlage mit Permanentmagnet-Synchrongenerator



Motivation

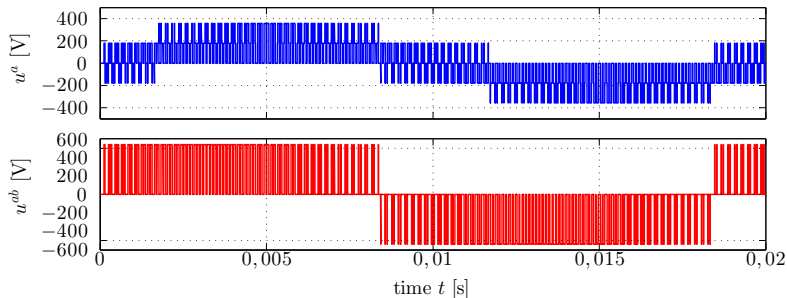
Leistungsfluss im elektrischen System



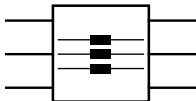
⇒ Ziel: Modelle für Maschine, Umrichter mit Zwischenkreis und Netzseite

Motivation

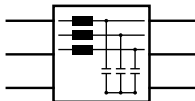
Netzfilter-Varianten



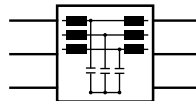
L-Filter
(Strom)



LC-Filter
(Spannung)



LCL-Filter
(Strom)



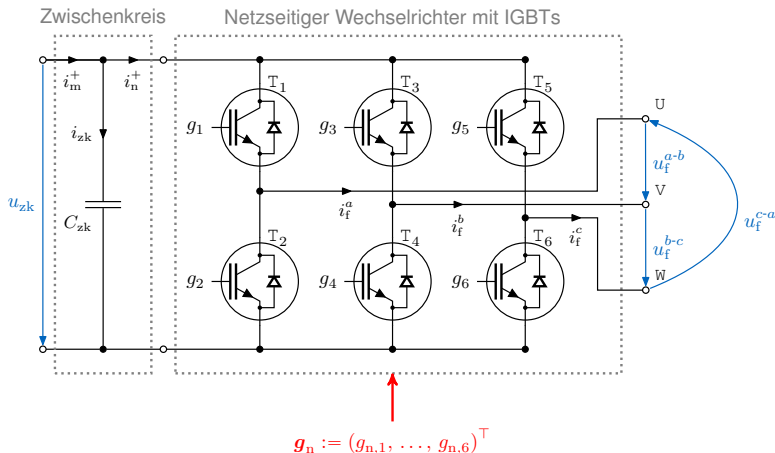
Gliederung I

2 Modellierung

- Netzseitiger Wechselrichter
- Netzseitiger Wechselrichter (mit idealen Schaltern)
- Netzanbindung über L-Filter

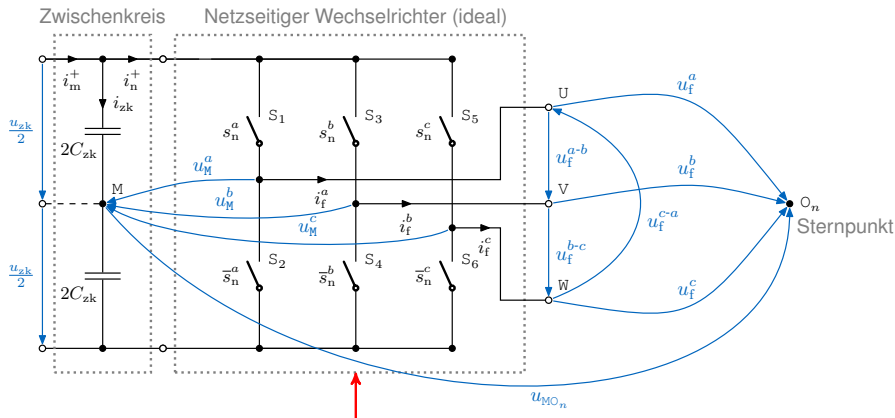
Modellierung

Netzseitiger Wechselrichter (=dreiphasiger gepulster Stromrichter am Netz)



Modellierung

Netzseitiger Wechselrichter (mit idealen Schaltern)

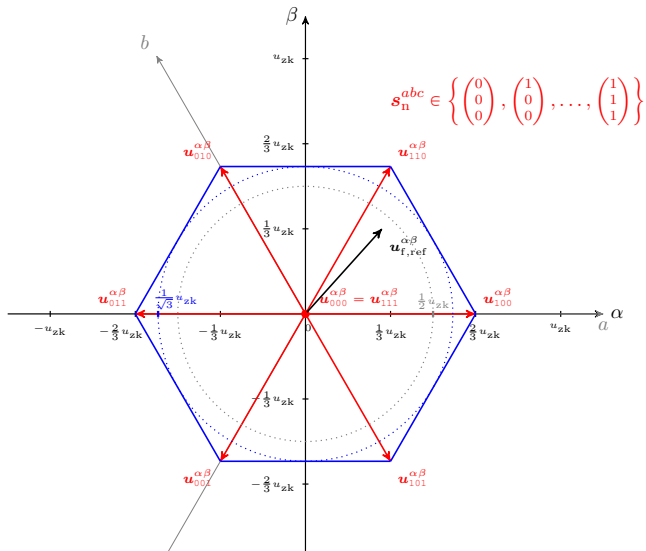


$$s_n^{abc} := (s_n^a, s_n^b, s_n^c)^T$$

- Phasenspannungen $\mathbf{u}_f^{abc} = (u_f^a, u_f^b, u_f^c)^T = \mathbf{f}(s_n^{abc}, u_{zk})$?
- Zwischenkreisspannungsdynamik $\frac{d}{dt} u_{zk} = f(i_m^+, s_n^{abc}, i_f^{abc})$?
- Spannungsvektoren im (α, β) -Koordinatensystem (Spannungshexagon) ?

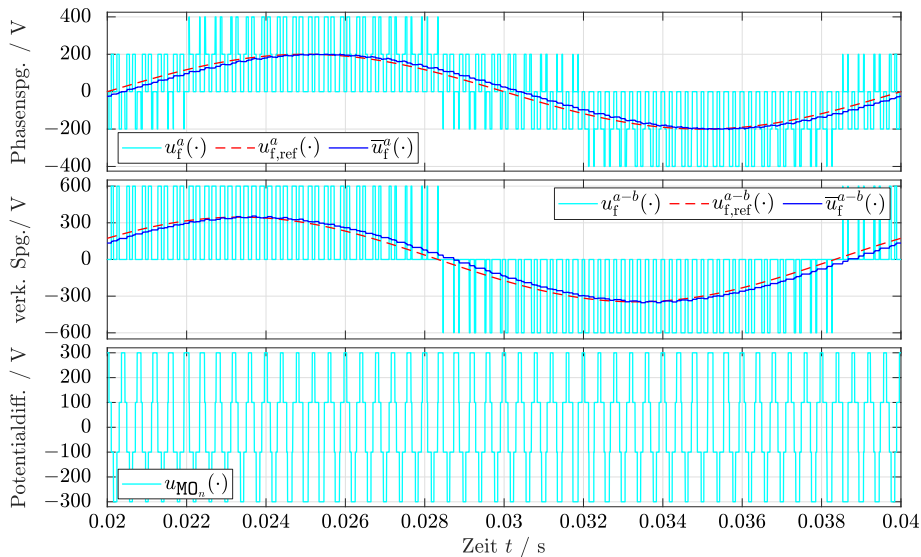
Modellierung

Netzseitiger Wechselrichter: Spannungshexagon mit Referenzspannungsvektor

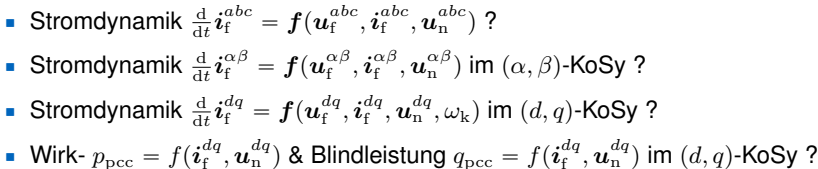


Modellierung

Netzseitiger Wechselrichter: Ausgangsspannungen



Netzanbindung über L-Filter

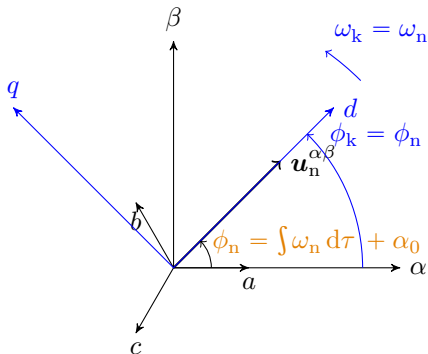
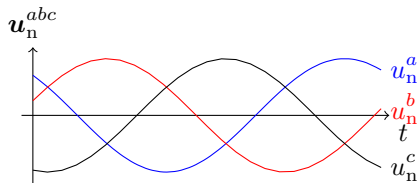


Gliederung I

3 Netzsynchronisation

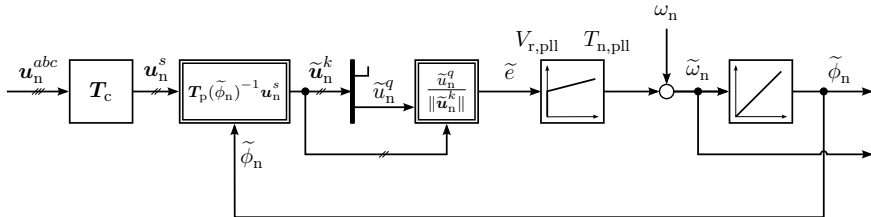
Netzsynchronisation

Spannungsorientierung



Netzsynchronisation

Netzsynchronisation (Phase-locked loop)

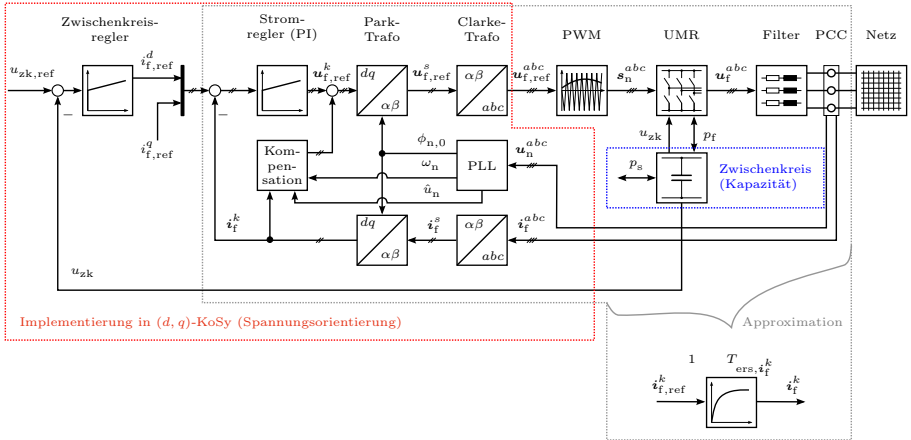


Gliederung I

4 Regelung

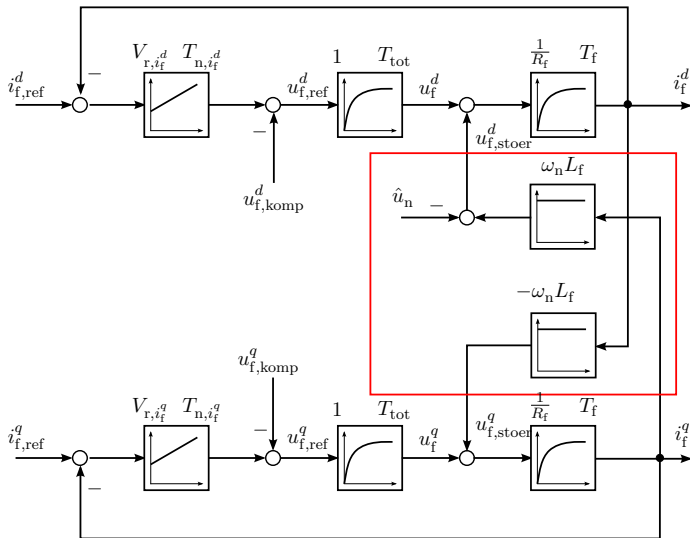
Regelung

Netzseitige Reglerstruktur [1]



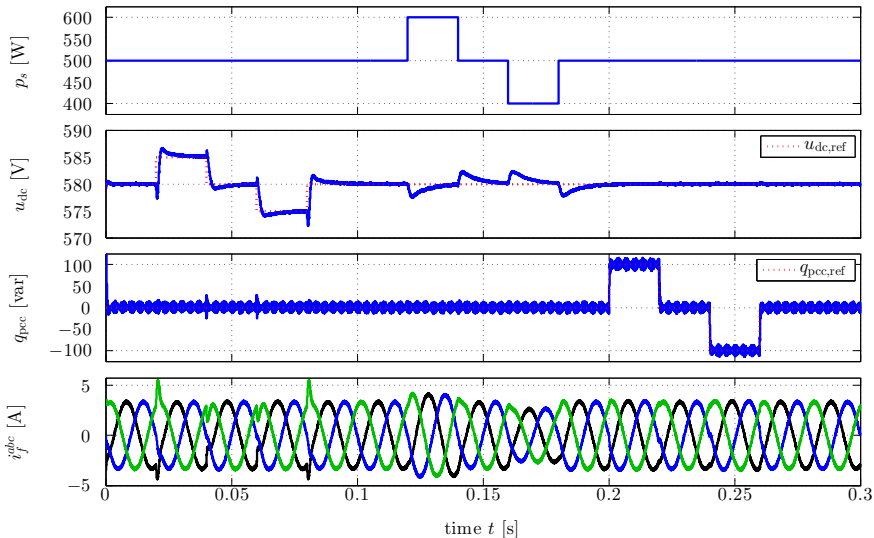
Netzseitige Reglerstruktur

Netzseitige Stromregelung



Regelung

Simulationsergebnisse: Führungs- und Störverhalten



Literaturliste I

- [1] Christian Dirscherl, Christoph Hackl, and Korbinian Schechner. Modellierung und Regelung von modernen Windkraftanlagen: Eine Einführung (see <https://arxiv.org/abs/1703.08661> for the english translation). In Dierk Schröder, editor, *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen*, chapter 24, pages 1540–1614. Springer-Verlag, 2015.
- [2] Christoph M. Hackl. *Non-identifier based adaptive control in mechatronics: Theory and Application*. Number 466 in Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer International Publishing, Berlin, 2017.
- [3] A. Q. Huang. Power semiconductor devices for smart grid and renewable energy systems. *Proceedings of the IEEE*, 105(11):2019–2047, Nov 2017.
- [4] Dierk Schröder. *Leistungselektronische Bauelemente*. Springer-Verlag, Berlin, 2 edition, 2006.

Gliederung I

1 Anhang

- Leistungselektronik
- Windkraftanlagenkonzepte
- Wechsel-/Drehstromsysteme [2, Chapter 14]
- Raumzeigertheorie

Gliederung

1 Anhang

■ Leistungselektronik

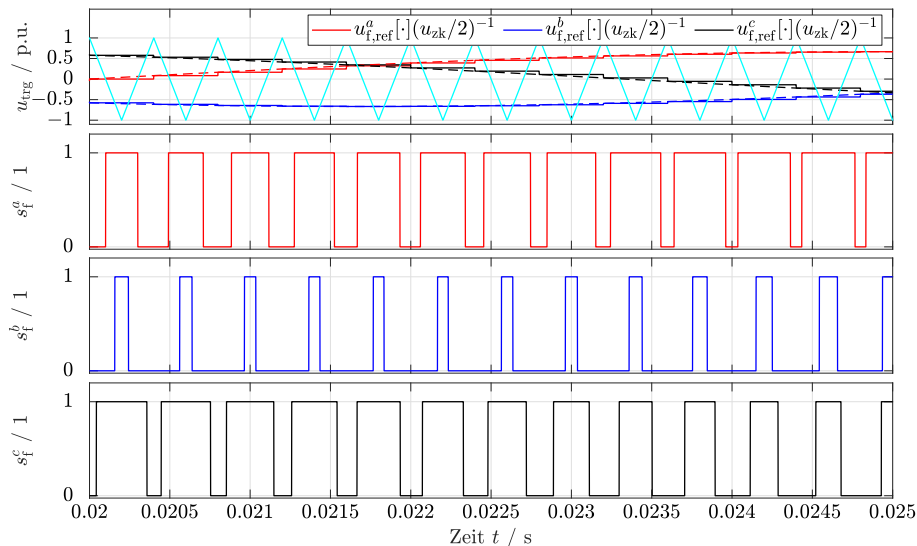
■ Windkraftanlagenkonzepte

■ Wechsel-/Drehstromsysteme [2, Chapter 14]

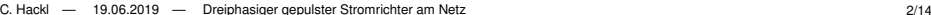
■ Raumzeigertheorie

Leistungselektronik

Frequenzumrichter: Symmetrische PWM und Schaltsignale

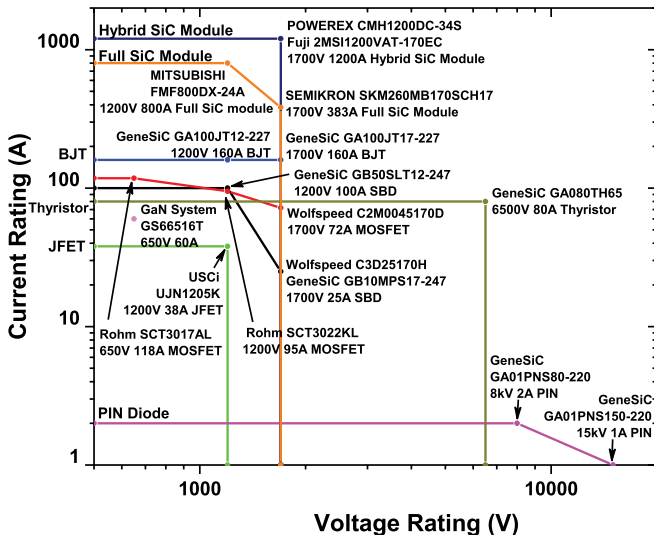


Vergleich der Halbleitertechnologien [3]: Si-basierte Bauelemente



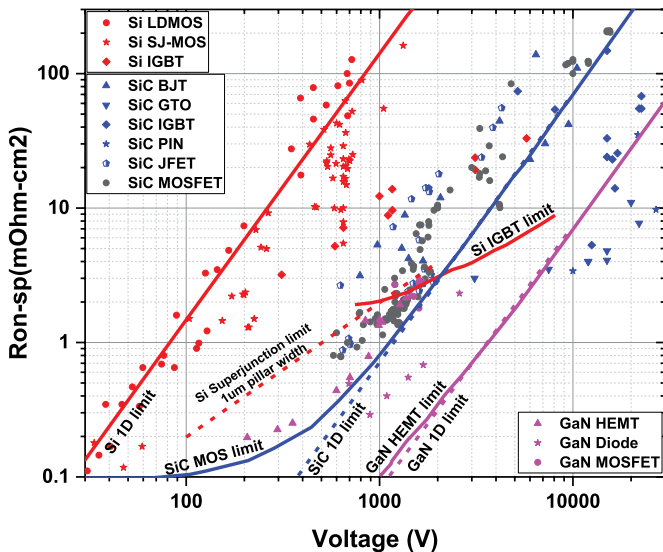
Leistungselektronik

Vergleich der Halbleitertechnologien [3]: SiC-basierte Bauelemente



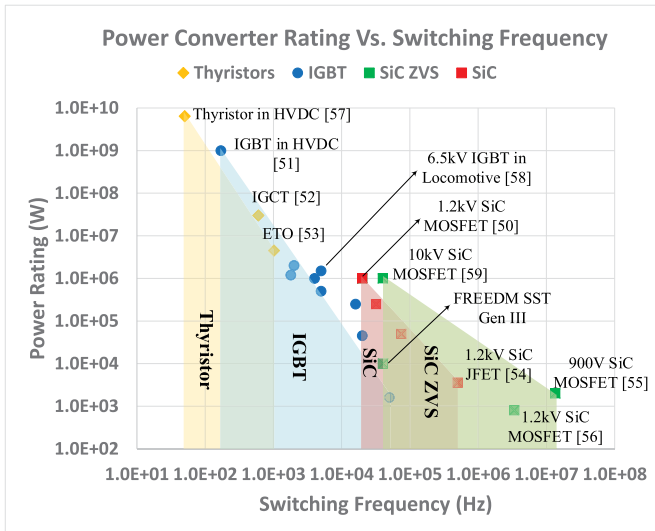
Leistungselektronik

Vergleich der Halbleitertechnologien [3]: Spezifischer Leitwiderstand R_{on}



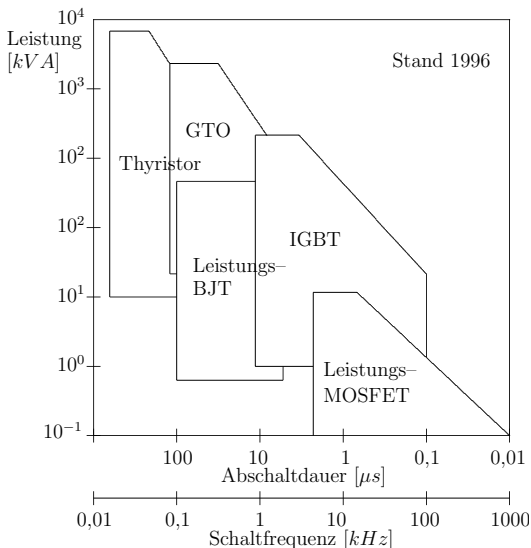
Leistungselektronik

Vergleich der Halbleitertechnologien [3]: Schaltfrequenzen und Leistungsbereiche



Leistungselektronik

Vergleich der Halbleitertechnologien [4, S. 2]: Schaltfrequenzen und Leistungsbereiche



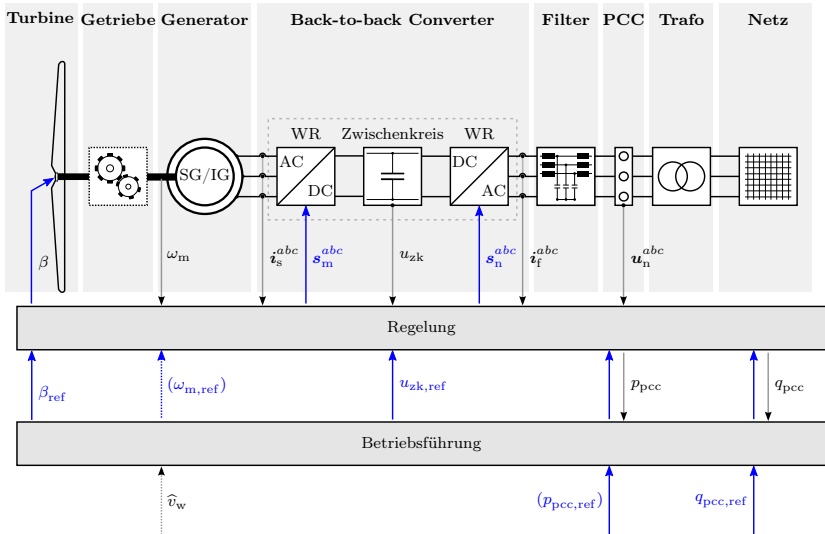
Gliederung

1 Anhang

- Leistungselektronik
- **Windkraftanlagenkonzepte**
- Wechsel-/Drehstromsysteme [2, Chapter 14]
- Raumzeigertheorie

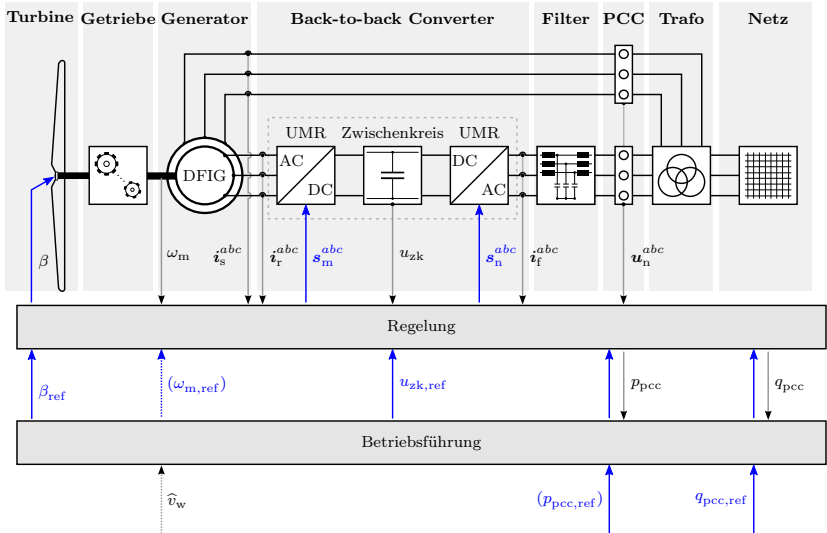
Windkraftanlagenkonzepte

Windkraftanlage mit Permanentmagnet-Synchrongenerator



Windkraftanlagenkonzepte

Windkraftanlage mit doppelt-gespeister Asynchronmaschine



Windkraftanlage mit elektrisch-erregtem Synchrongenerator



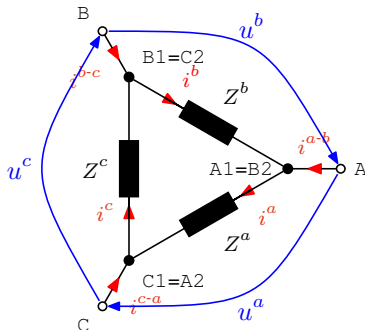
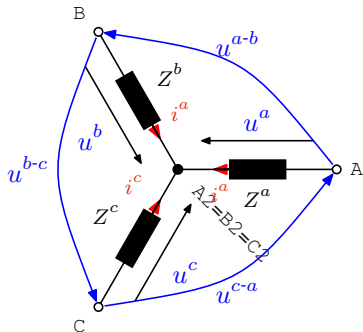
Gliederung

1 Anhang

- Leistungselektronik
- Windkraftanlagenkonzepte
- Wechsel-/Drehstromsysteme [2, Chapter 14]
- Raumzeigertheorie

Wechsel-/Drehstromsysteme

Verschaltung von Drei-Phasen-Systemen



Fact (Stern- / Υ -Schaltung)

- $i^a + i^b + i^c = 0$
- $u^{a-b} + u^{b-c} + u^{c-a} = 0$
- $(u^a + u^b + u^c \neq 0)$

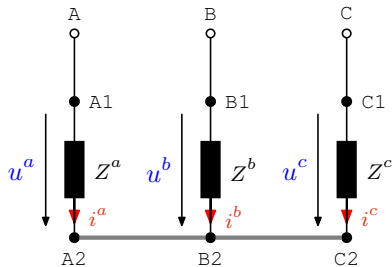
Fact (Dreieck- / Δ -Schaltung)

- $i^{a-b} + i^{b-c} + i^{c-a} = 0$
- $u^a + u^b + u^c = 0$
- $(i^a + i^b + i^c \neq 0)$

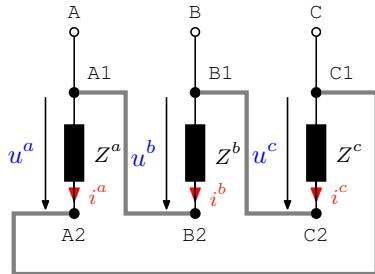
Wechsel-/Drehstromsysteme

Verdrahtung von Drei-Phasen-Systemen (Klemmkasten)

Sternschaltung (Symbol γ)



Dreieckschaltung (Symbol Δ)



Gliederung

1 Anhang

- Leistungselektronik
- Windkraftanlagenkonzepte
- Wechsel-/Drehstromsysteme [2, Chapter 14]
- Raumzeigertheorie

Raumzeigertheorie

Clarke-Transformation $(a, b, c) \rightarrow (\alpha, \beta, \gamma)$

Definition 1 (Clarke-Transformation mit $\kappa \in \{2/3, \sqrt{2/3}\}$)

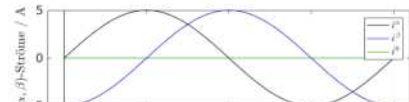
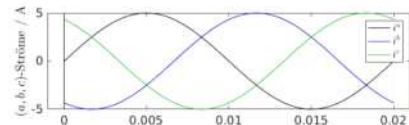
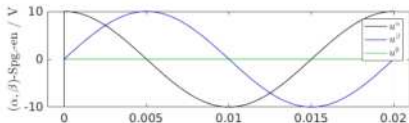
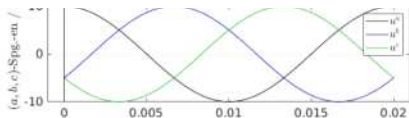
$$\mathbf{f}_c^*: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3, \underbrace{\begin{pmatrix} x^a \\ x^b \\ x^c \end{pmatrix}}_{=: \mathbf{x}^{abc}} \mapsto \underbrace{\begin{pmatrix} x^\alpha \\ x^\beta \\ x^0 \end{pmatrix}}_{=: \mathbf{x}^{\alpha\beta\gamma}} := \mathbf{f}_c(\mathbf{x}^{abc}) := \kappa \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}}_{=: \mathbf{T}_c^* \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, \forall \kappa \neq 0: \det(\mathbf{T}_c^*) \neq 0} \begin{pmatrix} x^a \\ x^b \\ x^c \end{pmatrix}$$
$$(\mathbf{T}_c^*)^{-1} = \frac{1}{\kappa} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{2}}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{2}}{3} \end{bmatrix}, \text{ somit } \mathbf{x}^{abc} = (\mathbf{f}_c^*)^{-1}(\mathbf{x}^{s,*}) = (\mathbf{T}_c^*)^{-1} \mathbf{x}^{\alpha\beta\gamma}.$$

Remark (Wahl von κ)

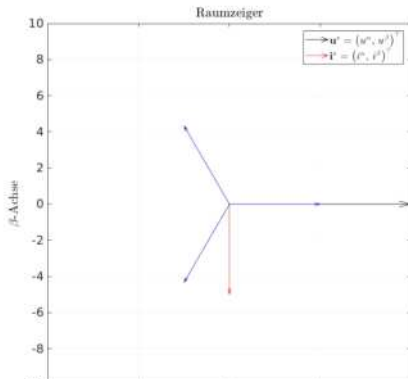
$$\begin{aligned} \kappa = \frac{2}{3} &\implies \text{amplituden-korrekte Transformation, d.h. } |x^a| = |x^\alpha|. \\ \kappa = \sqrt{\frac{2}{3}} &\implies \text{leistungs-korrekte Transformation, d.h. } (\mathbf{u}^{abc})^\top \mathbf{i}^{abc} = (\mathbf{u}^{\alpha\beta})^\top \mathbf{i}^{\alpha\beta}. \end{aligned}$$

Raumzeigertheorie

Raumzeiger-Animation



© Prof. Dr.-Ing. Christoph M. Hackl, 2018,
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik (FK04)
Hochschule München
christoph.hackl@hm.edu
<https://www.ee.hm.edu/fk04/profs/hackl.de.html>



Raumzeigertheorie

Park-Transformation $(\alpha, \beta) \rightarrow (d, q)$

Definition 2 (Park-Transformation (vereinfacht))

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_p: \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R}^2, \\ \underbrace{\begin{pmatrix} x^\alpha \\ x^\beta \end{pmatrix}}_{=: \mathbf{x}^{\alpha\beta}}, \phi &\mapsto \underbrace{\begin{pmatrix} x^d \\ x^q \end{pmatrix}}_{=: \mathbf{x}^{dq}} := \mathbf{f}_p(\mathbf{x}^{\alpha\beta}, \phi) = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}}_{=: \mathbf{T}_p(\phi)^{-1} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}, \forall \phi \in \mathbb{R}: \det(\mathbf{T}_p) \neq 0} \begin{pmatrix} x^\alpha \\ x^\beta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Properties

- $\forall \phi_1, \phi_2 \in \mathbb{R}: \quad \mathbf{T}_p(\phi_1 + \phi_2) = \mathbf{T}_p(\phi_1) \cdot \mathbf{T}_p(\phi_2)$
- $\forall \phi \in \mathbb{R}: \quad \mathbf{T}_p(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} = \mathbf{T}_p(-\phi)^{-1} = \mathbf{T}_p(-\phi)^\top$
- $\mathbf{J} := \mathbf{T}_p(\frac{\pi}{2}) = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ und $\forall \phi \in \mathbb{R}: \quad \mathbf{J}\mathbf{T}_p(\phi) = \mathbf{T}_p(\phi)\mathbf{J}$
- $\forall \phi(\cdot) \in \mathcal{C}^{\text{abs}}(\mathbb{R}_{\geq 0}; \mathbb{R}): \quad \omega(\cdot) := \frac{d}{dt}\phi(\cdot) \wedge \frac{d}{dt}\mathbf{T}_p(\phi(t)) = \omega(t)\mathbf{J}\mathbf{T}_p(\phi(t))$