

Regelung der Zwischenkreisspannung: Ein Vergleich

Christian Dirscherl¹, Christoph Hackl^{1,2} und Korbinian Schechner¹

¹Munich School of Engineering, Forschergruppe "Control of Renewable Energy Systems (CRES)"
Technische Universität München

²Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme und Leistungselektronik
Technische Universität München

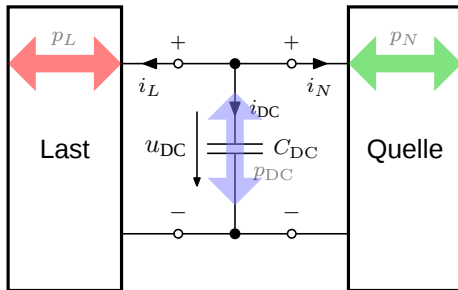
Kolloquium zur nichtlinearen Regelung
leistungselektronischer Systeme und elektrischer Antriebe
Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität des Saarlandes

06.02.2014

Gliederung

- 1 Problemstellung: Zwischenkreisspannungsregelung
- 2 Klassische PI-Regelung
- 3 Eingangs-/Ausgangslinearisierung
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

Motivation: Zwischenkreisspannungsregelung



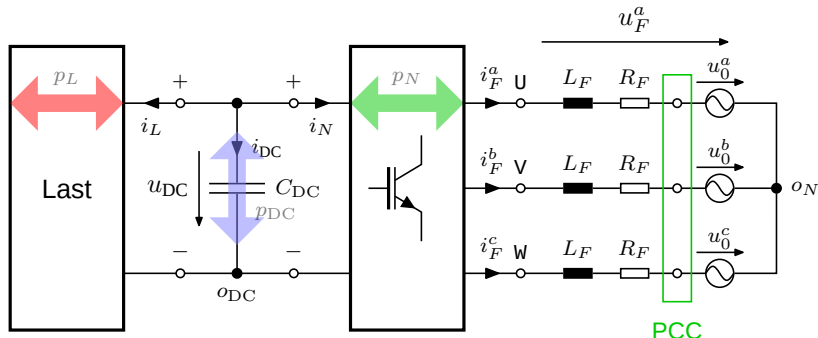
Leistungsgleichgewicht

$$p_{DC} = u_{DC} C_{DC} \frac{d}{dt} u_{DC} = -p_L - p_N \implies \frac{d}{dt} u_{DC} = \frac{1}{u_{DC} C_{DC}} (-p_L - p_N)$$

so dass

$$u_{DC} = u_{DC,ref} > 0$$

Modellierung: Netzseitiges elektrisches Netzwerk



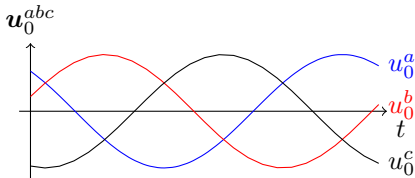
Netzwerk

$$\mathbf{u}_F^{abc} = (u_F^a, u_F^b, u_F^c)^\top = R_F \mathbf{i}_F^{abc} + L_F \frac{d}{dt} \mathbf{i}_F^{abc} + \mathbf{u}_0^{abc}$$

Leistung (bei verlustlosem Umrichter)

$$p_N = i_N u_{DC} = u_F^a i_F^a + u_F^b i_F^b + u_F^c i_F^c = (\mathbf{u}_F^{abc})^\top \mathbf{i}_F^{abc}$$

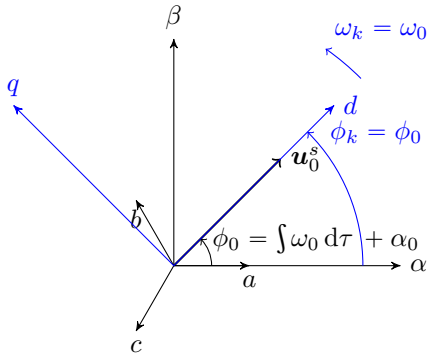
Modellierung: Netz und Spannungsorientierung



$$\begin{aligned} \mathbf{u}_0^{abc} &= (u_0^a, u_0^b, u_0^c)^\top \\ &= \hat{u}_0 \begin{pmatrix} \cos(\omega_0 t + \alpha_0) \\ \cos(\omega_0 t - 2/3\pi + \alpha_0) \\ \cos(\omega_0 t - 4/3\pi + \alpha_0) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

mit

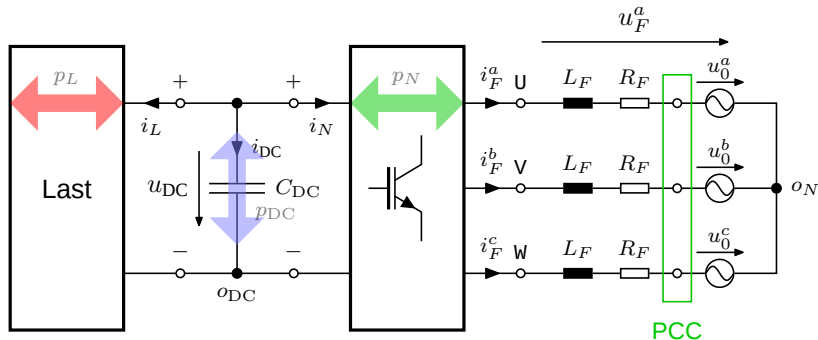
- $\hat{u}_0 = \sqrt{2} \cdot 230 \text{ [V]}$
- $\omega_0 = 2\pi \cdot 50 \text{ [rad/s]}$
- (hier: $\alpha_0 = \pi/4 \text{ [rad]}$)



$$\|\mathbf{u}_0^s\| = \hat{u}_0 \quad \text{und} \quad \phi_0 = \text{atan2} \left(\frac{u_0^\alpha}{u_0^\beta} \right)$$

$$\Rightarrow \boxed{u_0^d = \hat{u}_0 \quad \text{und} \quad u_0^q = 0}$$

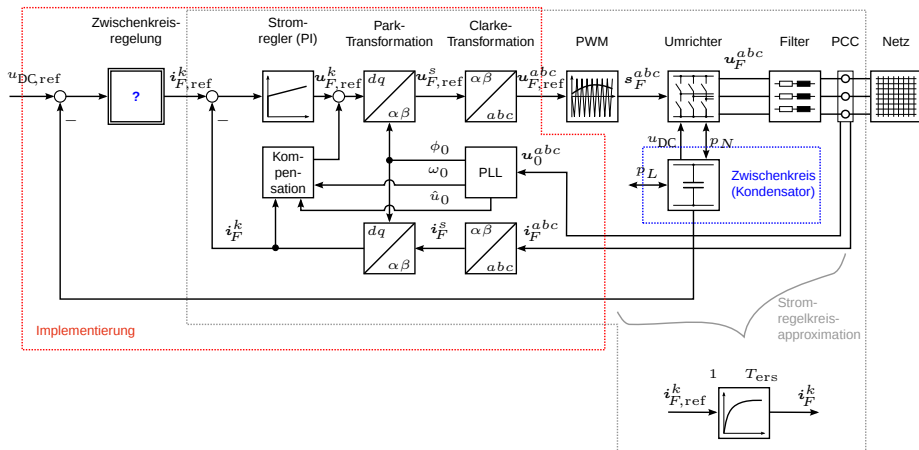
Modellierung: El. Netzwerk in Spannungsorientierung



$$\mathbf{u}_F^k = R_F \mathbf{i}_F^k + L_F \frac{d}{dt} \mathbf{i}_F^k + \omega_0 L_F \begin{pmatrix} -i_F^q \\ i_F^d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \hat{u}_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$p_N = \underbrace{\frac{3}{2} R_F \|\mathbf{i}_F^k\|^2}_{=: p_{V, R_F}} + \underbrace{\frac{3}{2} L_F \left(\frac{d}{dt} \mathbf{i}_F^k \right)^\top \mathbf{i}_F^k}_{=: p_{V, L_F}} + \underbrace{\frac{3}{2} \hat{u}_0 i_F^d}_{=: P_{PCC} \text{ Wirkleistung}} \quad \& \quad \underbrace{Q_{PCC} = -\frac{3}{2} \hat{u}_0 i_F^q}_{\text{Blindleistung}}$$

Übersichtsbild: Zwischenkreisspannungsregelung



Linearisierung im Arbeitspunkt $(u_{\text{DC}}^*, i_F^{d,*}, i_F^{q,*})$

$$\frac{d}{dt} u_{\text{DC}} = \frac{1}{C_{\text{DC}} u_{\text{DC}}} \left[-p_L - \frac{3}{2} \left(R_F \left\| \mathbf{i}_F^k \right\|^2 + L_F \left(\frac{d}{dt} \mathbf{i}_F^k \right)^\top \mathbf{i}_F^k + \hat{u}_0 i_F^d \right) \right]$$

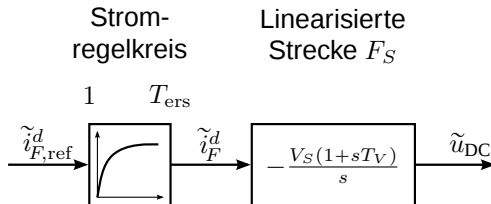
$$\Rightarrow \frac{d}{dt} \tilde{u}_{\text{DC}} = -\frac{1}{C_{\text{DC}} u_{\text{DC}}^*} \left[\tilde{p}_L + \frac{3}{2} \left(\left(\hat{u}_0 + 2R_F i_F^{d,*} \right) \tilde{i}_F^d + L_F i_F^{d,*} \frac{d}{dt} \tilde{i}_F^d \right) + \frac{3}{2} \left(2R_F i_F^{q,*} \tilde{i}_F^q + L_F i_F^{d,*} \frac{d}{dt} \tilde{i}_F^q \right) \right]$$

$$\circ \bullet s \tilde{u}_{\text{DC}}(s) = -\frac{1}{C_{\text{DC}} u_{\text{DC}}^*} \left[\tilde{p}_L(s) + \frac{3}{2} \left(\left(\hat{u}_0 + 2R_F i_F^{d,*} \right) + s L_F i_F^{d,*} \right) \tilde{i}_F^d(s) + \frac{3}{2} (2R_F + s L_F) i_F^{q,*} \tilde{i}_F^q(s) \right]$$

Führungsübertragungsfunktion:

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\tilde{u}_{\text{DC}}(s)}{\tilde{i}_F^d(s)} = -V_S \frac{1 + T_V s}{s}} \quad \text{mit} \quad T_V := \frac{L_F i_F^{d,*}}{\hat{u}_0 + 2R_F i_F^{d,*}}, \quad V_S := \frac{3}{2} \frac{\hat{u}_0 + 2R_F i_F^{d,*}}{C_{\text{DC}} u_{\text{DC}}^*}$$

Strukturvariante Strecke



$$(S_1) \quad i_F^{d,*} = 0 \implies T_V = 0 \implies \frac{u_{DC}(s)}{i_{F,ref}^d(s)} = \frac{V_S}{s(1+sT_{ers})} \quad (IT_1)$$

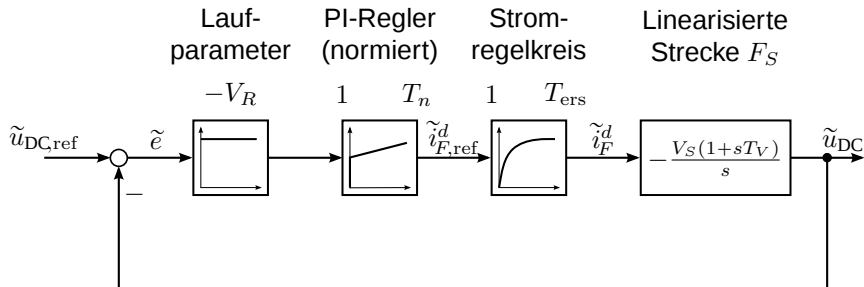
$$(S_2) \quad i_F^{d,*} > 0 \implies T_V > 0 \implies \frac{u_{DC}(s)}{i_{F,ref}^d(s)} = \frac{V_S(1+sT_V)}{s(1+sT_{ers})}$$

(IT₁ + PD, minimalphasig)

$$(S_3) \quad i_F^{d,*} < 0 \implies T_V < 0 \implies \frac{u_{DC}(s)}{i_{F,ref}^d(s)} = \frac{V_S(1-s|T_V|)}{s(1+sT_{ers})}$$

(IT₁ + PD, **nicht** minimalphasig)

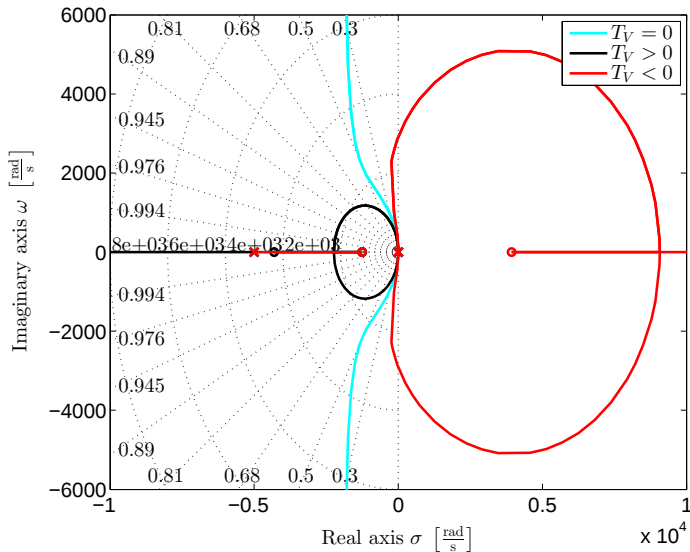
Wurzelortskurve des linearisierten Regelkreises



Offener Kreis

$$\frac{\tilde{u}_{\text{DC}}(s)}{\tilde{e}(s)} = \frac{V_R V_S (1 + sT_n)(1 + sT_V)}{s^2 T_n (1 + sT_{\text{ers}})}, \quad \begin{cases} T_{\text{ers}}, T_n > 0, V_S > 0 \\ T_V \in \mathbb{R} \text{ (abhängig vom Arbeitspunkt!)} \\ V_R \rightarrow \infty \text{ laufende Verstärkung} \end{cases}$$

Wurzelortskurven in Abhängigkeit des Arbeitspunktes



Stabilitätsanalyse nach Hurwitz

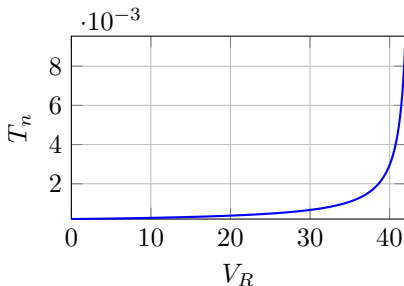
Geschlossener Regelkreis

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

Zwei Bedingungen (hinreichend)

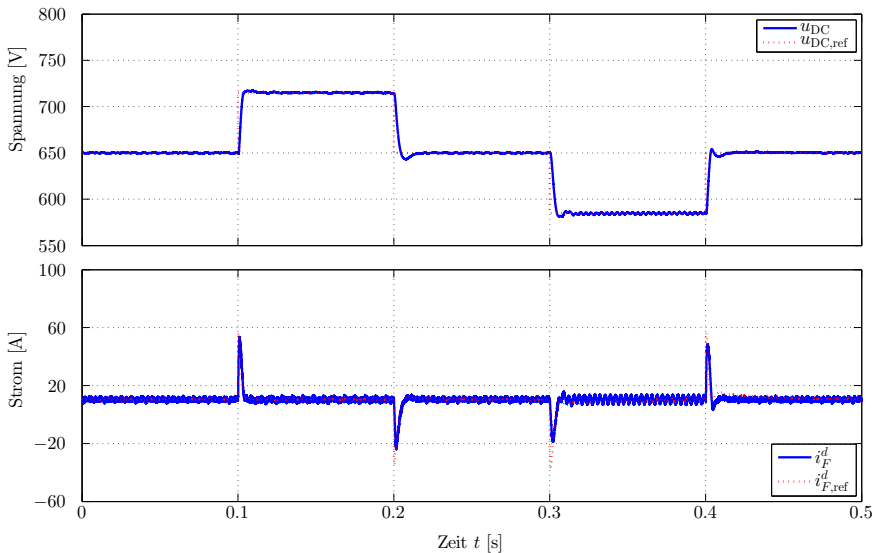
(B₁) $0 < V_R < \frac{1}{|T_V| V_S}$

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

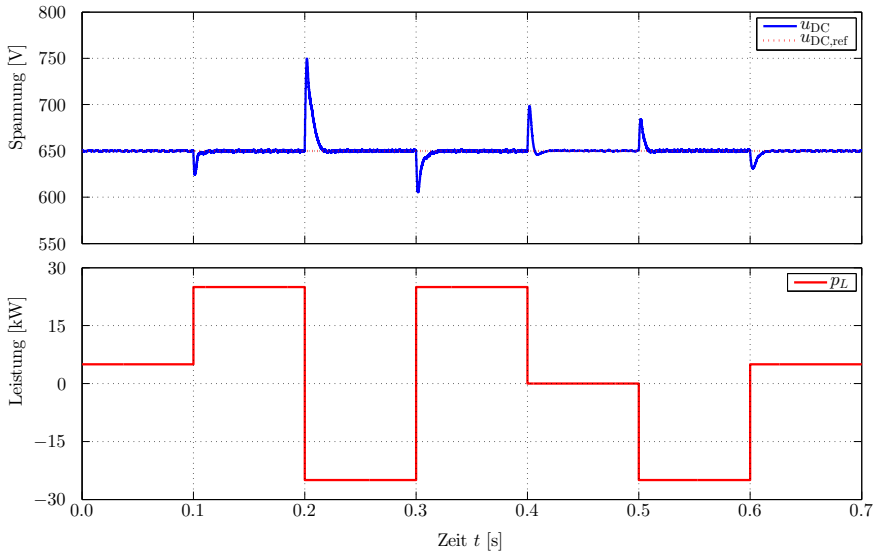


$\Rightarrow$ **lokal stabil**, da $a_0, a_1, a_2, a_3 > 0$ und $D_2 = a_2 a_1 - a_3 a_0 > 0$.

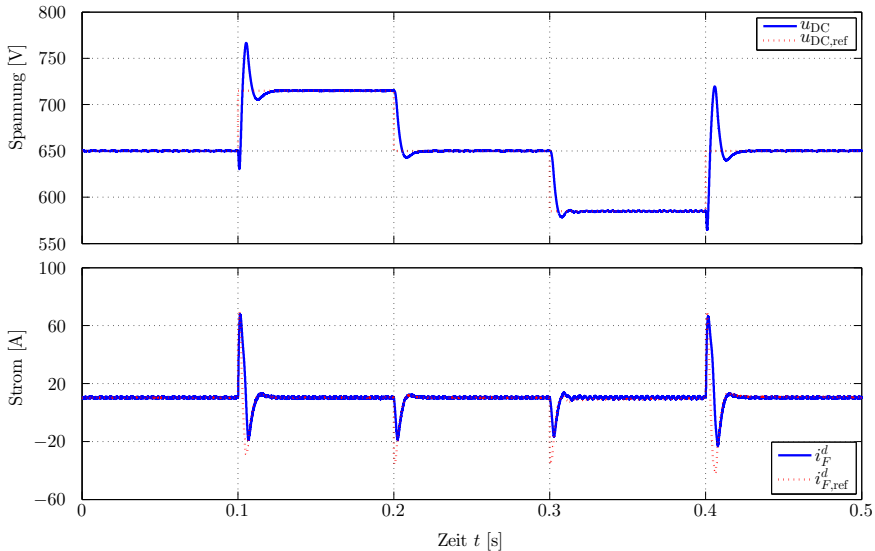
Simulation: Führungsverhalten ($L_F = L_0$)



Simulation: Störverhalten ($L_F = L_0$)



Simulation: Führungsverhalten ($L_F = 3L_0$)



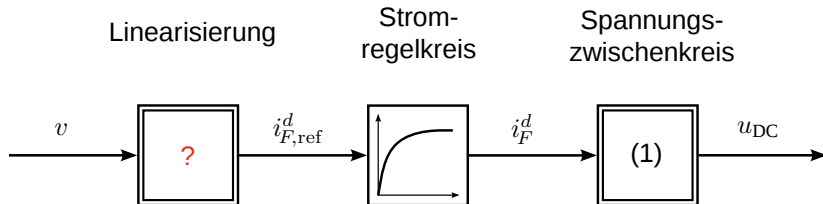
Idee der Linearisierung

Nichtlineare Strecke

$$\frac{d}{dt} u_{DC} = \frac{1}{C_{DC} u_{DC}} \left[-p_L - \overbrace{\frac{3}{2} \left(R_F \| \mathbf{i}_F^k \|^2 + L_F \left(\frac{d}{dt} \mathbf{i}_F^k \right)^\top \mathbf{i}_F^k + \hat{u}_0 i_F^d \right)}^{p_N} \right] \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i}_F^k = \frac{1}{T_{ers}} \left(-\mathbf{i}_F^k + \mathbf{i}_{F,ref}^k \right), \quad (u_{DC}(0), \mathbf{i}_F^k(0)^\top) = (u_{DC}^0, (\mathbf{i}_F^{k,0})^\top) \quad (2)$$

$$y = u_{DC}$$



Vereinfachende Annahmen

Unter

(A₁) Schnelle Stromregelung und kleine Induktivität,

$$\implies L_F \frac{d}{dt} \mathbf{i}_F^k = \frac{L_F}{T_{\text{ers}}} \left(-\mathbf{i}_F^k + \mathbf{i}_{F,\text{ref}}^k \right) \approx 0$$

(A₂) keine Blindleistung, d.h. $Q_{\text{PPC},\text{ref}} = 0 \implies i_{F,\text{ref}}^q = 0 \implies i_F^q \approx 0$

(A₃) Leistung der Last bekannt, d.h. p_L liegt als Messwert vor.

gilt

$$\frac{d}{dt} u_{\text{DC}} \approx \frac{1}{C_{\text{DC}} u_{\text{DC}}} \left[-p_L - \frac{3}{2} (R_F (i_F^d)^2 + \hat{u}_0 i_F^d) \right] \neq f(i_{F,\text{ref}}^d) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} i_F^d = \frac{1}{T_{\text{ers}}} (-i_F^d + i_{F,\text{ref}}^d), \quad (u_{\text{DC}}(0), i_F^d(0)) = (u_{\text{DC}}^0, i_F^{d,0}) \quad (4)$$

$$y = u_{\text{DC}}$$

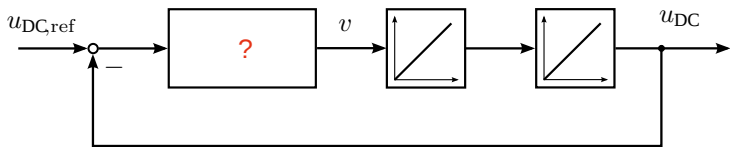
Eingriff und Linearisierung

$$\begin{aligned}
 \text{Eingriff} \quad & \left(\dot{y} = \frac{d}{dt} u_{DC} \neq f(i_{F,\text{ref}}^d) \right) \\
 \ddot{y} &= \frac{d^2}{dt^2} u_{DC} \\
 &= -\frac{1}{C_{DC}^2 u_{DC}^3} \left[-p_L - \frac{3}{2} (R_F (i_F^d)^2 + \hat{u}_0 i_F^d) \right]^2 \\
 &\quad + \frac{1}{C_{DC} u_{DC}} \left[-\dot{p}_L - \frac{3}{2} \left(2R_F \left(\frac{d}{dt} i_F^d \right) i_F^d + \hat{u}_0 \frac{d}{dt} i_F^d \right) \right] \\
 &\stackrel{(4)}{=} -\frac{1}{C_{DC}^2 u_{DC}^3} \left[-p_L - \frac{3}{2} (R_F (i_F^d)^2 + \hat{u}_0 i_F^d) \right]^2 \\
 &\quad + \frac{1}{C_{DC} u_{DC}} \left[-\dot{p}_L - \frac{3}{2} \left(-2 \frac{R_F}{T_{\text{ers}}} (i_F^d)^2 + 2 \frac{R_F}{T_{\text{ers}}} i_F^d i_{F,\text{ref}}^d \right) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{3}{2} \frac{\hat{u}_0}{T_{\text{ers}}} \left(-i_F^d + i_{F,\text{ref}}^d \right) \right] \stackrel{!}{=} v
 \end{aligned}$$

Linearisierung

$$\begin{aligned}
 \Rightarrow i_{F,\text{ref}}^d &= \frac{T_{\text{ers}}}{2R_F i_F^d + \hat{u}_0} \left\{ -\frac{2}{3} C_{DC} u_{DC} v - \cancel{\frac{2}{3} \dot{p}_L} + \frac{2R_F i_F^d + \hat{u}_0}{T_{\text{ers}}} i_F^d \right. \\
 &\quad \left. - \frac{2}{3C_{DC} u_{DC}} \left[-p_L - \frac{3}{2} (R_F (i_F^d)^2 + \hat{u}_0 i_F^d) \right]^2 \right\}
 \end{aligned}$$

Virtuelle Strecke und Reglerauslegung



Reglerauslegung

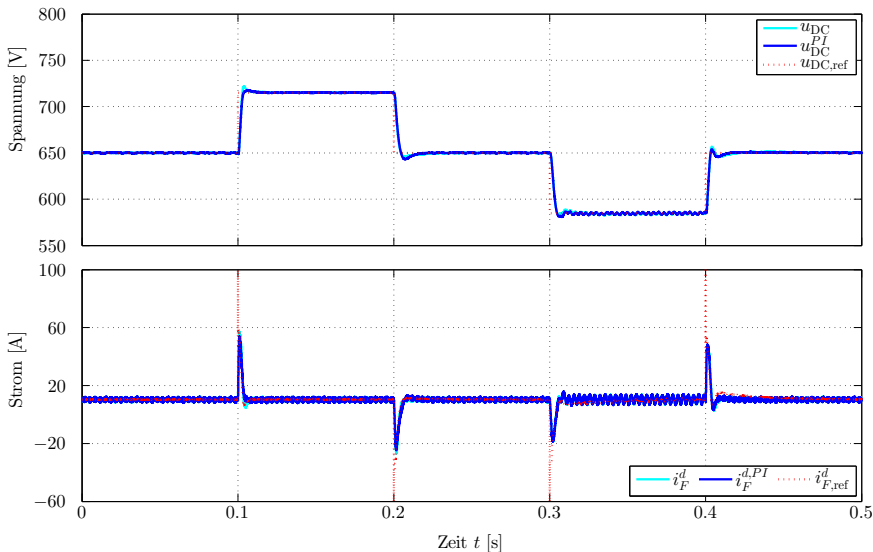
$$v(t) = k_P e(t) + k_D \dot{e}(t) + k_I \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad e(t) = u_{DC,ref}(t) - u_{DC}(t)$$

$$\Rightarrow F_{RK}(s) = \frac{u_{DC}(s)}{u_{DC,ref}(s)} = \frac{s^2 k_D + s k_P + k_I}{s^3 + s^2 k_D + s k_P + k_I}$$

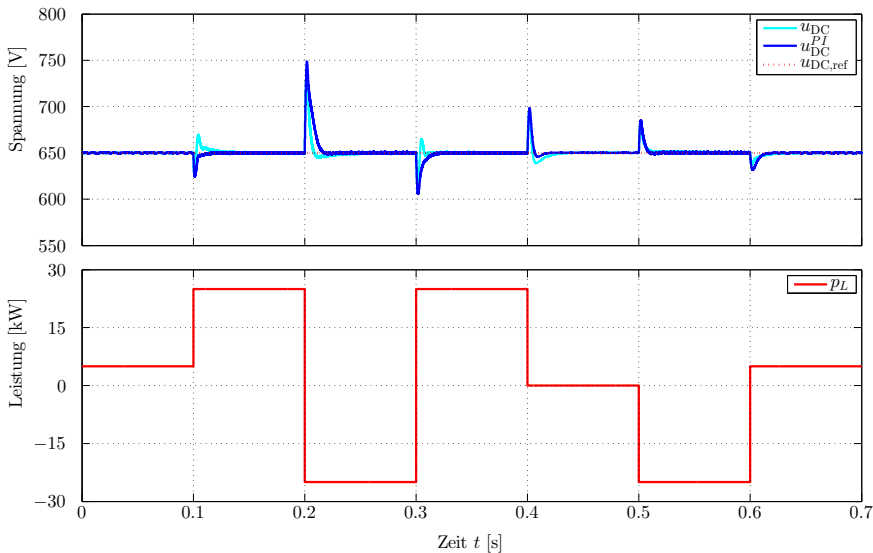
$\Rightarrow$ **stabil** für $k_P, k_I, k_D > 0$ und $k_P k_D > k_I$ (Hurwitz)

$\Rightarrow$ Auslegung z.B. nach Polvorgabe

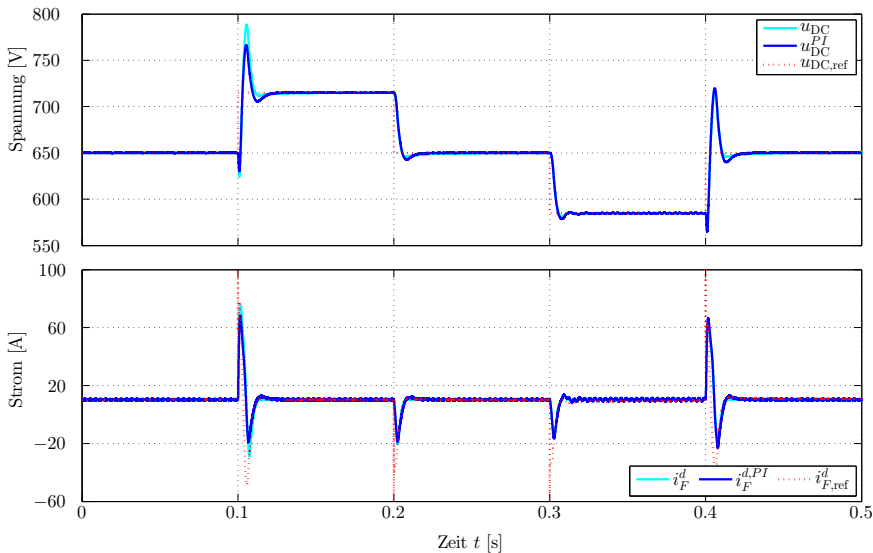
Simulation (Vergleich): Führungsverhalten ($L_F = L_0$)



Simulation (Vergleich): Störverhalten ($L_F = L_0$)



Simulation (Vergleich): Führungsverhalten ($L_F = 3L_0$)



Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung:

- Zwischenkreisspannungsregelung **nicht** trivial, da
 - nichtlineare Strecke
 - strukturvariante Strecke (abhängig vom Arbeitspunkt: **nicht** minimalphasig!)
- PI-Regler und E/A-Linearisierung
 - vergleichbare Performanz / lokale Ergebnisse
- E/A-Linearisierung: hoher Implementierungsaufwand

Offene Fragen:

- Störgrößenbeobachter (für p_L & $\dot{p}_L$)
 - ... sinnvoll für Eingangs-/Ausgangslinearisierung?
 - ... sinnvoll für Model Predictive Control (MPC)?
- Stellgrößenbeschränkungen?
- Robustheits- und Stabilitätsanalyse?
- Validierung im Labor (Messergebnisse)?

Literaturverzeichnis



C. Dirscherl.

Modellierung und Regelung von Windkraftanlagen mit doppelt gespeistem Asynchron-generator.

Master's thesis, Technische Universität München, Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme und Leistungselektronik, 2013.



A. Isidori.

Nonlinear Control Systems.

Springer-Verlag, London, 3rd edition, 1995.



K. Schechner.

Modellierung und Regelung von Windkraftanlagen mit permanenterregtem Synchron-generator.

Master's thesis, Technische Universität München, Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme und Leistungselektronik, 2013.



D. Schröder.

Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen (3., bearb. Auflage).

Springer-Verlag, Berlin, 2009.