

Regelung von Reluktanz-Synchronmaschinen für Elektrofahrzeuge

Christoph Hackl

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

24.06.2015

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM), Technische Universität München

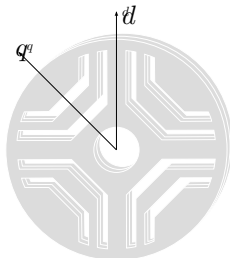
Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Regelung von Reluktanz-Synchronmaschinen
- 3 Offene Fragen und weiteres Vorgehen?

Gliederung

1 Motivation

Reluktanz-Synchronmaschinen: Eine Alternative?



Vorteile:

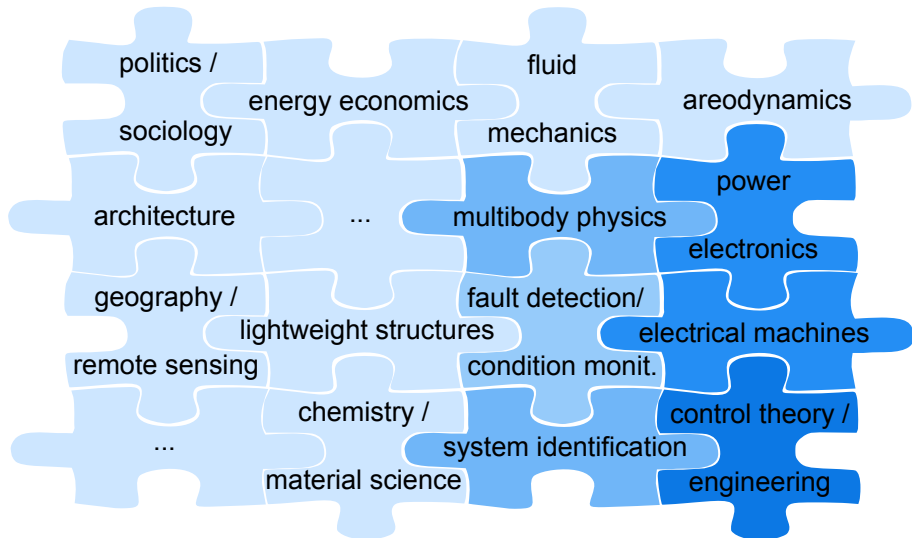
- (sehr) günstig
- hohe Effizienz möglich (IE4)
- hohe Leistungsdichte bzw. Momenten-pro-Volumen Verhältnis (bis zu $50 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$)
- geberlose Regelung möglich

Nachteile:

- Leistungsfaktor
- (Regelung komplex/aufwendig)

(Energie-)Forschung = Interdisziplinarität

Expertise der CRES Forschergruppe



Gliederung

2 Regelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

- Modell-basierte Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [1, 2]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse
- Modell-freie Strom-Trichter-Regelung von RSM [3]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse

Gliederung

2 Regelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

- Modell-basierte Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [1, 2]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse
- Modell-freie Strom-Trichter-Regelung von RSM [3]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse

Gliederung

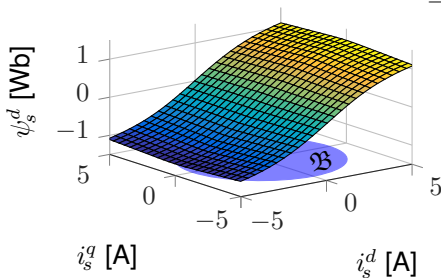
2 Regelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

- Modell-basierte Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [1, 2]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse
- Modell-freie Strom-Trichter-Regelung von RSM [3]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse

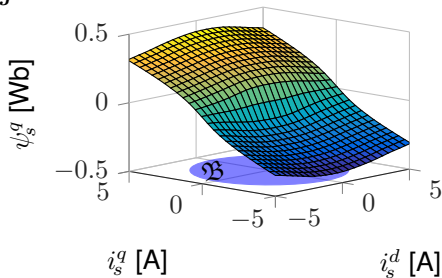
Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

Generisches Modell mit nichtlinearer Flussverkettung (ohne Eisenverluste)

$$\mathbf{u}_s^k(t) = R_s \mathbf{i}_s^k(t) + \frac{d}{dt} \psi_s^k(t) + \omega_k(t) \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}}_{=:J} \psi_s^k(t), \quad \psi_s^k(0) = \psi_{s,0} \quad [\text{Wb}]^2 \quad (1)$$



(a) *d*-Flussverkettung



(b) *q*-Flussverkettung

⇒ **Nichtlineares dynamisches System!**

Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

Generisches Modell: Nichtlineare Stromdynamik

Zeitliche Ableitung der Flussverkettung (Kettenregel) gegeben durch:

$$\frac{d}{dt} \psi_s^k(\mathbf{i}_s^k(t)) = \frac{\partial \psi_s^k(\mathbf{i}_s^k(t))}{\partial \mathbf{i}_s^k(t)} \frac{d}{dt} \mathbf{i}_s^k(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} L_s^{dd}(\mathbf{i}_s^k) & L_s^{dq}(\mathbf{i}_s^k) \\ L_s^{qd}(\mathbf{i}_s^k) & L_s^{qq}(\mathbf{i}_s^k) \end{bmatrix}}_{=: \mathbf{L}_s^k(\mathbf{i}_s^k(t))} \frac{d}{dt} \mathbf{i}_s^k(t) \quad (2)$$

Einsetzen von (2) in (1) ergibt **nichtlineare Stromdynamik**:

$$\boxed{\begin{aligned} \frac{d}{dt} \mathbf{i}_s^k(t) &= \mathbf{L}_s^k(\mathbf{i}_s^k(t))^{-1} \left[\mathbf{u}_s^k(t) - R_s \mathbf{i}_s^k(t) - \omega_k(t) \mathbf{J} \psi_s^k(\mathbf{i}_s^k(t)) \right] \\ \mathbf{i}_s^k(0) &= \mathbf{i}_{s,0}^k [\text{A}]^2 \end{aligned}} \quad (3)$$

Gliederung

2 Regelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

- Modell-basierte Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [1, 2]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse
- Modell-freie Strom-Trichter-Regelung von RSM [3]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse

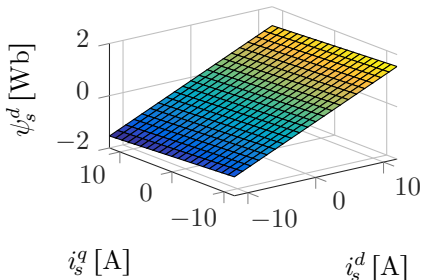
Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

Lineare Flussverkettung

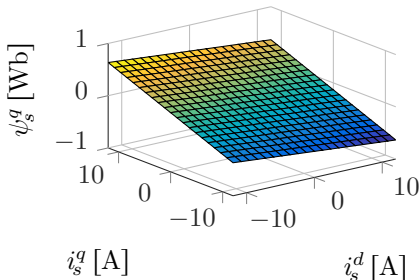
Fall 1

ψ_s^k ist eine **lineare** Funktion der Statorströme i_s^k , d.h.

$$\mathbf{L}_s^k(i_s^k) = \mathbf{L}_s^k = \begin{bmatrix} L_s^{dd} & L_s^{dq} \\ L_s^{qd} & L_s^{qq} \end{bmatrix} = \text{const.} \quad \text{und} \quad \psi_s^k(i_s^k) = \mathbf{L}_s^k i_s^k. \quad (4)$$



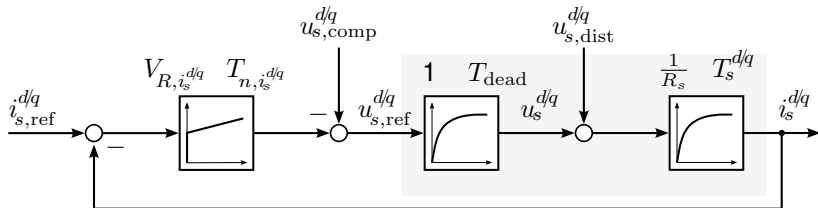
(a) d-Flussverkettung (linear)



(b) q-Flussverkettung (linear)

Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

Regelkreis (mit Umrichterapproximation) und PI-Reglerauslegung



wobei

- $T_s^{d/q} = T_s^{d/q}(L_s^{dd}, L_s^{dq}, L_s^{qd}, L_s^{qq}) = T_s^{d/q}(L_s^{dd}, L_s^c, L_s^{qq})$ mit $L_s^c := L_s^{dq} = L_s^{qd}$
- $T_{\text{dead}} \propto f_{\text{pwm}}$
- $u_{s,\text{comp}}^{d/q} = u_{s,\text{dist}}^{d/q}$ (ideale Entkopplung)
- Reglerauslegung nach **Betragsoptimum** [4]:

$$\text{Verstärkung: } V_{R, i_s^{d/q}} = \frac{T_s^{d/q} R_s}{2T_{\text{dead}}} [\Omega] \quad \wedge \quad \text{Zeitkonstante: } T_{n, i_s^{d/q}} = T_s^{d/q} \quad [\text{s}]$$

Gliederung

2 Regelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

- Modell-basierte Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [1, 2]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - **Stromregelung: Nichtlineare RSM**
 - Messergebnisse
- Modell-freie Strom-Trichter-Regelung von RSM [3]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse

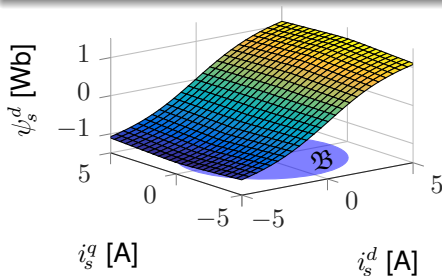
Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

Nichtlineare Flussverkettung

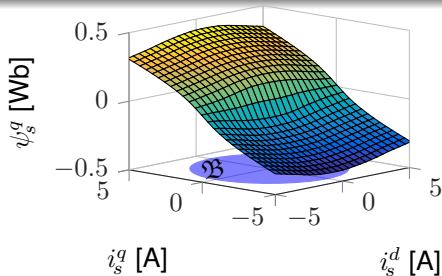
Fall 2

ψ_s^k ist eine **nichtlineare** Funktion der Statorströme i_s^k , d.h.

$$L_s^k(i_s^k) = \begin{bmatrix} L_s^{dd}(i_s^k) & L_s^{dc}(i_s^k) \\ L_s^{cd}(i_s^k) & L_s^{cc}(i_s^k) \end{bmatrix} \neq \text{const.} \quad \text{und} \quad \psi_s^k(i_s^k). \quad (5)$$



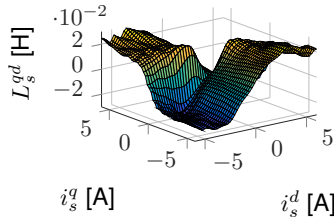
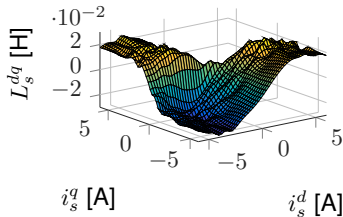
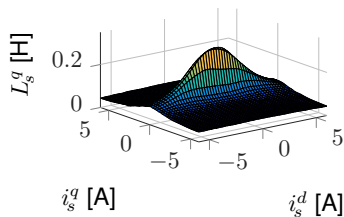
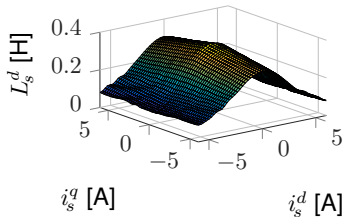
(a) *d*-Flussverkettung



(b) *q*-Flussverkettung

Modell-basierte Stromregelung (nichtlineare RSM)

Nichtlineare Induktivitäten



Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

PI-Reglerauslegung nach Betragsoptimum mit *online Parameteranpassung*

- Induktivitäten sind zustands(strom)-abhängig

$$L_s^{dd}, L_s^c, L_s^{qq} \Rightarrow L_s^{dd}(\mathbf{i}_s^k), L_s^c(\mathbf{i}_s^k), L_s^{qq}(\mathbf{i}_s^k)$$

- Statorzeitkonstanten sind zustands(strom)-abhängig

$$T_s^{d/q} = T_s^{d/q}(L_s^{dd}, L_s^c, L_s^{qq}) \Rightarrow T_s^{d/q}(\mathbf{i}_s^k) := T_s^{d/q}(L_s^{dd}(\mathbf{i}_s^k), L_s^c(\mathbf{i}_s^k), L_s^{qq}(\mathbf{i}_s^k))$$

⇒ **Online Anpassung** der Reglerparameter in jedem Sampling-Schritt:

Verstärkung: $V_{R, \mathbf{i}_s^{d/q}}(\mathbf{i}_s^k) = \frac{T_s^{d/q}(\mathbf{i}_s^k) R_s}{2T_{\text{dead}}} [\Omega]$

Zeitkonstante: $T_{n, \mathbf{i}_s^{d/q}}(\mathbf{i}_s^k) = T_s^{d/q}(\mathbf{i}_s^k)$

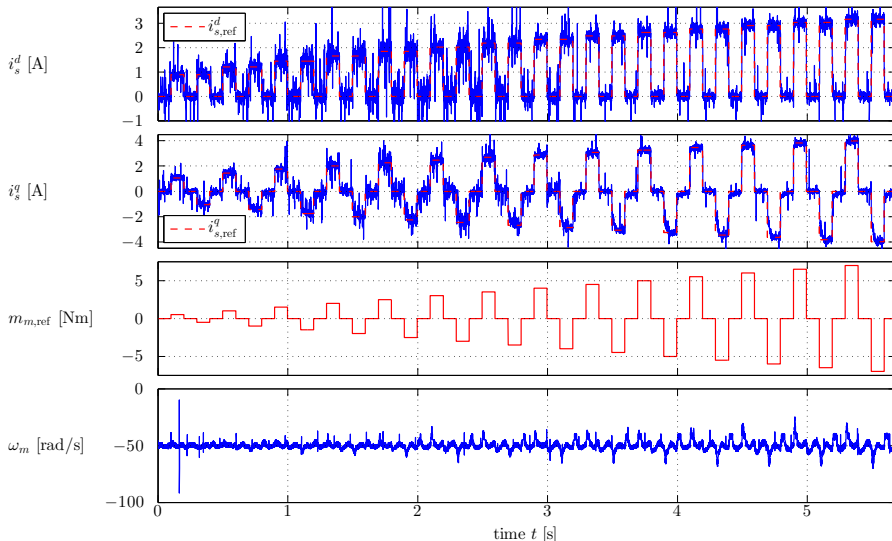
Gliederung

2 Regelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

- Modell-basierte Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [1, 2]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse
- Modell-freie Strom-Trichter-Regelung von RSM [3]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse

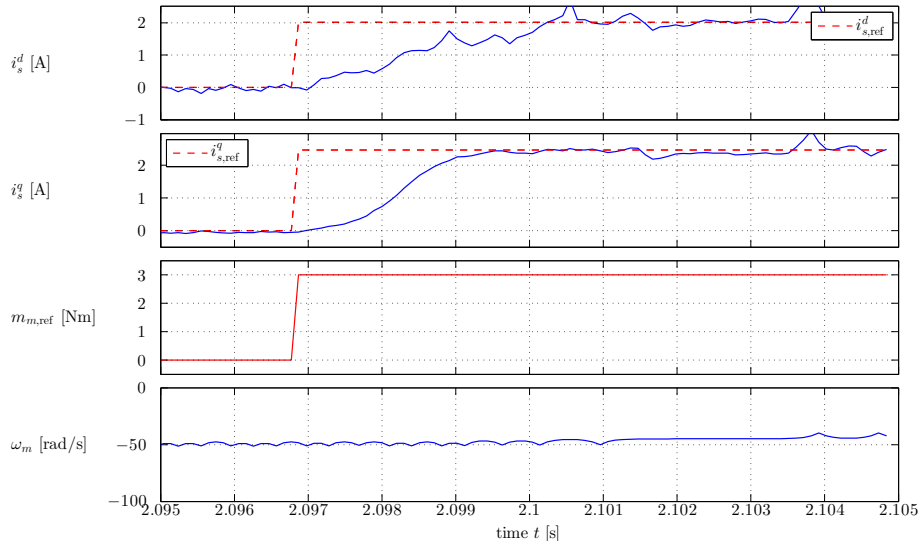
Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

Messergebnisse für 1,1 kW RSM



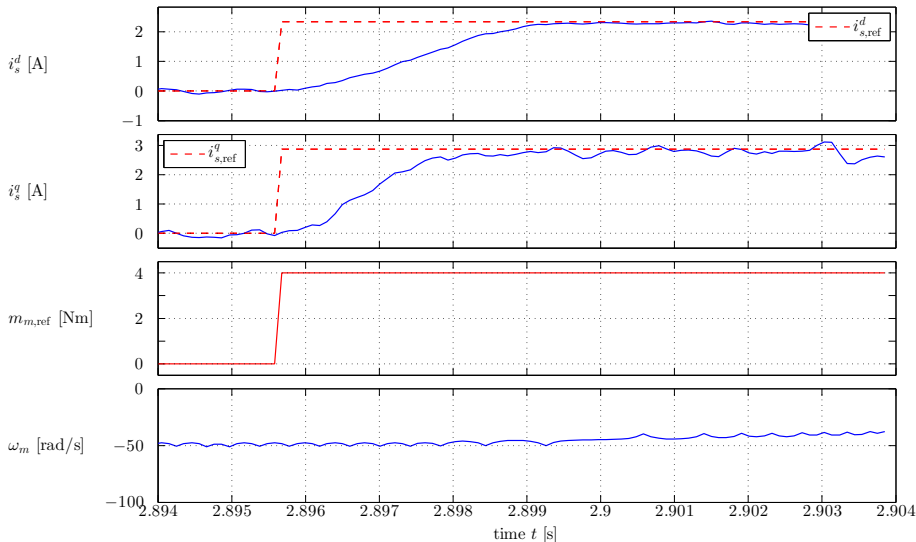
Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

Messergebnisse für 1,1 kW RSM (Zoom 1)



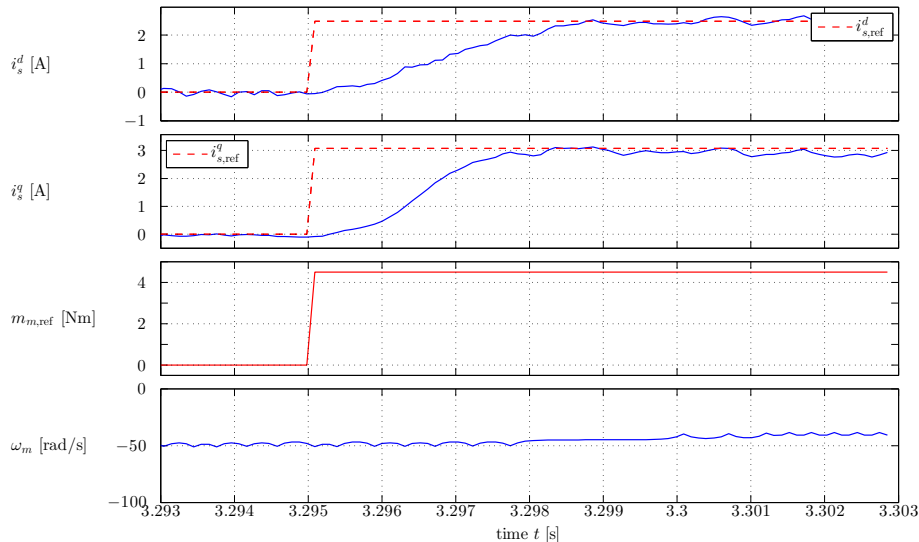
Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

Messergebnisse für 1,1 kW RSM (Zoom)



Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

Messergebnisse für 1,1 kW RSM (Zoom 3)



Gliederung

2 Regelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

- Modell-basierte Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [1, 2]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse
- Modell-freie Strom-Trichter-Regelung von RSM [3]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse

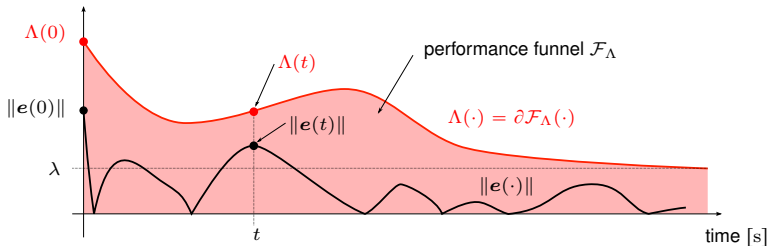
Gliederung

2 Regelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

- Modell-basierte Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [1, 2]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse
- Modell-freie Strom-Trichter-Regelung von RSM [3]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse

Strom-Trichter-Regelung von RSM [3]

Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")



Regelgesetz:

$$\mathbf{u}_{\text{fc}}(t) = k(t)e(t)$$

(FC $_{i_s^k}$)

wobei

- $e(t) = (e_s^d(t), e_s^q(t))^T = \mathbf{i}_{s,\text{ref}}^k(t) - \mathbf{i}_s^k(t)$
- $k(t) = \frac{1}{\Lambda(t) - \|e(t)\|} \geq \frac{1}{\Lambda(t)}$ mit $\|e(t)\| = \sqrt{e_s^d(t)^2 + e_s^q(t)^2}$

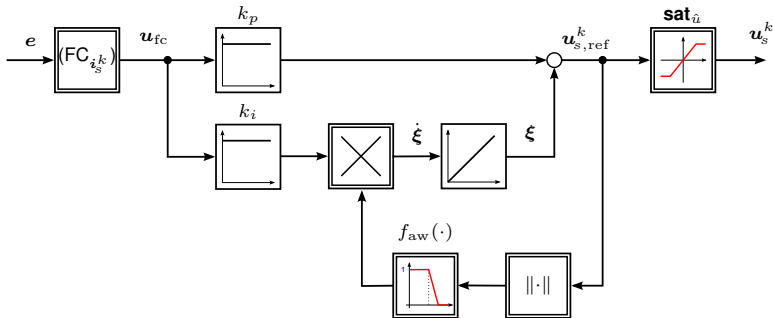
Gliederung

2 Regelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

- Modell-basierte Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [1, 2]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse
- Modell-freie Strom-Trichter-Regelung von RSM [3]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse

Strom-Trichter-Regelung von RSM

PI-Funnel Control mit Anti-Windup als Stromregler



$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \boldsymbol{\xi}(t) &= k_i f_{aw} \left(\boldsymbol{\xi}(t) + k_p \mathbf{u}_{fc}(t) \right) \mathbf{u}_{fc}(t), & \boldsymbol{\xi}(0) &= \boldsymbol{\xi}^0 \in \mathbb{R}^n \\ \mathbf{u}_{s,ref}^k(t) &= \boldsymbol{\xi}(t) + k_p \mathbf{u}_{fc}(t), & \text{mit } k_p &> 0, k_i \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{PI}^{aw})$$

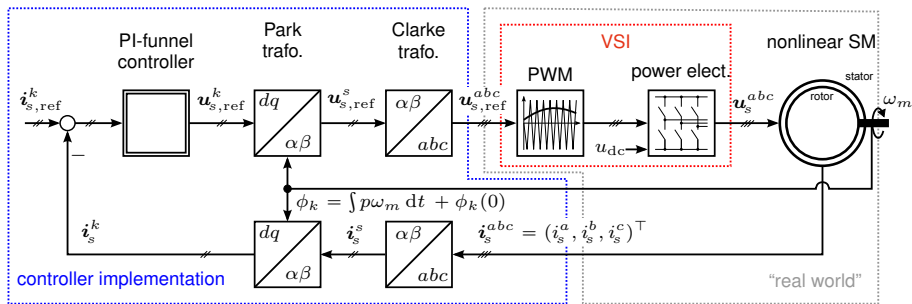
Gliederung

2 Regelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

- Modell-basierte Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [1, 2]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse
- Modell-freie Strom-Trichter-Regelung von RSM [3]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse

Strom-Trichter-Regelung von RSM

Regelkreis und Implementierung



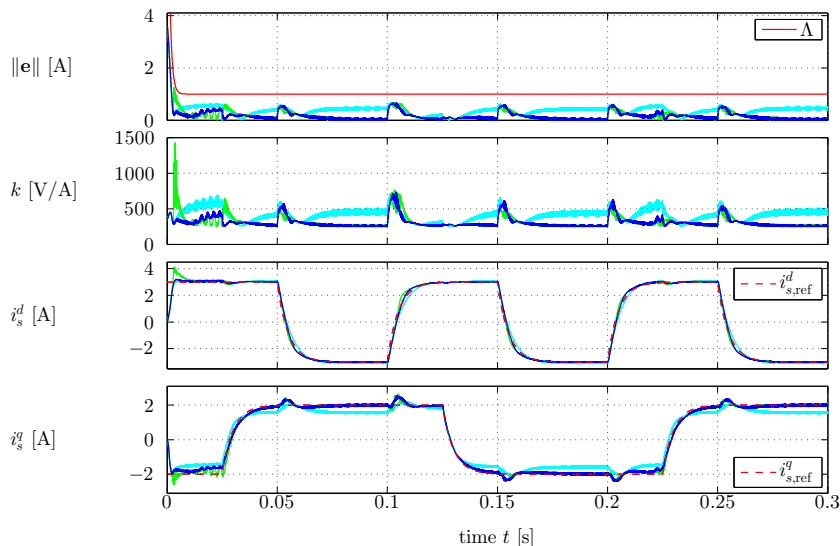
Gliederung

2 Regelung von Reluktanz-Synchronmaschinen

- Modell-basierte Stromregelung von Reluktanz-Synchronmaschinen (RSM) [1, 2]
 - Generisches RSM-Modell
 - Stromregelung: Lineare RSM
 - Stromregelung: Nichtlineare RSM
 - Messergebnisse
- Modell-freie Strom-Trichter-Regelung von RSM [3]
 - Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")
 - PI-Funnel Control mit Anti-Windup
 - Regelkreis und Implementierung
 - Simulationsergebnisse

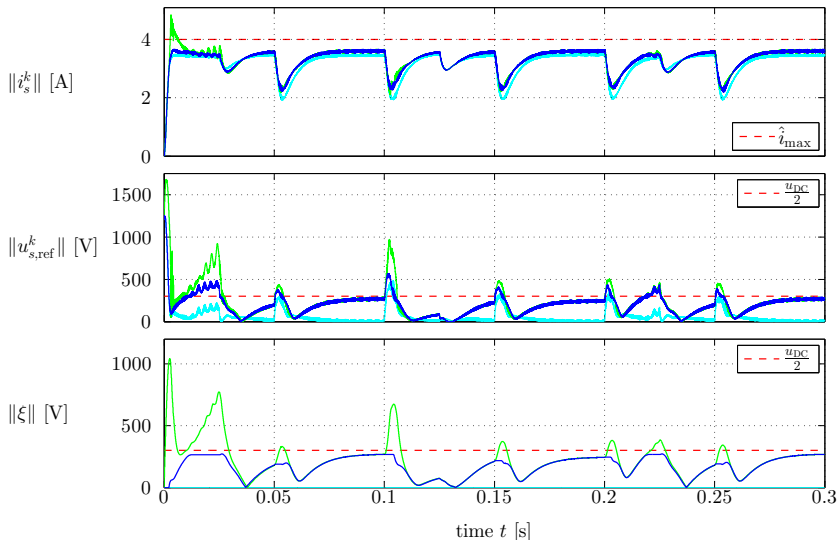
Strom-Trichter-Regelung von RSM

Simulationsergebnisse (1.1 kW RSM): — FC, — FC+PI and — FC+PI^{aw}



Modell-freie Stromregelung von RSM

Simulationsergebnisse (1.1 kW RSM): — FC, — FC+PI and — FC+PI^{aw}



Gliederung

3 Offene Fragen und weiteres Vorgehen?

Offene Fragen und weiteres Vorgehen

- Anforderungen an RSM im Elektrofahrzeug ?
 - Baugröße
 - Leistungsdichte
 - Moment (Getriebe?)
 - Dynamik
 - Effizienz
- Anforderungen an Leistungselektronik/Batterie im Elektrofahrzeug ?
 - Baugröße / Speicherkapazität
 - Schaltfrequenzen
 - Kühlung
 - Topologien
- Allgemein?
 - Interesse an RSM in Industrie
 - Möglichkeiten zur Einwerbung von Drittmitteln
 - Ausgestaltung einer möglichen Kooperation

Literaturliste

- [1] Julian Kullick. Simulation and control of a small-scale wind turbine system with reluctance synchronous generator. Master's thesis, Technische Universität München, MSE Research Group "Control of renewable energy systems", 2015.
- [2] Christoph M. Hackl, Maarten J. Kamper, Julian Kullick, and Joshua Mitchell. Nonlinear PI current control of reluctance synchronous machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics (in preparation)*, 2015.
- [3] Christoph M. Hackl. Current PI-funnel control with anti-windup for synchronous machines. In *submitted to 54th IEEE Conference on Decision and Control*, 2015.
- [4] Dierk Schröder. *Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen (3., bearb. Auflage)*. Springer-Verlag, Berlin, 2009.