

Optimale Betriebsführung, Momentenvorsteuerung und analytische Stromreferenzberechnung zur Verlustminimierung in anisotropen Synchronmaschinen

Christoph Hackl

MSE Research group "Control of Renewable Energy Systems (CRES)"

www.cres.mse.tum.de

06-07.03.2017

Volkswagen AG, Salzgitter

Outline I

- 1 MSE Forschergruppe “Control of Renewable Energy Systems (CRES)”
- 2 Optimale Betriebsführung, Momentenvorsteuerung und analytische Stromreferenzberechnung zur Verlustminimierung in anisotropen Synchronmaschinen [1–4]

Outline I

1 MSE Forschergruppe “Control of Renewable Energy Systems (CRES)”

- Technische Universität München (TUM)
- Munich School of Engineering (MSE)
- Team
- Laufende Forschungsprojekte
- Forschungsfokus und Publikationen
- Laboraufbau

Outline I

1 MSE Forschergruppe “Control of Renewable Energy Systems (CRES)”

- Technische Universität München (TUM)

- Munich School of Engineering (MSE)

- Team

- Laufende Forschungsprojekte

- Forschungsfokus und Publikationen

- Laboraufbau

Technische Universität München (TUM)

Zahlen und Fakten

Studium

Studierende	39.081
darunter	
Studentinnen	34 %
Ausländische Studierende	8.774
darunter	
1. China	1.117
2. Österreich	723
3. Italien	561
4. Indien	558
5. Türkei	507
Absolventen 2015	8.911
Studiengänge	160
darunter	
Bachelor	43
Master	97
Englischesprachige Studiengänge	24
Studiengänge bei TUM Asia in Singapur	8

Stichtag, wenn nicht anders angegeben: 1.12.2015



Architektur-Studierende

Personal & Alumni

Professorinnen und Professoren (mit Klinikum)	528
darunter	
aus dem Ausland	16 %
Professorinnen	17 %
Neuberufungen 2015	44
darunter	
von ausländischen Einrichtungen berufen	41 %
Wissenschaftliches Personal (mit Klinikum)	6.142
darunter	
aus dem Ausland	20 %
Frauen	34 %
Nichtwissenschaftliches Personal (ohne Klinikum)	3.207
darunter	
Frauen	58 %
Mitglieder im Alumni-Netzwerk	54.476

Stichtag, wenn nicht anders angegeben: 1.12.2015

Technische Universität München (TUM)

Hauptstandorte

Departments

154 programs - 13 departments - 3 locations

Munich

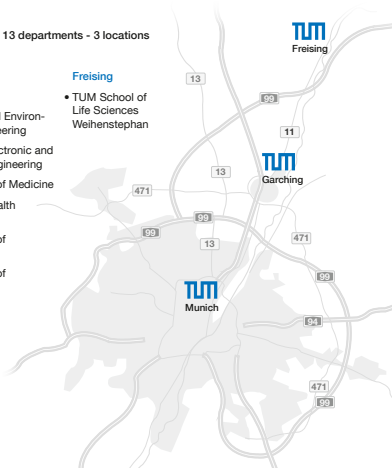
- Architecture
- Civil, Geo and Environmental Engineering
- Electrical, Electronic and Computer Engineering
- TUM School of Medicine
- Sport and Health Sciences
- TUM School of Education
- TUM School of Management

Garching

- Chemistry
- Informatics
- Mathematics
- Mechanical Engineering
- Physics

Freising

- TUM School of Life Sciences
Weihenstephan



Locations & Networks

TUM science network

- Max Planck Institutes:
Garching
Martinsried
Munich
- Helmholtz Zentrum
München
- iwb Anwenderzentrum
Augsburg
- Fraunhofer Institutes:
Holzkirchen
Freising

TUM locations

- Munich
- Garching
- Freising
- Iffeldorf
- Oberrach
- Straubing
- Wettzell
- Singapore: TUM Asia
- Beijing
- Brussels
- Cairo
- Mumbai
- São Paulo

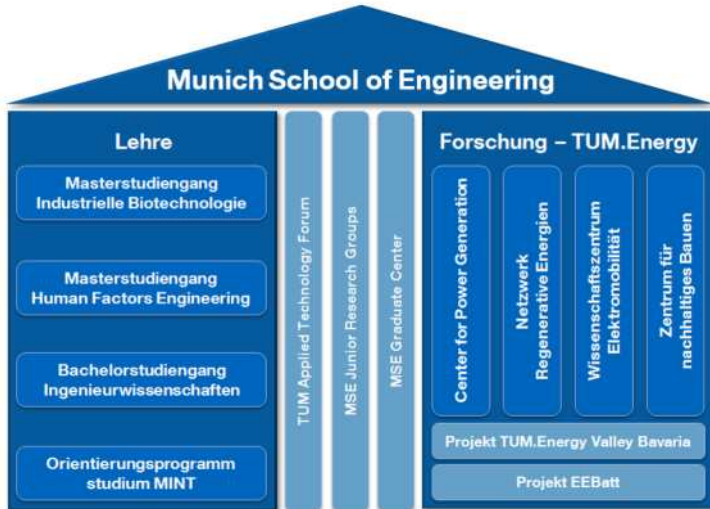
Outline I

1 MSE Forschergruppe “Control of Renewable Energy Systems (CRES)”

- Technische Universität München (TUM)
- **Munich School of Engineering (MSE)**
- Team
- Laufende Forschungsprojekte
- Forschungsfokus und Publikationen
- Laboraufbau

Munich School of Engineering (MSE)

Integrative research center



Outline I

1 MSE Forschergruppe “Control of Renewable Energy Systems (CRES)”

- Technische Universität München (TUM)
- Munich School of Engineering (MSE)
- Team
 - Laufende Forschungsprojekte
 - Forschungsfokus und Publikationen
 - Laboraufbau

“Control of renewable energy systems (CRES)”

Team (7 Doktoranden, 1 Post-Doc, 3 PhD Kooperationen)



H. Eldeeb, M.Sc.
(CRES, 09/2015)



C. Dirscherl, M.Sc.
(CRES, 01/2014)



C. Hackl, Dr.-Ing.
(CRES, 01/2014)



J. Kullick, M.Sc.
(CRES, 10/2015)



K. Schechner, M.Sc.
(CRES, 01/2014)



M. Landerer, M.Sc.
(CRES, 06/2016)

Externe Doktoranden



Z. Zhang, Dr.-Ing.
(CRES/EAL,07/2015)



S. Krüner, M.Sc.
(SINNPower,11/2015)



A. Birda, M.Sc.
(BMW, 04/2016)



F. Bauer, M.Sc.
(EAL)



M. Abdelrahem,
M.Sc. (EAL)



A. Ayad,
M.Sc. (EAL)

... und Kooperationen mit EAL (Prof. Kennel)

Outline I

1 MSE Forschergruppe “Control of Renewable Energy Systems (CRES)”

- Technische Universität München (TUM)
- Munich School of Engineering (MSE)
- Team
- **Laufende Forschungsprojekte**
- Forschungsfokus und Publikationen
- Laboraufbau

“Control of renewable energy systems (CRES)”

Forschungsprojekte (alle mit Bezug auf das elektrische System)

Large-scale WTS



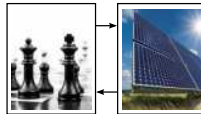
Efficiency+Reliability

Small-scale WTS



Reluctance SM

Model predictive control for RES



Real-time applicability

Airborne Wind Energy



Fault-tolerant control

Geothermal energy



Fault-tolerant control

Wave energy (SinnPower)



Efficiency+Reliability

Electric vehicles (BMW)



Efficiency+Reliability

Power systems



Four-wire system

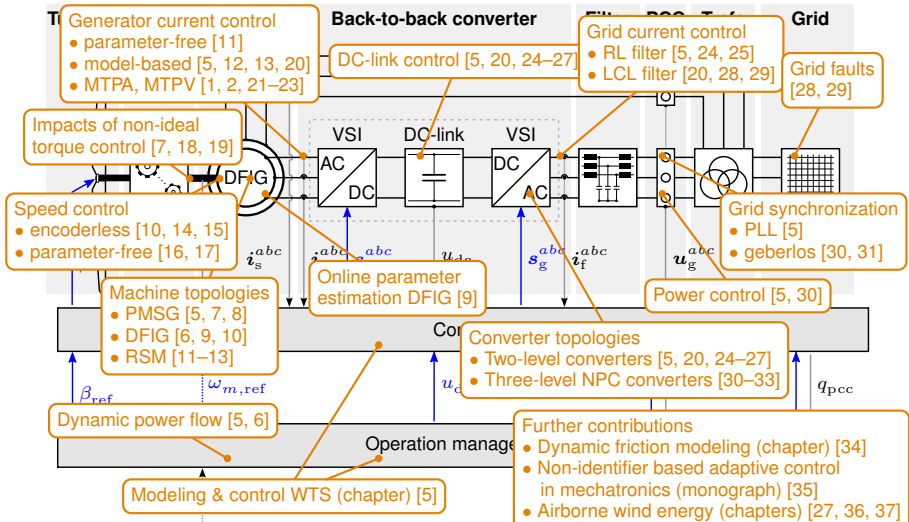
Outline I

1 MSE Forschergruppe “Control of Renewable Energy Systems (CRES)”

- Technische Universität München (TUM)
- Munich School of Engineering (MSE)
- Team
- Laufende Forschungsprojekte
- **Forschungsfokus und Publikationen**
- Laboraufbau

“Control of renewable energy systems (CRES)”

Forschungsfokus und Publikationen: **Elektrische** Komponenten von z.B. Windkraftanlagen



Outline I

1 MSE Forschergruppe “Control of Renewable Energy Systems (CRES)”

- Technische Universität München (TUM)
- Munich School of Engineering (MSE)
- Team
- Laufende Forschungsprojekte
- Forschungsfokus und Publikationen
- **Labora Aufbau**

“Control of renewable energy systems (CRES)”

Laboraufbau

Reluctance and Permanent-magnet SMs



Real-time system and VSIs



Electrically-excited SM and doubly-fed IM



Outline I

- 2** Optimale Betriebsführung, Momentenvorsteuerung und analytische Stromreferenzberechnung zur Verlustminimierung in anisotropen Synchronmaschinen [1–4]
 - Motivation
 - Problemstellung und Lösungsvorschlag
 - Betriebsführung und Betriebsmodi
 - Betriebsmodi und Umschaltunkte
 - Entscheidungsbaum
 - Illustration von MTPC, FW und MTPV
 - Betriebsmodi
 - Analytische Lösung
 - Analytische Lösung für Quadriken Schnittpunkt(e)
 - Analytische Lösung für Optimierungsproblem mit Gleichheitsnebenbedingung
 - Wurzeln eines Polynoms vierter Ordnung
 - Implementierung
 - Zusammenfassung und Ausblick

Outline I

2 Optimale Betriebsführung, Momentenvorsteuerung und analytische Stromreferenzberechnung zur Verlustminimierung in anisotropen Synchronmaschinen [1–4]

■ Motivation

■ Problemstellung und Lösungsvorschlag

■ Betriebsführung und Betriebsmodi

- Betriebsmodi und Umschaltunkte
- Entscheidungsbaum
- Illustration von MTPC, FW und MTPV
- Betriebsmodi

■ Analytische Lösung

- Analytische Lösung für Quadriken Schnittpunkt(e)
- Analytische Lösung für Optimierungsproblem mit Gleichheitsnebenbedingung
- Wurzeln eines Polynoms vierter Ordnung

■ Implementierung

■ Zusammenfassung und Ausblick

Motivation

Synchronmaschinen: Weitverbreitete, kompakte und effiziente Aktoren



www.bmw.de



www.farmwood.co.uk

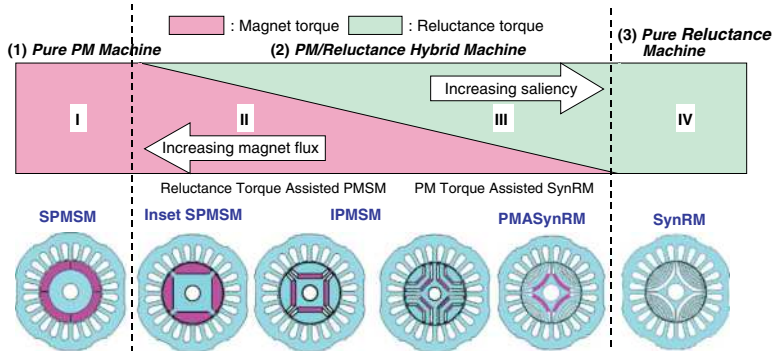


www.abb.com (from video)

- Traktionsantriebe (z.B. E-Fahrzeuge oder Züge)
- Klimaanlage und Ventilatoren
- Pumpen
- konventionelle Kraftwerke (z.B. Wasserkraftwerke)
- Erneuerbare Energiesysteme (z.B. DirectDrive Windkraftanlagen)

Motivation

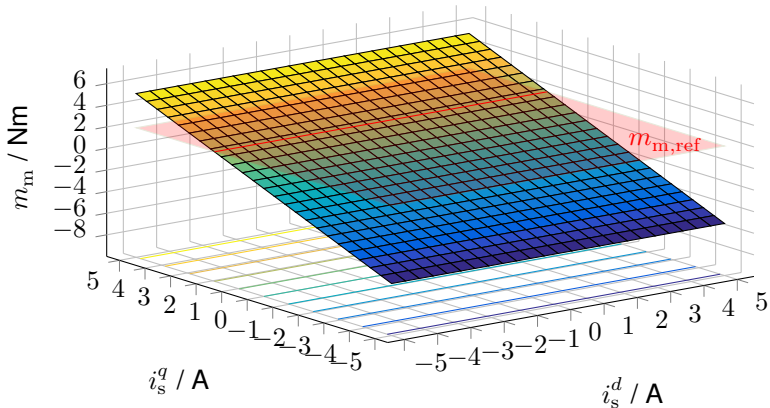
Beispiele von anisotropen Synchronmaschinen [38] mit “saliency ratio” $L_s^d/L_s^q \neq 1$



$$m_m(i_s^d, i_s^q) = \frac{3}{2} n_p \left[\underbrace{\psi_{pm} i_s^q}_{\text{El.-mag. Moment}} + \underbrace{(L_s^d - L_s^q) i_s^d i_s^q}_{\text{Reluktanzmoment}} + \underbrace{L_m ((i_s^q)^2 - (i_s^d)^2)}_{\text{Kreuzkopplungsmoment}} \right]$$

Motivation

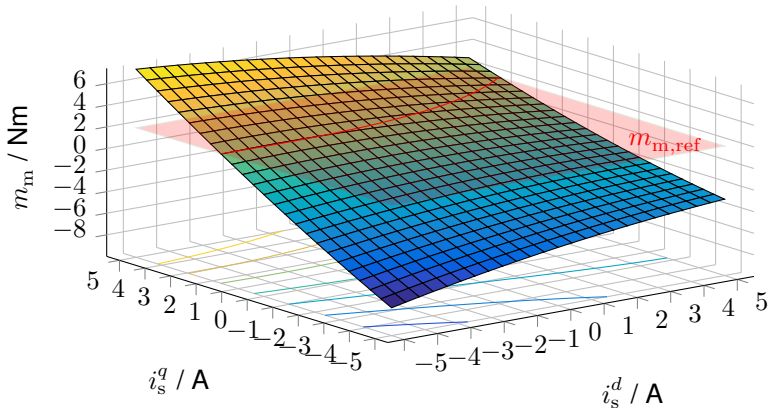
Optimale Momentenvorsteuerung: **Isotrope Maschine**



$$m_{m,ref} \stackrel{!}{=} m_m(i_s^d, i_s^q) = \frac{3}{2} n_p \psi_{pm} i_s^q \quad (\implies i_{s,ref}^q = \frac{2 m_{m,ref}}{3 n_p \psi_{pm}})$$

Motivation

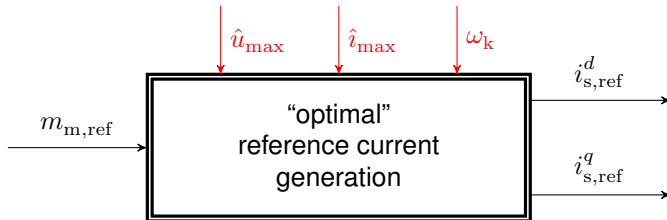
Optimale Momentenvorsteuerung: **Anisotrope Maschine**



$$m_{m,ref} \stackrel{!}{=} m_m(i_s^d, i_s^q) = \frac{3}{2} n_p \left[\psi_{pm} i_s^q + (L_s^d - L_s^q) i_s^d i_s^q + L_m ((i_s^q)^2 - (i_s^d)^2) \right]$$

Motivation

Optimale Momentenvorsteuerung: Ziel



$$\mathbf{i}_{s,\text{ref}}^k(m_{m,\text{ref}}, \hat{u}_{\text{max}}, \hat{i}_{\text{max}}, \omega_k) = \begin{pmatrix} i_{s,\text{ref}}^d(m_{m,\text{ref}}, \hat{u}_{\text{max}}, \hat{i}_{\text{max}}, \omega_k) \\ i_{s,\text{ref}}^q(m_{m,\text{ref}}, \hat{u}_{\text{max}}, \hat{i}_{\text{max}}, \omega_k) \end{pmatrix}$$

- ✓ Numerische Lösungen und/oder Look-up Tabellen
(aber: begrenzter Speicher, Genauigkeit, Realzeitfähigkeit)
- ? Analytische Lösungen (existieren; aber nur unter vereinfachenden Annahmen
so dass $R_s = 0$ und/oder $L_m = 0$)

Outline I

2 Optimale Betriebsführung, Momentenvorsteuerung und analytische Stromreferenzberechnung zur Verlustminimierung in anisotropen Synchronmaschinen [1–4]

- Motivation
- Problemstellung und Lösungsvorschlag
- Betriebsführung und Betriebsmodi
 - Betriebsmodi und Umschaltunkte
 - Entscheidungsbaum
 - Illustration von MTPC, FW und MTPV
 - Betriebsmodi
- Analytische Lösung
 - Analytische Lösung für Quadriken Schnittpunkt(e)
 - Analytische Lösung für Optimierungsproblem mit Gleichheitsnebenbedingung
 - Wurzeln eines Polynoms vierter Ordnung
- Implementierung
- Zusammenfassung und Ausblick

Problemstellung und Lösungsvorschlag

Betrachtete Maschinen: Anisotrope Synchronmaschinen (stationär)

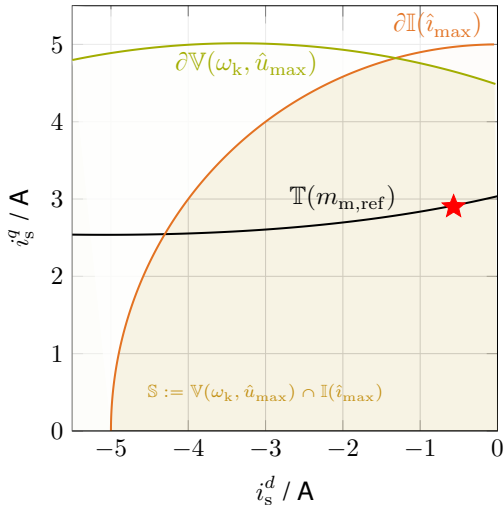
$$\begin{aligned}
 \underbrace{=: \mathbf{u}_s^k(\mathbf{i}_s^k, \omega_k)}_{\begin{pmatrix} u_s^d(\mathbf{i}_s^k, \omega_k) \\ u_s^q(\mathbf{i}_s^k, \omega_k) \end{pmatrix}} &= R_s \underbrace{=: \mathbf{i}_s^k}_{\begin{pmatrix} i_s^d \\ i_s^q \end{pmatrix}} + \omega_k \underbrace{=: \mathbf{J}}_{\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}} \underbrace{=: \boldsymbol{\psi}_s^k(\mathbf{i}_s^k)}_{\begin{pmatrix} \psi_s^d(\mathbf{i}_s^k) \\ \psi_s^q(\mathbf{i}_s^k) \end{pmatrix}} + \cancel{\frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}_s^k(\mathbf{i}_s^k)} \\
 m_m(\mathbf{i}_s^k) &= \frac{3}{2} n_p (\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{J} \boldsymbol{\psi}_s^k(\mathbf{i}_s^k) \\
 &= \frac{3}{2} n_p \left[\psi_{pm} i_s^q + (L_s^d - L_s^q) i_s^d i_s^q + L_m ((i_s^q)^2 - (i_s^d)^2) \right]
 \end{aligned}$$

Annahme (Affine Flußverkettung (zumindest lokal))

$$\boldsymbol{\psi}_s^k(\mathbf{i}_s^k) = \underbrace{\begin{bmatrix} L_s^d & L_m \\ L_m & L_s^q \end{bmatrix}}_{=: \mathbf{L}_s^k \in \mathbb{R}^{2 \times 2}} \mathbf{i}_s^k + \underbrace{\begin{pmatrix} \psi_{pm} \\ 0 \end{pmatrix}}_{=: \boldsymbol{\psi}_{pm}^k} \quad \text{mit } \mathbf{L}_s^k = (\mathbf{L}_s^k)^\top > 0$$

Problemstellung und Lösungsvorschlag

Momentenvorsteuerung: Optimierungsproblem mit mehreren Nebenbedingungen



$$\max_{\mathbf{i}_s^k \in S} -f(\mathbf{i}_s^k) \quad \text{s.t.}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \|\mathbf{i}_s^k\|^2 \leq \hat{i}_{\max}^2, \\ \text{(Strom-Kreisfläche)} \\ \|\mathbf{u}_s^k(\mathbf{i}_s^k, \omega_k)\|^2 \leq \hat{u}_{\max}^2, \\ \text{(Spannungs-Ellipsenfläche)} \\ |m_m(\mathbf{i}_s^k)| \leq |m_{m,\text{ref}}|, \text{ und} \\ \text{sign}(m_{m,\text{ref}}) = \\ \text{sign}(m_m(\mathbf{i}_s^k)). \end{array} \right.$$

z.B. $-f(\mathbf{i}_s^k) = -\|\mathbf{i}_s^k\|^2$ (minimiere Kupferverluste) $\Rightarrow \mathbf{i}_{s,\text{ref}}^k$ bei ★

Problemstellung und Lösungsvorschlag

Lösungsvorschlag: Implizite Formulierung (Quadriken), Optimierung und Schnittpunkte

Schritt 1: Herleitung der Quadriken $Q_A(\mathbf{i}_s^k) := (\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{A} \mathbf{i}_s^k + 2\mathbf{a}^\top \mathbf{i}_s^k + \alpha$:

- Strom-Kreisfläche: $(i_s^d)^2 + (i_s^q)^2 \leq \hat{i}_{\max}^2 \iff \|\mathbf{i}_s^k\|^2 = (\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{I}_2 \mathbf{i}_s^k \leq \hat{i}_{\max}^2$

$$\implies \mathbb{I}(\hat{i}_{\max}) := \{ \mathbf{i}_s^k \in \mathbb{R}^2 \mid (\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{I}_2 \mathbf{i}_s^k - \hat{i}_{\max}^2 \leq 0 \}$$

- Spannungs-Ellipsenfläche:

$$(u_s^d)^2 + (u_s^q)^2 \leq \hat{u}_{\max}^2 \iff \|\mathbf{u}_s^k(\mathbf{i}_s^k, \omega_k)\|^2 = \dots \leq \hat{u}_{\max}^2$$

$$\implies \mathbb{V}(\omega_k, \hat{u}_{\max}) := \{ \mathbf{i}_s^k \in \mathbb{R}^2 \mid (\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{V}(\omega_k) \mathbf{i}_s^k + 2\mathbf{v}(\omega_k)^\top \mathbf{i}_s^k + \nu(\omega_k, \hat{u}_{\max}) \leq 0 \}$$

- Referenzmoment-Hyperbel: $m_m(\mathbf{i}_s^k) = \frac{3}{2} n_p (\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{J} \boldsymbol{\psi}_s^k(\mathbf{i}_s^k) \stackrel{!}{=} m_{m,\text{ref}} \iff \dots$

$$\implies \mathbb{T}(m_{m,\text{ref}}) := \{ \mathbf{i}_s^k \in \mathbb{R}^2 \mid (\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{T} \mathbf{i}_s^k + 2\mathbf{t}^\top \mathbf{i}_s^k - m_{m,\text{ref}} = 0 \}$$

■ ...

Problemstellung und Lösungsvorschlag

Lösungsvorschlag: Implizite Formulierung (Quadriken), Optimierung und Schnittpunkte

Schritt 2: Optimierung mit Gleichheitsnebenbedingung

$$\max_{\mathbf{i}_s^k} - \left(\underbrace{(\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{A} \mathbf{i}_s^k + 2\mathbf{a}^\top \mathbf{i}_s^k + \alpha}_{=: Q_A(\mathbf{i}_s^k)} \right) \text{ s.t. } \underbrace{(\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{B} \mathbf{i}_s^k + 2\mathbf{b}^\top \mathbf{i}_s^k + \beta}_{=: Q_B(\mathbf{i}_s^k)} = 0$$

$\implies$ Hyperbeln für MTPC, MTPV und MTPF (mit $R_s \neq 0$ & $L_m \neq 0$!)

Schritt 3: Schnittpunkt(e) von zwei Quadriken

$$\mathbf{i}_{s,\text{ref}}^k := \arg \min_{\|\mathbf{i}_s^k\|} \left\{ \mathbf{i}_s^k \in \mathbb{R}^2 \mid Q_A(\mathbf{i}_s^k) = 0 \wedge Q_B(\mathbf{i}_s^k) = 0 \right\}$$

$\implies$ Optimaler Betriebspunkt ★ (Stromreferenzvektor)

Beides führt auf Subproblem: Wurzeln eines Polynoms vierter Ordnung

$$\chi(\lambda) := c_4 \lambda^4 + c_3 \lambda^3 + c_2 \lambda^2 + c_1 \lambda + c_0 \stackrel{!}{=} 0$$

$\implies$ Analytische Lösungen existieren (z.B. Eulers Lösung, siehe [39])

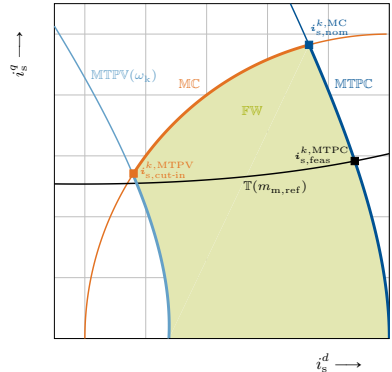
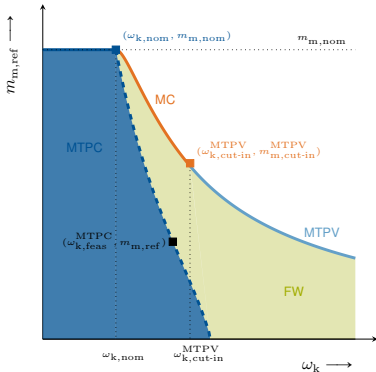
Outline I

2 Optimale Betriebsführung, Momentenvorsteuerung und analytische Stromreferenzberechnung zur Verlustminimierung in anisotropen Synchronmaschinen [1–4]

- Motivation
- Problemstellung und Lösungsvorschlag
- **Betriebsführung und Betriebsmodi**
 - Betriebsmodi und Umschaltunkte
 - Entscheidungsbaum
 - Illustration von MTPC, FW und MTPV
 - Betriebsmodi
- Analytische Lösung
 - Analytische Lösung für Quadriken Schnittpunkt(e)
 - Analytische Lösung für Optimierungsproblem mit Gleichheitsnebenbedingung
 - Wurzeln eines Polynoms vierter Ordnung
- Implementierung
- Zusammenfassung und Ausblick

Betriebsführung und Betriebsmodi

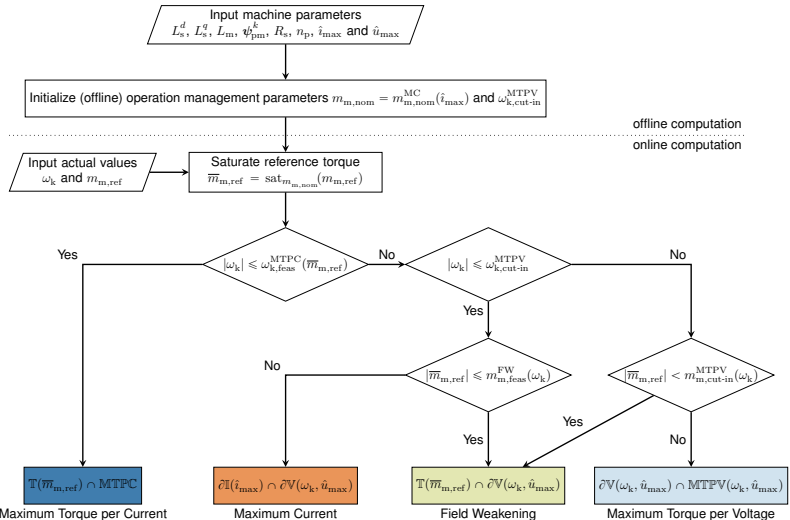
Betriebsmodi und Umschaltunkte



- **Maximum Torque per Current (MTPC):** $\omega_k \leq \omega_{k,feas}^{MTPC}(m_{m,ref})$ (und $m_{m,ref} \leq m_{m,nom}$)
- **Field Weakening (FW):** $\omega_{k,feas}^{MTPC}(m_{m,ref}) < \omega_k$ und $m_{m,ref} < m_{m,feas}^{FW}(\omega_k)$
- **Maximum Current (MC):** $\omega_{k,nom} < \omega_k < \omega_{k,cut-in}^{MTPV}$ und $m_{m,ref} \geq m_{m,feas}^{FW}(\omega_k)$
- **Maximum Torque per Voltage (MTPV):** $\omega_k > \omega_{k,cut-in}^{MTPV}$ und $m_{m,ref} \geq m_{m,cut-in}^{MTPV}(\omega_k)$

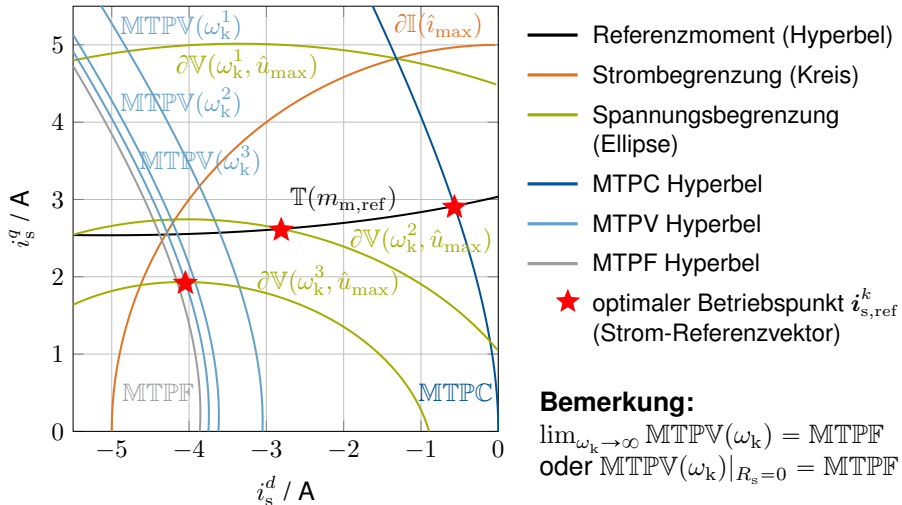
Betriebsführung und Betriebsmodi

Entscheidungsbaum und Umschaltunkte



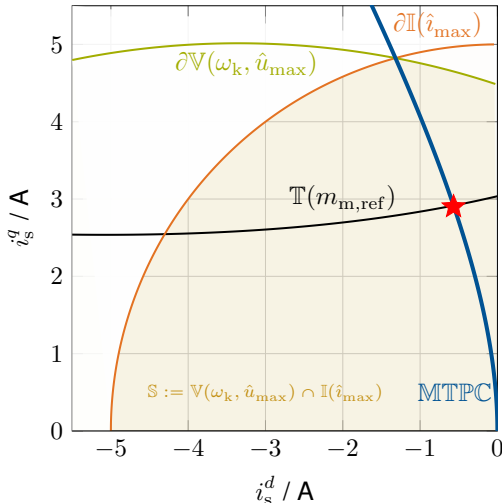
Betriebsführung und Betriebsmodi

Illustration von MTPC ($\omega_k^1 = \omega_{k,nom}$), FW ($\omega_k^2 = 2\omega_{k,nom}$) und MTPV ($\omega_k^3 = 3\omega_{k,nom}$)



Betriebsführung und Betriebsmodi

Maximum Torque per Current (**MTPC**): Referenzmoment zulässig



Optimierungsproblem

$$\begin{aligned} \max_{i_s^k \in S} & -\|i_s^k\|^2 \quad \text{s.t.} \\ & \underbrace{(i_s^k)^\top T i_s^k + 2 t^\top i_s^k}_{=m_m(i_s^k)} - m_{m,ref} = 0 \end{aligned}$$

Lösungsmenge

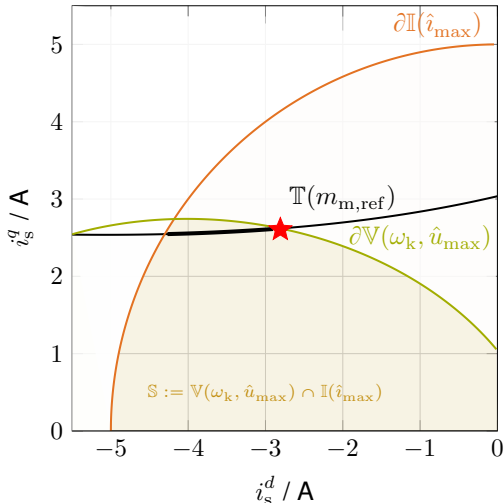
$$\begin{aligned} \text{MTPC} := & \{ i_s^k \in \mathbb{R}^2 \mid \\ & (i_s^k)^\top M_C i_s^k + 2 m_C^\top i_s^k = 0 \} \end{aligned}$$

Optimale Stromreferenz (★)

$$i_{s,ref}^k = \text{MTPC} \cap T(m_{m,ref})$$

Betriebsführung und Betriebsmodi

Field Weakening (FW): Referenzmoment zulässig



Optimierungsproblem

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{i}_s^k \in \mathbb{S}} & -\|\mathbf{i}_s^k\|^2 \quad \text{s.t.} \\ & \underbrace{(\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{T} \mathbf{i}_s^k + 2 \mathbf{t}^\top \mathbf{i}_s^k}_{=m_m(\mathbf{i}_s^k)} - m_{m,\text{ref}} = 0 \end{aligned}$$

Lösungsmenge

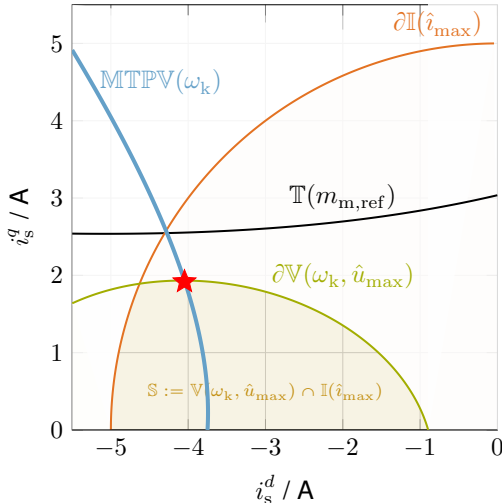
$$\begin{aligned} \text{FW}(m_{m,\text{ref}}, \omega_k, \hat{u}_{\max}) &:= \\ \mathbb{S}(\omega_k, \hat{u}_{\max}, \hat{i}_{\max}) \cap T(m_{m,\text{ref}}) \end{aligned}$$

Optimale Stromreferenz (★)

$$\mathbf{i}_{s,\text{ref}}^k = \partial V(\omega_k, \hat{u}_{\max}) \cap T(m_{m,\text{ref}})$$

Betriebsführung und Betriebsmodi

Maximum Torque per Voltage (**MTPV**): Referenzmoment **nicht** zulässig



Optimierungsproblem

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{i}_s^k \in \mathbb{S}} & -\|\mathbf{u}_s^k(\mathbf{i}_s^k)\|^2 \quad \text{s.t.} \\ & \underbrace{(\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{T} \mathbf{i}_s^k + 2 \mathbf{t}^\top \mathbf{i}_s^k}_{=m_m(\mathbf{i}_s^k)} - m_{m,ref} = 0 \end{aligned}$$

Lösungsmenge

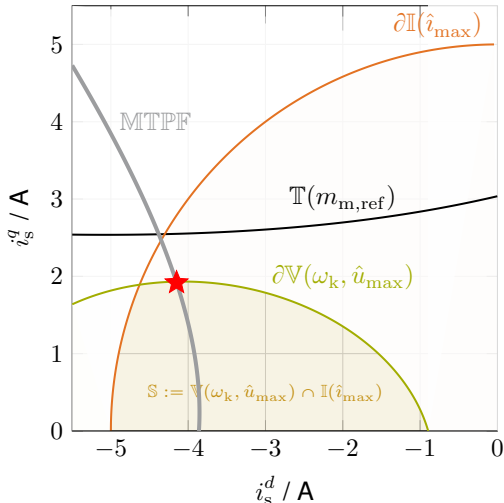
$$MTPV(\omega_k) := \{ \mathbf{i}_s^k \in \mathbb{R}^2 \mid (\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{M}_V \mathbf{i}_s^k + 2 \mathbf{m}_V^\top \mathbf{i}_s^k + \mu_V = 0 \}$$

Optimale Stromreferenz (★)

$$\mathbf{i}_{s,ref}^k = MTPV(\omega_k) \cap \partial V(\omega_k, \hat{u}_{\max})$$

Betriebsführung und Betriebsmodi

Maximum Torque per Flux (MTPF): Referenzmoment **nicht** zulässig



Optimierungsproblem

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{i}_s^k \in \mathbb{S}} & -\|\boldsymbol{\psi}_s^k(\mathbf{i}_s^k)\|^2 \quad \text{s.t.} \\ & \underbrace{(\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{T} \mathbf{i}_s^k + 2 \mathbf{t}^\top \mathbf{i}_s^k}_{=m_m(\mathbf{i}_s^k)} - m_{m,\text{ref}} = 0 \end{aligned}$$

Lösungsmenge

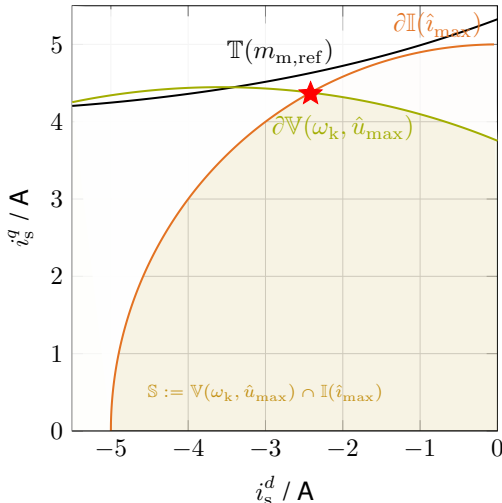
$$\text{MTPF} := \left\{ \mathbf{i}_s^k \in \mathbb{R}^2 \mid (\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{M}_F \mathbf{i}_s^k + 2 \mathbf{m}_F^\top \mathbf{i}_s^k + \mu_F = 0 \right\}$$

Optimale Stromreferenz (★)

$$\mathbf{i}_{s,\text{ref}}^k = \text{MTPF} \cap \partial V(\omega_k, \hat{u}_{\max})$$

Betriebsführung und Betriebsmodi

Maximum Current (MC): Referenzmoment **nicht** zulässig



Optimierungsproblem

$$\max_{i_s^k \in S} m_m(i_s^k)$$

Lösungsmenge

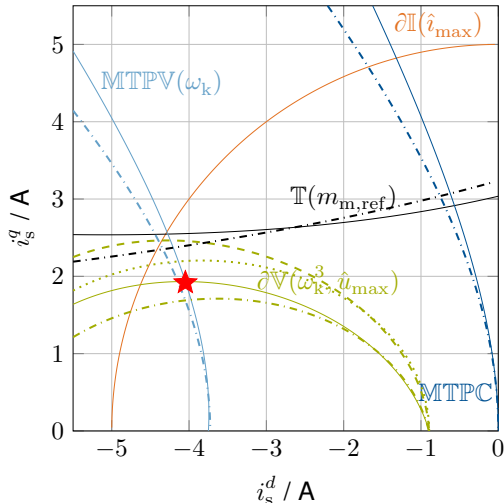
$$S = MC(\omega_k, \hat{u}_{max}, \hat{i}_{max}) := V(\omega_k, \hat{u}_{max}) \cap \partial I(\hat{i}_{max})$$

Optimale Stromreferenz (★)

$$i_{s,ref}^k = \partial V(\omega_k, \hat{u}_{max}) \cap \partial I(\hat{i}_{max})$$

Betriebsführung und Betriebsmodi

Illustration der Auswirkungen wenn R_s und/oder L_m vernachlässigt werden



--- $R_s = 0$ (und $L_m \neq 0$)

--- $L_m = 0$ (und $R_s \neq 0$)

..... $R_s = 0$ und $L_m = 0$

⇒ **Verminderte Effizienz!**
(und falsches Moment
und/oder falscher
Betriebsmodus)

Outline I

2 Optimale Betriebsführung, Momentenvorsteuerung und analytische Stromreferenzberechnung zur Verlustminimierung in anisotropen Synchronmaschinen [1–4]

- Motivation
- Problemstellung und Lösungsvorschlag
- Betriebsführung und Betriebsmodi
 - Betriebsmodi und Umschaltunkte
 - Entscheidungsbaum
 - Illustration von MTPC, FW und MTPV
 - Betriebsmodi
- Analytische Lösung
 - Analytische Lösung für Quadriken Schnittpunkt(e)
 - Analytische Lösung für Optimierungsproblem mit Gleichheitsnebenbedingung
 - Wurzeln eines Polynoms vierter Ordnung
- Implementierung
- Zusammenfassung und Ausblick

Analytische Lösung

Analytische Lösung für Quadrikschnittpunkt(e)

Problem

$$\mathbb{X} := \left\{ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 \mid \underbrace{\mathbf{x}^\top \mathbf{A} \mathbf{x} + 2\mathbf{a}^\top \mathbf{x} + \alpha}_{=: Q_A(\mathbf{x})} = 0 \wedge \underbrace{\mathbf{x}^\top \mathbf{B} \mathbf{x} + 2\mathbf{b}^\top \mathbf{x} + \beta}_{=: Q_B(\mathbf{x})} = 0 \right\}$$

Lösung: Quadriken in Verbindung bringen (z.B., wenn $\alpha \neq 0$ und $\beta \neq 0$)

$$Q_D(\mathbf{x}) := \frac{Q_A(\mathbf{x})}{\alpha} - \frac{Q_B(\mathbf{x})}{\beta} = \mathbf{x}^\top \underbrace{\left(\frac{\mathbf{A}}{\alpha} - \frac{\mathbf{B}}{\beta} \right)}_{=: \mathbf{D}} \mathbf{x} + 2 \underbrace{\left(\frac{\mathbf{a}}{\alpha} - \frac{\mathbf{b}}{\beta} \right)^\top}_{=: \mathbf{d}^\top} \mathbf{x} + \underbrace{\left(\frac{\alpha}{\alpha} - \frac{\beta}{\beta} \right)}_{=0} = 0$$

und Schnittpunkt(e) berechnen

$$Q_D(\mathbf{x}) := \mathbf{x}^\top \underbrace{(\mathbf{D} \mathbf{x} + 2\mathbf{d})}_{\stackrel{!}{=} \lambda \mathbf{J} \mathbf{x}} \stackrel{!}{=} 0 \iff \mathbf{x}^\star(\lambda) = -2(\mathbf{D} - \lambda \mathbf{J})^{-1} \mathbf{d}$$

Analytische Lösung

Analytische Lösung für Quadrikschnittpunkt(e)

dann $\mathbf{x}^*(\lambda)$ in $Q_A(\mathbf{x})$ (oder $Q_B(\mathbf{x})$) einsetzen, d.h.

$$Q_A(\mathbf{x}^*(\lambda)) = 4\mathbf{d}^\top (\mathbf{D} - \lambda \mathbf{J})^{-\top} \mathbf{A} (\mathbf{D} - \lambda \mathbf{J})^{-1} \mathbf{d} - 4\mathbf{a}^\top (\mathbf{D} - \lambda \mathbf{J})^{-1} \mathbf{d} + \alpha = 0 \quad \left| \cdot \underbrace{[\det(\mathbf{D} - \lambda \mathbf{J})]}_{\propto \lambda^2} \right|^2$$

$$\implies \boxed{\chi(\lambda) := c_4 \lambda^4 + c_3 \lambda^3 + c_2 \lambda^2 + c_1 \lambda + c_0 \stackrel{!}{=} 0}$$

$\implies$ Analytische (reelle) Lösung $\lambda^* \in \{\lambda_1, \dots, \lambda_4\}$ existiert (z.B. [39]):

$$\implies \boxed{\mathbf{x}^*(\lambda^*) = -2(\mathbf{D} - \lambda^* \mathbf{J})^{-1} \mathbf{d}}$$

Analytische Lösung

Analytische Lösung für Optimierungsproblem mit Gleichheitsnebenbedingung

Problem

$$\max_{\mathbf{i}_s^k} - \left(\underbrace{(\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{A} \mathbf{i}_s^k + 2\mathbf{a}^\top \mathbf{i}_s^k + \alpha}_{=: Q_A(\mathbf{i}_s^k)} \right) \text{ s.t. } \underbrace{(\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{B} \mathbf{i}_s^k + 2\mathbf{b}^\top \mathbf{i}_s^k + \beta}_{=: Q_B(\mathbf{i}_s^k)} = 0$$

$\implies$ Hyperbeln für MTPC, MTPV und MPTF (mit $R_s \neq 0$ & $L_m \neq 0$!)

Lösung: Lagrangian mit Lagrangian Multiplikator $\lambda \in \mathbb{C}$

$$\mathcal{L}(\mathbf{i}_s^k, \lambda) := -Q_A(\mathbf{i}_s^k) + \lambda Q_B(\mathbf{i}_s^k)$$

Analytische Lösung

Analytische Lösung für Optimierungsproblem mit Gleichheitsnebenbedingung

Gradient (notwendige Bedingung)

$$\mathbf{g}_{\mathcal{L}}(\mathbf{i}_s^k, \lambda) := \begin{pmatrix} \left(\frac{d\mathcal{L}(\mathbf{i}_s^k, \lambda)}{d\mathbf{i}_s^k} \right)^\top \\ \frac{d\mathcal{L}(\mathbf{i}_s^k, \lambda)}{d\lambda} \end{pmatrix} \stackrel{!}{=} \mathbf{0}_3 \Leftrightarrow \begin{pmatrix} -2\mathbf{A}\mathbf{i}_s^k - 2\mathbf{a} + \lambda(2\mathbf{B}\mathbf{i}_s^k + 2\mathbf{b}) \\ (\mathbf{i}_s^k)^\top \mathbf{B}\mathbf{i}_s^k + 2\mathbf{b}^\top \mathbf{i}_s^k + \beta \end{pmatrix} \stackrel{!}{=} \mathbf{0}_3.$$

Auflösen nach λ und umschreiben führt auf

$$\begin{aligned} \lambda &= -\frac{(a_{11}, a_{12})\mathbf{i}_s^k + a_1}{(b_{11}, b_{12})\mathbf{i}_s^k + b_1} = -\frac{(a_{12}, a_{22})\mathbf{i}_s^k + a_2}{(b_{12}, b_{22})\mathbf{i}_s^k + b_2} \\ \Rightarrow & \left((a_{11}, a_{12})\mathbf{i}_s^k + a_1 \right) \left((b_{12}, b_{22})\mathbf{i}_s^k + b_2 \right) \\ & - \left((a_{12}, a_{22})\mathbf{i}_s^k + a_2 \right) \left((b_{11}, b_{12})\mathbf{i}_s^k + b_1 \right) = 0. \end{aligned}$$

Analytische Lösung

Analytische Lösung für Optimierungsproblem mit Gleichheitsnebenbedingung

Dies lässt sich als Quadrik zusammenfassen:

$$(\dot{\mathbf{i}}_s^k)^\top \mathbf{M}_X \dot{\mathbf{i}}_s^k + 2\mathbf{m}_X^\top \dot{\mathbf{i}}_s^k + \mu_X = 0$$

wobei

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_X = \mathbf{M}_X^\top &:= \begin{bmatrix} a_{11}b_{12} - a_{12}b_{11} & \frac{1}{2}(a_{11}b_{22} - a_{22}b_{11}) \\ \frac{1}{2}(a_{11}b_{22} - a_{22}b_{11}) & a_{12}b_{22} - a_{22}b_{12} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{m}_X &:= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} a_{11}b_2 + a_1b_{12} - a_{12}b_1 - a_2b_{11} \\ a_{12}b_2 + a_1b_{22} - a_{22}b_1 - a_2b_{12} \end{pmatrix} \quad \text{und} \\ \mu_X &:= a_1b_2 - a_2b_1. \end{aligned}$$

⇒ Abhängig von A , a , B und b erhält man Hyperbeln für MTPC, MTPF bzw. MTPV.

Analytische Lösung

Wurzeln eines Polynoms vierter Ordnung (Lösung von Euler [39])

Problem: Finde Wurzeln von

$$\chi(\lambda) := c_4 \lambda^4 + c_3 \lambda^3 + c_2 \lambda^2 + c_1 \lambda + c_0 \stackrel{!}{=} 0$$

Lösung:

Schritt 1: Überführe $\chi(\lambda)$ in “*depressed*” Polynom $\chi_{\text{dep}}(y)$

$$\chi_{\text{dep}}(y) := y^4 + p y^2 + q y + r \stackrel{!}{=} 0 \quad (\text{wobei } \lambda := y - \frac{c_3}{4c_4})$$

mit Koeffizienten

$$p := \frac{1}{c_4} \left(c_2 c_4 - \frac{3c_3^2}{8} \right), \quad q := \frac{1}{c_4} \left(\frac{c_3^3}{8} - \frac{c_2 c_3 c_4}{2} + c_1 c_4^2 \right) \quad \text{und} \\ r := \frac{1}{c_4} \left(-\frac{3c_3^4}{256} + c_4^3 c_0 - \frac{c_4^2 c_3 c_2}{4} + \frac{c_4 c_3^2 c_2}{16} \right).$$

Analytische Lösung

Wurzeln eines Polynoms vierter Ordnung (Eulers Lösung [39])

Schritt 2: Finde Wurzeln $z_1^*, z_2^*, z_3^* \in \mathbb{C}$ der Euler-Resolventen (kubisches Polynom)

$$\chi_{\text{res}}(z) := z^3 + \underbrace{2p}_{=:d_2} z^2 + \underbrace{(p^2 - 4r)}_{=:d_1} z - \underbrace{q^2}_{=:d_0} \stackrel{!}{=} 0$$

Mit den Abkürzungen

$$\begin{aligned} \tilde{q} &:= \frac{d_1}{3} - \frac{d_2^2}{9} \quad \text{und} & \tilde{r} &:= \frac{d_1 d_2 - 3d_0}{6} - \frac{d_2^3}{27} \quad \text{und} \\ s_1 &:= \sqrt[3]{\tilde{r} + \sqrt{\tilde{q}^3 + \tilde{r}^2}} & \text{und} & s_2 &:= \sqrt[3]{\tilde{r} - \sqrt{\tilde{q}^3 + \tilde{r}^2}}. \end{aligned}$$

Wurzeln der Resolventen sind

$$z_1^* = (s_1 + s_2) - \frac{d_2}{3} \quad \text{und} \quad z_{2,3}^* = -\frac{1}{2}(s_1 + s_2) - \frac{d_2}{3} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2}(s_1 - s_2).$$

Analytische Lösung

Wurzeln eines Polynoms vierter Ordnung ([39])

Schritt 3: Mithilfe der Wurzeln $z_1^*, z_2^*, z_3^* \in \mathbb{C}$ von $\chi_{\text{res}}(z)$ sind die Wurzeln $\lambda_1^*, \dots, \lambda_4^* \in \mathbb{C}$ des Polynoms $\chi(\lambda)$ vierter Ordnung gegeben durch

$$\begin{aligned}\lambda_1^* &= \frac{(-1)^l}{2} \left(\sqrt{z_1^*} + \sqrt{z_2^*} + \sqrt{z_3^*} \right) - \frac{c_3}{4c_4}, \\ \lambda_2^* &= \frac{(-1)^l}{2} \left(\sqrt{z_1^*} - \sqrt{z_2^*} - \sqrt{z_3^*} \right) - \frac{c_3}{4c_4}, \\ \lambda_3^* &= \frac{(-1)^l}{2} \left(-\sqrt{z_1^*} + \sqrt{z_2^*} - \sqrt{z_3^*} \right) - \frac{c_3}{4c_4}, \quad \text{und} \\ \lambda_4^* &= \frac{(-1)^l}{2} \left(-\sqrt{z_1^*} - \sqrt{z_2^*} + \sqrt{z_3^*} \right) - \frac{c_3}{4c_4},\end{aligned}$$

wobei $l \in \{0, 1\}$ so gewählt, dass [39]

$$(-1)^l (\lambda_1^* \lambda_2^* \lambda_3^* + \lambda_1^* \lambda_2^* \lambda_4^* + \lambda_1^* \lambda_3^* \lambda_4^* + \lambda_2^* \lambda_3^* \lambda_4^*) = -q.$$

Outline I

2 Optimale Betriebsführung, Momentenvorsteuerung und analytische Stromreferenzberechnung zur Verlustminimierung in anisotropen Synchronmaschinen [1–4]

- Motivation
- Problemstellung und Lösungsvorschlag
- Betriebsführung und Betriebsmodi
 - Betriebsmodi und Umschaltunkte
 - Entscheidungsbaum
 - Illustration von MTPC, FW und MTPV
 - Betriebsmodi
- Analytische Lösung
 - Analytische Lösung für Quadriken Schnittpunkt(e)
 - Analytische Lösung für Optimierungsproblem mit Gleichheitsnebenbedingung
 - Wurzeln eines Polynoms vierter Ordnung
- **Implementierung**
- Zusammenfassung und Ausblick

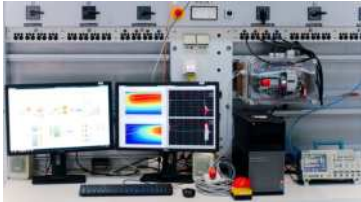
Implementierung

Laboraufbau

Reluctance SM (RSM) and Permanent-magnet SM



Host PC (rapid prototyping)

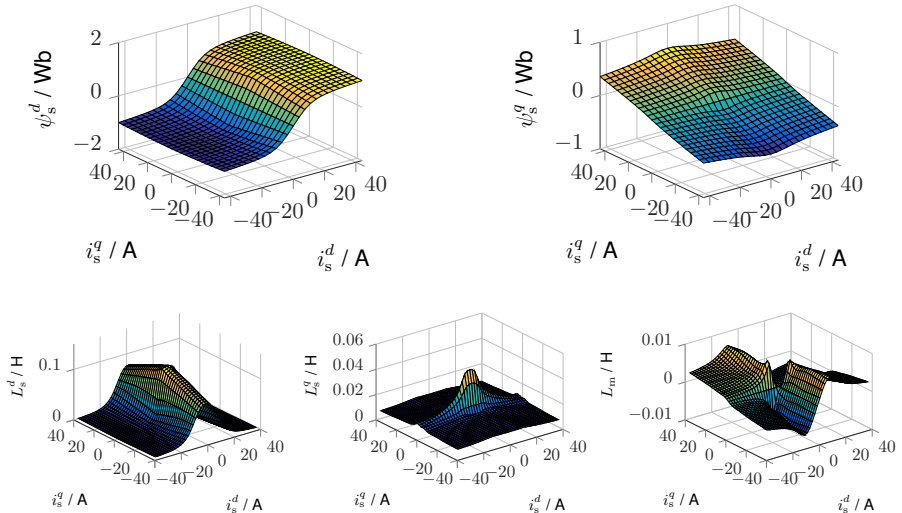


Real-time system and VSIs



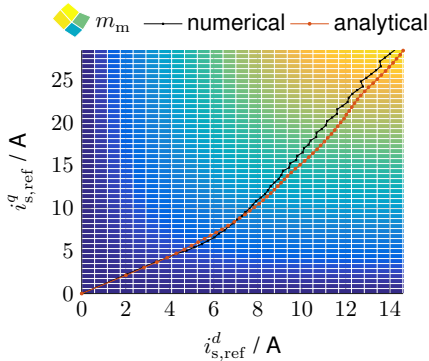
Implementierung

Nichtlineare Flußverkettung und Induktivitäten der RSM

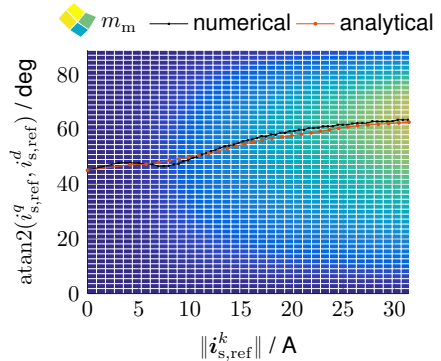


Implementierung

Vergleich der numerischen und analytischen Lösung für MTPC



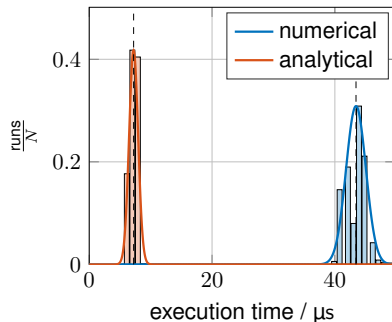
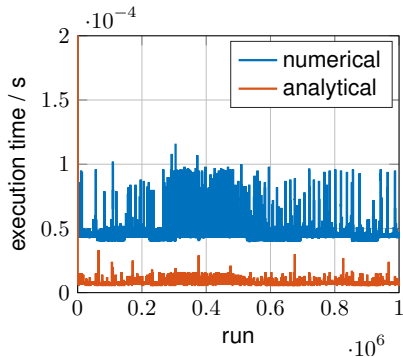
Kartesische Koordinaten



Polar-Koordinaten

Implementierung

Vergleich der Rechenzeit (Euler's Lösung und numerisches Verfahren)



- Ausführungszeiten für $N = 10^6$ Polynome (downsampled mit Faktor 100);
- Mittlere Ausführungszeiten $\mu_n = 43,4 \cdot 10^{-6}$ s und $\mu_a = 7,23 \cdot 10^{-6}$ s; und
- Standardabweichungen $\sigma_n = 1,61 \cdot 10^{-6}$ s und $\sigma_a = 0,73 \cdot 10^{-6}$ s.

Outline I

2 Optimale Betriebsführung, Momentenvorsteuerung und analytische Stromreferenzberechnung zur Verlustminimierung in anisotropen Synchronmaschinen [1–4]

- Motivation
- Problemstellung und Lösungsvorschlag
- Betriebsführung und Betriebsmodi
 - Betriebsmodi und Umschaltunkte
 - Entscheidungsbaum
 - Illustration von MTPC, FW und MTPV
 - Betriebsmodi
- Analytische Lösung
 - Analytische Lösung für Quadriken Schnittpunkt(e)
 - Analytische Lösung für Optimierungsproblem mit Gleichheitsnebenbedingung
 - Wurzeln eines Polynoms vierter Ordnung
- Implementierung
- Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- **einheitliche** Theorie für MTPC, FW, MTPV/MTPF oder MC basiert auf
 - **Quadriken** (implizite Formulierung),
 - **Optimierungsproblem** mit **Gleichheitsnebenbedingung**, und
 - **Schnittpunkt(e)** zweier Quadriken
- **analytische** Lösung für Strom-Referenzvektor (& Umschaltunkte)
- $R_s \neq 0$ und $L_m \neq 0$ (beide können **simultan** berücksichtigt werden)
- **schnelle(re)** und **genaue(re)** Berechnung
- **anwendbar** in Realität (nichtlineare RSM!)

Ausblick

- Konvergenz (mathematischer Beweis bzw. Berücksichtigung von nichtlinearer Flußverkettung)
- Eisenverluste (z.B. durch Berücksichtigung von $R_{fe}(\omega_k)$)
- Einfluss von Parameterungenauigkeiten (z.B. $R_s^a \neq R_s^b \neq R_s^c$)

Literaturliste I

- [1] Lorenz Horlbeck and Christoph Hackl. Analytical solution for the MTPV hyperbola including the stator resistance. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2016)*, pages 1060–1067, Taipei, Taiwan, 2016.
- [2] Hisham Eldeeb, Christoph M. Hackl, and Julian Kullick. Efficient operation of anisotropic synchronous machines for wind energy systems. In *Proceedings of the 6th edition of the conference “The Science of Making Torque from Wind” (TORQUE 2016)*, Open access Journal of Physics: Conference Series 753 (2016) 112005, Munich, Germany, 2016.
- [3] Hisham Eldeeb, Christoph M. Hackl, Lorenz Horlbeck, and Julian Kullick. On the optimal feedforward torque control problem of anisotropic synchronous machines: Quadrics, quartics and analytical solutions. *arXiv:1611.01629* (see <https://arxiv.org/pdf/1611.01629>), 2016.
- [4] Hisham Eldeeb, Christoph M. Hackl, Lorenz Horlbeck, and Julian Kullick. A unified theory for optimal feedforward torque control of anisotropic synchronous machines. *submitted to IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016.
- [5] Christian Dirscherl, Christoph Hackl, and Korbinian Schechner. Modellierung und Regelung von modernen Windkraftanlagen: Eine Einführung. In Dierk Schröder, editor, *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen*, chapter 24, pages 1540–1614. Springer-Verlag, 2015.
- [6] Christian Dirscherl and Christoph M. Hackl. Dynamic power flow in wind turbine systems with doubly-fed induction generator. In *Proceedings of the 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, pages 1–6, Leuven, Belgium, 2016.
- [7] Christoph M. Hackl and Korbinian Schechner. Non-ideal torque control of wind turbine systems: Impacts on annual energy production. *arXiv:1602.01225* (see <https://arxiv.org/pdf/1602.01225>), 2016.

Literaturliste II

- [8] Zhenbin Zhang, Christoph Hackl, and Ralph Kennel. Computationally efficient DMPC for three-level NPC back-to-back converters in wind turbine systems with PMSG. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016.
- [9] Mohamed Abdelrahem, Christoph M. Hackl, and Ralph Kennel. Application of extended Kalman filter to parameter estimation of doubly-fed induction generators in variable-speed wind turbine systems. In *Proceedings of the 5th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP 2015)*, pages 236–243, Taormina, Italy, 2015.
- [10] Mohamed Abdelrahem, Christoph M. Hackl, and Ralph Kennel. Sensorless control of doubly-fed induction generators in variable-speed wind turbine systems. In *Proceedings of the 5th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP 2015)*, pages 423–430, Taormina, Italy, 2015.
- [11] Christoph M. Hackl. Current PI-funnel control with anti-windup for synchronous machines. In *Proceedings of the 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2015)*, pages 1997–2004, Osaka, Japan, 2015.
- [12] Christoph M. Hackl, Maarten J. Kamper, Julian Kullick, and Joshua Mitchell. Nonlinear PI current control of reluctance synchronous machines. *arXiv:1512.09301* (see <https://arxiv.org/pdf/1512.09301>), 2015.
- [13] Christoph M. Hackl, Maarten J. Kamper, Julian Kullick, and Joshua Mitchell. Current control of reluctance synchronous machines with online adjustment of the controller parameters. In *Proceedings of the 2016 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2016)*, pages 153–160, Santa Clara, CA, USA, 2016.
- [14] Z. Zhang, C. Hackl, F. Wang, Z. Chen, and R. Kennel. Encoderless model predictive control of back-to-back converter direct-drive permanent-magnet synchronous generator wind turbine systems. In *Proceedings of 15th European Conference on Power Electronics and Applications*, pages 1–10, 2013.

Literaturliste III

- [15] Mohamed Abdelrahem, Christoph Michael Hackl, and Ralph Kennel. Simplified model predictive current control without mechanical sensors for variable-speed wind energy conversion systems. *Electrical Engineering*, pages 1–11, 2016.
- [16] Christoph M. Hackl. Funnel control for wind turbine systems. In *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Control Applications (CCA 2014)*, pages 1377–1382, Antibes, France, 2014.
- [17] Christoph M. Hackl. Speed funnel control with disturbance observer for wind turbine systems with elastic shaft. In *Proceedings of the 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2015)*, pages 2005–2012, Osaka, Japan, 2015.
- [18] Christoph M. Hackl and Korbinian Schechner. Non-ideal torque control in wind turbine systems: Causes and impacts. In *Proceedings of the 5th MSE-Kolloquium on “Innovations for Energy Systems, Mobility, Buildings and Materials”*, Munich, Germany, 2015.
- [19] Christoph M. Hackl and Korbinian Schechner. Non-ideal feedforward torque control of wind turbines: Impacts on annual energy production & gross earnings. In *Proceedings of the 6th edition of the conference “The Science of Making Torque from Wind” (TORQUE 2016)*, Open access Journal of Physics: Conference Series 753 (2016) 112005, Munich, Germany, 2016.
- [20] Josh C. Mitchell, Maarten J. Kamper, and Christoph M. Hackl. Small-scale reluctance synchronous generator variable speed wind turbine system with DC transmission linked inverters. In *Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE 2016)*, pages xxxx–xxxx, Milwaukee, WI, USA, 2016.
- [21] Julian Kullick. Simulation and control of a small-scale wind turbine system with reluctance synchronous generator. Master’s thesis, MSE Research Group “Control of renewable energy systems”, Technische Universität München, 2015.

Literaturliste IV

- [22] Hisham Eldeeb, Christoph M. Hackl, Lorenz Horlbeck, and Julian Kullick. On the optimal feedforward torque control problem of anisotropic synchronous machines: Quadrics, quartics and analytical solutions. 2016.
- [23] Hisham Eldeeb, Christoph M. Hackl, Lorenz Horlbeck, and Julian Kullick. A unified theory for optimal feedforward torque control of anisotropic synchronous machines. *submitted to IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016.
- [24] Christian Dirscherl, Christoph Hackl, and Korbinian 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 (ICIT 2015)*, pages 999–1006, 2015.
- [25] Christian Dirscherl, Christoph M. Hackl, and Korbinian Schechner. Pole-placement based nonlinear state-feedback control of the DC-link voltage in grid-connected voltage source power converters: A preliminary study. In *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Control Applications (CCA 2015)*, pages 207–214, Sydney, Australia, 2015.
- [26] Florian Bauer, Christoph M. Hackl, and Korbinian Schechner. DC-link control for airborne wind energy systems during pumping mode. In *Proceedings of the Airborne Wind Energy Conference (AWEC 2015)*, Delft, Netherlands, 2015.
- [27] Korbinian Schechner, Florian Bauer, and Christoph M. Hackl. Nonlinear DC-link PI control for airborne wind energy systems during pumping mode. In Roland Schmehl, editor, *Airborne Wind Energy: Advances in Technology Development and Research*. Springer-Verlag, 2016.

Literaturliste V

- [28] Christoph M. Hackl. MPC with analytical solution and integral error feedback for LTI MIMO systems and its application to current control of grid-connected power converters with LCL-filter. In *Proceedings of the 2015 IEEE International Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE 2015)*, pages 61–66, Valparaíso, Chile, 2015.
- [29] Christian Dirscherl, Josef Fessler, Christoph M. Hackl, and Hanka Ipach. State-feedback controller and observer design for grid-connected voltage source power converters with LCL-filter. In *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Control Applications (CCA 2015)*, pages 215–222, Sydney, Australia, 2015.
- [30] Zhenbin Zhang, Hue Xu, M. Xue, Z. Chen, T. Sun, Ralph Kennel, and Christoph Hackl. Predictive control with novel virtual flux estimation for back-to-back power converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(5):2823–2834, 2015.
- [31] Zhenbin Zhang, Christoph Hackl, Mohamed Abdelrahman, and Ralph Kennel. Voltage sensorless direct model predictive control of 3L-NPC back-to-back power converter PMSG wind turbine systems with fast dynamics. In *Proceedings of the Power Electronics Student Summit (PESS 2016)*, Aachen, Germany, 2016.
- [32] Zhenbin Zhang, Ralph Kennel, and Christoph Hackl. Computationally efficient direct model predictive control for three-level NPC back-to-back converter PMSG wind turbine systems. In *Proceedings of the 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2016)*, pages 1045–1050, Anacapri, Italy, 2016.
- [33] Zhenbin Zhang, Christoph Hackl, and Ralph Kennel. FPGA based direct model predictive current control of PMSM drives with 3L-NPC power converters. In *Proceedings of the PCIM*, Nuremberg, Germany, 2016.

Literaturliste VI

- [34] Christoph M. Hackl. Dynamische Reibungsmodellierung: Das Lund-Grenoble (LuGre) Reibmodell. In Dierk Schröder, editor, *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen*, chapter 25, pages 1615–1657. Springer-Verlag, 2015.
- [35] Christoph M. Hackl. *Non-identifier based adaptive control in mechatronics: Theory and Application*. Number SPIN 86365067 in Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer-Verlag, Berlin, 2017.
- [36] Florian Bauer, Christoph M. Hackl, Keyue Smedley, and Ralph Kennel. On multicopter-based launching and landing of lift power kites. In Roland Schmehl, editor, *Airborne Wind Energy: Advances in Technology Development and Research*. Springer-Verlag, 2016.
- [37] Florian Bauer, Christoph M. Hackl, Keyue Smedley, and Ralph Kennel. Crosswind kite power with tower. In Roland Schmehl, editor, *Airborne Wind Energy: Advances in Technology Development and Research*. Springer-Verlag, 2016.
- [38] Shigeo Morimoto. Trend of permanent magnet synchronous machines. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2(2):101–108, mar 2007.
- [39] R.W.D Nickalls. The quartic equation: Invariants and Euler's solution revealed. *Mathematical Gazette*, 93(526):66–75, 2009.