

Netzzustandserkennung mithilfe interner Modelle

Christoph Hackl

19.02.2020

Elgersburg Workshop

Gliederung I

- 1 Einführung
- 2 Internal Model Principle
- 3 Beobachterentwurf
- 4 Frequenzschätzung
- 5 Schätzung der Mit-, Gegen- & Nullsysteme
- 6 Zusammenfassung und Ausblick



Gliederung I

1 Einführung

- Motivation
- Problemstellung
- Lösungsansatz



Gliederung I

1 Einführung

- Motivation
- Problemstellung
- Lösungsansatz

Einführung

Motivation: Das Energiesystem—Ein Blick in die Zukunft



- mehr verteilte Erzeugung / erneuerbare Energiequellen
- Reduktion der stabilisierenden Massenträgheit
- hybride Netz- & Übertragungstopologien (z.B. AC & DC)
- mehr asymmetrische Fehler (> 75% bereits heute)
- mehr schwach-gekoppelte & unsymmetrische Micro-Grids
- mehr Leistungselektronik

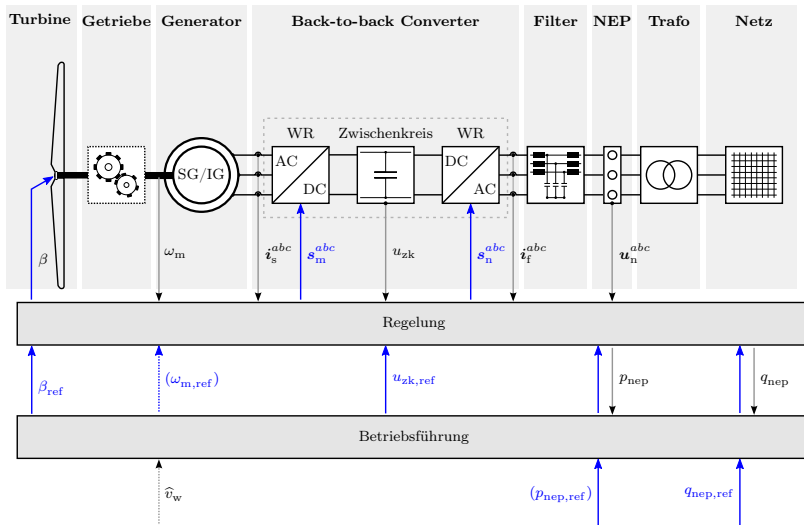
⇒ Schnellere Dynamik, mehr Harmonische & fragileres Netz

⇒ Netzzustandserkennung in Realzeit essentiell

→ ... für z.B. Symmetrierung, Spannungs- und Frequenzregelung

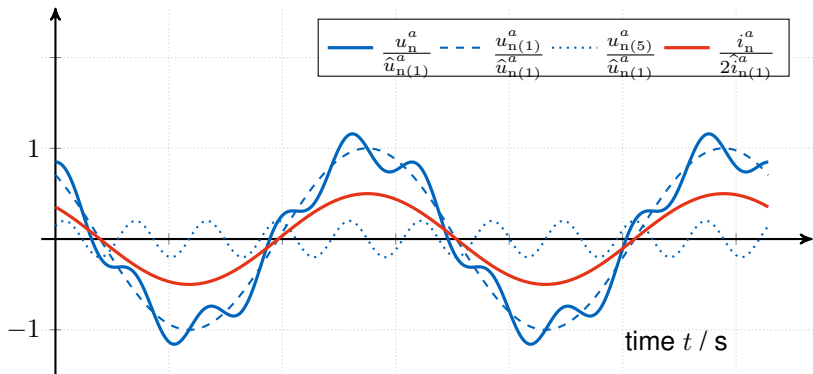
Einführung

Motivationsbeispiel: Windkraftanlage mit Synchrongenerator / Asynchrongenerator



Einführung

Motivationsbeispiel: Einprägung eines phasenkorrekten Fundamentalstromes



⇒ Detektion der fundamentalen Spannungskomponente $u_{n(1)}^a$

⇒ Einprägung des phasenkorrekten Stroms $i_n^a = i_{n(1)}^a$ (Wirkleistung)

Gliederung I

1 Einführung

- Motivation
- Problemstellung
- Lösungsansatz

Einführung

Problemstellung

Für ein gemessenes Netzsignal (Spannung, Strom oder Leistung)

$$y(t) := a_0 + \sum_{\nu \in \mathbb{H}_n} \underbrace{a_\nu(t) \cos(\phi_\nu(t))}_{=: y_\nu(t)} \quad \text{mit} \quad \begin{cases} \mathbb{H}_n := \{1, \nu_2, \dots, \nu_n\} \subset \mathbb{Q}_{>0} \\ \phi_\nu(t) := \int_0^t \nu \omega(\tau) d\tau + \phi_{\nu,0}, \end{cases} \quad (1)$$

sind die **Hauptziele**

(i) Signalschätzung mit *vorgegebener Genauigkeit* $\varepsilon_y > 0$ nach $t_{\text{set}} > 0$ s, i.e.

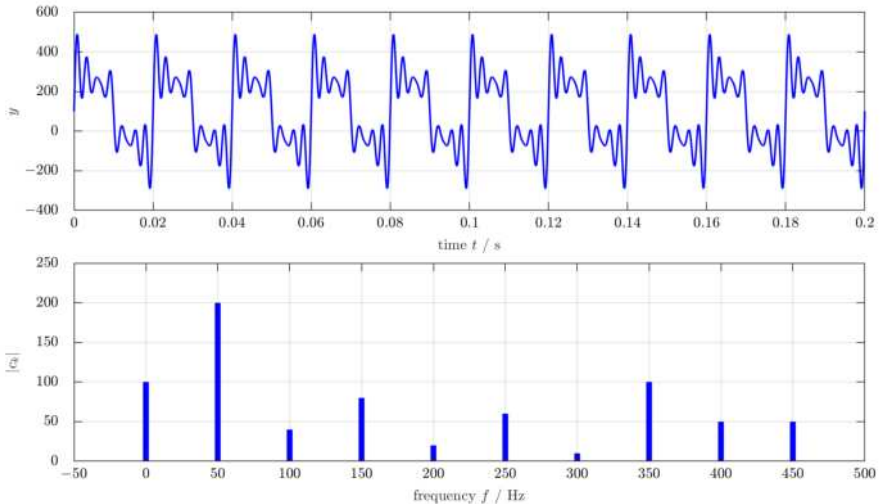
$$\forall t \geq t_{\text{set}} : |y(t) - \hat{y}(t)| \leq \varepsilon_y \quad \text{mit} \quad \hat{y}(t) := \hat{a}_0 + \sum_{\nu \in \mathbb{H}_n} \underbrace{\hat{a}_\nu(t) \cos(\hat{\phi}_\nu(t))}_{=: \hat{y}_\nu(t)}; \quad (2)$$

(ii) Amplitudenschätzung, d.h. $\hat{a}_0 \rightarrow a_0$ and $\hat{a}_\nu \rightarrow a_\nu$ for all $\nu \in \mathbb{H}_n$; und

(iii) Frequenz- und Winkelschätzung, d.h. $\hat{\omega} \rightarrow \omega$ and $\hat{\phi}_\nu \rightarrow \phi_\nu$ for all $\nu \in \mathbb{H}_n$.

Einführung

Problemstellung (Illustration)



Gliederung I

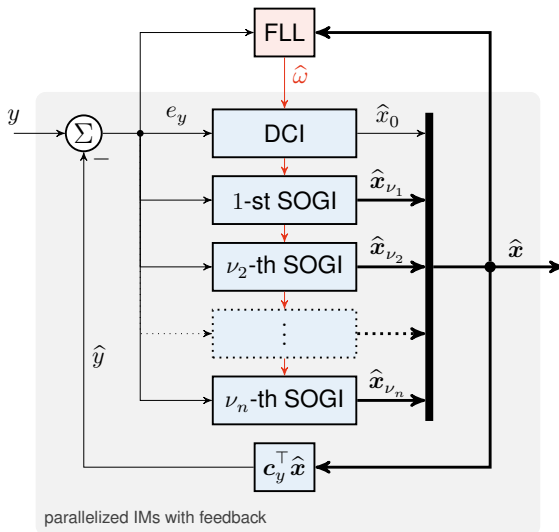
1 Einführung

- Motivation
- Problemstellung
- Lösungsansatz



Einführung

Lösungsansatz: Adaptiver Beobachter aus parallelen IM mit Rückführung und FLL



Gliederung I

2 Internal Model Principle

- Motivation
- Signalnachbildung
- Parallelschaltung der Internen Modelle (IM)
- Beobachtbarkeit der IM-Parallelschaltung



Gliederung I

2 Internal Model Principle

- Motivation
- Signalnachbildung
- Parallelschaltung der Internen Modelle (IM)
- Beobachtbarkeit der IM-Parallelschaltung



Internal Model Principle

Motivation

Walter M. Wonham (1985):

“Every good regulator [or observer] must incorporate a model of the outside world being capable to reduplicate the dynamic structure of the exogenous signals which the regulator [or observer] is required to process.” [1]



Gliederung I

2 Internal Model Principle

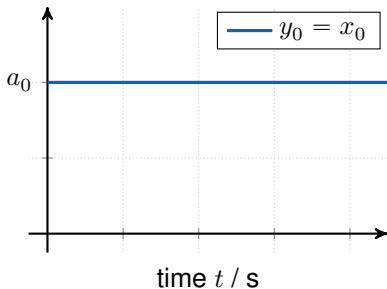
- Motivation
- **Signalnachbildung**
- Parallelschaltung der Internen Modelle (IM)
- Beobachtbarkeit der IM-Parallelschaltung



Internal Model Principle

Nachbildung von konstanten Signalen

constant IM (with initial value)



$$\frac{d}{dt}x_0 = 0, \quad x_0(0) = x_{0,0}$$

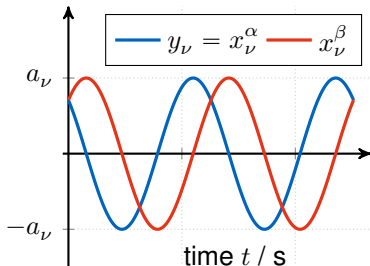
$$y_0 = x_0$$

Internal Model Principle

Nachbildung von sinusförmigen Signalen (ν -te Harmonische mit $\nu \in \mathbb{H}_n$)

sinusoidal IM (with initial values)

$$\mathbf{x}_{\nu,0} = a_{\nu} \begin{pmatrix} \cos(\phi_{\nu,0}) \\ \sin(\phi_{\nu,0}) \end{pmatrix} \longrightarrow \boxed{\nu\text{-th IM}_{\sin}} \xrightarrow{\omega} \mathbf{x}_{\nu} = \begin{pmatrix} x_{\nu}^{\alpha} \\ x_{\nu}^{\beta} \end{pmatrix}$$



$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}_{\nu} = \omega(t) \begin{bmatrix} 0 & -\nu \\ \nu & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}_{\nu}, \quad \mathbf{x}_{\nu}(0) = \mathbf{x}_{\nu,0}$$

$$y_{\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{x}_{\nu}$$

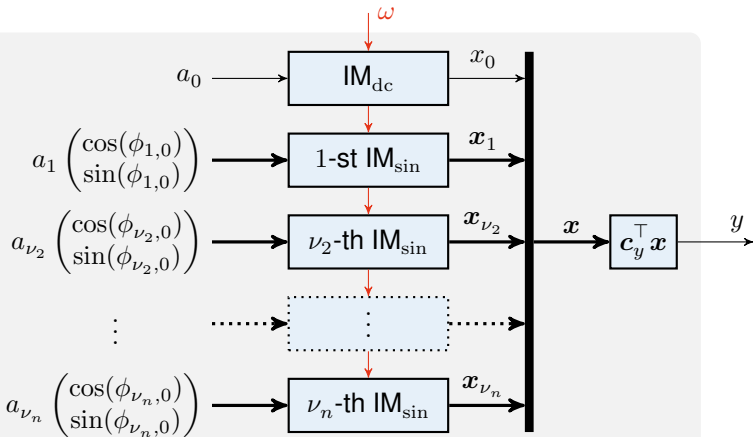
2 Internal Model Principle

- Motivation
- Signalnachbildung
- Parallelschaltung der Internen Modelle (IM)
- Beobachtbarkeit der IM-Parallelschaltung



Internal Model Principle

Parallelschaltung der Internen Modelle



parallelized IMs (with initial values)

Internal Model Principle

Dynamik der Parallelschaltung

$$\begin{aligned}
 & \overbrace{=: \mathbf{x} \in \mathbb{R}^{2n+1}}^{\substack{\left(\begin{array}{c} x_0 \\ x_1^\alpha \\ x_1^\beta \\ x_{\nu_2}^\alpha \\ x_{\nu_2}^\beta \\ \vdots \\ x_{\nu_n}^\alpha \\ x_{\nu_n}^\beta \end{array} \right)}} \frac{d}{dt} \mathbf{x} = \omega(t) \underbrace{=: \mathbf{J}_\Sigma \in \mathbb{R}^{(2n+1) \times (2n+1)}}_{\left[\begin{array}{cccc} 0 & & & \\ & \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} & & \\ & & \nu_2 \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} & \\ & & & \ddots \\ & & & & \nu_n \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \right]} \mathbf{x}, \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \\
 & y = \underbrace{(1, \quad (1, \quad 0), \quad (1, \quad 0), \quad \dots \quad (1, \quad 0))}_{=: \mathbf{c}_y^\top \in \mathbb{R}^{1 \times (2n+1)}} \mathbf{x}
 \end{aligned}$$

⇒ Beobachterproblem eines dynamischen Systems ... sofern beobachtbar!

Gliederung I

2 Internal Model Principle

- Motivation
- Signalnachbildung
- Parallelschaltung der Internen Modelle (IM)
- **Beobachtbarkeit der IM-Parallelschaltung**



Internal Model Principle

Beobachtbarkeit der IM-Parallelschaltung (für konstantes $\omega > 0$)

$$\text{rank} \begin{bmatrix} c_y^\top \\ c_y^\top J_\Sigma \\ c_y^\top J_\Sigma^2 \\ c_y^\top J_\Sigma^3 \\ c_y^\top J_\Sigma^4 \\ \vdots \\ c_y^\top J_\Sigma^{2n-1} \\ c_y^\top J_\Sigma^{2n} \end{bmatrix} =$$

$$\text{rank} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -\nu_2 & \cdots & 0 & -\nu_n \\ 0 & -1 & 0 & -\nu_2^2 & 0 & \cdots & -\nu_n^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \nu_2^3 & \cdots & 0 & \nu_n^3 \\ 0 & 1 & 0 & \nu_2^4 & 0 & \cdots & \nu_n^4 & 0 \\ 0 & \vdots & & \vdots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & (-1)^n & 0 & (-1)^n \nu_2^{2n-1} & \cdots & 0 & (-1)^n \nu_n^{2n-1} \\ 0 & (-1)^n & 0 & (-1)^n \nu_2^{2n} & 0 & \cdots & (-1)^n \nu_n^{2n} & 0 \end{bmatrix}$$

$$= 2n + 1 \iff \nu_i \neq \nu_j \text{ for all } i, j \in \{1, \dots, n\}$$

Gliederung I

3 Beobachterentwurf

- Beobachterstruktur
- DC-Integrator (DCI)
- Second-order generalized integrators (SOGIs)
- Polplatzierung
- Stabilitätsanalyse
- Messergebnisse ohne FLL

Gliederung I

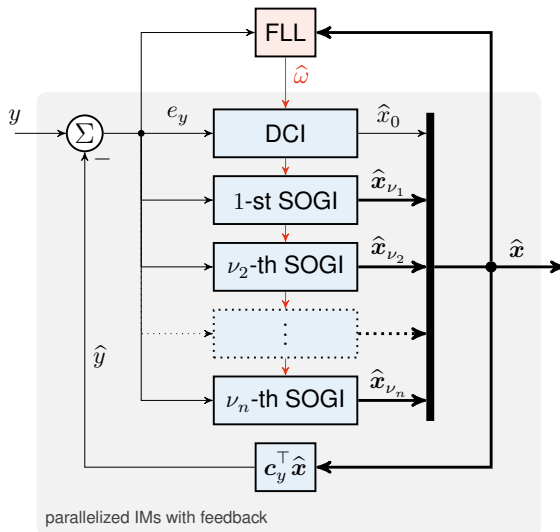
3 Beobachterentwurf

- Beobachterstruktur
- DC-Integrator (DCI)
- Second-order generalized integrators (SOGIs)
- Polplatzierung
- Stabilitätsanalyse
- Messergebnisse ohne FLL



Beobachterentwurf

Gesamtstruktur des Beobachters (Parallelstruktur)



Gliederung I

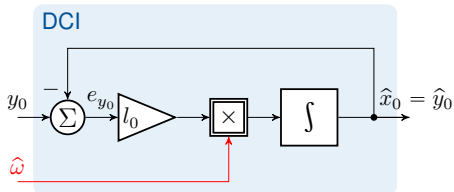
3 Beobachterentwurf

- Beobachterstruktur
- **DC-Integrator (DCI)**
- Second-order generalized integrators (SOGIs)
- Polplatzierung
- Stabilitätsanalyse
- Messergebnisse ohne FLL



Beobachterentwurf

DC-Integrator (DCI) für konstante Signale: IM_{dc} mit Rückführung



$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\hat{x}_0 &= -\hat{\omega}(t)l_0\hat{x}_0 + \hat{\omega}(t)l_0y_0, & \hat{x}_0(0) &= 0 \\ \hat{y}_0 &= \hat{x}_0\end{aligned}$$

Gliederung I

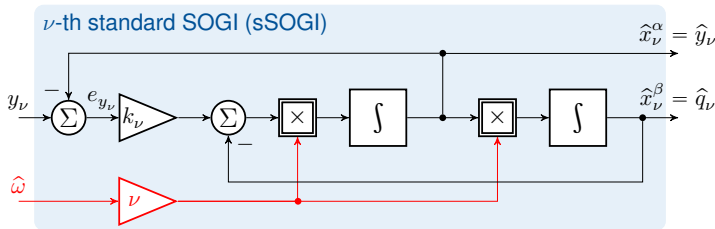
3 Beobachterentwurf

- Beobachterstruktur
- DC-Integrator (DCI)
- Second-order generalized integrators (SOGIs)
- Polplatzierung
- Stabilitätsanalyse
- Messergebnisse ohne FLL



Beobachterentwurf

Standard SOGI (sSOGI) für ν -te Harmonische: ν -tes $\text{IM}_{\sin}$ mit Rückführung

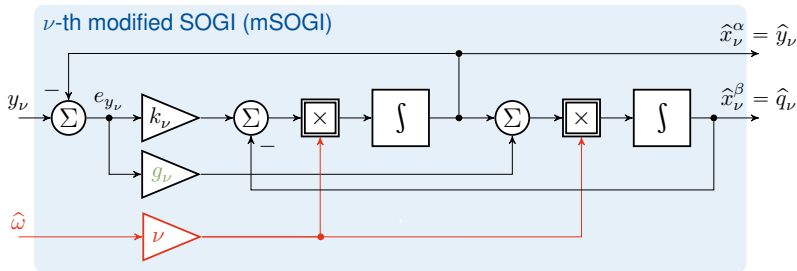


$$\frac{d}{dt} \underbrace{\begin{pmatrix} \hat{x}_\nu^\alpha(t) \\ \hat{x}_\nu^\beta(t) \end{pmatrix}}_{=: \hat{\mathbf{x}}_\nu(t) \in \mathbb{R}^2} = \underbrace{\hat{\omega}(t)}_{=: \mathbf{J}_\nu - \mathbf{l}_\nu(k_\nu) \mathbf{c}_\nu^\top} \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -\nu \\ \nu & 0 \end{bmatrix}}_{=: \mathbf{l}_\nu(k_\nu)} \hat{\mathbf{x}}_\nu(t) + \underbrace{\hat{\omega}(t)}_{=: \mathbf{l}_\nu(k_\nu)} \underbrace{\begin{pmatrix} \nu k_\nu \\ 0 \end{pmatrix}}_{=: \mathbf{l}_\nu(k_\nu)} y_\nu(t), \quad \hat{\mathbf{x}}_\nu(0) = \hat{\mathbf{x}}_{\nu,0}$$

$$\hat{y}_\nu(t) = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}}_{=: \mathbf{c}_\nu^\top \in \mathbb{R}^{1 \times 2}} \hat{\mathbf{x}}_\nu(t)$$

Beobachterentwurf

Modifizierte SOGI (mSOGI) für ν -te Harmonische: ν -tes $\text{IM}_{\sin}$ mit erweiterter Rückführung

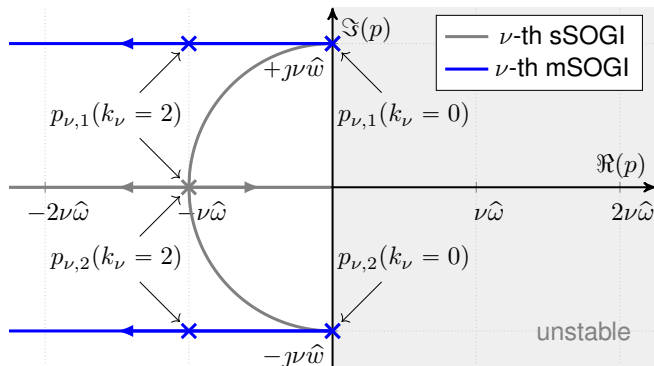


$$\frac{d}{dt} \hat{\mathbf{x}}_\nu(t) = \underbrace{\hat{\omega}(t) \begin{bmatrix} -\nu k_\nu & -\nu \\ \nu - \nu g_\nu & 0 \end{bmatrix}}_{=: \mathbf{J}_\nu - \mathbf{l}_\nu(k_\nu) \mathbf{c}_y^\top} \hat{\mathbf{x}}_\nu(t) + \underbrace{\hat{\omega}(t) \begin{pmatrix} \nu k_\nu \\ \nu g_\nu \end{pmatrix}}_{=: \mathbf{l}_\nu(k_\nu, g_\nu)} y_\nu(t), \quad \hat{\mathbf{x}}_\nu(0) = \hat{\mathbf{x}}_{\nu,0}$$

$$\hat{y}_\nu(t) = \mathbf{c}_\nu^\top \hat{\mathbf{x}}_\nu(t)$$

Beobachterentwurf

Vergleich der Wurzelortskurven der ν -ten sSOGI und mSOGI



sSOGI

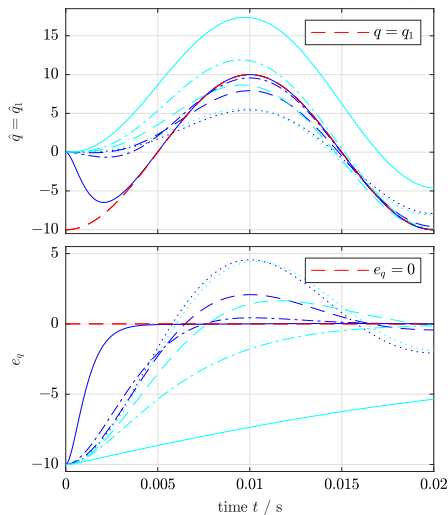
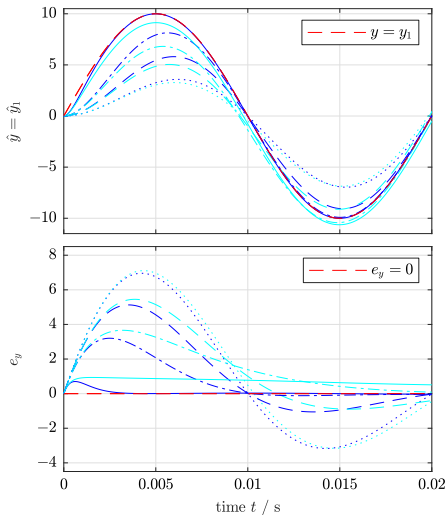
$$p_{\nu,1/2} = -\frac{\nu\hat{w}k_\nu}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4}{k_\nu^2}} \right)$$

mSOGI (for $g_\nu = -\frac{k_\nu^2}{4}$)

$$p_{\nu,1/2} = -\frac{\nu\hat{w}k_\nu}{2} \pm j\nu\hat{w}$$

Beobachterentwurf

Schätzperformanz von sSOGI (—) und mSOGI (—) für verschiedene $k_1 \in \{0.5, 1, 2, 10\}$



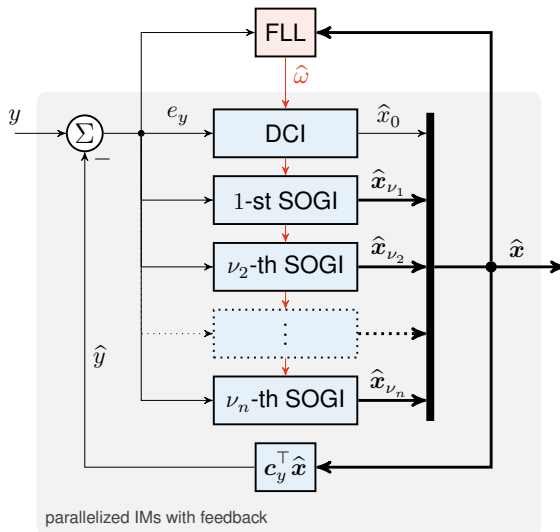
Gliederung I

3 Beobachterentwurf

- Beobachterstruktur
- DC-Integrator (DCI)
- Second-order generalized integrators (SOGIs)
- Polplatzierung
- Stabilitätsanalyse
- Messergebnisse ohne FLL

Beobachterentwurf

Polplatzierung



Beobachterentwurf

Polplatzierung für **parallele interne Modelle** mit **Rückführung**

Für $J := \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ und $l_\nu := \nu \begin{pmatrix} k_\nu \\ g_\nu \end{pmatrix}$ ergibt sich die Beobachterdynamik zu

$$\begin{aligned} \underbrace{=: \hat{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^{2n+1}}_{\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \hat{x}_0 \\ \hat{x}_1 \\ \hat{x}_{\nu_2} \\ \vdots \\ \hat{x}_{\nu_n} \end{pmatrix}} &= \hat{\omega}(t) \underbrace{\left[\begin{array}{c} 0 \\ \mathbf{J} \\ \nu_2 \mathbf{J} \\ \ddots \\ \nu_n \mathbf{J} \end{array} \right] - \begin{pmatrix} l_0 \\ l_1 \\ l_{\nu_2} \\ \vdots \\ l_{\nu_n} \end{pmatrix} \mathbf{c}_y^\top}_{=: \mathbf{J}_\Sigma - \mathbf{l} \mathbf{c}_y^\top =: \mathbf{A}} \hat{\mathbf{x}} - \hat{\omega}(t) \mathbf{l} y, \quad \hat{\mathbf{x}}(0) = \hat{\mathbf{x}}_0 \\ \hat{y} &= \underbrace{(1, \quad (1, \quad 0), \quad (1, \quad 0), \quad \dots \quad (1, \quad 0))}_{=: \mathbf{c}_y^\top \in \mathbb{R}^{1 \times (2n+1)}} \hat{\mathbf{x}} \end{aligned}$$

- $(\mathbf{c}_y^\top, \mathbf{J}_\Sigma)$ beobachtbar $\implies \exists \mathbf{l} \in \mathbb{R}^{2n+1}: \mathbf{A} := \mathbf{J}_\Sigma - \mathbf{l} \mathbf{c}_y^\top$ Hurwitz!
- Polplatzierung: $\mathbf{l} = \mathbf{S} \mathbf{p}_A^* \implies s_0^* = -p_0^* \wedge \forall \nu \in \mathbb{H}_n: s_{\nu,1/2}^* = -p_\nu^* \pm j\nu$

Gliederung I

3 Beobachterentwurf

- Beobachterstruktur
- DC-Integrator (DCI)
- Second-order generalized integrators (SOGIs)
- Polplatzierung
- **Stabilitätsanalyse**
- Messergebnisse ohne FLL

Beobachterentwurf

Stabilitätsanalyse für $\omega(\cdot) \in \mathcal{PC} \cap \mathcal{L}^\infty(\mathbb{R}_{\geq 0}; \mathbb{R}_{\geq \varepsilon})$ und $\hat{\omega}(\cdot) \in \mathcal{C}^1 \cap \mathcal{L}^\infty(\mathbb{R}_{\geq 0}; \mathbb{R}_{\geq \varepsilon})$

■ **Fehlerdynamik** $e_x := x - \hat{x}$ und $e_\omega := \omega - \hat{\omega} \implies \frac{d}{dt} e_x = f(e_x, e_\omega, \dots)$

■ **Lyapunov-Kandidat** $V(e_x) := e_x^\top P e_x$

□ $A := J_\Sigma - l c_y^\top$ Hurwitz $\implies$

$\forall Q = Q^\top > 0 \exists P = P^\top > 0: A^\top P + P A = -Q < 0$ [2, Cor. 3.3.47]

□ $\forall a, b, m \in \mathbb{R}: 2 a b = \frac{a^2}{m} + m b^2 - \left(\frac{a}{\sqrt{m}} - \sqrt{m} b \right)^2 \leq \frac{a^2}{m} + m b^2$

$\implies \frac{d}{dt} V(e_x) = \dots \leq -\mu_V V(e_x) + c_\omega e_\omega^2$ wobei $e_\omega(\cdot) \in \mathcal{L}^\infty(\mathbb{R}_{\geq 0}; \mathbb{R})$

□ Bellmann-Gronwall Lemma [3, Lemma 5.50]

$\implies \forall t \geq t_i: V(e_x(t)) \leq V(e_x(t_i)) e^{-\mu_V (t-t_i)} + c_\omega \int_{t_i}^t e_\omega(\tau)^2 e^{-\mu_V (t-\tau)} d\tau$

■ **Fehlergrenze** $\lambda_{\min}(P) \|e_x\|^2 \leq V(e_x) = e_x^\top P e_x \leq \lambda_{\max}(P) \|e_x\|^2$

$\implies \forall t \geq t_i: \|e_x(t)\|^2 \leq c_P \|e_x(t_i)\|^2 e^{-\mu_V (t-t_i)} + c'_\omega \int_{t_i}^t e_\omega(\tau)^2 e^{-\mu_V (t-\tau)} d\tau$

Gliederung I

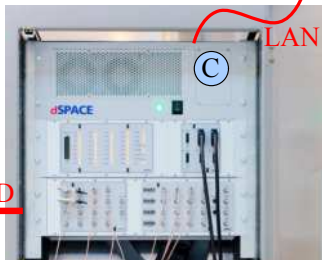
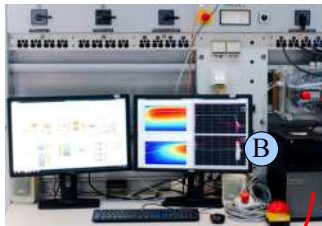
3 Beobachterentwurf

- Beobachterstruktur
- DC-Integrator (DCI)
- Second-order generalized integrators (SOGIs)
- Polplatzierung
- Stabilitätsanalyse
- Messergebnisse ohne FLL



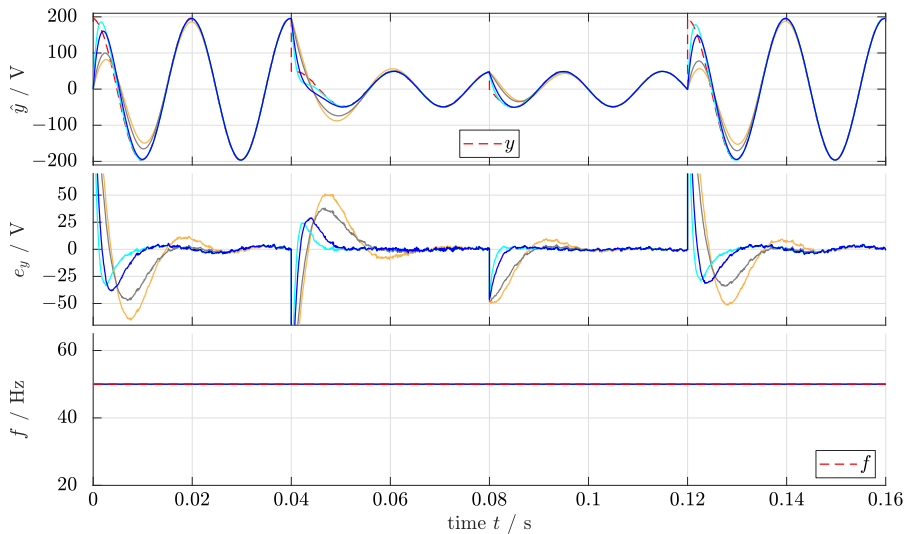
Beobachterentwurf

Messergebnisse im Labor: (A) Netz-Emulator, (B) Host-PC und (C) Realzeit-System



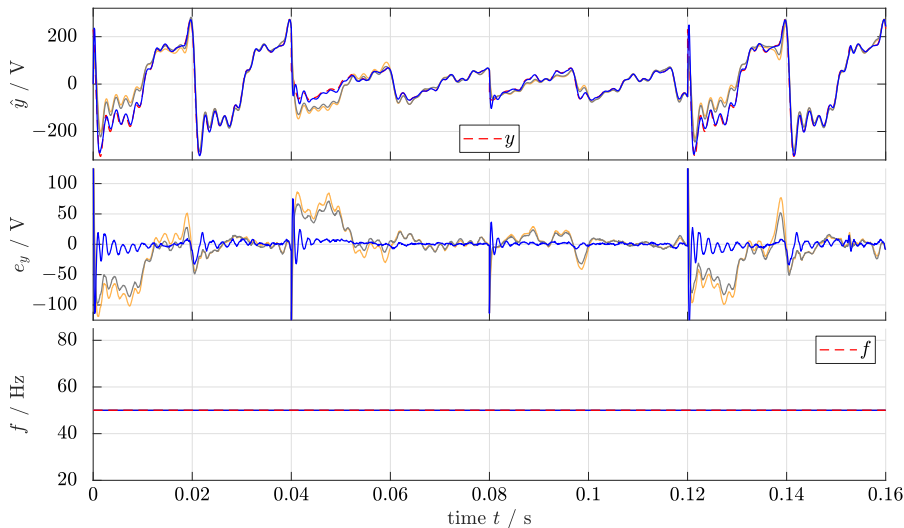
Beobachterentwurf

Messergebnisse **ohne** FLL ($\nu = 1$): — mSOGI, — mSOGI_{fast}, — sSOGI & — ANF



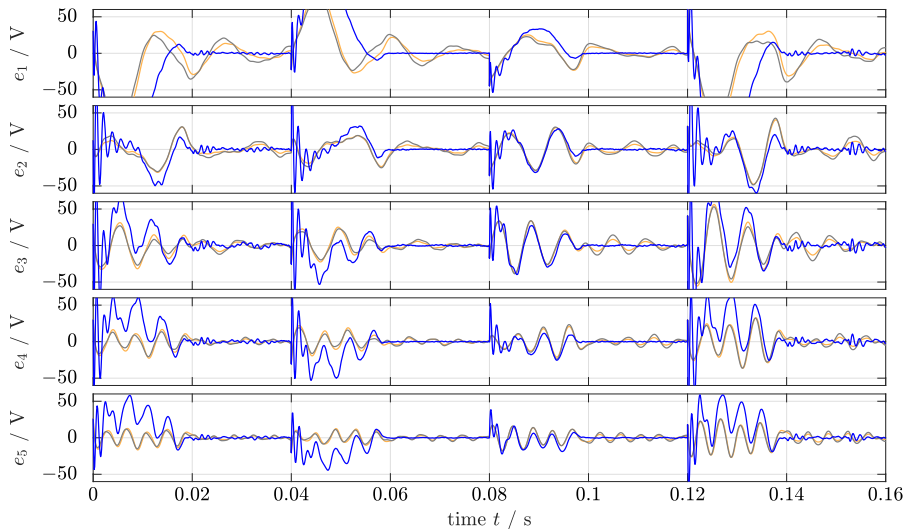
Beobachterentwurf

Messergebnisse **ohne** FLL ($\nu = 10$): — mSOGI, — sSOGI & — ANF



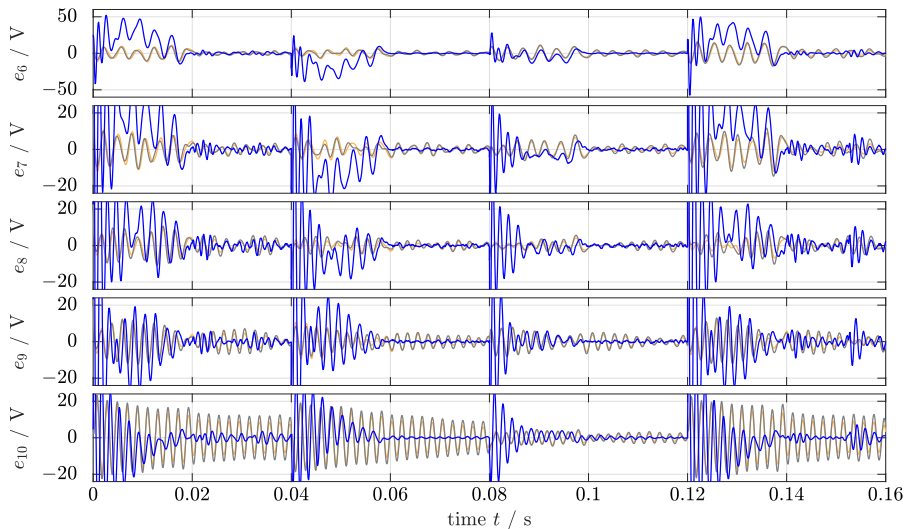
Beobachterentwurf

Messergebnisse **ohne** FLL ($\nu = 10$): $e_\nu = y_\nu - \hat{y}_\nu$ für — mSOGI, — sSOGI & — ANF



Beobachterentwurf

Messergebnisse **ohne** FLL ($\nu = 10$): $e_\nu = y_\nu - \hat{y}_\nu$ für — mSOGI, — sSOGI & — ANF



4 Frequenzschätzung

- Meyer-Kalman-Yakubovich Lemma: Ein Versuch
- Standard Frequency-Locked Loop (sFLL)
- Modifizierte Frequency-Locked Loop
- Messergebnisse mit FLL



4 Frequenzschätzung

- Meyer-Kalman-Yakubovich Lemma: Ein Versuch
- Standard Frequency-Locked Loop (sFLL)
- Modifizierte Frequency-Locked Loop
- Messergebnisse mit FLL



Frequenzschätzung

Ein Versuch aus "Robust adaptive control" [4, p. 129ff]

Lemma (Meyer-Kalman-Yakubovich Lemma)

Es sei $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ Hurwitz, $b, c \in \mathbb{R}^n$ und $d \in \mathbb{R}$. Ist $G(s) := c^\top (sI_n - A)^{-1} b + d$ streng positiv reel (SPR), dann gibt es, für jedes $Q = Q^\top > 0$, einen Skalar $\nu > 0$, einen Vektor $q \in \mathbb{R}^n$ und eine Matrix $0 < P = P^\top \in \mathbb{R}^{n \times n}$, so dass

$$A^\top P + AP = -qq^\top - \nu Q \quad \text{und} \quad Pb - c = \pm q\sqrt{2d}. \quad (3)$$

⇒ Für den Beobachter gilt

- $A := J_\Sigma - lc^\top$ (Hurwitz),
- $b = l, c = c_y$ und $d = 0$,
- $G(s) := c^\top (sI_n - A)^{-1} l$ SPR (für bestimmte l) und **somit**
- $A^\top P + AP = -qq^\top - \nu Q$ und $Pl = c_y$ (MKY-Lemma)



Satz

Für $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $b, c \in \mathbb{R}^n$, $e \in \mathbb{R}^n$, $0 < \Gamma = \Gamma^\top \in \mathbb{R}^{m \times m}$, $C_e \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $C_d \in \mathbb{R}^{m \times l}$ und $d(\cdot) \in \mathcal{C} \cap \mathcal{L}^\infty(\mathbb{R}_{\geq 0}; \mathbb{R}^l)$ sei folgendes System gegeben

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} e &= A e + b \left(\overbrace{\theta^* - \theta}^{=: e_\theta} \right)^\top \left(\overbrace{C_e e + C_d d(t)}^{=: \chi(t)} \right), & e(0) &= e_0 \\ \frac{d}{dt} \theta &= -e_y \Gamma \chi(t), & \theta(0) &= \theta_0 \\ e_y &= c^\top e. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Wenn A Hurwitz und $G(s) := c^\top (sI_n - A)^{-1} b$ SPR, dann gilt $e(\cdot)$, $\theta(\cdot)$, $\chi(\cdot) \in \mathcal{L}^\infty$, $e(\cdot)$, $\frac{d}{dt} \theta(\cdot) \in \mathcal{L}^\infty \cap \mathcal{L}^2$ und $e(t)$, $e_y(t)$, $\frac{d}{dt} \theta(t) \rightarrow 0$ für $t \rightarrow \infty$.

$\implies$ Für den Beobachter gilt: (i) $A := J_\Sigma - l c^\top$ (Hurwitz), $b = l$, $c = c_y$ und (ii) $e_\theta = e_\omega = \omega - \hat{\omega}$ bzw. $\theta^* = \omega$ und $\theta = \hat{\omega}$ (Skalare), aber $C_e = c_y^\top$ (Vektor), $C_d = J_\Sigma$ (Matrix) und $d = \hat{x}$ (Vektor) $\implies \chi = \text{Mix aus Skalar \& Vektor, d.h.}$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} e &= \omega A e + \left(l e_\omega c^\top e + e_\omega J_\Sigma \hat{x} \right), & e(0) &= e_0 & \text{X} \\ \frac{d}{dt} \hat{\omega} &= f(e_y, \hat{x}), & \hat{\omega}(0) &= \hat{\omega}_0 & \text{?} \\ e_y &= c^\top e. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

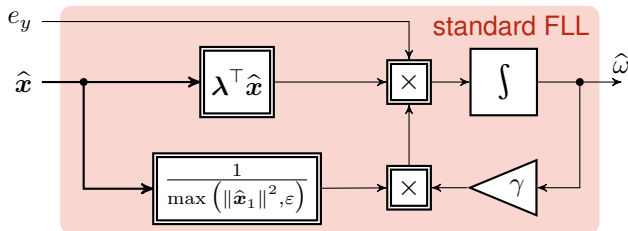
4 Frequenzschätzung

- Meyer-Kalman-Yakubovich Lemma: Ein Versuch
- **Standard Frequency-Locked Loop (sFLL)**
- Modifizierte Frequency-Locked Loop
- Messergebnisse mit FLL



Frequenzschätzung

Standard Frequency-Locked Loop (sFLL)



$$\frac{d}{dt}\hat{\omega} = \frac{\gamma \hat{\omega} e_y \lambda^T \hat{x}}{\underbrace{\max(\|\hat{x}_1\|^2, \epsilon)}_{=: \delta}} = \begin{cases} > 0, & \hat{\omega} < \omega \wedge e_y \neq 0 \\ < 0, & \hat{\omega} > \omega \wedge e_y \neq 0 \end{cases}$$

$$\Leftarrow \lambda := \text{blockdiag}\left(0, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{O}_{2 \times 2}, \dots, \mathbf{O}_{2 \times 2}\right) \mathbf{l} \quad (\text{sFLL})$$

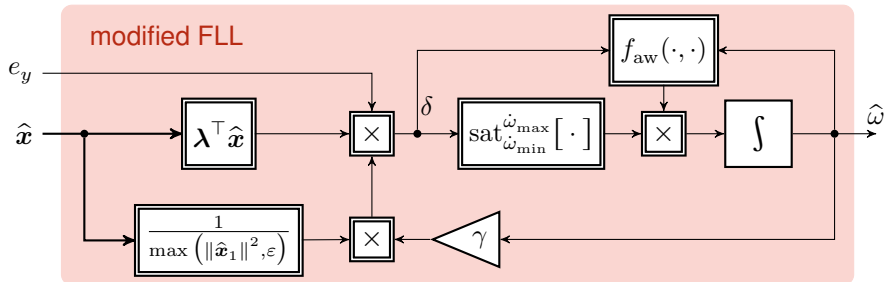
4 Frequenzschätzung

- Meyer-Kalman-Yakubovich Lemma: Ein Versuch
- Standard Frequency-Locked Loop (sFLL)
- **Modifizierte Frequency-Locked Loop**
- Messergebnisse mit FLL



Frequenzschätzung

Modifizierte Frequency-Locked Loop (mFLL) mit Anti-Windup und Ratenbegrenzung

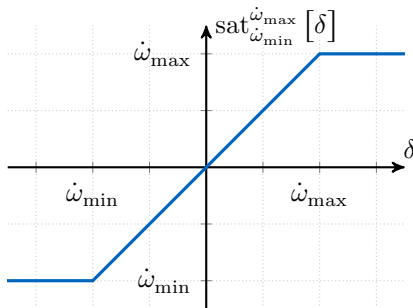


$$\frac{d}{dt}\hat{\omega} = f_{aw}(\hat{\omega}, \delta) \cdot \text{sat}_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \left[\underbrace{\frac{\gamma \hat{\omega} e_y \lambda^\top \hat{x}}{\max(\|\hat{x}_1\|^2, \epsilon)}}_{=: \delta} \right] = \begin{cases} > 0, & \hat{\omega} < \omega \wedge e_y \neq 0 \\ < 0, & \hat{\omega} > \omega \wedge e_y \neq 0 \end{cases}$$

$$\Leftarrow \lambda := \text{blockdiag} \left(0, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{O}_{2 \times 2}, \dots, \mathbf{O}_{2 \times 2} \right) l \quad (\text{mFLL})$$

Frequenzschätzung

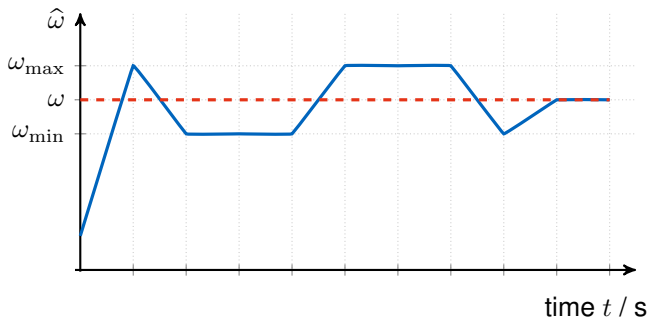
mFLL: Ratenbegrenzung (Begrenzung der Ableitung der geschätzten Frequenz)



$$\text{sat}_{\dot{\omega}_{\min}}^{\dot{\omega}_{\max}}[\delta] = \begin{cases} \dot{\omega}_{\max} & , \delta > \dot{\omega}_{\max} \\ \delta & , \dot{\omega}_{\min} \leq \delta \leq \dot{\omega}_{\max} \\ \dot{\omega}_{\min} & , \delta < \dot{\omega}_{\min} \end{cases}$$

Frequenzschätzung

mFLL: Anti-Windup (Vorzeichen korrekt; Lipschitz-stetige rechte Seite möglich)



$$f_{\text{aw}}(\hat{\omega}, \frac{d}{dt}\hat{\omega}) := \begin{cases} 0, & \text{for } (\hat{\omega} \geq \omega_{\max} \wedge \frac{d}{dt}\hat{\omega} > 0) \vee (\hat{\omega} \leq \omega_{\min} \wedge \frac{d}{dt}\hat{\omega} < 0) \\ 1, & \text{else} \end{cases}$$

$$\implies \forall t \geq 0: \hat{\omega}(t) \in [\min(\omega_{\min}, \hat{\omega}_0), \min(\omega_{\max}, \hat{\omega}_0)] \implies \hat{\omega}(\cdot) \in \mathcal{L}^\infty(\mathbb{R}_{\geq 0}; \mathbb{R}_{>0})$$

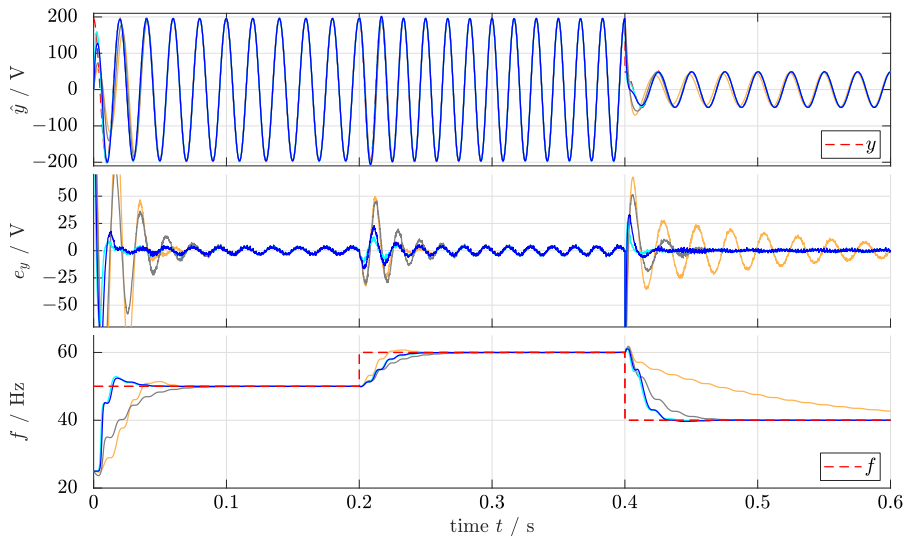
4 Frequenzschätzung

- Meyer-Kalman-Yakubovich Lemma: Ein Versuch
- Standard Frequency-Locked Loop (sFLL)
- Modifizierte Frequency-Locked Loop
- **Messergebnisse mit FLL**



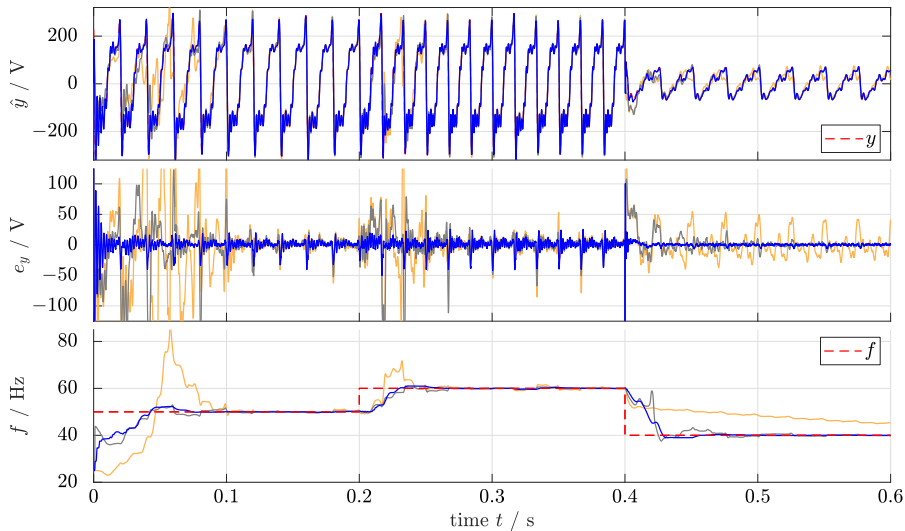
Frequenzschätzung

Messergebnisse mit FLL ($\nu = 1$): — mSOGI, — mSOGI_{fast}, — sSOGI & — ANF



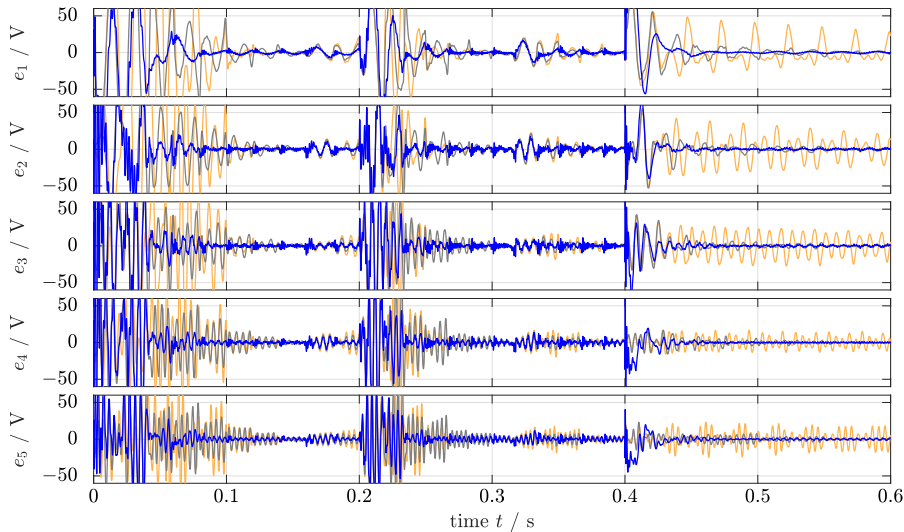
Frequenzschätzung

Messergebnisse mit FLL ($\nu = 10$): — mSOGI, — sSOGI & — ANF



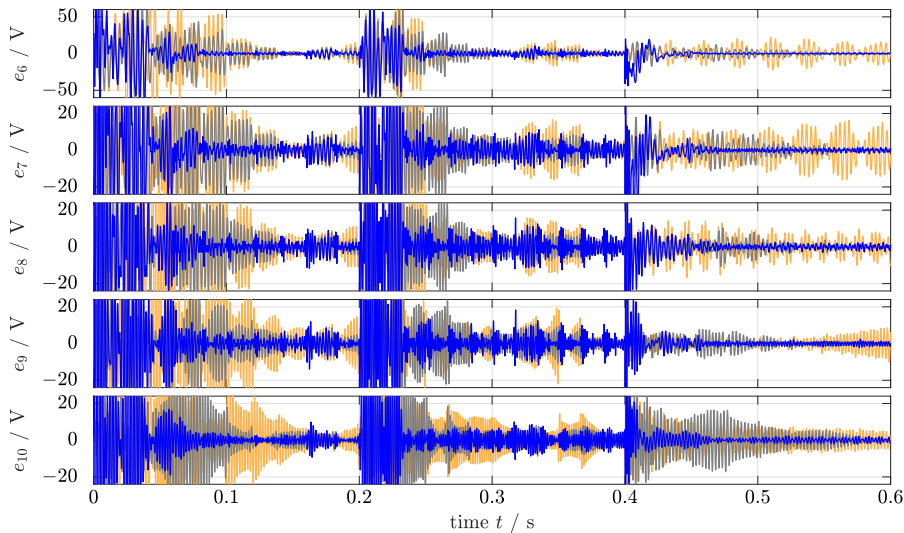
Frequenzschätzung

Messergebnisse mit FLL ($\nu = 10$): $e_\nu = y_\nu - \hat{y}_\nu$ für — mSOGI, — sSOGI & — ANF



Frequenzschätzung

Messergebnisse mit FLL ($\nu = 10$): $e_\nu = y_\nu - \hat{y}_\nu$ für — mSOGI, — sSOGI & — ANF



Gliederung I

5 Schätzung der Mit-, Gegen- & Nullsysteme

- Gesamte Implementierung
- Mit-, Gegen- und Nullsysteme aller drei Phasen
- Simulationsergebnisse



Gliederung I

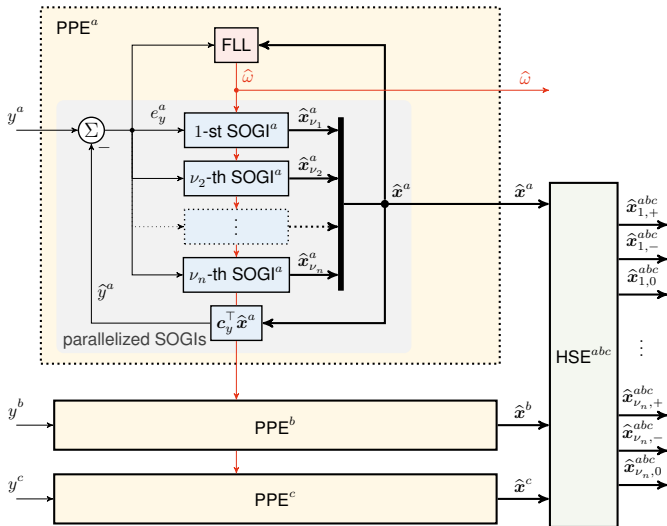
5 Schätzung der Mit-, Gegen- & Nullsysteme

- **Gesamte Implementierung**
- Mit-, Gegen- und Nullsysteme aller drei Phasen
- Simulationsergebnisse



Schätzung der Mit-, Gegen- & Nullsysteme

Überblick: Schätzung der Phasenparameter (PPE) und der Mit-, Gegen- & Nullsysteme (HSE)



Gliederung I

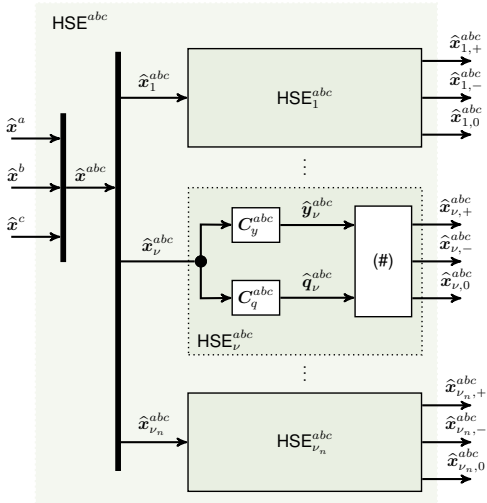
5 Schätzung der Mit-, Gegen- & Nullsysteme

- Gesamte Implementierung
- Mit-, Gegen- und Nullsysteme aller drei Phasen
- Simulationsergebnisse



Schätzung der Mit-, Gegen- & Nullsysteme

Mit-, Gegen- & Nullsysteme (HSE) aller drei Phasen a, b, c



Schätzung der Mit-, Gegen- & Nullsysteme

Mit-, Gegen- & Nullsystem der ν -ten Harmonischen

Für $\nu \in \mathbb{H}_n$, $\mathbf{J}_1 := \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ und $\mathbf{T}_c := \kappa \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$, $\kappa \in \{\frac{2}{3}, \sqrt{\frac{2}{3}}\}$,

definiere

$$\left. \begin{aligned}
 \mathbf{y}_\nu^{abc}(t) &= \underbrace{\frac{1}{2} \mathbf{T}_c^{-1} \overbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}^{=: \mathbf{D}_{12}} \mathbf{T}_c \hat{\mathbf{y}}_\nu^{abc}(t) + \frac{1}{2} \mathbf{T}_c^{-1} \mathbf{J}_1 \mathbf{D}_{12} \mathbf{T}_c \hat{\mathbf{q}}_\nu^{abc}(t)}_{=:\hat{\mathbf{x}}_{\nu,+}^{abc}(t) \text{ [Mitsystem]}} \\
 &+ \underbrace{\frac{1}{2} \mathbf{T}_c^{-1} \mathbf{D}_{12} \mathbf{T}_c \hat{\mathbf{y}}_\nu^{abc}(t) - \frac{1}{2} \mathbf{T}_c^{-1} \mathbf{J}_1 \mathbf{D}_{12} \mathbf{T}_c \hat{\mathbf{q}}_\nu^{abc}(t)}_{=:\hat{\mathbf{x}}_{\nu,-}^{abc}(t) \text{ [Gegensystem]}} \\
 &+ \underbrace{\mathbf{T}_c^{-1} \overbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}^{=: \mathbf{D}_3} \mathbf{T}_c \hat{\mathbf{y}}_\nu^{abc}(t)}_{=:\hat{\mathbf{x}}_{\nu,0}^{abc}(t) \text{ [Nullsystem]}}
 \end{aligned} \right\} \quad (\#)$$

Gliederung I

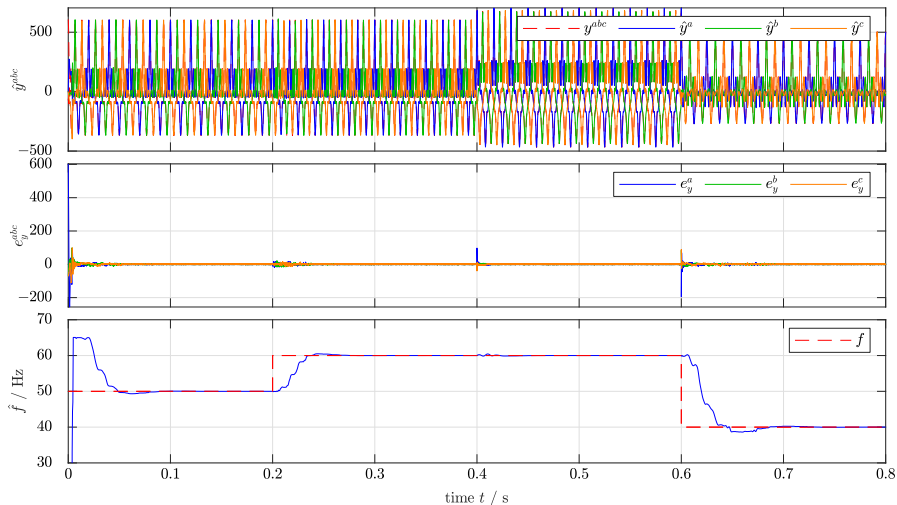
5 Schätzung der Mit-, Gegen- & Nullsysteme

- Gesamte Implementierung
- Mit-, Gegen- und Nullsysteme aller drei Phasen
- **Simulationsergebnisse**



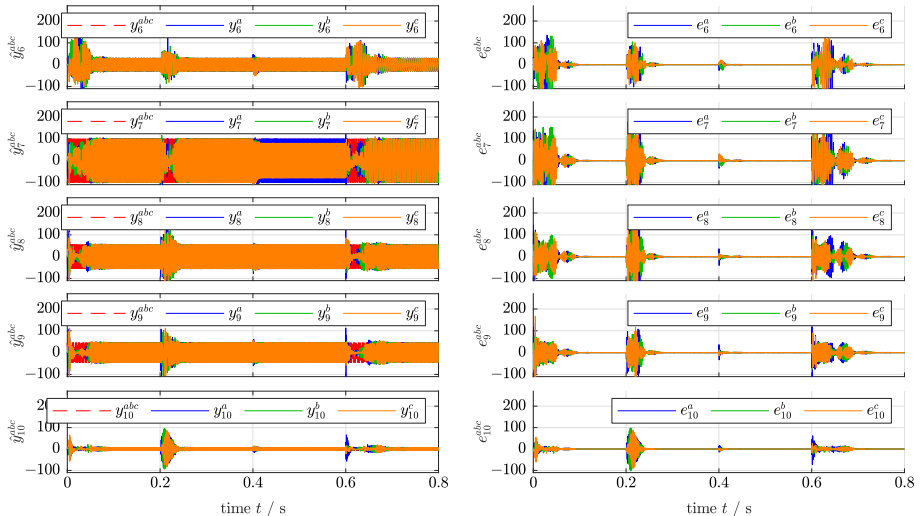
Schätzung der Mit-, Gegen- & Nullsysteme

Simulationsergebnisse: Schätzung $\hat{y}^{abc}$, Schätzfehler $e^{abc} = y^{abc} - \hat{y}^{abc}$ & ges. Frequenz $\hat{f}$



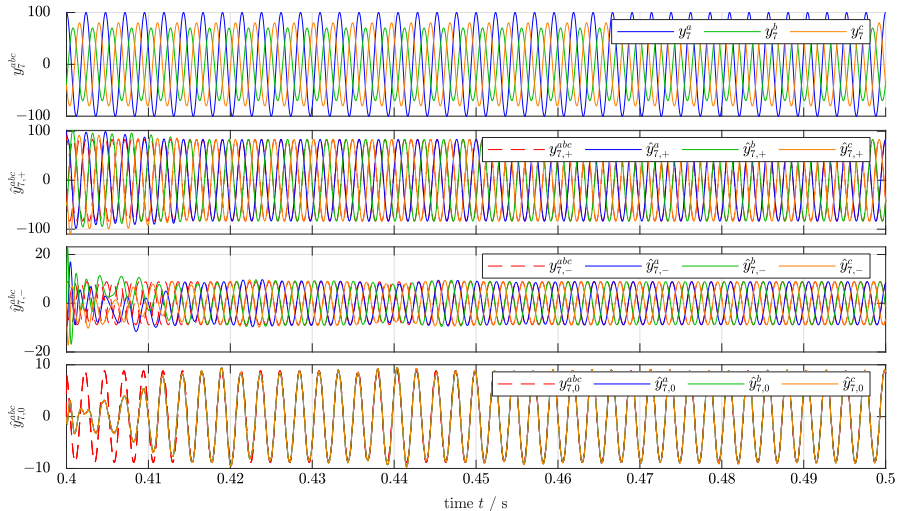
Schätzung der Mit-, Gegen- & Nullsysteme

Simulationsergebnisse: Schätzung $\hat{y}_\nu$ (links) und Schätzfehler $e_\nu = y_\nu - \hat{y}_\nu$ (rechts)



Schätzung der Mit-, Gegen- & Nullsysteme

Simulationsergebnisse: Harmonische y_7^{abc} , Mit- $\hat{y}_{7,+}^{abc}$, Gegen- $\hat{y}_{7,-}^{abc}$ & Nullsystem $\hat{y}_{7,0}^{abc}$



Gliederung I

6 Zusammenfassung und Ausblick



Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- **vereinheitlichte Theorie zur Netzzustandserkennung**, basierend auf
 - **Parallele internen Modelle** $\implies$ Beobachterproblem;
 - **Parallele internen Modelle** mit **Rückführung** (mSOGI)
 $\implies$ modularer Beobachteraufbau;
 - **Polplatzierung** $\implies$ Vorgabe des transienten Verhaltens möglich;
 - **modifizierte** Frequency-Locked Loop (FLL)
(mit Anti-Windup (Vorzeichen korrekt) und Ratenbegrenzung)
- **Netzzustandserkennung in Echtzeit**
- Schätzung der Komponenten des **Mit-, Gegen- und Nullsystems**
(für jede Harmonische)

Offene Forschungsfragen (Kollaborationen willkommen!)

- Frequency-Locked-Loop ist **Flaschenhals** $\implies$ Verbesserungspotential!
- Rausch-Unterdrückung $\implies$ Extended-Kalman-Filter?
- Anzahl und Wahl der Harmonischen im Beobachter?
- Schätzung konstanter Frequenzkomponenten im Netz?
(wenn keine Vielfachen der Fundamentalfrequenz)
- Unterdrückung von Leistungsschwankungen aufgrund der Netzharmonischen?

Literaturliste I

- [1] Walter M. Wonham. *Linear Multivariable Control: A Geometric Approach*. Number 10 in Applications of Mathematics. Springer-Verlag, Berlin, 3 edition, 1985.
- [2] D. Hinrichsen and A.J. Pritchard. *Mathematical Systems Theory I — Modelling, State Space Analysis, Stability and Robustness*. Number 48 in Texts in Applied Mathematics. Springer-Verlag, Berlin, 2005.
- [3] 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.
- [4] P.A. Ioannou and J. Sun. *Robust Adaptive Control*. Prentice Hall International Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 1996. (out of print in 2003, electronic copy at:
http://www-rcf.usc.edu/~ioannou/Robust_Adaptive_Control.htm).
- [5] W.J. Rugh. *Linear System Theory*. Prentice Hall International Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 2 edition, 1996.
- [6] Drumi Bainov and Pavel Simeonov. *Integral Inequalities and Applications*, volume 57 of *Mathematics and Its Applications (East European Series)*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1992.
- [7] Hassan K. Khalil. *Nonlinear Systems*. Prentice-Hall International Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 3 edition, 2002.
- [8] Achim Ilchmann. *Contributions To Time-Varying Linear Control Systems*. PhD thesis, Institut für Dynamische Systeme, Universität Bremen, Germany, 1987. Published by Verlag an der Lottbek, Ammersbek bei Hamburg, Germany.
- [9] Remus Teodorescu, Marco Liserre, and Pedro Rodríguez. *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, United Kingdom, 2011.