

Optimierung des dynamischen Verhaltens netzstützender Anlagen am Beispiel der Virtuellen Synchronmaschine

EnInnov 2014, Session E2

Timo Dewenter¹, Benjamin Werther², Alexander K. Hartmann¹
und Hans-Peter Beck²

¹Institut für Physik
Universität Oldenburg



²Institut für Elektrische Energietechnik und
Energiesysteme
Technische Universität Clausthal



13. Februar 2014

Einleitung

Theorie

Modell der Virtuellen Synchronmaschine

Optimierungsverfahren

Der Downhill-Simplex-Algorithmus

Ergebnisse

Zusammenfassung und Ausblick

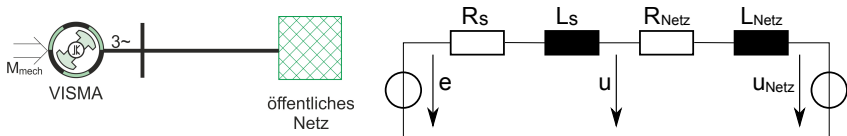
Einleitung

- Erneuerbare Energien nehmen immer größeren Anteil an Energieproduktion ein
→ Weniger Schwungmasse für Primärregelung
- Problem: beispielsweise PV-Anlagen stellen keine Schwungmasse bereit
→ Mögliche Lösung: *Virtuelle* Synchronmaschine, die Verhalten einer Synchronmaschine nachbildet
- Zusammenschluss mehrerer Anlagen → Zelle
- Reaktion einer Zelle auf Störung muss sofort erfolgen
→ Einstellungen der Anlagenparameter → gewünschtes Gesamtverhalten der Zelle

Welches sind die optimalen Anlagenparameter?

Hier: Fokus auf Virtueller Synchronmaschine, Konzept allerdings auf beliebige Anlagen anwendbar

Modell der Virtuellen Synchronmaschine



Schematischer Aufbau und Ersatzschaltbild einer Virtuellen Synchronmaschine [Beck2007] (VISMA) mit Kopplung an ein starres Netz.

- e : Polradspannung der VISMA
- R_S und L_S : Ständerwiderstand und -induktivität
- R_{Netz} und L_{Netz} : Netzwidestand und -induktivität
- u_{Netz} : Netzspannung

DGL für den (dreiphasigen) Strom:

$$\dot{\mathbf{i}} = \frac{1}{L_S + L_{\text{Netz}}} (\mathbf{e} - (R_S + R_{\text{Netz}}) \cdot \mathbf{i} - \mathbf{u}_{\text{Netz}}).$$

Mechanische DGLen der VISMA [Chen2012]

$$\begin{aligned}\dot{\varphi} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} \cdot \left(M_{\text{mech}} - \frac{P_{\text{el}}}{\omega} - M_d \right) \\ \dot{M}_d &= \frac{1}{T_d} \cdot (k_d \cdot \dot{\omega} - M_d)\end{aligned}$$

- φ und ω : Polradwinkel und VISMA-Kreisfrequenz
- J : Trägheitsmoment der VISMA
- M_{mech} : (virtuelles) mechanisches Drehmoment
- P_{el} : elektrische Leistung der VISMA: $P_{\text{el}} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{i}$
- M_d : Dämpfungsmoment der VISMA
- T_d und k_d : Dämpfungszeitkonstante und -faktor

Numerische Integration mit Runge-Kutta-Fehlberg-Methode 4. Ordnung ([GSL]: <http://www.gnu.org/software/gsl/>)

Optimierungsverfahren

Zwei zu optimierende Parameter: T_d und k_d

Störungsszenario:

Sprung des mechanischen Moments zum Zeitpunkt t_0 nach einer Einschwingphase

Gütefunktional (\rightarrow **Min**):

$$E = \int_{t_0}^{t_0+T} \lambda(t) \cdot \|\bar{P}(t) - P_{\text{Soll}}(t)\|_2^2 dt$$

mit

- T : Messdauer,
- $\bar{P}(t)$: (Über 2 Perioden gemittelte) Leistung der VISMA,
- $P_{\text{Soll}}(t)$: Sollleistung $P_{\text{Soll}}(t) = \Delta P \cdot \exp(-(t - t_0)/\tau) + P_0$,
- $\lambda(t) = \begin{cases} 1, & t \leq (T/2 + t_0) \\ 2, & t > (T/2 + t_0) \end{cases}$.

Der Downhill-Simplex-Algorithmus

- Entwickelt von Nelder und Mead [Nelder1965]
- **Ziel:** Finde Minimum (Maximum) einer N -dimensionalen Funktion, ohne deren Ableitung zu kennen

Idee des Downhill-Simplex-Algorithmus (DSX):

Transformiere Ausgangs-Simplex bestehend aus $N + 1$ Punkten so, dass sich am Ende das Simplex in einem (lokalen) Minimum befindet.

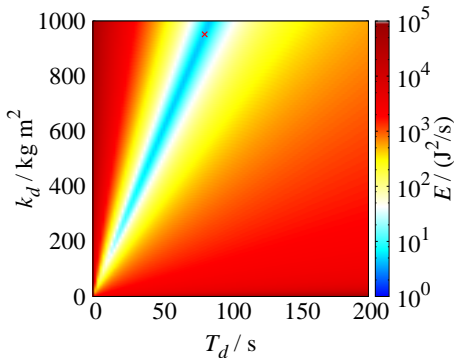
→ Schrittweises Abwärtsbewegen in der N -dimensionalen Topografie, die durch die Funktion vorgegeben wird

Hier: Verwendung der Implementierung in der [GSL] mit linearer Laufzeit in der Dimension N

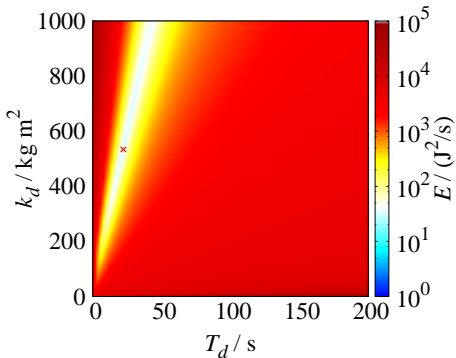
Gütefunktional-„Landschaft“

Gewünschtes exponentielles Verhalten von $\bar{P}(t)$:

$$P_{\text{Soll}}(t) \sim \exp(-(t - t_0)/\tau)$$



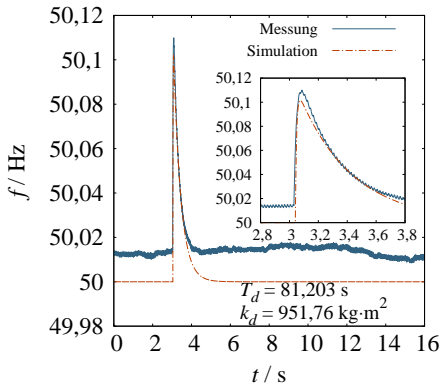
$\tau = 0,4$ s



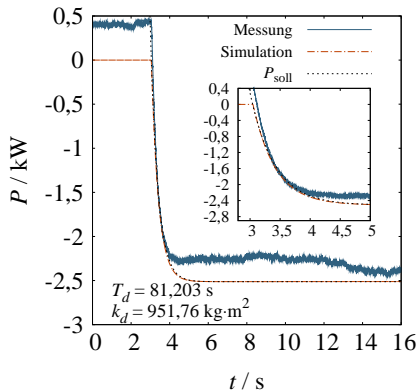
$\tau = 0,8$ s

Gütefunktional E als Funktion der Parameter T_d und k_d . Rote Kreuze markieren jeweils Minimum des Gütefunktionals.

Vergleich zwischen Simulation und Messung



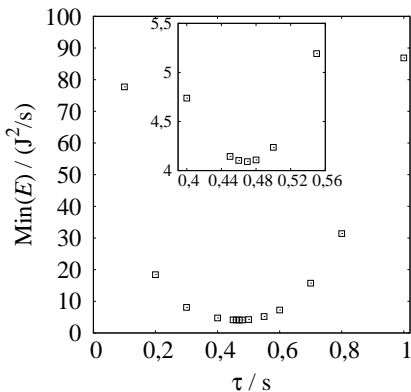
VISMA-Frequenz.



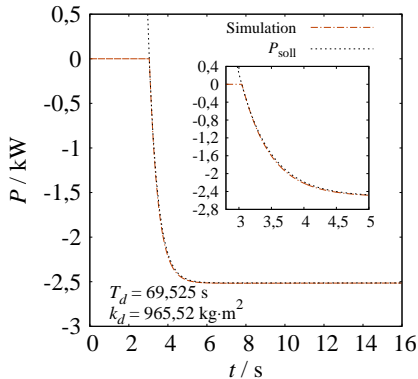
(Gemittelte) Wirkleistung.

Vergleich zwischen Simulation und Experiment, $\tau = 0,4$ s und ein Minimum des Gütefunktional.

Optimaler Wert für τ



Minimum des Gütefunktional als Funktion von τ . Inset: Bereich nahe des Minimums, welches bei $\tau \approx 0,47 \text{ s}$ liegt.



Vergleich der Sollleistung und der simulierten Leistung für ein Minimum des Gütefunktional und $\tau = 0,47 \text{ s}$.

→ Beste Übereinstimmung bei $\tau = 0,47 \text{ s}$, allerdings für gewähltes $\tau = 0,4 \text{ s}$ auch gute Übereinstimmung

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung:






- Modell der VISMA
- Optimierungsverfahren → Gütefunktional
- Downhill-Simplex-Algorithmus
- Ergebnisse, u.a. Vergleich zwischen Simulation und Experiment → Gute Übereinstimmung

Ausblick:

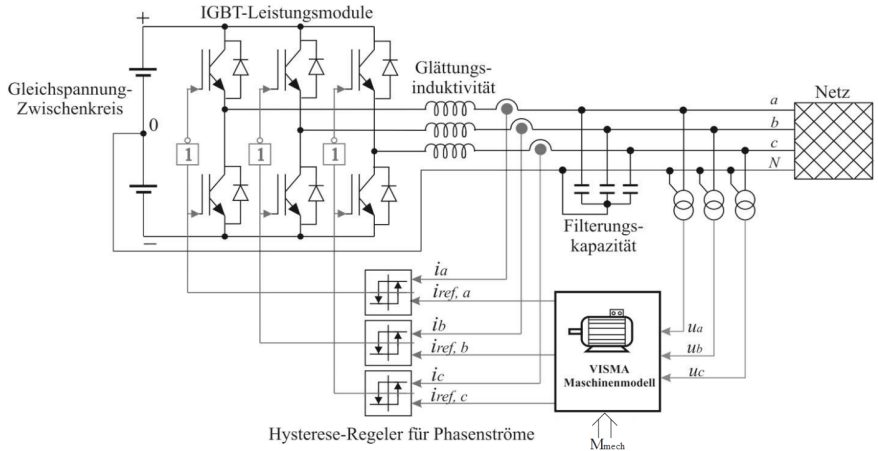
- Optimierung mehrerer Anlagen (z.B. VISMAAs, Wechselrichter, etc.), bis hin zu gesamtem MicroGrid
- Verwendung von Optimierungsverfahren aus der statistischen Physik (z.B. „Parallel Tempering“)
- Integration von stochastischer Einspeisung (PV und Windkraftanlagen)

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!

Literatur:

-  Beck, H.-P.; Hesse, R.: „Virtual Synchronous Machine“, IEEE 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU 2007), S. 1-6
-  Chen, Y; Hesse, R.; et al.: „Investigation of the Virtual Synchronous Machine in the Island Mode“, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, Berlin 2012
-  Galassi, M. et al: „GNU Scientific Library Reference Manual“, 3rd Ed. 2009, ISBN 0954612078; vgl. <http://www.gnu.org/software/gsl/>
-  Nelder, J.; Mead, R.: „A Simplex method for function minimization“, Computer Journal **7**, 308 (1965)
-  Press, W.H.; Teukolsky, S.A.; Vetterling, W.T.; Flammery, B.P.: „Numerical Recipes in C“, 2nd edition, Cambridge University Press 1992; vgl. <http://www.nr.com/>

Backup-Folie: VISMA-Aufbau



Aufbau der VISMA mit Hysterese-/Phasenstromregler
[Beck2007]