

Randnetzmodellierung für dynamische Frequenzuntersuchungen im Verteilnetz



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Anna Pfendler, Lukas Jung, Jutta Hanson

18. Symposium Energieinnovation (EnInnov) 2024
(C2) Regelung in Verteilernetzen

15. Februar 2024



Elektrische
Energieversorgung
unter Einsatz
Erneuerbarer Energien

- 1 Einleitung
- 2 Low-Inertia Systeme
- 3 Methodik
- 4 Simulationsergebnisse
- 5 Fazit und Ausblick

1 Einleitung

2 Low-Inertia Systeme

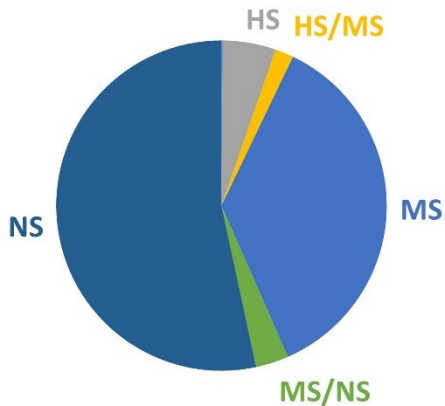
3 Methodik

4 Simulationsergebnisse

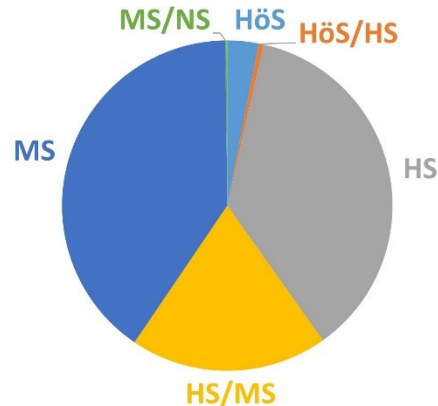
5 Fazit und Ausblick

Frequenzstabilität in aktiven Verteilernetzen

- Anschluss von EE-Anlagen hauptsächlich im Verteilnetz:



PV: 62 GW



Wind Onshore: 56 GW

Quelle: EEG-Anlagenstammdaten 2022, netztransparenz.de

- Aufrechterhaltung des Wirkleistungsgleichgewichts muss zunehmend durch EE-Anlagen erfolgen
- Frequenzuntersuchungen zum dynamischen Verhalten von EE-Anlagen in Verteilernetzen erfordert vereinfachte Modellierung des überlagerten Netzes

Wie kann das Randnetz für dynamische Frequenzuntersuchung im aktiven Verteilernetz vereinfacht nachgebildet werden?

1 Einleitung

2 Low-Inertia Systeme

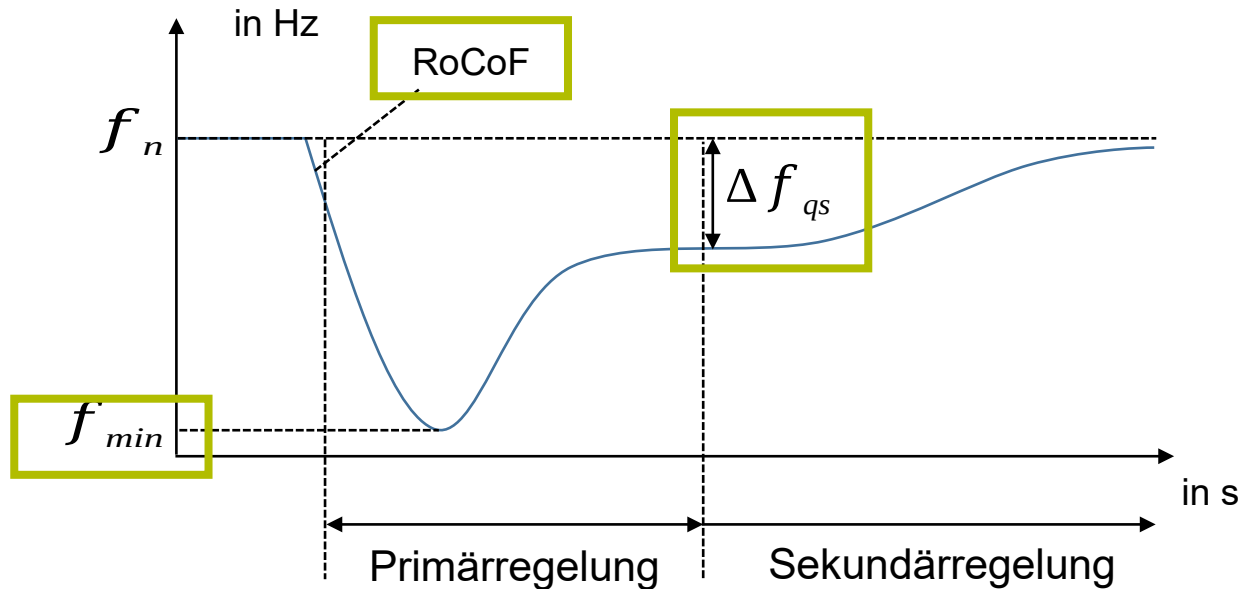
3 Methodik

4 Simulationsergebnisse

5 Fazit und Ausblick

Low-Inertia Systeme

Typischer dynamischer Frequenzverlauf



Frequenzgradient (RoCoF)

bestimmt durch das Trägheitsverhalten von

- rotierende Maschinen
- netzbildende Regelungen

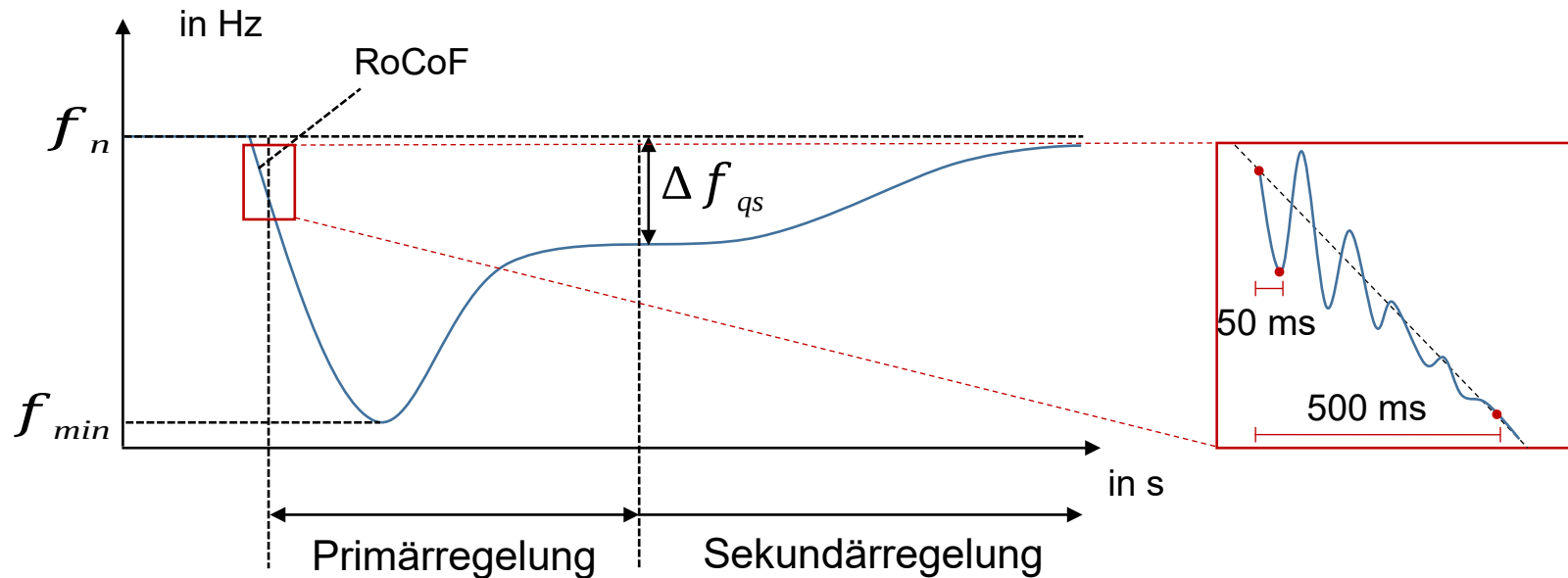
Frequenznadir

Quasistationäre

Frequenzabweichung bestimmt durch die Primärregelung von Erzeugungsanlagen

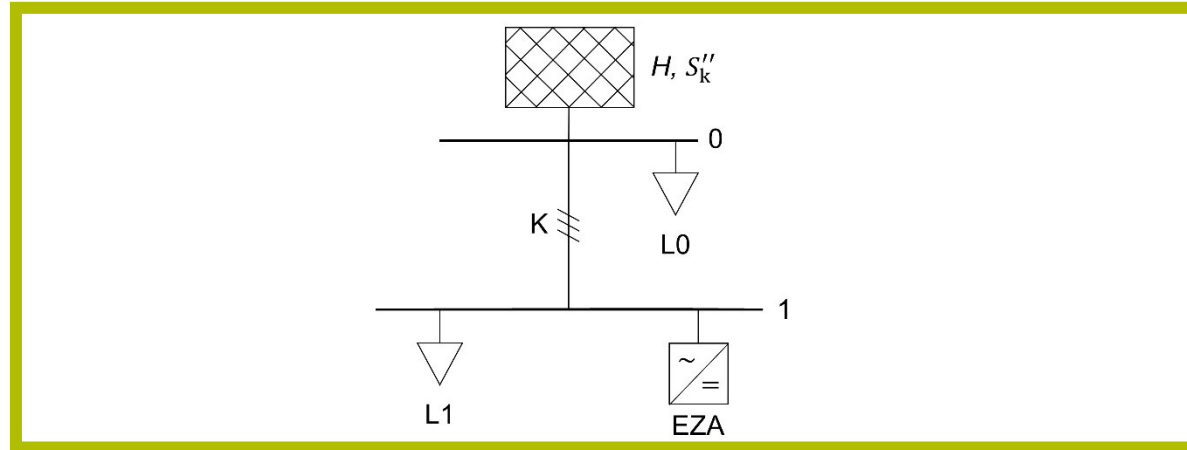
Low-Inertia Systeme

Typischer dynamischer Frequenzverlauf



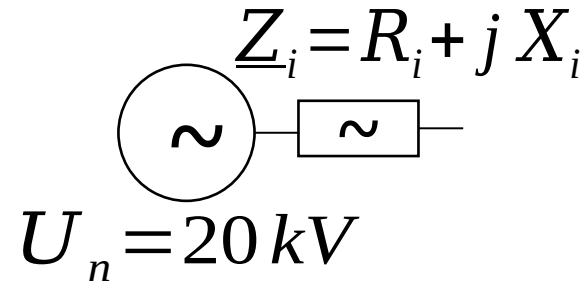
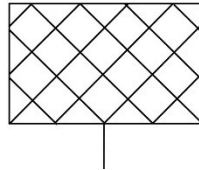
Sinkende Trägheit im elektrischen Verbundsystem führt zu schnelleren und stärkeren Frequenzänderungen

- 1 Einleitung
- 2 Low-Inertia Systeme
- 3 Methodik
- 4 Simulationsergebnisse
- 5 Fazit und Ausblick



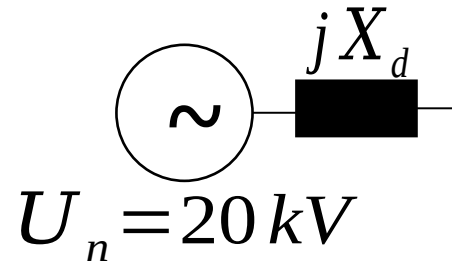
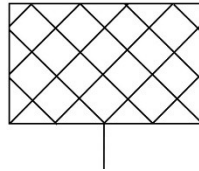
- Konzentrierte EZA und Last L1 im Strang
- Vergleich von zwei Varianten des externen Netzes:
- Ward-Äquivalent & aggregierter Synchrongenerator

- Nachbildung des externen Netzes als dreiphasige **Spannungsquelle mit Innenimpedanz**



- Frequenzverlauf kann der Spannungsquelle vorgegeben werden
- Impedanz wird wie folgt berechnet

- Nachbildung des externen Netzes als **Synchrongeneratormodell 6. Ordnung inkl. Regelung**

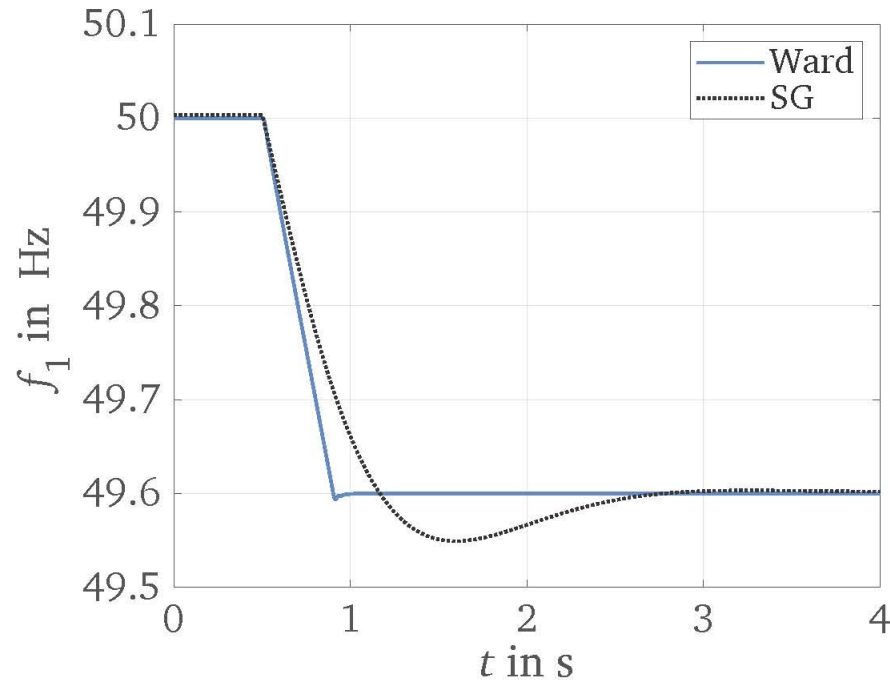


- Dynamisches Verhalten inkl. Trägheit, Spannungs- und Frequenzregelung wird modelliert
- Parametrierung anhand von Faustformeln
- Zur Simulation eines Unterfrequenzszenarios erfolgt ein Sollwertsprung der Last L0

- 1 Einleitung
- 2 Low-Inertia Systeme
- 3 Methodik
- 4 **Simulationsergebnisse**
- 5 Fazit und Ausblick

Simulationsergebnisse

Vergleich von Ward Äquivalent und aggregiertem Synchrongenerator



Ward:

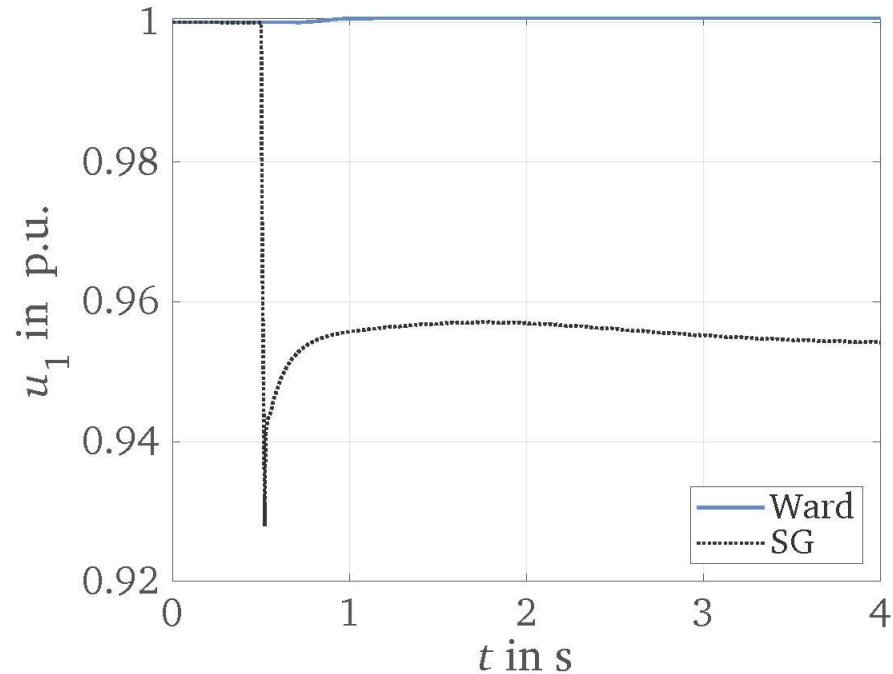
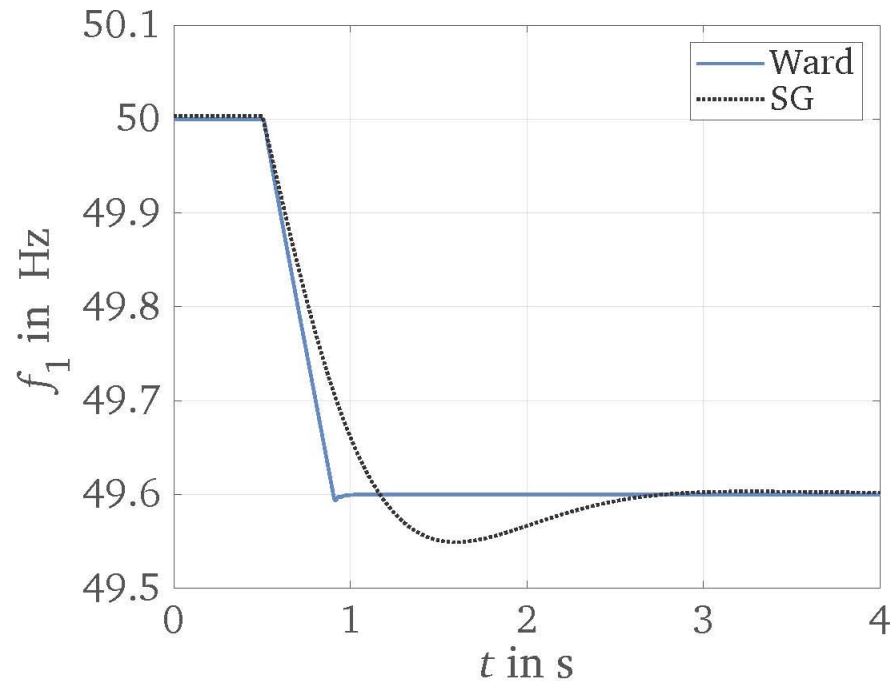
- Frequenzrampe mit für 0,4 s
- Kurzschlussleistung

Synchrongenerator:

- Lastsprung
- Kurzschlussleistung
- Trägheit

Simulationsergebnisse

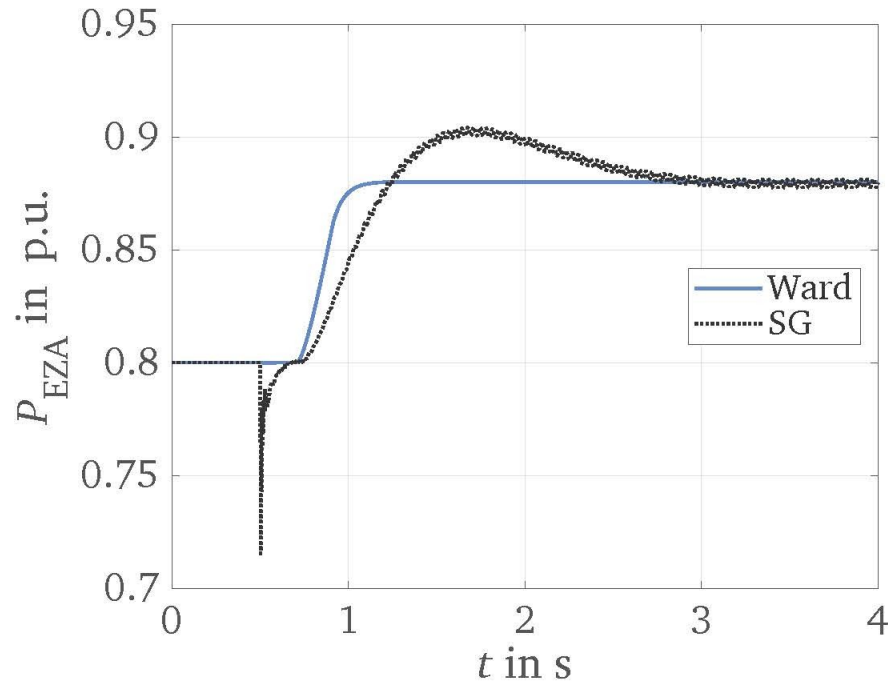
Vergleich von Ward Äquivalent und aggregiertem Synchrongenerator



Wie verhält sich die dezentrale EZA in diesen Szenarien?

Simulationsergebnisse

Vergleich von Ward Äquivalent und aggregiertem Synchrongenerator



Ward:

- Fast Frequency Response (FFR) mit Totband
- Wirkleistungsreaktion proportional zur Frequenzabweichung, da Spannung konstant

Synchrongenerator:

- Lastsprung → Spannungssprung

Zwischenfazit

- Ward-Äquivalent kann beliebige Frequenz vorgeben
- Die Spannung des Ward-Äquivalents ist starr
- Die Wirkleistungseinspeisung der dezentralen EZA folgt proportional der Frequenzabweichung

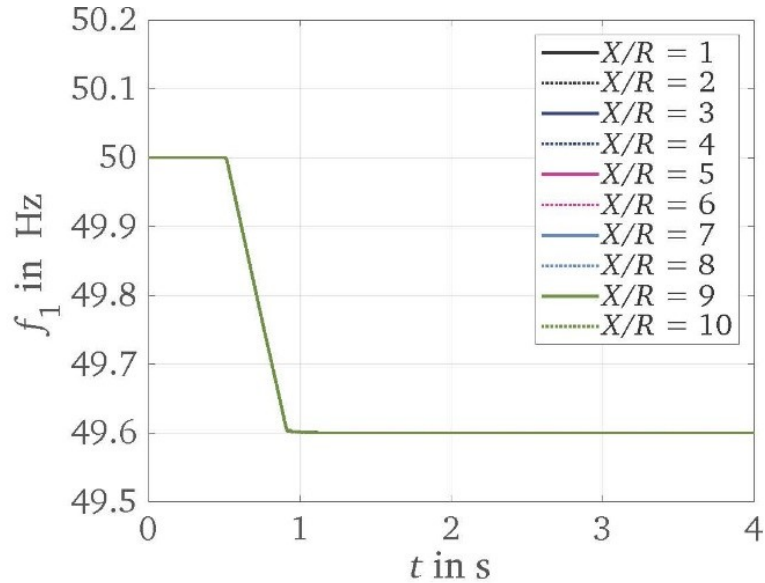


Sensitivitätsanalyse zur Anwendbarkeit des Ward-Äquivalents

- Variation des X/R Verhältnisses
- Variation der Netzstärke des externen Netzes

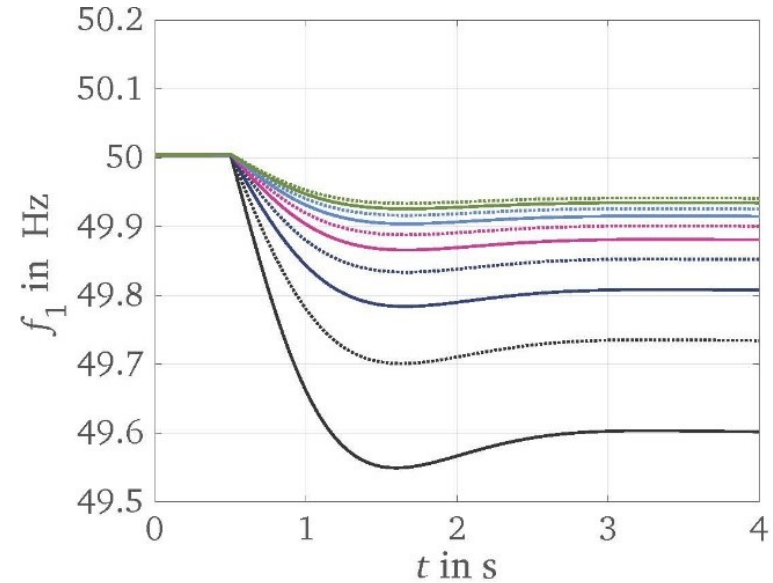
Simulationsergebnisse

Sensitivitätsanalyse – Variation X/R Verhältnis



Ward Äquivalent

$$\underline{Z}_i = \frac{U_n^2}{S_k''} \cdot e^{j \cdot \text{atan}(X/R)}$$

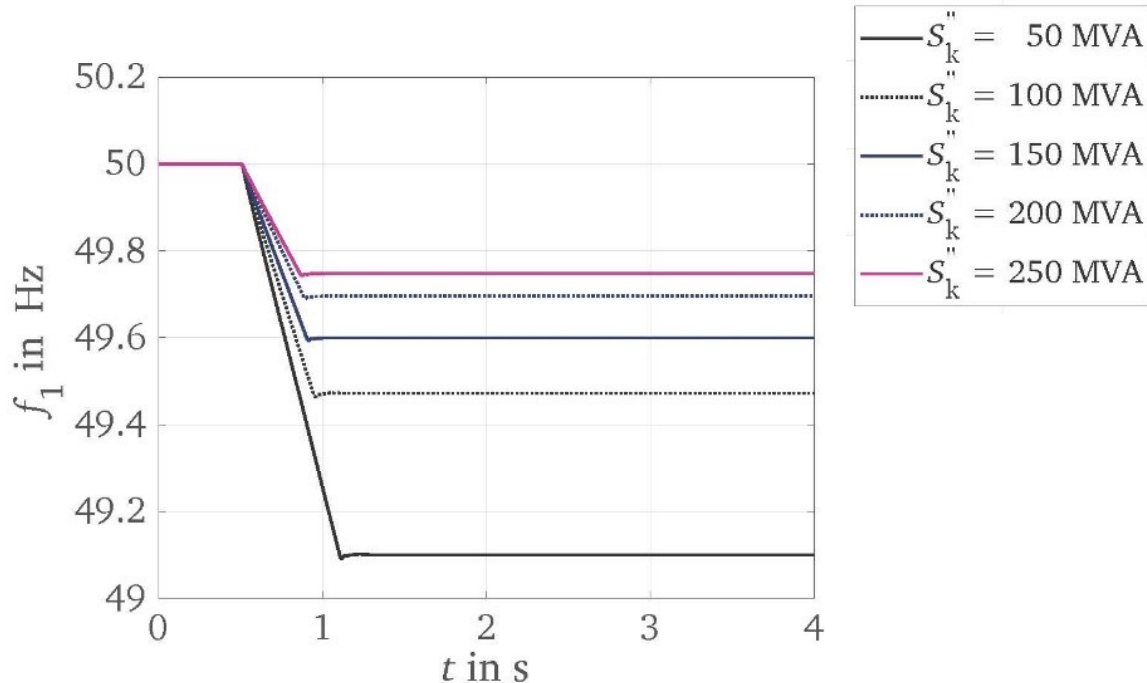


Synchrongenerator

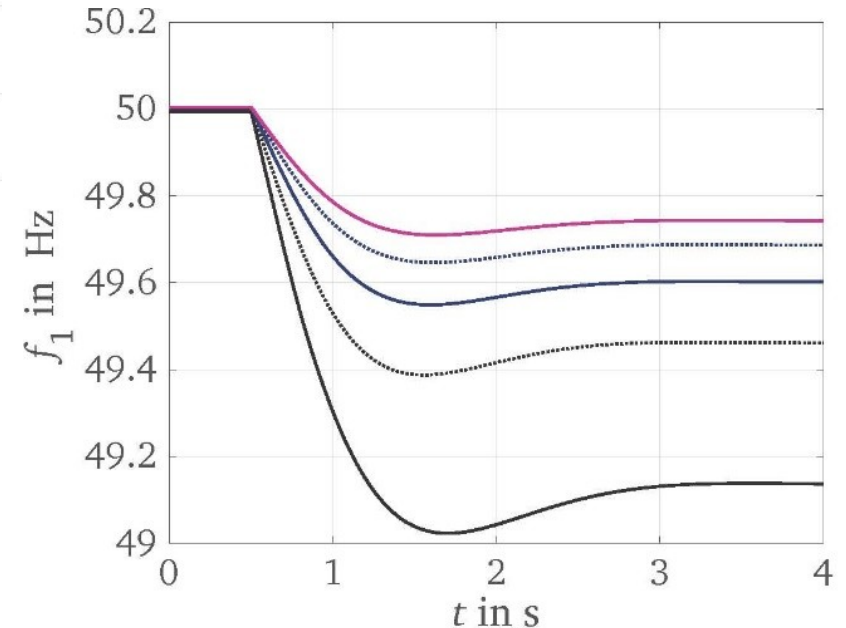
$$S_{r,SG} = x_d'' \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{R}{X}\right)^2} \cdot S_k''$$

Simulationsergebnisse

Sensitivitätsanalyse – Variation der Netzstärke

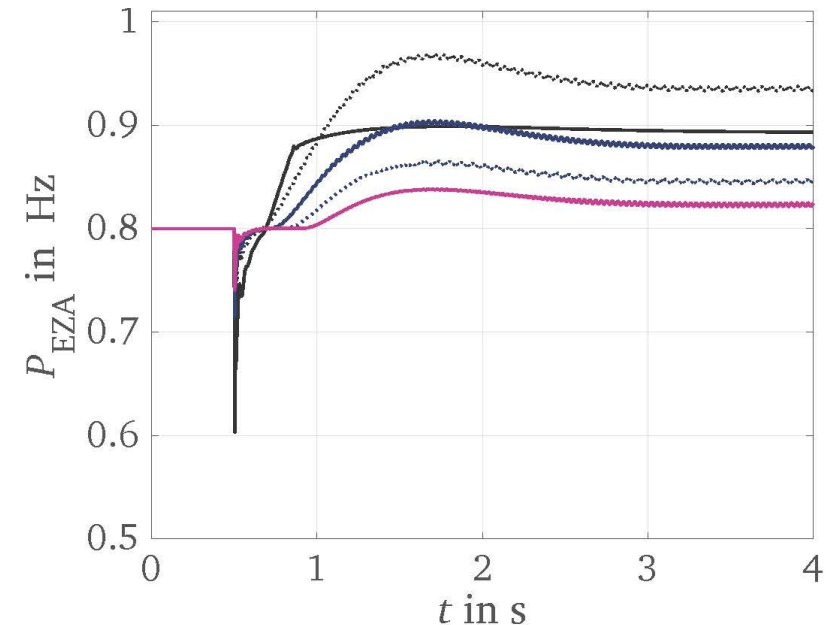
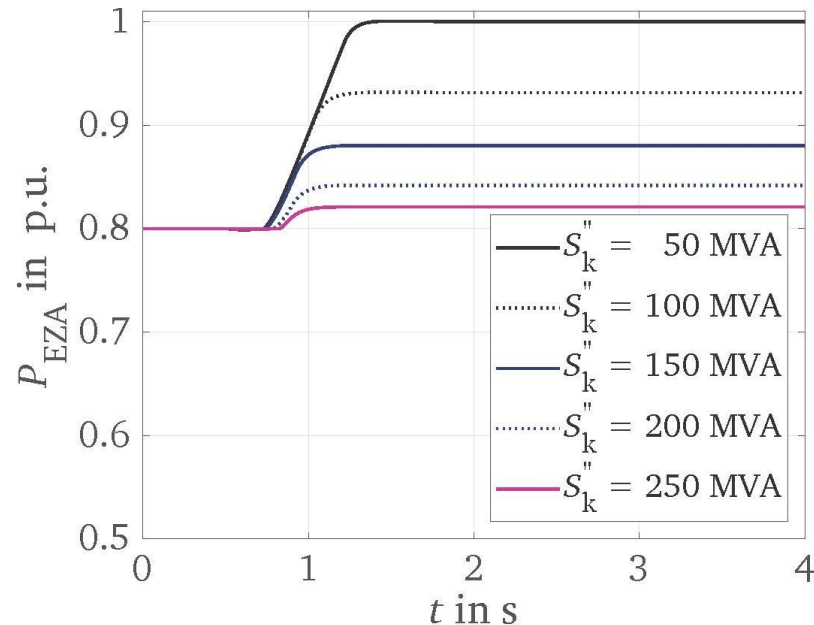


$$Z_i = \frac{U_n^2}{S_k''} \cdot e^{j \cdot \text{atan}(X/R)}$$



Simulationsergebnisse

Sensitivitätsanalyse – Variation der Netzstärke Teil 2



- Reglerinteraktion zwischen Synchrongenerator und dezentraler EZA
- Nicht-lineares Verhalten kann nicht durch Ward Äquivalent nachgebildet werden

- 1 Einleitung
- 2 Low-Inertia Systeme
- 3 Methodik
- 4 Simulationsergebnisse
- 5 **Fazit und Ausblick**

- Trägheitsverhalten und Primärregelung des Synchrongenerators können nicht mithilfe einer linearen Frequenzrampe nachgebildet werden
- Ward-Äquivalent bildet keinen Spannungseinbruch nach
→ dynamische Reaktion dezentraler EZA durch das Ward-Äquivalent nicht nachgebildet
- in schwachen Netzen werden die Unterschiede aufgrund der fehlenden Spannungsreaktion größer

Zukünftige Untersuchungen

- Detailliertes Verteilnetz
- Detailliertes überlagertes Netz



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Für Fragen stehe ich gerne zur Verfügung.



Anna Pfendler, M.Sc.
Wissenschaftliche Mitarbeiterin

Technische Universität Darmstadt
Institut Elektrische Energiesystem
Fachgebiet Elektrische Energieversorgung unter
Einsatz Erneuerbarer Energien (E5)

anna.pfendler@e5.tu-darmstadt.de
www.e5.tu-darmstadt.de

