



Abbildung von Energiemengenbeschränkungen netzbildender Umrichter

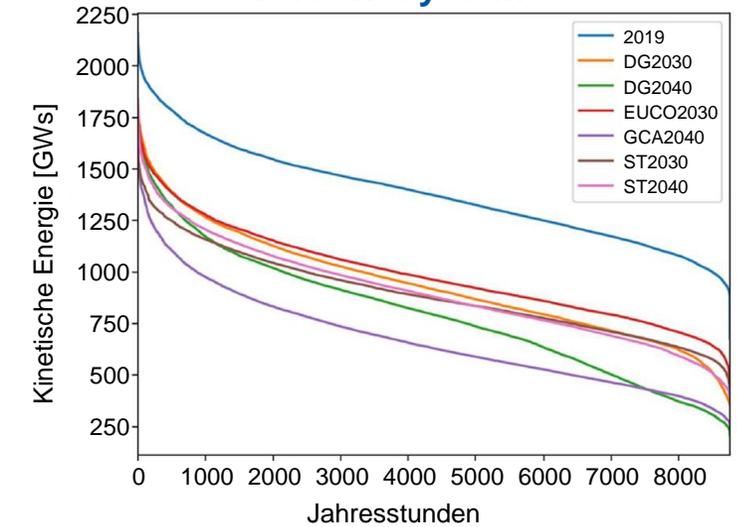
Name: Maik Schönefeld

Einleitung

Hintergrund und Motivation

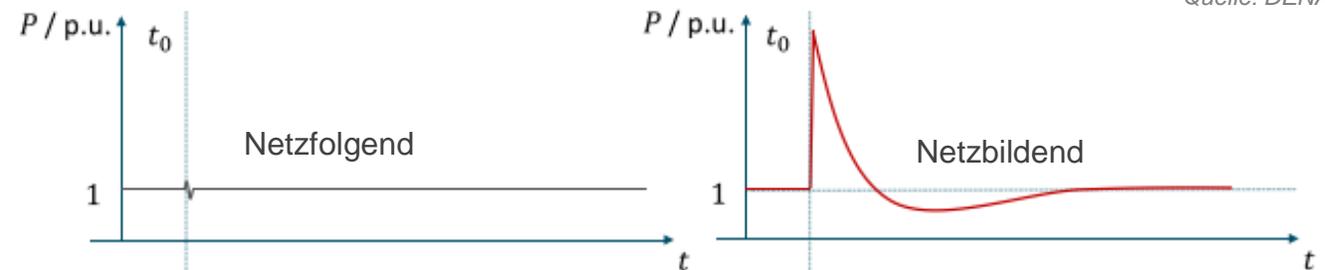
- Strukturwandel im Elektrizitätsversorgungssystem (EVS)
 - Abschaltung synchron gekoppelter, konventioneller Kraftwerke
 - Anbindung von Erzeugungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energien (EE-Anlagen) über Umrichter mit sog. netzfolgenden Regelungskonzepten
 - Bereitstellung von Momentanreserve aufgrund notwendiger Synchronisierung nicht möglich
- Abnahme rotierender Massen bzw. Momentanreserve im europäischen Verbundsystem
- Mögliche Alternative zur zukünftigen Bereitstellung von Momentanreserve: „Netzbildende“ Regelungskonzepte für Umrichter
 - Nachahmung des Verhaltens einer geregelten Spannungsquelle
- Untersuchung der Möglichkeit zur Bereitstellung von Momentanreserve über Umrichter mit netzbildenden Regelungskonzepten

Kinetische Energie im europäischen Verbundsystem



Quelle: Inertia and Rate of Change of Frequency, ENTSO-E, 2020

Verhalten unterschiedlicher Regelungskonzepte im Fehlerfall

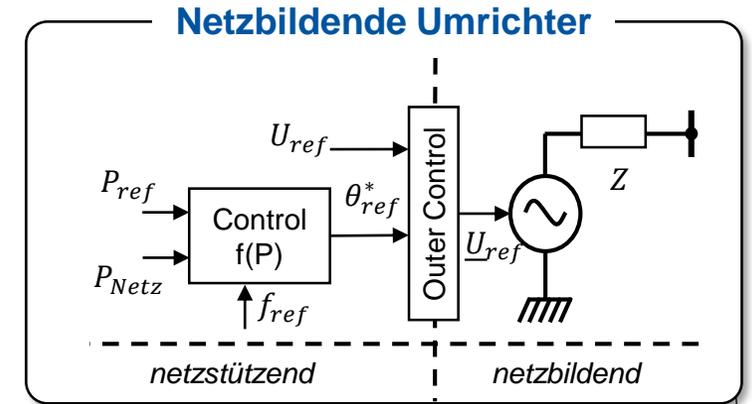


Quelle: DENA

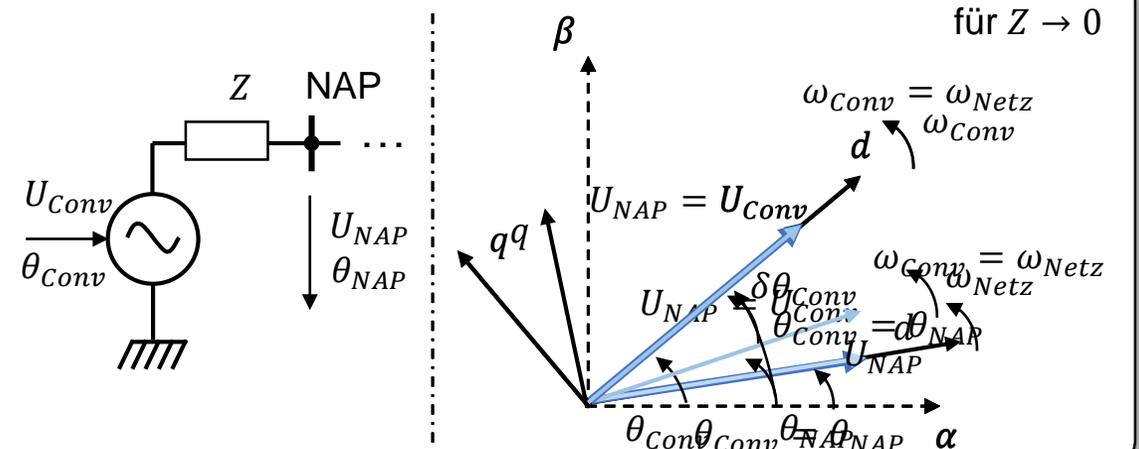
Analyse

Netzbildende Regelungskonzepte

- Virtuelles rotierendes Bezugssystem innerhalb der Regelung
- Stationär: Rotation des virtuellen Bezugssystems der Regelung mit der gleichen Frequenz wie die Netzspannung
- Bei Fehlereintritt: Rotation des virtuellen Bezugssystems mit Nennfrequenz, während der Winkel am NAP aufgrund des Störereignisses variiert
- Nach Einregeln: Erreichen eines neuen stationären Betriebspunkts
 - Neue Frequenz: $\omega_{Converter} = \omega_{Netz,nachFehlerfall} \neq 50 \text{ Hz}$
 - Identischer Spannungsbetrag: $|U_{vorFehlerfall}| = |U_{nachFehlerfall}|$
 - Neuer Spannungswinkel: $\theta_{vorFehlerfall} \neq \theta_{nachFehlerfall}$
- Keine Phasenregelschleife zur Synchronisation aufgrund des Leistungsausgleichs durch die Regelung notwendig
- ➔ Keine Messverzögerung durch Regelungskonzept vorhanden
- ➔ Bereitstellung von Momentanreserve durch netzbildendes Regelungskonzept möglich



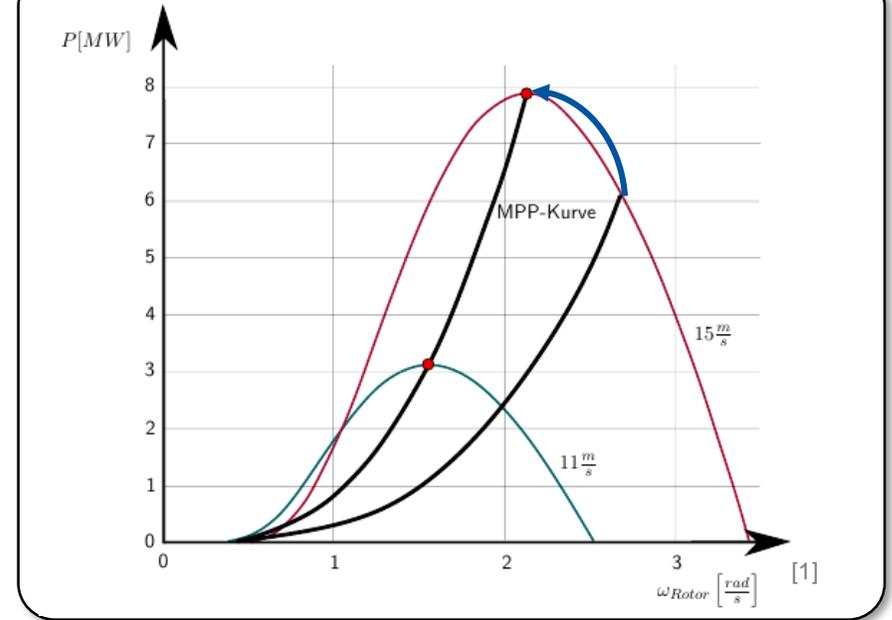
Virtuelles Bezugssystem netzbildender Regelungskonzepte



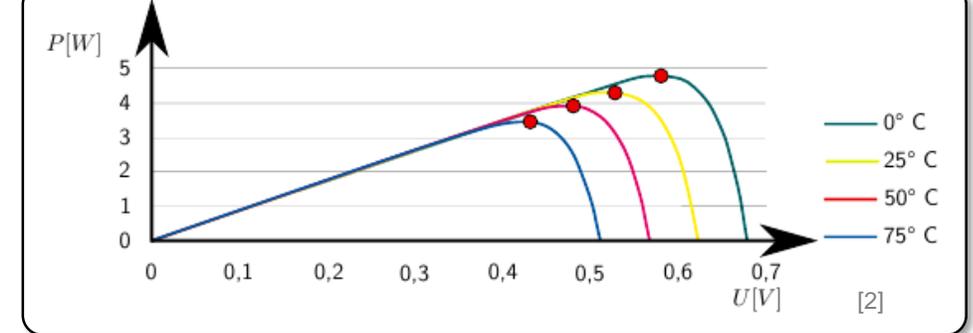
Leistungselektronisch angeschlossene Anlagen

- Windenergieanlagen
 - Bereitstellung von Momentanreserve aus Nennbetrieb heraus durch Rotationsenergie des Rotors bei Androsseln/Beschleunigen möglich
 - ➔ Energiereserve in Höhe von 10% der aktuellen Leistung für bis zu 10 Sekunden
- PV-Anlagen
 - Nur Energiereserve in Zwischenkreis des Umrichters vorhanden
 - ➔ Nahezu keine Energiereserve vorhanden
- Möglichkeit der Erweiterung des Energiespeichers:
 - SuperCaps
 - Hohe Leistungsdichte
 - Unmittelbare Bereitstellung von Leistung
 - Geringe Energiedichte
 - Batteriespeicher
 - Hohe Energiedichte
 - Kombination mit SuperCaps denkbar

Leistungs- und MPP-Kurve von WEA

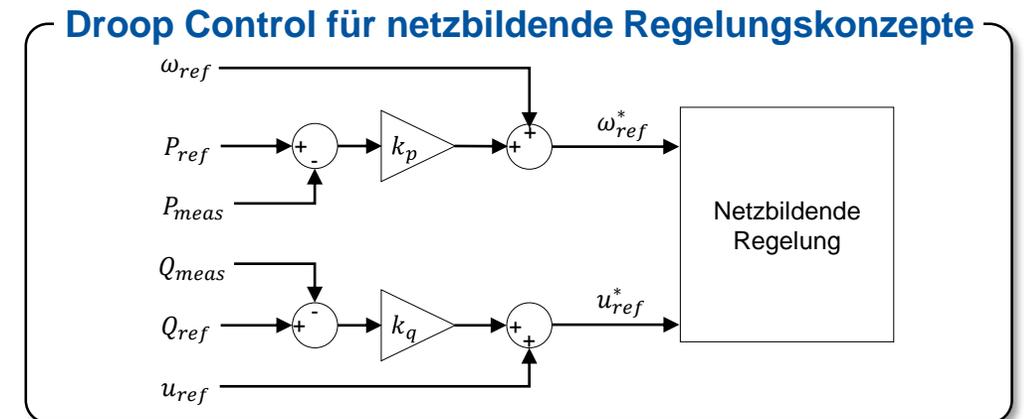
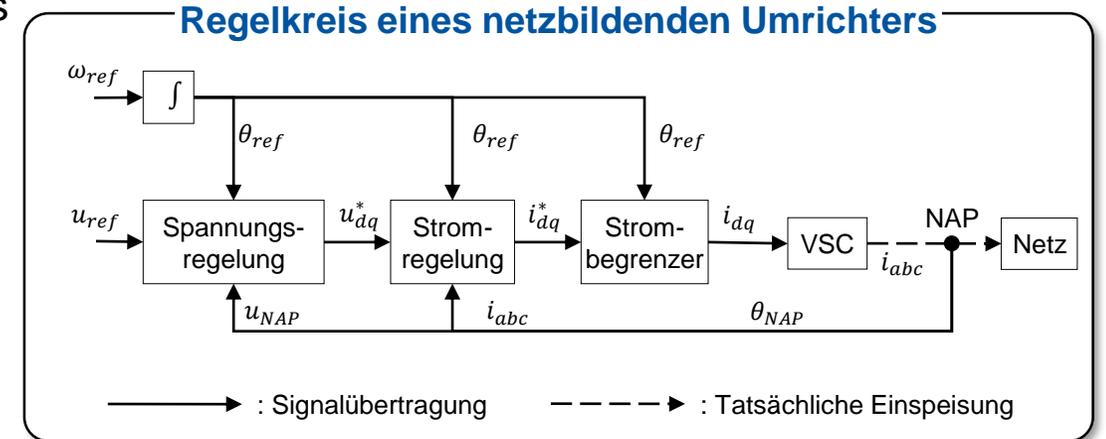


Leistungskurve einer Solarzelle



Netzbildendes Regelungskonzept mit Modellierung von Energiemengenbeschränkung

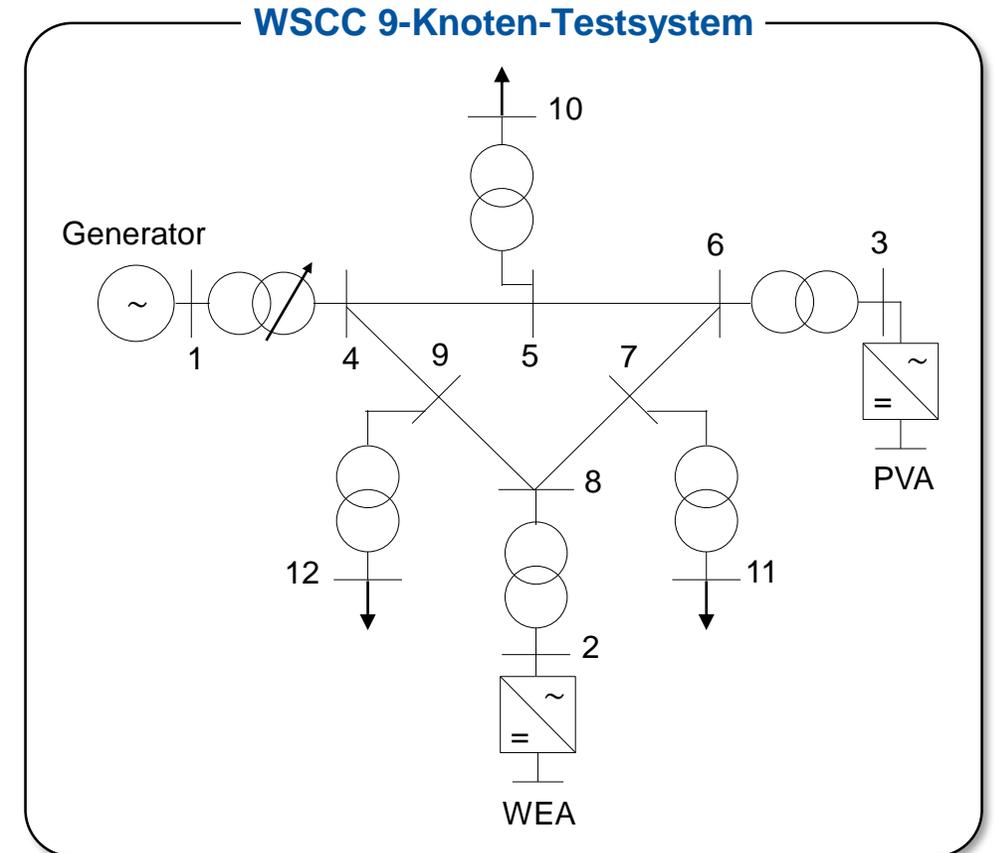
- Erweiterung des grundlegenden netzbildenden Regelungskonzepts um zusätzliches netzstützendes Verhalten
- Droop Control für netzbildende Umrichter
 - Berücksichtigung von Referenzwerten für Wirk- und Blindleistungseinspeisung über f(P)- und U(Q)-Statik
 - Ermöglicht Bereitstellung von Momentanreserve und Primärregelleistung
 - Vorgabe von Referenzspannung und Referenzwinkelgeschwindigkeit für netzbildendes Regelungskonzept
- Modellierung von Energiemengenbeschränkung nach Eintritt eines Störereignisses
 - Nach Aufbrauchen der Energiereserven Rückkehr von Wirkleistungseinspeisung auf Vorfehlerwert notwendig
 - Realisierung über schnelle Rückführung des ω_{ref}^* auf ursprünglichen Wert



Untersuchungen

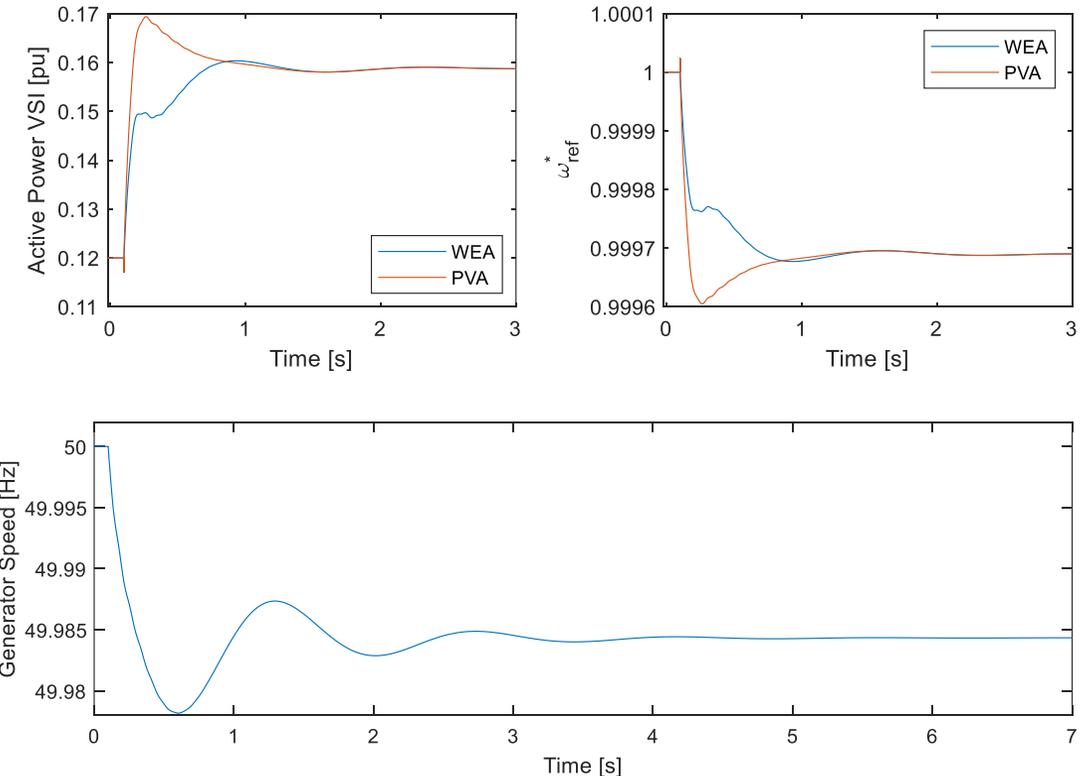
Untersuchungsprogramm

- Modifiziertes WSCC 9-Knoten-Netz
 - 1 konventionelles Kraftwerk mit Synchrongenerator
 - 1 PVA und 1 WEA mit netzbildendem Umrichter mit jeweils $P = 120 \text{ MW}$
 - Gesamte Last: 715 MW
- Durchführung von RMS-Zeitbereichssimulationen
- Lasterhöhung von 100 MW an Knoten 5 nach $t = 0,1 \text{ s}$
- Untersuchung von 2 Szenarien
 1. Untersuchung des Systemverhaltens bei Modellierung netzbildender Umrichter mit „unendlichen“ Energiereserven
 2. Untersuchung des Systemverhaltens bei Modellierung netzbildender Umrichter mit Energiemengenbeschränkungen



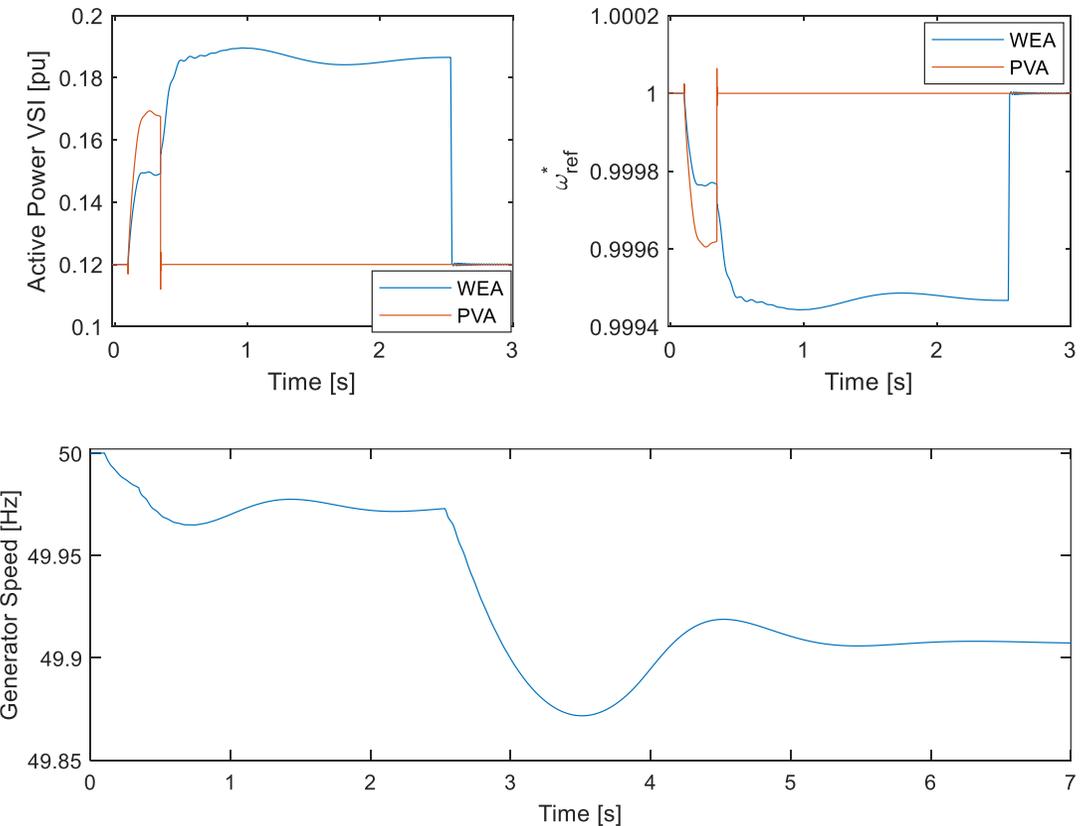
Netzbildende Umrichter mit unendlichen Energiereserven

- Per Unit-Größen bezogen auf 1000 MVA bzw. 50 Hz
- Bereitstellung von Momentanreserve und Primärregelleistung durch EE-Anlagen und Synchrongenerator
- Erhöhung der Einspeisung der EE-Anlagen durch interne Regelungsfrequenz von weniger als 1 pu (50 Hz)
- Max. dynamische Frequenzabweichung von ca. 0,022 Hz
- Quasistationäre Frequenzabweichung von ca. 0,015 Hz
- ➔ Sehr geringe Abweichungen von Nennfrequenz von 50 Hz im vorliegenden Szenario im gesamten zeitlichen Verlauf
- Wie sieht das Frequenzverhalten bei Berücksichtigung der Energiemengenbeschränkung bei sonst identischer Parameterwahl aus?



Netzbildende Umrichter bei Modellierung der Energiemengenbeschränkung

- Energiereserven der PVA nach weniger als 0,5 Sekunden aufgebraucht
 - Zusätzliche Bereitstellung von Momentanreserve durch Synchrongenerator und WEA
 - “Erste” maximale dynamische Frequenzabweichung von ca. 0,035 Hz
 - “Erste” quasistationäre Frequenzabweichung von ca. 0,025 Hz
 - Energiereserven der WEA nach ca. 2,5 Sekunden aufgebraucht
 - Nur noch Bereitstellung von Momentanreserve und Primärregelleistung durch Synchrongeneratoren
 - Max. dynamische Frequenzabweichung von ca. 0,13 Hz
 - Quasistationäre Frequenzabweichung von ca. 0,10 Hz
- ➔ Erheblicher Einfluss von Berücksichtigung der Energiemengenbeschränkung bei Anwendung netzbildender Umrichter zur Bereitstellung von Momentanreserve



Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Verringerung der Momentanreserve durch Rückbau konventioneller Kraftwerke
- Alternative zur zukünftigen Bereitstellung von Momentanreserve: EE-Anlagen mit netzbildenden Umrichtern
- EE-Anlagen haben i.d.R. keine oder nur geringe Energiereserven und hängen vom Netznutzer ab
 - Kurzzeitige Bereitstellung durch WEA durch Drosselung der Rotationsgeschwindigkeit möglich
 - Keine Reserven in PVA
 - SuperCaps und Batteriespeicher Option zur Erhöhung der vorhandenen Energiereserven
- Berücksichtigung von vorhandenen Energiereserven mit erheblichem Einfluss auf Frequenzverhalten des Netzes
- Abbildung bei Untersuchung des Frequenzverhaltens unerlässlich

**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit**



Maik Schönefeld, M.Sc.

RWTH Aachen University
Institut für Elektrische Anlagen & Netze,
Digitalisierung und Energiewirtschaft
Lehrstuhl für Übertragungsnetze und
Energiewirtschaft

Tel. +49 (0) 241 / 80 97886
m.schoenefeld@iaew.rwth-aachen.de