
Regelung und Stabilität im stromrichterdominierten Verbundnetz

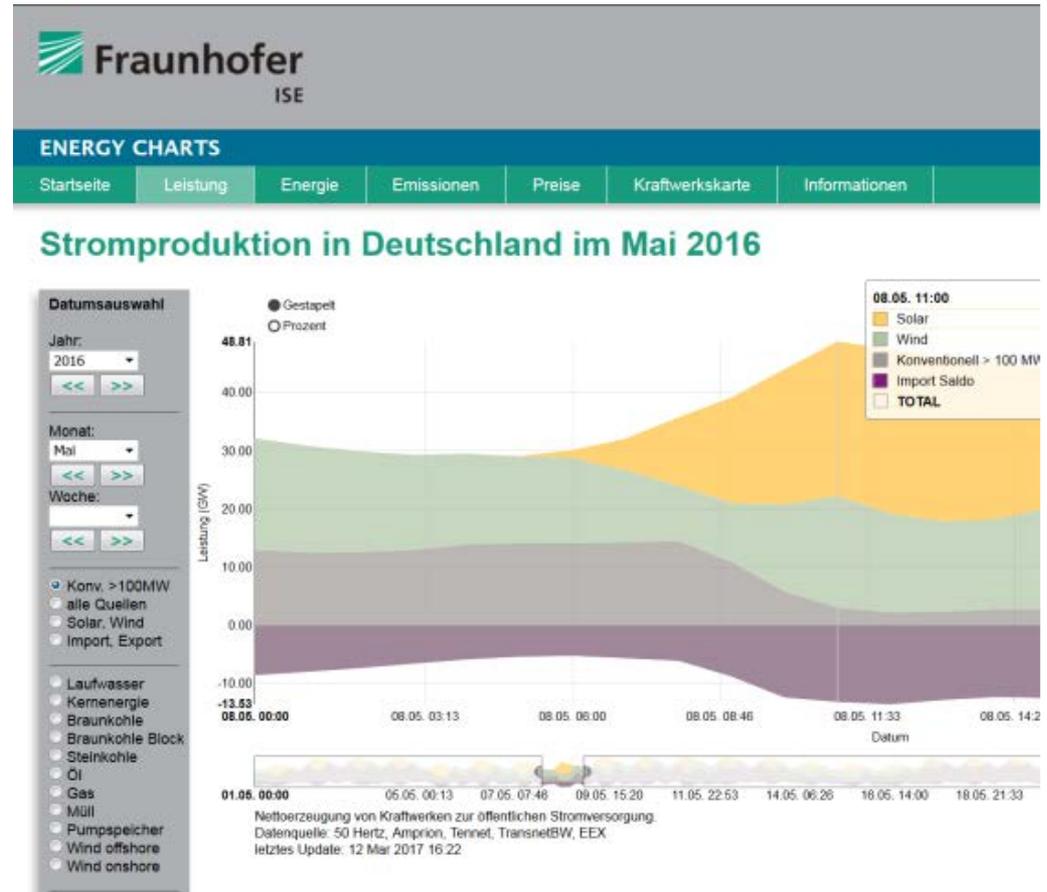
Philipp Strauß, Fraunhofer IEE
Gustav Lammert, Universität Kassel
Peter Unruh, Fraunhofer IEE

Netzregelung 2.0

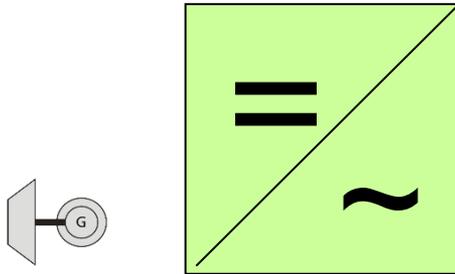


Motivation

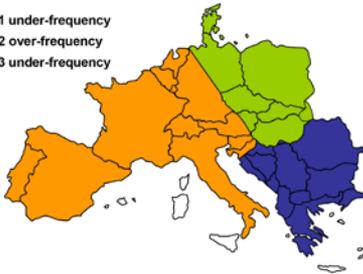
- Netzregelung basiert heute i.W. auf Großkraftwerken mit Synchrongeneratoren.
- Stromerzeugung erfolgt zunehmend mit stromrichtergekoppelten Erzeugungsanlagen
- Selbst bei hohem momentanen EE Anteil müssen derzeit konventionelle Kraftwerke am Netz bleiben
- Konventionelle Kraftwerke heute für Systemstabilität unverzichtbar



Quelle: www.energy-charts.de



- Area 1 under-frequency
- Area 2 over-frequency
- Area 3 under-frequency



- Nachweis, dass das elektrische Verbundsystem auch mit sehr hohen Stromrichteranteilen durch geeignete Regelungsverfahren stabil betrieben werden kann
- Stabilitätsnachweis auch für elektrisch getrennte Teile während „System Split“
- Vorbereitung einer konkreten Umsetzung der Ergebnisse im deutschen Teil des kontinentaleuropäischen Verbundnetzes



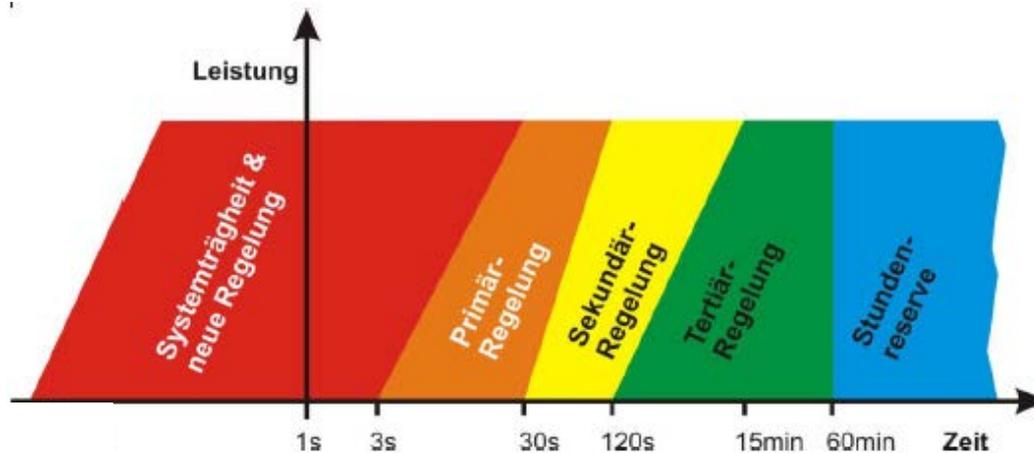
Netzregelung 2.0 – Konsortium



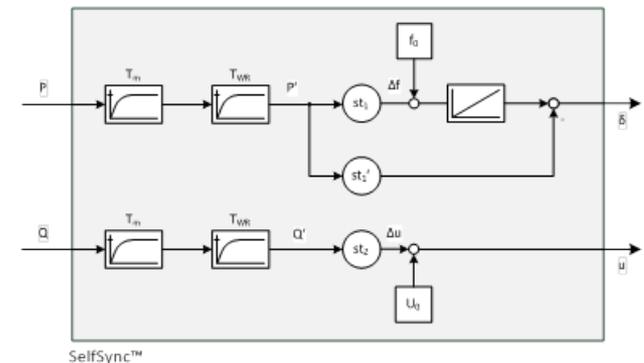
Projektlaufzeit: 1.12.2017 bis 30.11.2021

Arbeitshypothese

„Spannungseinprägende, netzbildende Stromrichter sind geeignet, die Systemstabilität im Verbundnetz auch ohne direkt gekoppelte Maschinen sicherzustellen.“



Bereitstellung von Momentanreserve

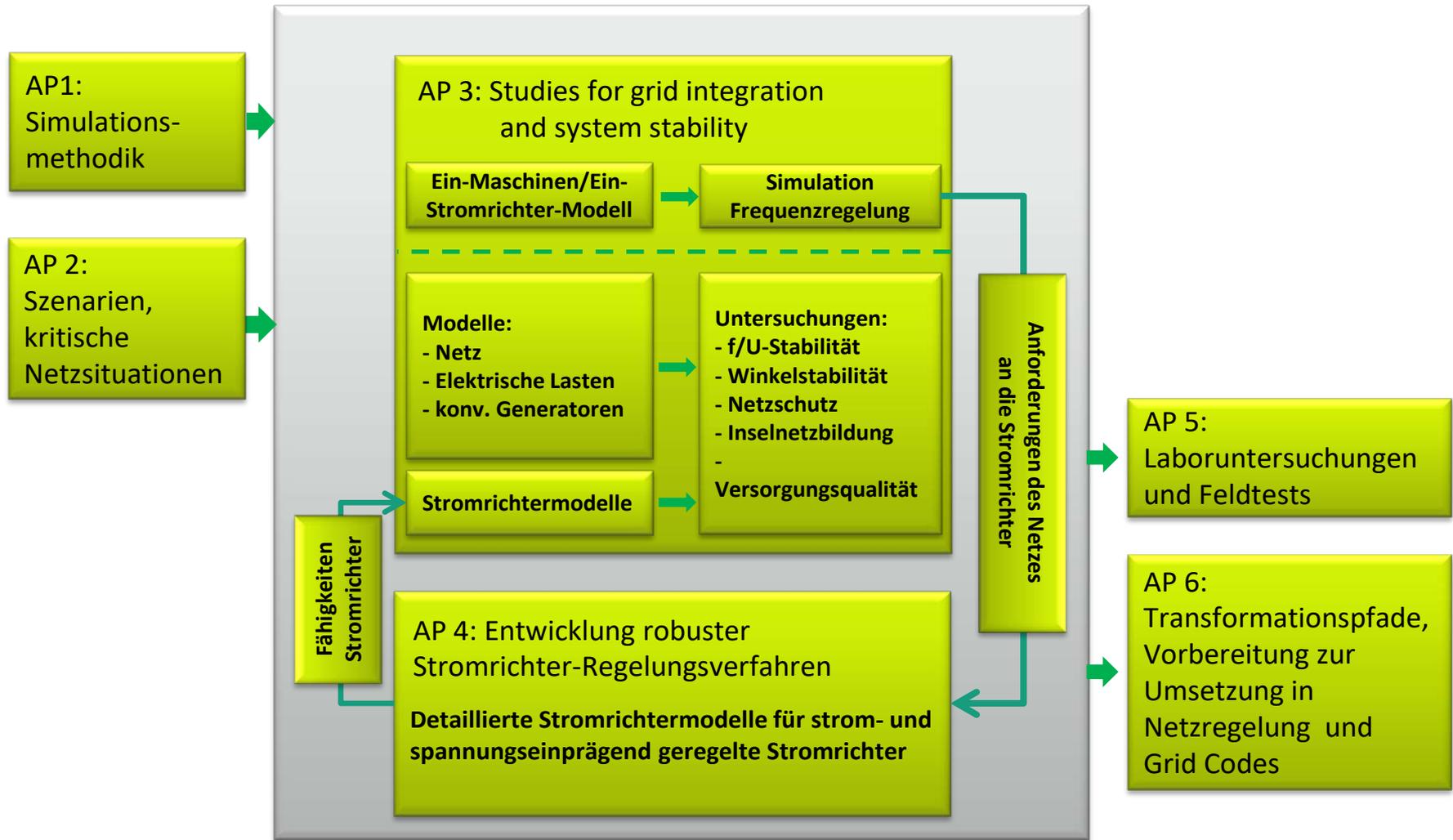


Beispiel: SelfSync™ – Verfahren

- $f(P)$ - bzw. $U(Q)$ -Kennlinien
- entkoppelte Regelung von P und Q

*) Selfsync: Engler, A.: „Regelung von Batteriestromrichtern in modularen und erweiterbaren Inselnetzen“, Dissertation, Fachbereich Elektrotechnik der Universität Kassel 2001

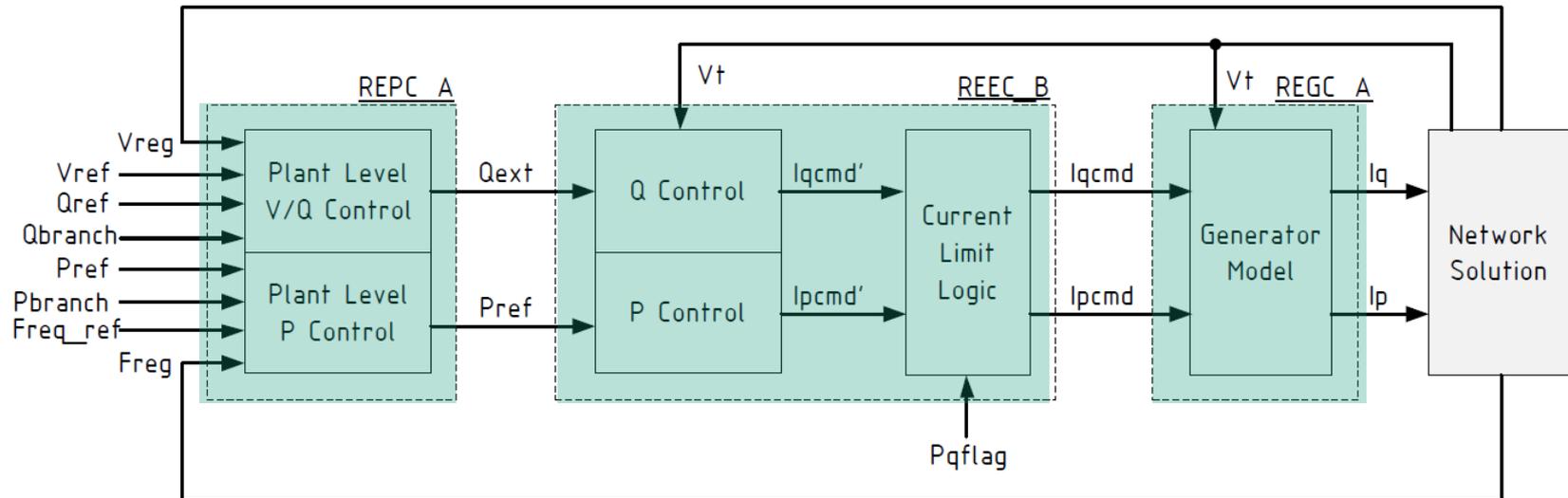
Arbeitsprogramm



- Unter welchen Bedingungen und mit welchen Regelungsverfahren können Stromrichter, unter Einhaltung ihrer Stromgrenzen, stabil am Verbundnetz betrieben werden?
 - Wie viele spannungseinprägende, stromrichtergekoppelte Erzeugungsanlagen werden gegebenenfalls auf welcher Spannungsebene benötigt und mit welchen Eigenschaften?
 - Welche Typen von Erzeugungsanlagen (Batterie, Wind, Photovoltaik, etc.) eignen sich ?
 - Wie werden die Stromrichter für die relevanten Netzsimulationen beschrieben? („generisches Stromrichter Modell“)
 - Welches sind geeignete Prüfverfahren für spannungseinprägende Stromrichter?
-
- **Regelungsverfahren schnell einsetzbar machen**
 - **Input für Weiterentwicklung von Netzanschlussregeln liefern**

Stromeinprägende Regelung

Generisches WECC Modell

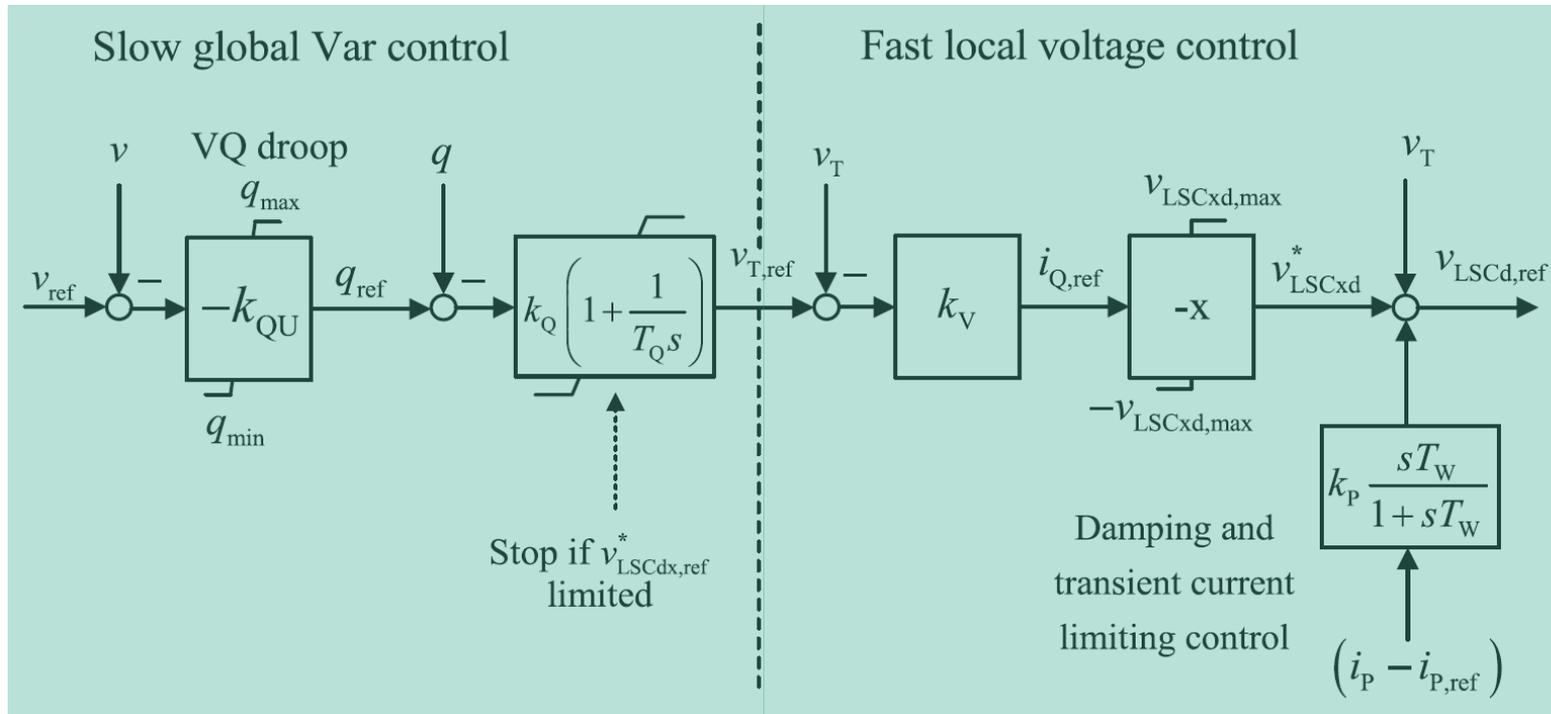


- **REGC_A:** Stromrichter (Wechselrichter) Schnittstelle zum Netz
- **REEC_B:** Schnelle Stromregelung des Wechselrichters mit Strombegrenzung (wichtig für Kurzzeitspannungsstabilität)
- **REPC_A:** Langsame Parkregelung mit Wirk-/Blindleistungsregelung

Quelle: WECC Solar Plant Dynamic Modeling Guidelines, Modeling and Validation Work Group, WECC PV Power Plant, Dynamic Modeling Guide, April 2014.

Spannungseinprägende Regelung

Direkte Spannungsregelung (nach I. Erlich et al.)



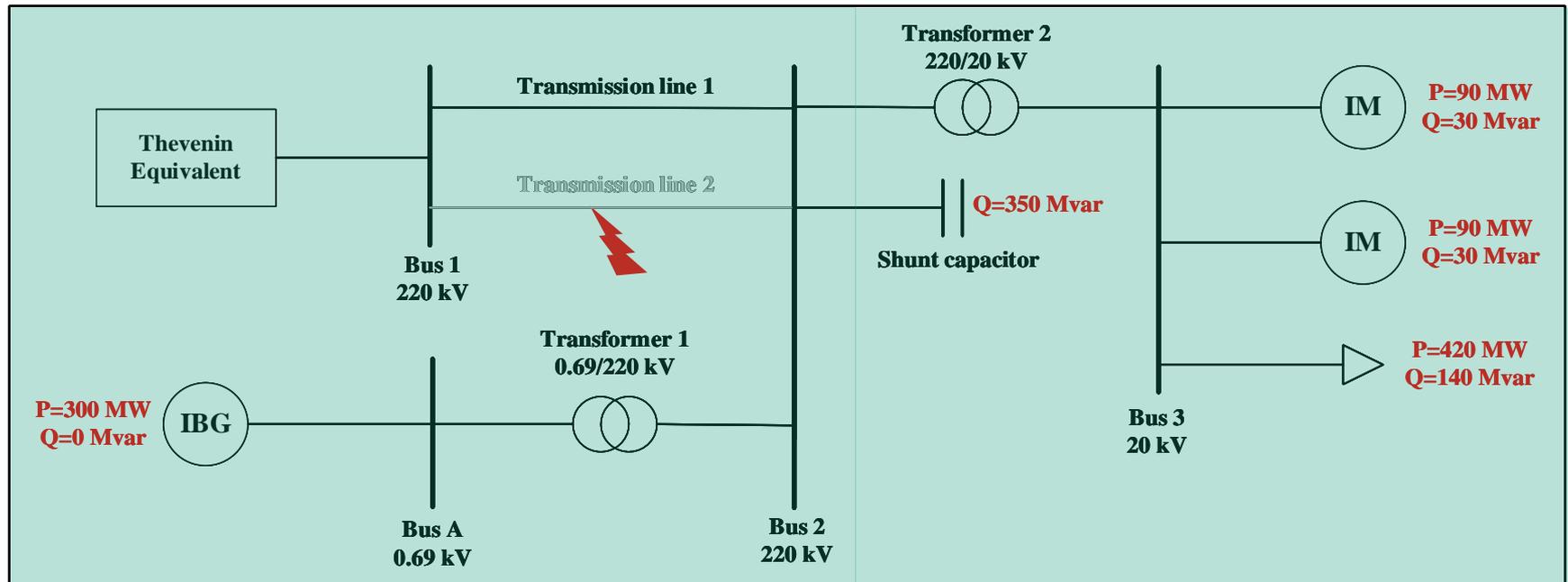
■ Übergeordnete Regelung (langsam)

■ Lokale Regelung (schnell)

Quelle: I. Erlich et al., "New Control of Wind Turbines Ensuring Stable and Secure Operation Following Islanding of Wind Farms," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 32, no. 3, pp. 1263-1271, Sept. 2017.

Einfluss auf Kurzzeitspannungsstabilität

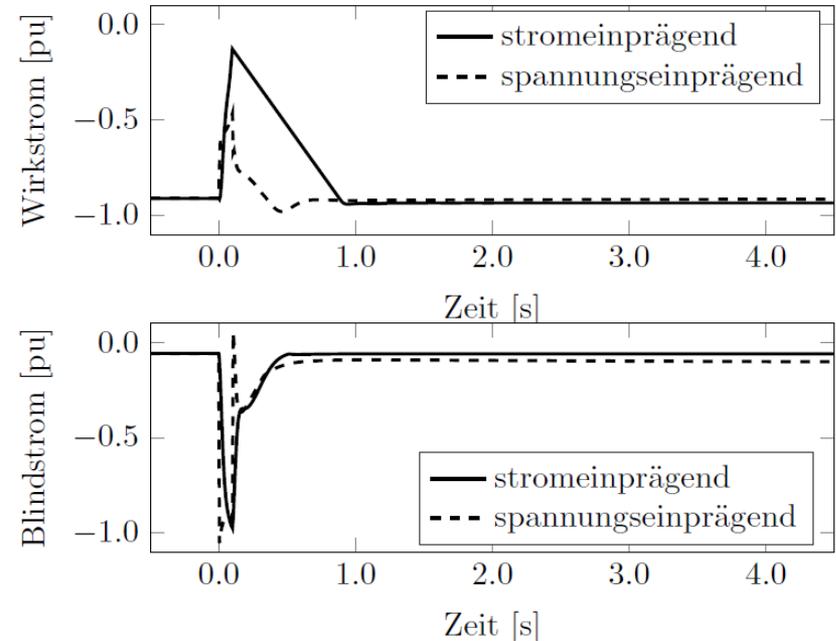
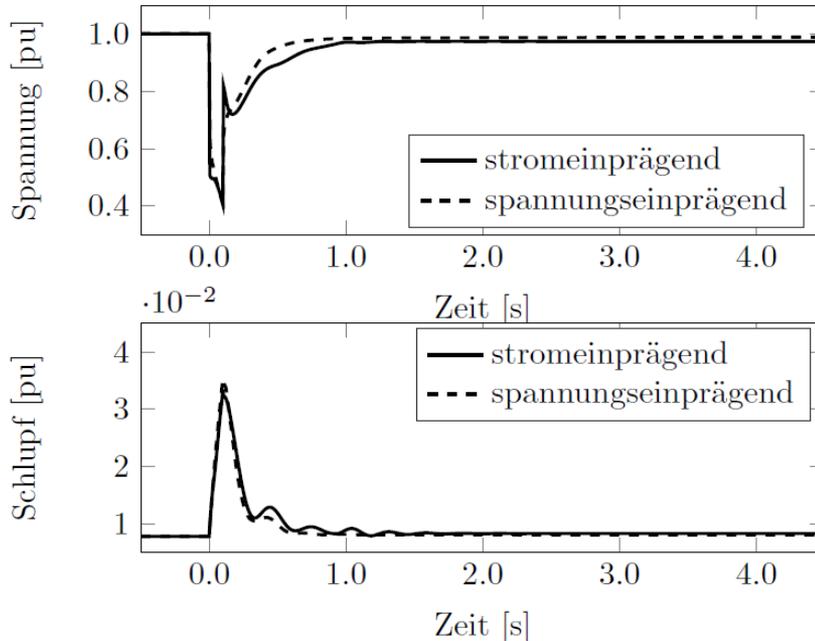
Testsystem



- Erzeugung (Windpark)
- Last (statisch und dynamisch)
- Externes Netz
- Arbeitspunkt: 50 % Durchdringung
- Kurzschluss
- Öffnen der Freileitung

Einfluss auf Kurzzeitspannungsstabilität

Ergebnisse



- Schnelle Spannungswiederkehr nach Fehlerklärung

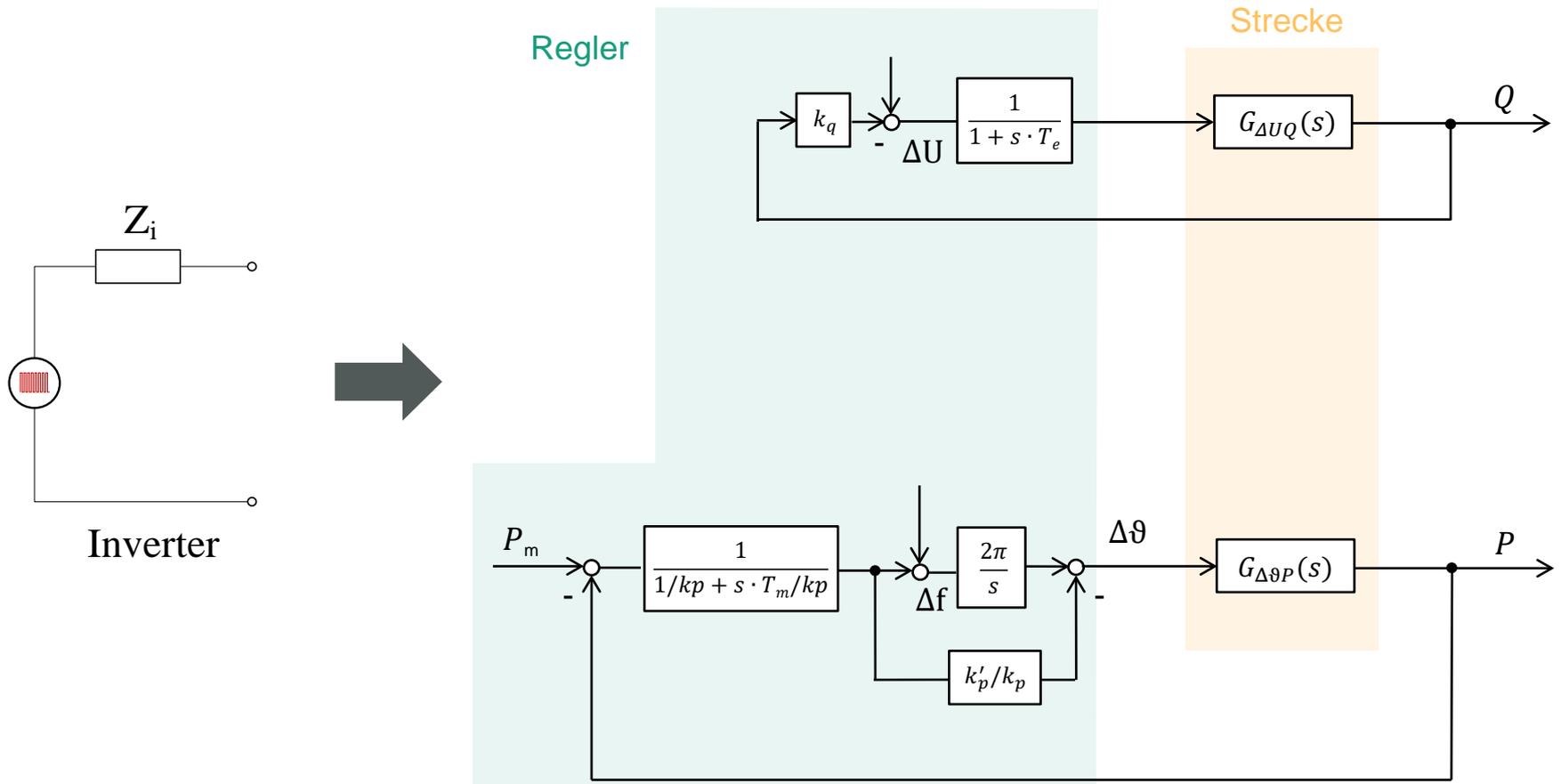
→ Kurzzeitspannungstabil

- Längere kritische Fehlerklärungszeit mit spannungseinprägender Regelung

Regelung	Zeit [ms]
Stromeinprägend	150
Spannungseinprägend	160

Netzbildende Stromrichter im Energiesystem

SelfSync



Anhang: Weitere netzbildende Regelverfahren

Synchronverter

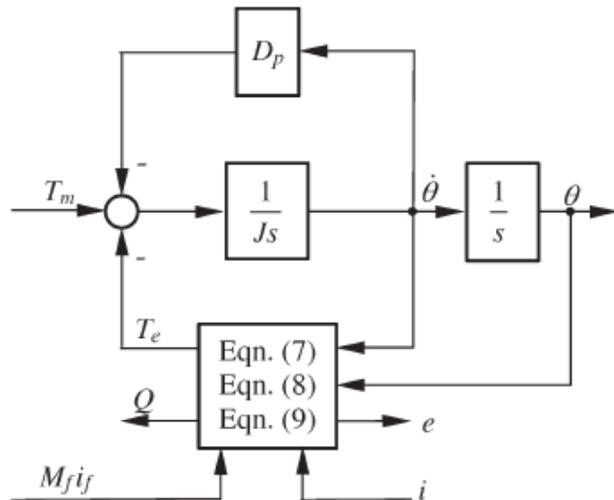


Bild entnommen aus [10]

- Eingeführt von Zhong/Weiss [10]
- Mimt das dynamische Verhalten der Synchronmaschine 2. Ordnung
- Stator/Rotor-Verknüpfung werden durch algebraische Gleichungen (7)-(9) wiedergegeben

$$T_e = -M_f i_f \left\langle i, \frac{\partial}{\partial \theta} \widetilde{\cos \theta} \right\rangle = M_f i_f \langle i, \widetilde{\sin \theta} \rangle. \quad (7)$$

$$e = \dot{\theta} M_f i_f \widetilde{\sin \theta}. \quad (8)$$

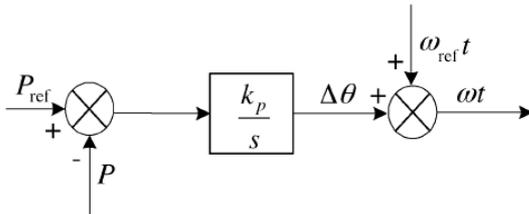
$$Q = -\dot{\theta} M_f i_f \langle i, \widetilde{\cos \theta} \rangle. \quad (9)$$

* $\langle \cdot, \cdot \rangle$ bezeichnet das dreidimensionale Skalarprodukt

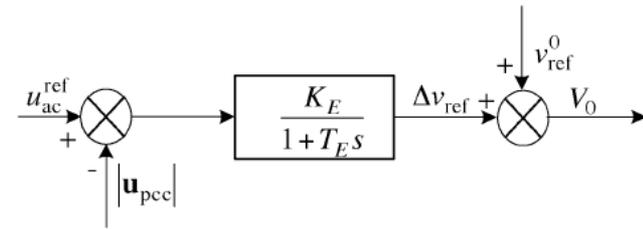
Anhang: Weitere netzbildende Regelverfahren

Power Synchronization Loop

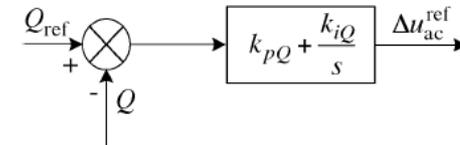
P/f-Regelschleife



Q/U-Regelschleife



- Vorgestellt von ABB [9]
- P/f-Regelschleife gleicht einer Statik
- Proportionaler Spannungsregler entspricht ebenfalls einem „drooping“ Verhalten...
- ... aber in gegensätzlicher Richtung

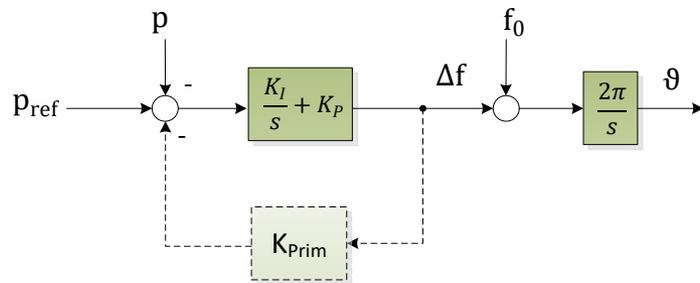


Bilder entnommen aus [9]

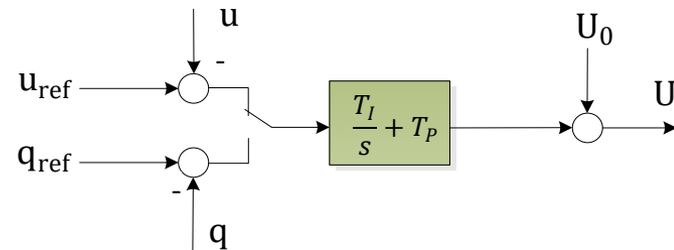
Anhang: Weitere netzbildende Regelverfahren

Voltage Controlled Inverter

P/f-Regelschleife



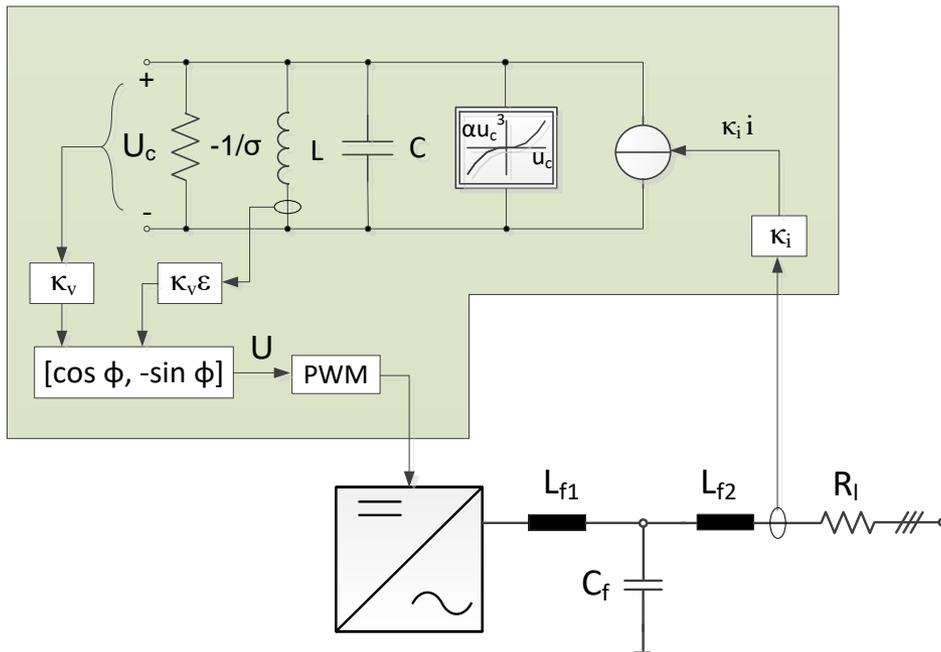
Q/U-Regelschleife



- Eingeführt von TU Braunschweig [8]
- Durch Umstrukturierung ist die P/f-Regelschleife äquivalent zu Selfsync
- Spannungsregler eliminiert Innenimpedanz anstatt ein „Drooping“ hervorzurufen.

Anhang: Weitere netzbildende Regelverfahren

Virtual Oscillator Circuit



- Vorgestellt von B. Johnson (früher NREL) [5]
- Sinusförmige Implementierung im Zeitbereich
- Nichtlinearer Van der Pol Oszillator
- Resonanzfrequenz des Schwingreises gleich nominaler Netzfrequenz

Anhang: Weitere netzbildende Regelverfahren

Direct Voltage Control

- Vorgeschlagen von der Universität Duisburg-Essen, (I. Erlich, A. Korai), Siehe [7]
 - Aus der bekannten Stromregelung wird der Integralanteil entfernt.
 - Der Proportionalanteil wird „verschoben“
 - Durch Hochpassfilter nur transiente Wirkung
- Netzbildende Eigenschaft muss überprüft werden! PLL ist nach wie vor erforderlich!

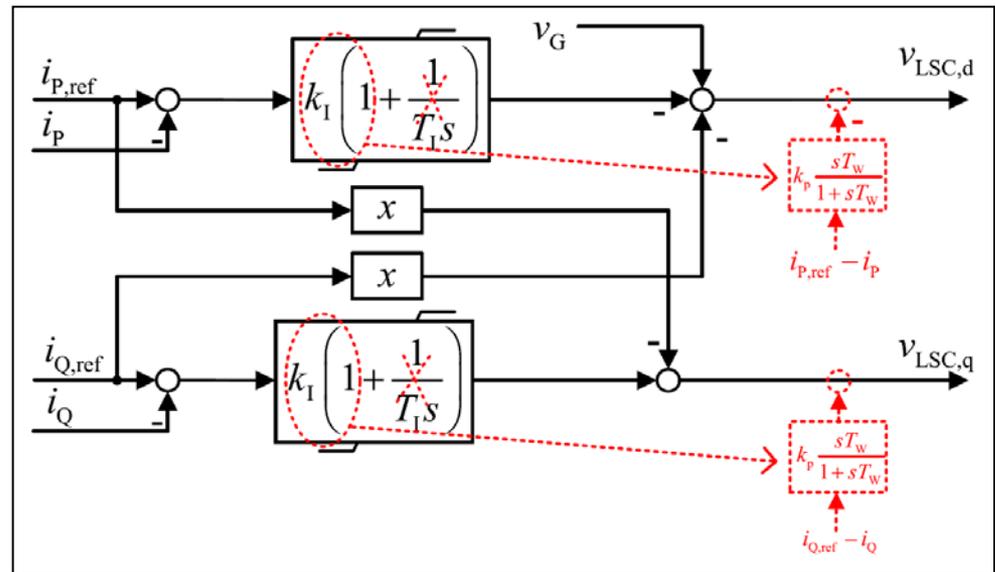
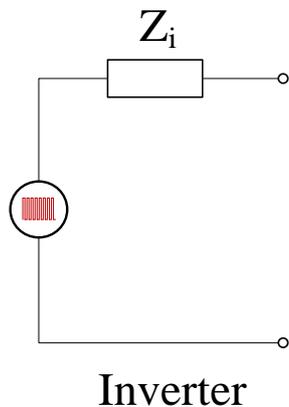


Bild entnommen aus [7]

Netzbildende Stromrichter im Energiesystem

Fazit



Netzbildende Stromrichter

- In grundlegender Funktionsweise gleichwertig zur Synchronmaschine
- Durch Phasenvorsteuerung besseres Dämpfungsverhalten
- Kurzschlussströme müssen begrenzt werden

Netzbildende Stromrichter im Energiesystem

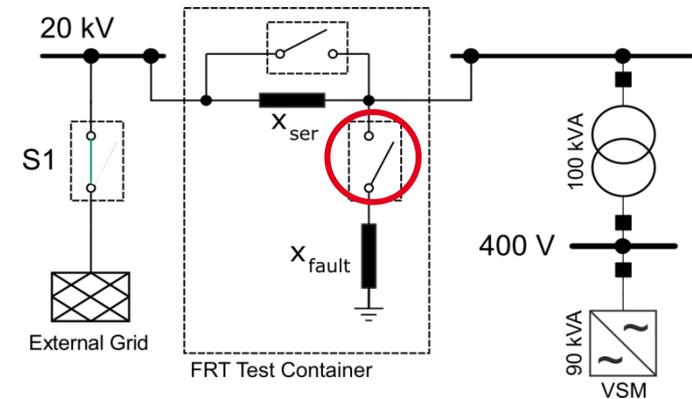
Strombegrenzung

- Experimentelle Validierung mit FRT-Container
 - Duckwitz, Knobloch et. al.: Experimental Short-Circuit Testing of Grid-Forming Inverters in Microgrid and Interconnected Mode, NEIS Conference, September 20, 2018, Hamburg
 - Netzbildende Regelung erfüllt bestehende Normung
 - Instantane und inhärente Reaktion
 - Wie sollten zukünftige FRT Normen für netzbildende Umrichter aussehen?
 - Die Spezifikation einer „Spannungsquelle mit Impedanz“ könnte eine alternative Normung darstellen

Netzbildende Stromrichter im Energiesystem

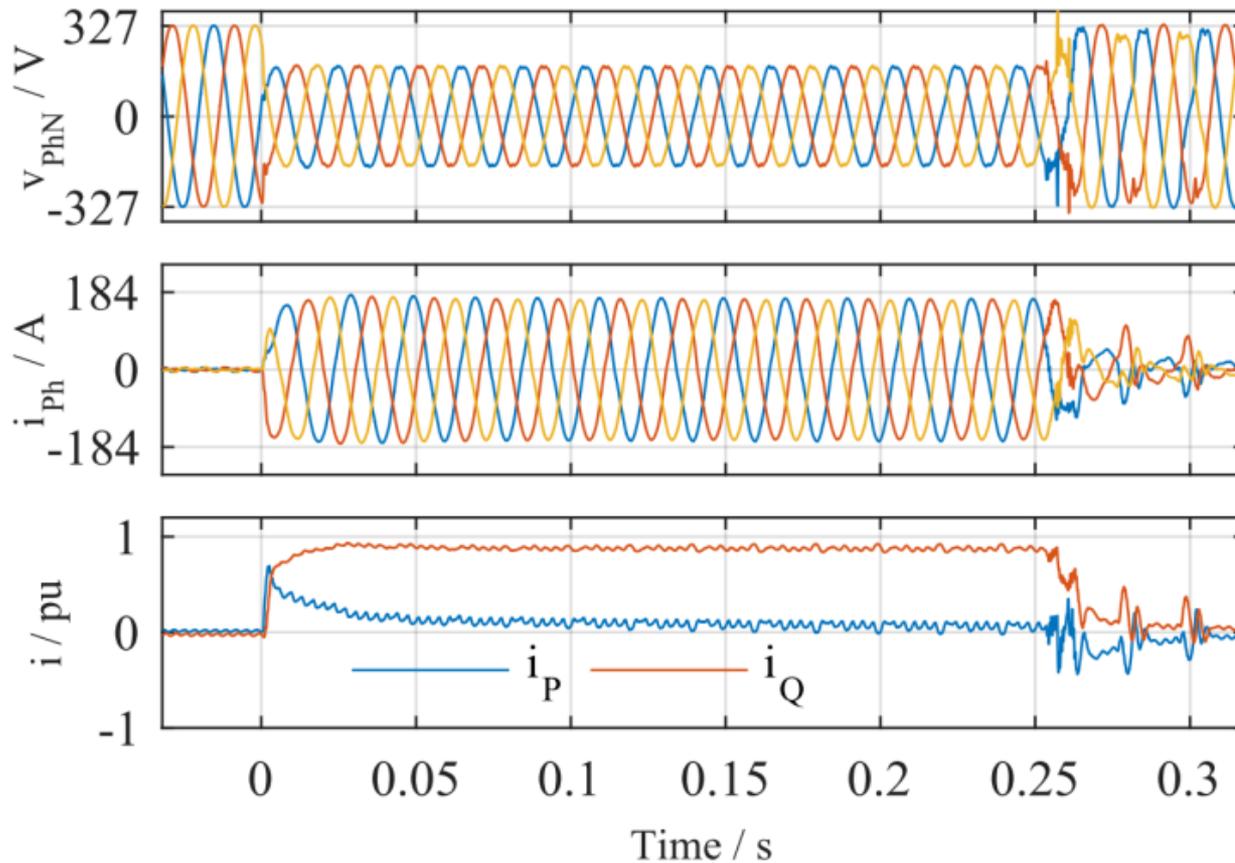
Strombegrenzung

- Standard FRT-Container Test: „Spannungsteiler“



Netzbildende Stromrichter im Energiesystem

Strombegrenzung



Virtuelle Impedanz

$$k = 2$$

$$\Delta i_B = k \cdot \Delta u$$

Projekt: Netzregelung 2.0



Kontakt:

Dr. Philipp Strauß

Netzregelung-2.0@iee.fraunhofer.de



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0350023A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren und spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Projektkonsortiums Netzregelung 2.0 wieder.

Netzbildende Stromrichter im Energiesystem

Quellen

- [1] Power System Control and Stability, P.M. Anderson and A.A. Fouad
- [2] Elektrische Energieversorgung I, V. Crastan
- [3] Vorrichtung zum gleichberechtigten Parallelbetrieb von ein- oder dreiphasigen Spannungsquellen, DE10140783A1, A. Engler
- [4] Distributed grid-forming inverters in power grids, P. Unruh and T. Gühna
- [5] B. Johnson, M. Rodriguez, M. Sinha, and S. Dhople, "Comparison of virtual oscillator and droop control," in 2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL): Stanford University, Stanford, California, USA, July 9-12, 2017, Stanford, CA, USA, 2017, pp. 1–6.
- [6] Duckwitz, Knobloch et. al.: Experimental Short-Circuit Testing of Grid-Forming Inverters in Microgrid and Interconnected Mode, NEIS Conference, September, 2018, Hamburg

Netzbildende Stromrichter im Energiesystem

Quellen

- [7] New Control of Wind Turbines Ensuring Stable and Secure Operation Following Islanding of Wind Farms, Istvan Erlich et al., *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 32, No. 3, September 2017
- [8] S. Laudahn, J. Seidel, B. Engel, T. Bulo, and D. Premm, “Substitution of synchronous generator based instantaneous frequency control utilizing inverter-coupled DER,” *7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 2016
- [9] L. Zhang, L. Harnefors, and H.-P. Nee, “Power-Synchronization Control of Grid-Connected Voltage-Source Converters,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 809–820, 2010.
- [10] Q. Zhong, G. Weiss, “Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators”, *IEEE Trans. On Industriell Electronics* , 2011