



Regelung und Stabilität im stromrichter-dominierten Verbundnetz

Regelungs- und gerätetechnische Lösungen für zukünftige netzbildende Stromrichtersysteme

**Andreas Knobloch, SMA Solar Technology AG
Abschlusskonferenz, Kassel, 07.07.2022**



Inhalt

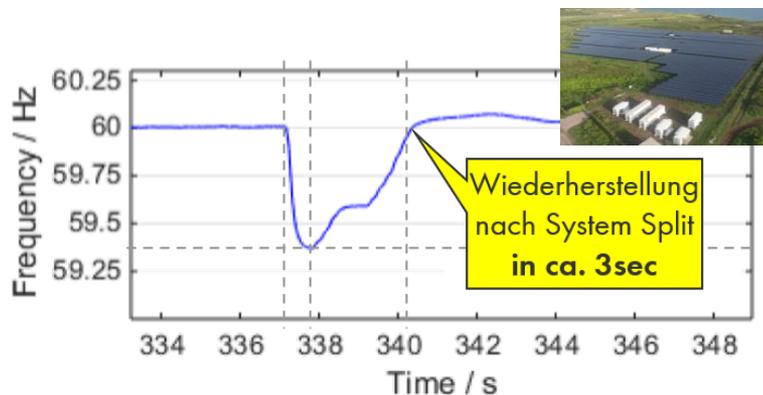
- **Potenziale von Stromrichtersystemen** zur Deckung der Bedarfe in zukünftigen stromrichterdominierten Verbundnetzen
- **Technologielösungen** für den stabilen und sicheren Netzbetrieb
- **Empfehlungen** für deren beschleunigten Einsatz im Verbundnetz





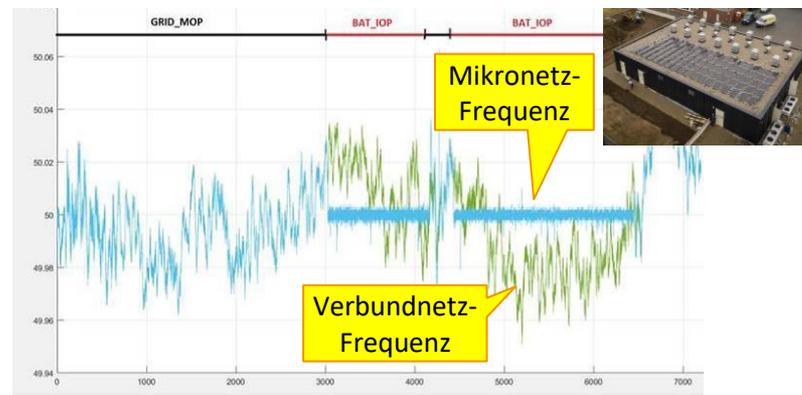
Pilotprojekte in Insel- & Mikronetzen mit Systemtechnik von SMA demonstrieren, dass eine stabile Stromversorgung auch ohne einen Mindestanteil an Synchrongeneratoren realisierbar ist

- Inselnetz-Beispiel: PV-Speichersystem St. Eustatius



- Um Größenordnungen dynamischere Netzregelung bei Großstörungen wie einer Netzauftrennung (System Split)

- Mikronetz-Beispiel: Batteriespeicher Bordesholm



- Herausragende Frequenz- und Spannungsqualität im Vergleich zu heutigen Verbundnetzen im Netznormalbetrieb

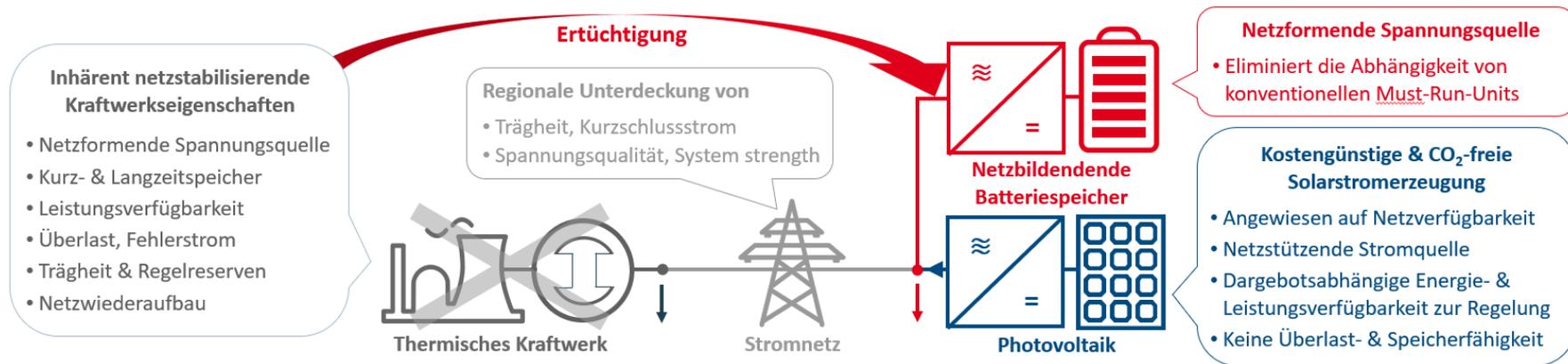
Schömann et al: „Experiences with large grid-forming Inverters on various Island and Microgrid projects“, 4th International Hybrid Power Systems Workshop, Crete, 2019

Knobloch et al.: „Grid stabilizing control systems for battery storage in inverter-dominated island and public electricity grids“, 13. ETG/GMA-Fachtagung „Netzregelung und Systemführung“, Berlin, 2019

Knobloch et al.: „PV-Speichersysteme für den stabilen und sicheren Betrieb regenerativ dominierter Energienetze“, 35. PV-Symposium Bad Staffelstein, März 2020



Netzbildende Stromrichtersysteme haben auch in großen öffentlichen Verbundnetzen das Potenzial, die Fähigkeiten heutiger Synchrongeneratoren zu ergänzen und sogar komplett zu ersetzen



- In stromrichterdominierten Netzen können netzbildende Systemdienstleistungen sowohl wie bisher von Erzeugern, aber auch von Speichern, Lasten und dedizierten Netzbetriebsmitteln erbracht werden.
- Für den stabilen und sicheren Netzbetrieb müssen nicht alle Netzteilnehmer netzbildende Eigenschaften aufweisen.
- Je nach Applikation und Technologie kann die Ausprägung netzbildender Eigenschaften unterschiedlich sein.



Das weiterentwickelte Stromrichtersystem für große Batteriespeicher ermöglicht die Bereitstellung netzbildender Systemdienstleistungen für den stabilen Betrieb stromrichterdominierter Verbundnetze

Spannungseinprägende / netzbildende Fähigkeiten:

- **Echte Spannungsquelle** (hinter einer Impedanz) für netzfolgende Verbraucher, Erzeuger und Speicher
- **Kommunikationslose Synchronisierung** mit anderen Spannungsquellen
- **Instantan stabilisierende Reaktion** auf Netzereignisse
- **Trägheit** zur Reduzierung der Spannungsvektorverschiebung
- **Verzögerungsfreie und konfigurierbare Momentan-, Frequenz-, Spannungshaltungs- und Fehlerstromreserven**
- **Dämpfung** subsynchroner Schwingungen
- **Verbesserung der Spannungsqualität** durch Wirkung als Senke für Harmonische und Asymmetrien
- **Netzwiederaufbau** (Schwarzstart)
- **Teilnetzbetriebsfähigkeit**

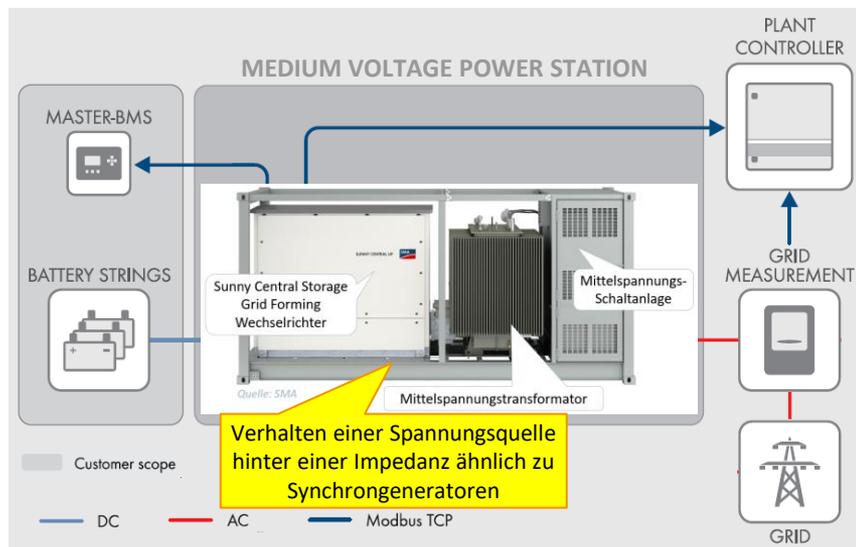
Anwendungsgebiete:

- Geeignet für den **Einsatz in öffentlichen Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetzen** (über zus. Maschinentransformator)
- **Ergänzung neuer oder bestehender Photovoltaikanlagen** (sowie anderer netzfolgender Anlagen) zur Bereitstellung netzbildender Systemdienstleistungen
- **Erhöhung der Einspeisekapazität und der „System Strength“** in Netzgebieten mit geringer Kurzschlussleistung
- **Netzbildende Netzbetriebsmittel** wie Netzbooster oder Statcoms mit dynamischer Blindleistungs- & Momentanreserve-Bereitstellung
- **Unterbrechungsfreie Stromversorgung** (USV)
- Realisierung von Energiesystemen mit **100% regenerativer Versorgung**

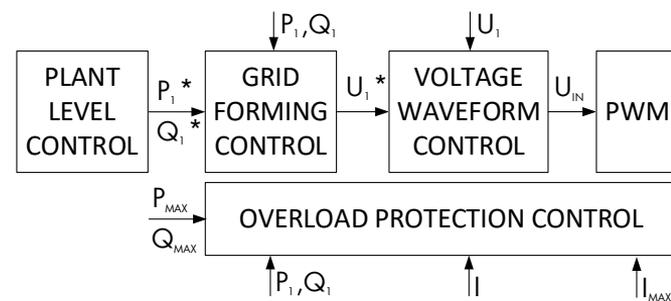


Technisches Realisierungskonzept des netzbildenden, skalierbaren Stromrichtersystems für Anlagen im Megawatt-Maßstab

Aufeinander abgestimmte Komponenten



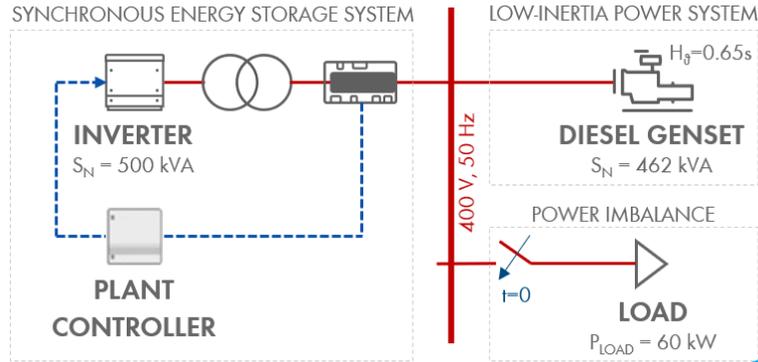
Verbesserte netzbildende Regelung



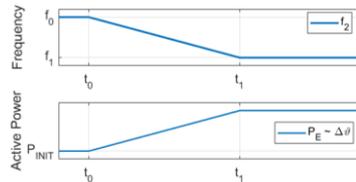
- **Spannungsregelung** und Verbesserung der **Spannungsform**
- **Synchroner Betrieb** mit einstellbarer Leistungsreaktion
- Performanter **Überlastschutz** zum unterbrechungsfreien, netzstützenden Durchfahren von Extremereignissen
- Genaue **Regelung am Anschlusspunkt der Anlage**



Experimenteller Nachweis der Fähigkeiten des Stromrichtersystems zur Frequenzstabilisierung am skalierten (Labor-)Verbundnetz

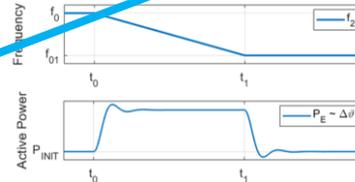


Instantane Frequenzhaltung:

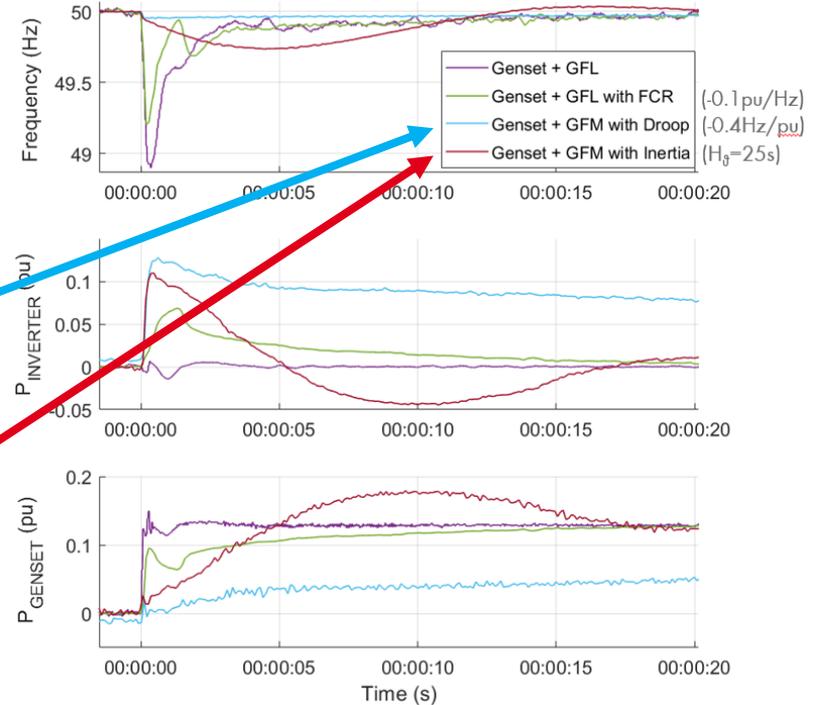


Reduziert RoCoF indirekt, durch instantane Entlastung anderer Spannungsquellen.

Instantane Momentanreserve:



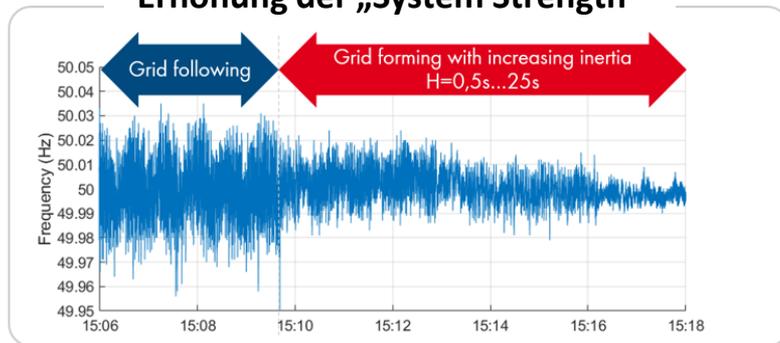
Reduziert RoCoF direkt, durch Trägheit der eigenen Winkeländerung.



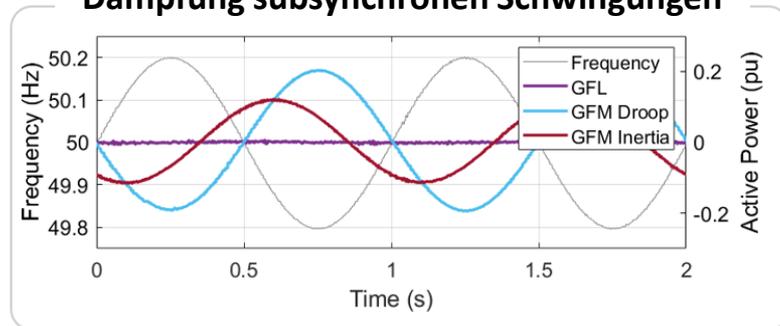


Experimenteller Nachweis der Fähigkeiten des Stromrichtersystems zur Bereitstellung weiterer netzbildenden Systemdienstleistungen

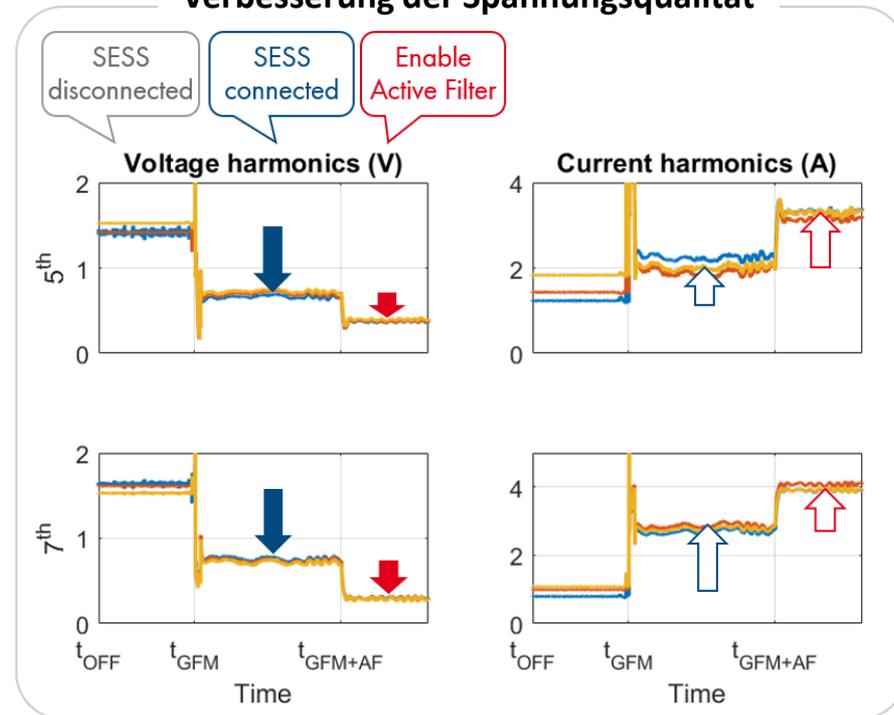
Erhöhung der „System Strength“



Dämpfung subsynchronen Schwingungen



Verbesserung der Spannungsqualität





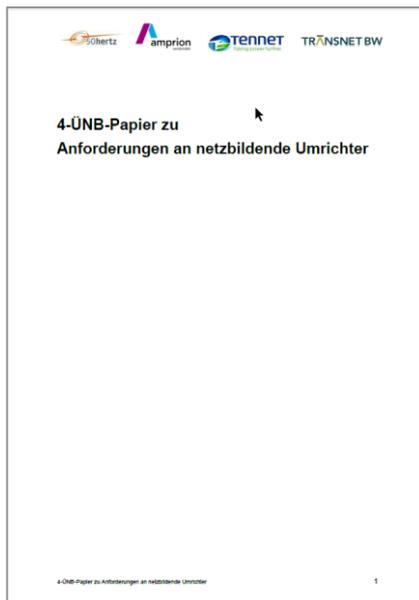
Allgemeine Empfehlungen für den beschleunigten Einsatz netzbildender Systemlösungen in öffentlichen Stromnetzen



- **Spezifizierung der technischen Fähigkeiten** von netzgekoppelten Stromrichtersystemen
- **Anpassung der Normenvorschriften** für den Anschluss netzbildender Stromrichtersysteme an öffentliche Verbundnetze
- **Bereitstellung realistischer Worst-Case-Szenarien** zur geeigneten Auslegung der Stellreserven für gewünschte netzbildende Regelungseingriffe
- **Schaffung eines geeigneten regulatorischen Rahmens mit ökonomischen Anreizen** für Anlagenbetreiber



Empfehlungen für die Spezifikation der netzbildenden Eigenschaften aus Herstellersicht



Quelle: Netztransparenz.de

Nur die gleichzeitige Integration aller zwingend notwendigen Eigenschaften zeichnet diese neue Klasse von netzbildenden Umrichtern aus. Bei Nicht-Implementierung nur einer oder gar mehrerer zwingend notwendiger Eigenschaften erfüllt die Anlage die Anforderungen an netzbildende Umrichter nicht.

2.1 Zwingend notwendige Eigenschaften netzbildender Umrichter

1. Spannungsbildung analog zur Polradspannung von Synchrongeneratoren (*Creating System Voltage*):

Jeder netzbildende Umrichter verhält sich wie eine Spannungsquelle hinter einer Impedanz.

2. Instantaner Kurzschlussstrombeitrag (*Contribution to Fault Level*):

➔ Wirkleistungspriorisierung im FRT nicht empfehlenswert.

3. Bereitstellung von elektrischer Trägheit (*Contribution to Inertia*) innerhalb der Auslegungsgrenzen:

Bei einer Last- bzw. Einspeiseänderung im System (sprungförmige Winkeländerung der Spannung) führt der unter Pkt. 1 beschriebene Ausgleichstrom mit seiner Wirkkomponente zu einem Beitrag zur Momentanreserve (im Kurzzeitbereich). Kommt es über den Kurzzeitbereich hinausgehend zu einer kontinuierlichen Winkeländerung, führt der unter Pkt. 1 beschriebene Ausgleichstrom zu einer Wirkkomponente proportional zum Frequenzgradienten (gemäß einer einstellbaren, virtuellen Trägheit des Umrichters). Eine schnelle Strom- und Energiebegren-

➔ Schließt Anlagen mit rein instantaner Frequenzhaltungsreaktion aus.

4. Verhinderung unerwünschter Reglerinteraktionen (*Preventing adverse Control Interaction*):

5. Teilnetzbetriebsfähigkeit

➔ Hoher Aufwand für z.B. netzbildende Statcoms oder erneuerbare Stromquellen.

- Lösungsoptionen, die nur eine Untermenge der Anforderungen erfüllen, jedoch sonst einen wirkungsvollen, spannungseinprägenden Beitrag leisten könnten nicht vom Netzbetrieb ausschließen.
- Besser einzelne netzbildende Eigenschaften/Netzdienstleistungen spezifizieren, anstatt von Gesamtanforderungen.



Liste der Fachveröffentlichungen von SMA mit Bezug zu Netzregelung 2.0

- „Experiences with large grid-forming Inverters on various Island and Microgrid projects“, O. Schömann, T. Bülo, C. Hardt, R. Hesse, A. Falk, P.-R. Stankat, H. Sadri, W. Krüger, 4th International Hybrid Power Systems Workshop, Crete, Greece, May 2019
- „Grid stabilizing control systems for battery storage in inverter-dominated island and public electricity grids“, A. Knobloch, C. Hardt, A. Falk, T. Bülo, 13th ETG/GMA-Symposium, Energy Transition in Power Supply - System Stability and System Security, September 2019
- „Next Generation Utility Scale PV- and Storage Systems: New Steps towards a 100% Renewable Generation“, T. Bülo, A. Knobloch, C. Hardt, A. Falk, O. Schömann, L. Grebe, 9th Solar & Storage Integration Workshop, Dublin, October 2019
- „PV-Speichersysteme für den stabilen und sicheren Betrieb regenerativ dominierter Energienetze“, A. Knobloch, T. Bülo, C. Hardt, A. Falk, G. Bettenwort, 35. PV-Symposium Bad Staffelstein, März 2020
- “Synchronous Energy Storage System with Inertia Capabilities for Angle, Voltage and Frequency Stabilization in Power Grids” A. Knobloch, C. Hardt, A. Falk, T. Bülo, S. Scheurich, C. Khalfet, R. Hesse, T. Becker, R. Bhattia, 11th Solar & Storage Power System Integration Workshop, September 2021
- „PV as an ancillary service provider 2021“, M. Kraiczy, A. Knobloch, D. Premm et al., IEA PVPS Task 14 Solar PV in the 100% RES Power System, October 2021



Erfolgreiches Erreichen der Ziele im Teilvorhaben von SMA

Ziele:

- **Erfassung zukünftiger nationaler und internationaler Anforderungen** des Stromnetzes an PV- und Batteriewechselrichter inkl. Systemlösungen
- **Realisierung von Technologielösungen** und ihre **experimentelle Evaluation** zur Erfüllung der neuen Anforderungen
- **Gewinnung eines vertieften Verständnisses** der regelungstechnischen Zusammenhänge und Wechselwirkungen in stromrichterdominierten Netzen
- **Mitwirkung bei Erarbeitung von Empfehlungen** für die Gestaltung und internationale Harmonisierung zukünftiger regelungstechnischer Regularien & Anschlussregeln für Stromrichter sowie Systemlösungen

Eckdaten des Teilprojekts von SMA:

- SMA-Volumen: 400 T€
- Laufzeit: 12/2017-08/2022
- Teilprojektleitung: Dipl.-Ing. Andreas Knobloch
Andreas.Knobloch@SMA.de

Ergebnisse:

- **Regelungstechnische Grundlagenerkenntnisse** und **verbesserte neue Technologielösungen** für die netzstabilisierende und netzbildende Regelung von Wechselrichtern:
 - **Know-How-Gewinn & Erkenntnisse** zu einer Vielfalt unterschiedlichster neuartiger Regelungsansätze für zukünftige Stromrichtersysteme
 - In Labortest und realen Einsatzgegebenheiten **erfolgreich evaluierte regelungs- und gerätetechnische Lösungen** für zukünftige netzdienliche & netzbildende Stromrichtersysteme
 - **Verbesserte Einschätzung der zukünftigen Anforderungen** an Stromrichtersysteme und vertiefte Einblicke in die Verbundnetzregelung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Teilvorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter den Förderkennzeichen 0350023D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren und spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Projektkonsortiums Netzregelung 2.0 wider.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages