

VERGLEICH VON REGELKONZEPTEN VON UMRICHTERN FÜR EINE 100 % ERNEUERBARE ENERGIEERZEUGUNG

Philipp Hackl¹(*), Ziqian Zhang¹, Robert Schürhuber¹

¹ Technische Universität Graz – Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Inffeldgasse 18/1, +43 316 873 – 7567, philipp.hackl@tugraz.at, www.iean.tugraz.at

Kurzfassung: Durch die Integration von erneuerbaren Energiequellen steigt die Anzahl der umrichterbasierten Stromerzeugungsanlagen in den letzten Jahren stark an und führt zur Verdrängung der klassisch genutzten Synchrongeneratoren. Dies führt zu einem grundlegenden geänderten Netzverhalten, wobei unterschiedliche Regelkonzepte der leistungselektronischen Anlagen einen maßgeblichen Einfluss auf die zukünftige Versorgungssicherheit besitzen. Dieser Artikel beschreibt die unterschiedlichen Regelkonzepte und fasst deren sinnvollen Anwendungsbereiche zusammen.

Keywords: Umrichter, Regelkonzepte, Grid Forming, Grid Following, Phase-locked loop

1 Einleitung

Für eine 100 % erneuerbare Energieerzeugung bedarf es eine weitreichende Integration von umrichterbasierten Stromerzeugungsanlagen wie Photovoltaik, Windkraftanlagen sowie Batteriespeichern. Zusammen mit der Umrüstung von großen Wasserkraftwerken, dem Ausbau von HVDC-Links sowie zukünftig möglichen eingebetteten MVDC-Netzen als Unterstützung des bestehenden AC-Netzes erfährt das Stromnetz einen Paradigmenwechsel. Die in den letzten Jahrzehnten maßgeblich an der Stromerzeugung beteiligten Synchrongeneratoren werden durch leistungselektronische Anlagen vom Stromnetz verdrängt. Aufgrund der niedrigeren Überlastungsfähigkeit und der fehlenden Schwungmasse (Inertia) der leistungselektronischen Betriebsmittel reduziert sich die Frequenzstabilität des Netzes mit den nach heutigem Stand eingesetzten Umrichtern.

Das Betriebsverhalten von leistungselektronischen Anlagen hängt im Gegensatz zu den inhärenten Eigenschaften der klassisch genutzten Synchrongeneratoren von den implementierten Regel- und Schutzalgorithmen [1] ab. Für den Erhalt der hohen Versorgungssicherheit und Spannungsqualität sind diese Regelkonzepte in den letzten Jahren in den Fokus der Forschung [2] [3] gerückt. Das derzeit vorherrschende „grid following“-Regelkonzept benötigt den Phasenwinkel der Spannung am Netzanschlusspunkt für eine Synchronisierung ans Stromnetz, wobei ein Phasenwinkelregelkreis (PLL – phase-locked loop) verwendet wird. In der Vergangenheit zeichnete sich dieses einfache Funktionsprinzip durch ihre robuste Nutzung in starken Netzen aus. In leistungselektronisch dominierten Netzen können diese Anlagen jedoch aufgrund der beschränkten Netzstützung zu Stabilitätsproblemen führen.

In der jüngsten Vergangenheit sind in der Literatur [4] [5] Erfolg versprechende modifizierte Regelstrategien aufgekommen, welche dem „grid forming“-Regelkonzept zugeordnet werden können. Diese benötigen im Normalbetrieb keinen Referenzwinkel der Netzspannung und können somit auch in Inselnetzen betrieben werden. Von der Grundidee zur Nutzung in Inselnetzen als konstante Spannungsquelle wurden diese weiterentwickelt, um in schwachen öffentlichen Stromnetzen zur Netzstützung beizutragen. Ein weiterer Vorteil dieses Regelkonzeptes ist die Unabhängigkeit einer Netzspannung. Hierbei könnten im Störfall bzw. beim Netzwiederaufbau, unter Einhaltung des Gleichgewichtes von Erzeugung und Last, Inselnetze betrieben und bei Bedarf wieder zugeschaltet werden. Im Allgemeinen ist es jedoch erforderlich im Normalbetrieb und im Störfall die statischen und dynamischen Netzanschlussbedingungen einzuhalten. Die Regelkonzepte von Umrichtern können grob nach der Ermittlungsmethode des Referenzphasenwinkels klassifiziert werden. Der Referenzphasenwinkel kann extern vorgegeben bzw. anhand eines Phasenregelkreises oder über einen Wirkleistungs-Frequenzregler ermittelt werden.

1.1 Phasenregelkreis (PLL – phase-locked loop)

Ein Phasenregelkreis PLL (phase-locked loop) dient zur Ermittlung des Phasenwinkels der Netzspannung. Dieser wird benötigt um eine kontrollierte Einspeisung von Wirk- und Blindleistung zu gewährleisten. Die PLL transformiert den Netzspannungszeiger hierzu in das rotierende dq-Koordinatensystem. Über einen PI-Regler wird die q-Komponente auf 0 geregelt, wobei der Umrichterspannungszeiger somit in der d-Achse liegt und synchron mit dem Netzspannungszeiger rotiert. Für ein schnelleres Erreichen des Regelzieles kann eine Referenzwinkelgeschwindigkeit ω_{ff} zusätzlich eingekoppelt werden. Der Phasenwinkel wird durch eine Integration berechnet und im Bereich $0-360^\circ$ begrenzt und dient anschließend als Referenz für die dq-Transformationen und den unterlagerten Regelungen.

Die Abbildung 1 zeigt ein vereinfachtes Blockschaftbild (oben) und die prinzipielle Funktionsweise (unten). Für einen ordnungsgemäßen Betrieb in symmetrischen und unsymmetrischen Fehlerfällen gibt es eine Vielzahl an Modifikationen, welche auch in der Lage sind das Mit- und Gegensystem getrennt voneinander zu erkennen.

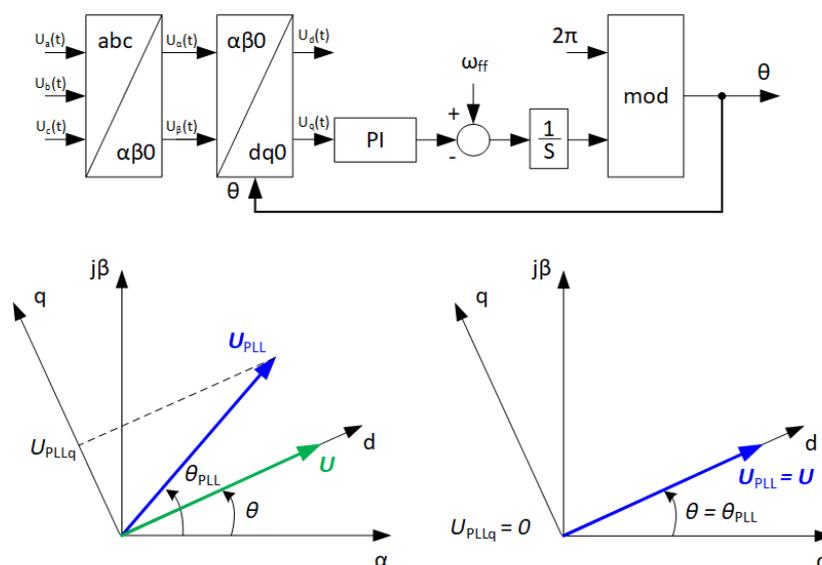


Abbildung 1: Blockschaftbild (oben) und prinzipielle Funktionsweise (unten) eines Phasenregelkreises (PLL)

1.2 Virtuelle Schwungmasse (Wirkleistungs-Frequenzregler)

Bei herkömmlich genutzten Synchrongeneratoren handelt es sich um rotierende Systeme in denen durch die Trägheit der vorhandene Schwungmasse mechanische Energie gespeichert ist. Bei einer auftretenden Frequenzänderung wirkt diese der Änderung entgegen und stabilisiert durch dieses inhärente Verhalten die Frequenz in den ersten Augenblicken. Bei umrichterbasierten Anlagen ist das mechanische System entkoppelt vom elektrischen und besitzt diese natürliche Eigenschaft nicht. Durch die Reduktion der Synchronmaschinen verringert sich die natürliche Schwungmasse und somit die Frequenzstabilisierung im Netz. Angepasste Regelkonzepte können durch die Bereitstellung sogenannter virtueller Schwungmasse die Frequenzstabilität durch die Nutzung von zusätzlichen Energiespeichern im DC-Zwischenkreis verstärken.

2 Vergleich von Regelkonzepten

In diesem Artikel werden in den nachfolgenden Absätzen die grundlegenden Funktionsweisen der unterschiedlichen Regelkonzepte und deren Anwendungsfälle zusammengefasst. Die Abbildung 2 listet die Regelkonzepte in einer vereinfachten Darstellung auf. Es kann erkannt werden, dass es sich bei den „grid following“-Regelkonzepten aufgrund der Regelung des Stromes in Amplitude und Phasenwinkel um geregelte Stromquellen handelt. Hierbei wird in Abhängigkeit der Spannung am Netzanschlusspunkt und der vorgegebenen Wirk- und Blindleistungen der Strom vorgegeben. Die Regelkonzepte basierend auf dem „grid forming“ Prinzip zeichnen sich durch eine Spannungsvorgabe am Netzanschlusspunkt aus (geregelte Spannungsquellen). Durch überlagerte Regelungen können netzdienliche Funktionen hinzugefügt werden.

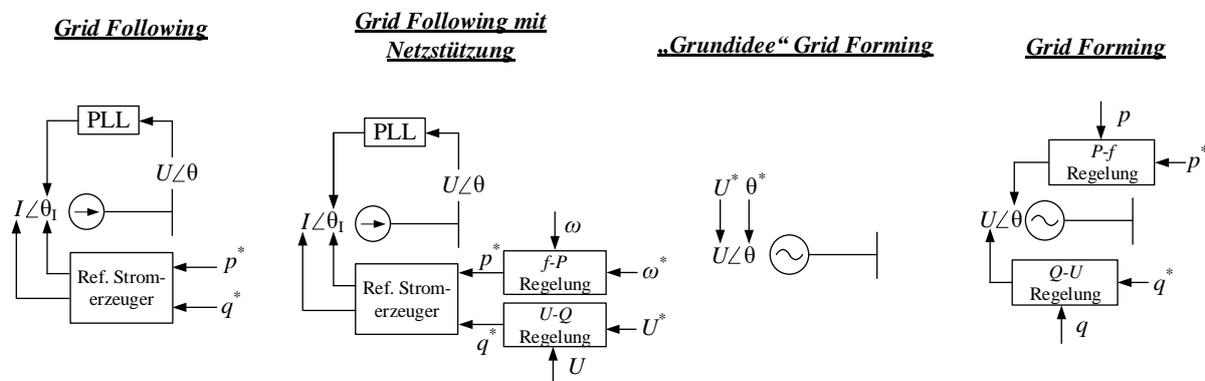


Abbildung 2: Überblick der Regelkonzepte für umrichterbasierte Anlagen

Aufgrund der Vielzahl an Implementierungsmöglichkeiten werden die Regelkonzepte in den folgenden Kapiteln exemplarisch mit vereinfachten Regelungsblöcken und im dq-Koordinatensystem gezeigt. Weiters sind auch Blöcke zur Limitierung der Regelungsgrößen ohne eine exakte Beschreibung der Funktionsweise dargestellt.

2.1 Grid Following (GFL)

Bei diesem Regelkonzept wird mit einer PLL der Phasenwinkel der Netzspannung bestimmt und in Abhängigkeit der DC-Spannungsseite eine vorgegebene Wirk- und Blindleistung eingespeist. Die Einhaltung der maximalen Überlastfähigkeit wird durch eine Begrenzung des Referenzstromes erreicht. Die nachfolgende Stromregelung erzeugt das Spannungsreferenzsignal, welches anschließend für die Ansteuerung der leistungselektronischen Schalter dient. Abbildung 3 zeigt das hierbei verwendete Blockschaftbild. In der Literatur wird dieses Einspeiseverhalten gerne als geregelte Stromquelle interpretiert.

Das Regelkonzept zeichnet sich durch einen stabilen Betrieb bei starken Netzen und einer guten FRT-Fähigkeit (fault ride through) durch dynamische Netzstützung (Blindleistungseinspeisung im Fehlerfall) mithilfe der PLL aus. Der Nachteil dieses Konzeptes ist die Verringerung der Stabilität bei schwächeren Netzen [6] und die fehlende Netzstützung bei kleinen Abweichungen vom stationären Fall. Dieses einfach gehaltene Konzept bietet keine virtuelle Schwungmasse und durch die Abhängigkeit des Referenzwinkels der Spannung am Netzanschlusspunkt ist kein autonomer Inselbetrieb möglich.

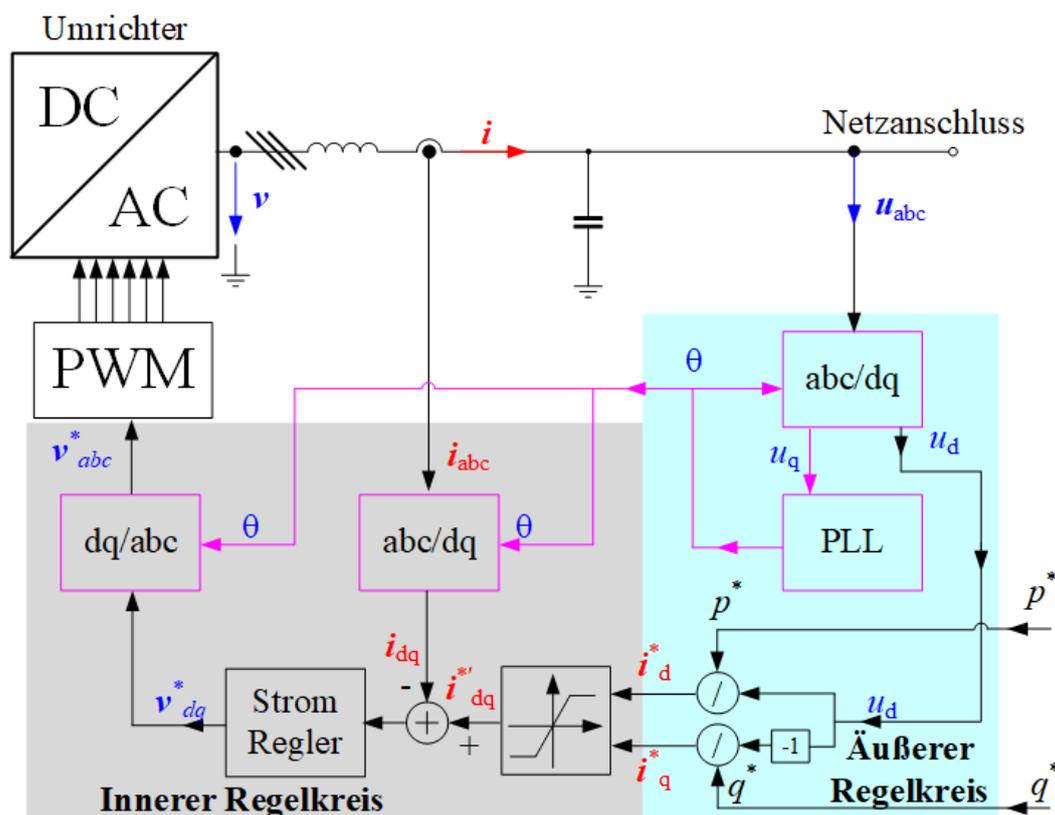


Abbildung 3: Blockschaftbild des "grid following"-Regelkonzeptes

2.2 „Grundidee“ Grid Forming

Bei diesem Regelkonzept wird der Spannungszeiger am Netzanschlusspunkt durch die Referenzwerte der Spannungsamplitude und Phasenwinkel direkt vorgegeben. (Abbildung 4) Hierbei wird durch eine Spannungsregelung die vorhandene Netzspannung verglichen und angepasst. Dieses Vorgeben der Netzspannung kann als geregelte Spannungsquelle interpretiert werden und dient als Spannungsreferenz im Inselbetrieb sowie für weitere Regelkonzepte. Aufgrund von möglichen Ausgleichsströmen sind diese jedoch nicht in Mehrzahl bzw. im öffentlichen Netz verwendbar. Weiters tragen diese Umrichter keinen Beitrag zur Stabilisierung des öffentlichen Netzes bei.

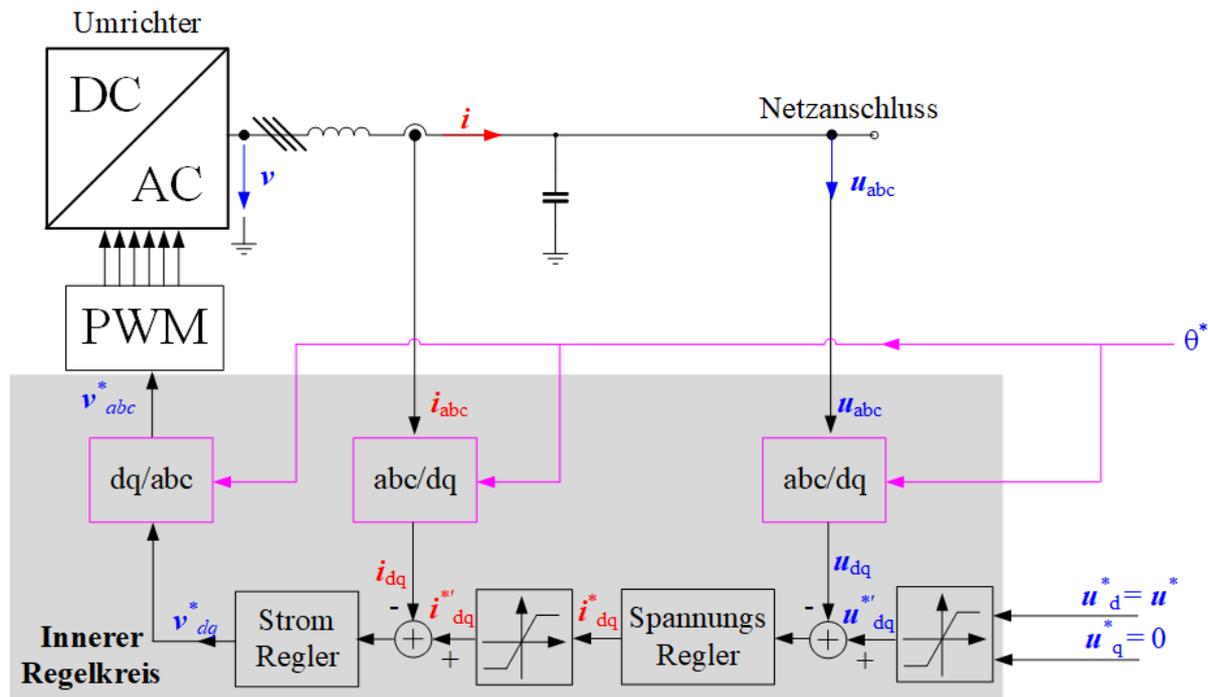


Abbildung 4: Blockschaltbild der Grundidee des "grid forming"-Regelkonzeptes

2.3 Grid Following mit Netzstützung

Aufbauend auf dem bereits beschriebenen „grid following“-Regelkonzept wird hier durch überlagerte Regelkreise eine Frequenz- und Spannungsstützung hinzugefügt. Abbildung 5 zeigt die exemplarische kaskadierte Regelung mit Spannungsvorgabe. Hierbei kann durch den Frequenz-Wirkleistungs-Zusammenhang eine Reduzierung bzw. Erhöhung der einspeisenden Wirkleistung zur Frequenzstabilisierung vorgegeben werden. Weiters beeinflusst die Blindleistungsabgabe bzw. -aufnahme die Spannung am Netzanschlusspunkt. Aufgrund bleibender Abhängigkeit vom Referenzwinkel der Netzspannung ist jedoch weiter kein autonomer Inselbetrieb möglich.

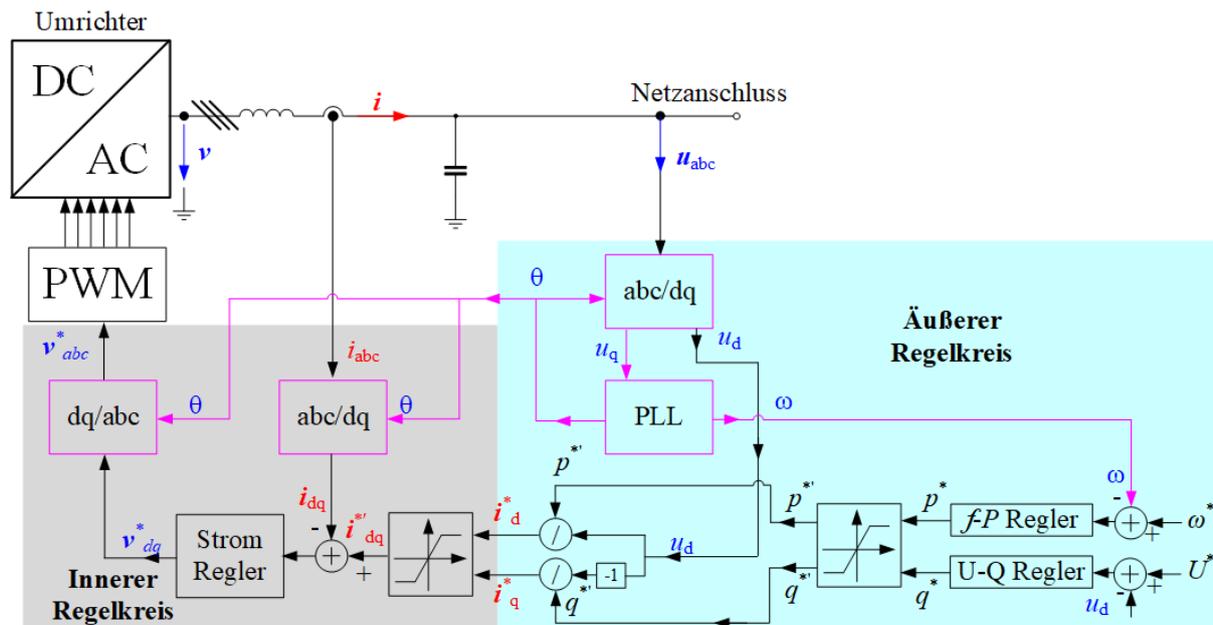


Abbildung 5: Blockschaltbild des "grid following mit Netzstützung"-Regelkonzeptes

2.4 Grid Forming (GFM)

Die Funktionsweise dieses spannungsgeregeltem Regelkonzept hängt grundsätzlich nicht direkt vom Netzspannungswinkel ab, sondern von einer überlagerten Regelung aus Momentan- und Referenzleistungen. Anhand dieser Regelstruktur kann das Verhalten von Synchronmaschinen in verschiedenen Detaillierungsgraden nachgebildet werden. Desweiteren können durch die schnelle Regelbarkeit mit den Freiheitsgraden der Umrichteranlagen eine Vielzahl an weiteren Regelungen [7] implementiert werden, welche zusätzliche Funktionen zur Netzstabilisierung besitzen. Dies führt zu einer gut geeigneten Nutzung in schwachen Netzen. Die Nachteile sind ein benötigter Energiespeicher auf der DC-Spannungsseite und das Blockieren der überlagerten Regelung bei einer Strombegrenzung. Die Abbildung 6 zeigt exemplarisch ein Blockdiagramm mit den Strom- und Spannungsbegrenzungen und der kaskadierten Regelung.

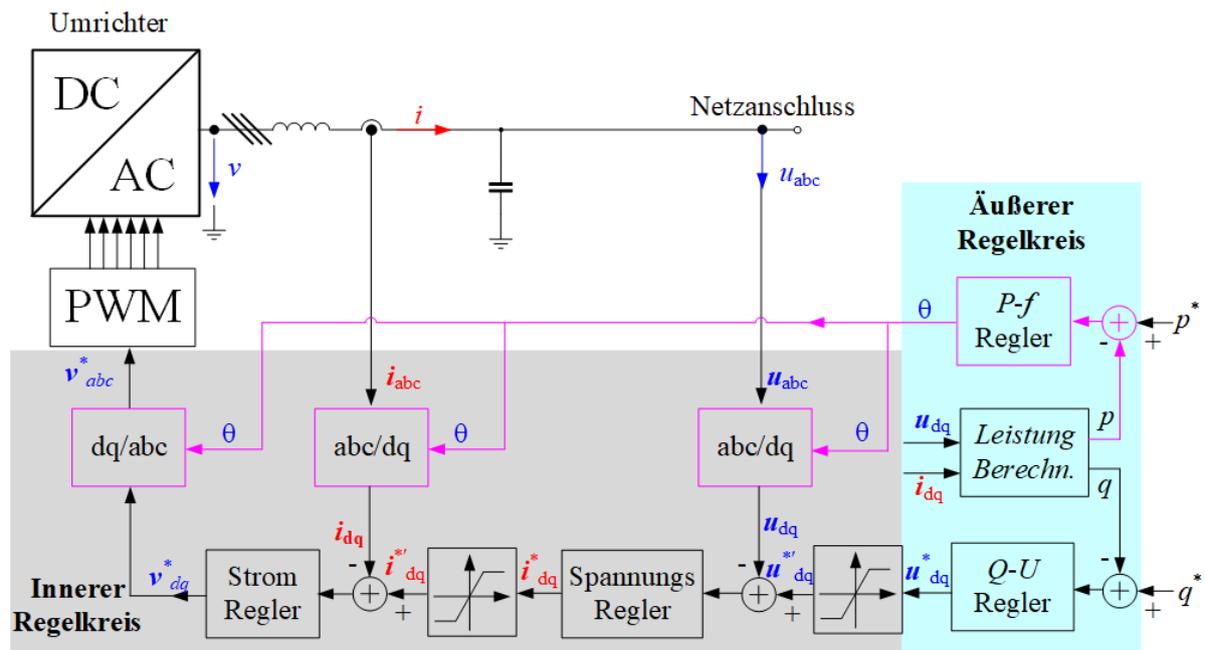


Abbildung 6: Blockschaltbild des "grid forming"-Regelkonzeptes

3 Anwendungsfälle

Durch die zuvor beschriebenen Vor- und Nachteile der Regelkonzepte ergeben sich unterschiedliche Anwendungsbereiche der Regelkonzepte. Im Allgemeinen handelt es sich hierbei um softwaremäßige Konzepte wobei mit überschaubarem finanziellem Aufwand die vorhandene Hardware für jegliches Konzept genutzt werden kann. Diese Umstellung kann, wenn notwendig, bei vorhandener Infrastruktur und Implementierung auch im Betrieb von statten gehen. Die folgende Abbildung 7 listet den möglichen Betrieb in den unterschiedlichen Anwendungsbereichen auf. Es wird hierbei in der Verwendung am öffentlichen Netz und im Inselnetz mit rein umrichterbasierter Erzeugung unterschieden.

Regelungskonzept	Anwendungsfall					
	öffentliches Netz	Inselnetz (lediglich Last)	Inselnetz mit "Grundidee" GFM	Inselnetz mit GFL	Inselnetz mit GFL mit Netzstützung	Inselnetz mit GFM
"Grundidee" Grid forming	✗	✓	✗	✓	✓	✓
Grid following	✓	✗	✓	✗	✗	✓
Grid following mit Netzstützung	✓	✗	✓	✗	✗	✓
Grid Forming	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Abbildung 7: Auflistung der möglichen Anwendungsbereiche der verschiedenen Regelkonzepte

Zusammengefasst kann erkannt werden, dass das Regelkonzept „Grundidee grid forming“ in Inselnetzen zur Referenzvorgabe der Spannung gut geeignet ist, jedoch ein Betrieb in Mehrzahl bzw. am öffentlichen Netz aufgrund von möglichen Ausgleichsströmen nicht geeignet ist. Anlagen im „Grid following“-Regelkonzept eignen sich gut in Netzen mit ausreichender Erzeugung mit Spannungsvorgabe, können jedoch aufgrund mangelnder Einhaltung der Anforderungen im reinen Inselbetrieb nicht betrieben werden. Regelstrategien, welche dem „grid forming“-Regelkonzept zugrunde liegen, können im Inselnetz sowie im öffentlichen Netz netzstabilisierend betrieben werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel sind exemplarisch die grundsätzlichen Regelkonzepte leistungselektronischer Anlagen mit ihrer Funktionsweise aufgelistet. Weiters wurden die Regelkonzepte auf ihre Anwendung ans öffentliche Netz bzw. bei Inselnetzen klassifiziert. Bei einer 100 % erneuerbare Energieerzeugung werden diese Anlagen in lokalen Netzgebieten bzw. dargebotsabhängig das Netzverhalten maßgeblich beeinflussen. Um hierbei die zukünftige Versorgungssicherheit zu gewährleisten, führte dies in den letzten Jahren zu einer Vielzahl an unterschiedlichen Umrichterregelungen mit netzstützendem Verhalten. Wobei dem „grid forming“-Regelkonzept ein großes Potential zugesprochen wird.

Da es jedoch unzählige Implementierungsvarianten gibt und das Fehlverhalten noch nicht ausreichend bekannt ist, müssen noch möglichst praxisnahe Untersuchungen durchgeführt werden. Hardware-in-the-loop Testsysteme können hierbei durch eine Kombination von Echtzeitrechnern und tatsächlichen Hardwarekomponenten Betriebsfälle detailgetreu nachbilden. [8]

Dadurch kann das Einhalten der Netzanschlussbedingungen von einzelnen Anlagen bereits in einer frühen Entwicklungsphase untersucht und optimiert werden. Weiters können etwaige Schwächen an den Netzanschlussbedingungen in einem leistungselektronisch dominierten Netz analysiert und bei Bedarf angepasst werden. Hierbei ist insbesondere das Verhalten zukünftiger Implementierungsvarianten in Fehlerfällen noch kaum untersucht.

Ein weiterer Vorteil der neuartigen Regelkonzepte ist die Möglichkeit zur Unterstützung beim Netzwideraufbau in einem möglichen Blackout Szenario. Hierbei können Inselnetze aufgebaut und anschließend zugeschaltet werden. Auch eingebettete MVDC-Netze zur Verstärkung der vorhandenen AC-Netze können in Zukunft nur mit ordnungsgemäß funktionierenden Umrichtern als Schnittstellen umgesetzt werden.

5 Referenzen

- [1] Z. Zhang et al., “Differences in Transient Stability Between Grid Forming and Grid Following in Synchronization Mechanism,” in CIGRE 2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Online Conference, Sep. 2021, pp. 1096–1100.
- [2] M. Paolone et al., “Fundamentals of power systems modelling in the presence of converter-interfaced generation,” *Electric Power Systems Research*, vol. 189, p. 106811, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106811.

- [3] S. Reichert, G. Griepentrog, and B. Stickan, "Comparison between grid-feeding and grid-supporting inverters regarding power quality," in 2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Florianopolis, Brazil, Apr. 2017 - Apr. 2017, pp. 1–4.
- [4] D. Pattabiraman, R. H. Lasseter., and T. M. Jahns, "Comparison of Grid Following and Grid Forming Control for a High Inverter Penetration Power System," in 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Portland, OR, Aug. 2018 - Aug. 2018, pp. 1–5.
- [5] R. Rosso, X. Wang, M. Liserre, X. Lu, and S. Engelken, "Grid-forming converters: an overview of control approaches and future trends," in 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, Oct. 2020 - Oct. 2020, pp. 4292–4299.
- [6] Zhang, Z., Schuerhuber, R., Fickert, L., Katrin, F., Guochu, C., & Yongming, Z. (2021). Domain of Attractions Estimation for Grid Connected Converters with Phase-Locked Loop. IEEE Transactions on Power Systems.
- [7] R. Rosso, X. Wang, M. Liserre, X. Lu, and S. Engelken, "Grid-Forming Converters: Control Approaches, Grid-Synchronization, and Future Trends—A Review," IEEE Open J. Ind. Applicat., vol. 2, pp. 93–109, 2021, doi: 10.1109/OJIA.2021.3074028.
- [8] Zhang, Z., & Fickert, L. (2016). Power Hardware-in-the-Loop testing for the Inverter-based Distributed Power Source. Beitrag in 14. Symposium Energieinnovation, Graz, Österreich.