

PRÜFMETHODEN UMRICHTERGEKOPPELTER ERZEUGUNGSEINHEITEN FÜR DAS ZUKÜNFTIGE ENERGIENETZ

Manuel Galler*, Ziqian Zhang, Robert Schürhuber

Technische Universität Graz – Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Inffeldgasse 18/1,
+43-316-873-7551, office.iean@tugraz.at, www.iean.tugraz.at

Kurzfassung: Der Trend zukünftiger Energiesysteme geht deutlich in die Richtung leistungselektronisch vernetzter Erzeugung. Im Gegensatz zu konventioneller Energieerzeugung hängt die dynamische Eigenschaft von umrichtergekoppelter Erzeugungseinheiten stark von der implementierten Regelungsstrategie ab. Diese Tatsache führt zu notwendigen Änderungen von derzeitigen Test- und Validierungsmethoden welche an leistungselektronische Anlagen angepasst werden müssen. Dieses Paper befasst sich mit neuen Test- und Validierungsmethoden basierend auf Hardware-in-the-Loop Verfahren. Durch dieses Verfahren können umrichtergekoppelte Erzeugereinheiten bereits während der Entwicklungsphase realitätsnahe getestet werden und Netzbetreiber können vor Inbetriebnahme bereits Stabilitätsuntersuchungen mit geeigneten Modellen vornehmen um zukünftige Netzausbaumaßnahmen zu überprüfen.

Keywords: PHIL, Umrichter, Prüfmethoden, Energienetz

1 Einführung

Energieerzeugung basierend auf leistungselektronisch gekoppelten Anlagen bieten die Vorteile hinsichtlich Flexibilität im Betrieb, jedoch existieren auch Herausforderungen bei ihrer Verwendung, etwa dürfen die Stabilitätsgrenzen im Betrieb nicht verletzt werden. Um die Stabilität des elektrischen Energiesystems bei einer Versorgung aus hauptsächlich leistungselektronisch gekoppelten Einheiten gewährleisten zu können, ist eine Überprüfung des in den Netzanschlussbedingungen geforderten Fehlerverhaltens nötig [1]. Die derzeit standardmäßig eingesetzten Testmethoden [2, 3, 4] decken jedoch reale Fehlersituationen im Netz oftmals nicht korrekt ab. So wurde in etlichen Fällen ein Stabilitätsverlust beim Auftreten von Spannungseinbrüchen beobachtet, obwohl die Erzeugungseinheiten die Standardtests korrekt absolviert hatten. Der Grund liegt zum Teil in unzureichenden Testmethoden, welche das komplexe Verhalten im Fehlerfall nicht vollständig nachstellen können. Aus diesem Grund soll ein neuer, realistischerer Ansatz [5] zur Überprüfung des Netzverhalten von umrichterbasierter Erzeugung vorgestellt werden. Dieser Ansatz stützt sich auf den Einsatz von Power/Controller-Hardware -In-The-Loop (PHIL bzw. CHIL) Systemen [6]. Dadurch wird eine einfachere, realistischere und auch umfangreichere Validierung des Verhaltens gewährleistet.

1.1 Standardregelmodell einer umrichtergekoppelten Erzeugungseinheit

Eine verbreitete Variante zur Implementierung von Reglern in leistungselektronischen Anlagen ist die Verwendung von sogenannten d-q-Komponenten. Diese ermöglichen es die zu regelnden Größen meist wie Gleichgrößen zu behandeln. Solch ein Regelmodell ist in Bild 1 dargestellt. Diese Abbildung beinhaltet ebenfalls die benötigte Clark- und Park-Transformationen. Diese Abbildung zeigt ein rudimentäres Modell und beinhaltet keine Stellgrößenbeschränkungen oder Anti-Windup-Maßnahmen, welche bei einer Implementierung in einen echten Umrichter durchaus berücksichtigt werden müssen.

In dem grauen Block mit dem Namen „Kompensation“ in Bild 1 befindet sich das mathematische Model der Störgrößenkompensation und der Kopplungsterme welche für eine entkoppelte Betrachtung der d- und q-Komponenten benötigt wird. In den roten Blöcken befinden sich die verwendeten Regler. Der Block „Stromregler“ beinhaltet zwei separate Regler, einen für die d-Komponente und einen für die q-Komponenten, diese zwei Regler sind meist ident ausgeführt. Der „Netzspannungsregler“ regelt die Blindleistungsaufnahme bzw. -abgabe des Umrichters, dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten der Regelung, welche aufgrund der geltenden technischen Richtlinien [1] ausgewählt werden. Der „Zwischenkreisspannungsregler“ hält die Spannung des DC-Bus auf einem bestimmten Wert, dafür Regelt er den Leistungsfluss in oder aus den energienetzseitigen Umrichter.

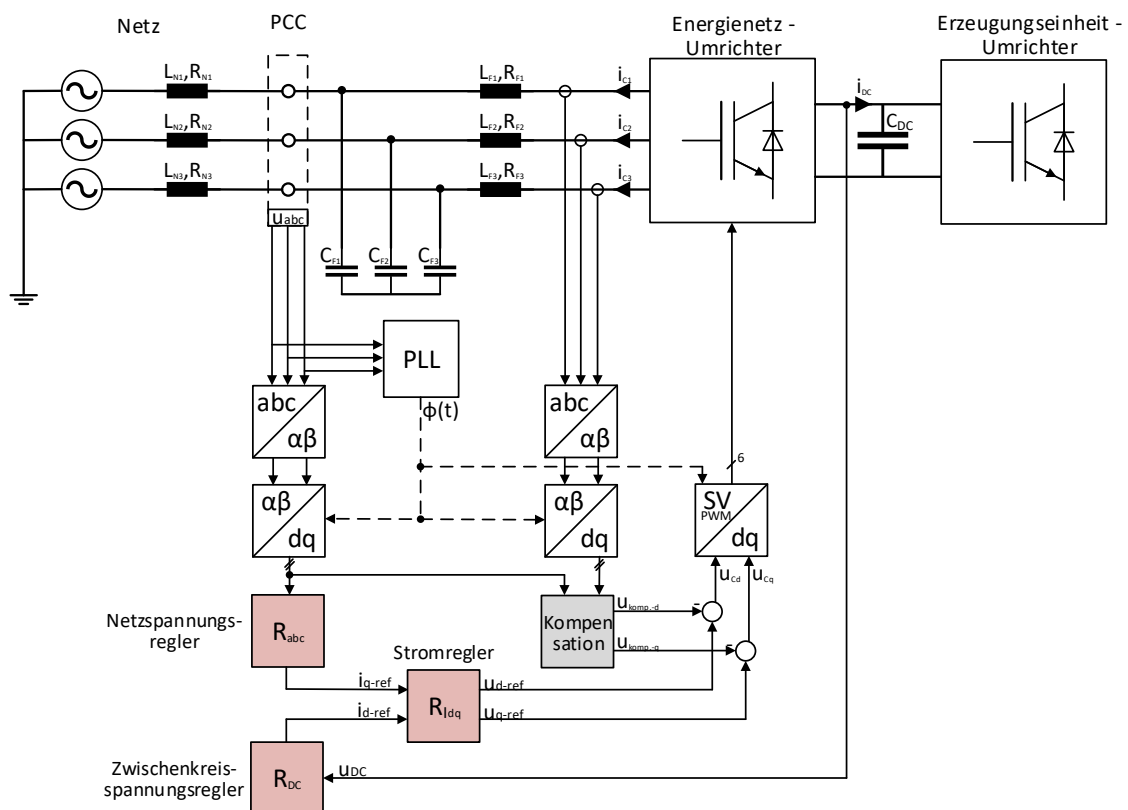


Bild 1: Standardregelmodell von leistungselektronischen Anlagen

Vernachlässigt man die Filterkapazitäten C_F in Bild 1 und transformiert, die geltenden Maschengleichungen in d-q-Komponente, nach Laplace, so ergibt sich Gleichung (1.1).

$$\begin{aligned}
 L\{u_C^{dq}(t)\} &= \begin{pmatrix} u_C^d(s) \\ u_C^q(s) \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} u_N^d(s) + i_C^d(s) \cdot R_{F1} - \omega \cdot L_{F1} \cdot i_C^q(s) + L_{F1} \cdot s \cdot i_C^d(s) - \omega \cdot L_{N1} \cdot i_C^q(s) + L_{N1} \cdot s \cdot i_C^d(s) \\ u_N^q(s) + i_C^q(s) \cdot R_{F1} + \omega \cdot L_{F1} \cdot i_C^d(s) + L_{F1} \cdot s \cdot i_C^q(s) + \omega \cdot L_{N1} \cdot i_C^d(s) + L_{N1} \cdot s \cdot i_C^q(s) \end{pmatrix}
 \end{aligned} \quad (1.1)$$

Ausgehend von der Gleichung (1.1) werden die PI-Regler eines Umrichters, wie in Bild 1, ausgelegt. Eine detaillierte Herleitungsbeschreibung der verwendeten Übertragungsfunktionen ist in [7] und [8] ausgeführt. Der geschlossene Regelkreis wird, nach Entkopplung der d-q Komponenten und mit Berücksichtigung der Netzimpedanz, durch Gleichung (1.2) beschrieben.

$$RP_i = \frac{i}{i_{ref}} = \frac{R_i \cdot P_i}{1 + R_i \cdot P_i} = \frac{V_i \frac{1+s \cdot T_i}{s \cdot T_i} \cdot \frac{1}{R_{F1} + R_{N1}}}{1 + V_i \frac{1+s \cdot T_i}{s \cdot T_i} \cdot \frac{1}{R_{F1} + R_{N1}}} \cdot \frac{1}{(1+s \cdot T_{swi}) \cdot \left(1 + s \cdot \frac{L_{F1} + L_{N1}}{R_{F1} + R_{N1}}\right)} \approx \frac{1}{1 + s \cdot 2 \cdot T_{swi}} \quad (1.2)$$

Die in Gleichung (1.2) verwendeten Zeitkonstanten sind, T_i als Regelzeitkonstante und T_{swi} als Schaltperiode [8]. Nur durch eine geeignete Wahl der Stromregelparameter ergibt sich eine näherungsweise von den Impedanzen unabhängige Stromregelung.

In einem realen Regelungssystem, wie es in Bild 1 dargestellt ist, muss der für die Park-Transformation (d-q-Transformation) verwendete Winkel berechnet werden. In Standardregelmodellen wird dies durch eine Phase Locked Loop (PLL) Regelung implementiert. Die PLL selbst ist ein eigener Regelkreis welcher den aktuellen Phasenwinkel der Spannung ermittelt.

Die Gleichungen (1.1) und (1.2) wurden unter Annahme einer idealen Park-Transformation angeschrieben und berücksichtigen daher den Regelkreis der PLL nicht. Forschungsarbeiten haben gezeigt das in bestimmten Fällen eine mitbetrachtung des PLL-Regelkreises unabdinglich für eine aussagekräftige Stabilitätsuntersuchung ist [9].

2 Betrachtung von Prüfmethoden

2.1 Derzeitige Prüfmethoden

Normative Prüfverfahren legen die Störfestigkeitsprüfverfahren und den Bereich bevorzugter Prüfschärfegrade für elektrische und elektronische Geräte, die zum Anschluss an Niederspannungs-Stromversorgungsnetze vorgesehen sind, gegenüber Spannungseinbrüchen, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen fest [3].

Diese normativen [2, 3, 4, 10] Prüfverfahren beinhalten meist lediglich die Vorgabe von Spannungswerten, wobei der Prüfgenerator als ideale Spannungsquelle angenommen werden darf.

Auf die Vorgabe von Impedanzänderungen wird gänzlich verzichtet, auch die Vorgabe von statischen Impedanzen wird oft vernachlässigt. Durch die Gleichung (1.2) ist gezeigt das bei einer umrichtergekoppelten Erzeugereinheit die Netzimpedanz durchaus in der

Übertragungsfunktion der Regelschleife vorhanden ist, jedoch mit geschickter Wahl der Regelparameter vernachlässigt werden kann. Wird dabei der zusätzliche PLL-Regelkreis miteinbezogen, gilt diese Vereinfachung jedoch nicht mehr und die Netzimpedanz kann zu einen stabilitätskritischen Parameter werden [9].

2.2 Neue Prüfmethode

Die in Abschnitt 2.1 erwähnten Prüfungen können von umrichtergekoppelten Erzeugereinheiten meist ohne weitere Komplikationen durchgeführt werden. Diese normierten Prüffälle sind jedoch meist nicht repräsentativ zu realen Fehlerfällen, so ändert sich nach einem Netzfehler, durch freischalten der fehlerhaften Leitung, die Impedanz im Netz. Dies führt zu Phasensprüngen an den Terminalspannungen des Umrichters. Solch ein Phasensprung hat direkte Auswirkung auf die Ermittlung des Phasenwinkels in der PLL und somit auf die benötigten Transformationen im Regelungssystem [5].

Um Prüfmethode in Zukunft für umrichtergekoppelte Erzeugereinheiten adäquat zu definieren, müssen repräsentative Impedanzen und auch Impedanzänderungen in das Prüfverfahren mitaufgenommen werden.

In folgenden Abschnitten werden Prüfmethode vorgestellt die eine ganzheitliche Systemprüfung für umrichtergekoppelte Erzeugereinheiten ermöglichen.

2.2.1 Controller-Hardware-in-the-Loop

Durch die Verwendung einer CHIL (Controller-Hardware-in-the-Loop) Prüfmethode kann das Regelungssystem des Umrichters in der realen Rechnerumgebung ablaufen. Es werden alle sonst physikalisch vorhandenen Größen mit einem Echtzeitregelungssystem simuliert.

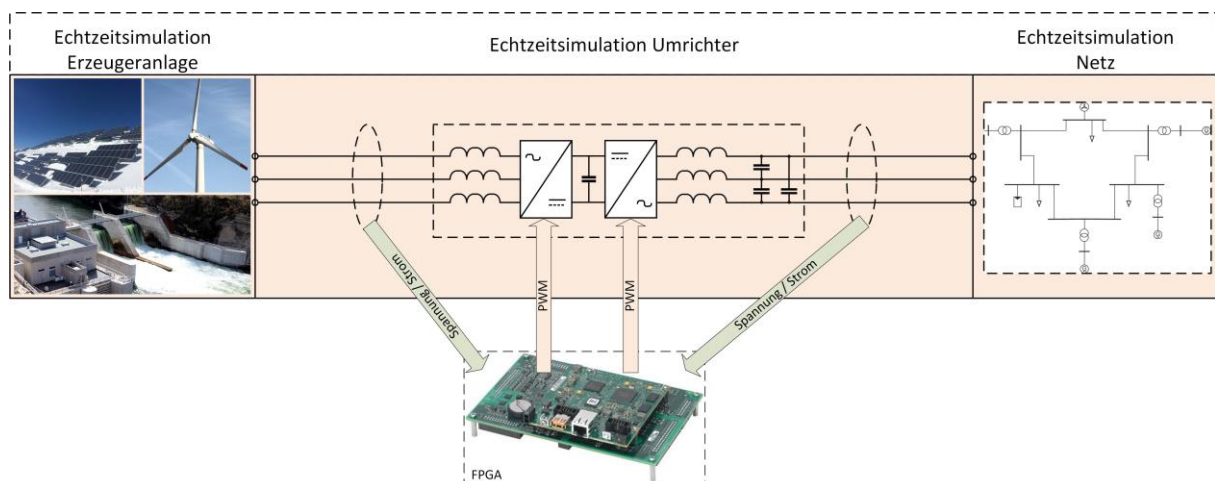


Bild 2: Schema eines CHIL Prüfaufbau mit FPGA

Die eingebettete Regelungstechnikkarte bekommt die Ströme und Spannungen des simulierten Systems und berechnet daraus die resultierenden PWM-Signale welche an das Regelungssystem zurückgegeben werden. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass hier ein reales Regelungssystem verwendet wird. Diese Karten könnten direkt von einem echten Umrichter verwendet werden. Um bei CHIL durch die Simulation aussagekräftige Ergebnisse zu bekommen muss die gesamte Leistungselektronik mit simuliert werden.

2.2.2 Power-Hardware-in-the-Loop

Auf die CHIL-Prüfmethode setzt die PHIL (Power-Hardware-in-the-Loop) Methode auf. Hierbei wird nicht nur die Regelungstechnikkarte eingebettet, sondern der gesamte Umrichter als solches.

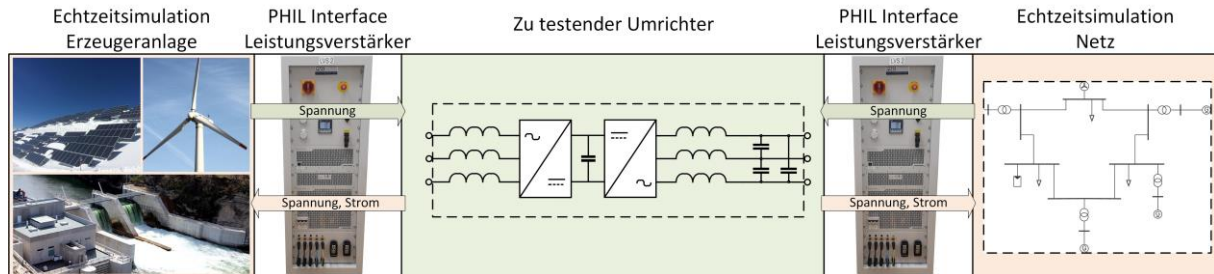


Bild 3: Schema eines PHIL Prüfaufbau mit realen Umrichter

Das Netz und die Erzeugeranlage werden in einer Echtzeitsimulation ausgewertet und über einen Leistungsverstärker an den Umrichter übergeben. Hierbei gibt der Leistungsverstärker die berechnete Spannung an den Anschlussklemmen aus und berechnet über den rückgekoppelten Strom die neue Spannung, dies wird auf der Netz- und Erzeugerseite des Umrichters gemacht. Der Umrichter muss sich in dieser Konfiguration so verhalten als befände er sich in solch einer realen Umgebung. Dadurch dass der Umrichter hier real vorhanden ist, werden unmittelbar alle sonst simulierten Störgrößen wie Latenzzeiten und Messwandler-Toleranzen mitberücksichtigt.

3 Zusammenfassung

Nach Betrachtung der derzeit gültigen Prüfmethode für die Feststellung von Störfestigkeiten elektrischer und elektronischer Anlagen im Hinblick auf Umrichter-Regelungen wird ersichtlich dass solch geprüfte umrichtergekoppelte Erzeugereinheit nur bedingt die Erfordernisse für einen stabilen Netzbetrieb erfüllen.

Durch die spezielle Regelungsstruktur von solchen Anlagen müssen für das zukünftige Energienetz detailliertere Prüfverfahren festgesetzt werden, diese müssen reale Fehlerfälle abdecken. Durch die Betrachtung der gültigen Gleichungen reicht es nicht aus eine ideale Spannungsquelle als Prüfgenerator zu verwenden und es ist notwendig dass auch Phasensprünge in die Prüfrichtlinien mitaufgenommen werden.

Die betrachteten neuen Prüfmethode, welche sich auf Echtzeitsimulation von Erzeugern und Energienetzen stützen, könnten hier eine signifikante Verbesserung bringen um die Systemstabilität von zukünftigen Energienetzen auch weiter gewährleisten zu können.

4 Referenzen

- [1] E-Control, „Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen,“ 2017. [Online].
- [2] 1547-2018 IEEE, „IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces,“ 2018.
- [3] OVE EN 61000-4-11 , Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 4-11: Prüf- und Messverfahren – Prüfungen der Störfestigkeit gegen Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen, 2019.
- [4] ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-11, „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 3-11: Grenzwerte - Begrenzung von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker in öffentlichen Niederspannungs-Versorgungsnetzen - Geräte und Einrichtungen mit einem Bemessungsstrom ≤ 75 A, die ei,“ 2001.
- [5] Z. Zhang, R. Schürhuber, G. Chen und Y. Zhang, „Stability and stability tests of inverter based power generation equipment,“ *13. ETG/GMA-Fachtagung - Netzregelung und Systemführung*, 2019.
- [6] Z. Zhang und L. Fickert, „Power hardware-in-the-loop test for cyber physical renewable energy in-feed: Retroactive effects and an optimized power Hardware-in-the-Loop interface algorithm,“ *17th International Scientific Conference on IEEE*, 2016.
- [7] D. Schröder, Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen, 4. Hrsg., Springer Vieweg, 2015.
- [8] M. Galler, Diplomarbeit - Entwicklung und Implementierung eines STATCOM, Graz: TU Graz, 2018.
- [9] R. Schürhuber und Z. Ziqian, „Stability of Grid-connected Photovoltaic Inverters During and After Low Voltage Ride Through,“ *8th Solar Integration Workshop: International Workshop on Integration of Solar into Power Systems*, 2018.
- [10] 6.-4.-1. ÖVE/ÖNORM EN, Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-14: Testing and measurement techniques – Voltage fluctuation immunity test for equipment, 2010.