

Ein Testverfahren für netzbildende Wechselrichter – Der nächste notwendige Schritt für den stabilen Betrieb stromrichterdominierter Netze

Sönke Rogalla¹, Rebekka Denninger¹, Philipp Ernst¹, Roland Singer¹,
Andreas Greulich², Manuel Kersic³, Tim Müller³

¹Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg
Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg, Tel.: 0761-4588 5454
Email: soenke.rogalla@ise.fraunhofer.de, Internet: www.ise.fraunhofer.de

²KACO new energy GmbH – A Siemens Company, Neckarsulm

³BELECTRIC GmbH, Dresden

Ausgangslage: Netzbildende Wechselrichter werden notwendig

Die fortschreitende Verdrängung konventioneller Kraftwerke durch leistungselektronisch gekoppelte Einspeiser (Wechselrichter) führt auf Grund des damit verbundenen Wegfalls rotierender Synchrongeneratoren zu einer Reduktion der Systemträgheit (Momentanreserve). Auftretende Netzstörungen können so zukünftig zu schnellen, ggf. unbeherrschbaren Frequenzabweichungen führen, die die Netzstabilität gefährden können. Im Gegensatz zu den sog. netzfolgenden oder netzstützenden Wechselrichtern sind netzbildende Wechselrichter in der Lage einen stabilen Verbundnetzbetrieb sicherzustellen, indem sie als Spannungsquelle im Parallelbetrieb mit anderen Erzeugern operieren können (vgl. Tabelle 1). Bei einer geeigneten Auslegung können sie somit alle für die Netzregelung erforderlichen Eigenschaften der wegfallenden Synchrongeneratoren ersetzen.

Tabelle 1: Übersicht der verschiedenen Regelungsarten netzgekoppelter Wechselrichter.

	Spannungsgeregt (voltage controlled)		Stromgeregt (current controlled)	
	Netzführend (grid leading)	Netzbildend (grid forming)	Netzfolgend (grid following)	Netzstützend (grid supporting)
Art der Quelle	Festspannungsquelle	Geregelte Spannungsquelle mit Innenimpedanz	Konstantstromquelle bzw. Konstantleistungsquelle	Geregelte Strom- bzw. Leistungsquelle
Anwendung	Inselnetze mit einer Spannungsquelle	Verbundnetzbetrieb mit mehreren Spannungsquellen	Leistungseinspeisung in ein starres Netz	Leistungseinspeisung & SDL-Bereitstellung (Stand der Technik)

In der Vergangenheit wurden bereits verschiedene Ansätze für netzbildende Wechselrichter wissenschaftlich untersucht und erprobt [1], so dass heute bereits Hersteller derartige Geräte am Markt anbieten. Die Notwendigkeit für den zukünftigen Einsatz von netzbildenden Wechselrichtern ist auf Seiten der Hersteller und Netzbetreiber gleichermaßen bekannt [2], [3].

Motivation: Es fehlt ein Nachweisverfahren für netzbildende Wechselrichter

Trotz der o. g. Situation zeichnet sich bisher noch kein Trend zur Installation von netzbildenden Wechselrichtern in den Energiesystemen ab. Die liegt v. a. daran, dass eine Definition oder Forderung eines netzbildenden Verhaltens erst allmählich Einzug in die Netzanschlussrichtlinie hält. So existieren inzwischen u. a. in Deutschland mit den „Anschlussbedingungen für HGÜ-Anlagen (VDE-AR-N 4131)“ und in Großbritannien mit dem Ergänzungsentwurf zum GB Grid Code „GC0137: Minimum Specification Required for Provision of GB Grid Forming (GBGF) Capability“

Richtlinienpapiere, auf deren Basis die Netzbildungsfähigkeit von Wechselrichtern gefordert werden kann. Ferner wurde vom FNN kürzlich das Hinweispapier „Spannungseinprägendes Verhalten von HGÜ-Systemen und nichtsynchrone Erzeugungsanlagen mit Gleichstromanbindung“ veröffentlicht, das ergänzend zur VDE-AR-N 4131 Simulationsszenarien für den Nachweis des netzbildenden Verhaltens von Umrichtern beschreibt. Trotz dieser Ansätze fehlt jedoch derzeit noch eine allgemeingültige, umsetzungsneutrale Definition der netzbildenden Eigenschaften in Verbindung mit einem etablierten Nachweisverfahren für die Netzbildungsfähigkeit von Wechselrichtern. Ohne ein solches Verfahren jedoch ist es für Netzbetreiber nur schwer möglich, die zu installierenden Geräte umfassend auf ihre Eignung hin zu bewerten. Ferner fehlt den Herstellern von netzbildenden Wechselrichtern – v. a. Anbietern von Batteriewechselrichtern für den Anschluss ans Nieder- und Mittelspannungsnetz – eine geeignete Testrichtlinie, um ihre Produkte und Lösungen nach anerkannten Maßstäben zweifelfrei überprüfen zu lassen.

Lösung: Testrichtlinie für netzbildende Wechselrichter

Vor diesem Hintergrund wird in diesem Beitrag eine Testrichtlinie vorgestellt, mit der im Rahmen einer Typprüfung die netzbildenden Eigenschaften von Wechselrichtern unabhängig von der technologischen Umsetzung geprüft werden können. Die Inhalte der vorgestellten Testrichtlinie basieren im Wesentlichen auf den Zwischenergebnissen des deutschen Forschungsprojekts „VerbundnetzStabil“ (gefördert durch das BMWi - FKZ 0350015) und des britischen „VSM project“ (finanziert durch NationalGrid ESO). Der Richtlinienentwurf wurde im Lauf des Jahres 2020 von einem Konsortium, erarbeitet, das sich aus folgenden Projektpartnern zusammensetzt: Fraunhofer ISE, KACO new energy GmbH, IFK der Universität Stuttgart, University of Strathclyde, Belectric GmbH, GE Renewable Energy sowie Siemens-Gamesa. Ferner wurde im Laufe des Prozesses mehrfach die Meinung von Übertragungsnetzbetreibern eingeholt.

Die Testrichtlinie zielt primär darauf ab, die Netzbildungsfähigkeit im Labor überprüfbar zu machen. Diese Vorgehensweise kommt v. a. für Wechselrichtereinheiten bis in die Leistungsklasse von einigen Megawatt, z. B. Batteriewechselrichter, in Frage, für die entsprechende Labore mit einer geeigneten Ausstattung zur Verfügung stehen. Die vorgestellte Richtlinie kann darüber hinaus auch als Grundlage für simulative Untersuchungen dienen. Sofern validierte Wechselrichtermodelle vorliegen, können auch Großumrichteranlagen, wie z.B. HGÜs oder STATCOMs, auf ihre Netzbildungsfähigkeit hin untersucht werden.

Inhalte der Testrichtlinie

Bei der Formulierung der Messvorschriften werden diejenigen Eigenschaften von Wechselrichtern berücksichtigt, die für einen stabilen elektrischen Betrieb der Stromnetze von Bedeutung sind [4]. Dies umfasst die Prüfungen der in Tabelle 2 aufgeführten elektrischen Eigenschaften.

Tabelle 2: Inhalte der Prüfrichtlinie für netzbildende Wechselrichter.

VERHALTEN NETZBILDENDER WECHSELRICHTER					
Spannungsquellenverhalten	Spannungsqualität	Momentanreserve	Überlast- und Fehlerverhalten	Wirk- / Blindleistungsregelung	Netzwechselwirkungen
- Reaktionszeit der Spannungsregelung - Wirksame Innenimpedanz	- Senke für Unsymmetrien - Senke für Oberschwingungen	- Trägheitskonstante (H oder T_{An}) - Dämpfung D	- Spannungsfehler - Phasenfehler - Frequenzfehler (RoCof) - Systemauf-trennungen	- Regelgenauigkeit - Einregelzeit - Frequenzregelung (z.B. LFSM-O/-U) - Spannungsregelung (z.B. Q(U))	Impedanzspektroskopie

Im Folgenden werden die einzelnen Eigenschaften und die zugehörigen Tests erläutert.

Spannungsquellenverhalten

Mit dem Test des Spannungsquellenverhaltens wird gezeigt, dass sich der Prüfling für die Grundschiwingung wie einen Spannungsquelle mit Innenwiderstand (Thévenin-Äquivalent) verhält [5]. Dabei gilt es die komplexe Innenimpedanz $Z_{GFC,int}$ des Prüflings sowie die Ausregelzeit des Spannungsreglers t_{VR} bei transienten Störungen zu bestimmen (vgl. Abbildung 1 und Abbildung 2). Mit dem Test kann ferner der stabile Betrieb des Prüflings am Verbundnetz sowie die Lastaufteilung zwischen verschiedenen Quellen gezeigt werden.

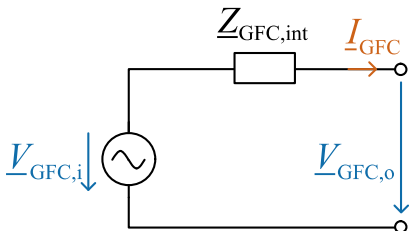


Abbildung 1: Ersatzschaltbild eines netzbildenden Umrichters.

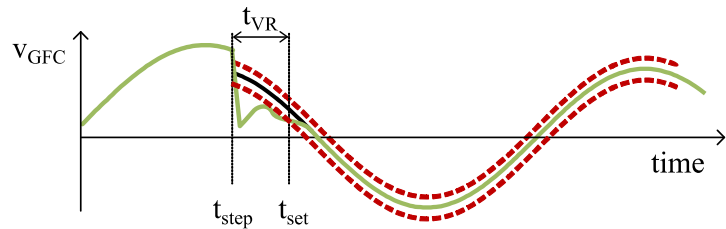


Abbildung 2: Illustration der Ausregelzeit des Spannungsreglers t_{VR} .

Zur Durchführung des Tests dient ein Prüfaufbau entsprechend Abbildung 3. Dabei wird der Prüfling zunächst parallel zu einer konfigurierbaren Lastbank (S_L geschlossen) am Netz (S_G geschlossen) betrieben. Der Test soll für verschiedene R-, L- oder C-Lasten durchgeführt werden, wo bei die Scheinleistung der Last die Nennleistung des Prüflings nicht übersteigen darf. Die Sollleistung des Prüflings beträgt $P_{Soll} = 0 \text{ W}$ und $Q_{Soll} = 0 \text{ var}$. Im Folgenden wird der Netzkuppelschalter S_G geöffnet, so dass der Prüfling mit der Last in den Inselbetrieb fällt und der Prüfling instantan die Versorgung der Last übernehmen muss. Aus den Verläufen von Spannung und Strom an den Klemmen des Prüflings können die Parameter t_{VR} und $Z_{DUT,int}$ bestimmt werden.

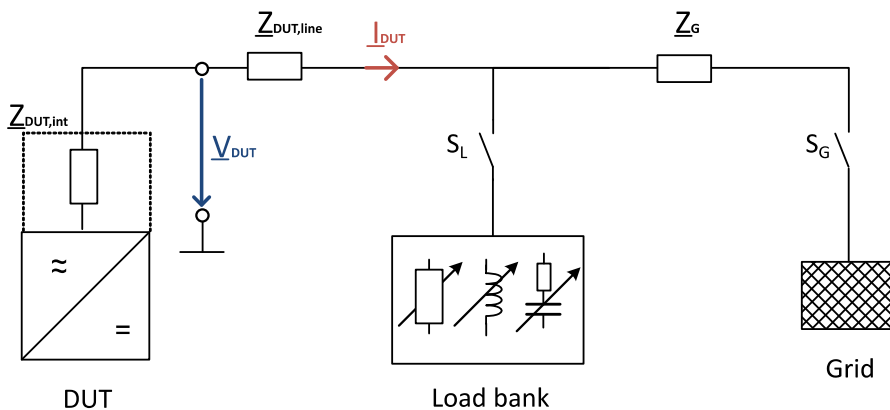


Abbildung 3: Prüfaufbau für die Bestimmung des Spannungsquellenverhaltens von Wechselrichtern.

Beitrag zur Spannungsqualität

Zunächst sei angemerkt, dass sich die Überprüfung hinsichtlich unzulässige hoher Oberschwingungsemissionen nicht grundlegend von den Verfahren zu Prüfung strom geregelter Wechselrichter unterscheidet. Deshalb wird hier nicht näher auf diesen Aspekt eingegangen.

Vielmehr steht bei der Überprüfung des Verhaltens von netzbildenden Wechselrichtern deren Fähigkeit zur Verbesserung der Spannungsqualität im Fokus. Idealerweise verhält sich ein netzbildender Wechselrichter wie eine reine Mitsystemspannungsquelle. Für Oberschwingungen

oder Unsymmetrien (Gegen-/Nullsystem) bildet er jedoch einen niederohmigen Pfad und verhält sich damit netzspannungsverbessernd.

Um zu prüfen, ob sich ein netzbildender Wechselrichter beim Auftreten von Unsymmetrien spannungsverbessernd verhält, wird der Testaufbau aus Abbildung 3 genutzt; die Lastbank jedoch durch eine Schiefast ersetzt. In der Folge entsteht aufgrund des Spannungsabfalls über der Netzimpedanz eine Gegensystemkomponente in der Spannung. Es wird für verschiedene Arbeitspunkte des Wechselrichters ermittelt, ob und in welchem Maß der Prüfling die Gegensystemspannung und die Gegensystemkomponente des Netzstrom reduziert.

Analog dazu wird für den Test der Verbesserungsfähigkeit von Netzspannungsverzerrungen eine nicht-lineare Last (Diodengleichrichter mit DC-Last) als Lastbank eingesetzt. Für einen Frequenzbereich bis 2,5 kHz (50. Harmonische) wird für verschiedene Arbeitspunkte des Wechselrichters ermittelt, wie stark die Spannungsverzerrung THD_U am Anschlusspunkt sowie die Stromverzerrung THD_I des Netzstroms durch den Prüfling reduziert werden. Ferner wird die Kompensationsfähigkeit der einzelnen Stromharmonischen durch den Prüfling untersucht. Idealerweise werden die Oberschwingungsstromkomponenten der nicht-linearen Last vom Wechselrichter und dem Netz jeweils anteilig gemäß dem vorliegenden Verhältnis von Prüflings- und Netzimpedanz bereitgestellt. Durch eine Analyse der jeweiligen Oberschwingungsanteile über den Frequenzbereich kann ermittelt werden, bis zu welcher Frequenz der Prüfling in der Lage ist, netzspannungsverbessernd zu wirken.

Bereitstellung von Momentanreserve

Die Bereitstellung von Momentanreserve, also die unmittelbare Reaktion mit einer Leistungsänderung auf eine Spannungswinkeländerungen, ist ein entscheidendes Charakteristikum eines netzbildenden Umrichters. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass dafür Regelansätze nicht geeignet sind, die Änderungen der Netzspannung (Amplituden, Phasen- oder Frequenzänderungen) zunächst messtechnisch erfassen, analysieren und anschließend mit einer neuen Stromvorgabe reagieren. Derartige Ansätze werden meist als „synthetic inertia“ bezeichnet. Vielmehr muss sich ein netzbildender Wechselrichter wie eine träge Spannungsquelle verhalten, die inhärent den benötigten Strom einer angeschlossenen Last bzw. Netzkonstellation instantan (< 5 ms) zur Verfügung stellt. Erst im weiteren zeitlichen Verlauf erfolgt eine allmähliche Einregelung der ursprünglichen Leistungssollwerte durch Änderungen der Frequenz oder Amplitude der inneren Spannungsquelle gemäß einstellbarer Werte für die Trägheitskonstante H bzw. T_{An} und die Dämpfungskonstante D . Somit wird zwar Momentanreserve aber keine Primär- oder Sekundärregelung erbracht. In der Konsequenz ergibt sich bei Frequenzänderungen und Phasensprüngen eine ähnliche Wirkleistungsreaktion wie die einer Synchronmaschine.

Zur Ermittlung der Parameter wird zunächst durch einen geeigneten Testaufbau (Netzsimulator oder Schalten von Längsimpedanzen) ein Phasensprung an den Klemmen des Wechselrichters erzeugt. Die resultierende Wirkleistungssprungantwort des Prüflings wird erfasst. Zur Ermittlung der Trägheitskonstante H und der Dämpfungskonstanten D wird ein vereinfachtes Simulationsmodell einer Synchronmaschine (sog. *swing equation*) zu Grunde gelegt. Die Werte für H und D , mit denen die Simulationsergebnisse bestmöglich an den gemessenen Verlauf gefittet werden können, gelten als die gesuchten Konstanten des Prüflings [6].

Auf Grund verschiedener Reglereinflüsse kann sich die transiente Trägheit eines Wechselrichters von dessen mittelfristiger Trägheit (Zeitbereich von mehreren Sekunden) unterscheiden. Um diesem Effekt Rechnung zu tragen, wird ein zweiter Test durchgeführt. Dabei wird der Prüfling mit einer Parallellast in die Insel geschaltet, so dass sich auf Grund der Reaktion des Prüflings ein Frequenzgradient einstellen. Die Last darf dabei die Nennleistung des Prüflings nicht übersteigen und

ist so zu wählen, dass sich eine Frequenzrampe von mehreren Sekunden ergibt, bevor eine Frequenzgrenze (z. B. 47 Hz oder 52 Hz) erreicht wird, die zum Abschalten des Prüflings führt. Die mittelfristig wirksame Trägheit lässt sich schließlich aus dem Frequenzgradienten, der eingestellten Last sowie der Nennleistung und -frequenz des Prüflings ableiten.

Es sei darauf hingewiesen, dass Trägheits- und Dämpfungskonstanten netzbildender Wechselrichter i. d. R. als einstellbare Parameter ausgeführt sind. Im Rahmen der Testdurchführung soll daher der einstellbare Parameterbereich mit sinnvoll gewählten Stichprobentests überprüft werden.

Überlastverhalten und Reaktion auf Netzfehler

Im Gegensatz zu stromgeregelten Wechselrichtern, die einen vorgegebenen Ausgangsstrom einregeln, stellt sich bei netzbildenden Wechselrichtern der aktuelle Strom auf Grund des Spannungsquellenverhaltens zunächst in Abhängigkeit der angeschlossenen Lasten bzw. der Netzsituation ein. Es sei angemerkt, dass Wechselrichter nicht oder nur unter erheblichen Kosten überlastfähig sind, während Synchronmaschinen in der Lage sind, kurzzeitig ein Mehrfaches ihres Nennstroms zu liefern.

Beim Auftreten transienter Amplituden-, Phasenwinkel- oder Frequenzänderungen in der Netzspannung kann dies dazu führen, dass ein netzbildender Wechselrichter den erforderlichen Strom, den das Gerät gemäß seines Spannungsquellenverhaltens liefern müsste, nicht in zur Verfügung stellen kann. Derartige Situationen können durch Netzfehler oder das Zu- bzw. Abschalten großer Lasten in der Nähe hervorgerufen werden. Ferner können ein hoher Oberschwingungsstrombedarf oder große Schiefasten zu einer Strombegrenzung einzelner Phasen bzw. kurzer Momente innerhalb einer Periode führen.

Während die vorherigen Abschnitte Betriebsfälle betreffen, in denen der Prüfling sich nicht im stromlimitierten Betriebsbereich befindet, widmet sich dieser Abschnitt dem netzdienlichen Verhalten netzbildender Wechselrichter in Situationen, in denen das Gerät zum Eigenschutz den Ausgangsstrom begrenzt [7].

Mit dem vorgeschlagenen Test werden folgende Anforderungen überprüft:

- Robustheit gegenüber großen Netzereignissen
- Erhalt der Netzsynchronität während längerer Netzfehler (kein „Kippen“)
- Keine dauerhafte Verzerrung des Netzstroms durch eine Momentanstrombegrenzung (kein dauerhaftes „Clipping“)
- Erhalt des spannungseinprägenden Charakters im limitierten Betrieb
- Automatische Lastaufteilung zwischen mehreren Geräten im limitierten Betrieb

Die Robustheit des Prüflings gegenüber Spannungsfehlern kann mittels gewöhnlicher „Under/Over Voltage Ride Through“-Prüfungen erfolgen. Phasenwinkelsprünge sind bis zu einem maximalen Winkelsprung von $\pm 60^\circ$ zu untersuchen. Ferner müssen netzbildende Wechselrichter Frequenzgradienten von mindestens 2 Hz/s durchfahren können. Bei allen Fehlersituationen darf sich der Wechselrichter nicht vom Netz trennen. Für die Durchführung der Prüfung können typische „Under/Over Voltage Ride Through“-Prüfeinrichtungen (UVRT/OVRT) eingesetzt werden. Alternativ ist es unter gewissen Voraussetzungen möglich, das Verhalten bei Phasenfehler durch das Aufschalten einer Störgröße auf die Phasenreferenz der internen Spannungsquelle in der Regelung des Wechselrichters zu testen. Idealerweise jedoch erfolgen die Prüfungen an einem geeigneten

Netzsimulator, da hier auch große Winkelsprünge sowie Frequenzänderungen vorgegeben werden können. Letzteres kann ggf. auch durch ein „Fallen in die Insel“-Test realisiert werden.

Der Erhalt der Netzsynchronität kann durch das Anlegen langer Fehlerdauern und einer Überprüfung einer stabilen Leistungsabgabe während des Fehlers sichergestellt werden. Die Fehlerdauer muss dabei mindestens so lang gewählt werden, dass die Phasendifferenz zwischen Netzspannung und innerer Prüflingsspannung so stark ansteigt, dass es zum Erreichen der Stromgrenze des Prüflings kommt. Mit den aktuellen „Fault Ride Through“-Anforderungen an Typ-2-Anlagen z. B. gemäß RfG (Regulation for Generators) sind in i. d. R. bereits ausreichend lange Fehlerdauern gefordert. Ferner wird durch eine Analyse der Stromkurvenform im Verlauf des Fehlers überprüft, dass der Wechselrichter sich nicht über einen längeren Zeitraum an Maximalstromgrenze befindet (kein dauerhaftes „Strom-Clipping“). Genaue Anforderungen an die tolerierbaren Clipping-Zeiten sind noch zu definieren.

Der Erhalt des spannungseinprägenden und netzbildenden Charakters ist auch während des strombegrenzten Betriebs notwendig, um auf weitere Änderungen der Netzsituation netzdienlich reagieren zu können und um eine korrekte Lastaufteilung (z. B. von Kurzschlussströmen) zwischen mehreren begrenzten Geräten im Verbundnetz zu realisieren. Zum Nachweis des gewünschten Verhaltens wird die Reaktion des Prüflings auf Doppelfehler (z. B. Spannungswinkelsprung gefolgt von einem Amplitudenfehler) untersucht. Dabei muss der erste Fehler den Prüfling bereits in die Strombegrenzung treiben. Der Prüfling muss dennoch auf den zweiten Fehler eine sinnvolle netzdienliche Reaktion zeigen.

Wirk- und Blindleistungsregelung

Unter Wirk- und Blindleistungsregelung wird hier die Fähigkeit von Wechselrichtern verstanden, sich aktiv am Blindleistungsmanagement oder der lokalen Spannungsregelung bzw. der Lastflussregelung oder Frequenzhaltung zu beteiligen. Dies geschieht durch Sollwertvorgaben für die Wirk- oder Blindleistungsabgabe, die per Fernwirkbefehl oder aus lokalen Reglern (z.B. $Q(U)$ oder $P(f)$ bzw. LFSM-O/-U) erfolgen und mit ausreichender Dynamik und Genauigkeit umgesetzt werden müssen. Die für diese Zwecke geforderten Zeitkonstanten lassen sich – wie aktuell praktiziert – auch mit stromgeregelten Wechselrichtern gut erfüllen.

Aus diesem Grund sehen die Autoren in Bezug auf die Wirk- und Blindleistungsregelung von netzbildenden Wechselrichtern keine wesentlichen Unterschiede zu den Vorgaben, die bereits heute an netzstützende Wechselrichter gemacht werden. Entsprechend können diesbezüglich Anforderungen aus den heutigen Netzanschlussrichtlinien auch für netzbildende Wechselrichter übernommen werden.

Netzwechselwirkungen

Unerwünschte Netzwechselwirkungen wie Resonanzbildungen zwischen Wechselrichtern und dem Netz können durch eine Analyse der Frequenzverläufe der Wechselrichterimpedanz und der vorliegenden Netzimpedanz beschrieben werden; beispielsweise mittels des sog. impedanzbasierten Stabilitätskriteriums. Für derartige Untersuchungen – idealerweise schon während der Planungsphase von neuen Anlagen – muss die wirksame Ausgangsimpedanz eines Wechselrichters bekannt sein. Eine Messung des wirksamen Ausgangsimpedanzverlaufs soll mittels differentieller Impedanzspektroskopie erfolgen [8].

Ausblick: Erarbeitung eines international anerkannten Teststandards

Eine Entwurfsversion der in diesem Beitrag beschriebenen Testrichtlinie befindet sich aktuell in der Finalisierung und wird in Kürze von dem o. g. Konsortium veröffentlicht. Im Folgenden soll die weitere Bearbeitung in ein internationales Normungsgremium überführt werden. Ziel ist es die vorgestellten Nachweiseverfahren zu einem etablierten Teststandard weiterzuentwickeln.

Literatur

- [1] R. Singer, S. Rogalla, und A. Salman, „Erkenntnisse aus dem Test spannungseinprägender Wechselrichter im Megawattmaßstab“, gehalten auf der 34. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, März 2019.
- [2] K. Vennemann u. a., „Systemic Issues of Converter-based Generation and Transmission Equipment in Power Systems“, gehalten auf dem Wind Integration Workshop 2018, Stockholm, Okt. 2018.
- [3] „High Penetration of Power Electronic Interfaced Power Sources and the Potential Contribution of Grid Forming Converters“, ENTSO-E Technical Group on High Penetration of Power Electronic Interfaced Power Sources, Technical Report, Jan. 2020.
- [4] M. Kersic u. a., „Testing Characteristics of Grid Forming Converters Part I: Specification and Definition of Behaviour“, gehalten auf dem 19th Wind Integration Workshop 2020, virtuell, Nov. 2020.
- [5] R. Denninger, S. Reichert, S. Rogalla, und K. Jalili, „Testing Characteristics of Grid Forming Converters Part II: Voltage Source Properties and Contribution to Power Quality“, gehalten auf dem 19th Wind Integration Workshop 2020, virtuell, Nov. 2020.
- [6] A. Dyško u. a., „Testing Characteristics of Grid Forming Converters Part III: Inertial Behaviour“, gehalten auf dem 19th Wind Integration Workshop 2020, virtuell, Nov. 2020.
- [7] R. Singer, R. Denninger, P. Ernst, K. Jalili, und S. Rogalla, „Testing Characteristics of Grid Forming Converters Part IV: Overload Behavior and Response to Grid Faults“, gehalten auf dem 19th Wind Integration Workshop 2020, virtuell, Nov. 2020.
- [8] S. Rogalla, S. Kaiser, B. Burger, und B. Engel, „Determination of the Frequency Dependent Thévenin Equivalent of Inverters Using Differential Impedance Spectroscopy“, gehalten auf der 2020 IEEE 11th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Sep. 2020.

Q:\Veröffentlichungen\2021\ZNE2021\VerbundnetzStabil\GFC_Prüfrichtlinie\Workdir\PaperDie Arbeiten, die dieser Veröffentlichung zugrunde liegen, wurden gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Forschungsprojekts „VerbundnetzStabil“ (FKZ 0350015).