

BEDEUTUNG VON PHIL-TESTS ALS SIMULATIONS-COCKPIT

Carina LEHMAL^{1*}, Ziqian ZHANG², Philipp Hackl², Robert Schürhuber²

¹Carina Lehmal, IEAN-TU Graz, Inffeldgasse 18, 8010 Graz, +436644063588, carina.lehmal@tugraz.at, www.tugraz.at/institute/iean/home/

²Ziqian Zhang, Philipp Hackl, Robert Schürhuber, IEAN-TU Graz, Inffeldgasse 18, 8010 Graz, +433168737551, office.iean@tugraz.at, www.tugraz.at/institute/iean/home/

Kurzfassung: Mit zunehmendem Einsatz erneuerbarer Energien, insbesondere Photovoltaik und Windkraft, gewinnen Wechselrichter im Stromnetz an Bedeutung. Neben ihrer Funktion der Gleichstrom-Wechselstrom-Umwandlung spielen sie eine entscheidende Rolle in der Sicherung der Spannungsqualität und Netzstabilität. Diese Entwicklung reflektiert nicht nur die Modernisierung der Stromnetze, sondern auch den Trend zu nachhaltiger Energieinfrastruktur. Regelungsalgorithmen von Wechselrichtern beeinflussen jedoch die Netzstabilität und führten bereits zu Stromausfällen. Sowohl öffentliche als auch industrielle Stromnetze leiden unter Spannungsqualitätsproblemen, verursacht durch Wechselrichter und daraus resultierenden Produktionsausfällen. Um dieser Problematik zu begegnen, sind sorgfältige Bewertung und umfassende Prüfung notwendig. Die übliche Testmethode mit idealer Spannungsquelle berücksichtigt jedoch nicht die Wechselwirkung zwischen Wechselrichtern und dem Stromnetz unter realen Bedingungen. Die Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) Prüfmethode bietet eine realistischere Testumgebung, ermöglicht die Reproduktion realer Netzbedingungen und verschiedener Fehler. PHIL-Tests erweisen sich als aussagekräftiger und realitätsnäher, indem sie die Herausforderungen aufzeigen, denen Wechselrichter im tatsächlichen Betrieb gegenüberstehen.

Keywords: Power Hardware in the Loop, Testmethode, Umrichtertest, Stabilität

1 Motivation

In einer Ära, die den globalen Fokus auf den Klimawandel und die Energiekrise des Jahres 2022 richtet, manifestiert sich der wachsende Dringlichkeitsbedarf im Bereich erneuerbarer Energien. Vor dem weiteren Hintergrund der anspruchsvollen Ziele der Europäischen Kommission mit dem Fit for 55-Paket, das eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen auf mindestens 55% des Niveaus von 1990 vorsieht, in Kombination mit der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED), muss sich die Struktur des elektrischen Stromnetzes im synchronen Netz Kontinentaleuropas in absehbarer Zukunft erheblich verändern. Mit einem kontinuierlich wachsenden Anteil erneuerbarer Energiequellen ändert sich das stationäre und dynamische Verhalten des gesamten elektrischen Stromnetzes, und es ergeben sich neue Herausforderungen und Aufgaben für Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber (ÜNB und VNB). Die Photovoltaik-Stromerzeugung nimmt dabei eine herausragende Stellung in Europa ein, insbesondere aufgrund ihrer geografischen Anpassungsfähigkeit und angesichts der beschränkten Möglichkeiten im Bereich der Wind- und Wasserkraftproduktion in bestimmten Regionen. Hierbei nimmt insbesondere der technologische Fortschritt in der Verarbeitung, Produktion und Auslegung sämtlicher Komponenten eine entscheidende Rolle ein. Durch

diesen Fortschritt erfolgt eine Kostenreduktion in erneuerbaren Energien, insbesondere im Bereich der Photovoltaikenergie. Dies führt dazu, dass die Photovoltaik als äußerst effiziente und wirtschaftlich tragfähige Energielösung herausragt, insbesondere im Kontext von Gebäudedächern.

Allerdings wurde in den letzten Jahren gelernt, dass das Stromnetz auf diese neue Entwicklung erst adaptiert werden muss. In Regionen mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energiequellen und somit einer großen Anzahl von Umrichtern kam es zu großflächigen Stromausfällen und sogar kompletten Blackouts aufgrund instabiler Wechselrichter-Netz-Wechselwirkungen. Beispiele hierfür sind das Vereinigte Königreich im Jahr 2019 (Netzfrequenzabweichung) [1], China im Jahr 2015 (Teilsynchronresonanz) und Australien im Jahr 2016 (Spannungskollaps) [2], um nur einige zu nennen. Diese Beispiele verdeutlichen die signifikante Bedeutsamkeit bereits existierender erneuerbarer Energien im elektrischen Stromsystem und die nachteiligen Folgen bei Fehlverhalten dieser.

Dabei ist das Augenmerk auf dem Herzstück des Gesamtsystem, nämlich dem Wechselrichter. Der Wechselrichter ist nicht mehr die einfache elektrische Komponente von vor zehn Jahren, die Gleichspannung in Wechselspannung umgewandelt hat, sondern hat sich in ein intelligentes, leistungselektronisches Betriebsmittel entwickelt, welches ausgeklügelte Regelungsmechanismen enthält und damit das Netz bei der Spannungs- und Frequenzhaltung unterstützen kann. Weiters werden netzbildende Umrichter in Zukunft viele Aufgaben einer Synchronmaschine übernehmen und im Angesicht der neuen EU-weiten Netzanschlussbedingungen für Stromerzeuger (RfG) [3] auch einen Teil des Netzwiederaufbaus und damit einen großen Anteil der Gesamtsystemstabilität übernehmen.

Angesichts dieser gesteigerten Verantwortung wird deutlich, dass bisherige Technologien, Analysemethoden und Standards anpassungsbedürftig sind, um einen stabilen Betrieb, eine zufriedenstellende Spannungsqualität und Versorgungssicherheit sicherzustellen [4]. Insbesondere ist zu überprüfen, ob die derzeit angewandten Testverfahren für Produkte, Netzsicherheitskonzepte im Kontext sowie Betriebsrichtlinien ausreichend sind, um die Stabilität im Netzbetrieb zu gewährleisten.

1.1 Herausforderungen in realen Stromnetzen

Um die Wechselrichter im Zusammenhang mit dem Stromnetz und der Überlegung über adaptierte Testmethoden umfassend zu verstehen, ist es essenziell, ihre Funktionsprinzipien innerhalb eines elektrischen Netzwerks darzustellen. Das Stromnetz besteht, vereinfacht dargestellt, aus Stromerzeugungsanlagen, Übertragungsleitungen, Transformatoren sowie Lasten. Der Wechselrichter nimmt hierbei eine zentrale Position für erneuerbare Erzeuger ein, indem er kontinuierlich seine Klemmenspannung überwacht, um essentielle Daten über Netzbedingungen wie Amplitude, Phase und Frequenz zu erfassen. Durch ausgeklügelte Regelalgorithmen erfolgt die Umwandlung der Gleichspannung der Photovoltaikzellen in eine mit der Netzspannung kompatible Wechselspannung, um die erzeugte Leistung ins öffentliche Netz zu übertragen.

Innerhalb dieses Systems ergeben sich für den Wechselrichter einige komplexe Herausforderungen. Bei Vorhandensein einer Impedanz zwischen dem Wechselrichter und der idealen Spannungsquelle, die typischerweise in einem realen Stromnetz aus Kabeln und Transformatoren besteht (vgl. Abbildung 1), beeinflusst der Ausgangsstrom des Wechselrichters die Spannung an seinem Netzanschlusspunkt und bildet somit einen Rückkopplungskreislauf. Ein Regelungsalgorithmus, der diese Rückkoppelung nicht hinreichend robust berücksichtigt, kann anfällig für Spannungsschwankungen sein, was wiederum zu Instabilität im Wechselrichter führen kann. In extremen Fällen, wie im Inselbetrieb, kann dies sogar zu einer allgemeinen Netzinstabilität führen. Allerdings kann bereits ein Fehlerzustand im Netz ausreichen um durch die Rückkoppelung das Netz sowie den Wechselrichter negativ zu beeinflussen.

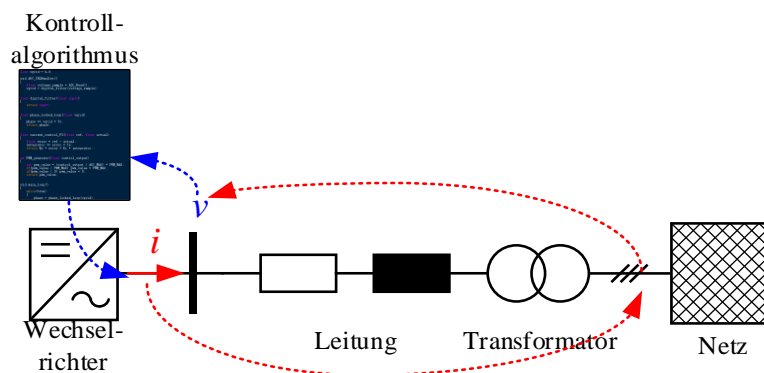


Abbildung 1: Rückkopplung zwischen Netz und Wechselrichter

1.1.1 Fehlerzustände

Bei den derzeit am meisten eingesetzten Wechselrichtern richtet sich die Regelung nach der Frequenz und Spannung des Netzes über die Phasenregelschleife, die die Grundlage aller im Wechselrichter vorhandenen Regelstrukturen ist. Tritt nun ein Fehler, beispielsweise ein Kurzschluss im Netz auf, verändern sich die Spannungskennwerte, worauf die Regelung des Wechselrichters reagiert und je nach Komplexität auch ausgleichend wirken kann.

Während eines Kurzschlusses, der mit einem starken Einbruch der Netzspannung einhergeht, wird dieser Fehler vom Netz sowie vom Wechselrichter gespeist. Zusammen mit der geänderten wirksamen Netz- und Fehlerimpedanz beeinflusst dies die Klemmenspannung des Wechselrichters im Fehlerfall. Sollte sich der Wechselrichter nicht rasch an diese Änderungen anpassen, kann dies zu Instabilität führen [4,5], die weitere Spannungsschwankungen verursacht und potenziell andere Netzkomponenten wie Schutzeinrichtungen beeinträchtigt [6].

Um unter diesen fehlerhaften Bedingungen eine stabile Leistungseinspeisung zu gewährleisten, muss der Wechselrichter schnell und präzise reagieren, indem er seinen Ausgangsstrom entsprechend den Änderungen der Klemmenspannung anpasst. Dies erfordert fortschrittliche Regelungsstrategien und schnelle Reaktionsmechanismen. Nach Behebung des Fehlers muss der Wechselrichter möglichst rasch wieder in seinen normalen Arbeitsbereich zurückkehren, um die allgemeine Netzstabilität aufrechtzuerhalten.

1.2 Zertifizierung von Wechselrichtern

Die Beurteilung, ob Wechselrichter die vorgegebenen Reaktionszeiten sowie Schutz- und Regelungsparameter einhalten, erfolgt durch Tests gemäß einschlägigen Richtlinien und Normen. In Österreich existiert hierfür die Richtlinie R25, die die spezifischen Testverfahren für Wechselrichter in der Niederspannung festlegt. Nach erfolgreichem Durchlaufen dieser Tests gelangen die entsprechenden Wechselrichter auf die sogenannte Wechselrichter-Whitelist von Österreichs Energie.

Diese Liste dient als anerkannte Referenz für Wechselrichter, die nach den nationalen Standards geprüft und zertifiziert wurden, was wiederum die Qualität und Konformität der Produkte mit den österreichischen Anforderungen gewährleistet.

2 Prüfverfahren

Die Richtlinie R25 legt detaillierte Verfahren für die Prüfung von Wechselrichtern unter Verwendung einer idealen Spannungsquelle fest. Diese Prüfmethode ist in der Energietechnik weit verbreitet und dient der Verifizierung der Leistungsfähigkeit von Betriebsmittel. Trotz ihrer weitreichenden Anwendung weist die Verwendung einer idealen Spannungsquelle spezifische Einschränkungen auf.

2.1 Prüfung mit idealer Spannungsquelle

Eine ideale Spannungsquelle kann eine dreiphasige sinusförmige Spannung erzeugen und simuliert Spannungsabfälle gemäß vordefinierten Abläufen. Während dieser Simulation bleibt die Spannung unbeeinflusst von dem angeschlossenen Testgerät, da die Spannungsquelle keinen Innenwiderstand aufweist. Dies bedeutet, dass keine Rückkopplung zwischen dem angeschlossenen Testgerät und der Spannungsquelle stattfindet. Diese spezifische Eigenschaft der idealen Spannungsquelle ignoriert jedoch genau die Rückkopplung, die durch Wechselrichter beeinflusst wird, wie zuvor beschrieben.

Da der Ausgangsstrom des Wechselrichters die Ausgangsspannung der idealen Spannungsquelle nicht beeinflussen kann, werden jegliche tatsächliche Rückkopplungswechselwirkungen zwischen dem Wechselrichter und dem Netz in dieser Testanordnung vollständig vernachlässigt. Wenn der Wechselrichter nicht in der Lage ist, während eines simulierten Netzfehlers einen stabilen Ausgangsstrom aufrechtzuerhalten, kann er auch nicht die ausgegebene Klemmenspannung unter Berücksichtigung der tatsächlichen Impedanz des Netzes beeinflussen. Dies führt zu erfolgreichen Testergebnissen, wobei mögliche Instabilitäten des Wechselrichters nicht erkannt werden.

Die Abwesenheit einer Rückkopplung in dieser Testumgebung reduziert das Niveau, auf dem die Wechselrichter die Testkriterien erfüllen müssen. Ein positives Ergebnis bei einem Test mit einer idealen Spannungsquelle garantiert daher nicht die gleichen Fähigkeiten der Fehlerreaktion und des Nachfehlerfalles in einer realen Umgebung mit tatsächlicher Netzimpedanz. Die ausschließliche Verwendung von Tests mit idealen Spannungsquellen birgt das Risiko, dass Netzbetreiber die Leistungsfähigkeit des Wechselrichters unter realen Netzbedingungen zu optimistisch einschätzen und somit potenzielle Risiken für die Netzstabilität übersehen.

2.2 Prüfung mit PHIL-Technologie

Die Simulation von realen Netzbedingungen in einem Laborumfeld, insbesondere bei der Nachbildung von Fehlerzuständen, stellt eine technisch anspruchsvolle Aufgabe dar. Der Einsatz einer physischen Netzstruktur für solche Überprüfungen hätte nicht nur Auswirkungen auf die Spannung im Labor, sondern könnte auch potenziell externe Geräte beeinträchtigen. Daher sollten künstlich erzeugte Netzstörungen vermieden werden, um unnötige Risiken für die Ausrüstung im Testumfeld zu minimieren. Zusätzlich sind physische Aufbauten unflexibel und erfordern oft umfangreiche Neukonfigurationen bei Änderungen von Testszenarien, wie z.B. die Anpassungen der Netztopologie.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, bietet die Technologie des Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) Tests eine effektive Lösung [7, 8]. PHIL stellt eine "simulierte Cockpit-Umgebung" für Betriebsmittel im Bereich der elektrischer Energiesysteme. Durch den Einsatz von Hochleistungs-Echtzeitsimulatoren und Präzisions-Leistungsverstärkern schafft PHIL eine elektrische Signalumgebung, die der eines realen Netzes sehr ähnlich ist. Anstatt die Netztopologie zu vereinfachen, imitiert PHIL tatsächlich die komplizierten Rückkopplungen und Interaktionen des Netzes. Daher ermöglicht die Verwendung der PHIL-Technologie eine präzisere Bewertung der Funktionalität und Stabilität von Wechselrichtern unter realeren Netzbedingungen, wodurch ein sicherer und stabiler Betrieb des elektrischen Energiesystems gewährleistet wird.

Diese Struktur ermöglicht eine einfache Anpassung der Testumgebung und -szenarien durch geringfügige Änderungen am Computer, was die Flexibilität der Tests erheblich erhöht. Der Informationsaustausch zwischen dem Echtzeitsimulator mit integrierter Netzinfrastruktur sowie Testszenario und dem zu testendem Gerät, in diesem Fall dem Wechselrichter, erfolgt über Leistungssignale im Megahertz-Bereich. Die Ausgangssignale des Simulators werden über die PHIL-Schnittstelle in entsprechende Spannungs- oder Stromsignale umgewandelt, die als Eingangssignal des Wechselrichters dienen. Gleichzeitig empfängt und verarbeitet der Simulator die Ausgangsleistungssignale (Spannungs- oder Stromsignale) vom Wechselrichter, um den Zustand des Netzmodells zu aktualisieren. Diese fortschrittliche Anordnung ermöglicht die umfassende Überprüfung des Wechselrichters unter realen Bedingungen des elektrischen Energiesystems und erleichtert die Bewertung seiner Stabilität unter realistischen Betriebssituationen.

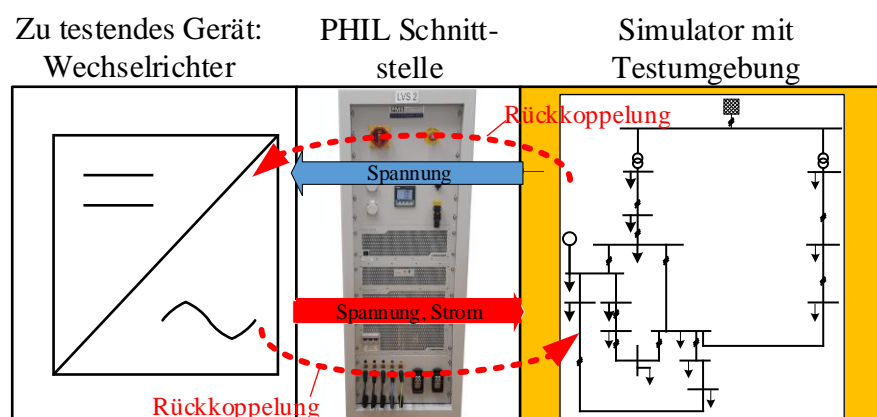


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Testsystems

3 Testaufbau

Um die wesentlichen Unterschiede zwischen Tests mit einer idealen Spannungsquelle und der Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL)-Technologie aufzuzeigen, wurden Wechselrichter verschiedener Hersteller mit einer Nennleistung von 10 kW untersucht. Dabei wurde speziell die Fault-Ride-Through (FRT)-Fähigkeit der Wechselrichter analysiert und die Ergebnisse der beiden Tests miteinander verglichen. Für eine objektive Bewertung stützt sich die Prüfung primär auf die österreichische Richtlinie TOR-Typ A [10].

FRT-Fähigkeit bedeutet dabei, dass im Falle einer Spannungsabsenkung es dem Wechselrichter obliegt, den kontinuierlichen Betrieb aufrechtzuerhalten, solange das Spannungsniveau und die Dauer des Fehlers die in den Netzcodes festgelegten Schwellenwerte nicht überschreiten. Zusätzlich muss der Wechselrichter nach Behebung des Fehlers innerhalb einer Sekunde zu seiner vorherigen aktiven Stromausgabe zurückkehren. Diese präzise zeitliche Vorgabe unterstreicht die Anforderungen an die Reaktionsfähigkeit der Wechselrichter im Falle von Spannungsabsenkungen und betont die Bedeutung einer raschen und stabilen Wiederherstellung des normalen Betriebszustands nach Fehlerbehebung. Durch diese präzise Regelung und Rückkehr zum vorherigen Betriebsniveau wird sichergestellt, dass Wechselrichter nicht nur den Netzcodes entsprechen, sondern auch einen Beitrag zur Aufrechterhaltung der Netzstabilität leisten, indem sie eine konsistente und zuverlässige Leistungsabgabe gewährleisten.

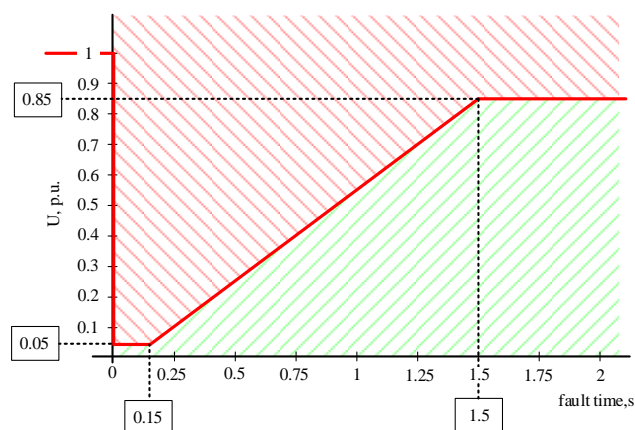


Abbildung 3: FRT-Kurve bei Spannungseinbruch

Bezüglich der Tests wurde jeder Testfall mindestens dreimal ausgeführt, um das gesamte Spektrum möglicher Phasenverschiebungen der Spannung zu erfassen. Diese repetitive Methodik erhöht die statistische Robustheit der Ergebnisse und ermöglicht ein präziseres Verständnis dafür, wie sich der Ausgangsstrom jedes Wechselrichters unter Fehlerbedingungen ändert.

Am wichtigsten ist die Auswahl eines klaren Darstellungsansatzes für den intuitiven Vergleich und die Anzeige der verschiedenen Reaktionsverhalten der Wechselrichter. Dafür wurden konkret die Ausgangsstromdaten für jeden Wechselrichter aus allen Testfällen entsprechend dem Zeitpunkt des Fehlereintritts auf Zeitpunkt Null Sekunden ausgerichtet, wodurch die dynamischen Reaktionsmerkmale jedes Wechselrichters während und nach Fehlerzuständen klar zu beobachten und zu vergleichen sind.

3.1 FRT-Fähigkeit bei idealer Spannungsquelle

Für den Vergleich mit PHIL-Testmethoden wurde zunächst die traditionelle Methode der idealen Spannungsquelle als Grundlage für die Tests angewendet. Im Verlauf des Tests variiert lediglich der Wert der Amplitude der Wechselspannung im Netz, während die Phasenlage konstant bleibt. Diese Änderung beeinflusst den Phasensynchronisations-Regelungsalgorithmus der Wechselrichter nicht. In mehreren Abstufungen des Spannungseinbruches wird der ausgegebene Strom des Wechselrichters analysiert und mit den zulässigen Grenzwerten der FRT-Anforderungen verglichen.

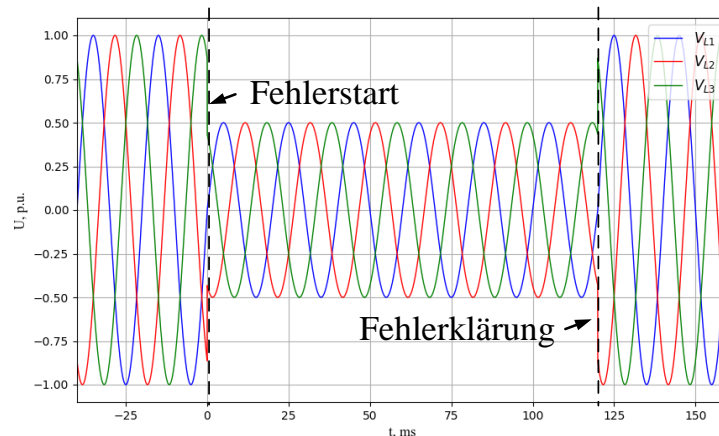


Abbildung 4: Beispiel der Kurve des Spannungseinbruches auf 0,5 p.u. der Spannung

3.1.1 Ergebnisse

Im Folgenden wird das Verhalten von zwei unterschiedlichen Wechselrichtern während der Prüfung in einem Netz mit idealer Spannungsquelle analysiert.

In sämtlichen Tests wurde zusätzlich der Gesamtklirrfaktor (Total Harmonic Distortion, THD) des Ausgangsstroms mittels Fast-Fourier-Transformation bewertet. Diese Messgröße erweist sich als äußerst relevant für die Einschätzung der Leistungsfähigkeit der Wechselrichter und spielt eine entscheidende Rolle bei den Normen zur Bewertung der Spannungsqualität sowie bei der Beschreibung der elektromagnetischen Störaussendung von Geräten in verschiedenen Umgebungen, wie sie beispielsweise in der IEC 61000 festgelegt sind.

Abbildung 5 illustriert die Spannungs-, Strom- und Leistungsverläufe von Wechselrichter A auf der linken Seite und Wechselrichter B auf der rechten Seite. In beiden Fällen wurde die Spannung für 120 ms auf 0,4 p.u. reduziert, wobei gemäß dem Verlauf der FRT-Kurve der Wechselrichter stabil am Netz bleiben muss. Im Kontext von Spannungsstützung gibt die TOR unterschiedliche Anforderungen vor: Bei Einspeisung ins Mittelspannungsnetz ist dynamische Netzstützung durch zusätzliche Einspeisung von Blindstrom gefordert. Bei Anschluss in der Niederspannung ist nur statische Spannungshaltung gefordert, wobei Anlagen die bereits über die Möglichkeit, der dynamischen Netzstützung verfügen, diese Funktion auch im Niederspannungsnetz nutzen können. Für die Wirkleistung ist nach TOR von 47,5 Hz bis 50,0 Hz eine automatische Trennung nicht zulässig aber bis 50,2 Hz keine Einschränkung hinsichtlich des Einspeisewertes definiert. Ab 50,2 Hz muss die Frequenz mit 40 % pro Hz reduziert werden und ab 51,5 Hz eine Trennung vom Netz erfolgen.

Wechselrichter A zeigt ein normkonformes Verhalten inklusive dynamischer Netzstützung, indem die Wirkleistung während des Fehlerzeitraums auf Null reduziert wird und gleichzeitig Blindleistung ins Netz eingespeist wird. Der eingespeiste Strom kehrt innerhalb von 15 ms nach Fehlereintritt wieder zu einem sinusförmigen Verlauf zurück und weist einen durchschnittlichen THD-Wert von 2,89 % auf. Bemerkenswert ist, dass nach der Fehlerbehebung mindestens 250 ms vergehen, bis der Wechselrichter wieder Wirkleistung ins Netz einspeist und somit in seinen normalen Betriebszustand zurückkehrt.

Bei genauer Betrachtung von Wechselrichter B zeigen die Strom- und Leistungsverläufe höhere THD-Werte, die im Durchschnitt bei 7,03 % liegen. Es ist ersichtlich, dass keine dynamische Spannungsstützung durch Blindleistungseinspeisung von Null vom Wechselrichter durchgeführt wird und ein anderes Regelungsverfahren für die Wirkleistung angewendet wird. Trotzdem kehrt die Wirkleistungseinspeisung nach der Fehlerbehebung innerhalb von 10 ms zurück.

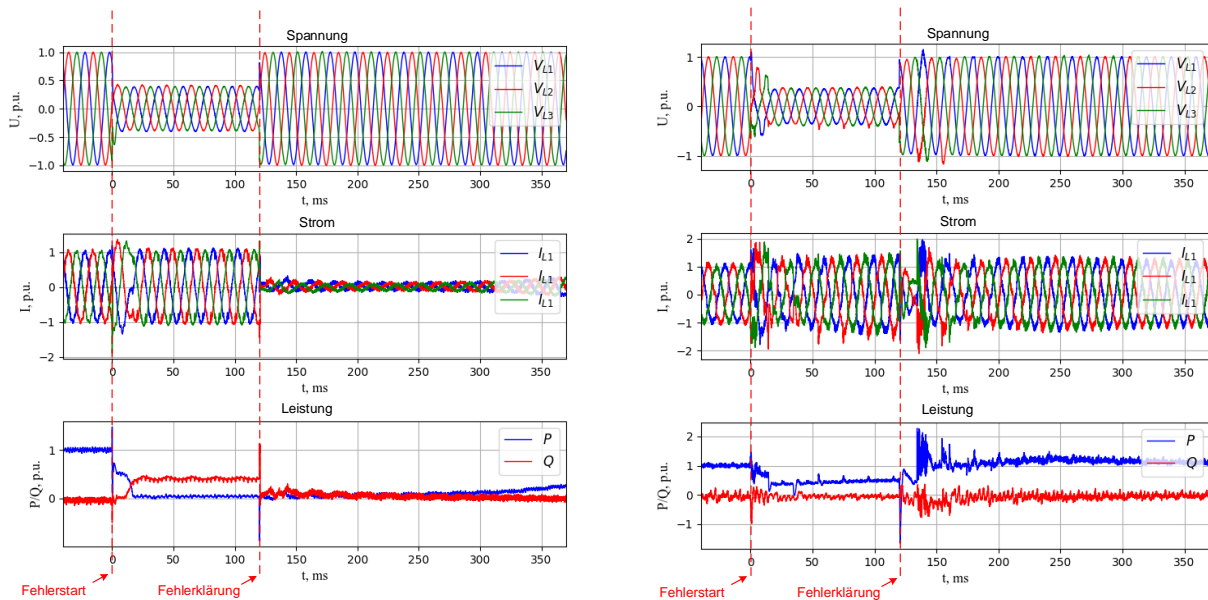


Abbildung 5: Vergleich zweier Wechselrichter bei Test mit idealer Spannungsquelle bei Spannungsabfall auf 0,4 p.u. Links: Wechselrichter A, Rechts: Wechselrichter B

3.2 FRT-Fähigkeit bei PHIL-Tests

Beim PHIL-Test wird nun eine Netzimpedanz im Simulator integriert. Um reale Bedingungen zu bewerten, wurde das komplexe Netzmodell der Arbeitsgruppe CIGRE C6.04.02 als Benchmark-Netz eingesetzt [9,11]. Der zu testende PV-Wechselrichter ist über einen 20/0,4 kV Transformator mit diesem Netzmodell verbunden, um das 20 kV-Level des Mittelspannungsnetzes zu erreichen.

3.2.1 Ergebnisse

Derselbe zuvor durchgeführte Test wurde nun in der PHIL-Testumgebung vollzogen. In dieser Umgebung wird mit einem realen Netz gearbeitet, das als geschlossener Mittelspannungs-Ring ausgeführt ist. Bei Auftreten eines Fehlers kann die Fehlerstelle mit Leistungsschalter isoliert werden, um so die Spannung im übrigen Netz wiederherzustellen. Die Schutzsysteme der Leistungsschalter weisen unterschiedliche Ansprechzeiten auf, was dazu führt, dass ein

Leitungsende vor dem anderen getrennt wird. Dies resultiert in einer zweistufigen Restspannung. Zudem ändert sich die Netztopologie, sobald die fehlerhafte Leitung an beiden Enden abgeschaltet ist, was Auswirkungen auf den Spannungsphasenwinkel hat. Diese komplexe Fehlerdynamik bietet somit eine präzisere und praxisrelevantere Grundlage für die Bewertung von Wechselrichtern.

In Abbildung 6 wird erneut das Verhalten von Wechselrichter A auf der linken Seite und von Wechselrichter B auf der rechten Seite dargestellt. Das zweistufige Schutzkonzept ist in den Spannungsverläufen durch den ersten Spannungsabfall kurz nach Fehlereintritt und den anschließenden Spannungsanstieg bei 60 ms deutlich erkennbar. Nach 60 ms öffnet der erste Leistungsschalter und isoliert seine Seite der Leitung, wodurch die Spannung ansteigt. Wechselrichter A reagiert dabei normgemäß mit einer Erhöhung der Blindleistung. Hingegen zeigt Wechselrichter B eine Reduktion der Blindleistung. Nach weiteren 120 ms öffnet auch der Leistungsschalter an der anderen Seite, und die Spannung kann vollständig wiederhergestellt werden. Daraufhin passt Wechselrichter A seine Wirk- und Blindleistungseinspeisung an, um in den Vor-Fehler-Zustand zurückzukehren. Im Gegensatz dazu schafft es Wechselrichter B nicht, seine Leistungsabgabe bzw. Stromabgabe zu stabilisieren, woraufhin der Regelalgorithmus nach 120 ms die Abschaltung des Wechselrichters einleitet und ihn vom Netz trennt.

Dieses beobachtete Verhalten zeigt deutliche Unterschiede im Vergleich zum Test mit idealer Spannungsquelle. Während beide Wechselrichter nach der Fehlerbehebung im Test mit idealer Spannungsquelle erfolgreich wieder zum Netz synchronisieren, gelingt dies im PHIL-Test nur Wechselrichter A.

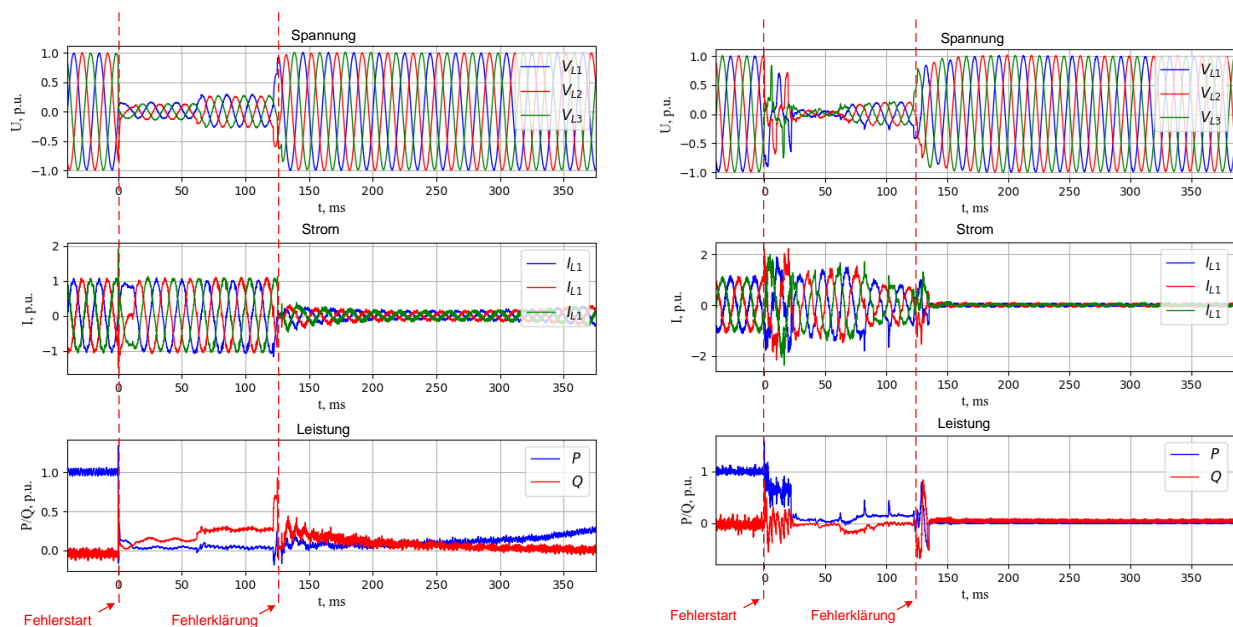


Figure 6: Vergleich zweier Wechselrichter bei Test mit PHIL-Testumgebung bei Spannungsabfall.
Links: Wechselrichter A, Rechts: Wechselrichter B

4 Zusammenfassung

Durch die verstärkte Integration von Wechselrichtern im Stromsystem, verbunden mit ihrer kontinuierlichen technischen Weiterentwicklung, nehmen Wechselrichter eine maßgebliche Rolle ein. Ihre Regelalgorithmen tragen bereits zur Stabilisierung von Spannung und Frequenz bei und können bei ausgereifter Programmierung während Netzfehlern Blindleistung bereitstellen. Um festzustellen, ob die Leistungsfähigkeit eines Wechselrichters ausreicht, um diesen Aufgaben gerecht zu werden, bedarf es jedoch rigoroserer Tests als derzeit standardmäßig angewandt. In diesem Zusammenhang wird die Power Hardware-in-the-Loop (PHIL)-Testumgebung aufgrund ihrer schnellen Anwendbarkeit und einfachen Anpassung vorgeschlagen.

Die Tests in dieser Studie zeigen deutlich, dass ein erfolgreich bestandener Test bei einer idealen Spannungsquelle und die daraus resultierende Zertifizierung und Zulassung in Österreich allein keine umfassende Aussagekraft darüber hat, wie sich ein Wechselrichter in einem typischen Mittelspannungsnetz unter realen Bedingungen verhält. Diese Erkenntnisse verdeutlichen die Vielfältigkeit der Aspekte bezüglich Leistungsfähigkeit, Reaktionsfähigkeit und Stabilität von Wechselrichtern in dynamischen Netzumgebungen.

Insbesondere hat sich herausgestellt, dass die Performance eines Wechselrichters stark vom implementierten Regelalgorithmus des Herstellers abhängt, und demnach nicht jeder Wechselrichter identische Eigenschaften aufweist. Die aufgeführten Erkenntnisse ermöglichen eine eingehende Analyse und Bewertung einzelner Modelle. Dies ist von entscheidender Bedeutung, um eine fundierte Grundlage für die Auswahl und Implementierung dieser Technologien im Energiesystem zu schaffen, insbesondere im Hinblick auf die Markenauswahl.

5 Bibliografie

- [1] Bialek, J. "What does the GB power outage on 9 August 2019 tell us about the current state of decarbonised power systems?." *Energy Policy* 146 (2020): 111821.
- [2] Operator, A. E. M. Integrated Final Report SA Black System 28 September 2016. Australia Energy Market Operator 2017, Available: http://www.aemo.com.au/-/media/Files/Electricity/NEM/Market_Notices_and_Events/Power_System_Incident_Reports/2017/Integrated-Final-Report-SA-Black-System-28-September-2016.pdf.
- [3] https://www.entsoe.eu/network_codes/rfg/
- [4] Zhang, Z.; Lehmal, C.; Hackl, P.; Schuerhuber, R. Transient Stability Analysis and Post-Fault Restart Strategy for Current-Limited Grid-Forming Converter. *Energies* 2022, 15, 3552. <https://doi.org/10.3390/en15103552>
- [5] Zhang, Z., et al. "Domain of attraction's estimation for grid connected converters with phase-locked loop." *IEEE Transactions on Power Systems* 37.2 (2021): 1351-1362.
- [6] Zhang, Z., et al. "Study of stability after low voltage ride-through caused by phase-locked loop of grid-side converter." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 129 (2021): 106765.
- [7] Brestan, M. "Performance of a digital distance protection relay during short circuit in presence of a converter connected grid." *International Conference & Exhibition on Electricity Distribution: CIRED 2023*. 2023.
- [8] Zhang, Z., Schürhuber, R., Fickert, L., Friedl, K., Chen, G., & Zhang, Y. (2021). Systematic Stability Analysis, Evaluation and Testing Process and Platform for Grid-connected Power Electronic Equipment. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 138(1), 20-30. <https://doi.org/10.1007/s00502-020-00857-y>

- [9] Zhang, Z., Fickert L., and Zhang Y. "Power hardware-in-the-loop test for cyber physical renewable energy infeed: Retroactive effects and an optimized power Hardware-in-the-Loop interface algorithm." *2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. IEEE, 2016.
- [10] <https://www.e-control.at/documents/1785851/1811582/TOR+Erzeuger+Typ+A+V1.0.pdf/6342d021-a5ce-3809-2ae5-28b78e26f04d?t=1562757767659>
- [11] Hackl P., Lehmal C., Zhang Z., and Schuerhuber R., "A novel modular combinable hardware-in-the-loop platform for stability investigations of converter-driven power grids," pp. 258–262, doi: 10.1049/icp.2022.2762.