

Nichtinvasive Messung von Netzimpedanzen zur Beurteilung von Netzurückwirkungen

Noninvasive Measurement of the network impedance for power quality assessment

Dr.-Ing., Juan Velásquez, Hubert Göbel GmbH, Bönen, Deutschland, j.velasquez@hgmes.de

M. Sc., Alexander Lübke, Hubert Göbel GmbH, Bönen, Deutschland, a.luebke@hgmes.de

Dipl.-Ing., Bernhard Grasel, NEO Messtechnik GmbH, Zöbern, Österreich, bernhard.grasel@neo-messtechnik.com

Kurzfassung

Durch eine stetige Zunahme an Gleichstromverbrauchern mit Netzteilen, Frequenzumrichtern zur Leistungs- und Drehzahlregelung oder weiteren nichtlinearen Lasten können die Oberschwingungspegel in einem Netz derart zunehmen, dass es zu einer Störung oder zu einer unzulässigen Belastung von anderen Komponenten kommt. Daher ist es sinnvoll, schon in der Planungsphase einer Neuanlage beurteilen zu können, inwiefern von ihr Netzurückwirkungen ausgehen werden. Der Bedarf, die Netzqualität detaillierter zu überwachen und ggf. Gegenmaßnahmen zu ergreifen, steigt dadurch. Eine wichtige Größe in diesem Zusammenhang insbesondere für die Auslegung von Neuanlagen ist die frequenzabhängige Netzimpedanz. Dieser Beitrag beschreibt einerseits ein Verfahren zur nichtinvasiven Messung der Netzimpedanz, welches auf eine einfache Art und Weise in die Beurteilung der Netzqualität integriert werden kann. Das Verfahren basiert auf der Auswertung von transienten Vorgängen im Netz, die das Frequenzspektrum anregen. Als Lösung für die Niederspannung wurde eine Anregungseinheit entwickelt, die für die Erzeugung geeigneter Anregungen im Netz sorgt. Für Messungen in der Mittelspannung, Hoch- und Höchstspannung werden transiente Vorgängen im Netz (z.B. der Einschaltvorgang eines Transformators oder die Zuschaltung einer Freileitung) zur Anregung des Frequenzspektrums verwendet. Andererseits illustriert dieser Beitrag anhand von Fallbeispielen die Anwendung sowie den Mehrwert der messtechnischen Bestimmung von Netzimpedanzen bei der Aufklärung von Netzurückwirkungen.

Abstract

Due to a continuous increase in DC loads with power supplies, frequency converters for power and speed control or other non-linear loads, the harmonic levels in a network can increase to such an extent that a disturbance or an impermissible stress on other components occurs. Already in the planning phase it is therefore useful to be able to assess whether a new plant will have an impact on the power quality. This increases the need to monitor the power quality in more detail and, if necessary, to take countermeasures. An important parameter in this context, especially for the design of new plants, is the frequency-dependent network impedance. This paper describes on the one hand a method for a non-invasive measurement of the network impedance, which can be integrated in a simple way into the assessment of the power quality. The method is based on the evaluation of transients in the network, which excite the frequency spectrum. As a solution for low voltage, an excitation unit was developed, which ensures the generation of suitable excitations in the network. For measurements in medium voltage, the high voltage and the extra high voltage level transient events in the grid (e.g. the energization of a power transformer or the switching of an overhead line) are used for the excitation of the frequency spectrum. On the other hand, this paper illustrates by a case study the application as well as the benefit of the measurement of network impedances in the clarification of power quality issues.

1 Einleitung

Die elektrische Energieversorgung von der Niederspannung bis hin zu der Höchstspannung ist heutzutage einer Reihe von Veränderungen ausgesetzt. Sowohl in industriellen als auch in öffentlichen Netzen werden zur effizienten Nutzung der elektrischen Energie zunehmend eine Vielzahl leistungselektronischer Energiewandler eingesetzt – vom Schaltnetzteil und der Energiesparlampe im Watt-Bereich über den Walzantrieb und die Elektrolyse im Megawatt-Bereich bis hin zur Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) im Gigawatt-Bereich. Es wird

ebenfalls darüber nachgedacht, DC-Netze als Ergänzung zu den klassischen AC-Netzen zu errichten, wie ein Positionspapier des österreichischen Verbands für Elektrotechnik darstellt [1].

In der Niederspannung ist damit zu rechnen, dass vor allem die Anzahl von PV-Anlagen sowie die Anzahl von Ladestationen und Wärmepumpen stetig steigt. In der Mittelspannung ist zu erwarten, dass die Einspeisung aus erneuerbaren Energien (Windkraftanlagen und PV-Anlagen) ebenfalls steigt, wie die aktuelle Fassung einer Studie belegt [2].

Diese Veränderungen stehen stark im Zusammenhang mit einer Zunahme leistungselektronischer Anlagen (LEA) im Netz, welche zur Beeinträchtigung der Spannungsqualität führen können. Dementsprechend ist mit einer kontinuierlichen Veränderung der Netzqualitätssituation im Netz zu rechnen.

Daher ist es sinnvoll, sowohl in der Planungsphase einer Neuanlage als auch in Bestandsanlagen beurteilen zu können, inwiefern Netzzurückwirkungen auftreten können. Um gewährleisten zu können, dass durch den Betrieb eines Gerätes bzw. durch den Betrieb einer Anlage keine Netzzurückwirkungen auftreten, werden in der Normenreihe IEC 61000-3-X Grenzwerte für die Störaussendung von Geräten und Anlagen festgelegt. Die Festlegung dieser Grenzwerte haben zum Ziel, dass die Gesamtstöraussendung einer Installation immer unterhalb eines bestimmten Verträglichkeitspegel liegt, sodass eine ausreichende Abstand zwischen der Gesamtstöraussendung und der Störfestigkeit der Geräten/Anlagen herrscht (siehe **Bild 1**).

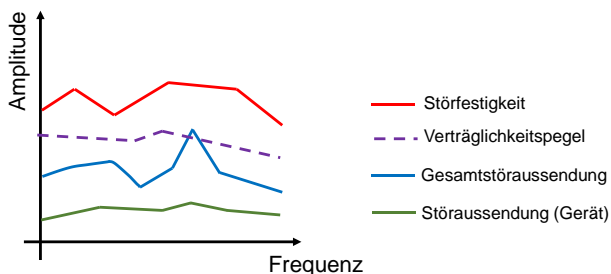


Bild 1 Darstellung des Zusammenhangs zwischen Störaussendung, Verträglichkeitspegel und Störfestigkeit (Verträglichkeitskoordination)

Bei der Betrachtung von Grenzwerten für die Störaussendung wird in der Normenreihe IEC 61000-3-X zwischen Geräten und Anlagen unterschieden. Für Geräte mit einem Nennstrom kleiner gleich 16 A (230 V) werden Grenzwerte für die Störaussendung in den dementsprechenden Normen (z.B. IEC 61000-3-2) festgelegt. Diese Grenzwerte sind unabhängig von der Netzimpedanz definiert. Für Großgeräte und Anlagen mit einer Anschlussleistung größer 52 kVA (75 A bei 400 V) gibt es technische Richtlinien, die zur Festlegung von Grenzwerten gelten. Ein Beispiel dafür sind die D-A-CH-CZ technische Regeln für die Beurteilung von Netzzurückwirkungen [3]. Wie in [3] beschrieben, ist für eine Beurteilung von Netzzurückwirkungen von Anlagen ($I_r > 75$ A) Kenntnis über die Netzimpedanz des Netzes erforderlich. In der 3. Ausgabe der DACH-CZ technischen Regeln wird auf die Bedeutung der frequenzabhängigen Netzimpedanz hingewiesen. Es wird ebenfalls eine Methodik vorgeschlagen, die eine Beurteilung von Netzzurückwirkungen unter Berücksichtigung von gemessenen, berechneten oder eingeschätzten Netzimpedanzen erfolgt. Die Methodik basiert auf sogenannten Resonanzfaktoren.

Obwohl der Bedarf nach einer messtechnischen Bestimmungen von Netzimpedanzen groß ist, findet in der Realität selten eine Netzimpedanzmessung statt. Der Grund dafür ist, dass es zum jetzigen Zeitpunkt nur sehr wenige kommerzielle messtechnische Lösungen dafür gibt. Diese wenigen Lösungen beschränken sich hauptsächlich auf die Niederspannung und die Mittelspannung. Aufgrund der fehlenden Lösungen für die Hoch- und Höchstspannung, werden in der Regel anstatt von Messungen Netzberechnungen zur Ermittlung von Netzimpedanzen durchgeführt. Obwohl eine rechnerische Ermittlung von Netzimpedanzen bei diesen Spannungsebenen sinnvoll ist, fordert diese Vorgehensweise eine Validierung der Netzberechnungen. Auch hierfür eignet sich eine Messung der frequenzabhängigen Netzimpedanz.

Als Beitrag zur Verbesserung der Beurteilung von Netzzurückwirkungen wurde im Rahmen von Forschungstätigkeiten bei der Hubert Göbel GmbH ein Verfahren zur nichtinvasiven Messung der frequenzabhängigen Netzimpedanz entwickelt. Das Verfahren ist so konzipiert, dass die Messung auf eine einfache Weise in ein Netzqualitätsmessgerät integriert werden kann. Im Zusammenarbeit mit der Firma NEO Messtechnik GmbH wurden Tests zur Verifikation der Genauigkeit der entwickelten Algorithmen durchgeführt.

2 Verfahren zur nichtinvasiven Messung der Netzimpedanz

2.1 Allgemeines

Zur Bestimmung der frequenzabhängigen Netzimpedanz wird grundsätzlich zwischen zwei verschiedenen Messverfahren unterschieden. Es gibt zum einen das invasive Verfahren, welches darauf abzielt, durch eine externe Quelle ein Strom- oder Spannungssignal an dem Netzverknüpfungspunkt (NVP), wo die Netzimpedanz von Interesse ist, einzuprägen. Auf der anderen Seite existieren die nichtinvasiven Verfahren, bei denen die im Netz vorhandenen Spannungs- und Stromsignale (z.B. Zu- und Abschalten von Lasten) genutzt und ausgewertet werden, um die Netzimpedanz zu bestimmen [4].

Nichtinvasive Verfahren kennzeichnen sich dadurch, dass sie das zu untersuchende Netz nicht beeinflussen. Sie beruhen auf der Messung von Spannungen und Strömen am NVP. Das Grundprinzip einer nichtinvasiven Messung ist in [4] beschrieben.

2.2 Beschreibung des Verfahrens

2.2.1 Allgemeines

Über das im **Bild 2** dargestellte Ersatzschaltbild eines Netzes lässt sich das Grundprinzip der Netzimpedanzmessung erläutern. Zur Anregung des Netzes wird eine Last über

den Schalter (S) zu- und abgeschaltet. Durch die Schaltaktionen entsteht ein Strom I_h , der Oberschwingungen beinhaltet. Der Strom I_h verursacht einen Spannungsabfall über der Netzimpedanz Z_{Netz} . Demensprechend enthält ebenfalls die Spannung am NVP U_{h_Last} Oberschwingungen. Über eine Fourier-Transformation der Zeitverläufe von Spannung und Strom wird für die Netzzustände 1 und 2 die harmonischen Anteile (U_h und I_h) berechnet. Anschließend erfolgt eine Berechnung der frequenzabhängigen Netzimpedanz gemäß der **Formel 1**. Eine Voraussetzung zur Anwendung der **Formel 1** ist die Annahme, dass die Hintergrundharmonischen des Netzes (U_{h_Netz}) bei den ausgewählten Netzzuständen 1 und 2 nahezu konstant bleiben.

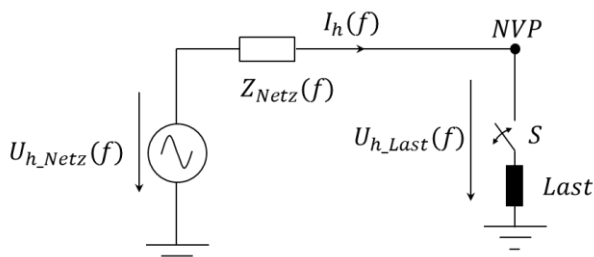


Bild 2 Grundprinzip einer nichtinvasiven Messung der Netzimpedanz

$$Z_{Netz}(f) = \frac{U_{h_Last2}(f) - U_{h_Last1}(f)}{I_{h1}(f) - I_{h2}(f)} \quad \text{Formel 1}$$

U_{h_Last1} : harmonische Spannungen an der Last beim Netzzustand 1
 U_{h_Last2} : harmonische Spannungen an der Last beim Netzzustand 2
 I_{h_Last1} : harmonische Ströme beim Netzzustand 1
 I_{h_Last2} : harmonische Ströme beim Netzzustand 2

Es ist darauf zu achten, dass eine Berechnung der Netzimpedanz nach der **Formel 1** keine Neuigkeit darstellt. In verschiedenen Veröffentlichungen wird auf die Anwendung der Formel hingewiesen wie zum Beispiel in [4]. Allerdings gibt es wie vorher erwähnt nur wenige handelsübliche Messgeräte, die eine Netzimpedanzmessung ermöglichen.

Obwohl die Berechnung nach der **Formel 1** einfach erscheint, müssen für eine brauchbare und genaue Berechnung der Netzimpedanz unter anderem folgende Faktoren berücksichtigt werden:

- Auswahl ein geeignetes Verfahren zur Veränderung von Netzzuständen. Um die Netzimpedanz berechnen zu können, muss eine ausreichende Anregung vorhanden sein.
- Hochgenaue Messtechnik zur Aufzeichnung von Spannung und Strom
- Intelligente Signalverarbeitung zur automatischen Erkennung und Festlegung von Netzzuständen
- Robustheit der Berechnung gegenüber veränderlichen Hintergrundharmonischen

Bei der Entwicklung des Verfahrens wurde auf die oben genannten Faktoren geachtet. Der Hauptfokus wurde auf die Messung von Netzimpedanzen in der Niederspannung gelegt, obwohl das Verfahren in sich für alle Spannungsebenen geeignet ist. Der Messaufbau ist in **Bild 3** schematisch dargestellt. Für die Durchführung der Messung wird eine Anregungseinheit an das Netz angeschlossen. Sowohl der Strom als auch die Spannung am Eingang der Anregungseinheit werden gemessen. Diese werden über ein Aufzeichnungsmessgerät mit einer Abtastrate im Bereich von 500 kHz bis 1 MHz aufgezeichnet. Die Ergebnisse der Aufzeichnung werden in eine Matlab-Datei überführt. Anschließend wird die Matlab-Datei in die Analysesoftware hochgeladen, wo die Berechnung der Netzimpedanz stattfindet.

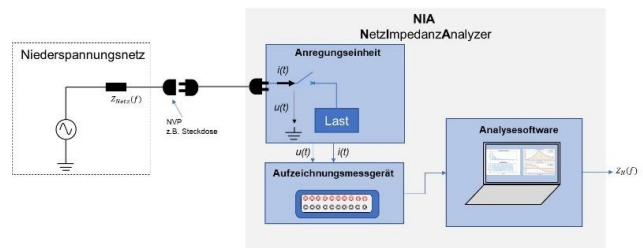


Bild 3 Schematische Darstellung des Messaufbaus

Für die Entwicklung des Verfahrens wurde zur Anregung eine generische Anregungseinheit gebaut. Die Einheit wurde so konstruiert, dass verschiedene Arten von Lasten (Induktivitäten, Kapazitäten, Widerstände oder LCR-Kombinationen) als Anregung verwendet werden können. Diverse Untersuchungen wurden durchgeführt, um geeignete Anregungen zu erzielen. Es wurden ebenfalls verschiedene Arten von Schaltern in der Anregungseinheit verbaut (Solid State Relais, Thyristor-Steller mit Phasenanschnittsteuerung (PAS), magnetische Schalter). Es wurde festgestellt, dass die Verwendung von Widerständen als Last im Kombination mit dem Schalten über eine PAS sehr gute Ergebnisse liefert.

Als Beispiel werden im **Bild 5** die Zeitverläufe von Strom und Spannung gezeigt, die im Rahmen einer Netzimpedanzmessung eines 400 V-Anschlusses aufgezeichnet worden sind. Der Zeitabschnitt vor dem Schalten der PAS (Zeit=0,58 s) entspricht dem Netzzustand 1 während der Zeitabschnitt nach dem Schalten der PAS (Zeit>0,58 s) dem Netzzustand 2 entspricht.

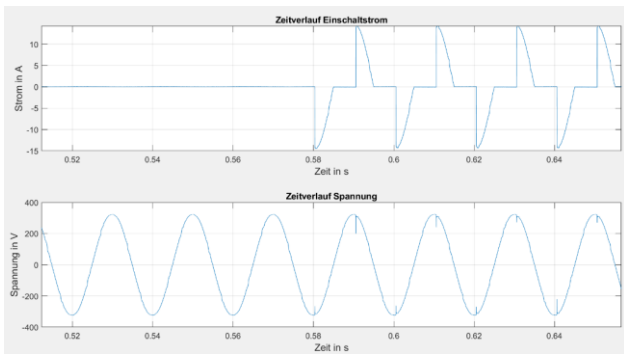


Bild 5 Aufgezeichnete Zeitverläufe von Strom und Spannung

Das **Bild 6** zeigt die Ausgabe des Ergebnisses der Netzimpedanzmessung im reduzierten Frequenzbereich bis 50 kHz.

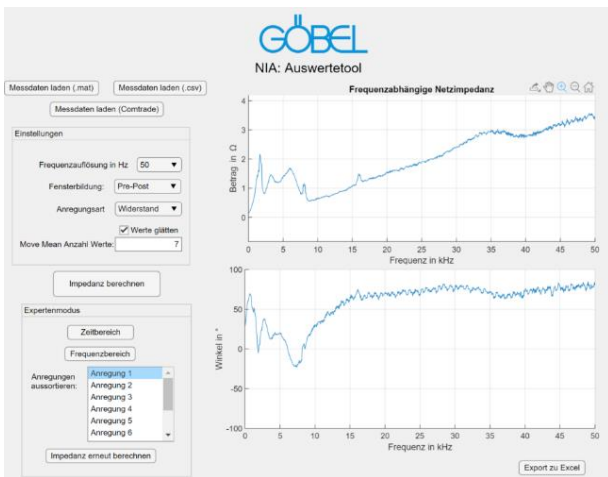


Bild 6 Ergebnis der Netzimpedanzberechnung

2.2.2 Validierung des entwickelten Verfahrens

Zur Verifikation des Verfahrens wurden im ersten Schritt Simulationen in der Software ATP-EMTP durchgeführt. Es wurde beispielsweise der Einschaltvorgang eines Transformators simuliert. Das **Bild 7** zeigt den Simulationsaufbau. In der Simulation wurde die Netzimpedanz als eine RLC-Parallelschaltung ($R=11 \Omega$, $L=0,9 \text{ mH}$ und $C=31 \mu\text{F}$) dargestellt. Aus der Simulation wurden die zeitliche Verläufe von Spannung und Strom am Eingang des Transformators ermittelt. Anschließend wurden aus den Zeitverläufen die Netzimpedanz berechnet. Dem **Bild 8** kann entnommen werden, dass eine gute Übereinstimmung zwischen der berechneten Netzimpedanz und der Referenz (Frequenzgang der RLC-Schaltung) gegeben ist.

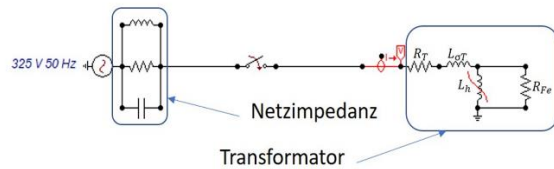


Bild 7 Nachbildung des Netzes zur Verifikation des Verfahrens

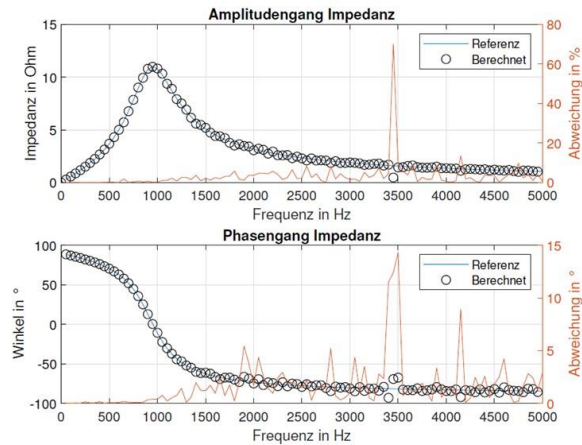


Bild 8 Ergebnis der Netzimpedanzberechnung aus den Simulationsergebnissen

Im einem zweiten Schritt wurden Messungen durchgeführt, um die Genauigkeit der entwickelten Algorithmen zu verifizieren. Eine Herausforderung bei der messtechnischen Validierung des Verfahrens liegt darin, eine valide Referenz für die zunächst unbekannte Netzimpedanz zu bekommen. Durch die Verwendung einer bekannten Vorschaltimpedanz zwischen dem Netz und der Anregungseinheit kann unter Vernachlässigung der Netzimpedanz der Impedanzwert der Vorschaltimpedanz bestimmt werden. Dieser Messaufbau ist im **Bild 9** dargestellt. In diesem Fall wurde das Schalten eines Kondensators als Anregung verwendet. Aus den aufgezeichneten Zeitverläufe von Spannung und Strom am Eingang des Kondensators wurde die Gesamtimpedanz auf der linken Seite des Kondensators ermittelt (Reihenschaltung zwischen der Netzimpedanz Z_{Netz} und der Reihenimpedanz (RC-Glied). Unter der Voraussetzung, dass der Betrag der Reihenimpedanz wesentlich größer ist als der Betrag der Netzimpedanz, darf die Reihenimpedanz als Referenznetzimpedanz betrachtet werden.

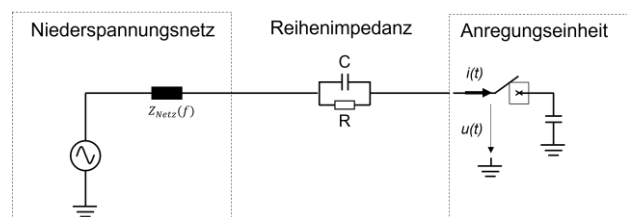


Bild 9 Messaufbau für die Validierung des Verfahrens

Das **Bild 10** zeigt einen Abgleich zwischen der gemessenen Netzimpedanz (Netzimpedanz mit RC-Reihenimpedanz, blaue Kurve) mit dem ermittelten Frequenzgang der RC-Reihenimpedanz (rote Kurve). zur Validierung der Genauigkeit der Netzimpedanzmessung.

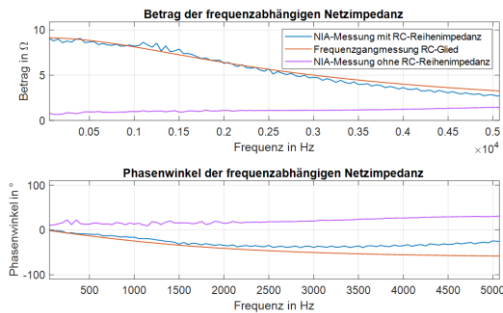


Bild 10 Abgleich zwischen der gemessenen Netzimpedanz mit der RC-Reihenimpedanz (blaue Kurve) und Impedanz der RC-Reihenimpedanz (rote Kurve)

Darüber hinaus wurden in Zusammenarbeit mit der NEO Messtechnik GmbH Messungen durchgeführt, bei denen die Messergebnisse eines kommerziellen Netzimpedanzmessgeräts als Referenz genommen wurden. Die Ergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung zwischen der Messung mit dem kommerziellen Messgerät und dem betrachteten Verfahren im Frequenzbereich bis 50 kHz.

3 Fallbeispiele

Um den Mehrwert einer Messung der frequenzabhängigen Netzimpedanz zu illustrieren, wird in diesem Kapitel ein Fallbeispiel aus der Praxis erläutert. Es handelt sich um eine Messung zur Aufklärung der Ursachen von Netzqualitätsproblemen im Niederspannungsnetz eines Wohngebietes. In der Nähe dies Wohngebietes befindet sich eine Wasserpumpstation. Im Zuge einer Modernisierung der Station wurde die Pumpe mit einem drehzahleregelten Antrieb nachgerüstet, was in Hinblick auf die Verbesserung der Energieeffizienz vorteilhaft ist. Nach dem Einbau des benötigten Frequenzumrichters kam es vermehrt zu Beschwerden von Anwohnern, die in einem benachbarten Wohngebiet wohnen. Anhand von PowerQuality-Messungen und durch einen Abgleich des zeitlichen Auftretens der Probleme bei den Anwohnern mit den Betriebszeiten des drehzahleregelten Antriebs wurde ersichtlich, dass der nachgerüstete Frequenzumrichter zu den Problemen führt. Auch die Installation eines Filters und eine Anpassung der Schaltfrequenzen des Frequenzumrichters führte zu keiner signifikanten Verbesserung, sodass der Antrieb nur noch ungeregelt im Stern-Dreieck-Betrieb betrieben werden darf.

Zur Untersuchung, weshalb es durch den Betrieb des Frequenzumrichters zu derart starken Netzurückwirkungen kommt, wurde in dem Netzgebiet an drei verschiedenen Stellen die Netzimpedanz gemessen (Siehe **Bild 11**). Zuerst wurde direkt an der Ortsnetzstation gemessen. Da das

dahinterliegende Netz nicht abgetrennt werden kann, ergibt sich eine Parallelschaltung von dem vor- und dem nachgelagerten Netz.

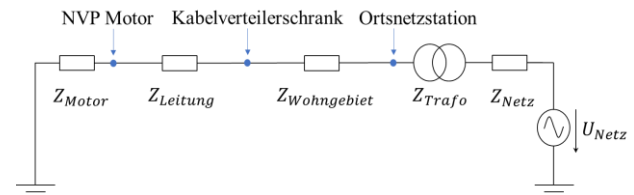


Bild 11 Skizze der durchgeführten Messkampagne

Hierbei wird die Netzimpedanz im niederfrequenten Bereich durch die Impedanz des vorgelagerten Mittelspannungsnetzes und die Transformatorimpedanz dominiert (siehe **Bild 12**). Es fällt auf, dass die Impedanz der einzelnen Phasen ab 4 kHz etwas unterschiedlich verlaufen. Bei Frequenzen um die 16 kHz waren messbare Oberschwingungen im Netz vorhanden, die zu Ausreißern in der Messung geführt haben und an dieser Stelle noch nicht aussortiert wurden.

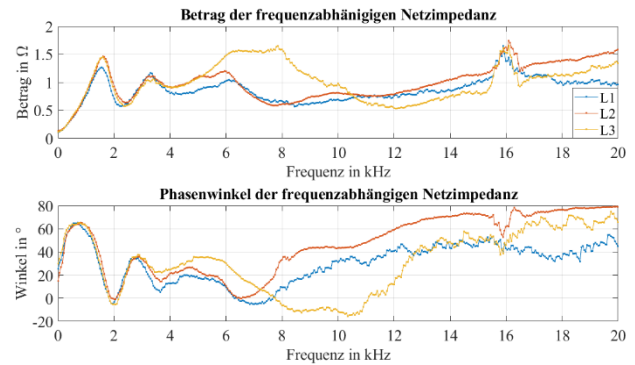


Bild 12 Gemessene frequenzabhängige Netzimpedanz an der Ortsnetzstation

Bei zunehmender Entfernung der Messstelle von der Ortsnetzstation, wie an der Messstelle am Kabelverteilerschrank oder am NVP des Motors, findet im niederfrequenten Bereich eine Erhöhung der Netzimpedanz um die Impedanz $Z_{Wohngebiet}$ bzw. $Z_{Leitung}$ statt. Es zeigt sich, dass speziell die Impedanz $Z_{Leitung}$ zu einer starken Zunahme der Netzimpedanz am NVP des Motors führt (siehe **Bild 13**). Da es sich bei dieser Leitung um eine Stichleitung handelt, war davon auszugehen, dass sie zu einer stärkeren Impedanzhöhung führt als eine vergleichbare Leitung in einem vermaschten Netz.

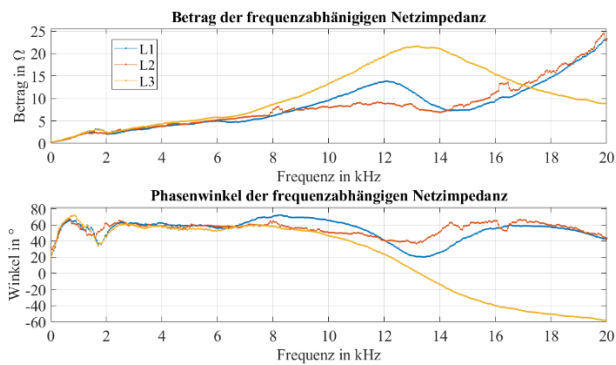


Bild 13 Gemessene frequenzabhängige Netzimpedanz am NVP des Motors

Mithilfe der frequenzabhängigen Netzimpedanzmessung konnte festgestellt werden, dass die Stickleitung am NVP des drehzahlgeregelten Antriebs die tatsächliche Ursache für die starken Netzurückwirkungen ist.

Die Tatsache, dass sowohl der Frequenzumrichter normkonform ausgelegt und hergestellt wurde als auch keine Vorgaben für die frequenzabhängige Netzimpedanz an Netzverknüpfungspunkten in Niederspannungsnetzen existieren, zeigt eine Normungslücke auf. Mithilfe der frequenzabhängigen Netzimpedanzmessung lassen sich ungünstige Netzimpedanzen im elektrischen Netz feststellen, noch bevor es zum Auftreten von unzulässigen Netzurückwirkungen kommt.

4 Zusammenfassung

Das in diesem Beitrag beschriebene Verfahren ermöglicht eine Netzimpedanzmessung über einen weiten Frequenzbereich durch das gezielte Zuschalten von Lasten im elektrischen Netz. In Abhängigkeit von dem Frequenzspektrum, welches von der zugeschalteten Last angeregt wird, ist eine Bestimmung der Netzimpedanz bis zu Frequenzen von 150 kHz möglich. Zur Validierung des Verfahrens wurde sowohl die Berechnung rein simulativ als auch die gesamte Messung anhand von Referenzimpedanzen und Referenzmessgeräten plausibilisiert. Das vorgestellte Fallbeispiel zeigt die Anwendung und die Relevanz der frequenzabhängigen Netzimpedanzmessung in der Praxis. So lassen sich vor Ort ungünstige Impedanzen bzw. Resonanzstellen in der Netzimpedanz erkennen, wodurch sich künftig unzulässige Oberschwingungspegel vorhersagen lassen und somit proaktiv das elektrische Netz verbessert werden kann.

5 Ausblick

Als Ausblick ist es geplant, das Verfahren zur Messung der frequenzabhängigen Netzimpedanz in der Mittel- Hoch- und Höchstspannungsebene zu testen und zu optimieren. Erste Testmessungen sind durchgeführt worden. Die Ergebnisse zeigen grundsätzlich sehr plausible Werte. Es wurde allerdings festgestellt, dass aufgrund eines niedrigen Signal/Rausch-Verhältnisses eine verbesserte Messtechnik

(Spannungsmessung, Strommessung, PQ-Messgerät) erforderlich ist. Ein weiterer Punkt ist die künftige Verwendung der entwickelten Algorithmen zur Messung der Netzimpedanz über ein kommerzielles PQ-Messgerät. Somit wäre es in naher Zukunft möglich, die klassische PQ-Messung mit einer Netzimpedanzmessung zu kombinieren, was einen Mehrwert bei der Beurteilung von Netzurückwirkungen darstellt.



Bild 14 Prototypen eines kommerziellen Messgerätes für eine kombinierte PQ- und Netzimpedanzmessung

6 Literatur

- [1] Positionspapier „Innovation für Österreich DC-Technologien für die Energiewende“, Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 04/2022.
- [2] Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Harry Wirth, Fraunhofer ISE, Download von www.pv-fakten.de, Fassung vom 1.5.2022.
- [3] Technische Regeln für die Beurteilung von Netzurückwirkungen, Teil B: Anforderungen und Beurteilung, 3. Ausgabe, 2021
- [4] A. Robert, et. Al. “Guide for assessing the network harmonic impedance”, Volume 2, pages 3/1–310 vol.2. IET, 1997.