Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 105 (2014)
Heft: 6

Artikel: Impendanzmessungen machen Verteilnetze sicherer
Autor: Müller, Jürgen / Neumaier, Franz / Grass, Norbert
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856256

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Impedanzmessungen machen Verteilnetze sicherer

Höhere Versorgungszuverlässigkeit bei dezentralen Einspeisern

Die dezentrale Einspeisung Tausender Fotovoltaik-Anlagen und kleiner Blockheizkraftwerke in Deutschland verändert die Funktion des Niederspannungsnetzes. Eine zeitweise Umkehr der Leistungsflüsse und eine höhere Netzbelastung sind die Folge. Schwachstellen in Form von Ausfällen und anderen Netzstörungen machen sich deshalb immer öfter bemerkbar. Impedanzmessungen können helfen, potenzielle Schwachstellen wie mangelhafte Pressverbindungen in Verbindungs- und Abzweigmuffen zu finden.

Jürgen Müller, Franz Neumaier, Norbert Grass

Das Niederspannungsnetz (NS-Netz) wird heute durchschnittlich stärker belastet, wobei es manchmal an seine Grenzen kommt. Schwachstellen in Form von Ausfällen und anderen Netzstörungen machen sich immer öfter bemerkbar. Eine potenzielle Schwachstelle sind dabei mangelhafte Pressverbindungen in Verbindungs- und Abzweigmuffen.

Einphasige Einspeiseanlagen erhöhen zudem zunehmend die Unsymmetrie der Phasenlast und beanspruchen zusätzlich den Neutralleiter. Die Zunahme an elektronischen Verbrauchern führt zu einer steigenden Oberschwingungsbelastung. Kritisch sind hier meist die durch drei teilbaren Vielfachen der Netzfrequenz, da sich diese Anteile aus den Phasen im Neutralleiter addieren statt sich wie die Grundschwingung aufzuheben (Bild 1).

Dies alles wirkt sich negativ auf die Stabilität des Energieversorgungsnetzes aus.

Gute Gründe für die Netzimpedanzmessung

Die genaue Kenntnis der Netzimpedanz liefert wertvolle Informationen zum sicheren und zuverlässigen Betrieb der Verteilnetze. Diese Informationen sind z.B. nötig, um Sicherungen richtig zu dimensionieren, Schwachstellen zu finden und Massnahmen zur Vermeidung von Störungen zu ergreifen.

Aus der gemessenen Netzimpedanz kann die maximale Anschluss- bzw. Einspeiseleistung am Anschlusspunkt ermittelt werden. Bei hoher dezentraler Einspeiseleistung kann mithilfe der Netzimpedanz die Spannungserhöhung im Netz berechnet werden.

Werden Netzabschnitte einer bestehenden Anlage geändert, erweitert oder übernommen, liefert die Netzimpedanzmessung die ideale Grundlage zur ordnungsgemässen Abnahme. Die gemessene Netzimpedanz sollte annähernd mit dem berechneten Wert übereinstimmen. Diese Messung dient somit auch der Überprüfung und Korrektur von Berechnungsmodellen zur Auslegung des NS-Netzes.

Neben der zulässigen Belastung des Kabels muss bei der Dimensionierung von Sicherungen einerseits gewährleistet sein, dass die Sicherung den maximal auftretenden Fehlerstrom zuverlässig unterbricht. Andererseits muss der minimale, durch die Netzkonfiguration bestimmte Kurzschlussstrom die Sicherung ebenfalls rechtzeitig auslösen. Beide Eckpunkte werden durch die Netzimpedanzmessung sicher beurteilt, um die für den jeweiligen Fall richtige Sicherung auszuwählen.

Schwachstellen aufspüren

Um Schwachstellen im NS-Netz aufzudecken, können die gemessenen Netzimpedanzwerte zwischen verschiedenen Phasen verglichen werden. Wird die Netzimpedanz nicht nur an einer Phase bestimmt, so lässt sich auch die Impedanz von Schutz- und Neutralleiter (PEN-Impedanz) berechnen. Der Vergleich der Schleifenimpedanz Phase-Neutralleiter mit den Werten der Schleife Phase-Phase liefert klare Hinweise bei Fehlern. Neutralleiterfehler werden so erkannt, die sonst zu gefährlichen Potenzialanhebungen führen und damit Personen gefährden könnten.

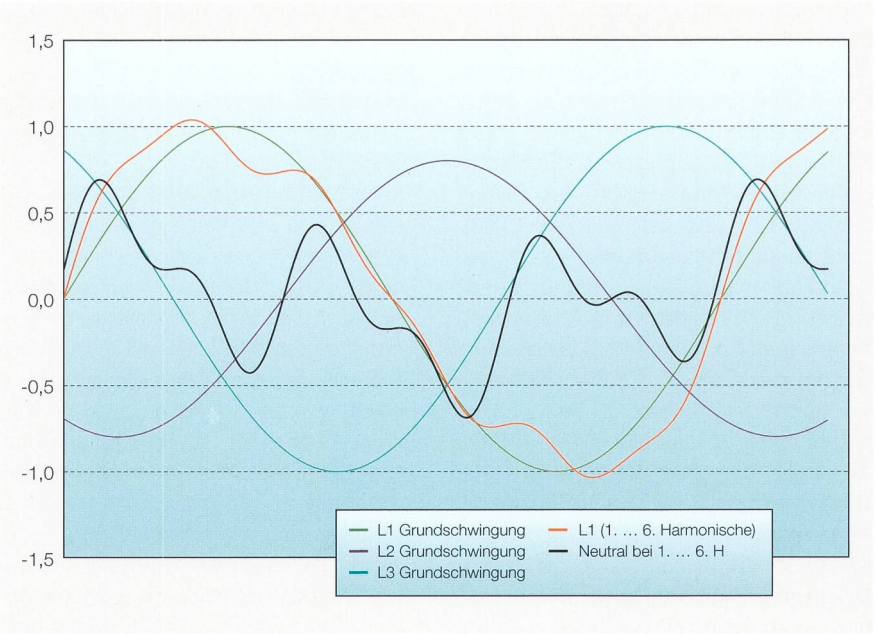

Bild 1 Neutralleiterspannung (schwarz) bei oberschwingungsbehaftetem 3-Phasensystem mit Schieflast.

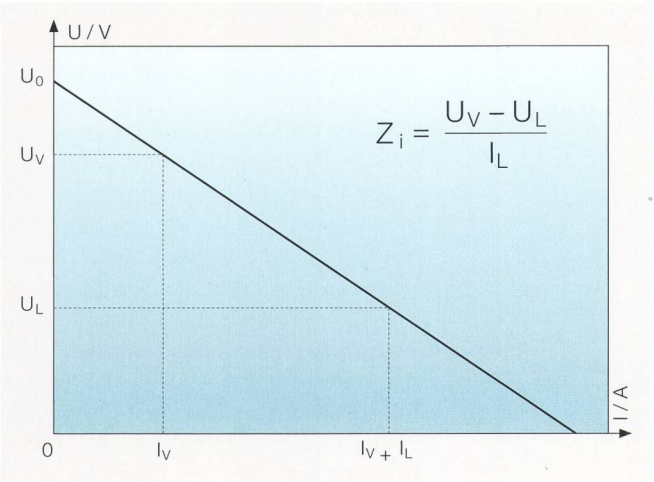

Bild 2 Kennlinie einer idealen Spannungsquelle mit Innenwiderstand Z_i.

Oft werden Spannungsschwankungen (z.B. Flicker) durch schlechte Leiterverbinder verursacht und treten zunächst intermittierend auf, bevor es schliesslich zum kompletten Spannungsausfall kommt. Durch die Netzimpedanzmessung können diese intermittierenden Fehler bei ausreichend hohen Messströmen gezielt provoziert werden. Bereits die Messergebnisse liefern klare Hinweise auf die Fehlerursache. Der Fehler kann mit gängigen Reflexionsmessverfahren geortet werden.

Das Messverfahren

Das Prinzip zur Messung der Netzimpedanz ist einfach: Eine einzelne Messung bestimmt jeweils die Impedanz der gesamten Schleife zwischen den jeweiligen Anschlusspunkten des Messgeräts. Aus mehreren Einzelmessungen (L_1–N, L_2–N, L_3–N, L_1–L_2, L_1–L_3, L_2–L_3) lassen sich dann die Impedanzwerte für L_1, L_2, L_3 und PEN berechnen.

Ersetzt man das speisende Verteilnetz am Messpunkt durch eine ideale Spannungsquelle mit dem komplexen Innenwiderstand Z_i, so müssen auf der U/I-Kennlinie dieser Quelle lediglich zwei Punkte bestimmt werden, um den Innenwiderstand zu bestimmen **(Bild 2)**.

Der erste dieser beiden Punkte ergibt sich durch die zum Zeitpunkt der Messung im Netz vorhandene Verbraucherlast R_V, welche durch den Verbraucherlaststrom I_V die Quellenspannung U_0 auf die Klemmenspannung U_V reduziert. Dann wird ein zusätzlicher Laststom I_L generiert, um den zweiten Punkt der Kennlinie anzusteuern. Misst man nun den vom Messgerät erzeugten Laststrom I_L und die resultierende Klemmenspannung U_L, so lässt sich aus der Spannungsdifferenz ($U_V - U_L$) und dem Laststrom I_L die Impedanz Z_i der Quelle berechnen.

In der Praxis ist der während der Impedanzmessung fliessende Verbraucherlaststrom I_V nicht bekannt. Da das Messintervall sehr kurz ist, kann dieser jedoch mit ausreichender Wahrscheinlichkeit als konstant angenommen werden. Unter dieser Voraussetzung genügen zur Berechnung der Quellenimpedanz die vom Messgerät ermittelten Grössen und die Messung kann im ganz normalen Netzbetrieb durchgeführt werden.

Die Impedanz des NS-Netzes ist ein komplexer Widerstand. Dominiert wird der imaginäre Anteil der Impedanz von der Induktivität des Trafos. Schon aus diesem Grund ergibt sich eine Frequenzabhängigkeit des Impedanzbetrags $|Z_i|$. Allerdings stellt man auch bei der ohmschen Komponente der Netzimpedanz eine Frequenzabhängigkeit fest (Skin-Effekt).

Bei der technischen Ausführung eines Netzimpedanzmessgeräts müssen deshalb sowohl die Frequenzabhängigkeit, als auch die Real- und Blindkomponente der Impedanz berücksichtigt werden. Zur Bestimmung der komplexen Netzimpedanz muss der Lastkreis des Messgeräts folglich nicht nur die Grundfrequenz, sondern auch die Oberwellen anregen. Dies erreicht man z.B. durch eine Phasenanschnittsteuerung oder durch ein gepulstes Zuschalten der Last.

Die zeitlichen Verläufe von Strom und Spannung (mit und ohne Laststrom I_L) werden mit Hilfe von entsprechenden Mess- und A/D-Wandlern aufgezeichnet. Hierbei muss auf Phasentreue geachtet werden, da sich Laufzeitunterschiede zwischen den Messkanälen als Fehler bei der Bestimmung der komplexen Netzimpedanz auswirken.

Nach der Transformation der zeitlichen Spannungs- und Stromverläufe in den Frequenzbereich mit Hilfe einer FFT lässt sich die komplexe und frequenzabhängige Schleifenimpedanz direkt berechnen.

Aus diesen gemessenen Schleifenimpedanzen lassen sich dann weitere Ergebnisse berechnen. Beispiele sind neben den Impedanzwerten der einzelnen Leiter (L_1, L_2, L_3) und der PEN-Impedanz der zu erwartende Kurzschlussstrom und die Kurzschlussleistung. Auch lässt sich berechnen, mit welchem Spannungseinbruch zu rechnen ist, wenn eine bestimmte Leistung am Anschlusspunkt entnommen werden soll. Dies kann u.a. zur Klärung und Abnahme der Anschlusssituation vor der Installation grösserer Verbraucher dienen, wie beispielweise Maschinen oder medizintechnische Anlagen, die das Netz oft mit grösseren Pulsströmen belasten.

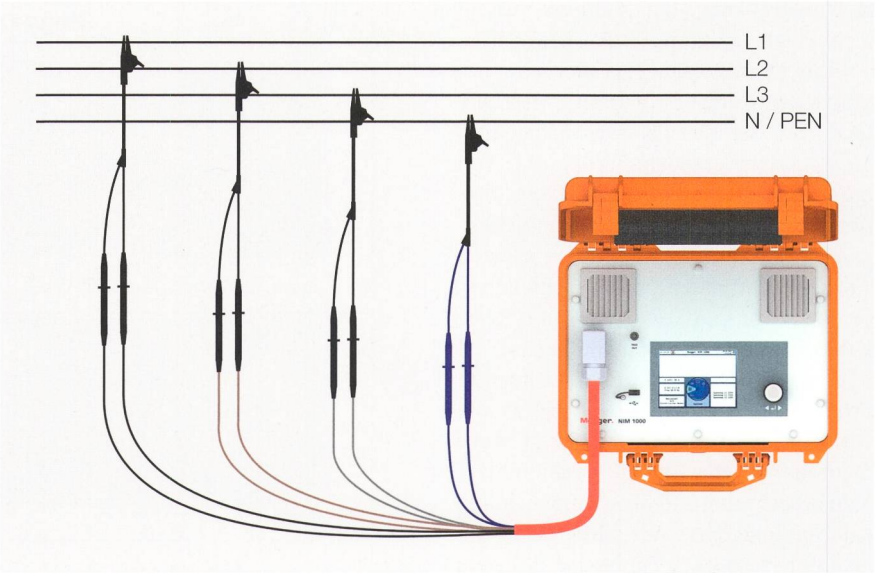

Bild 3 Anschluss des NIM 1000 an ein Messobjekt.

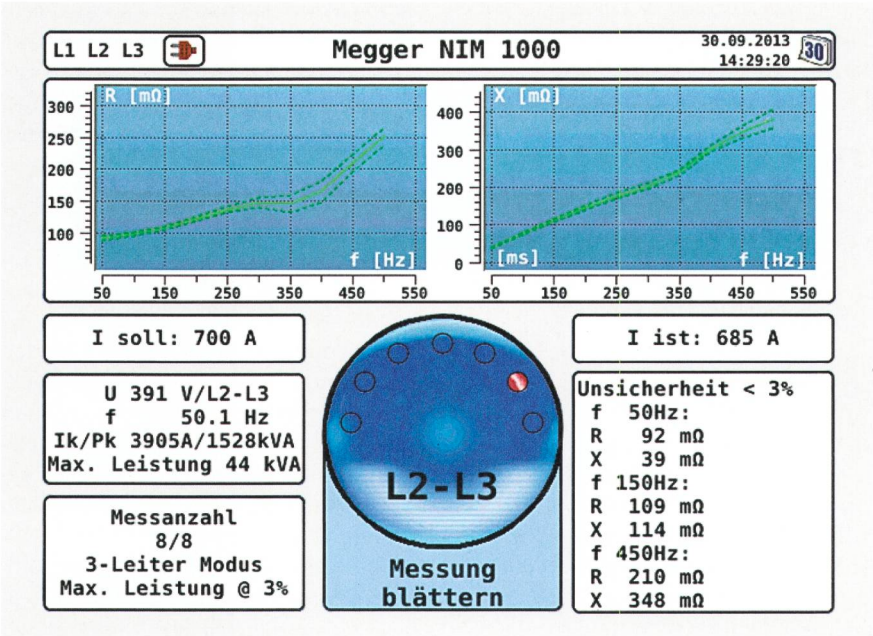

Bild 4 Ergebnisanzeige.

Möglichst hoher Prüfstrom

Vorentwicklungsarbeiten der Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg in Kooperation mit der N-Ergie Service GmbH, die Praxiserfahrungen einbrachte, bildeten die Voraussetzungen zur Entwicklung des neuen Netzimpedanzmessgeräts NIM 1000.

Ein Ziel dieser Vorarbeiten war es zu klären, wie sich die verschiedenen technischen Anforderungen an ein modernes Netzimpedanzmessgerät möglichst geschickt erfüllen lassen:

- portables, handliches Gerät für den mobilen Feldeinsatz,
- hohe Messgenauigkeit im relevanten Bereich einiger 10 mΩ,
- Messung der komplexen Impedanz über den Frequenzbereich,
- Unterstützung der Fehlersuche im NS-Netz.

Konkret sollte dabei ein Messgerät mit möglichst hohem Prüfstrom entstehen. Der von den am Markt verfügbaren Messgeräten erzeugte Prüfstrom von max. 280 A reicht für eine genaue Messung nicht aus, da im N-Ergie-Versorgungsgebiet (ähnlich wie in den meisten städtischen Netzen) an verschiedenen Verknüpfungspunkten eine sehr hohe Kurzschlussleistung vorhanden ist.

Zunächst entstand ein vereinfachter Prototyp, mit dem die Lösungskonzepte verifiziert wurden. Mit der neuen Messmethode wurden sowohl Daten aus der Netzberechnung und Messwerte bekannter Netzimpedanzmessgeräte bestätigt, als auch verdeckte Fehler im NS-Netz aufgespürt und beseitigt.

Das von SebaKMT mit Unterstützung der beiden Kooperationspartner entwickelte Netzimpedanzmessgerät NIM 1000 basiert auf diesen teils neuen Konzepten und nutzt zudem die während der Vorentwicklungsarbeit und Praxiserprobung gewonnenen Erfahrungen.

Ein wesentliches Merkmal des NIM 1000 ist die Art und Ausführung der Messstromerzeugung. Für eine hohe Messgenauigkeit muss der Messstrom möglichst gross sein. Andererseits erzeugt ein grosser Messstrom eine hohe Verlustleistung am Messwiderstand, was zu einem grossen, schweren Gerätedesign führt und wiederholte Messungen durch erforderliche Abkühlphasen verlangsamen würde. Obwohl das NIM 1000 mit nur 10 kg Masse und den Abmessungen einer Aktentasche sehr handlich ist, erzeugt es einen Spitzenlaststrom von bis zu 1000 A für Messungen mit einer Auflösung von 1 mΩ. Dies wird dadurch erreicht, dass der Laststrom nur kurzzeitig zugeschaltet und so die abzuführende Verlustleistung minimiert wird. Ausserdem werden sowohl die Grundfrequenz von 50 bzw. 60 Hz als auch die höheren Frequenzen zur Messung der Netzimpedanz über den Frequenzbereich bis zur 10. Harmonischen ausreichend angeregt.

Ein weiterer Vorteil des eingesetzten Messverfahrens ist die Unabhängigkeit von der exakten Grösse des Lastwiderstands. Somit führt der durch wiederholte Messungen entstehende Temperaturdrift des Lastwiderstandswertes nicht zu einer Reduzierung der Messgenauigkeit.

Kompakt und einfach bedienbar

Für den Praxiseinsatz sind die einfache Bedienung und die Sicherheit gemäss Messkategorie CAT IV (EN 61010-1) wichtig. Die Messwerte kann man am Farbgrafikbildschirm des Geräts betrachten und zur Protokollierung und Analyse über eine USB-2.0-Schnittstelle zu einem PC übertragen. Über die USB-Schnittstelle lässt sich auch die Gerätesoftware aktualisieren.

Der Anschluss an das Messobjekt (Bild 3) erfolgt mittels austauschbarer Kelvinklemmen. Das NIM 1000 kann sowohl einphasig als auch mehrphasig angeschlossen werden. Bei mehrphasigem Anschluss ermittelt das NIM 1000 auch

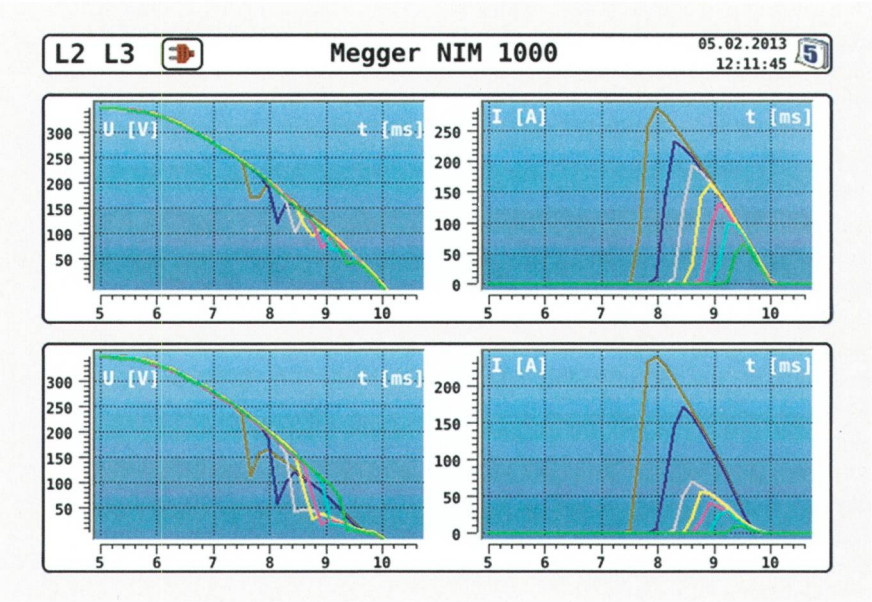

Bild 5 Fehlerfreie Verbindung (oben) und fehlerbehaftete Phase (unten).

Bilder: SebaKMT

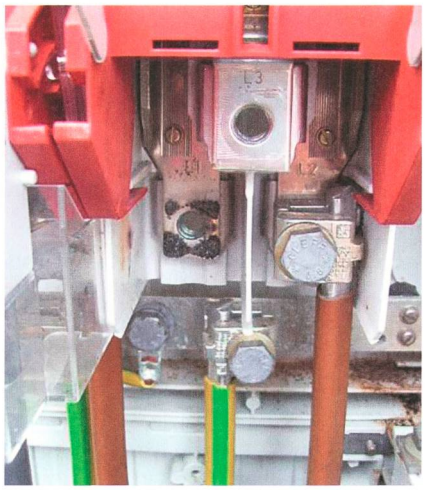

Bild 6 Mangelhafte Verschraubung.

den Wert der PEN-Impedanz, was bei entsprechenden Erdungsverhältnissen der Nullleiterimpedanz entspricht.

Um auch bei hoher Netzvolatilität aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, lassen sich mit dem NIM 1000 automatische Mehrfachmessungen mit Mittelwertbildung durchführen. Weiter kann man auch den Verlauf der Netzimpedanzwerte über einen bestimmten Zeitraum (z.B. eine Woche) analysieren. Das NIM 1000 führt dazu in bestimmten Zeitabständen selbstständig eine Messung durch. Die anschliessende Auswertung zeigt die Einflüsse der unterschiedlichen Last- und Einspeiseverhältnisse auf.

Praktische Anwendung

Um die Netzimpedanz an einem Anschlusspunkt zu messen, wird das NIM 1000 mit Kelvinklemmen ein- oder mehrphasig angeschlossen. Die Messparameter werden mit einem Drehgeber eingestellt: Auswahl Ein- oder Mehrphasenmessung, maximaler Messstrom und die Anzahl der Messungen zur Mittelwertbildung. Bei Bedarf kann man weitere Parameter vorgeben, wie z.B. die Messdauer für Langzeitmessungen sowie Vorgaben für die Lastberechnung. Letztere errechnet aus den Impedanzwerten, welche Anschlussleistung an der Messstelle zu einem maximal tolerierten Spannungseinbruch (oder Spannungserhöhung im Falle der Einspeisung) führt und umgekehrt.

Die Messungen werden vollautomatisch durchgeführt und alle relevanten Werte werden numerisch und grafisch angezeigt sowie zur späteren Protokollerstellung im nichtflüchtigen Speicher abgelegt.

Bild 4 zeigt den Ergebnisbildschirm mit der grafischen Darstellung des Resistanz- und Reaktanzverlaufs über die Frequenz sowie der tabellarischen Auflistung der numerischen Werte bei drei besonders interessanten Frequenzen. Zudem werden im linken Bereich der ermittelte Kurzschlussstrom, die maximale Kurzschlussleistung sowie die maximale Anschlussleistung bei Einhaltung des vorgegebenen maximalen Spannungseinbruchs angezeigt.

Aus den Einzelwerten ermittelt das NIM 1000 im Mehrleitermodus auch die PEN-Impedanzwerte. Abhängig von den Erdungsverhältnissen der Messstelle lässt dies eine Beurteilung der Neutralleiterverbindung bzw. der Erdungswiderstände zu.

Die Ergebnisse bilden beispielsweise die Grundlage zur Abnahme von neu installierten Netzabschnitten, helfen zur Klärung der am Anschlusspunkt verfügbaren Einspeise- oder Anschlussleistung oder liefern die Basisdaten zur richtigen Dimensionierung von Sicherungen bzw. Festlegung der Einstellparameter für Lasttrennschalter.

Fehlersuche im Verteilnetz

Am einfachsten lassen sich Fehler durch einen Vergleich der Messergebnisse zwischen den einzelnen Phasen an einer Messstelle finden. Hierzu kann mit dem Drehgeber des NIM 1000 durch die Ergebnisse geblättert werden. Weicht das Ergebnis einer Phase signifikant von den anderen Phasen ab, deutet dies auf einen Fehler hin.

Viele Fehler im Niederspannungsbereich verändern ihr Verhalten in Abhängigkeit des Laststroms. Eine lose oder korrodierte Klemmstelle hat beispielsweise einen erhöhten Übergangswiderstand. Fliesst nun ein hoher Strom durch diese schlechte Verbindung, kann sie temporär verschweissen und der Widerstandswert verringert sich. Diese Verschweissung wird natürlich bei Temperaturänderungen, mechanischen Belastungen oder durch eine weitere Laststromerhöhung wieder aufbrechen. In jedem Fall ist also eine sprunghafte Änderung des Widerstands in Abhängigkeit des Laststroms ein deutliches Anzeichen für eine schlechte Verbindungsstelle.

Das NIM 1000 stellt eine Betriebsart zur Verfügung, die genau diese Erkenntnis für die Fehlersuche im Praxisalltag nutzbar macht: Im Fehlermodus werden der Laststrom schrittweise bis zum vorgegebenen Maximalwert erhöht und die jeweiligen Strom- und Spannungsverläufe in einer gemeinsamen Grafik dargestellt. So ist die charakteristische Widerstandsänderung beim Vorliegen einer schlechten Verbindungsstelle schnell erkennbar. **Bild 5 oben** zeigt die Messreihe an einer fehlerfreien Verbindung. Die Strom- und Spannungskurven liegen alle auf der einhüllenden Sinuskurve. Die gleiche Messreihe an einer fehlerbehafteten Phase ergibt das in **Bild 5 unten** gezeigte Ergebnis. Sehr deutlich ist in der Stromkurvenschar die sprunghafte Widerstandsänderung zu sehen, die in diesem Fall bereits bei vergleichsweise kleinem Laststrom stattfand.

Ein praktisches Beispiel ist in **Bild 6** dargestellt. Durch eine mangelhafte Verschraubung an L_1 wurden lastabhängige Spannungsschwankungen verursacht. Diese Schwachstelle wurde durch den Einsatz des NIM 1000 identifiziert und lokalisiert.

Angaben zu den Autoren

Jürgen Müller ist Leiter COE-Tools bei SebaKMT.
SebaKMT/Megger, DE-96148 Baunach, mueller.j@sebakmt.com

Franz Neumaier ist Projektleiter bei SebaKMT.
SebaKMT/Megger, DE-96148 Baunach, neumaier.f@sebakmt.com

Dr.-Ing. **Norbert Grass** ist Professor am Institut Elsys an der Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg.
Technische Hochschule Georg Simon Ohm, DE-90121 Nürnberg, norbert.grass@th-nuernberg.de

Résumé

Les mesures d'impédance augmentent la sécurité des réseaux de distribution

Un approvisionnement plus fiable en présence de production décentralisée

L'alimentation décentralisée de milliers d'installations photovoltaïques et de petites centrales de cogénération en Allemagne modifie le fonctionnement du réseau basse tension. Conséquence : une inversion intermittente des flux de puissance et une plus grande charge du réseau. Des points faibles tels que des pannes ou autres perturbations du réseau sont de ce fait de plus en plus souvent perceptibles.

Les mesures d'impédance peuvent contribuer à identifier les points faibles potentiels, tels que les raccordements par sertissage défectueux des jonctions et des dérivations.

La valeur mesurée de l'impédance du réseau permet en outre de déterminer la puissance maximale connectée et injectée au point de raccordement. Dans le cas d'une injection importante de puissance décentralisée, l'augmentation de la tension du réseau peut également être calculée à l'aide de l'impédance de ce dernier. No