Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 104 (2013)
Heft: 12

Artikel: Neue und erweiterte Anforderungen an Messwandler
Autor: Sperling, Erik / Vogelsang, Ruben
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856564

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: 09.07.2025

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

Neue und erweiterte Anforderungen an Messwandler

Veränderte Netztopologie bringt zusätzliche Belastungen

Messwandler übertragen hohe Spannungen oder Ströme in standardisierte und äquivalente Werte für Zähler, Mess- und Schutzgeräte. Je nach Anwendung muss dies mit einer sehr hohen Genauigkeit erfolgen. Solche Messgeräte sind an vielen Stellen im Energieübertragungs- und Verteilnetz zu finden. Aufgrund der sich verändernden Netztopologie im Zuge der vermehrten Einspeisepunkte durch die Energiewende treten zunehmend Belastungen auf, welche die Hochspannungsgeräte negativ beeinflussen können.

Erik Sperling, Ruben Vogelsang

In allen Energieversorgungsnetzen sind Messwandler für die Strom- und Spannungsmessung im Einsatz. Derzeit werden in modernen Hochspannungsnetzen hauptsächlich induktive Stromwandler, induktive Spannungswandler, kapazitive Spannungswandler sowie Kombiwandler, eine Kombination aus induktivem Strom- und Spannungswandlerteil in einem Gehäuse, eingesetzt. Grundsätzlich funktionieren alle induktiven Messwandler nach dem Transformatorprinzip, wobei der Stromwandler ein im Kurzschluss laufender Transformator ist, der Spannungswandler hingegen nahezu im Leerlauf betrieben wird. Kapazitive Spannungswandler funktionieren über einen Spannungsteiler, bei welchem sich die Spannung über den Kapazitäten des Wandlers einstellt, und einen Mittelspannungswandler (die sogenannte elektromagnetische Einheit), der die Sekundärspannung erzeugt. Das Grundprinzip der magnetischen Kopplung ist seit mehr als 120 Jahren bekannt. Seit dieser Zeit werden induktive Messwandler erfolgreich für Verrechnungs-, Mess- und Schutzzwecke eingesetzt (Bild 1). Die sich daraus ergebende Fertigungs- und Betriebserfahrung hat zu äusserst zuverlässigen, langlebigen und präzisen Messwandlern der heutigen Bauweise geführt. Die erreichte Messgenauigkeit liegt für Stromwandler im Bereich bis Klasse 0,2 bei einem Messbereich von 1 bis 200 % des Nennstroms. Für Spannungswandler liegt die Genauigkeit im Bereich bis Klasse 0,1 bei 80 bis 120 % der Nennspannung. [1, 2]

Neue Anforderungen durch Anwendung und Normen

Im Gegensatz zu früheren Anwendungen werden in heutigen Mess- und Schutzsystemen auf der Sekundärseite der Wandler durch den Einsatz von elektronischen Systemen nur noch wenige VA Messbürdenleistung benötigt. Die Anwendung der IEC 61850 trägt diesen Veränderungen Rechnung und bewirkt eine starke Verringerung der Messbürdenleistung auf wenige VA. Dadurch wird der Einsatz von nichtkonventionellen Messverfahren möglich.

Bei der Auslegung und Prüfung von Messwandlern werden internationale Normen als Basis herangezogen. Der

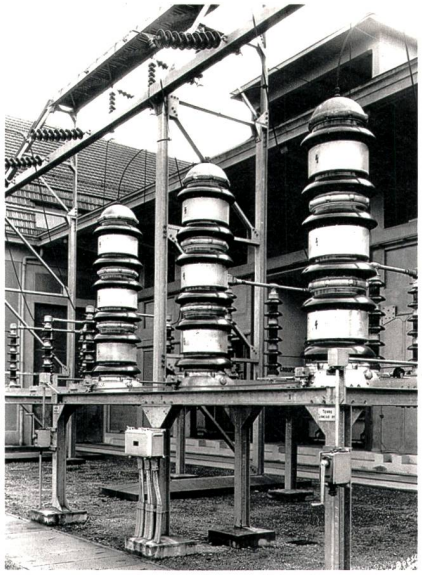


Bild 1 Einer der ersten kommerziell eingesetzten Spannungswandler für Hochspannung im Jahr 1936 (von Emil Pfiffner).

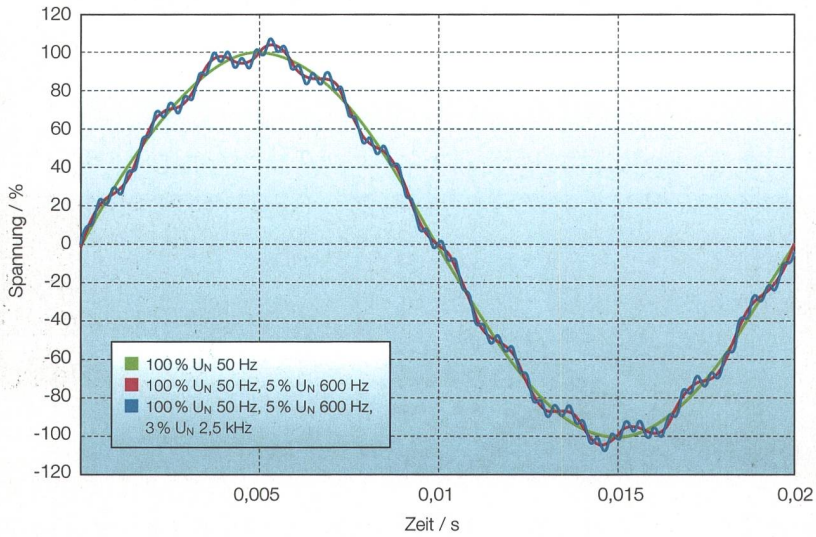


Bild 2 Spannungsverlauf bei Netzfrequenz von 50 Hz mit Oberwellenanteilen von 5 % bei 600 Hz und 3 % bei 2,5 kHz.

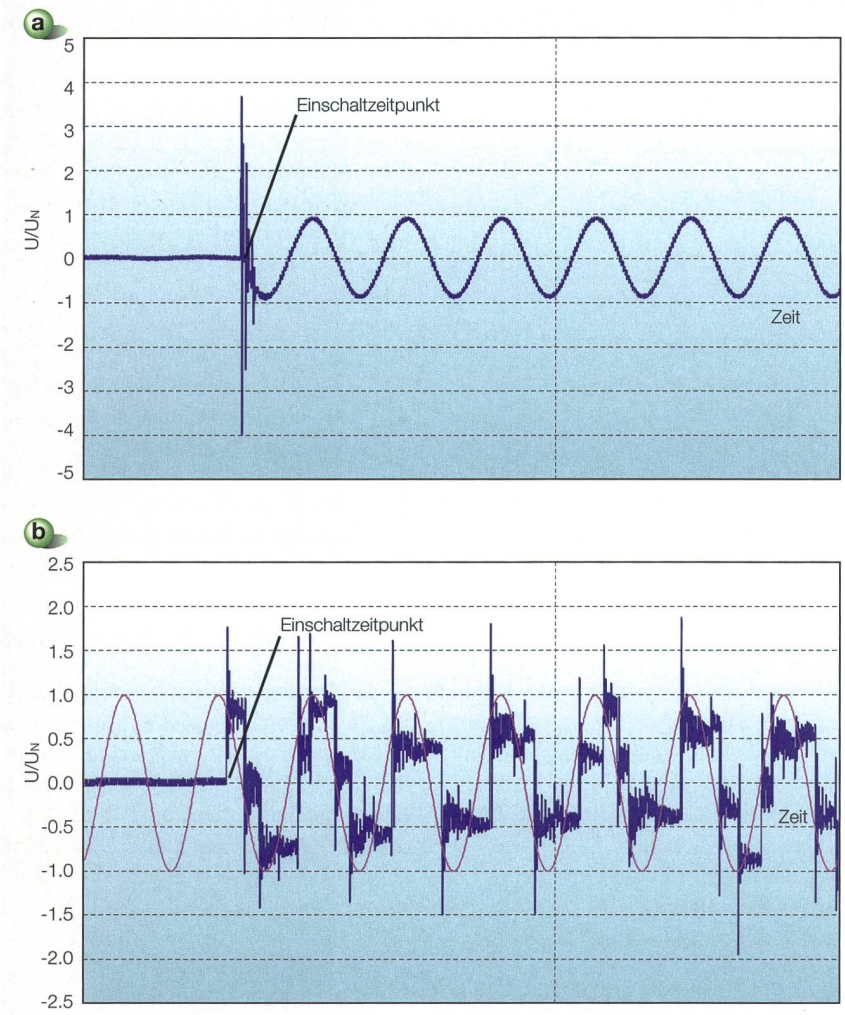


Bild 3 Die ersten 120 ms des Einschaltvorgangs nach dem Zuschalten eines Leitungsabschnittes mittels HS-Schalters (oben) bzw. Trenners (unten).

in Europa hauptsächlich verwendete Wandlerstandard ist die IEC. Das technische Komitee TC 38 der IEC betreut die Normenfamilie IEC 61869-x. Teil 1 stellt hierbei die allgemeinen Anforderungen dar, welche für alle Arten von Messwandlern gültig sind. Die im Anschluss folgenden Teile 2 bis 15 repräsentieren die jeweiligen Wandler- oder messspezifischen Anforderungen. Bei den Prüfungen werden im Wesentlichen zwei Kategorien unterschieden: die Routineprüfungen und die Typenprüfungen. Definiert werden dielektrische Anforderungen, thermische- und mechanische Anforderungen sowie Genauigkeitsanforderungen. Bis heute finden sich in den aktuellen Normen jedoch keine Empfehlungen oder Hinweise bezüglich hochfrequenten Belastungen, Kippschwingungen, Belastungen durch den Proximity-Effekt oder auch transiente Spannungsspitzen.

Veränderte Belastungen im Netz

In der Vergangenheit waren die Messwandler immer wieder Belastungen ausgesetzt, welche sich von der eigentlichen Messaufgabe unterscheiden. Die internationalen Normen deckten diese zusätzlichen Belastungen durch geeignete Typenprüfungen gut ab. Aufgrund der dynamischen Veränderung der Übertragungsnetze hinsichtlich benötigter Flexibilität der Übertragungsleistung und der Einspeiseoptionen haben sich die Anforderungen jedoch stark geändert. So entstehen in den Netzen aufgrund des teilweise hohen Einspeiseanteils alternativer Energieerzeuger (Windparks, Fotovoltaikanlagen) durch den Einsatz von Wechselrichtern vermehrt Oberwellen bis in den kHz-Bereich **(Bild 2)**. Oberwellen entstehen ebenso, wenn Erzeugungsanlagen über eine HGÜ (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung) mit dem Netz verbunden sind, dies z.B. bei der Anbindung von Offshore-Windparks. [3] Oberwellen im Energieversorgungsnetz sind keine neue Erscheinung. Sie treten seit vielen Jahren auf, so wurden Oberwellen aufgrund von Quecksilberdampfgleichrichtern im Netz bereits vor Jahrzehnten erkannt. Die heutige Problematik ist die Vielfalt und die stetig steigende Anzahl oberwellenerzeugender Quellen.

Ein weiteres Resultat der dynamischen Einspeisesituation (Sonne scheint und Wind weht unregelmässig) ist, dass es in den Netzen zu immer mehr Schalthandlungen kommt. Dadurch entstehen hochfrequente Spannungsimpulse, die sich bis in den MHz-Bereich erstrecken können. Verstärkt wird dieser Trend durch den vermehrten Einsatz von SF_6-Anlagen, bei denen Schalthandlungen mit hohen Spannungsspitzen mit Spannungsanstiegszeiten von wenigen Nanosekunden verbunden sind. Leicht ist nachzuvollziehen, dass hierbei sehr hohe Frequenzanteile auftreten **(Bild 3)**, welche sich direkt auf das Betriebsmittel und dessen Komponenten auswirken können.

Ein weiteres Phänomen stellen schnelle Steilimpulse dar, die Anstiegs- oder Abstiegszeiten im Nanosekundenbereich aufweisen. Als Beispiel sei hier ein abgeschnittener Blitzstoss in einer SF_6-Atmosphäre genannt **(Bild 4)**.

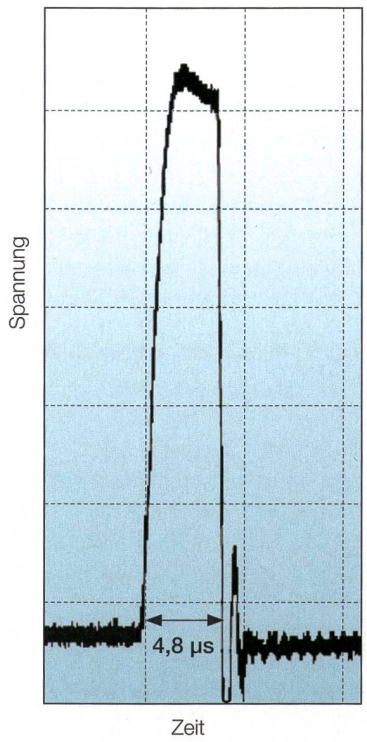


Bild 4 Abgeschnittener Blitzstoss in SF_6-Atmosphäre.

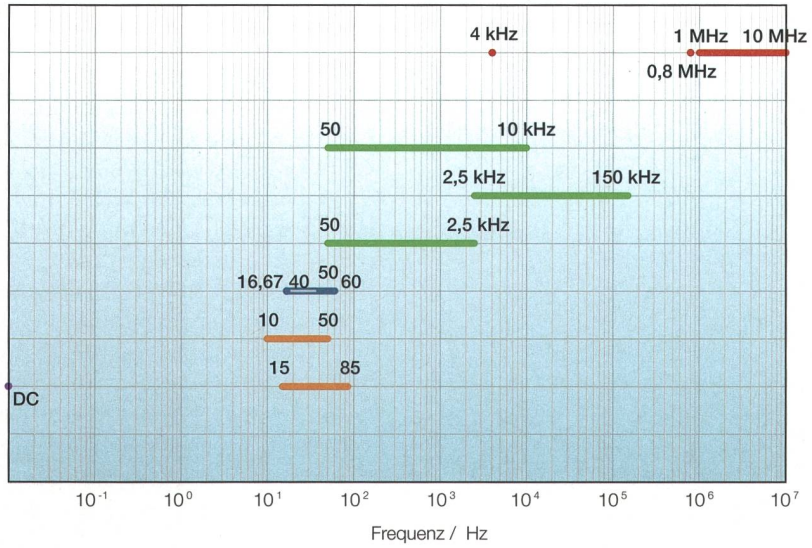


Bild 5 Frequenzanteile von Spannungs- und Stromsignalen im Hochspannungsnetz.

Folgende frequenzabhängigen Belastungen werden heute in den Hochspannungsnetzen beobachtet **(Bild 5)**:

- 50/60 Hz mit der Variation von $16^2/_3$ Hz verwendet bei der Bahn als eigentlicher Messbereich eines Messwandlers (blauer Bereich).
- 10–50 Hz als Frequenzbereich der einpoligen und dreipoligen Kippschwingungen sowie 15–85 Hz als Flickerbereich (oranger Bereich).
- Auftreten von harmonischen Frequenzen (grüne Bereiche), welche wie folgt in drei Unterklassen aufgeteilt werden: 1. 50 Hz–2,5 kHz, definiert in IEC 61000-4-30; 2. 50 Hz–10 kHz, erweiterter Bereich, derzeit international in Diskussion; 3. 2,5 kHz–150 kHz, ist in Diskussion.
- 1–10 MHz als Bereiche der Impulsspannungen, wie zum Beispiel Blitzstossspannungen, Schaltstossspannungen (4 kHz), abgeschnittene Spannungen in Luft oder SF_6-Gas; sie repräsentieren Naturphänomene, Schalthandlungen und Überspannungsbegrenzungen (roter Bereich).
- 0 Hz oder DC-Spannungen (violetter Punkt), welche als «Offset» im Wechselspannungsnetz auftreten; diese sind für induktive Betriebsmittel schädlich und müssen unter allen Umständen vermieden werden.

Dauernde, transiente Belastungen als Herausforderung

Die im obigen Abschnitt aufgeführten Belastungen können in zwei Hauptkategorien unterteilt werden. Die erste Klasse reflektiert die dauernden Belastungen, welche permanent oder periodisch wiederkehrend auf die Betriebsmittel einwirken. Die zweite Klasse reflektiert die transienten Belastungen, welche sich durch hohe und schnelle Impulse charakterisieren lassen. Sie treten zumeist durch ein konkretes vorheriges Ereignis auf.

Dauernde Belastungen sind:

- Hohe Ströme.
- Hohe Systemspannungen.
- Harmonische Frequenzen.
- Sub-harmonische Frequenzen.
- Thermische Beanspruchungen.
- Magnetische Kopplungen.

Transiente Belastungen sind:

- Spannungsspitzen von Schalthandlungen.
- Kippschwingungen.
- Hohe Überspannungen.
- Sehr steile Spannungsimpulse (GIS und AIS-Kombination).

Die Auswirkungen von Oberwellen auf Messwandler und andere Betriebsmittel des Netzes sind noch nicht vollständig geklärt. Es ist jedoch nachvollziehbar, dass beim Auftreten von höherfrequenten Spannungen die Belastung der Hochspannungsisolation zunimmt. Oberschwingungsströme verursachen zusätzliche thermische Verluste, was zu steigenden Netzverlusten führt. Weitere Auswirkungen sind verstärkte Schallemissionen oder die negative Beeinflussung der Regelung von Betriebsmitteln. Ebenso wird die Hochspannungsisolation von elektrischen Betriebsmitteln durch die immer häufiger auftretenden hochfrequenten Spannungsimpulse belastet. Eine mögliche Konsequenz kann eine schnellere Alterung der Betriebsmittel sein. Bei Rückwirkungen durch das Auftreten von Überschlägen im Gasraum von SF_6-isolierten Schaltanlagen treten Anstiegszeiten von wenigen Nanoskunden auf. Beim Eintreffen der Spannungswelle können die elektrischen Verbindungen hochimpedant werden, was einen nicht vorhersehbaren Spannungsabfall bewirkt, der schlussendlich sogar einen Überschlag über eine Isolierstrecke hervorrufen kann.

Auswirkungen von Hybridübertragungen

Ein Ungleichgewicht der Energieerzeugung (z.B. viel Einspeisung im Norden, viele Verbraucher im Süden eines Landes) fordert die Notwendigkeit einer effizienten Übertragung über längere Strecken. Die Idee einer Hybridübertragung, also AC-Spannung und DC-Spannung auf einer Trasse, ergeben neue technische Herausforderungen. [4] Mögliche Wechselwirkungen zwischen

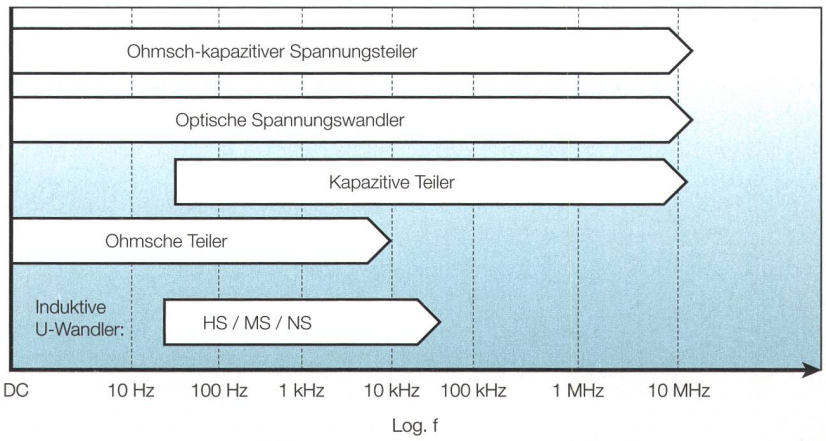


Bild 6 Frequenzgang verschiedener Messmethoden der Spannungsmessung nach IEC/TR 61869. [4]

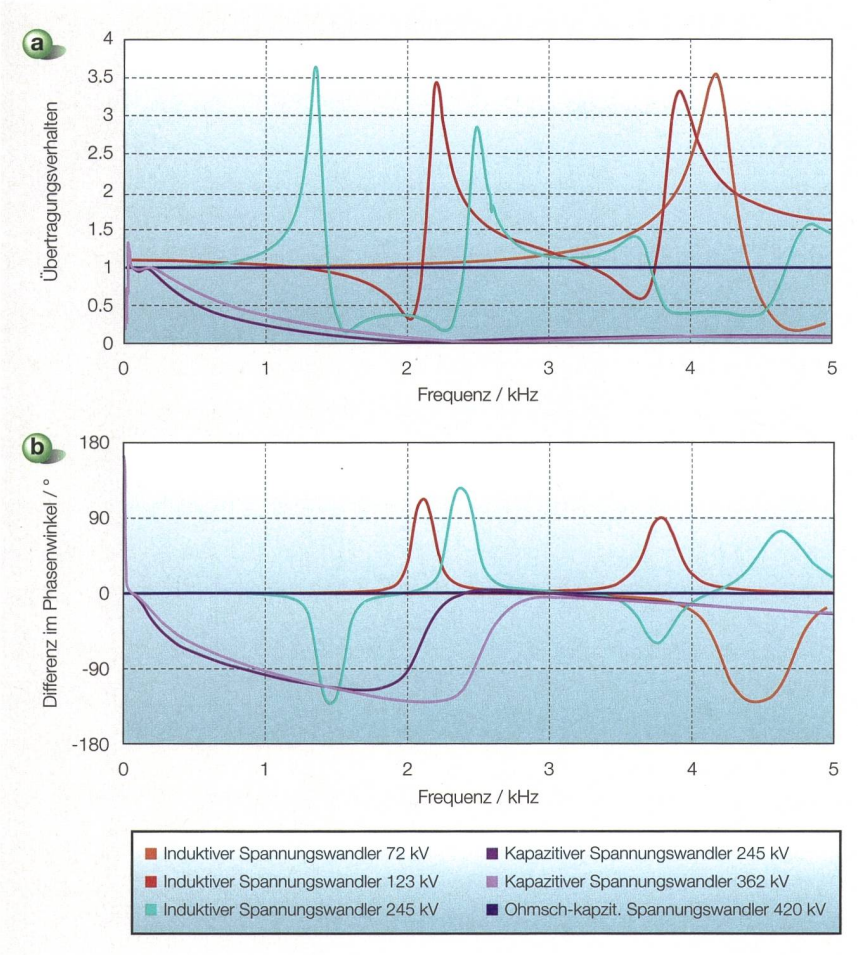


Bild 7 Übertragungsverhalten verschiedener Spannungswandlertypen.

AC- und DC-Netzen werden untersucht, da eine DC-Komponente auf dem AC-Netz induktive Messwandler und andere Betriebsmittel, die nach dem magnetischem Prinzip funktionieren, in Sättigung treiben würde, was zu starken thermischen Belastungen führt.

Die Kippschwingungen sind kein neues Problem. Sie können jedoch unvorhergesehen in einem Netzbereich auftreten, der vorher nie solch ein Verhalten gezeigt hatte. Häufig liegt das daran, dass Komponenten wie z.B. Steuerkondensatoren an Schaltern ausgetauscht wurden, wenn sich die Übertragungsleistungen und sich damit die Netzsituation komplett verändert hatten.

Konsequenzen für den Messwandlereinsatz

Als Konsequenz aus den dargestellten Belastungen wird eine detailliertere Betrachtung des Gerätes «Messwandler» offensichtlich. Zu den Designkriterien wie Genauigkeit, Stabilität, Isolationskoordination und Abdeckung der geforderten und international spezifizierten Routine- und Typenprüfungen kommen weitere Kriterien hinzu. Einige davon müssen durch den Anlagenbetreiber selbst berücksichtigt werden. Hochfrequente Belastungen erzwingen grundsätzlich niederimpedante elektrische Verbindungen. Das betrifft sowohl die Verbindung zwischen dem Hochspannungsaktivteil und dem Hochspannungsanschluss, als auch die Verbindung zum Erdpotenzial. Durch geeignete Schirmtechniken wird die Spannungsverteilung bei Impulsbeanspruchungen deutlich verbessert, damit Spannungsanhebungen vermieden werden.

Aufgrund moderner Techniken ist heute die Auslegung der Spannungswandler hin zu einem kippschwingungsarmen Gerät möglich, welches unter spezifizierten Betriebsbedingungen nicht zum Schwingen neigt. Berechnungsmodelle, aber auch reelle Messungen im Prüffeld, werden hierfür herangezogen.

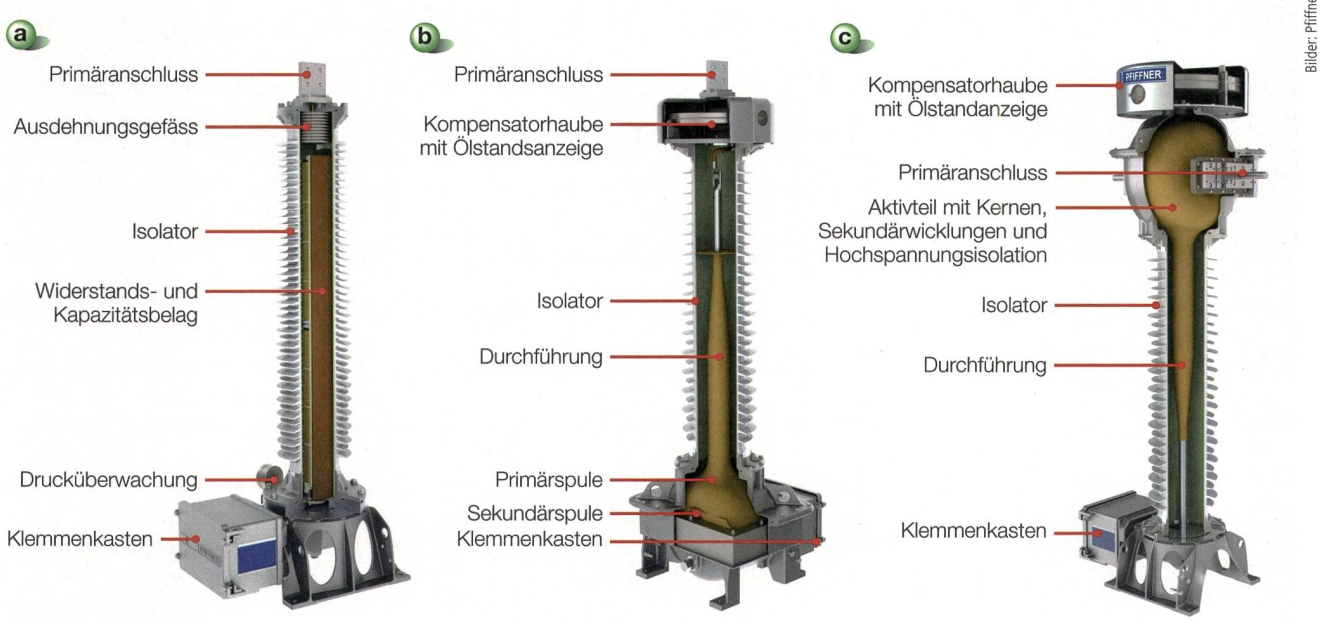
Das Phänomen des Auftretens von harmonischen Frequenzen ist die jüngste Belastung, welche vermehrt im Netz auftritt. Hier steht man international noch am Anfang der Forschung. Entscheidend ist, dass das Isolationssystem diesen Belastungen auf Dauer standhält. Gleichzeitig gilt es zu untersuchen, wie sich induktive Wandler verhalten und inwieweit sie zur Messung von höherfrequenten Signalen einsetzbar sind. [5]

Möglichkeiten der Strom- und Spannungsmessung

Das internationale Normenkomitee der IEC, TC 38, hat einen technischen Report erstellt, in dem sämtliche bekannten Messsysteme im Hinblick auf die Messung der Energiequalität («Power Quality») betrachtet werden. Hierbei zeigt sich, dass sich die Spannungsmessung für den höherfrequenten Anteil als deutlich schwieriger erweist als die Strommessung. Für die Strommessung bis in den tiefen kHz-Bereich sind die gängigen Stromwandler grundsätzlich einsetzbar. Für die Strommessung oberhalb einiger 10 kHz werden als alternative Messmethoden Messungen mit Rogowski-Spule, Messungen nach dem Hall-Effekt, mittels Shunt oder als optische Messung empfohlen. [5]

Für die Spannungsmessung steht in einem breiten Frequenzbereich nur die Messung mit ohmsch-kapazitiven Teilern oder mittels optischer Methoden (Ausnutzung des Pockels-Effekts) zur Verfügung. Für tiefe Frequenzen eignet sich der Widerstandsteiler und für höhere Frequenzen der Messteiler basierend auf dem Kapazitätsprinzip **(Bild 6)**. [5]

Kombiniert man das Messprinzip nach dem ohmschen und kapazitiven Teiler, so erhält man die Möglichkeit der Spannungsmessung über ein breites Frequenzspektrum. Der ohmsch-kapazitive Teiler besteht aus einem parallelgeschalteten ohmschen und kapazitiven Messaufbau. Vorteil dieses Messprinzips ist, dass je nach Frequenzanteil der Primärspannung der ohmsche oder kapazitive Übertragungsweg dominiert. Dies ermöglicht es, mit einem Messgerät einen sehr grossen Frequenzbereich der Spannung, und somit den Frequenzbereich von Gleichspannung über die Nennspannung im Hz-Bereich bis in den Oberwellenbereich von einigen MHz, zu messen. Eine entsprechend genaue und direkte Übertragung in verschiedenen Frequenzbereichen ist mit herkömmlichen induktiven oder kapazitiven Messsystemen nicht möglich **(Bild 7)**. [6]



Bilder: Pfiffner

Bild 8 Aufbau moderner Hochspannungswandler (v.l.n.r. Ohmsch-kapazitiver Teiler, Induktiver Spannungswandler, Induktiver Stromwandler).

Der ohmsch-kapazitive Teiler wird typischerweise dort eingesetzt, wo nichtnennfrequente Spannungsphänomene vermutet werden, welche andere Betriebsmittel beeinflussen können. Die Messung von Oberwellen oder sonstigen höher- oder niederfrequenten Phänomenen auf dem Hochspannungssignal ist damit sehr einfach möglich.

Zusammenfassung

Moderne konventionelle Messwandler sind in der Lage, sich den neuen Herausforderungen zu stellen. Entscheidend ist, dass die Phänomene bekannt sind, welche im Netz auftreten. Fliessen die Beanspruchungen in das Design eines modernen Messwandlers ein, dann sind sie in der Lage, ihre Aufgaben wie gewohnt sehr zuverlässig zu erfüllen. Dazu ist es aber notwendig, dass ein Netzbetreiber seinen aktuellen Zustand im Netz kennt. Dies ist wiederum nur mit Messwandlern möglich, die in der Lage sind, die oben genannten Phänomene zu messen und korrekt darzustellen. Erst dann können geeignete Gegenmassnahmen wie Filterung, Bedämpfung oder Überspannungsschutz eingeleitet werden.

Nicht jede Belastungsart ist mit jedem Messprinzip messbar. Ein erfolgreiches Zusammenspiel mit dem Einsatz von konventioneller und nichtkonventioneller Messtechnik kann eine hervorragende Ergänzung darstellen, um die heutigen Messaufgaben sicher zu erfüllen, aber auch der zunehmenden Notwendigkeit der Diagnose und Überwachung gerecht zu werden.

Referenzen

[1] Erik Sperling, ETG-Fachtagung Luzern, Thema: «Moderne konventionelle Messwandler für neue Herausforderungen», 2011.
[2] Fritz Hunziker, «Messwandler im Hochspannungsnetz heute und morgen», Energie-Revue, 2009.
[3] VDN – Verband der Netzbetreiber: EEG-Erzeugungsanlagen am Hoch- und Höchstspannungsnetz – Leitfaden für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energien an das Hoch- und Höchstspannungsnetz in Ergänzung zu den NetzCodes, Ausgabe August 2004.
[4] Klaus Vennemann, Eckhard Grebe, Klaus Kleinekorte, «Hochspannungs-Gleichstromfernübertragungsstrecken – Systematische Anforderungen an das Ultranet», ew Jg. 112 (2013), Heft 5.
[5] IEC/TR 61869-103, 2012-05, «Instrument transformer – The use of instrument transformer for power quality measurement».
[6] Erik Sperling, Peter Schegner, «A possibility to measure power quality with RC-divider», 22nd International Conference on Electricity Distribution, CIRED 2013, Stockholm (Sweden), Paper 0195.

Angaben zu den Autoren

Erik Sperling, dipl. El.-Ing., ist Stellvertretender Leiter der F&E der Pfiffner-Gruppe. Er ist Mitglied im Normengremium von TC 33 («Power Capacitors and their Applications») sowie TC 38 («Instrument Transformers») und beschäftigt sich mit Messwandlerlösungen seit 15 Jahren.
Pfiffner Messwandler AG, 5042 Hirschthal
erik.sperling@pmw.ch

Dr. **Ruben Vogelsang,** dipl. El.-Ing., ist Leiter Verkauf und Marketing der Pfiffner Messwandler AG. Er beschäftigt sich seit mehr als 15 Jahren mit verschiedenen Themen im Energiesektor.
ruben.vogelsang@pmw.ch

Résumé

Nouvelles exigences pour les transformateurs de mesure

La nouvelle topologie du réseau donne lieu à des charges supplémentaires

Les transformateurs de mesure transforment des tensions ou des courants élevés en des valeurs standard pour les compteurs, ainsi que pour les dispositifs de mesure et de protection. Suivant l'application, une très grande précision doit être assurée. Ces dispositifs se trouvent à plusieurs endroits dans les réseaux de transport et de distribution d'électricité. L'extension massive des énergies renouvelables a modifié la topologie du réseau, ce qui met les transformateurs de mesure face à de nouvelles exigences. Vu la proportion élevée des injections des producteurs d'énergie alternative, des harmoniques se créent dans la plage des kilohertz. Les injections irrégulières qui dépendent des conditions météorologiques engendrent toujours plus de commutations qui peuvent déclencher des impulsions de tension jusque dans la plage des mégahertz.

Pour que les transformateurs de mesure puissent venir à bout des charges supplémentaires, il est essentiel de connaître les phénomènes qui peuvent survenir dans le réseau. Il existe diverses méthodes de mesure pour les charges bien que chaque type de charge ne soit pas mesurable au moyen de chaque principe de mesure. La combinaison des techniques de mesures conventionnelles et non conventionnelles pourrait d'une part s'avérer un bon complément pour assurer les tâches de mesure actuelles et répondrait d'autre part aux besoins de diagnostic et de surveillance.

Se