

Untersuchung des Übertragungsverhaltens von Kleinsignal-Wandlern für Schutz- und Messzwecke

Ch. Suttner¹, W. Ebbinghaus², S. Tenbohlen¹

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH), Universität Stuttgart¹

ABB AG, EPMV-E, Ratingen²

christian.suttner@ieh.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Das Thema Spannungsqualität gewinnt im Rahmen der Energiewende zunehmend an Bedeutung. Der vermehrte Einsatz von taktender Leistungselektronik, wie beispielsweise Wechselrichtern zur dezentralen Energieeinspeisung oder Ladegleichrichtern von Elektrofahrzeugen, führt zu flächendeckend auftretenden Quellen leitungsgebundener Störungen im niedrigen kHz-Bereich. Im Mittelspannungsnetz sind Einflüsse von Oberschwingungen insbesondere an den Schnittstellen zur Niederspannungsebene denkbar.

Gleichzeitig erfordert die komplexe Topologie der Verteilnetze mit dezentraler Einspeisung und wechselnden Lastflussrichtungen, eine Vielzahl von kostengünstigen und flexiblen Messstellen zur Strom- und Spannungsmessung. Dies führt aktuell vor allem in den unteren Verteilnetzebenen dazu, dass passive Kleinsignalwandler, bzw. Sensoren anstelle klassischer Wandler eingesetzt werden.

In diesem Beitrag werden die Übertragungseigenschaften von elektronischen Messwandlern in Bezug auf supraharmische Oberschwingungen untersucht. Ziel ist es zum einen, negative Auswirkungen auf den Netzschutz auszuschließen. Andererseits soll festgestellt werden, ob sich die Sensoren zur direkten Messung möglicher Oberwellenanteile in den Mittelspannungskreisen eignen. Dazu wurden verschiedene handelsübliche Sensoren zur Strom- und Spannungsmessung untersucht und deren Übertragungsverhalten im Frequenzbereich analysiert.

Abstract

In the context of the national energy transformation, the issue of power quality is gaining more and more importance. The increasing spread of pulsed power electronics, such as inverters for decentralized power supply or charging rectifiers of electric vehicles, results in numerous sources of conducted interference in the low kHz range. In medium voltage distribution grids, harmonics are to be expected especially at the links to the low voltage level.

Additionally, the increasing complexity in distribution grids, with decentralized power generation and changing directions of load flow demands cost effective and flexible voltage and current measurements. This encourages the use of alternative technologies, such as low power instrument transformers, especially in the lower grid levels.

In this paper, the transmission characteristics of low power instrument transformers are examined as regards to supra harmonics. It is the aim of the investigations, to assess possible negative effects of the interferences on the grid protection systems. On the other hand it shall be determined whether the sensors are suitable for direct measurement of possible harmonic components in the medium voltage circuits. Various commercially available sensors for current and voltage measurement have been examined and their transmission characteristics have been analyzed in the frequency domain.

1 Einleitung

1.1 Auftretende Störungen im Verteilnetz

Bei moderner Leistungselektronik wird, insbesondere für höhere Leistungen eine Pulsweitenmodulation (PWM) eingesetzt. Dadurch wird die Energieeffizienz verbessert und leitungsgebundene Emissionen im Bereich bis 2 kHz reduziert. Ohne geeignete Filtermaßnahmen erzeugen diese Systeme jedoch HF-Emissionen bei ihrer Taktfrequenz und deren Vielfachen, die ins Netz zurückwirken.

Nach heutigem Stand der Normung existieren noch keine Emissions- oder Störfestigkeitsgrenzwerte, die den Bereich zwischen 2 kHz und 150 kHz abdecken.

In Abhängigkeit von Faktoren wie Netzimpedanz, sowie Leistung und Anzahl der Wechselrichter in einem Gebiet können dadurch sowohl Spannung, als auch Strom hohe Oberwellenanteile aufweisen [1].

Die Ausbreitung dieser Störungen über Kabel und Transformatoren ist Gegenstand aktueller Forschung [2]. Erste Messungen an einem Verteilnetztransformator zeigen eine Dämpfung zwischen der Nieder- und der Mittelspannungsseite [3]. Dies gilt jedoch nicht im Bereich der Resonanzfrequenz, die je nach Spannungsebene und Nennleistung variiert. Es kann demnach nicht ausgeschlossen werden, dass auch auf Mittelspannungsebene nennenswerte Oberwellenanteile auftreten. Davon wären vor allem Ortsnetzstationen oder Ringkabelnetze betroffen, in denen bisher kaum Messtechnik vorhanden ist und die nur wenig automatisiert sind.

1.2 Spannungsqualität im Verteilnetz

Unter dem Begriff der Spannungsqualität sind mehrere Aspekte zusammengefasst, die die Abweichung der Netzspannung von einer perfekten Sinusform beschreiben. Dazu gehören neben den Oberschwingungen auch die Höhe des Effektivwertes der Spannung und die Netzfrequenz. In Deutschland ist die Norm DIN EN 50160 [4] verbindlich für die vom Netzbetreiber bereitgestellte Spannung am Netzanschlusspunkt. Im Interesse einer kontinuierlich hochwertigen Spannungsqualität nimmt die Anzahl der Messstellen im Verteilnetz stetig zu. Schon seit mehreren Jahren gibt es dabei die Überlegung, auch Messstellen, die zu Abrechnungs-, Schutz-, oder Überwachungszwecken schon existieren, für Spannungsqualitätsmessungen zu verwenden. Neben der erforderlichen Genauigkeit der Wandler und Messgeräte kann dabei das Übertragungsverhalten bei höheren Frequenzen ein Problem darstellen. In der DIN EN 50160 wird die Spannung bis zu einer Frequenz von 2 kHz ausgewertet. Es gibt aber Bestrebungen, auch höhere Frequenzen in die Normung mit einzubeziehen. Die bei der Abrechnung oder in Schutzgeräten eingesetzten Spannungs- und Stromwandler sind aber in der Regel nur für eine Messung des Effektivwertes der Grundfrequenz 50 Hz ausgelegt und können höhere Frequenzbereiche stark dämpfen. Für eine aussagekräftige Messung der Spannungsqualität muss der Frequenzgang eines Spannungswandlers bis mindestens 2 kHz aber möglichst linear sein. Oberschwingungsanteile im Strom unterliegen im Netz keiner Normung. Trotzdem können Oberschwingungsmessungen des Stroms dabei helfen, die Ursachen für eine mangelnde Spannungsqualität zu finden und zu beheben.

1.3 Sensoren als Alternative zu klassischen Schutzwandlern

Aufgrund zunehmender dezentraler Energieerzeugung mit schwankenden Einspeiseleistungen kann es im Verteilnetz zu dynamisch veränderlichen Lastflussrichtungen und Spannungsfällen kommen (**Bild 1**).

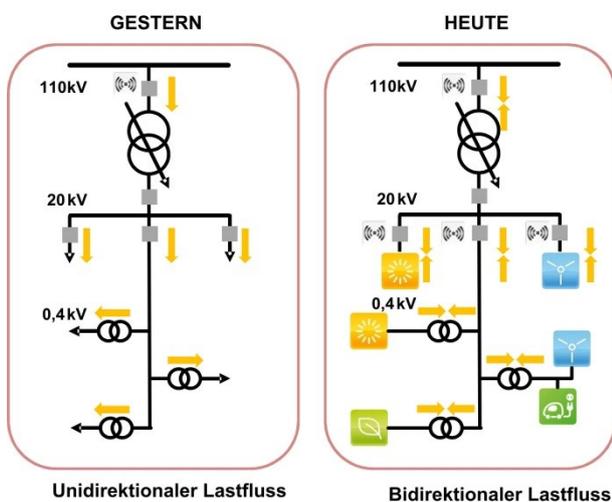


Bild 1 Herausforderungen im MS-Verteilnetz

Dies stellt den Netzschutz vor besondere Herausforderungen. Um einen Fehler der aus mehreren Quellen gespeist wird, möglichst selektiv abschalten zu können, wären Distanzschutzfunktionen am besten geeignet. In den unteren, wenig automatisierten Bereichen des Verteilnetzes werden die dafür erforderlichen Messgrößen bisher jedoch nicht erhoben. Häufig ist nur eine einfache Überstrom-Schutzfunktion vorhanden. Ohne zusätzliche Messstellen und Kommunikation würde die Fehlerortung zukünftig erschwert und die Verfügbarkeit reduziert werden. Diese Nachrüstungen mit konventioneller Wandler-Technologie vorzunehmen wäre mit hohen Kosten und Problemen beim Bauraum verbunden.

Hinzu kommt, dass durch die schwankende Einspeiseleistung neben der Lastflussrichtung auch die Fehlerströme stark variieren. Konventionelle Stromwandler sind aufgrund ihrer Hysterese jedoch in ihrer Dynamik beschränkt. Die Schutz-Applikation kann ohne Modifikationen an der Primärtechnik kaum an veränderte Netzparameter angepasst werden.

Heutige digitale Schutzgeräte sind zudem nicht auf die hohe Ausgangsleistung angewiesen, die konventionelle Wandler noch immer bereitstellen. Diese muss einerseits mit einem gewissen Verdrahtungsaufwand übertragen werden und erzeugt außerdem erhebliche Wärmeverluste in den Schaltanlagen.

Eine Alternative zu konventionellen Wandlern sowohl für die Strom- als auch für die Spannungsmessung sind passive Kleinsignal-Wandler. Diese zeichnen sich durch eine große Eingangsdynamik aus, bei gleichzeitig drastisch reduziertem Bauraum, geringerem Gewicht und niedrigen Kosten. Die an den Sekundärklemmen bereitgestellte Ausgangsleistung ist im Vergleich zur konventionellen Technik sehr klein. Neben der Energieeffizienz wird dadurch auch die Sicherheit der Bediener verbessert, da an den Klemmen von Spannungssensoren oder den hier behandelten Rogowski-Sensoren zur Strommessung keine gefährlichen Berührspannung an offenen Klemmen auftreten. Außerdem können Spannungs-Sensoren im Gegensatz zu Wandlern bei Kurzschlüssen im Sekundärkreis nicht überlastet und zerstört werden.

Aufgrund ihrer Eigenschaften sind die passiven Kleinsignal-Wandler vor allem für Netzbereiche geeignet in denen der Bedarf komplexer Schutzfunktionen mit begrenztem Installationsraum und hohem Kostendruck in Einklang gebracht werden muss. Dies sind dann genau die Bereiche - nahe an der Niederspannungsebene - in denen zunehmend mit Oberwellenanteile im supraharmischen Bereich zu rechnen ist.

Im folgenden Abschnitt wird versucht, trotz fehlender Grenzwerte und Verträglichkeitslevel abzuschätzen, ob Oberwellen im Strom zu Beeinträchtigungen beim Netzschutz führen können. Bei der anschließenden Beurteilung der Spannungssensoren geht es dagegen ausschließlich um die Frage, inwieweit ohmsche oder kapazitive Sensoren zur Beurteilung der Spannungsqualität herangezogen werden können.

2 Der Rogowski-Sensor zur Strommessung

Rogowski-Sensoren (**Bild 2**) haben im Gegensatz zu konventionellen Wandlern keinen ferromagnetischen Kern. Dadurch zeigen sie keine Sättigungseffekte, haben einen weiten Strommessbereich und sind nicht anfällig für Ferroresonanz.



Bild 2 Rogowski-Sensor

Die Ausgangsgröße ist eine Spannung $u_2(t)$ über der Messimpedanz R_B , die eine zeitliche Ableitung des Primärstromes darstellt. Das sinusförmige Signal erfährt dabei eine Phasenverschiebung von 90° . Durch Integration dieses Signals wird ein skaliertes Abbild des Primärstromes erzeugt. Um den Einfluss externer magnetischer Felder zu minimieren ist der Rückleiter im Zentrum der Wicklung zum Anfangspunkt zurückgeführt. Die Amplitude der Ausgangsspannung ist proportional zu den Abmessungen der Spule und der Stromänderungsrate. Unter Vernachlässigung von Bürde und Streukapazität gilt:

$$u_2(t) = -\mu_0 \cdot n \cdot A_c \frac{di_1(t)}{dt} = -M_{12} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} \quad (1)$$

μ_0	Magnetische Feldkonstante
n	Windungszahl
A_c	Querschnittsfläche des Kerns
M_{12}	Koppelinduktivität

Die Ausgangsspannung von kommerziellen Rogowski-Sensoren ist üblicherweise klein, z.B. $0,15 \text{ V} / 80 \text{ A}$. Nach (1) steigt die Ausgangsspannung linear mit der Stromänderungsrate. Dadurch ergibt sich eine Steigung in der Kennlinie der Transferimpedanz des Sensors (**Bild 3**) von $20 \text{ dB} / \text{Dekade}$.

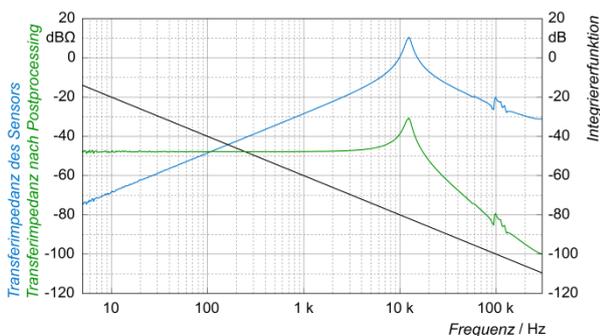


Bild 3 Transferimpedanz einer Rogowskispule

Dieser frequenzabhängige Anstieg wird durch die Integration des Signals ausgeglichen, sodass sich ein konstantes Übersetzungsverhältnis bis zur Resonanzfrequenz des Sensors ergibt. Diese bestimmt sich mit der Induktivität L_3 der Spulenwicklung (**Bild 4**) und der Streukapazität C_S zwischen den Windungen des Sensors zu:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_3 \cdot C_S}} \quad (2)$$

Eine höhere analoge Bandbreite der Strommessung könnte mit einer kleineren Streukapazität C_S erreicht werden. Dabei entsteht jedoch ein Zielkonflikt mit einer möglichst kompakten Bauweise des Sensors.

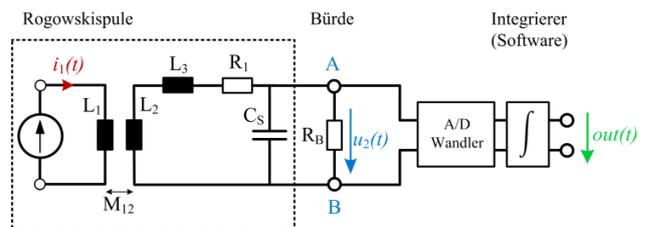


Bild 4 Ersatzschaltbild Rogowski-Messkreis

Typische Werte der Resonanzfrequenz bei Sensoren für die Mittelspannung liegen im Bereich zwischen 5 kHz und 30 kHz . Für Power-Quality-Messungen nach EN 50160 ist das ausreichend. Für Messungen im sogenannten CENELEC-Band zwischen 2 kHz und 150 kHz sind sie dagegen nur eingeschränkt verwendbar.

Eine weitere Voraussetzung dafür ist eine ausreichend hohe Dynamik des verwendeten PQ-Messsystems. Da die Ausgangsspannung linear mit der Frequenz zunimmt, muss der Integrator, bzw. der Analog-Digital-Wandler ab einer oberen Grenzfrequenz von 50 kHz bereits mindestens 60 dB Dynamik aufweisen.

Das folgende Beispiel (**Bild 5**) veranschaulicht den Sachverhalt anhand des analogen Eingangs eines Schutzgerätes. Die Eingangsdynamik liegt bei 50 Hz zwischen 5% und dem 40-fachen des eingestellten Nennstroms von 100 A . Bei diesen Einstellungen würden sogar Oberwellenanteile von 5 A im Bereich der Resonanzfrequenz noch innerhalb der Dynamikgrenzen liegen. Die Gefahr einer Fehlfunktion beim Netzschutz aufgrund von Dynamikverletzungen kann demnach als gering eingeschätzt werden.

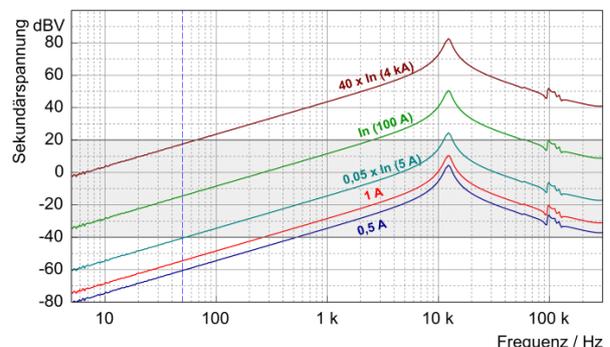


Bild 5 Dynamikanforderung A/D-Wandler

3 Ohmsche Spannungs-Sensoren

Der ohmsche Spannungsteiler hat im Vergleich mit anderen Spannungs-Sensoren, wie z.B. kapazitiven Spannungsteilern Vorteile bei der Genauigkeit im Bereich der Netzfrequenz. Dadurch, dass sich der Hoch- und Niederspannungsteil auf dem gleichen Trägermaterial befinden, kann es durch eine Temperaturveränderung nicht zu einer Drift in der Übersetzung kommen. Obwohl sich der Gesamtwiderstand geringfügig ändert, bleibt das Verhältnis gleich [5]. Zudem ist das Übersetzungsverhältnis unabhängig von anderen externen Einflüssen, wie z.B. Fremdschichten.

Aufgrund der kompakten Bauweise ist die Unterbringung z.B. in einem Stützelement ohne weiteres möglich. Dadurch werden jedoch häufig Elemente zur Feldsteuerung benötigt. Die Streukapazitäten zwischen dem Widerstandsmaterial und diesen Elementen führt in Verbindung mit hohen Widerstandswerten zu Unstetigkeiten im Frequenzverlauf.

Bei niedrigen Frequenzen teilt sich die Spannung über dem Sensor rein resistiv zwischen R_H und R_N auf (Bild 6). Für hohe Frequenzen findet die Teilung dann kapazitiv zwischen C_{H2} und C_N statt.

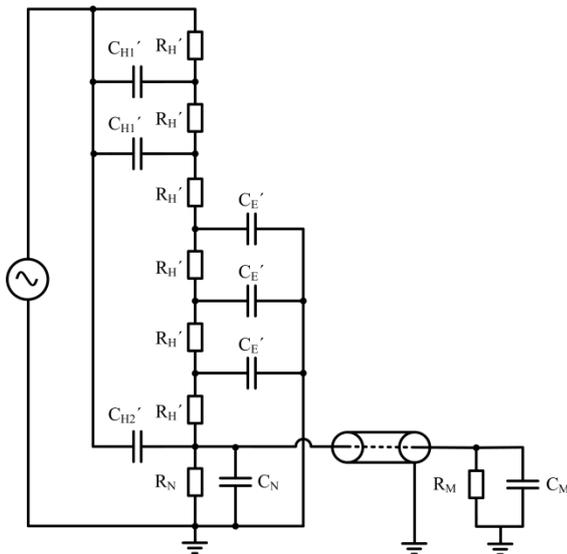


Bild 6 Ersatzschaltbild ohmscher Teiler

Beide Übersetzungen können aneinander angepasst werden, indem vereinfacht gilt:

$$R_H * C_{H2} = R_N * C_N \quad (3)$$

Bei dem untersuchten Teiler Typ 3 (Bild 7) wurde eine zusätzliche diskrete Kapazität verwendet, um den Wert von C_N zu erhöhen. Das Ergebnis ist der in Bild 7 grün dargestellte optimierte Verlauf. Durch den Einfluss der Streukapazitäten zur Feldsteuerung, insbesondere der Erdkapazitäten C_E' kommt es jedoch trotzdem zu einer durch die Bauart bedingten Abweichung in der Übersetzung. Der Effekt ließe sich reduzieren, indem die Kapazitäten C_E' gegenüber C_{H2} und C_N klein werden. Das erforder-

jedoch entweder größere Abmessungen des Sensors oder eine zusätzliche kapazitive Steuerung, also einen gemischten Teiler.

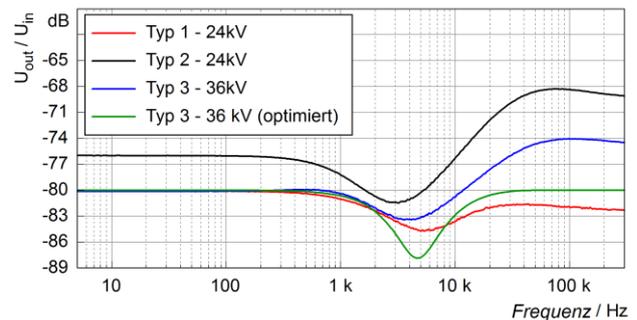


Bild 7 Frequenzabhängige Übersetzungen von ohmschen Teilern verschiedener Hersteller

Die Abweichung von der Nennübersetzung liegt bei den untersuchten Teilern bis 2 kHz bei maximal 7 dB. Bei induktiven Spannungswandlern kann diese Abweichung sogar noch größer ausfallen [6]. Eine Verwendung dieser Sensoren für PQ-Messungen nach EN 60150 erscheint aber ohne eine geeignete Kompensation des Frequenzgangs nicht möglich zu sein.

4 Kapazitive Spannungs-Sensoren

Kapazitive Teiler haben neben den unter Kapitel 3 genannten möglichen Problemen den Vorteil eines - zumindest im unteren kHz-Bereich - über der Frequenz konstanten Übersetzungsverhältnisses (Bild 8).

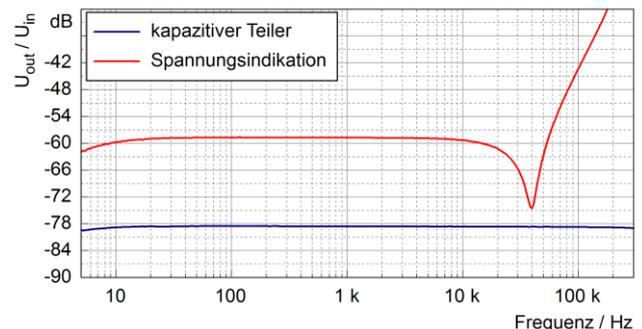


Bild 8 Frequenzabhängige Übersetzung eines kapazitiven Teilers und eines Spannungs-Anzeigesystems

Voraussetzung für eine Verwendbarkeit über 2 kHz hinaus ist allerdings die räumliche Nähe von Hoch- und Niederspannungsteil. Dort wo das nicht gegeben ist, beispielsweise bei Anzeigesystemen zur Spannungsindikation mit zusätzlichem Messabgriff, können durch Wechselwirkung mit der Messleitung Resonanzstellen entstehen. Ein großer Vorteil dieser Anzeigesysteme liegt jedoch in ihrer weiten Verbreitung und der guten Zugänglichkeit bei Vor-Ort-Messungen. Wenn Spannungsanzeigen für PQ-Messungen verwendet werden, kann es durch Streukapazitäten von Schutzelementen, bzw. der Messleitung zu kleinen Abweichungen von der Nennübersetzung kommen. Diese lässt sich durch einen Vergleich mit dem Spannungswandler bei 50 Hz ermitteln und ausgleichen.

5 Zusammenfassung

Verschiedene Messungen in Verteilnetzen zeigen bereits heute signifikante Oberwellenanteile in Strom und Spannung, die im Rahmen des Umbaus der deutschen Energieversorgung noch zunehmen werden. Um die Verteilnetze trotz volatiler, dezentraler Erzeugung mit hoher Verfügbarkeit betreiben zu können, werden außerdem Kleinsignal-Wandler künftig an Bedeutung gewinnen.

Es konnte gezeigt werden, dass Rogowski-Sensoren zur Strommessung für PQ-Beurteilungen nach EN 50160 geeignet sind. Darüber hinaus besitzen die Schutzgeräte bereits durch die Anforderungen an den Strom-Messbereich bei 50Hz eine ausreichende Dynamik um auch die Signalpegel von Strömen mit höheren Frequenzen noch zu erfassen.

Der ohmsche Teiler ist als Spannungs-Sensor für PQ-Messungen nur bedingt geeignet. Die untersuchten Sensoren weisen Unstetigkeiten in ihrer Übertragungsfunktion auf, die auf parasitäre Kapazitäten zurückzuführen sind.

Besser geeignet sind hier kapazitive Sensoren, wobei zu beachten ist, dass bei räumlich verteilten Messsystemen Resonanzstellen im niedrigen kHz-Bereich auftreten können.

6 Literatur

- [1] M. Klatt, J. Meyer, P. Schegner, A. Koch, J. Myrzik und C. Körner, „Emission levels above 2 kHz - Laboratory results and survey measurements in public low voltage grids“, *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, Stockholm, June 2013.
- [2] C. Kikkert, „A PLC frequency model of 3 phase power distribution transformers.“, *3rd International Conference on Smart Grid communications (SmartGridComm)*, Tainan, November 2012.
- [3] S. Schöttke, S. Rademacher, J. Meyer und P. Schegner, „Transfer characteristic of a MV/LV transformer in the frequency range between 2 kHz and 150 kHz“, *2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, Dresden, August 2015.
- [4] EN 50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems., www.cenelec.org.
- [5] P. Mähönen, V. Virtanen und T. Hakola, „The Rogowski coil and the voltage divider in power system protection and monitoring“, *Proceedings CIGRE, China*, 2000.
- [6] M. Klatt, J. Meyer, M. Eslt und P. Schegner, „Frequency response of MV voltage transformers in the range of 50 Hz to 10 kHz“, *International Conference on Harmonics and Power Quality (ICHQP)*, Bergamo, September 2010.