

# Messung der Spannungsqualität in der Hochspannungsebene an Transformator durchführungen

## Power Quality Measurement in High Voltage Grids using Transformer Bushings

Christoph Kattmann, BSS Hochspannungstechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland, christoph.kattmann@bss-hs.de

Martin Siegel, BSS Hochspannungstechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland, martin.siegel@bss-hs.de

Thomas Brügger, Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich, Schweiz, bruegger@fkh.ch

Stefan Tenbohlen, Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland, stefan.tenbohlen@ieh.uni-stuttgart.de

### Kurzfassung

Mit der Verbreitung von PV-Anlagen, Windkraftanlagen mit nachgeschaltetem Umrichter, FACTS-Anlagen und HGÜ-Konverterstationen ist die Messung der Spannungsqualität auch in Hoch- und Höchstspannungsnetzen zunehmend von Interesse. Für die genaue Messung von Oberschwingungen muss zunächst ein geeigneter Spannungswandler gefunden werden, der bei hoher Spannungsfestigkeit und großem Teilerfaktor zusätzlich eine hohe Bandbreite besitzt. Von den etablierten Wandlertypen besitzen nur dedizierte kapazitive und RC-Teiler diese Bandbreite. In diesem Beitrag wird eine weitere Methode vorgestellt, die Messung an einer Transformator durchführung mittels eines kapazitiven Adapters. Es werden die Bandbreite, die Temperaturstabilität und Alterungseffekte diskutiert und die Eignung der Methode durch Labor- und Feldtests demonstriert.

### Abstract

The adoption of PV plants, wind power plants with inverters, FACTS devices and HVDC converters leads to an increased interest in power quality measurements in HV and EHV grids. A major factor in the correct and accurate measurement of harmonics and transient effects in these grids is a suitable voltage divider, which has to feature high voltage stability, a high divider factor, and, additionally, high bandwidth. Among the established divider types, only dedicated capacitive and RC-dividers possess this bandwidth. In this paper, another method is presented, the measurement using transformer bushings and a capacitive adapter. The bandwidth of the method, its temperature stability and ageing effects are discussed and the suitability of the method is demonstrated in lab tests and real-world application.

## 1 Einleitung

Die Messung der Spannungsqualität im Rahmen der DIN EN 50160 ist in der Niederspannung ein etablierter Standard. Mit der zunehmenden Verbreitung von elektronisch gesteuerten Anlagen und Betriebsmitteln wie PV-Anlagen, Windkraftanlagen mit Vollumrichtern, Ladestationen für Elektrofahrzeuge, HGÜ-Konverterstationen und FACTS-Anlagen ist die Sicherstellung der Spannungsqualität auch in der Hoch- und Höchstspannungsebene eine Herausforderung. Vor diesem Hintergrund sind insbesondere mögliche Oberschwingungen und transiente Störungen in der Spannung von Interesse, die zu erhöhten thermischen Verlusten in Transformatoren, Isolationsproblemen, und bei höheren Frequenzen auch zu EMV-Problemen führen können. Konventionelle Kombi- und Spannungswandler, wie sie häufig in der Hochspannungsebene und vornehmlich zu Abrechnungszwecken verwendet werden, sind in der Regel für eine präzise Messung bei Nennfrequenz ausgelegt und haben für die Oberschwingungsmessung keine ausreichende Bandbreite (siehe Kapitel 2). Spezielle RC-Teiler

können auch höhere Frequenzen übertragen, erfordern aber bauliche Änderungen im Umspannwerk. Eine weitere Lösung ist die Messung der Spannung direkt über den Messabgriff der Transformator durchführungen, der in der Regel nur zur Zustandsdiagnose verwendet wird. Mit einem Adapter, der eine Kapazität enthält, kann so mit der Durchführung ein kapazitiver Teiler geschaffen werden, der die sichere Messung der Hochspannung mit großer Bandbreite erlaubt. Die Installation und der Rückbau des Messsystems sind ohne bauliche Änderungen am Transformator möglich.

Diese Arbeit präsentiert die Ergebnisse von diversen Untersuchungen bezüglich der Machbarkeit, erzielbaren Bandbreite, Stabilität sowie Genauigkeit dieser Methode und zeigt einige praktische Erfahrungen. Dazu wird das Temperaturverhalten des kapazitiven Teilers betrachtet, das zu erwartende Langzeitverhalten anhand von historischen Messdaten der Durchführungskapazität untersucht sowie die Konstruktion des kapazitiven Adapters optimiert. Die Vermessung der Bandbreite zeigt, dass mit dieser Methode eine Genauigkeit der erfassten Oberschwin-

gungen von 1% bis 200 kHz möglich ist. Das Temperaturverhalten und die ausgewertete Langzeitstabilität zeigen keine größeren Abweichungen. Die Messmethode wird bei Diagnose- und Monitoringanwendungen getestet und erlaubt eine einfache und kostengünstige Messung der Spannungsqualität im Hoch- und Höchstspannungsnetz.

## 2 Spannungswandler in Hoch- und Höchstspannungsnetzen

In Hoch- und Höchstspannungsnetzen kommen heute mehrere verschiedene Prinzipien von Spannungswandlern zum Einsatz. Fünf mögliche Wandlerprinzipien sind in Bild 1 zu sehen.

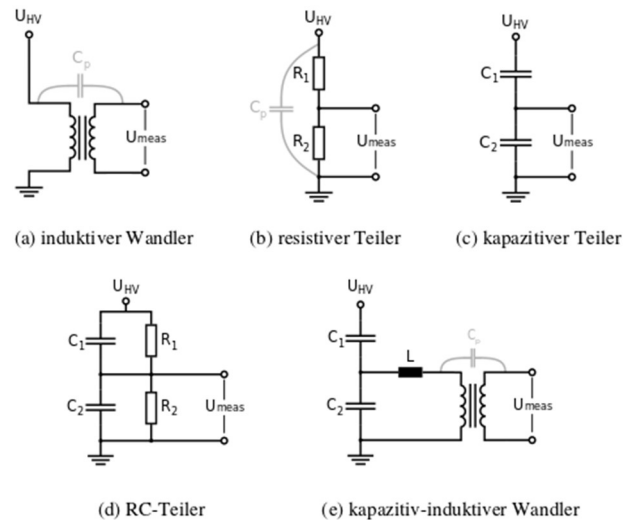
*Induktive Spannungswandler* (Bild 1a) sind heute Standard bei vielen Netzbetreibern. Sie arbeiten nach dem transformatorischen Prinzip und sind in der Regel auf die Netzfrequenz (50 bzw. 60 Hz) ausgelegt. Bei höheren Frequenzen kann der Frequenzgang laut mehrerer Studien [1], [2], [3] stark abweichen. Bereits bei niederfrequenten Harmonischen sind die Abweichungen demnach inakzeptabel. Ab 4 kHz können sogar Resonanzen auftreten, die Abweichungen von 100% und mehr zur Folge haben. Für Messungen im höheren Frequenzbereich sind induktive Spannungswandler demnach nicht geeignet.

*Resistive Spannungsteiler* (Bild 1b) sind die einfachste Teilerbauart aus zwei Widerständen, an denen die Spannung proportional zum Widerstandswert abfällt. Sie werden teilweise im Mittelspannungsnetz eingesetzt. Da die Widerstandswerte sehr groß sein müssen (50 M $\Omega$  und mehr für den Primärwiderstand  $R_1$ ), beschränken die parasitären Kapazitäten die Bandbreite dieser Wandler. Dafür sind sie uneingeschränkt DC-fähig und damit interessant für HVDC-Systeme.

*Kapazitive Spannungsteiler* (Bild 1c) werden vor allem im Höchstspannungsnetz eingesetzt. Die primäre Kapazität  $C_1$  wird meistens aus mehreren, übereinander angeordneten Elementen gebildet. Sie haben eine sehr hohe Bandbreite und werden auch für die Ein- und Auskopplung von Kommunikationssignalen verwendet.

*RC-Teiler* (Bild 1d) bestehen aus einem kapazitiven und einem parallel geschalteten resistiven Teiler. Sie vereinen die Vorteile von resistiven und kapazitiven Teilern und erlauben somit präzise Messungen über einen weiten Frequenzbereich inklusive DC. Sie werden in der Regel für die Messung der Spannungsqualität [4] und transienter Vorgänge [5] verwendet.

*Kapazitiv-induktive Wandler* (Bild 1e) sind eine weitere Bauform in Hoch- und Höchstspannungsnetzen. Der Wert der Induktivität  $L$  muss auf die Netzfrequenz angepasst werden. Für höhere Frequenzen wird der Frequenzgang unvorhersehbar [6]. Dafür ist die Messspannung galvanisch von der Hochspannung getrennt, und eine Leistungsentnahme aus dem Messsignal ist möglich.

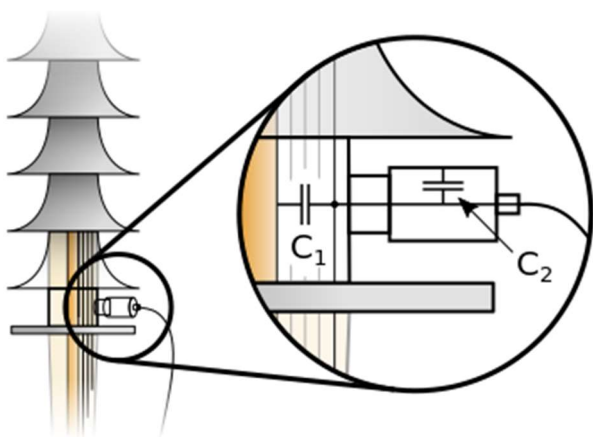


**Bild 1** Verschiedene Prinzipien von Spannungswandlern

Von diesen fünf Messprinzipien sind nur kapazitive Wandler und RC-Teiler in der Lage, höhere Frequenzen mit einem glatten und konstanten Frequenzgang zu übertragen. Induktive, resistive, und kapazitiv-induktive Wandler liefern dagegen schon bei niederfrequenten Harmonischen teils stark abweichende Werte.

## 3 Spannungsmessung über den kapazitiven Messabgriff von Transformatordurchführungen

Eine elegante Art, einen kapazitiven Spannungsteiler in einem Hoch- oder Höchstspannungsnetz zu konstruieren, ist, den kapazitiven Messabgriff einer bestehenden Transformatordurchführung als primäre Kapazität zu verwenden. Dieser Messabgriff ist mit einer internen Absteuerfolie verbunden und wird normalerweise für diagnostische Messungen der Durchführungskapazität und des Verlustfaktors  $\tan(\delta)$  verwendet. Diese etablierten Verfahren erlauben Rückschlüsse über den Zustand des Isolationsmediums und eventuelle interne Beschädigungen der Durchführung. Wird eine sekundäre Kapazität  $C_2$  an den Messanschluss angeschlossen, bildet sie gemeinsam mit der primären Kapazität  $C_1$  einen kapazitiven Teiler wie in Bild 1c. Die Konstruktion ist schematisch in Bild 2 dargestellt.



**Bild 2** Installation des Durchführungsadapters mit der sekundären Kapazität  $C_2$  an der Durchführung

Bei Transformatordurchführungen in der Hoch- und Höchstspannungsebene liegen die Werte der Durchführungskapazität  $C_1$  meist im Bereich um 600 pF. Wenn eine Netzspannung von 420 kV auf eine sichere Messspannung von 20 V heruntergeteilt werden soll, ergibt sich für den Wert der Sekundärkapazität  $C_2$ :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} = \frac{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2}}{\frac{1}{j\omega C_2}} = C_2 \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) = \frac{C_2}{C_1} + 1$$

$$\Rightarrow C_2 = \left( \frac{U_1}{U_2} - 1 \right) C_1 = \left( \frac{420 \text{ kV} / \sqrt{3}}{20 \text{ V}} - 1 \right) \cdot 600 \text{ pF} \approx 7.3 \text{ } \mu\text{F}$$

Diese Kapazität muss über den gesamten Spannungs- und Frequenzbereich stabil sein und muss unempfindlich gegenüber Temperaturänderungen und Alterungserscheinungen sein. Bei SMD-Kapazitäten ist man deshalb auf Klasse 1-Kondensatoren (NP0) beschränkt.

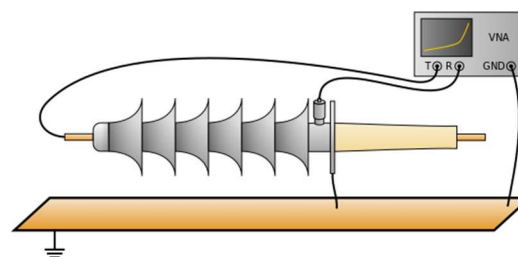
Eine kompakte Bauform ist wichtig, um die Induktivitäten im Sinne einer hohen Bandbreite innerhalb der Schaltung zu minimieren. Aus diesem Grund ist es nicht empfehlenswert, bedrahtete Kondensatoren zu verwenden. Die parasitären Induktivitäten der Bauteile und der Leiterbahnen befinden sich in der Mitte des kapazitiven Teilers, wo sie großen Einfluss auf den Frequenzgang ausüben können.

### 3.1 Bandbreite

Die Bandbreite des Gesamteilers aus Durchführung und Adapter wird mit einem Netzwerkanalysator (VNA) im Labor gemessen. Bild 4 zeigt die Abweichung des Teilerfaktors des Aufbaus von dem Teilerfaktor bei 50 Hz bis zu einer Frequenz von 1 MHz. Dieser beträgt bei einer Ausgangsspannung von 20 V im 420 kV-Netz etwa 1:21.000. Die Abweichungen beim Frequenzgang werden zumindest teilweise durch parasitäre Kapazitäten verursacht, die bei energietechnischen Komponenten mit Ausmaßen von einigen Metern unvermeidlich sind. Da jede Installation an einem Transformator hinsichtlich der parasitären Effekte zwischen Durchführung, Transformatoraufbauten und -

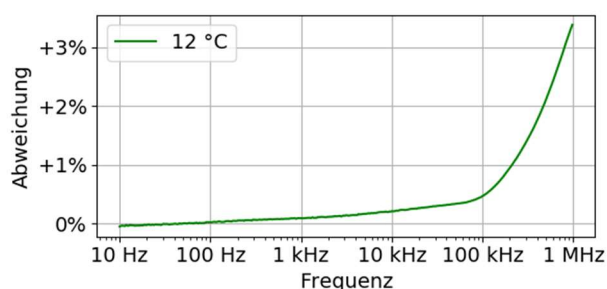
kessel sowie der Erde unterschiedlich ist, wird auch der genaue Frequenzgang des Teilers stets unterschiedlich sein. Um die Ergebnisse der Labormessung hinsichtlich diese Streuungen im realen Einsatz in relevant zu halten, werden die Messungen des Frequenzganges mit einem Messaufbau wie in Bild 3 durchgeführt. Die Durchführung wird dabei etwa 20 cm über einer Kupferplatte platziert, die fest mit der Erde des Netzwerkanalysators verbunden ist. Dadurch sollen die entstehenden parasitären Kapazitäten ein Worst-Case-Szenario darstellen, und die gemessenen Frequenzgänge somit eine untere Grenze für die erzielbare Bandbreite sein.

Der Frequenzgang des Teilers wird von 10 Hz bis 1 MHz vermessen.



**Bild 3** Messaufbau zur Messung der Bandbreite mit definiertem Erdpotential

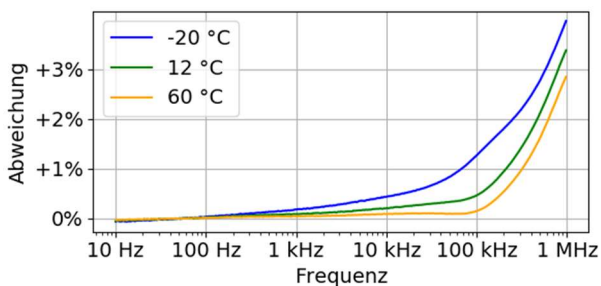
Bild 4 zeigt die Abweichung des Teilerfaktors vom Teilerfaktor bei 50 Hz. Der Teilerfaktor steigt mit steigender Frequenz an und weicht erst ab 200 kHz um mehr als 1% nach oben ab. Ein steigender Teilerfaktor bedeutet eine niedrigere Sekundärspannung, so dass die 3000ste Harmonische bei 150 kHz etwa 0,6% niedriger gemessen wird. In der Norm EN 61000-4-7 wird eine Genauigkeit der gesamten Messkette von 5% gefordert. Damit bleibt für den Rest der Messkette, wie das Messgerät selbst, genügend Toleranz.



**Bild 4** Abweichung des Teilerfaktors vom Faktor bei 50 Hz über der Frequenz

### 3.2 Temperaturabhängigkeit

Hochspannungskomponenten sind wegen der Isolationsanforderungen in der Regel groß gebaut und damit anfällig für Temperaturschwankungen. Die Kapazität einer Transformatordurchführung könnte bei extremen Temperaturen durch leichten Änderungen in der Geometrie variieren. In einer Klimakammer wird deshalb zusätzlich der Teilerfaktor der Durchführung mit installiertem Adapter über der Frequenz bei -20° und 60° Celsius getestet.

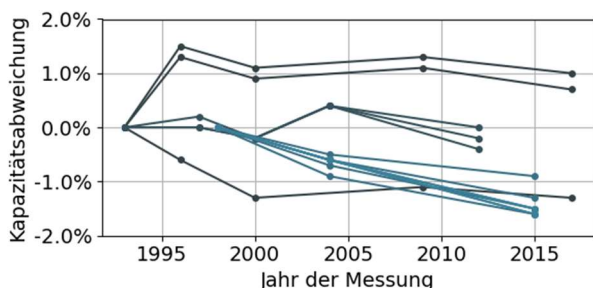


**Bild 5** Abweichung des Teilerfaktors bei 50 Hz und 12° Celsius über der Frequenz bei verschiedenen Temperaturen

Die Ergebnisse in Bild 5 zeigen, dass die Abweichung des Teilerfaktors bei -20° Celsius etwas größer ist, wobei die Abweichung bei 150 kHz immer noch unter 2% liegt. Bei 60° Celsius liegt die Abweichung niedriger als bei 12° Celsius und steigt erst nach 100 kHz überhaupt merkbar an.

### 3.3 Alterung

Um die Alterungserscheinungen bei der Kapazität von Transformatordurchführungen zu beurteilen, werden historische Daten von insgesamt 14 RIP-Durchführungen ausgewertet. Für 6 dieser Durchführungen liegen Daten von 1993 bis 2017 vor. Wie in Bild 6 zu sehen ist, weicht die Kapazität in diesen 24 Jahren nie mehr als 2% vom Ausgangswert ab.



**Bild 6** Abweichungen der primären Kapazität  $C_1$  vom Ausgangswert bei 14 Durchführungen

Bei einer internen Beschädigung der Durchführung, wie dem Überschlag zwischen zwei Absteuerfolien wäre diese Abweichung stärker. Da ein solcher Schaden eine plötzliche und nachhaltige Veränderung der gemessenen Spannung zur Folge hätte, könnte deshalb ein Monitoringsystem diesen auch detektieren und so auch die Funktion eines Durchführungsmonitorings erfüllen.

Leider gibt es keine Informationen über das Langzeitverhalten des Frequenzganges. Es ist aber davon auszugehen, dass bei gleichbleibender Kapazität auch die anderen elektrischen Parameter der Durchführung sich nicht stark verändern werden.

## 4 Anwendung und Resultate

Die Messung der Spannungsqualität mit Durchführungsadaptern wird an mehreren Use-Cases erprobt. Die Anbringung der kapazitiven Adapter ist minimal invasiv und erfordert im besten Fall nur eine sehr kurze Installationszeit, während der der Transformator freigeschaltet werden muss. Dabei müssen lediglich die Adapter aufgeschraubt und die Messkabel verlegt werden. Genauso leicht ist die Installation auch wieder rückzubauen. Bilder 7 und 8 zeigen die Installation an einem Transformator.



**Bild 7** Transformator-Installation des Spannungsqualitäts-Messsystems (zusätzlich Rogowski-Stromzangen installiert)

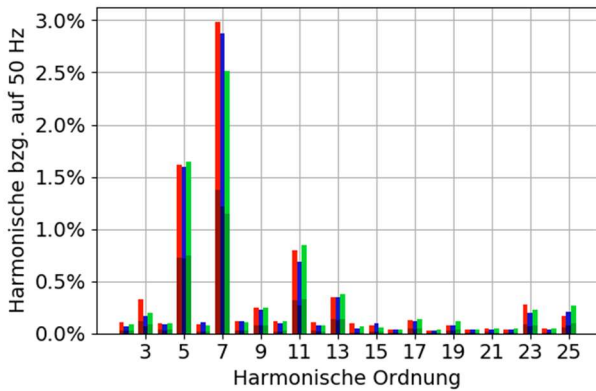


**Bild 8** Installation eines kapazitiven Adapters an der Durchführung (zusätzlich Rogowski-Stromzangen installiert)

Die Ergebnisse zeigen, dass Oberschwingungen im Hochspannungsnetz messbar sind. Bild 9 zeigt das 95ste Perzentil (dunkle Farbe) und den Maximalwert (hellere Farbe) der ersten 25 Harmonischen aller drei Phasen

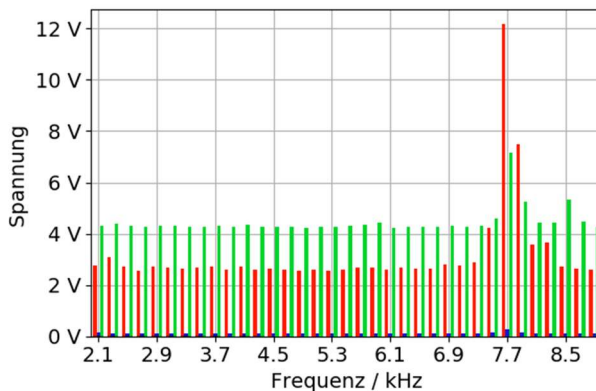


(rot: L1, blau: L2, grün: L3), für die in der Norm DIN 50160 Grenzwerte gegeben sind. Es zeigt sich, dass wie bei vielen Messungen in der Niederspannungsebene vor allem die 5. und die 7. Harmonische einen erhöhten Anteil aufweisen.



**Bild 9** Gehalt an niederfrequenten Harmonischen aller drei Phasen bis zur 25. Ordnung (Werte auf 50 Hz bezogen) bei einer Spannungsqualitätsmessung im 380-kV-Netz (rot: L1, blau: L2, grün: L3)

Im höheren Frequenzbereich von 2 bis 9 kHz (Bild 10) werden die Oberschwingungen meist in 200-Hz-Abschnitten ausgewertet. Die 95sten Perzentil in dunkler Farbe sind kaum sichtbar, bei den Maximalwerten zeigen sich erhöhte Werte um 8 kHz. Die Phase L2 (blau) zeigt in diesem höheren Frequenzbereich kaum Anteile. Diese kurzzeitige Erhöhung kann viele Gründe haben, zeigt aber, dass auch hochfrequente Oberschwingungen im Hochspannungsnetz auftreten.



**Bild 10** Gehalt an hochfrequenten Oberschwingungen bis zur 9 kHz bei einer Spannungsqualitätsmessung im Hochspannungsnetz (rot: L1, blau: L2, grün: L3)

## 5 Zusammenfassung

Bei den Labormessungen und der praktischen Anwendung zeigen sich für die Spannungsmessung an Transformator-durchführungen mit kapazitiven Adaptern viele Vorteile

und keine kritischen Nachteile. Die erzielbare Genauigkeit ist bis zu einer Frequenz von mindestens 150 kHz ausreichend für eine normgerechte Messung von Oberschwingungen. Die Temperaturtests ergaben, dass der Teilerfaktor bei kalten Temperaturen etwas stärker abweicht, aber bis 150 kHz stets im Rahmen von 2% bleibt.

Eine Analyse der Alterungseigenschaften ist nur eingeschränkt möglich, aber eine Auswertung historischer Messdaten von Durchführungskapazitäten zeigt über 24 Jahre keine Abweichungen größer 2%.

Die Installation und der Rückbau der Messinstallation sind jeweils innerhalb eines Tages ohne bauliche Änderungen am Transformator möglich und erfordern nur eine kurzzeitige Freischaltung.

Die Labor- und Feldtest demonstrieren die Eignung der Methode hinsichtlich für Messungen der Spannungsqualität im Hochspannungsnetz.

## 6 Referenzen

- [1] J. Meyer, R. Stiegler, M. Klatt, M. Elst and E. Sperling, "Accuracy of Harmonic Voltage Measurements in the Frequency Range up to 5 kHz Using Conventional Instrument Transformers", CIRED 2011, 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 6-9 June 2011, Paper 0917.
- [2] C. Buchhagen, M. Fischer, L. Hofmann and H. Däumling, "Metrological determination of the frequency response of inductive voltage transformers up to 20 kHz," 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, BC, 2013, pp. 1-5. doi: 10.1109/PESMG.2013.6672835.
- [3] J. Meyer, R. Stiegler and J. Kilter, "Accuracy of voltage instrument transformers for harmonic measurements in elering's 330-kV-transmission network," 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ), Tallinn, 2016, pp. 85-90. doi: 10.1109/PQ.2016.7724094
- [4] E. Sperling and P. Schegner, "A possibility to measure power quality with RC-divider," 22<sup>nd</sup> International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), Stockholm, 2013, pp.1-4. doi: 10.1049/cp.2013.0602
- [5] L. Schwalt, J. Plesch, S. Pack, W. Schulz and G. Achleitner, "Transient measurements in the Austrian high voltage transmission system," 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), Natal, 2017, pp. 208-211. doi: 10.1109/SIPDA.2017.8116925
- [6] H. J. Vermeulen, L. R. Dann and J. van Rooijen, "Equivalent circuit modelling of a capacitive voltage transformer for power system harmonic frequencies," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 4, pp. 1743-1749, Oct 1995. doi: 10.1109/61.473385