

Alternatives Verfahren für die Störfestigkeitsprüfung von elektronischen Messwandlern in Schaltanlagen

M.Sc. Christian Suttner, Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen, Universität Stuttgart, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Stuttgart, Deutschland
Christian.suttner@ieh.uni-stuttgart.de

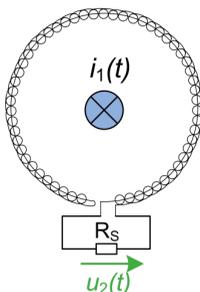
Dr.-Ing. Werner Ebbinghaus, ABB AG, Oberhausener Straße 33, 40472 Ratingen

1 Einleitung

Mittelspannungsschaltanlagen ermöglichen in Energieversorgungsnetzen eine Änderung der Netztopologie, bzw. den selektiven Schutz des Netzes im Fehlerfall. Schalthandlungen in den Mittelspannungskreisen verursachen Vor- und Rückzündungslichtbögen, die transiente Überspannungen mit kurzen Anstiegszeiten zur Folge haben. Diese breitbandigen Transienten koppeln auf die Niederspannungsseite über und wirken dort auf die elektronischen Schutz- und Steuereinheiten (engl. intelligent electronic devices, kurz: IEDs) ein. Um das Risiko einer Fehlfunktion des Netzschutzes zu minimieren sind für die analogen Eingänge eines IEDs spezielle Typprüfungen vorgesehen. Durch die zunehmende Verbreitung von elektronischen Messwandlern nach IEC 60044-8, wie z.B. Rogowski-Sensoren, ergeben sich Unsicherheiten in Bezug auf das genormte Prüfverfahren. In diesem Beitrag werden die Unterschiede zwischen den konventionellen Stromwandlern (engl. current transformer, kurz: CT) und der neuen Technik vorgestellt. Beide Technologien werden hinsichtlich der Koppelpfade für Störgrößen verglichen. Anschließend werden das genormte Prüfverfahren und die Probleme bei dessen Anwendung auf IEDs mit elektronischen Messwandlern beschrieben. Es wird ein alternatives Prüfverfahren vorgeschlagen, dass die reale Beanspruchung für hochohmige Eingänge besser nachbildet. Die Vergleichbarkeit der Störpegel bei Prüfung und realem Schaltanlagenbetrieb wird dabei im Zeit- und Frequenzbereich gezeigt.

1.1 Neue Wandlerkonzepte

a) Rogowski-Sensor



b) Konventioneller Stromwandler

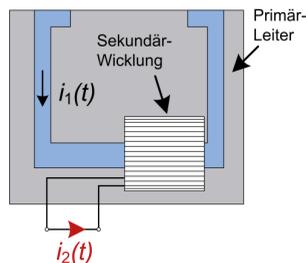


Abbildung 1 - Rogowski-Sensor, konventioneller CT

Konventionelle CTs stellen an ihren Klemmen neben einem genauen Abbild des Primärstroms auch genügend Ausgangsleistung zur Verfügung um

elektromechanische Schutzrelais zu versorgen, oder lange Signalwege zu überbrücken. Ein solcher CT verwendet eine Primärspule mit einer einzigen Windung und einem ferromagnetischen Kern, auf den eine Sekundärspule aufgebracht ist, siehe Abbildung 1b. Aufgrund der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie des Eisenkerns ist die Genauigkeit stark von der Bürde und von der Breite des gewünschten Strommessbereichs abhängig. Da die Fehlerströme in Schaltanlagen die Betriebsströme um mehrere Größenordnungen überschreiten können ist es nicht möglich den gleichen Stromwandler sowohl für Schutz-, als auch für Messzwecke zu verwenden. Die Auslegung der CTs für individuelle Schutzanwendungen erfordert komplexe Netzwerkberechnungen und resultiert in über 100 verschiedenen CT für einen einzelnen Schaltanlagentyp. Hinzu kommt, dass die vom CT abgegebene Leistung von modernen Schutzgeräten nicht benötigt wird. Die Bürde der CT-Verdrahtung ist bei aktueller Feldbus-Technik kaum mehr relevant. Die großen Abmessungen und die Wärmeverluste der CTs stehen der Konstruktion von kleineren Gasräumen im Weg.

Rogowski-Sensoren, wie in Abbildung 1a gezeigt, haben keinen ferromagnetischen Kern. Dadurch zeigen sie keine Sättigungseffekte, haben einen deutlich größeren Strommessbereich und sind nicht anfällig für Ferroresonanz. Die vergleichsweise einfache, kostengünstige und platzsparende Bauweise bietet besonders im Kompaktanlagenbereich und bei Retrofit-Anwendungen Vorteile.

1.2 Besonderheiten mit Blick auf die EMV

Bei einem konventionellen CT bestimmt sich der Sekundärstrom $i_2(t)$ aus dem Verhältnis der Windungszahlen von Primär- und Sekundärspule, sowie aus dem Primärstrom $i_1(t)$. Beim Rogowski-Sensor ist die Ausgangsgröße die Spannung $u_2(t)$ über den Shuntwiderstand R_S , welche die 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 wird der Rückleiter im Zentrum der Wicklung zum Anfangspunkt zurückgeführt, siehe Abbildung 1b. Die Amplitude der Ausgangsspannung ist proportional zu den Abmessungen der Spule und der Stromänderungsrate. Unter Vernachlässigung der Bürde 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. $0,15 \text{ V} / 80 \text{ A}$, was bei einem Nennstrom von 1250 A in einer Ausgangsspannung von $2,34 \text{ V}$ resultieren würde. Typische Störspannungen, wie in Kapitel 1.3 beschrieben, können dagegen bis zu 150 V betragen. Das führt zu einer Überschreitung der Dynamik des IED-Eingangs und kann in Verbindung mit der Signalintegration einen DC-Offset im Stromsignal verursachen. Diese Situation zweifelsfrei zu erkennen und innerhalb kürzester Zeit von einem echten Fehler mit voll verlagertem Kurzschlussstrom zu unterscheiden, stellt für die Hersteller von IEDs eine große Herausforderung dar. Insbesondere der berechnete Erdfehlerschutz, bei dem kein Summenstromwandler verwendet wird, ist hier dem Risiko von Fehlfunktionen ausgesetzt. Um dieses Risiko zu minimieren, ist eine realistische Störfestigkeitsprüfung der IED-Eingänge unverzichtbar.

1.3 Störgrößenausbreitung in Schaltanlagen

Im Folgenden werden die Koppelpfade eines Störimpulses im Mittelspannungskreis einer Schaltanlage über die feldinterne Verdrahtung bis hin zum A/D-Wandler des IEDs beschrieben. Abbildung 2 zeigt den Fall eines konventionellen CT und Abbildung 3 eine Applikation mit Rogowski-Sensor.

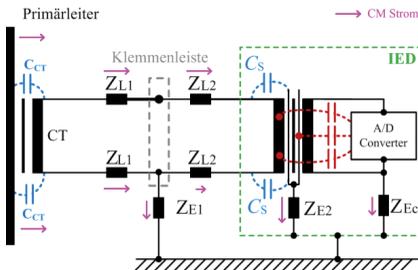


Abbildung 2 - Koppelpfad Stromwandler

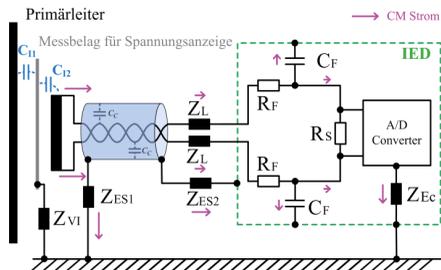


Abbildung 3 - Koppelpfad Rogowski-Sensor

In beiden Fällen findet die Kopplung überwiegend kapazitiv statt und wird hauptsächlich durch die Streukapazität C_{CT} zwischen dem Primärleiter und der Sekundärspule des CT, bzw. des Rogowski-Sensors bestimmt. Im Allgemeinen kann bei Letzterem von einer kleineren Streukapazität ausgegangen werden, da sowohl die Abmessungen deutlich kleiner, als auch der Abstand größer sind. Zudem werden Rogowski-Sensoren fast ausschließlich auf geschirmte Energiekabel oder Durchführungen mit Belägen zur Spannungsanzeige montiert, was die Koppelkapazität nochmals deutlich herabsetzt.

Die Sekundärverdrahtung ist bei Sensoren, anders als bei CTs, geschirmt ausgeführt. Dieser Schirm reduziert neben der elektromagnetischen Strahlungskopplung auch die leitungsgebundenen Störgrößen. Über die Kapazität zum geerdeten Kabelschirm kann ein signifikanter Anteil des Störstromes zur Masse abfließen. Der bei Sensoren verwendete Eingangsfilter muss für das Nutzsignal bei 50 Hz eine möglichst kleine Bürde darstellen. Dadurch fällt die Eingangsimpedanz gegenüber Gleichtaktströmen im Bereich von 1 MHz bis 100 MHz deutlich größer als beim konventionellen CT. Im Fall des CTs wird diese hauptsächlich durch die Impedanz Z_{E2} der Schirmerdung des Sekundärwandlers bestimmt. Abbildung 4 zeigt die gemessenen Störspannungen am IED während einer Trennschalteröffnung unter realen Bedingungen bei 14 kV_{LE}.

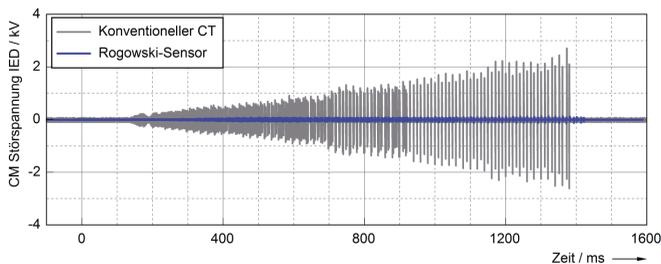


Abbildung 4 - Trennschalteröffnung bei 14 kV_{LE}

Der Vergleich zeigt, dass beim Rogowski-Sensor deutlich geringere CM-Störspannungen am IED-Eingang auftreten als bei konventionellen CTs.

2 Stand der Technik der Störfestigkeitsprüfung

Zur Abdeckung transienter Störgrößen, hervorgerufen durch Schaltvorgänge in den Primärkreisen ist vor allem die Fast Transient / Burst Prüfung relevant. Das Mess- und Prüfverfahren ist in der EMV-Grundnorm IEC 61000-4-4 [1] definiert. Die Störfestigkeitsanforderungen selbst sind in den Fachgrundnormen, bzw. in den spezielleren Produktfamiliennormen und Produktnormen spezifiziert. Für die analogen Signaleingänge von IEDs sind in Tabelle 1 - Anforderungen an Fast Transient / Burst Prüfung aufgelistet.

Tabelle 1 - Anforderungen an Fast Transient / Burst Prüfung

Anforderungen an Signalports (gemäß EMV-Grundnorm IEC 61000-4-4)	Fachgrundnorm für Schaltanlagenumgebungen IEC 61000-6-5	Produktfamiliennorm für Schaltanlagen IEC 62271-1	Produktfamiliennorm für IEDs IEC 60255-26
Generatorspannung	4 kV	2 kV	4 kV
Pulswiederholrate	2,5 kHz	5 kHz	5 kHz
Koppelmethode	nicht spezifiziert	Kap. Koppelzange	CDN

Die Produktfamiliennorm für Schutzgeräte IEC 60255-26 [2] sieht für die verschiedenen Geräteschnittstellen unterschiedliche Methoden der Impulseinkopplung vor. Im Fall der Eingänge für Strom- und Spannungswandler, denen auch die Sensoren zuzurechnen sind, ist ein Koppel-/Entkoppelnetzwerk (engl. coupling decoupling network, kurz CDN) vorgesehen. Das in der EMV-Grundnorm 61000-4-4 beschriebene CDN, siehe Abbildung 5, ist jedoch für hochohmige Einkopplung nicht anwendbar.

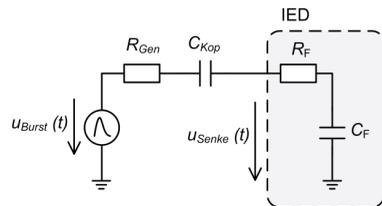
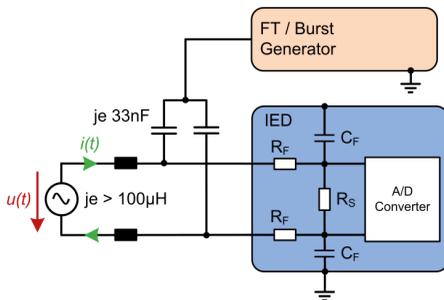


Abbildung 5 - Anordnung zur Burst Prüfung mit CDN Abbildung 6 - ESB der Burst Prüfung mit CDN

Die Ersatzschaltung in Abbildung 6 zeigt, dass aufgrund der im Verhältnis zur Senkenimpedanz kleinen Koppelimpedanz, die gesamte Spannung am Eingang des Prüflings abfällt. Dies stellt eine Beanspruchung dar, welche die Anforderungen im Betrieb um viele Größenordnungen übersteigt. Im Fall eines konventionellen Stromwandlereingangs würde der Störimpuls - wie unter 1.3 beschrieben - über die Abschirmung des Sekundärwandlers zur Masse hin abgeleitet. Bei einem Sensoreingang würde diese Art der Einkopplung dagegen zu Überschlüssen an der Steckverbindung zum IED bzw. im Eingangskreis führen.

Um diesem Problem zu begegnen kommt es in der Praxis auch vor, dass auf die Koppelmethode aus IEC 62271-1 [1] zurückgegriffen wird. Dabei wird ein IED im

eingebauten Zustand in der Schaltanlage geprüft. Es wird eine kapazitive Koppelzange verwendet um die Einwirkung transientser elektromagnetischer Felder auf die Wandlerverdrahtung nachzubilden. Diese Art der Einkopplung entspricht jedoch nicht dem unter 1.3 beschriebenen Koppelpfad. Einerseits findet die Einkopplung nicht im Sensor, sondern im Kabel statt, andererseits ist die wirksame Koppelkapazität aufgrund der Kabelschirme bei Sensoren nur sehr gering. Dadurch fällt die Prüfung insgesamt zu schwach aus. Abbildung 7 zeigt das Ergebnis einer Burst-Prüfung mit der kapazitiven Koppelzange.

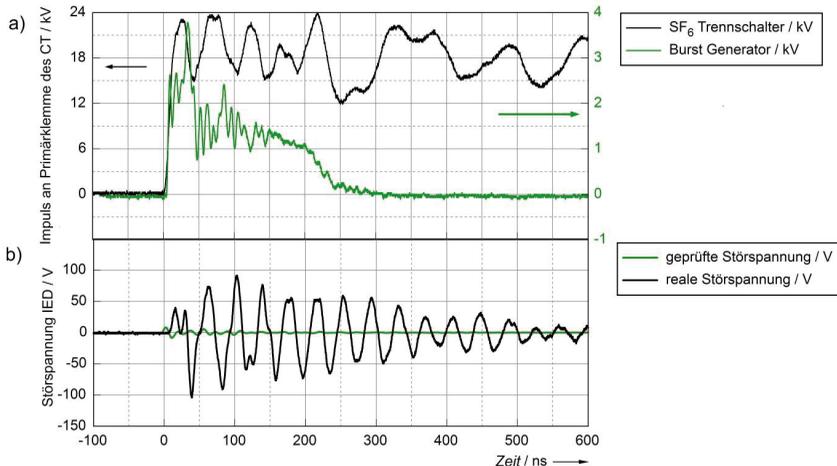


Abbildung 7 – Burst-Prüfung mit kapazitiver Koppelzange

Beim Vergleich der primärseitigen Anregung in Abbildung 7a wird deutlich, dass der Spannungsanstieg des Burst-Impulses mit der Wanderwellenfront einer Trennschalterzündung vergleichbar ist. Der wesentliche Unterschied besteht in der Amplitude. Die eingekoppelte Störspannung fällt im Vergleich zur realen Beanspruchung jedoch weniger als halb so groß aus, als aufgrund der niedrigeren Amplitude der Primärspannung zu erwarten gewesen wäre. Der Grund dafür ist der unterschiedliche Ausbreitungsweg, der den beiden Störspannungen zu Grunde liegt. Diese Koppelmethode kann daher nicht für eine Typprüfung des IED herangezogen werden.

3 Eine alternative Methode zur Einkopplung von Transienten

Um eine realitätsnahe Störfestigkeitsprüfung durchführen zu können müssen sowohl die Anregung der Primärseite, als auch der Koppelpfad möglichst genau nachgebildet werden. Der Aufbau mit dem neuen Koppelnetzwerk nach Abbildung 8 erlaubt eine Prüfung des IED-Eingangs inklusive der originalen Anschlussleitung, um die unter 1.3 beschriebene dämpfende Wirkung der Kabelkapazität zu erhalten.

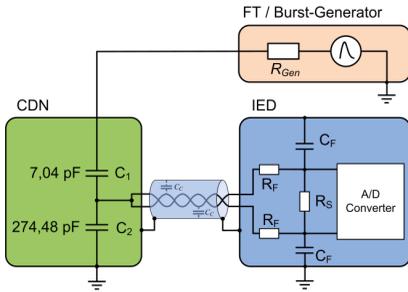


Abbildung 8 - Anordnung für neue Burst-Prüfung Abbildung 9 - Neues Koppelnetzwerk im Gehäuse

Das neue Koppelnetzwerk besteht aus einer mehrschichtigen Leiterplatte und ist in einem geschirmten Gehäuse eingebaut. Es wird anstelle des Sensors im Sekundärkreis platziert und ist mit dem Prüfgenerator über ein Koaxialkabel verbunden.

Die Amplitude der Prüfspannung kann über den kapazitiven Spannungsteiler an einen für den Prüfling definierten Worst-Case angepasst werden. Dieser ist abhängig von der Anlagennennspannung und dem zu testenden Sensortyp. Spannungssensoren, z.B. ohmsche Teiler, haben für gewöhnlich geringere Streukapazitäten bei Stromsensoren. Durch den Aufbau des Teilers über die Streugrößen der Leiterplatte werden Induktivitäten minimiert und eine hohe Spannungsfestigkeit gewährleistet.

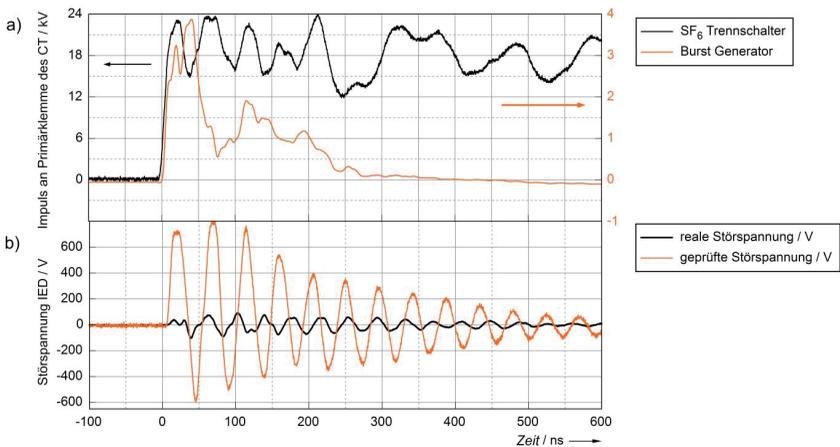


Abbildung 10 - Alternative Koppelmethode: Störspannung im Zeitbereich

Abbildung 10b zeigt einen direkten Vergleich der Störspannung am IED-Eingang. Dabei wird deutlich, dass die reale Beanspruchung von der neuen Prüfung sowohl in Bezug auf die Amplitude als hinsichtlich der Signalforn gut abgedeckt wird. Für Letztere ist entscheidend, dass die Anregung mit annähernd gleicher Bandbreite erfolgt, was durch die ähnliche Anstiegszeit der Impulse gegeben ist.

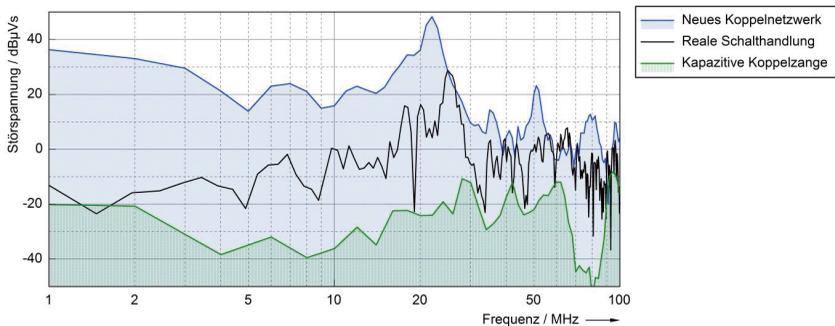


Abbildung 11 - Alternative Koppelmethode: Amplitudendichtespektrum

Der Vergleich der eingekoppelten Störspannungen im Frequenzbereich auf Abbildung 11 zeigt, dass die real auftretenden spektralen Anteile bei der alternativen Koppelmethode wesentlich besser abgedeckt sind als bei der Prüfung mit der kapazitiven Koppelzange. Dabei sind Abweichungen zwischen real auftretenden und geprüften Störpegeln von bis zu 30 dB erkennbar. Insbesondere im kritischen Frequenzbereich zwischen 5 MHz und 30 MHz liefert die neue Methode deutlich bessere Resultate.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge der Einführung alternativer Wandlerkonzepte sind Unsicherheiten in Bezug auf die EMV-Typprüfung von IEDs aufgetreten. Die in IEC 60255-26 geforderte Methode der Einkopplung ist auf hochohmige Eingänge nicht anwendbar. Eine Einkopplung mittels kapazitiver Koppelzange, wie in IEC 62271-1 beschrieben, führt zu deutlich zu geringen Prüfpegeln. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Koppelpfad im realen Schaltfeld ein grundsätzlich anderer ist. Insbesondere im Fall von geschirmten Sensorkabeln weisen die realen Störgrößen wesentlich stärkere spektrale Anteile auf, als die bei der Störfestigkeitsprüfung getesteten. Im Bereich von 1 MHz bis 100 MHz wurden Überschreitungen der geprüften Pegel von bis zu 30 dB festgestellt.

Auf Grundlage dieser Problemstellung wurde eine alternative Methode zur Einkopplung der Prüfspannung vorgeschlagen, bei der anstelle der Koppelzange eine breitbandige Koppelkapazität verwendet wird. Diese besteht aus einer mehrschichtigen Leiterplatte, ist in einem geschirmten Gehäuse eingebaut und wird anstelle des Sensors in den Sekundärkreis eingebracht. Über die Wahl der Kapazität kann der Prüfpegel an die vorgesehene Anlagennennspannung angepasst werden. Durch die verstärkte Kopplung sowie durch die Berücksichtigung des kompletten Ausbreitungsweges zwischen Störquelle und Störsenke werden bei dieser Art der Prüfung die real auftretenden Störgrößen wesentlich besser abgedeckt.

Im nächsten Schritt sollte ein Worst-Case-Szenario für die Störspannungseinkopplung bei Strom und Spannungssensoren definiert und das Teilverhältnis des Koppelnetzwerks darauf angepasst werden.

Ziel weiterer Untersuchungen könnte es sein, die Übertragbarkeit der Methode auf andere genormte Prüfspannungsformen, z.B. Damped Oscillatory Wave zu überprüfen.

5 Literaturverzeichnis

- [1] IEC technical committee 17, subcommittee 17B, IEC 62271-1 Edition 1.0, IEC , 2007.
- [2] IEC technical committee 95, IEC 60255-26 Edition 3.0, IEC, 2013.
- [3] IEC technical committee 77, IEC 61000-6-5 First Edition, IEC.
- [4] IEC technical committee 77, subcommittee 77B, IEC 61000-4-4 First Edition, IEC, 1995.