
Ortung von Teilentladung in gasisolierten Schaltanlagen mittels elektromagnetischer Wellen im UHF-Bereich

Dipl.-Ing. Stefan Hoek

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. J. Kindersberger
Tag der mündlichen Prüfung:	10.02.2014
Publikation:	ISBN: 978-3-86844-681-4

Kurzfassung

Der zuverlässige Betrieb von Hochspannungskomponenten und die Beherrschung der hohen elektrischen Feldstärken sind eine wichtige Voraussetzung zum sicheren Betrieb des elektrischen Versorgungsnetzes. Die Detektion und anschließende Ortung von Teilentladungen (TE) stellt ein wichtiges Hilfsmittel bei der Prüfung, Beurteilung und Wartung von gasisolierten Schaltanlagen (GIS) dar, da sie Schwächen bzw. Schwachstellen im Isolationssystem aufzeigen kann. Die Bestimmung der Position dieser Teilentladungen ist in der Praxis eine wichtige Information, die bei der Beurteilung des Isolationssystems und für die Durchführung von schnellen und gezielten Reparaturen von Vorteil ist. Die UHF-TE-Messung ist ein sehr empfindliches Diagnoseverfahren, denn dabei ermöglicht die massive und leitfähige Kapselung eine von äußeren Störern weitgehend unbeeinträchtigte Erfassung von TE-Signalen. Dabei werden die elektromagnetischen Auswirkungen von Teilentladungen im Frequenzbereich von einigen hundert MHz bis ca. 1,5 bis 2 GHz verwendet. In der vorliegenden Arbeit werden unterschiedliche Methoden zur Ortung von Teilentladungen in GIS mittels Auswertung von Signalen im UHF-Frequenzbereich diskutiert.

Einleitend wird der grundlegende Mechanismus der Teilentladungsentstehung und der typischen Fehlerbilder in GIS erläutert. Auf Grund der verschiedenen physikalischen Auswirkungen dieser schnellen Entladungsprozesse können Teilentladungen mittels unterschiedlicher Messmethoden (z. B. akustisch, optisch, elektrisch etc.) detektiert werden. Gezeigt werden die verschiedenen TE-Messtechniken und ihre Einsatzmöglichkeiten am Betriebsmittel GIS.

Weiter wird die allgemeine Ortung durch Verwendung von Distanzen und Abstandsdifferenzen diskutiert und für die GIS-Anwendung vereinfacht. Eine Quelle kann geortet werden, wenn sich die Länge des Ausbreitungspfades von der Quelle zum Sensor ermitteln lässt und wenn die Geometrie der Anlage mit den Positionen der Sensoren und deren Ausbreitungspfaden bekannt ist.

Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Ausbreitungsweg für die Ortung entscheidend sind, werden die grundlegenden Zusammenhänge der Anregung und Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen im UHF-Bereich in GIS beschrieben. Mit Hilfe von geeigneten Simulationsprogrammen wird versucht, die Komplexität

dieser Ausbreitungsvorgänge anschaulich darzustellen. An einfachen Beispielen wird die Charakteristik der Ausbreitung der UHF-Impulse an verschiedenen typischen Elementen einer GIS gezeigt. Dabei wird die Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Impulses von der Dispersion der höheren Ausbreitungsmoden deutlich. An Beispielen wird die Wellencharakteristik (bzw. die Resonanz) der UHF-Signale demonstriert, die eine Kalibrierung der UHF-Methode kaum denkbar macht.

Es wird eine Ortungsmethode im Frequenzbereich vorgestellt. Diese Methode beruht auf der Auswertung von Interferenzen, die bei der Überlagerung zweier zeitlich verschobener Messsignale entstehen. Nach Erläuterung der Grundlagen werden Vorbedingungen und Grenzen der Methode diskutiert. Zur Analyse der Messkurven werden verschiedene Ansätze verfolgt, die eine empfindliche und genaue Auswertung der Abstandsdifferenz ermöglichen. Eine besteht in der Verwendung der Wavelet-Transformation. Bei der Suche nach den Interferenzabständen mit Hilfe der Wavelet-Analyse wird ein Mutter-Wavelet verwendet, das als Funktionsprototyp, vergleichbar einer Schablone, mit dem Messsignal verglichen wird, um daraus die Zeitdifferenzen der Messsignale abzuleiten. Leistungsfähigkeit und Grenzen dieser Methode werden anhand mehrerer Beispiele demonstriert und diskutiert.

Zur schnellen Diagnose in gasisolierten Schaltanlagen wird eine weitere Ortungsmethode vorgestellt. Das UHF-TE-Ortungssystem arbeitet im Zeitbereich und verwendet schnelle Zähler, die die Zeitdifferenz eines TE-Ereignisses an verschiedenen Sensoren im Subnanosekundenbereich misst. Start- und Stoppsignale der Zähler werden durch die Auswertung der Leistungssprünge im Messsignal durch analoge Signalverarbeitung erzeugt. In der Praxis hat sich dies als eine robuste und empfindliche Methode der Detektion herausgestellt. Es wurde ein Prototyp des Messsystems aufgebaut und es wurden Messungen an verschiedenen Anlagen durchgeführt, die die Leistungsfähigkeit und die Grenzen eines solchen Systems aufzeigen. Die Empfindlichkeit des Messsystems wird durch in den Testaufbau eingespeiste Spannungsimpulse einer bestimmten Amplitude dargestellt. Die Bewertung der Amplitude der Impulse wird in Anlehnung an den Empfindlichkeitsnachweisen nach CIGRE [CIGRE 1999] durchgeführt. Schon für Impulse mit Amplituden, die eine scheinbare Ladung von ca. 5 pC repräsentieren, kann eine Genauigkeit der Laufzeitdifferenzmessung im Nanosekundenbereich festgestellt werden. Die statistische Auswertung von hunderten TE-Ereignissen verbessert noch zusätzlich die Genauigkeit und Zuverlässigkeit.

Mit Hilfe der schnellen und zuverlässigen Detektion, Identifikation und Lokalisation eines Defektes in einer GIS wird eine qualifizierte Bewertung des Isolationszustands möglich.

Summary

Localization of Partial Discharges in Gas-Insulated Switchgear using Electro-magnetic Waves in the UHF-Frequency Range

The reliable operation of high voltage assets and control of the high electric field strengths is an important precondition for safe operation of electrical supply networks. Detection and localization of partial discharge (PD) is an important tool for diagnostic, inspection and maintenance of gas-insulated switchgear (GIS). PD measurements have turned out to be a very powerful technique for testing and monitoring the condition of insulation systems. PD as an early breakdown indicator is generally accepted as needed for measurements and is therefore reflected in numerous standards.

Partial discharges are local electrical discharges that partially break down the high-voltage (HV) insulation and generate electric impulses as well as electromagnetic waves in a broad frequency spectrum due to their short rise time and duration. As an example, for protrusions in SF₆ rise times of impulses below 24 ps have been verified. Measurement and detection of PD is performed with different methods (e. g., acoustic, optical, electrical) involving different propagation paths, propagation mechanisms, frequency ranges and sensor principles which result in divergent transfer behavior. UHF PD measurement, so the measurement in ultra-high-frequency range, ranges from a few hundred MHz up to approximately 1.5 to 2 GHz and is therefore a very sensitive diagnostic method for GIS. Using fast and reliable detection, identification and localization of a defect in a GIS, a qualified assessment of the insulation condition is possible. Several methods can be used for localization of PD, based on different physical phenomena. The most practical methods are based on sectionizing, electrical time-of-flight measurements, acoustic measurements and a combination of them.

This thesis describes different methods for time based localization of PD in GIS using signals in the UHF frequency range in a cost-effective way. Magnitude-based localization is not possible because of resonances and other effects.

Starting with the basic mechanism of partial discharge, the typical failure patterns in GIS is explained. The different PD measuring techniques and their application on GIS are shown. Background of the time-of-flight localization is the excitation and propagation processes of the electromagnetic waves in the GIS simulated by PD pulses.

Appropriate simulation programs are used to illustrate the complexity of propagation processes. Simulation examples are used to show the characteristics of the propagation of UHF pulses at various simple and typical GIS elements. Thereby the dependence becomes apparent of the propagation velocity and the dispersion because of the higher propagation modes. Higher propagation modes are wave modes propagating in cavities with conductive boundaries like in GIS which are only propagable at frequencies above their own cut-off-frequency (f_{co}). The first higher modes can propagate at frequencies above some hundreds of MHz depending on the size of the GIS.

The first discussed method to estimate time differences for localization is using the frequency domain. It is based on the analysis of interference phenomena caused by

the superposition of two time-shifted measurement signals at two UHF sensors. For analysis of the measured values, different approaches are being pursued to allow a sensitive and accurate evaluation of the localization. One method to analyze the measured spectra is by using wavelet transformation. A sensitive and robust analysis can be done by using a special adapted mother wavelet which matches to the expected superposed signal. This method is discussed by case studies and in consideration of its preconditions and its limitations.

For a fast, simple and reliable diagnosis in gas-insulated switchgear, another localization method is presented. The UHF PD measuring system operates in the time domain. The PD localizations system (PADLOS) uses simple high-speed counters, which measures the time difference of a single PD event to different UHF sensors in the sub-nanosecond range. Start and stop signals of the counters are triggered by the evaluation of measuring abrupt changes of signal power by analog signal processing units. In practice, it has proven to be a robust and sensitive method of detecting and locating PD in a GIS. A prototype of this measuring system (PADLOS) demonstrates the performance and limitations of such a system on a different measurement setup. Even for small pulses, that means with a magnitude which are also used to verify the sensitivity according CIGRE [CIGRE 1999], accuracy could be represented in the nanosecond range. Statistical analysis of hundreds of TE events by using histograms additionally improved the accuracy and reliability.

Using the fast and reliable detection, identification and localization of a defect in a GIS as a qualified assessment of the insulation condition is possible.

Ortung von Teilentladung in gasisolierten Schaltanlagen mittels elektromagnetischer Wellen im UHF-Bereich

Ortung von TE in GIS mittels elektromagnetischer Wellen im UHF-Bereich