

- **Zweiseitige Teilentladungsmessung zur Zustandsbewertung langer Energiekabel**
Dipl.-Ing. Manuel Wild

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. ten Brink

Tag der mündlichen Prüfung:

05.06.2018

Durch den vermehrten Einsatz von langen Kabelstrecken im Energieübertragungsnetz steigen die Anforderungen an die Prüftechnik. Heutzutage hat sich die Teilentladungsmessung als wertvolles Hilfsmittel zur Prüfung von elektrischen Betriebsmitteln durchgesetzt. Speziell bei Kabelstrecken im Mittel- und Hochspannungsbereich werden Teilentladungsprüfungen nach der Neuinstallation, Reparatur und zur Zustandsbestimmung im Betrieb eingesetzt. Die Dämpfung von Teilentladungsimpulsen, welche mit der Kabellänge zunimmt, hat einen erheblichen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und Qualität der Teilentladungsmessung. Es steigt die Nachfrage nach neuen Prüfmethoden, welche diese Herausforderungen bewältigen.

Ein Ansatz, der in dieser Arbeit untersucht wird, beschäftigt sich mit der Erweiterung der einseitigen Auskopplung der Teilentladungen an Energiekabel. Bei dieser Technik befindet sich das Messsystem an einem Ende des Kabels. Dieses Messsystem besteht meist aus einem Koppelkondensator zum Auskoppeln der Teilentladungsimpulse aus dem unter Hochspannung befindlichen Kabel. Die hier vorgestellte Erweiterung verwendet ein zweites System, welches am anderen Kabelende die Teilentladungen misst. Diese sogenannte zweiseitige Teilentladungsmessung verringert die maximale Strecke auf die Hälfte, die ein Teilentladungsimpuls zurücklegen muss, bevor er das Messgerät erreicht. Durch diese Methode wird die Empfindlichkeit gesteigert, und Teilentladungen mit geringer Amplitude können zuverlässiger detektiert werden.

Mithilfe des Messsystems an der zweiten Kabelseite kann außerdem die Ortungsmöglichkeit der Fehlerstelle verbessert werden. Eine Fehlerstelle, die eine Teilentladung verursacht, erzeugt einen Impuls, der sich entlang des Kabels in beide Richtungen weg vom Fehlerursprung ausbreitet. Bei der einseitigen Messung wird die zeitliche Differenz ausgewertet, welche zwischen dem direkt eintreffenden Impuls und der Reflexion am offenen Kabelende entsteht. Durch diesen Wert und mit der Kenntnis der Kabellänge sowie der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Impulse kann der tatsächliche Fehlerort berechnet werden. Der Nachteil für diese Art der Lokalisierung besteht in der Notwendigkeit der Reflexion des Impulses am Kabelende. Vorteil der zweiseitigen Messung ist, dass der Impuls am Kabelende gemessen wird und die Reflexion sowie die Ausbreitung zurück zum Kabelanfang nicht mehr notwendig sind. Mit Messungen an verschiedenen langen Kabeln werden die Unterschiede zwischen ein- und zweiseitiger Messung deutlich.

Die zweiseitige Messung bringt neue Herausforderungen mit sich, welche ebenfalls als Teil dieser Arbeit untersucht werden. Die beiden Messstellen befinden sich an den Kabelenden und können bei langen Kabelstrecken mehrere zehn Kilometer voneinander entfernt liegen. Dies stellt ein Problem hinsichtlich der Steuerung des Messsystems und der Auswertung der Messdaten dar. Zum einen kann der Bediener nur an einem System direkt sein, zum anderen müssen die Messsignale zeitlich synchronisiert werden, um eine Laufzeitbestimmung für die Lokalisierung durchführen zu können. Das zweite Messsystem am entfernten Kabelende soll deswegen ferngesteuert werden. Hierfür wird ein Kommunikationssystem entwickelt, welches eine Datenübertragung über lange Kabelstrecken ermöglicht. Als Übertragungsmedium kommt das Energiekabel selbst zum Einsatz, da dieses ohnehin vorhanden ist und somit keine zusätzliche Infrastruktur notwendig wird. Hierfür werden verschiedenen Möglichkeiten zur Modulation der Datensignale untersucht. Eine große Herausforderung ist das Ein- und Auskoppeln der Signale auf ein unter Hochspannung befindliches Kabel. Zu diesem Zweck wird ein Hochspannungskoppelkondensator verwendet, der mithilfe eines angepassten Ankoppelnetzwerks die Daten von einem Modem auf das Energiekabel überträgt. Damit ist es möglich, dasselbe Kabel für die Datenübertragung zu verwenden, welches gleichzeitig der Hochspannungsprüfung unter-

zogen wird. Es wird anhand von Messungen gezeigt, dass die Übermittlung von Datensignalen über eine Distanz von mehreren zehn Kilometern möglich ist.

Eine weitere Herausforderung der zweiseitigen Teilentladungsmessung ist die zeitliche Synchronisation der Messdaten der beiden getrennt liegenden Messsysteme. Für diese Aufgabe wird ein GPS Modul eingesetzt, welches einen Zeitstempel erzeugen kann um die beiden Systeme zu synchronisieren. Messungen zeigen, dass die zeitliche Genauigkeit ausreichend ist, um eine Lokalisierung auf mehrere Meter genau durchführen zu können. Bei einem Energiekabel mit mehreren Kilometern Länge wird dadurch eine Genauigkeit kleiner als ein Prozent erreicht. Hierbei wird die untere Grenze der Genauigkeit durch die Impulsform der Teilentladungen begrenzt. Direkt am Entstehungsort der Teilentladung liegt die Anstiegszeit des Impulses bei wenigen Nanosekunden. Bereits nach einer kurzen Ausbreitungsstrecke von einigen Metern sind die hochfrequenten Anteile bereits so stark gedämpft, dass die Anstiegszeit im Bereich von einigen hundert Nanosekunden bis hin zu mehreren Mikrosekunden liegen kann. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Auswertung der zeitlichen Differenz im Anstieg der Impulsform die besten Ergebnisse liefert. Bei einer langsamen Anstiegszeit ist deshalb mit einem großen zeitlichen Fehler zu rechnen. Dieser Effekt stellt eine physikalische Grenze der Genauigkeit der Lokalisierung an langen Energiekabelstrecken dar.

Die Arbeit zeigt, dass die zweiseitige Teilentladungsmessung zusammen mit dem Einsatz der Datenübertragung über Energiekabel sowie der Synchronisierung mit GPS Möglichkeiten eröffnet, zuverlässigere und empfindlichere Teilentladungsmessungen durchführen zu können. Untersuchungen zur Teilentladungsausbreitung an langen Energiekabeln und deren Herausforderungen bei Vor-Ort-Messungen werden vorgestellt. Mithilfe eines Modells zur Simulation der Teilentladungsausbreitung kann die Veränderung von Teilentladungsimpulsen während der Ausbreitung im Energiekabel bestimmt werden. Die Arbeit zeigt außerdem ein neues Verfahren um die Teilentladungsmessung an Energiekabel empfindlicher zu machen. Hierfür wird ein Verfahren entwickelt, welches sich für die Datenübertragung über Energiekabel bei Vor-Ort-Messungen eignet. Insbesondere der Einsatz des Energiekabels selbst als Übertragungskanal verringert den Installationsaufwand bei Vor-Ort-Messungen erheblich und senkt damit den zeitlichen und finanziellen Aufwand.

■ **Two-sided Partial Discharge Measurement for Condition Monitoring of long Power Cables**

Dipl.-Ing. Manuel Wild

Due to the increased use of long cable lengths in the power transmission grid, requirements for testing technology are increasing. Nowadays, partial discharge measurement has become a valuable tool for testing electrical equipment. Especially

in the case of cable circuits in the medium and high voltage range, partial discharge measurements are used after the installation and repair as well for condition monitoring during operation. The attenuation of partial discharge pulses, which increases with the cable length, has a considerable influence on the reliability and quality of the partial discharge measurement. There is a growing demand for new test methods that meet this challenge.

One approach, which is investigated in this thesis, deals with the extension of the single-sided decoupling of the partial discharges out of the energy cable. In this technique, the measuring system is located at one end of the cable. This system usually consists of a coupling capacitor for decoupling the partial discharge pulses from the cable under high voltage. The expansion shown here uses a second system, which measures the partial discharges at the other end of the cable. This shows two-sided partial discharge measurement reduces the maximum distance to the half that a partial discharge pulse must pass before it reaches the measuring device. It is shown that this method increases sensitivity and allows partial discharges with low amplitude to be detected more reliably.

By using an additional measuring system at the second cable side, the location possibility of the fault location can also be improved. An isolation fault causing partial discharge, produce a pulse that propagates along the cable in both directions away from the fault origin. In the case of the single-sided measurement, the time difference between the directly arriving pulse and the reflection over the far cable end is evaluated. This value and the knowledge of the cable length as well as the propagation speed of the pulses can be used to calculate the actual fault location. The disadvantage for this type of localization is the need of the reflection of the cable end. The advantage of the two-sided measurement is the pulse at the cable end is measured and the reflection as well as the propagation back to the other cable side is no longer necessary. With measurements on cables of different lengths, the differences between single and two-sided measurements are pointed out.

The two-sided measurement leads to new challenges, which are also examined as part of this work. The two measuring systems are located at the cable ends and can be several tens of kilometers apart for long cable circuits. This is a problem with regard to the control of the measuring system and the evaluation of the measured data. On the one hand, the operator can only be directly at one cable end, on the other hand the measuring signals have to be synchronized in time in order to be able to perform a signal propagation time determination for the localization. The second measuring system at the remote end of the cable should be controlled remotely. For this purposes, a communication system is developed which allows data transmission over long cable lengths. As transmission medium the power cable itself is used, since it is already present and thus no additional infrastructure is necessary. Various possibilities for the modulation of the data signals are examined for this purpose. A great challenge is the coupling of the signals to a cable under high voltage. For this task, a high-voltage coupling capacitor has been used, which transmits the data from a modem to the power cable by means of an adapted coupling network. This makes it

possible to use the same cable for data transmission, which is simultaneously subjected to the high-voltage test. It is shown by means of measurements that the transmission of data signals over a distance of several tens of kilometers is possible.

The second challenge of the two-sided partial discharge measurement is the time synchronization of the measurement data of the two separately located measuring systems. For this task, a GPS module is used, which can generate a time stamp in order to synchronize the two systems. For an energy cable with several kilometers of length, an accuracy of less than one percent is achieved. In this case, the lower limit of the accuracy is limited by the pulse shape of the partial discharges. The rise time of the pulse is only a few nanoseconds at the point of origin of the partial discharge. Even after a short propagation distance, the high-frequency components are already strongly attenuated that the rise time can be in the range from a few hundred nanoseconds to several microseconds. Therefore, a high temporal error can be expected with a slow rise time. This effect is a physical limit to the localization accuracy at long power cable distances.

It can be summarized that the two-sided partial discharge measurement together with the use of the data transmission via power cables as well as the synchronization with GPS makes it possible to carry out more reliable partial discharge measurements. Investigations on the partial discharge propagation on long power cables and their challenges in on-site measurements are presented. A model for simulating partial discharge propagation can be used to determine the change in partial discharge pulses during propagation in the power cable. The work also shows a new method to make the partial discharge measurement on power cables more sensitive. In particular, the use of the power cable itself as a transmission channel considerably reduces the amount of installation required for on-site measurements and reduces the setup time and financial costs.