Messtechnische Untersuchung von Erdschlussströmen

Günther Storf, Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH), Zürich

1 Messtechnische Möglichkeiten

1.1 Grundsätzliches zu Erdungsmessungen

Die Überprüfung der Wirksamkeit von Erdungssystemen ist primär eine wichtige sicherheitstechnische Aufgabe [1, 2]. Im Einflussbereich von elektrischen Anlagen dürfen weder im Betrieb noch im Störungsfall Erdpotentialdifferenzen oder Erdströme auftreten, die Lebewesen oder technische Einrichtungen gefährden können. Diese Anforderungen sind in Form von Grenzwertfestlegungen in der geltenden Starkstromverordnung vom 30.3.1994 (Stand 20.1.1998) und der SEV-Regel 3755 D (1999) "Erden als Schutzmassnahme in elektrischen Starkstromanlagen" formuliert.

Ausser der Kontrolle der sicherheitstechnischen Aspekte soll die Erdungssituation einer technischen Anlage auch nach betriebstechnischen Gesichtspunkten beurteilt werden.

Dabei steht eine Analyse der Erdschlussstromverteilung im Vordergrund. Im vorliegenden Beitrag wird auf die dazu eingesetzten Messverfahren eingegangen

1.2 Messung mit simuliertem Erdschluss (Strom-Spannungs-Methode)



Abbildung 1: Grundprinzip einer Erdungsmessung

Das Prinzip einer Erdungsuntersuchung für netzfrequente Vorgänge nach der Strom-Spannungs-Methode [3] kann wie folgt umschrieben werden:

Ein künstlicher, reduzierter Erdschlussstrom I_E wird in das Erdsystem eingespeist. Dieser Strom tritt ins Erdreich über und erzeugt dabei in der Anlagenumgebung eine trichterförmige Potentialanhebung U_E .

Es entstehen Potentialdifferenzen, welche durch Schritt- und Berührungsspannnungsmessungen untersucht werden (siehe Abbildung 1). Ein gewisser Anteil der Erdschlussströme, welcher nicht ins Erdreich übertritt, sondern als Rückstrom in Erdleitern fliesst, muss durch Strommessungen erfasst werden (siehe z.B. Erdseilstrom Abbildung 2). Eine messtechnische Überprüfung eines Erdsystems besteht demnach aus Messungen von *Spannungsdifferenzen* und *Ausgleichsströmen* an ausgesuchten Orten der Erdungsanlage, die durch Erdschlussströme entstehen.

Bei grösseren Anlagen wird für die Erdschlussschleife nach Möglichkeit eine ausser Betrieb genommene Freileitung oder Kabelleitung verwendet, welche in einer Gegenstation geerdet wird (vgl. Abbildung 2).

Bei kleinen Erdungsanlagen, beispielsweise bei Transformatorenstationen und bei Masterdern, werden Erdungsmessgeräte (Voltmeter mit integrierter Stromquelle) eingesetzt, wobei die Gegenerde mit Erdsonden bewerkstelligt wird



Abbildung 2: Erdschlussschleife über die Erdungssysteme zweier Unterwerke unter Benutzung einer Freileitung

Die untersuchten Anlagen bleiben jedoch normalerweise in Betrieb, so dass bei allen Messungen mögliche Beeinflussungen aus dem Anlagenbetrieb (50 Hz und Oberwellen) zu berücksichtigen sind.

Bei grösseren Erdungsanlagen von Unterwerken und Kraftwerken wird zur Einspeisung des Erdschlussstroms I_E eine Stromquelle von einigen 10 *A* bis einigen 100 *A* benötigt.

Die FKH verwendet dazu einen mobilen Frequenzumformer. Zur Anpassung an die jeweilige Impedanz der Versuchsleitung wird zwischen Umrichter und Erdschluss-Einspeisestelle ein Anpasstransformator geschaltet. Durch frei zuschaltbare Kondensatoren kann die Blindleistung kompensiert werden. Mit dem Umrichter besteht die Möglichkeit netzasynchron einzuspeisen (12 bis 100 Hz). Die von 50 Hz abweichende Frequenz des eingespeisten Erdungsstroms erlaubt eine einfache und wirkungsvolle Trennung der versuchsbedingten Erdungsströme von betriebsmässigen Erdungsströmen. Zur Ermittlung der Einwirkspannungen wird ein geeignetes hochselektive Filter verwendet, welches eine Beeinflussung der Messresultate durch den 50-Hz-Anlagenbetrieb oder auch durch 16.7-Hz-Bahnströme wirksam verhindert.



Abbildung 3: Erdungsmessanhänger mit Quelle

Abbildung 4: Strommesseinheit mit Filtern

Die FKH verwendet für die Messung einzelner Stromanteile geeignete Zangenstromwandler oder spezielle Rogowskispulen (siehe Abbildung 5 und Abbildung 7), so dass auch Leiter grösseren Querschnitts (z.B. Hochspannungskabel), Rohrleitungen und Masten bis zu Durchmessern von über einem Meter umfasst werden können.

Die Bürdenspannungen der Stromwandler müssen zur Vermeidung von Störeinkopplungen mit abgeschirmten und verdrillten Signalkabeln zum Messplatz übertragen werden. Zur Unterdrückung von 50-Hz-Betriebsströmen und 16.7-Hz-Bahnströmen werden wie bei der Messung Bandsperrfilter und Lock-In-Verstärker eingesetzt.

Die Bestimmung der Phasenlage von Erdstromanteilen in Erdleitern und Kabelmänteln erfordert, dass das Signal vom Messort bis zum versuchsmässig eingespeisten Erdschlussstrom übertragen wird, damit es mit dem Referenzsignal verglichen werden kann. Normalerweise werden die Signale mit einem bebürdeten Stromwandler erfasst und über eine abgeschirmte und verdrillte Zweidrahtleitung bis zum Messplatz übertragen, wo die Phasenverschiebung zwischen dem Referenzstrom und dem gemessenen Teilstrom bestimmt wird.



Abbildung 5: Rogowskispule um KW-Wasserrohr Loopantenne über Kabeltrassee

Abbildung 6:

Abbildung 7: Kleine Flexible Rogowskispule

Für die Bestimmung von Erdstromanteilen, welche über das Erdseil von Freileitungen abfliessen, kann die magnetische Flussdichte B mit einer Loopantenne (siehe Abbildung 6) gemessen werden. Diese "indirekte" Erfassung der Erdseilströme IL hat den Vorteil, dass die Ströme in den oft schwer zugänglichen Erdseilen ohne Mastbesteigungen mittels einer Schleifenantenne vom Boden aus bestimmt werden können. Da der eingespeiste Strom sich in der Frequenz vom Netzbetriebsstrom unterscheidet, können die Magnetfelder, welche der Netzbetriebsstrom verursacht, durch Filterung unterdrückt werden.

1.3 Messung mit echtem Erdschluss

In isolierten Netzen kann der Erdschlussstrom in Betrieb, unter Wahrung der erforderlichen Sicherheitsmassnahmen, durch absichtliches Einleiten eines Erdschlusses direkt gemessen werden. Allerdings erhöht sich die Spannung an den beiden nicht geerdeten Phasen um den Faktor 1.7, was zu einem erhöhten Risiko für das Eintreten eines zweipoligen Erdschlusses führt.

In der Regel wird hierzu in einer Schaltanlage oder Trafostation mit einem Leistungsschalter ein einphasig geerdetes Reservefeld zugeschaltet. Da dieser Schaltzustand nicht lange aufrechterhalten werden sollte, gilt es in möglichst kurzer Zeit alle Messgrössen aufzuzeichnen. Da der Erdschlussstrom synchron zur Netzfrequenz ist, wird vorgängig eine Nullmessung ohne eingelegten Erdschluss aufgenommen. Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen den Messaufbau und die Ergebnisse eines solchen Erdschlussversuchs in einem isolierten Netz.



Abbildung 8: Mehrkanalrekorder

Abbildung 9: Aufzeichnung von 18 Messgrössen

2 Ausgewählte Beispiele

2.1 Untersuchung eines zweipoligen Erdschlusses im isolierten Netz

Dieses Beispiel beschreibt das messtechnische Vorgehen in dem von H. Luternauer bereits besprochenen Doppelerdschlussfällen.

Im Mittelspannungsnetz des ewz wurden in einem ausser Betrieb gesetzten Teilnetz Situationen mit Erdschlüssen an zwei Phasen an unterschiedlichen Orten experimentell untersucht.

Zur Bildung der Doppelerdschlussschleife stand ein Mittelspannungsring von einem Unterwerk aus mit zwei Trafostationen zur Verfügung. In der einen Trafostation konnte der Leistungsschalter zwischen den beiden Leitungsabgängen wahlweise geöffnet werden (Abbildung 10).

Als Speisequelle für einen reduzierten Doppelerdfehlerstrom wurde die FKH-Versuchsquelle mit Frequenzumrichter eingesetzt (Abbildung 11).

Mit dieser frequenzvariablen Speisequelle wurde im Unterwerk ein reduzierter Kurzschlussstrom potentialfrei zwischen den Phasen R und S eingespeist. Um Einkopplungen aus dem im Betrieb stehenden benachbarten Netz unterdrücken zu können, wurde mit einer Frequenz der Stromquelle von 70 Hz eingespeist (Abbildung 12).



Abbildung 10: Prinzipschema der Einspeisung

Gemessen wurden alle Ströme in den durch den doppelten Erdschluss betroffenen Leitungen, sowohl im Leiter als auch auf den Kabelschirmen. Zusätzlich interessierten eingekoppelte Ströme auf Kabelschirmen von parallelen Kabeln, sowie induzierte Spannung von ausgewählten, freigeschalteten, parallelen Energiekabeln.



Abbildung 11: Einspeisequelle im Unterwerk

Abbildung 12: Messplatz in den Trafostationen

2.2 Registrierung von Erdungsströmen und Spannungen bei Versuchen hinsichtlich dem Einsatz eines Polerdungsschalters

Dieses Beispiel wurde im Beitrag von G. Castelli behandelt

Im isolierten 16-kV-Mittelspannungsnetz des AEW wurden zur Abklärung der Eignung eines selektiven Polerdungsschalters zur Erdschlusslöschung praktische Messungen durchgeführt.

Die Funktionsweise eines Polerdungsschalter wurde von G. Castelli sowie P. Abächerli, A. Schmid und G. Köppl schon erläutert.

Für die Erdschlussversuche wurde eine 16-kV-Leitung des AEW benutzt, welche sowohl Kabelstrecken als auch Freileitungsabschnitte enthielt (siehe Abbildung 13). Mit dem Leistungsschalter einer mobilen Trafostation (siehe Abbildung 14) wurde an verschiedenen Stellen der Leitung ein einpoliger Erdschluss eingelegt. Im Anschluss an die Erdschlusseinlei-

tung wurde in beiden Fällen dieselbe Phase im Unterwerk in einem Reservefeld mit einem Polerdungsschalter geerdet.

Alle Erdschlussversuche wurden mit folgenden drei Netzzuständen durchgeführt:

- Versuchsleitung als leerlaufende Leitung
- Versuchsleitung und rückwärtiges Netz
- Versuchsleitung, rückwärtiges Netz und Netz auf der Verbraucherseite der Leitung



Abbildung 13: Prinzipschema der Versuche im 16-kV-Netz des AEW

Bei einer Kabelstrecke konnte wahlweise der Kabelschirm einseitig geöffnet werden. Die Freileitung war mit einem Erdseil versehen.

Messgrössen wurden sowohl im Unterwerk als auch beim Erdschlussort draussen im Felde aufgezeichnet (Abbildung 15). In jeder Versuchskonfiguration wurde der folgende experimentelle Schaltzyklus durchgeführt:

- Start der Aufzeichnung an allen Messorten
- Erden der Phase T in der mobilen Schaltstation (künstlicher Erdfehler)
- Erden der Phase T im UW (Ansprechen des Polerdungsschalters)
- Enterden der Phase T in der mobilen Schaltstation (Aufheben des Fehlers)
- Enterden der Phase T im UW (Ausschalten des Polerdungsschalters)
- Stoppen der Aufzeichnung an allen Messorten

Zwischen den einzelnen Punkten lag immer eine Zeitspanne von ca. 10 Sekunden, womit die Aufzeichnungszeit auf eine Minute festgelegt werden musste. Es konnten pro Schaltzyklus jeweils 4 verschiedene Schaltzustände bewertet werden.



 Abbildung 14:
 Mobile Trafostation des AEW und Abbildung 15:
 Erfassung der Spannungen durch verschiedene Spannungsteiler

Abbildung 16 zeigt ein ausgewertetes Beispiel der Erdstrommessungen für drei Netzkonfigurationen. Die Säulen entsprechen den oben beschriebenen Schaltphasen. Der Erdschluss im Felde befand sich nach der ersten Kabelstrecke vom UW aus. Im vorliegenden Fall war der Schirm der Kabelstrecke beidseitig geerdet



Abbildung 16: Amplitudenauswertung der Ströme: ES = Erdschluss im/bei

Die Untersuchungen zeigten die komplexen Zusammenhänge zwischen Netzkonfiguration und Fehlerzustand einerseits, und der Erdschlussrückstromverteilung andererseits. Der Einfluss des Polerdungsschalters lässt sich teilweise erst nach eingehender Analyse der Erdungssituation voraussagen. Die Erdfehlerstromverteilung ist ohne die Wirkung der magnetischen Induktion, das heisst nur durch die ohmschen Spannungsabfälle, nicht zu erklären.

Abhängigkeit der Erdschlussströme von der Netzkapazität

Wurde der experimentelle Erdschluss nur an einem Ort, d.h. ohne Einsatz des Polerdungsschalters, eingeleitet, entweder bei der Fehlerstelle oder im Unterwerk, so war dieser nur von der Kapazität des betroffenen Netzes abhängig und war unabhängig vom Ort der Fehlerstelle

Beim Versuch nur mit der Leitung (1. Tabelle in Abbildung 16) betrug der Erdschlussstrom etwa 16 A.

Wird zusätzlich das rückwärtige Netz in den erdschlussbehafteten Trafoabgang einbezogen (2. Tabelle in Abbildung 16) erhöhte sich der Erdschlussstrom auf 45 A.

Zusammen mit dem Netz als Last (3. Tabelle in Abbildung 16) ergab sich ein einpoliger Erdschlussstrom von 64 A.

Einfluss der Belastung der Leitung

Bei den Versuchen mit dem Netz als Last wurde festgestellt, dass sich der Erdschlussstrom an der Fehlerstelle durch zusätzliche Erdung der vom Erdschluss betroffenen Phase im Unterwerk, bei kleiner Leitungsnullimpedanz zwischen Fehlerstelle und Unterwerk, (3. Tabelle in Abbildung 16) sogar von 65 A auf 80 A erhöhte.

3 Schlussfolgerungen

Die Untersuchung von Erdschlussströmen erfordert in realen Fällen die Erfassung einer grossen Zahl von Teilströmen, die bei Kurzzeitmessungen simultan aufgezeichnet werden müssen.

Bei der Analyse der Fehlerströme spielen sowohl kapazitive Ströme (über die Kabelisolation) wie induktive (über Leitungen und Schirme) wie auch ohmsche Ströme (Erdleiterströme) eine wichtige Rolle.

Um die Aufteilung von Erdfehlerströmen an Erdungsverbindungsstellen aufzuzeigen ist deshalb die Erfassung von Amplituden und Phasenlagen erforderlich (komplexe Stromzeiger).

Die vielkanalige simultane Erfassung und eine effiziente Nachverarbeitung der komplexen Ströme und Spannungsabfälle setzt ein sorgfältig ausgetestetes Datenerfassungsgerät und eine darauf abgestimmte Hard- und Softwareinfrastruktur mit den dazugehörigen Schnittstellen voraus.

4 Literatur

- [2] Bräunlich, R.; Storf, G., Sigg, M.: Erdungsmessungen in Unterwerken der Schweizerischen Bundesbahnen. Elektrische Bahnen, Bd 99(2001)1-2, S. 64.
- [3] Erdungen in Starkstromnetzen; Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke m.b.H. VDEW, Frankfurt am Main; 3. Auflage, 1992.