

## 13.3 Erdschlusserfassungsverfahren und Schutzeinrichtungen

In der Tabelle 13-2 sind zunächst die üblichen Erdschlusserfassungsmethoden in einer Übersicht zusammengestellt.

### 13.3.1 Erdschlussmelderelais

- **Funktionsprinzip:** Durch die Unsymmetrie der Außenleiter-Erde-Spannungen auf Grund des Stromflusses zur Erde weicht deren Summe, also die Verlagerungsspannung, von Null ab.

Im Erdschlussfall bricht, je nachdem wie „satt“ der Fehler ist, die Spannung gegen Erde im defekten Leiter bis auf 0 zusammen und in den gesunden Leitern kommt es zur Erhöhung der Spannung von  $U/\sqrt{3}$  auf den Betrag der verketteten Spannung  $U$ . Das bedeutet z. B. im 10-kV-Netz, dass im Erdschlussfall eine Erhöhung von vorher 5,8 kV auf 10 kV eintritt. Die Spannungsverhältnisse bei ungestörtem Betrieb und im Erdschlussfall, wie sie sich im Netz bzw. der Messwicklung und der Erdschluss hilfswicklung ergeben, sind im Bild 13-2 dargestellt.

Hinzu kommt, dass im Erdschlusseintritt bzw. bei intermittierenden Erdschlüssen Spannungsspitzen bis  $2,5 U$  im kompensierten und bis  $3,5 U$  bei isoliertem Sternpunkt auftreten.

Der an der Fehlerstelle fließende Erdschlussstrom kann für Mensch und Tier (auftretende Schrittspannung) sowie die Anlage (thermische Zerstörung) und seine Umwelt (Brandentstehung) eine Gefahr darstellen. Weiterhin kann es durch die Spannungserhöhung in den gesunden Leitern an einer ganz anderen Stelle zu einem weiteren Isolationsdurchschlag im galvanisch zusammenhängenden Netz und damit zum Doppelerdschluss kommen. Mit zunehmender Netzgröße steigt die Wahrscheinlichkeit des Entstehens eines Doppelerdschlusses quadratisch [S3].

Die Erdschlusserfassung erfolgt zweckmäßigerweise durch Anschluss eines Überspannungsrelais an der Erdschluss hilfswicklung der Spannungswandler, z. B. auf der Unterspannungsseite der 110/20-kV-Transformatoren. Zur Unterdrückung der Meldung bei Erdschlusswischern wird ein Zeitrelais nachgeschaltet.

Bei Kabelnetzen ist die üblicherweise im gesunden Netz auftretende Verlagerungsspannung ca. 1–3 % der vollen Verlagerungsspannung bei sattem Erdschluss (100 %, d. h. 100 V sekundär). In Freileitungsnetzen sind wegen der verschiedenen Leiter-Erde-Kapazitäten bei der Verlagerungsspannung Werte von ca. 5–15 % üblich, u. U. (z. B. bei trockenem Wetter und hohen Isolationswerten) kann die Verlagerungsspannung Werte bis zu 30 % annehmen. Ein niedrig (ca. 30 %  $U_{\text{nom}}$ ) eingestelltes Überspannungsrelais erfasst diese Verlagerungsspannung und gibt das Signal („Erdschluss im Netz“) ab.

- **Vorteil:** Wegen der Gleichartigkeit der Verlagerungsspannung im gesamten Netz, unabhängig von der Lage der Erdschlussstelle, kann man Erdschlüsse flächendeckend erfassen.
- **Nachteil:** Keine Fehlerortsselektivität, Einstellprobleme bei hochohmigen Fehlern. Die Verlagerungsspannung errechnet sich bei Abstimmung auf Resonanz aus dem Spannungsteiler bestehend aus der Summe der Wirkverluste des Nullsystems des Netzes und dem Übergangswiderstand an der Fehlerstelle. Übergangswiderstands-Werte ab dem  $k\Omega$ -Bereich regeln u. U. die Verlagerungsspannungsrelais nicht mehr an.
- **Typische Einstellung:**  
 $U_0 = 30 \text{ V}$  und  $t = 10 \text{ s}$  (für Erdschlusswischer-Unterdrückung) bzw.  
 $U_0 = 30 \text{ V}$  und  $t = 0$  (für Erfassung auch von Erdschlusswischern).

### 13.3.2 Erdschluss-Wischerrelais (Standard Auswerte-Algorithmus)

- **Funktionsprinzip:** Beim Zünden eines Erdschlusses entlädt sich zuerst der kranke Außenleiter mit einem Wechselstromstoß, dessen Amplitude und Frequenz von den Wanderwellen entlang dem zu entladenden Leiter bestimmt wird. Diese Entladeschwingung wird aber bei den Erdschluss-Wischerrelais mit Hilfe eines Tiefpasses von ca. 2,5 bis 5 kHz entfernt. Gleichzeitig beginnt ein Umladevorgang, der im Wesentlichen durch die Transformator-Streureaktanzen und den L-C-Ver-



Bild 13-3 Erdschlusswischerrelais ERER3, Sprecher Automation

teilungen der aufzuladenden Leiter bestimmt wird. Die Überlagerung beider Vorgänge nennt man „Zündschwingung“.

Da bei diesen hochfrequenten Vorgängen die Erdschlusslöschpule durch ihre hohe Induktivität unwirksam ist, bestimmt man die Richtung des Ausgleichsstromes und damit den fehlerbehafteten Abgang aus der Phasenlage zwischen Summenstrom und Verlagerungsspannung in einer sog. „Sin-Phi-Schaltung“. Sie wertet die Phasenlage zwischen dem durch einen Hochpass gefilterten Summenstromsignal und dem ebenso gewonnenen Verlagerungsspannungssignal aus.

Bei Fehlereintritt im Spannungsmaximum, z. B. bei Isolationsverlust, kommt es zu kräftigen Umladevorgängen und zu großen Stromstößen im Summenstrom. Ein Erfahrungssatz sagt, dass während etwa 90–95 % der Periodendauer die Spannungsamplitude des kranken Leiters groß genug ist, dass der Zündvorgang kräftig genug wird, um einen Schutz anzuregen. Die Umladefrequenz ist im Wesentlichen abhängig von der Netzgröße, der Kurzschlussimpedanz des Transformators, der Längsinduktivität der Leitung und der Kapazität der Leitung gegen Erde [E40].

Bei Freileitungsnetzen treten Umladefrequenzen von 800–2000 Hz auf; in Kabelnetzen beträgt die Frequenz oft nur wenige 100 Hz. Damit können die Filterkreise der Relais u. U. nicht mehr leicht zwischen betriebsfrequenten Vorgängen und Einschwingvorgängen unterscheiden.

- **Vorteil:** Große, allerdings variable Amplituden beim Zündvorgang, auf Winkelfehler zwischen  $u_0$  und  $i_0$  nicht empfindlich.
- **Nachteil:** Die Messung ist nur einmalig beim Zündvorgang. Bei Doppelerdschlüssen ist dadurch nach Abschaltung eines Fußpunktes keine Ortung des verbleibenden Fußpunktes mehr möglich. Es gibt außerdem keine geschlossene Formel oder einfachere Berechnungsmöglichkeit, um für eine Einstelloptimierung die Frequenzen und die Amplitude – selbst bei angenommenem Fehler-Eintrittswinkel – exakt zu berechnen.
- **Typische Einstellung:** Laut Herstellerhandbuch

### 13.3.3 Erdschluss-Wischerrelais (qu-, und qu2-Algorithmus)

Eine wesentliche Verbesserung konnte mit der Einführung des qu-Algorithmus [S17] bzw. qu2-Algorithmus [E40] erreicht werden. Dieses Verfahren macht sich zunutze, dass die gesunden Leiter des Netzes auf die verkettete Spannung aufgeladen werden.

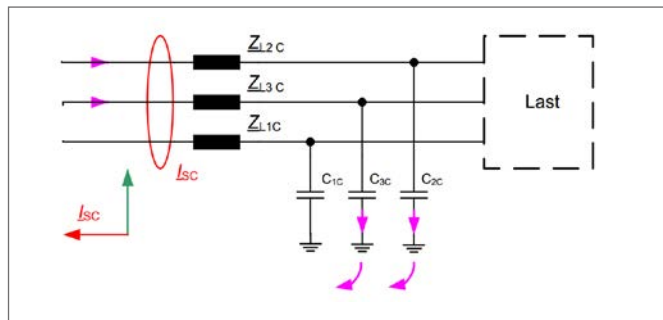


Bild 13-4 Gesunder Abgang

Der Verlauf der Nullspannung kann für diesen gesunden Abgang vereinfacht beschrieben werden durch

$$u_0(t) = u_0(t_0) + \frac{1}{C_{eqB}} \int_{t_0}^t i_{0B}(\tau) d\tau$$

Die heutigen digitalen Relais verfügen über genügend große Speicher, sodass bei Überschreitung der Erdschluss- Schwelle auch auf Daten in der Vergangenheit zugegriffen werden kann und diese sehr einfach bewertet werden können. Gleichung kann leicht gelöst werden, wenn im Speicher der Zeitpunkt mit  $u_0 = 0$  gesucht wird und ab diesen Zeitpunkt der Nullstrom  $i_0$  aufsummiert wird. Der summierte Nullstrom entspricht aber der in die Leitung hineinfließenden Ladung  $q_0$ . Wird nun in einem Diagramm die Ladung  $q_0$  über die Verlagerungsspannung  $u_0$  aufgetragen, so entsteht für einen gesunden Abgang eine Gerade. Die Steigung dieser Geraden entspricht laut Gleichung dem Kehrwert der Leiter-Erde Kapazität des gesunden Abganges.

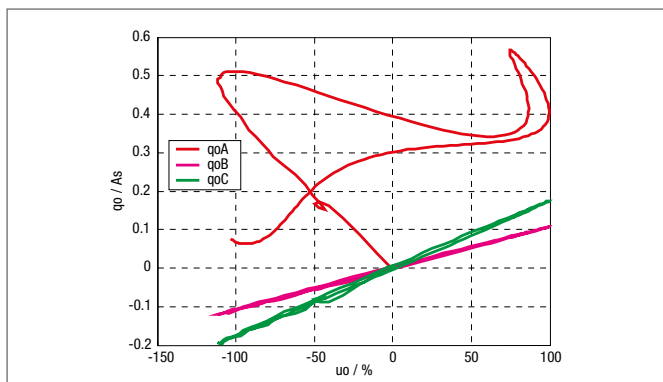


Bild 13-5  $q_u$ -Diagramm eines niederohmigen Fehlers

Für den Strom im fehlerhaften Abgang eines gelöschten Netzes ist diese Modellbeschreibung nicht mehr richtig. Die Auswertung des fehlerhaften Abganges A liefert im gelöschten Netz keine Gerade mehr. Das resultierende Diagramm für den erdschlussbehafteten Abgang A sowie den beiden gesunden Abgänge B und C ist im Bild 13-5 dargestellt.

Durch die Auswertung der Vergangenheit sind bei diesem Verfahren Erdschlusswischer bis in den Bereich von einigen  $k\Omega$  erkennbar.

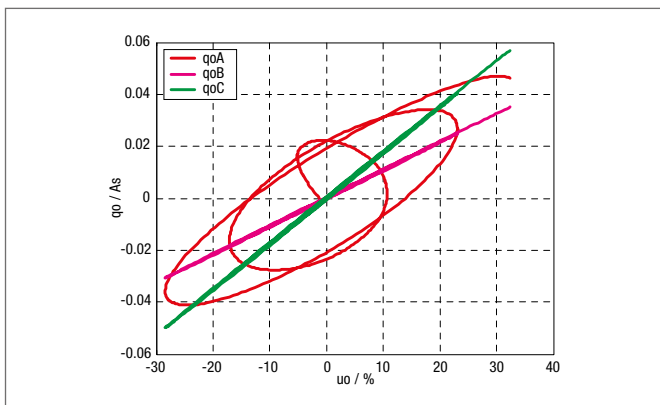


Bild 13-6 qu-Diagramm eines hochohmhigen Fehlers

Die leicht modifizierte Variante in der Form des qui-Verfahrens erkennt auch eindeutig den fehlerhaften Abgang im Falle eines wiederzündenden Fehlers.

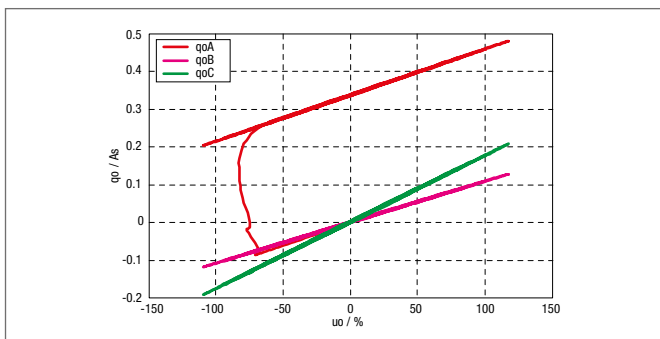


Bild 13-7 qu-Diagramm eines wiederzündenden Fehlers

In Bild 13-7 ist erkennbar, dass zwischen den Zündzeitpunkten der Erdschluss verloschen ist und deshalb während dieser Zeit dieser Abgang gesund ist und eine Gerade darstellt.

Wie in [S26] gezeigt wird, funktionieren die meisten Ortungsverfahren bei intermittierenden Erdschlüssen nicht. Es wird daher bei den digitalen Erdschlussortungsrelais der Firma A. Eberle einerseits mehrere Ortungsalgorithmen gleichzeitig berechnet aber auch eine priorisierte Bewertung der Algorithmen durchgeführt. Dadurch werden z. B. während eines intermittierenden Erdschlusses die Anzeigen des  $\cos(\phi)$  Verfahren unterdrückt.

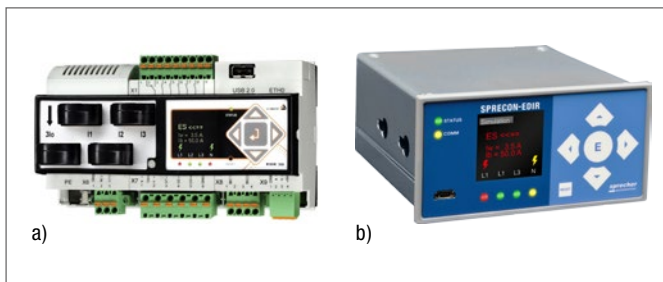


Bild 13-8 Digitale Erdschlussrichtungsrelais  
a) EOR-3D, A. Eberle  
b) EDIR, Sprecher Automation

Durch die integrierende Auswertung des Null-Stromes ist dieses Verfahren auch relativ unempfindlich auf Störungen im Signal. Für die Bewertung des transienten Vorganges wird bei diesem Verfahren daher nur eine kleine Abtastrate benötigt.

Der  $qu_2$ -Algorithmus ist der  $qu$ -Algorithmus mit vorgeschalteter Vorverarbeitung, bestehend aus der Linearisierung um den Arbeitspunkt mit einem nachfolgenden nichtlinearen Filter um die Kreisströme in vermaschten Netzen zu unterdrücken.

Die Praxis hat gezeigt, dass das  $qu_2$ -Verfahren bis in den  $k\Omega$ -Bereich und in vermaschten Netzen richtige Anzeigen liefert. Einzige Voraussetzung für eine richtige Anzeige ist, dass der Zündzeitpunkt im Aufzeichnungsbereich, das sind 10 Perioden vor dem Überschreiten der Erdschluss-Schwelle, liegt.