



Foto: © Denis Junker - Fotolia

Digitale Erdschlussrichtungsbestimmung mit hoher Empfindlichkeit

Die transiente Erdschlussrichtungsbestimmung ist das dominante Verfahren zur selektiven Erdfehlererkennung in den mit Resonanzsternpunktterdung betriebenen 110-kV-Hochspannungsnetzen. In den gleichermaßen geerdeten Mittelspannungsnetzen wird das Verfahren oft zur Grobortung benutzt. Bisher mussten Geräte nach diesem Verfahren zusätzlich zum ohnehin notwendigen Kurzschlusschutz installiert werden oder enthielten keine Aufzeichnung der transienten Ströme und Spannungen im erforderlichen hochfrequenten Bereich. Das hat sich mit der Schutzgerätereihe Siprotec 5 von Siemens geändert.

Text: Stefan Werben, Hagen Grünert

Erdschlusswischerrelais werten die Nullgrößen in einer kurzen Phase nach der Erdschlusszündung aus. Hierbei sind die Signalanteile von besonderem Interesse, die durch das Ent- und Aufladen der Erdkapazitäten des Netzes hervorgerufen werden. Während die Entladeschwingung (typi-

scher Frequenzbereich 500 Hz bis 1000 kHz) des fehlerbehafteten Leiters normalerweise innerhalb der ersten Periode der Aufladeschwingung abgeschlossen ist, benötigt die Aufladeschwingung (typischer Frequenzbereich 70 Hz bis 4 kHz) der fehlerfreien Leiter dafür die ersten Perioden der

Nennfrequenzgrundschiwingung. Aus diesem Grund lässt sich die Entladeschiwingung auch mit relativ hohen Abtastraten (zum Beispiel 8 kHz) nicht immer zuverlässig detektieren. Eine wichtige Eigenschaft dieser Umladevorgänge ist die fehlerrichtungsabhängige Polarität von Nullspannung und Nullstrom.

Dieser Sachverhalt wird von analogen Erdschlusswischerrelais seit Jahrzehnten erfolgreich ausgenutzt, um die Fehlerrichtung bei niederohmigen Erdschlüssen (Bild 1) aus dem Zündimpuls mit einem Vorzeichenvergleich der Nullgrößen zu bestimmen. Bei hochohmigen Fehlern (Bild 2) findet die Umladung der Leitungskapazitäten langsamer statt. Da kein Zündimpuls vorhanden ist, werden derartige Erdschlüsse von klassischen, analogen Wischerrelais nicht zuverlässig erkannt.

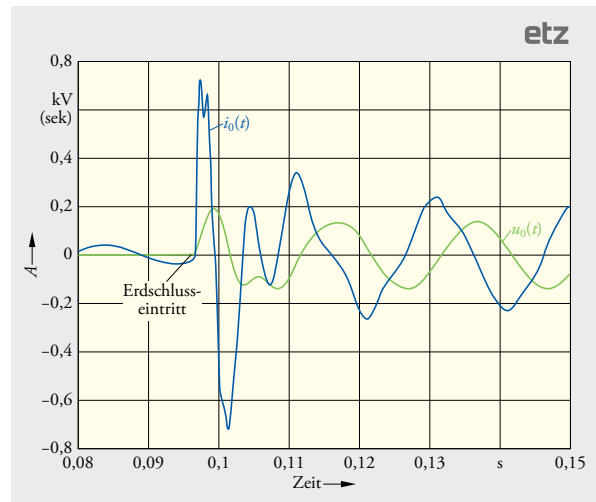
Richtungsbestimmung des neuen Verfahrens

Bei dem neuen Verfahren der Schutzgerätereihe Siprotec 5 von Siemens [1] wird die richtungsbildende Komponente gegenüber einem auf den Momentanwerten der Nullgrößen basierenden Verfahren stark vergrößert, indem ab Fehlerzündung die Wirkleistung und anschließend die Wirkenergie im Nullsystem über eine begrenzte Dauer berechnet werden (Gleichungen 1 bis 3).

$$p_0(k) = u_0(k) i_0(k) \quad (1)$$

$$p_a(k) = \frac{1}{T} \int_{k-T}^k p_0(k) \cdot dt \quad (2)$$

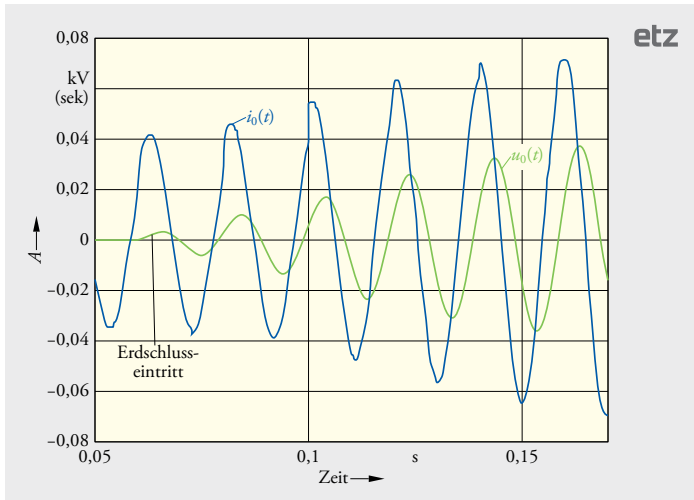
$$E_0(k) = \int_0^k p_a(k) \cdot dt \quad (3)$$



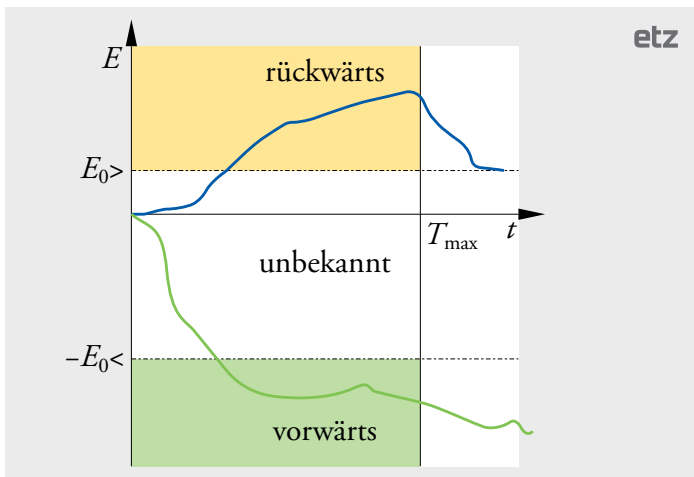
01 Niederohmiger Erdschluss

Die Bewertung der Wirkenergie resultiert aus dem zunächst gleich- oder gegensinnigen Vorzeichenverlauf der Nullspannung und des Nullstroms. Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, den Erdschlusseintrittszeitpunkt präzise zu bestimmen.

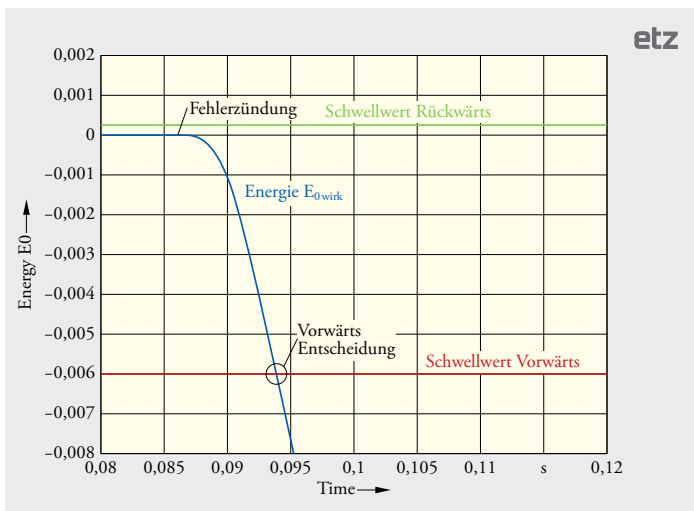
Die berechnete Wirkenergie wird zur Richtungsbestimmung mit Schwellwerten verglichen (Bild 3). Das Überschreiten des positiven Schwellwerts bestimmt den Erdschluss in Rückwärtsrichtung. Das Unterschreiten des negativen Schwellwerts bestimmt den Erdschluss in Vorwärtsrichtung. Die Bewertung der Energie nach Fehlerzündung ist durch eine Zeit T_{max} beschränkt, nach der keine Richtungsentscheidung mehr getroffen wird. Der Umladevorgang ist dann größtenteils abgeschlossen und der Ausgleichvorgang nach Fehlerlöschung oder der statische Fehler kann das Ergebnis negativ beeinflussen. Bild 3 zeigt,



02 Hochohmiger Erdschluss



03 Richtungszonen



04 Berechnung beim hochohmigen Erdschluss

dass der Rückwärtsschwellwert kleiner ist als der Vorwärtsschwellwert. Dies ist plausibel, da sich im fehlerbehafteten Abzweig (Richtung vorwärts) die Ladeschwingungen aus allen Abzweigen summieren und sich somit ein größerer Energiewert ergibt als in den einzelnen fehlerfreien Abzweigen (Richtung rückwärts).

Betriebliche Nullgrößen

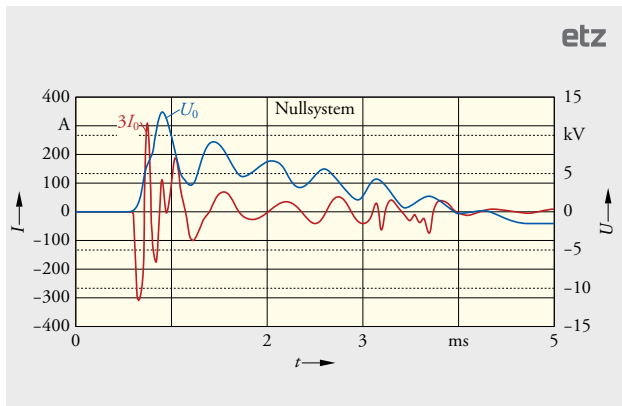
Für die Verfahren zur Erdschlussortung sind kreisende betriebliche Nullströme in vermaschten Netzen oder geschlossenen Ringen ein Problem. Sie werden aus Unsymmetrien der Phasenimpedanzen oder durch parallele Systeme hervorgerufen und verfälschen die Phasenlage des Fehlerstroms. Sie gehen in die Berechnung der Wirkenergie im Nullsystem ein. Dabei steht die Richtung dieser Ströme in keinem Zusammenhang zum Fehlerstrom. Folglich kann das Ergebnis der Richtungsbestimmung verfälscht werden. Für eine korrekte Richtungsentscheidung ist daher die Eliminierung dieser Ströme notwendig. Dies wurde in dem neuen Verfahren umgesetzt.

Bild 4 zeigt die Berechnung der Wirkenergie im Nullsystem für den in Bild 2 gezeigten hochohmigen Erdschluss. Nach der Fehlerzündung erkennt man klar den negativen Verlauf der Wirkenergie. Es handelt sich somit um einen Erdschluss in Vorwärtsrichtung. Rund 7 ms nach Fehlerzündung wird der Richtungsentscheid getroffen.

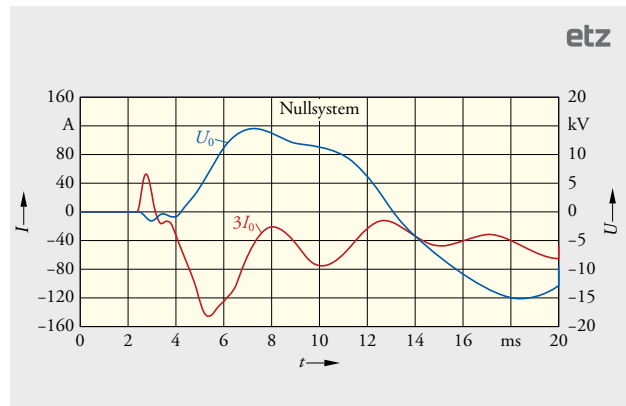
Durch die doppelte Integralbildung (Gleichungen 1 bis 3) lässt sich eine hohe Empfindlichkeit erzielen (bis circa 5 kΩ Fehlerimpedanz). Der Algorithmus arbeitet in allen Netztopologien (Stern, Ring und vermascht) und ist hinsichtlich dieser Eigenschaft statisch messenden Verfahren überlegen. Auch extrem kurze Erdschlusswischer (mit Ladevorgängen von 1 ms bis 2 ms) werden erkannt. Als digitales Verfahren lässt sich der Algorithmus in allen Schutzgeräten der Reihe Siprotec 5 parallel zum Hauptschutz (Leitungsschutz oder Überstromzeitschutz) anwenden.

Prüfungen zur Verfahrensverifizierung

Die Einführung neuer Technologien und Verfahren erfordert geeignete Prüfungen. Somit haben frühzeitige Feldtests aus Herstellersicht eine besondere Bedeutung. Die Anzahl und besonders die Art und Weise der realen Netzfehler ist jedoch nicht vorhersehbar und gewährleistet somit nicht die erforderliche Testtiefe. Um dennoch vor der Markteinführung die erforderlichen Prüfungen, unter Berücksichtigung der kritischen Randbedingungen ausgeführt zu haben, werden transiente Simulationen mit anschließender Sekundärprüfung vorgenommen. Mit dem transienten Berechnungsprogramm Powerfactory V14.1 von Digsilent [2] wurden unterschiedlich große Mittelspannungs- und Hochspannungsnetze simuliert sowie die transienten Ströme und Spannungen für verschiedene Fehler szenarien berechnet.



05 Hochfrequenter Erdschluss in einem kleinen 10-kV-Netz



06 Zündzeitpunkt 165°

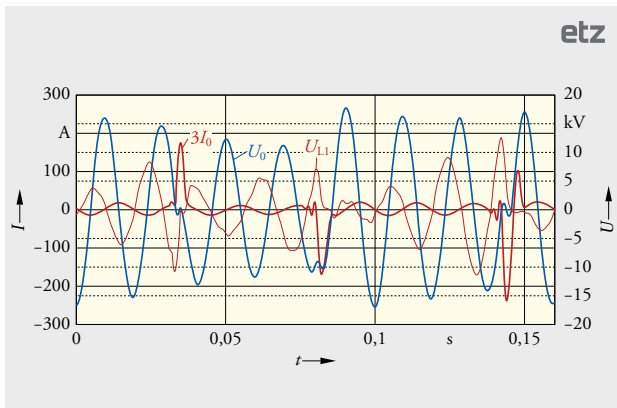
Mithilfe der Sekundärprüfeinrichtung CMC356 von Omicron [3] wurde das Schutzgerät 7SJ85 geprüft. Schwerpunkte der Untersuchungen bildeten die nachstehend spezifizierten und als besonders kritisch eingestuften Parameter.

Fehlereintrittszeitpunkt

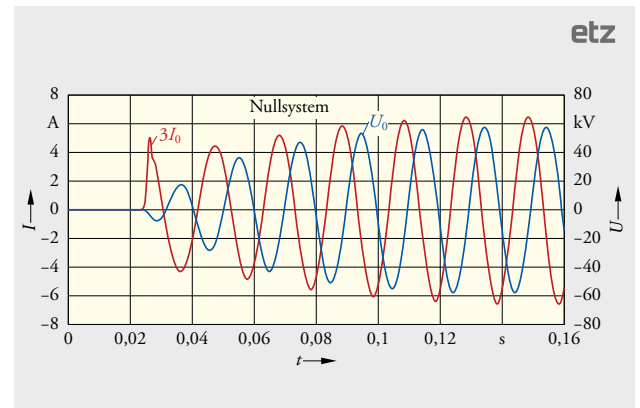
Eine wesentliche und für alle Anwendungen gültige Variable ist der Fehlereintrittszeitpunkt. Tritt der Erdschluss nahe dem Spannungsmaximum der fehlerbehafteten Phase ein, so bilden sich große Amplituden im Nullsystem aus. Das bedeutet, dass sehr gute Messbedingungen existieren (**Bild 5**). Versuche sowie Erfahrungen zeigen jedoch, dass der Fehlereintrittszeitpunkt durchaus nahe dem Nulldurchgang der Spannung liegen kann. Die wesentliche Eigenschaft der Nullgrößen unmittelbar nach dem Fehlereintritt, nämlich die Polarität beziehungsweise die Wirkleistung, ist, wie in **Bild 6** dargestellt, auch hier gültig, jedoch bei sehr geringen Anfangsamplituden. Es folgt die Forderung nach einer sehr empfindlichen sowie genauen Messung und exakten Synchronisierung auf den Fehlereintritt.

Hohe Frequenzen

Die Frequenzen der Ent- und Aufladeschwingungen hängen von den wirksamen Kapazitäten und Induktivitäten der jeweils repräsentativen Schleife ab. Während der Entladevorgang im Wesentlichen durch die Netznullkapazität sowie die Leitungsimpedanzen bestimmt wird, erfolgt die Aufladung



07 Intermittierender Erdschluss

08 110-kV-Erdschluss mit $R_f = 5 \text{ k}\Omega$

der gesunden Leiter über die verhältnismäßig große Transformatorinduktivität. In einem sehr kleinen 10-kV-Mittelspannungsnetz mit einem kapazitiven Erdschlussstrom $I_{ce} = 8 \text{ A}$ und einer 25-MVA-Transformatoreinspeisung beträgt die Aufladefrequenz nach Gleichung 4 1,85 kHz.

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \times \frac{1}{\sqrt{3L_{\text{Trafo}}C_0}} \quad (4)$$

Die gemessene Aufladefrequenz f_a des realen Erdschlusses ergab 1,8 kHz. Wie in Bild 6 ersichtlich, hat die Entladeschwingung mit etwa 6 kHz eine wesentlich höhere Frequenz, die besonders von den Stromwandlern auch übertragen wird. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit eines anspruchsvollen Filterdesigns zur Gewährleistung der Funktion in kleinen Netzen.

Intermittierende Erdfehler

Eine Vielzahl der Erdfehler in Kabelnetzen ist durch ein intermittierendes Verhalten gekennzeichnet (Bild 7). Das bedeutet, dass der Erdfehler selbsttätig verlischt, um anschließend wieder neu zu zünden. Unter diesen Umständen darf der Algorithmus keine neue Messung starten, weil sonst die Gefahr von falschen Richtungsentscheidungen besteht.

Hochohmige Erdfehler

In Freileitungsnetzen, besonders bei trockenem, gefrorenem oder steinigem Boden, können die resultierenden Übergangswiderstände R_f zwischen dem beschädigten Leiter und der Erde sehr große Werte im $\text{k}\Omega$ -Bereich annehmen (Bild 8). Die charakteristischen Nullströme haben dann kein Schwingungsverhalten und bauen sich nur langsam auf. Die Notwendigkeit, derartige Fehler zu erkennen, liegt auf der Hand, da sich ein spannungsführender Leiter in greifbarer Nähe befindet. Ein weiteres Mal wird zur Synchronisierung auf den Fehlereintritt ein besonders empfindliches und genaues Messverhalten gefordert. Weitere zu berücksichtigende Aspekte sind Schalthandlungen mit

kurzzeitigen Nullsystemen sowie betriebliche Nullgrößen durch Unsymmetrien.

Fazit

Unter Variation der vorstehend beschriebenen Parameter wurden Tests für Netze mit Resonanzsternpunktterdung durchgeführt. Isolierte Netze haben hinsichtlich der transienten Erdschlussrichtungsfunktion ein gleiches Verhalten. Berücksichtigt wurden Hochspannungsnetze mit kapazitiven Erdschlussströmen von 100 A, 700 A und 2300 A sowie Mittelspannungsnetze mit 8 A und 150 A. Bei sämtlichen Prüfungen wurde keine falsche Richtungsangabe generiert. Somit bietet das neue, einfache und stabile Verfahren einige Vorteile. Dazu gehören eine hohe Empfindlichkeit (bis etwa $5 \text{ k}\Omega$ Fehlerübergangswiderstand), der Einsatz in allen Netztopologien (Stern, Ring und vermascht), die Integration in die multifunktionalen Siprotec-5-Schutzgeräte (parallel zum Kurzschlusschutz) und die hochauflösende Störschreibung bis 8 kHz. (no)

Literatur

- [1] Siemens AG, München: www.siprotec.de
- [2] Digsilent GmbH, Gomarigen: www.digsilent.de
- [3] Omicron Electronics GmbH, Klaus/Österreich: www.omicron.at
- [4] GSC Power Engineering GmbH, Erlangen: www.gscpower.com

Autoren



Dipl.-Ing. Stefan Werben arbeitet in der Siemens-Division Energy Management in Nürnberg als Produktmanager für Überstromzeitschutzgeräte. stefan.werben@siemens.com



Dipl.-Ing. Hagen Grünert ist Geschäftsführer der GSC Power Engineering GmbH [4] in Erlangen sowie öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für elektrische Energietechnik sowie Schutztechnik von Hoch- und Mittelspannungsanlagen. hagen.gruenert@gscpower.com

