

Selektive Erdschlusserfassung an 380/220/110-kV-Transformatoren

Jens Hauschild • Hagen Grünert

Nicht wirksam geerdete 110-kV-Netze werden üblicherweise mit Resonanzsternpunktterdung betrieben. Hierzu sind die Sternpunkte ausgewählter Verteilungstransformatoren über Petersenspulen geerdet. Basierend auf einem Erdfehler in unmittelbarer Transformatornähe, berichten die Verfasser über die Möglichkeiten und Grenzen der selektiven Erdschlusserfassung.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen der Resonanzsternpunktterdung und einer wirksamen Sternpunktterdung liegt in der Weiterführung des Netzbetriebs im Fall eines einpoligen Erdfehlers, da es zwar zu einer Erhöhung der Spannung der nicht fehlerbehafteten Leiter kommt, jedoch die Fehlerströme gering bleiben. Der Erdfehler, im Weiteren auch als Erdschluss bezeichnet, muss in diesen Netzen durch geeignete Schutzgeräte erkannt und zur Anzeige gebracht, jedoch nicht selektiv abgeschaltet werden. Zur gerichteten Erdschlusserfassung werden üblicherweise Erdschlusswischerrelais verwendet. Die als Kurzschlusschutz verwendeten Distanz- und Differenzialschutzeinrichtungen sollen den einfachen Erdschluss nicht erkennen, um eine Abschaltung des fehlerbehafteten Anlagenteils zu verhindern.

Basierend auf den vorstehenden Fehlergeschehen gilt es, die Möglichkeiten einer selektiven und schnellen Abschaltung von Erdschlüssen im Transformatorbereich genauer zu analysieren, um eventuelle Zerstörungen infolge des Lichtbogens und der wahrscheinlichen Fehlerausweitung auf andere Leiter zu minimieren. Einige wesentliche und schwer quantifizierbare Relaisparameter, wie die Empfindlichkeit der Erdschlusswischerrelais oder die transiente Verzögerungszeit der Distanzanregung beim einfachen Erdschluss, sollen im Weiteren ebenfalls untersucht werden. Letztendlich wurden Erdschlusswischerrelais verschiedener Hersteller detaillierten Tests unterzogen, um die praktischen Grenzen der Erdschlusserfassung zu bestimmen.

Bestimmende Systemparameter

Basierend auf dem aufgezeichneten Störfall (Bild 1) galt es zunächst, ein geeignetes Berechnungsmodell zur Verifizierung des Fehlers und zur weiteren Si-

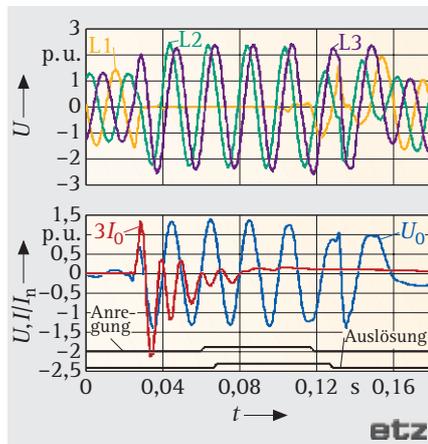


Bild 1. Transiente Größen der Netzstörung

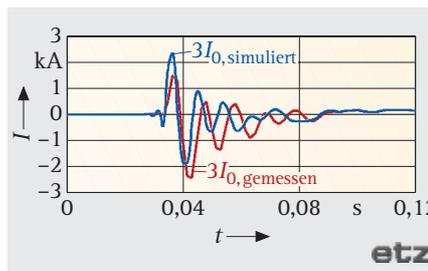


Bild 2. Gemessener und simulierter Nullstrom

mulation zu entwickeln. Hierfür wurde das transiente Simulationsprogramm „PowerFactory“ von Digsilent [1] verwendet. Die Modellierung des Fehlers zeigt eine recht gute Übereinstimmung zwischen Simulation und praktischer Messung unter Berücksichtigung einer Reihe unbekannter Parameter (Bild 2). Im Besonderen die aus Bild 1 ersichtliche kapazitive Unsymmetrie wurde bei der Simulation nicht berücksichtigt. Die wichtigsten Parameter des Fehlers sind:

- kapazitiver Erdschlussstrom ca. 1 500 A,
- Lastfluss ca. 700 MVA,
- Fehlerübergangswiderstand 1 Ω bis 2 Ω,

- der Fehlerort liegt im Randbereich des Netzes,
- Verstimmung -5 % mit 14 verteilten Spulen.

Die Systemparameter Netzausdehnung, Fehlerübergangswiderstand, Fehlereintrittspunkt, Transformatorgröße und örtliche Lage sowie Lastfluss werden näher untersucht, da sie einen maßgeblichen Einfluss auf die Ströme und Spannungen und somit auf die zu verwendenden Schutzsysteme haben.

Die Netzausdehnung

Die Netzausdehnung bestimmt neben der Höhe des kapazitiven Erdschlussstroms und damit des messbaren Nullstroms auch die Frequenzen der Ent- und Aufladungsschwingung (Bild 3) gemäß

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

Die Analyse ergab, dass die kapazitiven Erdschlussströme galvanisch verbundener Netze zwischen 60 A und 2 200 A liegen (Bild 4).

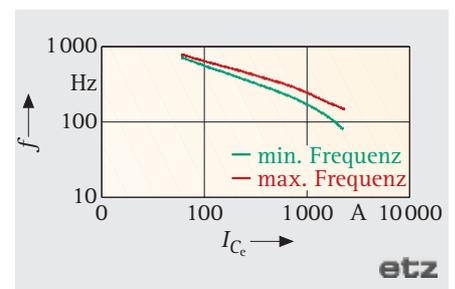


Bild 3. Frequenzen der Ausgleichschwingung

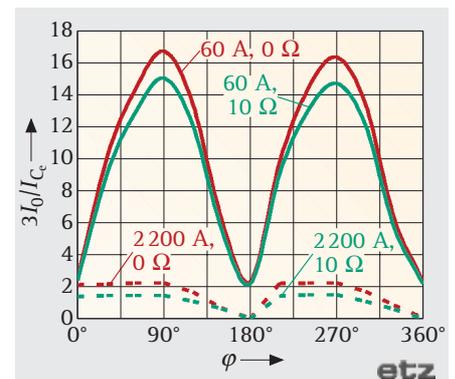


Bild 4. Erste Amplitude der Ausgleichschwingung



Der Fehlerübergangswiderstand

Der Erdschluss ist im Allgemeinen mit einem breit variierbaren Übergangswiderstand zwischen einigen Ohm bis hin zu mehreren Kiloohm in Verbindung zu bringen. Die Berechnungen wurden mit 0 Ω, 1 Ω, 10 Ω, 100 Ω, 1 kΩ durchgeführt. Im Fall hochohmiger Fehler werden die energiereichen Ausgleichschwingungen nahezu vollständig bedämpft. Die verbleibenden netzfrequenten Nullströme haben nur geringe Amplituden, und die Nullspannung baut sich relativ langsam auf, was zu einer verlängerten Reaktionszeit des Schutzgeräts bzw. zum Ausbleiben der Fehlererkennung führt (Bild 5).

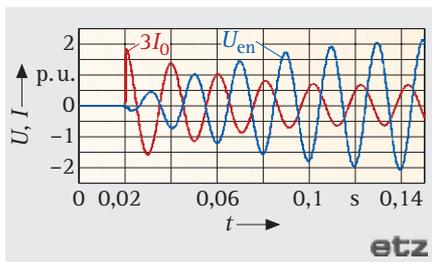


Bild 5. Nullgrößen bei einem Fehlerwiderstand von 1 kΩ

Der Fehlereintrittszeitpunkt

Der Fehlereintrittszeitpunkt bestimmt die Amplituden der Ent- und Aufladeschwingung. Es kann mit hoher Wahrscheinlichkeit angenommen werden, dass der Erdschluss im Spannungsmaximum eintritt und somit die maximalen Amplituden gemessen werden. Untersuchungen und praktische Erfahrungen zeigen jedoch, dass der Eintritt ebenso im Bereich des negativen Nulldurchgangs der Spannung des fehlerbehafteten Leiters erfolgen kann. Bild 6 zeigt diesen Sachverhalt für $\varphi = 150^\circ$. Die meisten Wischerrelais

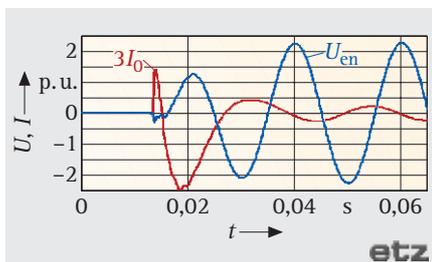


Bild 6. Einfluss des Fehlereintrittszeitpunkts

benutzen den Vorzeichenvergleich der ersten Amplituden von Nullstrom und Nullspannung zur Richtungsbestimmung. Bei entgegengesetzter Richtung liegt der Erdschluss in Richtung des zu schützenden Objekts. Gerade die erste Amplitude der Nullspannung ist unter diesen Umständen sehr gering, was erst zum Ansprechen der Triggerschwelle mit der fol-

genden Halbschwingung führen kann. Es ist daher wichtig, die Messfenster für Spannung und Strom synchron zu halten.

Für die Untersuchungen wurden daher Rechnungen mit 0°, 30°, 90°, 150° und 170° durchgeführt.

Die Transformatorgröße und örtliche Lage

Die Größe des Transformators hat keinen entscheidenden Einfluss auf die Höhe des Nullstroms. Die Amplitude ist vielmehr durch dessen örtliche Lage bezüglich des Netzzentrums sowie durch die Gesamteinspeiseleistung bestimmt. Die größten Amplituden und Frequenzen ergeben sich im Bereich der elektrischen Mitte des Netzes.

Der Lastfluss

Der zum Zeitpunkt des Erdschlusseintritts vorliegende Lastfluss hat einen Einfluss auf die Amplituden und Frequenzen der Ausgleichschwingungen. Generell gilt, dass ein großer Lastfluss im Besonderen die Entladeschwingung des fehlerbehafteten Leiters dämpft, während die Frequenz der Aufladeschwingung größer wird. Im Ergebnis der Analyse und unter Berücksichtigung der Verringerung des Lastflusses um 60 % betrug der Einfluss beispielsweise:

- 25 % auf die Frequenz der Aufladeschwingung,
- 54 % auf die Zeitkonstante des Vorgangs,
- 11 % auf den Effektivwert des Stroms,
- 8 % auf die erste Amplitude.

Die Bewertung von Distanzschutzrelais

Für die selektive Erfassung des Erdschlusses im Transformatorfeld muss der Leiterstrom den eingestellten Ansprechwert „I“ der Unterimpedanz- bzw. Impedanzanregung sowie den für die Fehlererkennung maßgeblichen Ansprechwert „ $3I_0$ “ überschreiten (Bild 7). Es gilt:

1. Die Leiteranregung des Distanzschutzes hängt von der Belastung des Transformators ab.

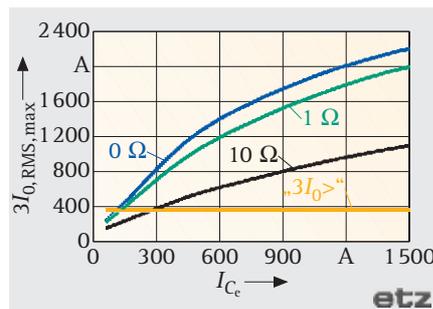


Bild 7. Dreifacher Nullstrom $3I_0$ als Funktion des kapazitiven Erdstroms I_{c_e}

Im Schwachlastfall wird möglicherweise keine Anregung stattfinden.

2. Die Nullstromanregung müsste bei kleineren Netzen auf ca. 100 A, bei Netzen mit $I_{c_e} > 600$ A auf ca. 200 A bis 300 A eingestellt werden, wobei die minimale Auslösezeit bei unverzögert eingestellter Zeitstufe t_1 20 ms bis 30 ms betragen muss. Diese kurze Kommandozeit ist bei den im Einsatz befindlichen einsystemigen Distanzrelais nicht immer gegeben. Erfahrungsgemäß liegen die Auslösezeiten im Bereich von 20 ms bis 50 ms (Bild 8).

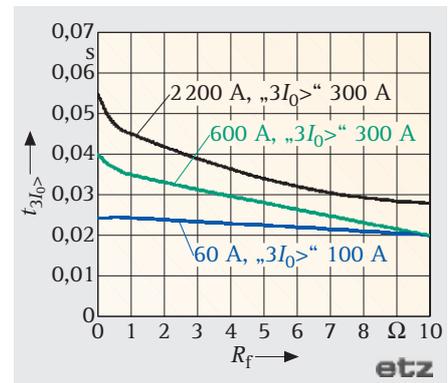


Bild 8. Die Dauer der $3I_0$ -Anregung

3. Die Distanzberechnung erfolgt auf der Basis der Vektoren der Nennfrequenz bzw. dem Leitungsmodell erster Ordnung. Die stromstarken transienten auswertbaren Größen liegen im Frequenzbereich 100 Hz bis 400 Hz bei Abtastfrequenzen bis 1 kHz. Daher sind die Ergebnisse, im Besonderen mit Übergangswiderstand, unplausibel.
4. Die in der Regel in die 110-kV-Netze eingespeiste Leistung mit Lastwinkeln zwischen -30° und 30° verfälschen die Richtung der gemessenen Resistanz, was eigentlich zur Fehlerlokalisierung in Sperrichtung führen müsste.

Eine sichere und selektive Erfassung von 110-kV-Erdschlüssen im Bereich der 380/220/110-kV-Transformatoren ist mit den heute verfügbaren Distanzrelais daher theoretisch als auch praktisch nicht realisierbar.

Bewertung von Erdschlusswischerrelais

Das Erdschlusswischerrelais stellt ein bewährtes Schutzgerät zur selektiven Erdschlusserfassung in 110-kV-Netzen dar. Entsprechend Bild 4 und unter Ausschluss der geringen Wahrscheinlichkeit von Erdschlüssen mit Fehlereintritt im Spannungs nulldurchgang wird als Ansprechempfindlichkeit 200 A vorgeschlagen. Für die üblichen Wandlernennströ-

me zwischen 800 A bis 1 600 A entspricht dies ca. $0,1I_n$. Die Ansprechempfindlichkeit der Relais reicht im Strompfad bis ca. 30 mA. Damit sollte ein Ansprechen der Geräte für Fehlerübergangswiderstände zwischen 0Ω und 10Ω sichergestellt sein. Die Erfassung hochohmiger Erdfehler bis ca. $1 \text{ k}\Omega$ erfordert wesentlich empfindlichere Einstellungen, wie aus dem Bild 9 Diagramm ersichtlich ist.

Die Empfindlichkeit der effektiven Nullspannung U_0 sollte auf etwa 10 V eingestellt werden. Stabilität hinsichtlich einer Überfunktion bei Erdschlüssen im Netz ist ebenfalls sichergestellt, da hier durch die isolierten Sternpunkte der Transformatoren bedingt theoretisch kein Nullstrom fließt.

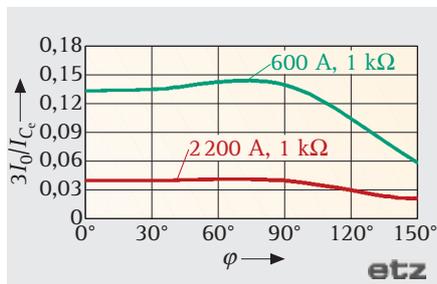


Bild 9. Empfindlichkeit der Erdschlusswischer-Ansprechwerte

Praktische Prüfungen

Um die verfügbare Relais-technik hinsichtlich der bestimmenden Systemparameter näher zu verifizieren, wurden Erdschlusswischerrelais von vier Geräteherstellern einer Reihe praktischer Prüfungen unterzogen. Hierzu wurden verschiedene Netze mit einem I_{C_e} von 60 A, 600 A und 2 200 A mittels „PowerFactory“ simuliert und die Fehlereintrittszeitpunkte sowie die Übergangswiderstände in den beschriebenen Grenzen variiert. Die berechneten transienten Ströme und Spannungen wurden im Comtrade-Format [2, 3] abgelegt. Die Relaisprüfung erfolgte mittels Relaissekundärprüfgerät. **Tabelle 1** zeigt die Ergebnisse der Relaisprüfung. Die Erdschlussrichtungen wurden immer richtig eingemessen, insofern die Relais den Fehler erkannten.

Ausblick

Die selektive Erfassung von Erdschlüssen im Bereich der 380/220/110-kV-Transformatoren ist mit den geprüften Erdschlusswischerrelais möglich. Auf der Basis der durchgeführten Simulationen und Prüfungen konnte die Ansprechsicherheit und das korrekte Richtungsverhalten für wahrscheinliche Fehlereintrittswinkel im Bereich von 30° bis 170°

und Fehlerübergangswiderstände zwischen 0Ω und 10Ω festgestellt werden. Im Gegensatz zum Schutz der Freileitungen, wo mit höheren Fehlerwiderständen zu rechnen ist, sollte für die im Beitrag beschriebene Anwendung des Transformatorschutzes der spezifizierte Bereich von 0Ω bis 10Ω ausreichend sein.

Im Ergebnis der Untersuchungen wird die Verwendung der Erdschlusswischerrelais zur Meldung des transformatorseitigen Erdschlusses vorgeschlagen. Für den Fall der Auslösung des Leistungsschalters sollte neben dem Richtungsentscheid das Vorhandensein der Nullspannung für mindestens 200 ms berücksichtigt werden, um die Stabilität des Schutz-

systems hinsichtlich transienter Nullgrößen bei Schaltvorgängen zu erhöhen.

Literatur

- [1] Digsilent GmbH, Gomaringen: www.digsilent.de
- [2] IEC 60255-24:2001-05 Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems. Genf/Schweiz: Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale (ISBN 2-8318-5736-8)
- [3] DIN 60255-24 (VDE 0435-3040):2002-04 Elektrische Relais – Teil 24: Standardformat für den Austausch von transienten Daten elektrischer Energieversorgungsnetze (COMTRADE). Berlin · Offenbach: VDE VERLAG

Fehlereintrittszeitpunkt	Fehlerübergangswiderstand					A	B	C	D				
	30°	90°	150°	170°	0 Ω					1 Ω	10 Ω	100 Ω	1 kΩ
x					x					v	v	v	v
x						x				v	v	v	v
x							x			v	v	v	v
x								x		v	v	v	v
x									x	v			
	x				x					v	v	v	v
	x					x				v	v	v	v
	x						x			v	v	v	v
	x							x		v	v	v	v
		x			x					v	v	v	v
		x				x				v	v	v	v
		x					x			v	v	v	v
		x						x		v			
			x		x					v	v	v	v
			x			x				v	v	v	v
			x				x			v	v	v	v
				x	x					v	v	v	v
				x		x				v	v	v	v
x					x					v	v	v	v
x						x				v	v	v	v
x							x			v	v	v	v
x								x		v	v	v	v
	x				x					v	v	v	v
	x					x				v	v	v	v
	x						x			v	v	v	v
	x							x		v	v	v	v
		x			x					v	v	v	v
		x				x				v	v	v	v
		x					x			v	v	v	v
			x					x		v	v	v	v
				x	x					v	v	v	v
				x		x				v	v	v	v
					x		x			v	v	v	v
2 200 A	600 A	60 A								v	v	v	v

Tabelle 1. Ergebnisse der Erdschlusswischer-Prüfung (v – vorwärtsgerichtet)



Dipl.-Ing. Jens Hauschild (45), VDE, ist Mitarbeiter im Bereich Anlagenmanagement bei Vattenfall Europe Transmission GmbH in Berlin und befasst sich seit 1988 mit der Schutztechnik des 220-/380-kV-Übertragungsnetzes. Er studierte an der TU Dresden Elektroenergiesysteme. E-Mail: jens.hauschild@vattenfall.de



Dipl.-Ing. Hagen Grünert (42), VDE, ist Geschäftsführer der GSC Power Engineering GmbH in Erlangen und befasst sich seit seinem Studium der elektrischen Energietechnik in Zittau mit der Schutztechnik elektrischer Netze und Kraftwerke. Er ist von der IHK-Nürnberg öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für elektrische Energietechnik, Schutztechnik von Hoch- und Mittelspannungsanlagen. E-Mail: hagen.gruenert@gscpower.com

