Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 93 (2002)

Heft: 21

Artikel: Prüfen von Erdschlussschutz : korrektes Detektieren von Erdschlüssen : Teil 1

Autor: Aebersold, Andreas

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-855474

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Prüfen von Erdschlussschutz

Korrektes Detektieren von Erdschlüssen – Teil 1

Für die Prüfung von Erdschlussschutz stehen verschiedene Hilfsmittel zur Verfügung. Seit zwei Jahren sind in unterschiedlichen Netzen verschiedener Netzbetreiber der Schweiz fünfzig Schutzgeräte mit einem neuartigen Erdschlusserfassungsprinzip in Betrieb. Mittels theoretischer Betrachtungen und auf Grund von praktischen Versuchen wurde ihre Eignung für Mittelspannungsnetze getestet. Dabei zeigte sich, dass sämtliche Erdschlüsse detektiert und in ihren Richtungen bestimmt werden konnten. Der vorliegende Beitrag fasst die Ergebnisse dieser Untersuchung zusammen.

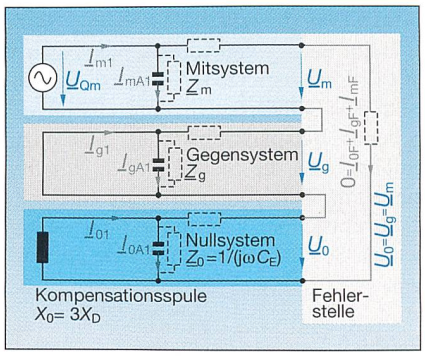

Bild 2 Vereinfachte Transformation eines Erdschlusses im Komponentensystem
Kompensiertes Netz mit Spule

Andreas Aebersold

Bei Erdschlüssen handelt es sich um unsymmetrische Fehlerfälle. Damit sie in ein einfaches und symmetrisches mathematisches Modell transformiert werden können, ist die Verwendung symmetrischer Komponenten unerlässlich (Bild 1).

Zu diesem Zweck wird das Dreiphasensystem in ein Mit-, ein Gegen- und ein Nullsystem zerlegt und kann so in einer Serieschaltung von Impedanzen und einer idealen Netzquelle vereinfacht dargestellt werden (Bild 2). Dabei ist zu beachten, dass das Gegensystem – bezogen auf das Mitsystem – ein symmetrisches System mit entgegengesetztem Drehsinn darstellt [1, 2, 3, 4].

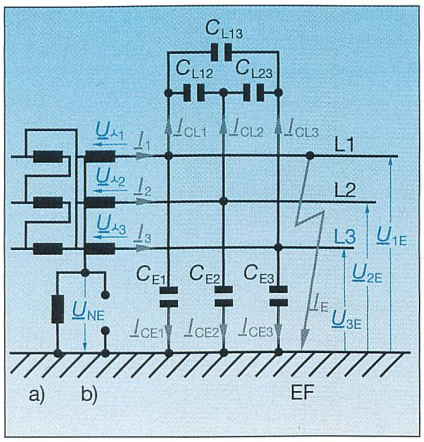

Bild 1 Ersatzschaltung eines Übertragungsnetzes ohne Berücksichtigung von Längsimpedanzen
Dreiphasiges Netz mit Erdschluss auf der Phase L1; a: kompensierter Sternpunkt; b: isolierter Sternpunkt; EF: Erdschlussstelle; L: Leiter; C: Kapazität; I: Strom; U: Spannung.

Für eine transiente Berechnung ist die Darstellung durch das vereinfachte Mit-, Gegen- und Nullsystem (Bild 2) allerdings ungeeignet, da unter anderem dämpfende Widerstände in der Erdschlussbahn (tan δ von Kabeln, Ableiter usw.) und Induktivitäten – wie die des einspeisenden Transformators (Umladevorgänge) – vernachlässigt werden.

Für die transiente Betrachtung muss das im Bild 2 vorgestellte elektrische Ersatzschaltbild mit der effektiven π-Ersatzschaltung von Übertragungsleitungen und Transformatoren im Mit-, Gegen- und Nullsystem berücksichtigt werden.

Ferner müssen auch subtransiente Einflüsse in der Einspeisung mittels angepasstem Verhältnis Z_2/Z_1 [1)] integriert werden. Das vorgestellte Ersatzschaltbild in Bild 2 eignet sich in der dargestellten Form ausschliesslich für die überschlagsmässige statische Erdschlussberechnung.

Erdschlusszündung und -entladung

Das Zünden eines Erdschlusses – in einem Kabel- oder Freileitungsnetz – ist eine plötzliche Zustandsänderung des Netzes, die mit einem Entladevorgang des fehlerbehafteten Stranges beginnt. Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass Entladeschwingungen im Bereich von 500 Hz bis 100 kHz auftreten (Bild 3).

Die Entladefrequenz ist dabei umgekehrt proportional zur Leitungslänge. Kleine Netze mit kleinen Erdkapazitäten entladen sich daher äusserst schnell, und es treten entsprechend hohe Frequenzen auf. Beispiele hierfür sind Industrienetze mit Eigenerzeugung oder Inselbetrieb.

In einem 16-kV-Netz der Industriellen Betriebe in Wohlen sind beispielsweise Frequenzen im Bereich von 800 Hz berechnet worden. Das Netz ist vorwiegend verkabelt (Verkabelung über eine Länge von ungefähr 30 km). Sowohl in Versuchen als auch mittels analytischer Betrachtungen konnte nachgewiesen werden, dass sich die Entladeschwingung in Form einer Wanderwelle im Netz ausbreitet und Reflexionseffekte aufweist.

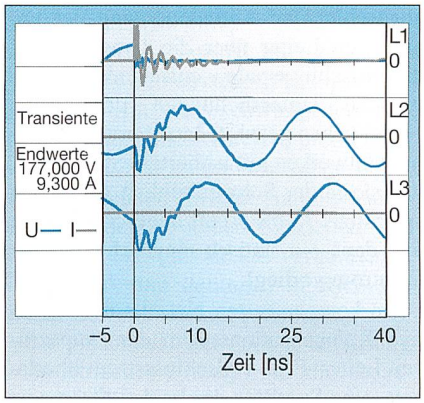

Bild 3 Erdschluss, Entlade- und Umladevorgang
Messung in einem kompensierten Netz der Industriellen Betriebe in Wohlen AG

Die Vorgänge der Erdschlusszündung und der Entladung sind äusserst schnell. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Entladeschwingung liegt bei Freileitungsnetzen in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit, bei Kabelnetzen etwa bei der halben Lichtgeschwindigkeit.

Beispiel: Stadtwerke Wil

Beim Betrieb von vermaschten Netzen mit Erdschlussrichtungsrelais ist der Aspekt der Entladeschwingung ausschlaggebend. Beispielsweise hat dies dazu geführt, dass die Stadtwerke in Wil SG zurzeit ihr Netz von «vermascht» auf «radial» umstellen, weil die aktuell eingesetzten Schutzsysteme Probleme aufweisen.

Beispiel: Netz der Bewag

Messtechnische Untersuchungen im Netz der Bewag[2)] durch die Firma EAW[3)] zeigten Scheitelwerte des Zündstromes (I_{ZE}) im Bereich des 250- bis 500fachen des Erdschlussstroms auf. Dieser Scheitelwert ist nur indirekt von der Leitungslänge abhängig; massgebend ist die kapazitive Ladeleistung des Netzes.

Faustregel zur Bestimmung des Zündstromes

Auf Grund der Messungen kann als Faustregel für die Bestimmung des Zündstromes bei Freileitungsnetzen $I_{ZE} = 500 \cdot I'_{CE}$ und bei Kabelnetzen $I_{ZE} = 250 \cdot I'_{CE}$ angenommen werden. Dabei bedeutet I'_{CE} den längenbezogenen kapazitiven Erdschlussstrom.

Die Höhe der Amplitude wird durch das Schaltmoment bestimmt: die Zündung im Spannungsmaximum liefert den maximalen Zündstrom.

Erdschlussaufladung

Für Erdschlussschutzrelais nach dem wattmetrischen Prinzip ist vor allem der abgeschlossene Aufladevorgang der ungestörten Leiter über die Umspanner – die Erdschlussspule – entscheidend. Analytische Untersuchungen der Firma NSE[4)] haben gezeigt, dass dieser Vorgang in Stadtwerken mit isoliertem Sternpunkt, wie sie in der Schweiz üblich sind, nach spätestens 35 bis 50 ms abgeschlossen ist und dann ein statisch eingeschwungener Erdstrom vorliegt.

Im kompensierten Netz ist der induktive Kompensationsstrom dem kapazitiven Leiter–Erde-Erdschlussstrom überlagert, eine Synthese der beiden Ströme ist in der Praxis nur schwer erkennbar. Einschwingvorgänge können da bis zu einigen Sekunden dauern.

Die Aussagen über Entlade- und Aufladeschwingung sind in gleicher Weise sowohl in Netzen mit isoliertem als auch induktiv geerdetem Sternpunkt gültig.

Der Aufladevorgang beginnt zeitgleich mit dem Entladevorgang. Auf Grund seiner niedrigen Frequenz ist die Überlagerung allerdings nicht immer deutlich zu erkennen und kann nur mathematisch vom Entladevorgang separiert werden. Einfluss auf die Aufladefrequenz haben die Induktivitäten der Trafowicklung sowie die Leiter–Leiter- und Leiter–Erde-Kapazitäten der Einspeiseleitung. Die Amplitude des kapazitiven Erdschlussstromes hingegen wird durch den kapazitiven Erdschlussstrom des Netzes mit Schaltmoment beeinflusst.

Die umfassenden Versuche der Firma EAW sowie die speziell in der Schweiz durch die Firma NSE untersuchten Fälle haben die Voraussetzung zur Erfassung und Interpretation des transienten Erdschlussvorganges geliefert. Diese Untersuchungen haben es ermöglicht, Fehlverhalten von üblichen Schutzsystemen zu interpretieren und daraus neue Verfahren für die effiziente Erkennung von Erdschlüssen zu entwickeln.

Als Resultat der Untersuchungen kann festgehalten werden, dass bei ausgedehnten Kabelnetzen mit einer Aufladefrequenz von 70 Hz, bei Eigenbedarfsnetzen von 5 kHz gerechnet werden muss.

Erdschlussabschaltung

Oft wird die Problematik der Erdschlussabschaltung bei der Planung vernachlässigt. Genau hier fängt aber im Betrieb die Problematik an. Durch Suchschaltungen[5)] im Netz wird ein ständiges Umladen der Erdschlussströme erzwungen. Nicht selten führt dies zu einem Doppelerdschluss und zur Abschaltung der Netzeinspeisung.

Bei Beendigung des Erdschlusses wird der unsymmetrische Ladungszustand wieder in einen symmetrischen Zustand übergeführt.

Das Einschwingen der Spannung im isolierten Netz mit einem Erdschlussstrom von 80 bis 300 A und einer Betriebsspannung von 16 bis 24 kV erfolgt in 20 bis 50 ms. Im kompensierten Netz hängt die Dauer des Einschwingvorganges vom Kompensationsgrad und der Abstimmung der Petersenspule[6)] ab.

Generell kann gesagt werden, dass im exakt kompensierten Netz die Einschwingdauer mehr als 20 Halbwellen beträgt.

Der kapazitive Erdschlussstrom im kompensierten Netz wird durch einen entsprechenden induktiven Petersenspulenstrom an der Fehlerstelle kompensiert.

Das Ergebnis ist ein kleiner Wirkstrom, der über die Fehlerstelle fliesst. Da dieser Wirkstrom in Phase mit der treibenden Verlagerungsspannung ist, ist ein selbständiges Löschen des Erdfehlers möglich. Im Verteilnetz mit 16 bis 24 kV liegen diese Wirkrestströme[7)] üblicherweise 25 bis 35 A.

Tritt der Erdfehler (bezogen auf die betroffene Phase) bei maximalem Strom – beziehungsweise im Nulldurchgang der Spannung – auf, so entsteht der intensivste Ausgleichsvorgang mit einem Gleichstromanteil: der maximale Spulenstrom beträgt dann weniger als das Fünffache des Nennstromes.

Vereinfachend wirkt sich die niedrige Frequenz des Petersenspulenstromes auf

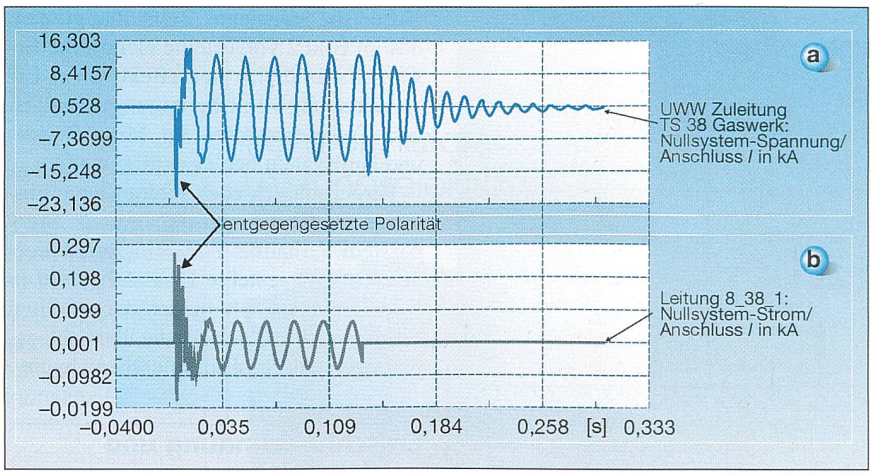

Bild 4 Bestimmen der Polarität

Berechnung I_0 und U_{NE} im fehlerbehafteten Abgang. Die entgegengesetzte Polarität von Strom (Bild 4a) und Spannung (Bild 4b) zeigt einen Fehler in Richtung Abgang an. Die Berechnungen wurden mit dem Netzberechnungsprogramm DIgSILENT PowerFactory für ein 16-kV-Netz mit isoliertem Sternpunkt der Industriellen Betriebe Wohlen durchgeführt. Zugrunde lag ein konkreter Fehler in der Sulzer Metco mit Erdfehlerabschaltung nach 100 ms.

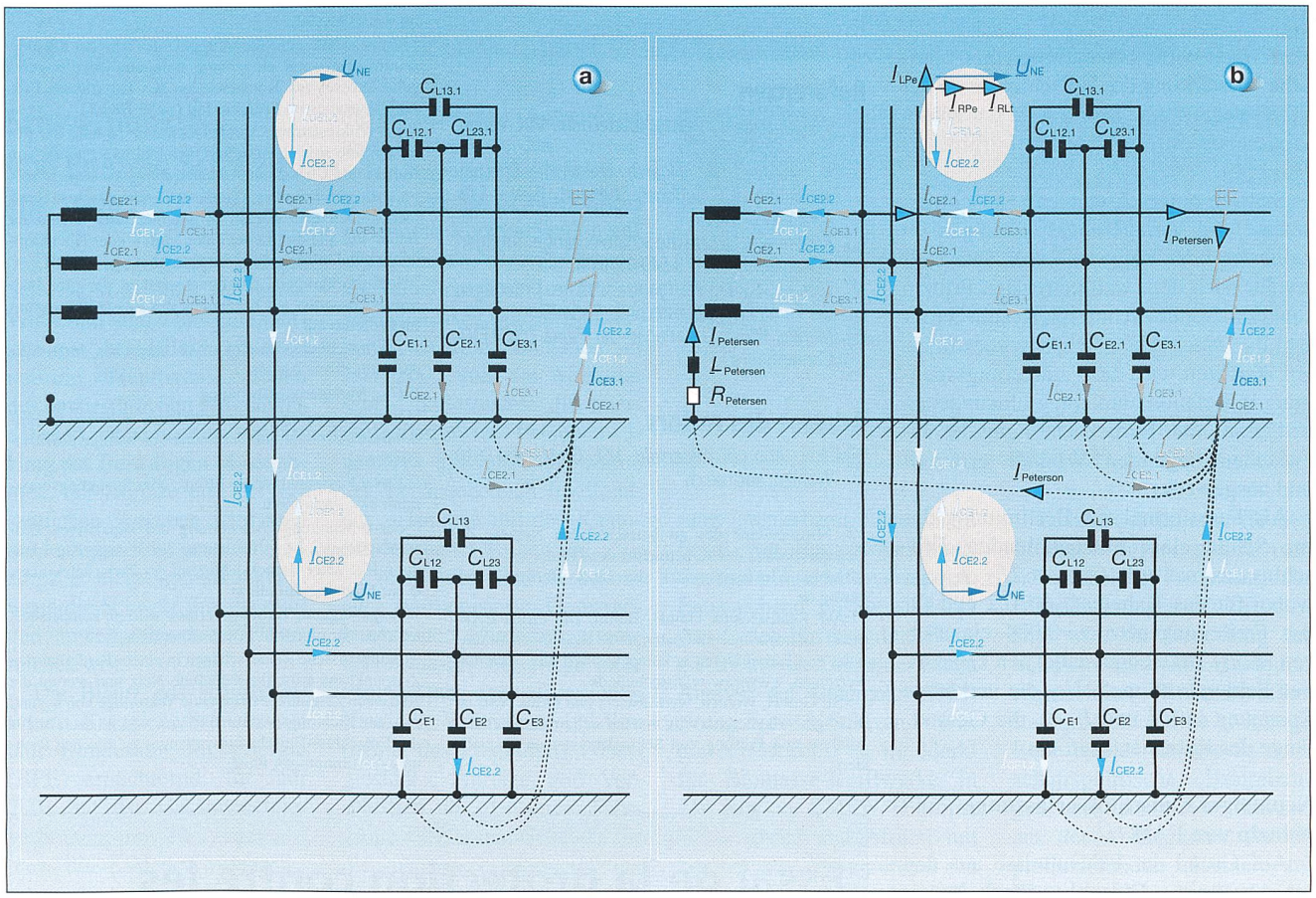

Bild 5 Stromverteilung bei Erdschluss

a: Kapazitive Stromverteilung bei Erdschluss im isolierten Fall; b: kapazitive und induktive Stromverteilung bei Erdschluss im kompensierten Fall (ohne ohmsche Restströme von Leitungen). I_{LPE}: induktiver Petersenstrom; I_{RPE}: ohmscher Petersenstrom; I_{RLT}: ohmscher Querleitwert von Kabel, Überspannungsableiter usw.; $I_{CExx.y}$: kapazitiver Leitungsstrom

die Erfassung des transienten Vorganges mit Richtungsentscheid aus.

Im Zustand des eingeschwungenen Erdschlusses fliessen also nur die kapazitiven Ladeströme und der kompensierende induktive Spulenstrom zur Fehlerstelle hin. Über die Fehlerstelle fliessen sowohl der unkompensierte Reststrom (Verstimmung, Oberwellen) als auch der Wirkstromanteil aus Verlusten (Cu, Fe, Korona, Ableitung).

Der Reststrom liegt normalerweise in der Grössenordnung von 2% bis 6% (ausnahmsweise bis 10%) des kapazitiven Erdschlussstromes des Netzes und bedarf zu seiner Erfassung besonderer Massnahmen wie etwa eines Kabelumbauwandlers[8] oder einer abgeglichenen Holmgreengruppe[9].

Transiente Erdschlussabläufe

Bewertet man nun den ganzen transienten Ablauf eines Erdschlusses im kompensierten oder isolierten Netz, so stellt man fest, dass die erste Halbwelle des Entlade- und des Umladevorganges die gleiche Polarität haben, und dass I_0[10] und U_{NE}[11] entgegengesetzte Polarität aufweisen (Richtung «Leitungsabgang», Bild 4).

Die Auswertung von Erdschlusswischern[12] und Dauererdschluss wird somit mit geeigneten Schutzsystemen möglich unter Verwendung des ersten Fusspunkts[13] I_0 zu U_{NE} bei intermittierenden Fehlern.

Verschiedene Versuche belegen, dass in isolierten Netzen Wischer mit herkömmlichen Schutzsystemen oftmals nicht oder falsch erkannt werden. Ebenfalls wurde festgestellt, dass das Prinzip der reinen Wischerschaltung für beabsichtigte Suchschaltungen ungeeignet ist.

Als Vorteil bei der Beurteilung des transienten Vorganges kann – wenn der erste Fusspunkt erfasst wird – die hohe Amplitude der Zündschwingung angesehen werden. Dies bedingt prinzipiell keinen speziellen und zusätzlichen angepassten Wandler.

Wattmetrische Erdschlusserfassung

Das Prinzip der Auswertung von Summennullstrom und Verlagerungsspannung im 50-Hz-Bereich unter Berücksichtigung des Zwischenwinkels ist bereits seit den ersten elektromechanischen Schutzschaltungen bekannt. Je nach Gerätetyp wurde noch die kapazitive Ladeleistung bestimmt und als Anregekriterium ausgewertet. Im isolierten Netz mit Erdschlussströmen im Bereich von 80 bis 150 A (evtl. bis 300 A) sowie im kompensierten Netz ist die Bereitstellung des Nullstromes durch eine abgeglichene Holmgreengruppe oder einen Kabelumbauwandler meistens unumgänglich.

Im isolierten Netz ist mit der sin-φ-Schaltung (wattmetrisches Prinzip)[14] ein Erdschluss im eingeschwungenen Zustand und radialisierten Netz problemlos zu erfassen. Die im fehlerbehafteten Abgang fliessenden Ströme stammen allesamt von den gesunden Netzteilen und Abgängen des galvanisch verbundenen Netzes und sind demnach in Richtung und Grösse einfach zu bestimmen.

Als Nachteil der cos-φ-Schaltung (wattmetrisches Prinzip) für die Erfassung des Wattreststromes[15] im kompensierten Netz ist der im Erdschluss äusserst geringe und schlecht bestimmbare Wattreststrom der Petersenspule und die

eher untergeordneten Anteile von Kabel und Überspannungsableiter zu erwähnen. Vorteilhaft wirkt sich natürlich eine ohmsche Verstärkung des Erdschlusses an der Petersenspule aus. Damit wird der zu detektierende Strom deutlich vergrössert (Bild 5b).

Statisch eingeschwungene Erdschlussströme und Verlagerungsspannungen im isolierten oder kompensierten Netz stellen für nach dem wattmetrischen Prinzip funktionierende Schutzrelais kein Problem dar. Nach Ablauf einer vorbestimmten Wartezeit wird die Verlagerungsspannung in Relation zum eingeschwungenen Erdstrom unter Berücksichtigung des dazwischen liegenden Winkels ermittelt und ausgewertet.

Als Faustformel zur Bestimmung des im Schutzrelais einzustellenden Erdschlussstromes gilt $I_{CE} = \alpha \cdot U_{LL} \cdot I_{LtgNetz}$, wobei für das Kabelnetz $\alpha = 0{,}2$ und für das Freileitungsnetz $\alpha = 0{,}004$ einzusetzen ist. I_{CE} bezeichnet dabei den kapazitiven Fehlerstrom in A, U_{LL} die verkettete Spannung in kV und $I_{LtgNetz}$ die Gesamtlänge des Kabelnetzes in km.

Neuartiges Erdschlusserfassungsprinzip von EAW

Auf Grund der Erkenntnisse aus den im Abschnitt «Erdschlussabschaltung» angestellten theoretischen Betrachtungen muss die Verlagerungsspannung mit Zeitbedingung[16] hinzugezogen werden. Die Untersuchungen der Firma NSE ergaben, dass bei namhaften Herstellern von Schutzgeräten die Verlagerungsspannung nur gerade in einem geräteinternen fixen Zeitfenster erfasst und weiterverarbeitet wird. Problematisch wird es bei diesem wattmetrischen Verfahren, wenn durch den Nulllaststoss bei Schalthandlungen, durch die Stufung von Regeltrafos oder durch das Ansprechen von Überspannungsableitern hervorgerufene Ausgleichsvorgänge fälschlicherweise als Erdschluss angezeigt werden.

Referenzen

[1] *Walter Schossig:* Netzschutztechnik. VDE-Verlag, ISBN 3-8007-2231-1.

[2] *R. Flossdorff, G. Hilgarth:* Elektrische Energieverteilung. B. G. Teubner, Stuttgart, ISBN 3-519-46411-X.

[3] *Rüdenberg:* Elektrische Schaltvorgänge. Springer-Verlag Berlin, ISBN 3-540-05766-8.

[4] *Lothar Gegner, Wolfgang Fritzsche:* Unterlagen der Firma EAW Relaistechnik, Berlin/D.

[5] *Markus Pöller:* Unterlagen der Firma DIgSILENT, Gomaringen/D.

Adresse des Autors

Dipl.-Ing. *Andreas Aebersold*, NSE GmbH, CH-5610 Wohlen, aa@nse.ch

[1] Z_1: Mitimpedanz des zu betrachtenden Netzes; Z_2: Gegenimpedanz des zu betrachtenden Netzes

[2] Bewag: Elektrizitätswerk der Stadt Berlin, www.bewag.de

[3] EAW Relaistechnik GmbH, Berlin. Die Firma EAW bietet ein neuartiges und patentiertes System zur Erkennung von Erdschlüssen in kompensierten und isolierten Netzen an. www.eaw-relaistechnik.de

[4] NSE GmbH, Wohlen, www.nse.ch. Die Firma NSE ist im Engineeringbereich tätig und hat sich im Kernbereich Analyse und Prüfung von Sekundärsystemen spezialisiert.

[5] Suchschaltung: Zu- und Abschalten radialer Netzteile im Erdschlussfall

[6] Petersenspule: eine im Nullpunkt des oder der Einspeisetransformatoren eingebaute geregelte oder ungeregelte Drossel zur Kompensation des kapazitiven Erdschlussstromes im Erdfehlerfall (siehe Bild 1)

[7] Als Wirkrestströme werden ohmsche Anteile der Petersenspule sowie ohmsche Querableitwiderstände von Kabeln und Überspannungsableitern bezeichnet.

[8] Kabelumbauwandler: Dienen der Erkennung von Summenströmen und werden in geteilter oder ungeteilter Bauart um alle drei Leiter eines Mittel- oder Hochspannungskabel angeordnet

[9] Holmgreengruppe: Zusammenschalten der drei Phasenstromwandler zur Erkennung des Erdschlussstromes im Erdfehlerfall

[10] I_0: Erdschlussstrom inklusive ohmscher, induktiver und kapazitiver Anteile

[11] U_{NE}: Verlagerungsspannung

[12] Erdschlusswischer: Intermittierend auftretende Erdschlusszündspitzen mit der Dauer von wenigen Millisekunden

[13] Erster Fusspunkt: erstes Strom- oder Spannungsmaximum bzw. -minimum

[14] cos-φ-Schaltung: Auswertung des kapazitiven Erdschlussstromes I_{CE} in Beziehung zur Verlagerungsspannung U_{NE} unter Berücksichtigung des Zwischenwinkels φ zur Richtungsdefinition

[15] Eingebürgerter Terminus: erfasst wird im kompensierten Netz der ohmsche «Watt»-Reststrom.

[16] Wattmetrische Relais schauen in einem vordefinierten Zeitpunkt ins erdschlussbehaftete Netz und werten die zu diesem Zeitpunkt existierende Vektorlage von I_{CE} und U_{NE} zur Richtungsbestimmung aus, was je nach Status des Erdschluss-Einschwingvorganges zu falschen Richtungsbestimmungen führt.

Essai de la protection contre les courts-circuits à la terre

La détection correcte des courts-circuits à la terre – 1ère partie

Il y a divers moyens à disposition pour l'essai de la protection contre les courts-circuits à la terre. Depuis deux ans, cinquante appareils de protection utilisant un principe de détection des courts-circuits à la terre sont en service dans différents réseaux de divers exploitants de Suisse. Leur aptitude à l'utilisation dans les réseaux moyenne tension a été testée selon des points de vue théoriques et sur la base d'essais pratiques. Il s'est avéré que tous les courts-circuits à la terre avaient été détectés et leur direction déterminée. Le présent article résume les résultats de cette étude.

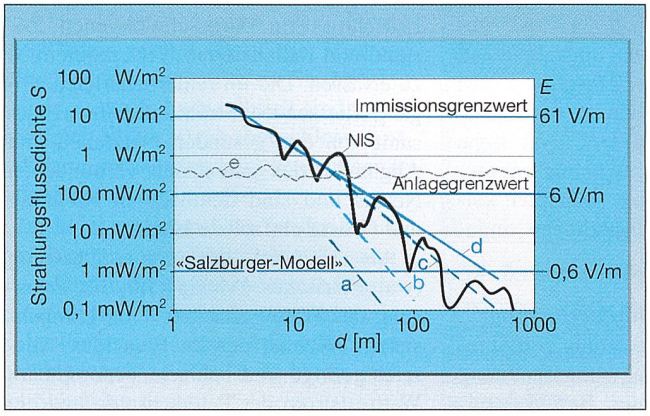

Bild 5 Typischer Verlauf der Strahlungsflussdichte *S* in Funktion des Abstandes *d* von der Antenne

EIRP = 2 kW. a, b, c: Empirische Modelle für dichte städtische Bebauung; a, b: keine Sichtverbindung, Feldstärken auf Strassen und auf Obergeschosshöhen (Nähe Dach); c: Sichtverbindung; d: Approximation mit Freiraumformel (Gleichungen in Bild 1); NIS: Exposition aus der GSM-Anlage (qualitativ, Verlauf vom Beobachtungsweg abhängig); e: Fremdstrahlung (qualitativ), z.B. Telepage[15], ISM-Gerät[16], GSM-Handy.

Korrigendum

Im Artikel *«Ermittlung der NIS-Exposition von Mobilfunkanlagen – Teil 2»* in Heft 19/02 hat sich ein bedauerlicher Fehler eingeschlichen. Ein Teil der Beschriftung in Bild 5 auf Seite 19 fehlt. Die korrekte Grafik ist hier wiedergegeben.