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: 88 (1997)

Heft: 7

Artikel: Mittelspannungskabel : Dimensionierung und Erdung des Kabelschirmes unter verschiedenen Aspekten des Netzbetriebes

Autor: Schmid, Roland

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902187

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: 16.07.2025

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

Bei der Entwicklung und beim Einsatz von Mittelspannungskabeln ist auch auf eine aufgabengerechte Konzeption des Kabelschirmes zu achten. Der Beitrag zeigt, welche betrieblichen Aspekte dabei zu berücksichtigen sind. Als zentrale Einflussgrösse erweist sich die thermische Belastung des Kabels in unterschiedlichen Fehlersituationen; der Kabelschirm soll so bemessen sein, dass er durch die Fehlerströme nicht beschädigt wird. Für die Dimensionierung sind die Sternpunktbehandlung, die maximal möglichen Fehlerströme und die Fehlerabschaltzeiten der Schutzgeräte im Erdschlussfall von Bedeutung. Die Materialwahl schliesslich muss den elektrochemischen Verhältnissen Rechnung tragen.

Mittelspannungskabel

Dimensionierung und Erdung des Kabelschirmes unter verschiedenen Aspekten des Netzbetriebs

■ Roland Schmid

Bei einem Mittelspannungskabel stellt die Dimensionierung des Leiterquerschnittes in der Regel keine grösseren Probleme. Aufwendiger ist die aufgabengerechte Querschnittswahl des Kabelschirmes. Bei Hochspannungskabeln wird dieser Schirmquerschnitt in der Regel projektspezifisch entsprechend den herrschenden Randbedingungen des Netzes ausgelegt. Bei Mittelspannungskabeln ist es jedoch üblich, standardisierte, auf den Leiterquerschnitt abgestimmte Schirmquerschnitte entsprechend Tabelle I zu wählen. Die Festlegung dieser standardisierten Schirmquerschnitte bei Kunststoffkabeln wurde beeinflusst durch die früher üblicherweise verwendeten Blei-Schirmquerschnitte von Papier-Blei-Kabeln.

Neben dem Querschnitt des Kabelschirmes selbst ist auch die Art der Schirmerdung Gegenstand von Diskussionen. Dieser Beitrag soll den Planern und Betreibern von Stromverteilnetzen die zu berücksichtigenden relevanten betrieblichen Aspekte bei der Wahl von Kabelschirmquerschnitt und Schirmerdung bei Mittelspannungskabeln darlegen. Als zentrale Einflussgrösse erweist sich dabei die thermische Belastung des Kabels in unterschiedlichen Fehlersituationen.

Erdungswiderstand von Anlagen

Bei der Erstellung und dem Betrieb von Stromverteilanlagen sind die bestehenden Erdungsvorschriften zu berücksichtigen. Seit einigen Jahren wird als Hauptelement der Anlagenerdung ein Fundamenterder verwendet. Im Zusammenhang mit den Anlagenerdern haben auch Kabelschirme eine grosse Bedeutung. Sie soll am Beispiel von Trafostationen erläutert werden. Die Erdungsvor-

Leiterquerschnitt [mm² Cu]	Schirmquerschnitt [mm² Cu]
50	16
95	25
150	35
240	35
500	50
630	70

Tabelle I Zuordnung der Standard-Schirmquerschnitte zu den Leiterquerschnitten bei 20/12-kV-Kabeln

Adresse des Autors
Dr. *Roland Schmid,* Dätwyler AG Kabel+Systeme, 6460 Altdorf

schriften besagen, dass die Einhaltung der Grenzwerte der Schrittspannungswerte nach Anschluss aller Mittel- und Niederspannungskabel zu überprüfen ist. Elektrisch gesehen führt dies bei beidseitiger Kabelschirmerdung dazu, dass die Erdungen unterschiedlichster Anlagen parallel geschaltet werden und dass dadurch tiefe Erdungswiderstandswerte erreicht werden (Bild 1).

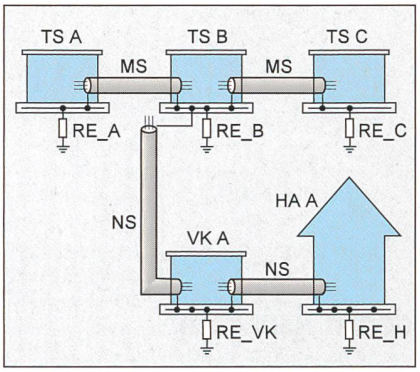


Bild 1 Vermaschung der Erdungssysteme
Im Stromverteilnetz werden die Erdungssysteme von Trafostationen, Verteilkabinen und Endverbrauchern über die Kabelmäntel oder Neutralleiter miteinander verbunden.

RE_.. Erdungswiderstand der einzelnen Anlage
TS Trafostation
VK Verteilkabine
HA Hausanschluss
MS Mittelspannungskabel
NS Niederspannungskabel

Erfahrungswerte aus Messungen an neu errichteten vorfabrizierten Trafostationen mit einer Grundfläche von etwa 2×3 m zeigen, dass typische Werte für Erdungswiderstände von Trafostationsgebäuden (nur das Gebäude mit Fundament- und allfälligem Ringerder) im Mittelland in der Grössenordnung von 5 bis 10 Ohm liegen. Nach Anschluss aller Kabel liegen die Werte dann meistens unter 1 Ohm.

Zwischen den Trafostationen werden im Siedlungsbereich Mittelspannungskabel mit einer typischen mittleren Länge von rund 400 m verlegt. Ein häufig zum Einsatz gelangender Kabeltyp ist ein XLPE-20/12-kV-Einleiterkabel mit 95 mm² Leiter- und 25 mm² Schirmquerschnitt. Der Kupferschirm dieses 400 m langen Einleiterkabels weist einen Widerstand in der Grössenordnung von 0,27 Ohm auf. Da alle drei Leiterschirme parallel verlaufen, liegt der gesamte Schirmwiderstand noch bei 0,09 Ohm. Bei einer beidseitigen Schirmerdung werden somit über diesen Schirmwiderstand weitere Anlagewiderstände parallel zur Trafostationserdung geschaltet.

Neben dem Schirmwiderstand selbst spielt die Leitfähigkeit des Erdbodens eine zentrale Rolle. Die Wirkung von Schirmwiderstand und Erdboden lässt sich gesamthaft durch die Nullimpedanzwerte charakterisieren (siehe unten: «Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung, unterschiedliche Fehlerorte»). Da die Anlagenerdung selbst in der Grössenordnung von einigen Ohm liegt, ist anzustreben, dass der Schirmwiderstand die Grenze von etwa 0,5 bis 1 Ohm nicht überschreitet.

Differenziert zu betrachten ist die Situation in ländlichen Bereichen bei abgelegenen Trafostationen (welche sich schlimmstenfalls zudem noch auf felsigem Untergrund befinden können), die über eine Stichleitung erschlossen werden. In dieser Konstellation kann das speisende Netz wesentlich dazu beitragen, die schwierigen Erdungsverhältnisse des Trafostationsgebäudes selbst zu verbessern. Ein tiefer Schirmwiderstand wirkt sich in diesem Anwendungsfalle entsprechend positiv aus.

Werden die Kabel jedoch nur einseitig geerdet oder ist der Schirmwiderstand extrem hoch, sind die Erdungssysteme der unterschiedlichen Anlagen entkoppelt, und entsprechend schwierig kann es allenfalls werden, den Erdungswiderstand der Anlagen auf einem angestrebten Niveau von 1 bis 2 Ohm zu halten.

Zusammenfassend lässt sich somit aus dem Aspekt der Anlagenerdung aussagen, dass letztlich aus Gründen der Sicherheit im Fehlerfall grundsätzlich eine beidseitige Kabelschirmerdung wünschenswert ist. Bei Kabelverlegungen im Agglomerationsbereich und Kabellängen in der Grössenordnung von 500 m oder weniger würden in der Regel gegenüber den heute standardmässig üblichen Schirmquerschnitten (Tabelle I) reduzierte Schirmquerschnitte in der Grössenordnung von 5 mm² Kupfer vollauf genügen.

Sternpunktbehandlung und Erdschlussströme

Arten der Sternpunktbehandlung

Die betrieblichen Eigenschaften des Mittelspannungsnetzes werden relevant beeinflusst durch die Art der Sternpunktbehandlung. Eine im Herbst 1995 in Mulhouse durchgeführte Tagung hat folgende Zusammenhänge gezeigt:

«In ländlichen Netzen mit hohem Freileitungsanteil hat sich über Jahre hinweg der isolierte Sternpunkt bewährt. Im Erdschlussfall liegen die Fehlerströme in der Grössenordnung einiger Ampere bis weniger als 10 A. Mit steigendem Kabelanteil im Netz nehmen die Fehlerströme im Erdschlussfall markant zu und können Grössenordnungen von mehreren 100 A erreichen. Ein Übergang zum induktiv geerdeten («gelöschten») Sternpunkt führt dazu, dass im Falle eines Erdschlusses die Fehlerströme in der Grössenordnung von 30 A gehalten werden können. Sobald ein Netz einen Kabelanteil von 100% aufweist, ist, aus betrieblichen Überlegungen heraus, der niederohmig geerdete Sternpunkt von Vorteil. In dieser Betriebsart können Erdschlussströme in der Grössenordnung weniger Kiloampere auftreten.»

Kabel werden in der Regel unter der Randbedingung verlegt, dass sie 30 bis 40 Jahre genutzt werden können. Die vorangehenden Schilderungen zeigen, dass aus betrieblichen Überlegungen heraus die Art der Sternpunktbehandlung im Laufe eines Kabellebens ändern kann. Es ist deshalb bei der Auswahl von Schirmquerschnitt und Schirmerdung darauf zu achten, dass man sich eine gewisse Flexibilität für die Zukunft aufrecht erhält.

Fehlerströme und Einwirkungszeiten

Unterschiedliche Sternpunktbehandlungen führen zu unterschiedlichen Fehlerströmen. Die Erdungsvorschriften des SEV [1] zeigen klar auf, wie hoch die zulässige Schrittspannung in Abhängigkeit der Einwirkdauer sein darf (siehe Bild 2: Z-Kurve oder Homberger-Kurve). Bei kurzzeitiger Einwirkung im Millisekundenbereich liegt die Grenze bei 700 V, bei dauernder Einwirkung bei 50 V. Die Schrittspannung ist die Konsequenz aus der sich von der fehlerbehafteten Anlage nach aussen trichterförmig abbauenden Erdungsspannung. Die Erdungsspannung selbst ist wiederum die Folge von Erdungswiderstand und Erdschlussstrom.

Für eine Betrachtung der Grössenordnungen sei davon ausgegangen, dass die

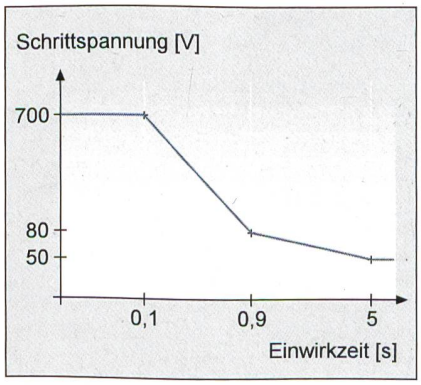


Bild 2 Zulässige Schrittspannungen in Hochspannungs-Wechselstromanlagen bei Frequenzen unter 100 Hz [1]

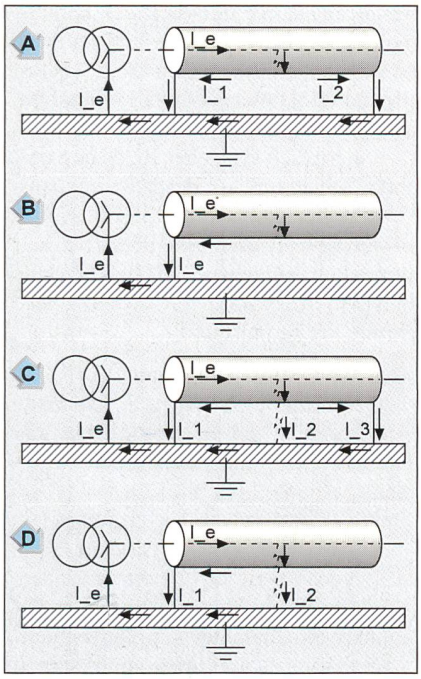


Bild 3 Stromfluss im Erdschlussfall in starr geerdetem Netz
Am Beispiel eines Netzes mit geerdetem Sternpunkt zeigt sich, wie in Abhängigkeit der Schirmerdung und in Abhängigkeit der Erdschlussart sich unterschiedliche Strompfade über den Kabelschirm und durch das Erdreich einstellen.

A beidseitige Kabelschirmerdung, Isolationsdefekt ohne Erdberührung
B einseitige Kabelschirmerdung, Isolationsdefekt ohne Erdberührung
C beidseitige Kabelschirmerdung, Isolationsdefekt mit Erdberührung
D einseitige Kabelschirmerdung, Isolationsdefekt mit Erdberührung

Schrittspannung bei realen Trafostationen im Bereich von 25% der Erdungsspannung und der Wert des Erdungswiderstandes der gesamten Anlage typischerweise in der Grössenordnung von 1 Ohm liegen wird. Unter Berücksichtigung dieser Werte und unter Betrachtung der Knickpunkte der Kurve in Bild 2 führt dies zu folgenden Erdschlussstromwerten und zulässigen Einwirkungszeiten: 2,8 kA während 0,1 s oder weniger, 320 A über 0,9 s oder weniger, 200 A über mehrere Stunden. Die Abschaltung des Erdschlusses selbst ist die Aufgabe der Netzschutzeinrichtungen und Leistungsschalter. Die Kabelschirme sind so zu dimensionieren, dass sie diesen Randbedingungen gerecht werden.

Thermische Wirkung der Erdschlussströme im Kabelschirm und im Leiter

Aufteilung des Erdschlussstromes

Für die Beurteilung der thermischen Wirkung der im Abschnitt «Fehlerströme und Einwirkungszeiten» abgeschätzten möglichen Erdschlussströme und Einwirkungszeiten ist relevant, welcher Anteil dieses Fehlerstromes über den einzelnen Kabelschirm oder durch das Erdreich fliesst. Bild 3 zeigt am Beispiel eines starr geerdeten Netzes unterschiedliche Schirmerdungsvarianten und Fehlerarten. Es zeigt sich, dass im Falle eines inneren Erdschlusses im Kabel, in einer Muffe oder in einem Endverschluss bei einseitig geerdetem Kabel die Schirmbelastung am grössten ist, fliesst doch der gesamte Fehlerstrom über den Schirm zum Schirmerdungspunkt und von dort weiter zur Sternpunktserdung. In den anderen Fällen tritt eine Stromaufteilung auf den Kabelschirm beidseits der Fehlerstelle und/oder auf das Erdungssystem auf. Für die folgenden Überlegungen soll der schlimmste Fall, bei dem der volle Erdschlussstrom über den Kabelschirm fliesst, betrachtet werden.

Thermische Wirkung auf den Kabelschirm selbst

Der Kabelschirm soll so bemessen sein, dass er durch den während der Einwirkzeit fliessenden Fehlerstrom nicht geschädigt wird. Für Kunststoffkabel mit einer Isolation aus vernetztem Polyäthylen ist nach IEC eine im Kurzschlussfall kurzzeitig maximal zulässige Grenztemperatur von 250 °C zu berücksichtigen; Erfahrungswerte zeigen aber, dass kurzzeitig auch Temperaturen im Schirmbereich bis 350 °C zulässig sind. Für den Kabelmantel aus unvernetztem Polyäthylen liegt die maximal zulässige Grenztemperatur relevant tiefer, nämlich bei ungefähr 150 °C.

Die folgenden Zahlen basieren auf der Annahme eines Kabelschirmes mit Querschnitt 10 mm² Cu. Die thermisch zulässige Fehlereinwirkzeit (t_{ist}) lässt sich bei vorgegebenem Stromwert auf dem Kabelschirm berechnen. Den Vergleich mit den erlaubten Abschaltzeiten (t_{soll}) zeigt Tabelle II. Im Bereich der Fehlerdauer von wenigen Sekunden ist die zulässige Zeit somit grösser als die aus den Vorschriften abgeleitete erforderliche Abschaltzeit und somit unkritisch. Es zeigt sich klar, dass die kritischen Fälle vor allem im Bereich der Einwirkung über Minuten oder Stunden liegen können.

Reduktion der thermischen Kabelbelastbarkeit aufgrund der Schirmströme

Die Belastung im Mittelspannungsnetz rührt grösstenteils von den in den Trafostationen angeschlossenen Netztrafos in Dy5-Schaltung her. Aufgrund der Dreieckschaltung der Primärwicklung fliessen im Erdschlussfall die Lastströme weiter, bleiben doch die verketteten Spannungen vom Erdschluss unbeeinflusst. Dieser Laststrom weist in einem Mittelspannungs-Verteilnetz einen typischen cos(φ)-Wert von 0,97 auf und ist somit weitgehend ohmsch mit induktivem Anteil.

Wie die Bilder 4, 5 und 6 zeigen, fliesst über den erdschlussbehafteten Phasenleiter des fehlerbehafteten Lei-

Erdschlussstrom I_e [A]	zulässige Einwirkzeit t_{ist} [s]	erlaubte Abschaltzeit t_{soll} [s]
2800	0,4	0,1
320	ca. 20	0,9
200	ca. 60	7200
100	∞	–

Tabelle II Vergleich der thermisch zulässigen Abschaltzeit t_{ist} mit der vorschriftenbedingten maximal erlaubten Abschaltzeit t_{soll} bei unterschiedlichen Erdschlussstromwerten I_e

Erdschlussstrom I_e [A]	Fehler-Abschaltzeit [s]	gesamter Leiterstrom [A]	nutzbarer Leiterstrom [A]
0	∞	290	290
2800	0,1	290	290
320	0,9	290	290
200	7200	Kabel überlastet	Kabel überlastet
80	7200	160	80
50	7200	230	180
25	∞	265	240

Tabelle III Thermisch zulässige Leiterströme bei unterschiedlichen Erdschlussstromwerten und entsprechenden Fehlerabschaltzeiten
Da ein Teil des Erdschlussstromes über den Leiter fliesst, ist der für die Leistungsübertragung effektiv nutzbare Leiterstrom bei Fehlereinwirkzeiten von mehr als einigen Sekunden signifikant reduziert.

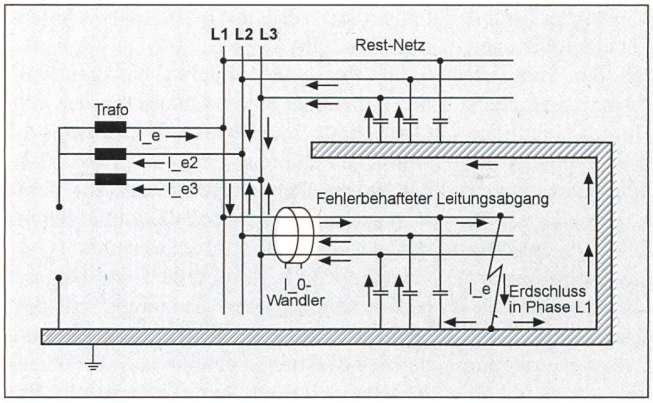


Bild 4 Stromfluss bei Erdschluss im Netz mit isoliertem Sternpunkt
Der Erdschluss sei in Phase *L1* aufgetreten. Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass in den gesunden Phasenleitern kapazitive Ströme fliessen.

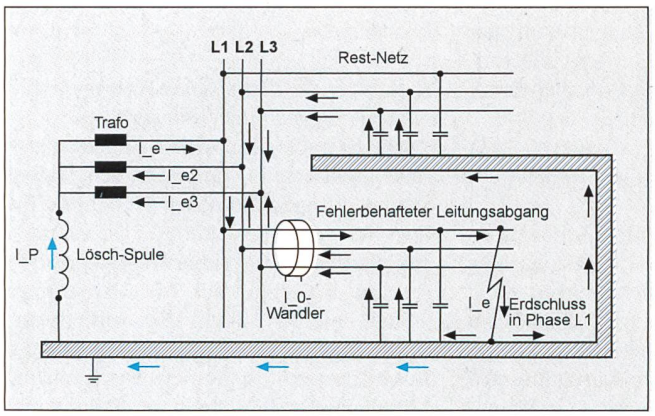


Bild 5 Stromfluss bei Erdschluss im Netz mit induktiv geerdetem Sternpunkt
Der Erdschluss sei in Phase *L1* aufgetreten. Aus der Darstellung ist ersichtlich, wo der Kompensationsstrom der Löschspule fliesst.

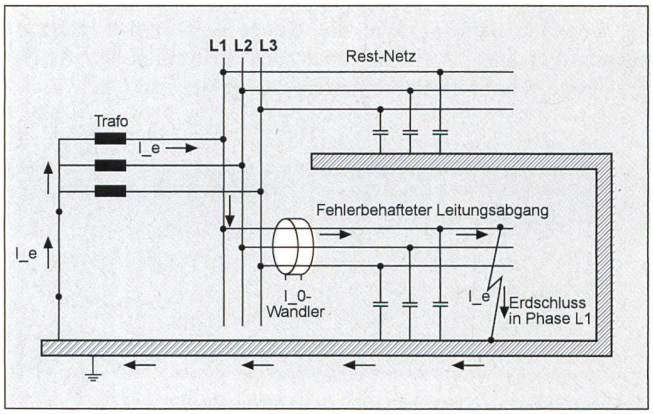


Bild 6 Stromfluss bei Erdschluss im Netz mit starr geerdetem Sternpunkt
Die kapazitiven Fehlerströme wurden vernachlässigt.
Der Erdschluss sei in Phase *L1* aufgetreten.

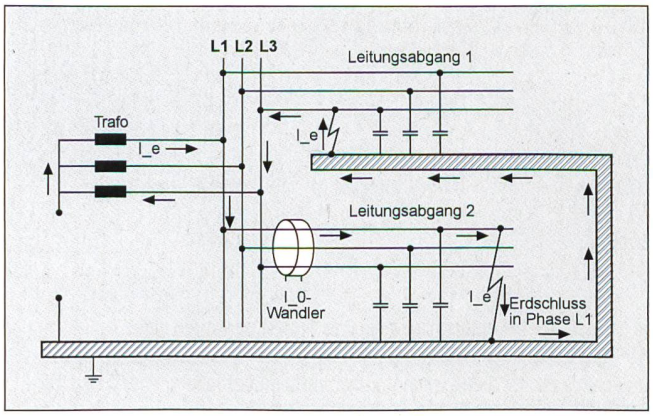


Bild 7 Stromfluss bei Doppelerdschluss im Netz mit isoliertem Sternpunkt
Prinzipdarstellung der sich einstellenden Fehlerströme bei Doppelerdschluss (Phase *L1* und *L3*) in unterschiedlichen Netzteilen.
Die kapazitiven Fehlerströme wurden vernachlässigt.

tungsabganges der Grossteil des Fehlerstromes. Dies bedeutet, dass sich der Fehlerstrom zum normalen Laststrom (vektoriell) addiert. Dieser gesamte Leiterstrom kann, je nach Sternpunkt-Behandlungsart, zu thermisch kritischer Belastung des Kabels führen; es ist deshalb durchaus sinnvoll, im Netz kombinierte Kurzschluss- bzw. Erdschluss- und Thermoschutzrelais eingebaut zu haben. Die möglichen Auswirkungen dieser Überlagerung der Ströme sind:

- Bei isoliertem Sternpunkt sind die Fehlerströme praktisch rein kapazitiv und somit in der Phasenlage um nahezu 90 Grad zum Laststrom verschoben.
- Bei gelöschtem Netz ist in der Regel die Löschspule so dimensioniert, dass das Netz überkompensiert betrieben wird und der Fehlerstrom ohmsch-induktiven Charakter hat. Der Fehlerstrom kann somit bezüglich seiner Phasenlage ebenfalls ähnlich liegen wie der Laststrom.
- Bei geerdetem Netz ist der Fehlerstrom weitgehend ohmsch-induktiv, liegt somit bezüglich Phasenlage ähnlich wie der Laststrom selbst.

Dieser gesamte Leiterstrom führt zu einer entsprechenden Erwärmung des Kabels. Neben dieser thermischen Wirkung des Leiterstromes führen jedoch auch die Erdschlussströme auf dem Kabelschirm zu einer zusätzlichen Erwärmung des gesamten Kabels. Diese Erwärmung des Kabelmantelbereiches bewirkt umgekehrt, dass sich aus thermischer Sicht die maximal zulässigen Leiterströme relevant reduzieren werden. Das Ziel ist, dafür zu sorgen, dass das erdschlussbehaftete Kabel thermisch keine Schädigung erfährt, das heisst, dass nach Sanierung der Erdschlussfehlerstelle alle drei Phasenleiter normal weiterbetrieben werden können.

An einem konkreten Beispiel sei dies dargelegt: Für ein Kabel mit 95 mm² Leiterquerschnitt und 10 mm² Cu-Schirmquerschnitt ergeben sich (bei Verlegung von drei verdrillten Einleiterkabeln, Typ XKT-YT, in einem Rohr, Verlegetiefe 1 m, Bodentemperatur 20 °C) bei unterschiedlichen Randbedingungen zulässige Stromwerte gemäss Tabelle III.

Bei kurzen Fehlerstrom-Einwirkzeiten liegt aufgrund der thermischen Zeitkonstante des Kabels der zulässige Leiterstrom praktisch gleich hoch wie im Normalbetrieb. Bei geringeren Fehlerströmen mit längerer Dauer (typischerweise im gelöschten Netzbetrieb) fliesst auf dem fehlerbehafteten Leiter neben dem Leiterstrom auch der Fehlerstrom.

Dies führt zu einer entsprechenden Reduktion des zulässigen Laststromes. Die Werte aus Tabelle III zeigen klar, dass der thermisch kritische Betriebszustand derjenige ist, bei dem die Fehlerströme über längere Zeiträume fliessen.

Neben dem fehlerbehafteten Kabel selbst können auch andere Leitungsabschnitte des Netzes tangiert werden: Als Beispiel zeigt Bild 5 ein gelöschtes Netz mit mehreren Netzteilen. In den gesunden Netzteilen werden die vom Unterwerk abgehenden Kabelleitungen zusätzlich durch den kapazitiven Ladestrom des von ihnen gespeisten Netzteiles beansprucht. Wiederum soll das Beispiel eines 95-mm²-Mittelspannungskabels beigezogen werden. Der zulässige dauernde Laststrom beträgt (siehe Abschnitt «Reduktion der thermischen Kabelbelastbarkeit aufgrund der Schirmströme») ungefähr 290 A. Der kapazitive Ladestrom im gesunden Netzteil kann durchaus mehrere 10 A betragen. Aufgrund der in der Regel nahezu ohmschen Lastströme führen die zusätzlichen kapazitiven Ladeströme vektoriell addiert letztlich aber nur zu einer bescheidenen Erhöhung des Stromwertes und sind somit nicht zwingend thermisch kritisch.

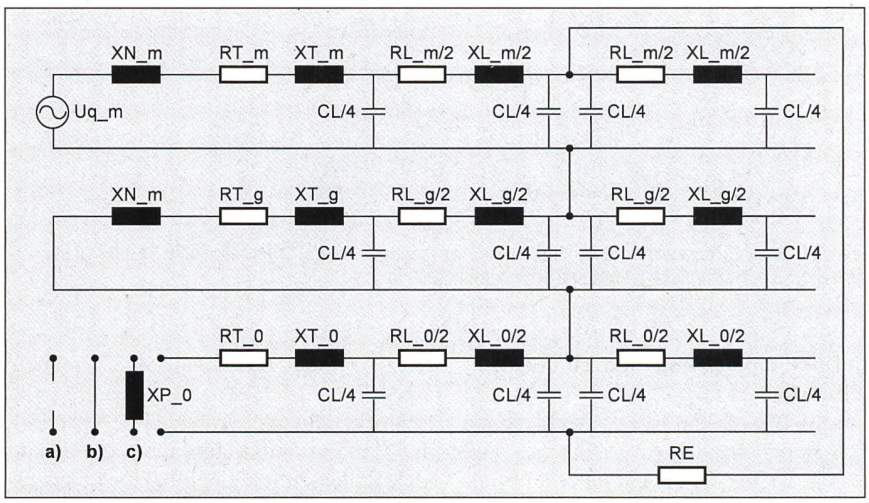


Bild 8 Erdschluss-Ersatzschaltung unter Anwendung der Methode der symmetrischen Komponenten
Die Ersatzschaltung stellt die Situation eines Erdschlusses in der Mitte eines Leitungsabschnittes für verschiedene Sternpunktbehandlungsarten dar.

a	isolierter Sternpunkt	*T_*	Trafo	*_m*	Mitsystem
b	geerdeter Sternpunkt	*L_*	Leitung	*_g*	Gegensystem
c	gelöschtes Netz	*P_*	Löschspule	*_0*	Nullsystem
*N_*	vorgelagertes Netz	*E*	Erdschluss		

Zweipoliger Kurzschluss

Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung

Bei einem zweipoligen Kurzschluss ohne Erdberührung ist die Ausbildung des Kabelschirmes nicht von Bedeutung. Der Fehlerstrom liegt dabei um den Faktor 0,866 tiefer als der Fehlerstrom im Falle eines dreiphasigen Kurzschlusses.

In Mittelspannungsnetzen liegen die dreipoligen Kurzschlussströme in der Regel tiefer als 16 kA, in der Nähe von Unterwerken können sie Werte von gegen 25 kA annehmen. Die zweipoligen Kurzschlussströme liegen somit in der Regel tiefer als 14 kA, in extremen Fällen können sie bis 22 kA hoch liegen.

Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung und unterschiedlichen Fehlerorten

Bei einem Erdschluss steigt die Spannung der beiden «gesunden» Phasen gegenüber Erdpotential auf die verkettete Spannung. Diese Spannungsanhebung kann dazu führen, dass an dielektrisch schwachen Stellen im Netz in einer zweiten Phase ein Folge-Erdschluss eintritt. Dadurch entsteht ein zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung und unterschiedlicher geographischer Lage der Erdschlussorte (Bild 7). Die Höhe des Fehlerstromes wird dabei massgeblich bestimmt durch die Impedanzverhältnisse der Kabelschirme und des Erdbodens zwischen den beiden Fehlerstellen.

Dieser Fehlerzustand muss innerhalb kürzester Zeit behoben werden, unabhängig von der Art der Sternpunktbehandlung. Üblicherweise sind als Kurzschlussschutz-Relais Überstrom-Zeit-Relais mit Abschaltzeiten von maximal etwa 1,6 s in der Nähe der Unterwerke eingesetzt. Auch bei extrem schlechten Nullimpedanzverhältnissen in der Grössenordnung von 16 Ohm würde sich in einem 16-kV-Netz noch ein Fehlerstrom von rund 1000 A einstellen. In Verteilnetzen sind in der Regel die Kurzschlussschutzgeräte bezüglich ihres Ansprechwertes so parametriert, dass dieser Stromwert für eine sichere Auslösung genügt.

Sind aus Gründen der Schutzstaffelung relevant höhere Ansprechwerte eingestellt, ist bei Anlagen in ländlichen Gebieten mit schlechter Bodenleitfähigkeit bei Kabeln der Schirm grosszügig zu dimensionieren und beidseitig zu erden.

Bezüglich der thermischen Wirkung dieser Kurzschlussströme ist die Betrachtung ähnlich wie im Abschnitt «Thermische Wirkung auf den Kabelschirm selbst» (siehe oben). Bei beidseitig geerdeten Kabeln wird sich der Fehlerstrom bei der Fehlerstelle auf beide Seiten des Kabelschirmes verteilen. Damit sind dann auch Kabel mit reduziertem Schirmquerschnitt nicht überlastet.

Anders sieht es aus bei einseitig geerdeten Kabelschirmen oder Kabeln mit Schirmunterbrechung. Da sich der Strom im Schirm nur auf eine Seite ausbreiten kann, ist ein erhöhtes Risiko von thermischer Überbelastung des Kabelschirmes gegeben, und eine grosszügige Schirmdimensionierung drängt sich deshalb auf.

Netzschutz

Entscheidungskriterien

In der Regel verwenden Erdschlussschutzgeräte die Nullspannung und den Nullstrom als Eingangsgrössen. Je nach gewähltem Schutzalgorithmus werden die absolute Höhe der Nullspannung und des Nullstromes, die Phasenlage zwischen Nullspannung und Nullstrom, die Nulleistung als Produkt aus Nullspannung und Nullstrom oder spezifische Oberschwingungsanteile als Entscheidungskriterien benutzt.

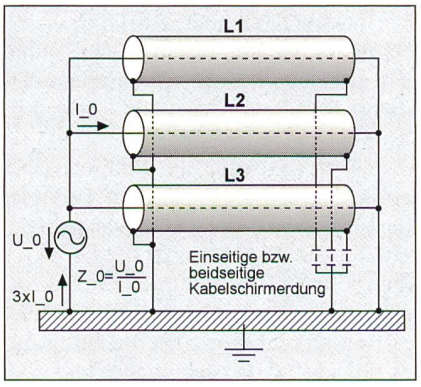


Bild 9 Prinzip der Nullimpedanzmessung an einer dreiphasigen Leitung mit einphasiger 50-Hz-Wechselspannung

Schirmquerschnitt [mm² Cu]	Schirmerdung	Impedanz Z_0 R_0+jX_0 [Ohm]	Impedanzbetrag $\lvert Z_0 \rvert$ [Ohm]
25	einseitig	0,36+j·2,07	2,1
25	beidseitig	0,8 +j·0,26	0,85
10	einseitig	0,36+j·2,07	2,1
10	beidseitig	1,2 +j·0,85	1,5

Tabelle IV Nullimpedanzwerte (berechnet) für Mittelspannungskabel mit Leiterquerschnitt 95 mm² Cu in Abhängigkeit von Schirmquerschnitt und Schirmerdungsart.

Einfluss der Nullimpedanzen der Leitungen

Wie Bild 8 für die verschiedenen Sternpunktbehandlungsvarianten *a, b* und *c* zeigt, ist für die Ausbildung der Nullströme und -spannungen die Nullimpedanz der Leitungen von relevanter Bedeutung. Wie die Nullimpedanz von Leitungen messtechnisch bestimmt wird, zeigt Bild 9.

Bei Anlagen im Agglomerationsbereich im Mittelland mit relativ kurzen Kabellängen zwischen den Trafostationen sind die Verhältnisse weniger kritisch, wie das Beispiel in Tabelle IV unter der Annahme eines 400 m langen 20/12-kV-XLPE-Kabels zeigt. Die Nullimpedanzwerte der beidseitig geerdeten Kabel variieren dabei in einem Bereich von 0,85 bis 1,5 Ohm. Mit gegen Null abnehmendem Schirmquerschnitt würde sich der Nullimpedanzwert entsprechend dem Wert der Kabel mit einseitiger Schirmerdung annähern. Bei der einseitigen Schirmerdung sieht man, dass der Schirmquerschnitt auf die Nullimpedanz selbst keinen direkten Einfluss hat. Es zeigt sich somit, dass bei beidseitiger Kabelschirmerdung und durchschnittlicher Bodenleitfähigkeit die Nullimpedanz nicht extrem stark von der Wahl des Schirmquerschnittes abhängt.

Kritisch sind vor allem längere Leitungen zu abgelegenen Trafostationen. Wird in diesem Falle der Kabelschirm nur einseitig auf der speisenden Seite geerdet oder der Kabelschirm gezielt unterbrochen, besteht das erhöhte Risiko, dass der Erdschluss in dieser abgelegenen Station nicht erkannt wird, da sich aufgrund der erhöhten Nullimpedanz nur ein minimaler Fehlerstrom ausbildet.

Konkret wird dann die Nullimpedanz bestimmt durch den ohmschen und den induktiven Anteil der Nullimpedanz. Die Leitfähigkeit des Bodens ist für den ohmschen Anteil nicht stark massgebend, ist doch die leitfähige Querschnittsfläche des Bodens sehr gross. Die Leitfähigkeit des Bodens wirkt sich jedoch auf die mittlere Eindringtiefe des Stromes in den Erdboden und damit auf die Nullreaktanz aus. Die Abhängigkeit der Nullreaktanz von der Leitfähigkeit ist jedoch über Wurzel-Funktion gegeben. Extrem schlecht leitende Erdböden führen deshalb im Extremfall gegenüber gut leitenden Böden zu um einen Faktor von rund 10 höheren Nullreaktanzwerten. Bei ungefähr 1,5 km langen Kabeln kann dann bei extrem schlechten Bodenverhältnissen die Nullimpedanz des Erdbodens allein bis gegen 20 Ohm betragen. Dieser Wert zeigt, dass hier ein gut leitender Kabelschirm eingesetzt werden muss.

Schirmdimensionierung

Folgende Kriterien und Schlussfolgerungen sind somit für die Schirmdimensionierung relevant. Obschon kein direkter Zusammenhang zwischen Leiterquerschnitt und Schirmquerschnitt besteht, ist es im Interesse der Kabelhersteller und letztlich auch der Kabelbetreiber, einer gewissen Normierung und Standardisierung nachzuleben.

Numerische Netzberechnungsprogramme zwecks Optimierung des Netzes im Normalbetrieb und im Fehlerfall bauen auf der Modellbildung des Netzes aufgrund der elektrischen Ersatzschaltungswerte der Leitungen auf. Ungenaue oder unvollständige Ausgangsdaten führen letztlich zu falschen Berechnungswerten und allenfalls dadurch auch zu Fehlern in der Netzplanung und der Netzschutzoptimierung. Es ist somit für jeden Kabelbetreiber wichtig, die spezifischen Kabelwerte sauber zu dokumentieren. Standardisierte Kabeltypen erleichtern dies wesentlich. Aus oben erwähnten Überlegungen lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Hauptkriterium für die Schirmquerschnittswahl ist die thermische Wirkung des Erdschlussstromes. Für die Schirmdimensionierung sind die Sternpunktbehandlung, die maximal möglichen Fehlerströme und die Fehlerabschaltzeiten der Schutzgeräte im Erdschlussfall von Bedeutung.
- In Netzen mit isoliertem Sternpunkt mit Fehlerabschaltzeiten kleiner 1 s und Netzen mit starr geerdetem Sternpunkt mit Abschaltzeiten kleiner 0,5 s genügen in der Regel reduzierte Schirmquerschnitte, wenn gleichzeitig beide Enden des Kabelschirmes geerdet sind.
- Den kritischen Fall stellen gelöschte Netze mit Fehlereinwirkzeiten über mehrere Stunden dar. Lässt sich der Fehlerstrom zuverlässig auf ein Niveau von 25 A begrenzen, wird der zulässige Leiterstrom des Kabels um ungefähr 10% reduziert.
- Bei höheren Fehlerstromwerten reduziert sich bei reduziertem Schirmquerschnitt der zulässige Leiterstrom wesentlich. Daraus lässt sich auch die Aussage ableiten, dass bei Erdschluss-Stromwerten von 50 A oder grösser, die über Stunden hinweg fliessen, ein erhöhter Querschnitt des Kabelschirmes nahezu zwingend ist.
- Generell ist bei der Anspeisung von abgelegenen Trafostationen in felsigem Gelände ein Kabel mit erhöhtem Schirmquerschnitt mit beidseitiger Schirmerdung einzusetzen.
- Beim Einsatz von Kabeln mit einseitiger Schirmerdung oder gezielter Schirmunterbrechung ist im allgemeinen von einer gegenüber den Standard-Schirmquerschnitten (Tabelle I) reduzierten Schirmdimensionierung abzusehen.

Schirm	Lage der angespeisten Anlagen				
	abgelegen, ländlich	Agglomeration Sternpunktbehandlung des MS-Netzes			
		isoliert	geerdet	gelöscht $I_e < 30$ A	gelöscht $I_e > 30$ A
Normaler Querschnitt	ja	ja	ja	ja	ja
Reduzierter Querschnitt	nein	ja	ja	ja	nein
Beidseitige Erdung	ja	ja	ja/nein	ja/nein	ja

Tabelle V Schirmquerschnittswahl und Schirmerdung
Empfehlung für die Schirmquerschnittswahl und Schirmerdung bei Mittelspannungskabeln unter Berücksichtigung der Netzverhältnisse

Somit würde in den weitaus meisten Anwendungsfällen der Einsatz von Mittelspannungskabeln mit einem Schirmquerschnitt in der Grössenordnung von 10 mm^2 Cu vollauf den gegebenen Randbedingungen genügen.

Materialwahl

Grundsätzlich drängen sich entweder Kupfer oder Aluminium als Kabelschirmmaterial auf. Um den gleichen elektrischen Leitwert zu erreichen, ist bei Aluminium ein um etwa einen Faktor 2 höherer Querschnitt erforderlich als bei Kupfer. Dieser höhere Querschnitt bei Aluminium führt zu einer höheren Wärmekapazität des Kabelschirmes, die jedoch für die thermischen Eigenschaften des Kabels und dessen thermisches Verhalten im Erdschlussfall gegenüber der Verwendung von Kupfer keine relevanten Vorteile zeitigt.

Massgebend für die Materialwahl ist das elektrochemische Verhalten. Wie im Kapitel «Erdungswiderstand von Anlagen» erläutert wurde, werden die Kabelschirme über die Anlagenerdung mit dem Fundamenterder und allfällig vorhandenen Ringerdern zusammengeschlossen. Fundamenterder bestehen in der Regel aus armiertem Beton. Elektrochemisch verhält sich dieser armierte Beton ähnlich wie Kupfer und somit ähnlich wie der Ringerder aus Kupfer. Der Kabelschirm wird also mit einem System zusammengeschlossen, das sich elektrochemisch ähnlich verhält wie Kupfer. Aluminium hat den Nachteil, dass sein elektrochemisches Potential wesentlich von demjenigen von Kupfer abweicht. In Anwesenheit von Feuchtigkeit wird deshalb in einem Aluminium-Kupfer-System das Aluminium relativ schnell und stark korrodieren.

Bei der Verlegung von Energiekabeln besteht immer das Risiko, dass Feuchtigkeit vorhanden ist. Deshalb ist der Frage des elektrochemischen Potentials entsprechendes Gewicht beizumessen. Aus diesem Grunde hat die Verwendung von Kupfer als Schirmmaterial gegenüber Aluminium wesentliche Vorteile. Auch aus der Perspektive der Anschlusstechnik des Kabelmantels weist Kupfer gegenüber Aluminium klare Vorteile auf.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse lassen sich gemäss Tabelle V zusammenfassen. Erfahrungen in Europa zeigen, dass sich die Philosophie der Sternpunktbehandlung über die Jahre oder Jahrzehnte hinweg den sich verändernden Randbedingungen des Netzbetriebes anpassen wird und in der Regel die Entwicklung vom isolierten über den gelöschten zum geerdeten Sternpunkt hin durchlaufen wird. In diesem Zusammenhang hat sich gezeigt, dass die nach Tabelle I üblicherweise verwendeten leiterquerschnittsabhängigen Normschirmquerschnitte sich gut bewährt haben.

Wie Tabelle V zeigt, können unter bestimmten Randbedingungen auch Kabel mit Schirmquerschnitten, die gegenüber den Standard-Schirmquerschnitten (Tabelle I) reduziert sind, sinnvoll eingesetzt werden. Aus netzbetrieblicher Sicht drängt sich eine beidseitige Schirmerdung auf. Bei einseitiger Schirmerdung oder gezielter Schirmunterbrechung ist ein Verzicht auf einen reduzierten Schirmquerschnitt angezeigt.

Generell empfiehlt sich die Verwendung von Kupfer als Schirmmaterial.

Literatur

[1] SN 413569-1/2/3: Erden als Schutzmassnahme in elektrischen Starkstromnetzen, Teile 1–3. SEV 3569-1.1985 / SEV 3569-2, 1987 / SEV 3569-3.1986.

[2] *A. Hochrainer:* Symmetrische Komponenten in Drehstromsystemen. Springer-Verlag, 1957.

Câbles moyenne tension

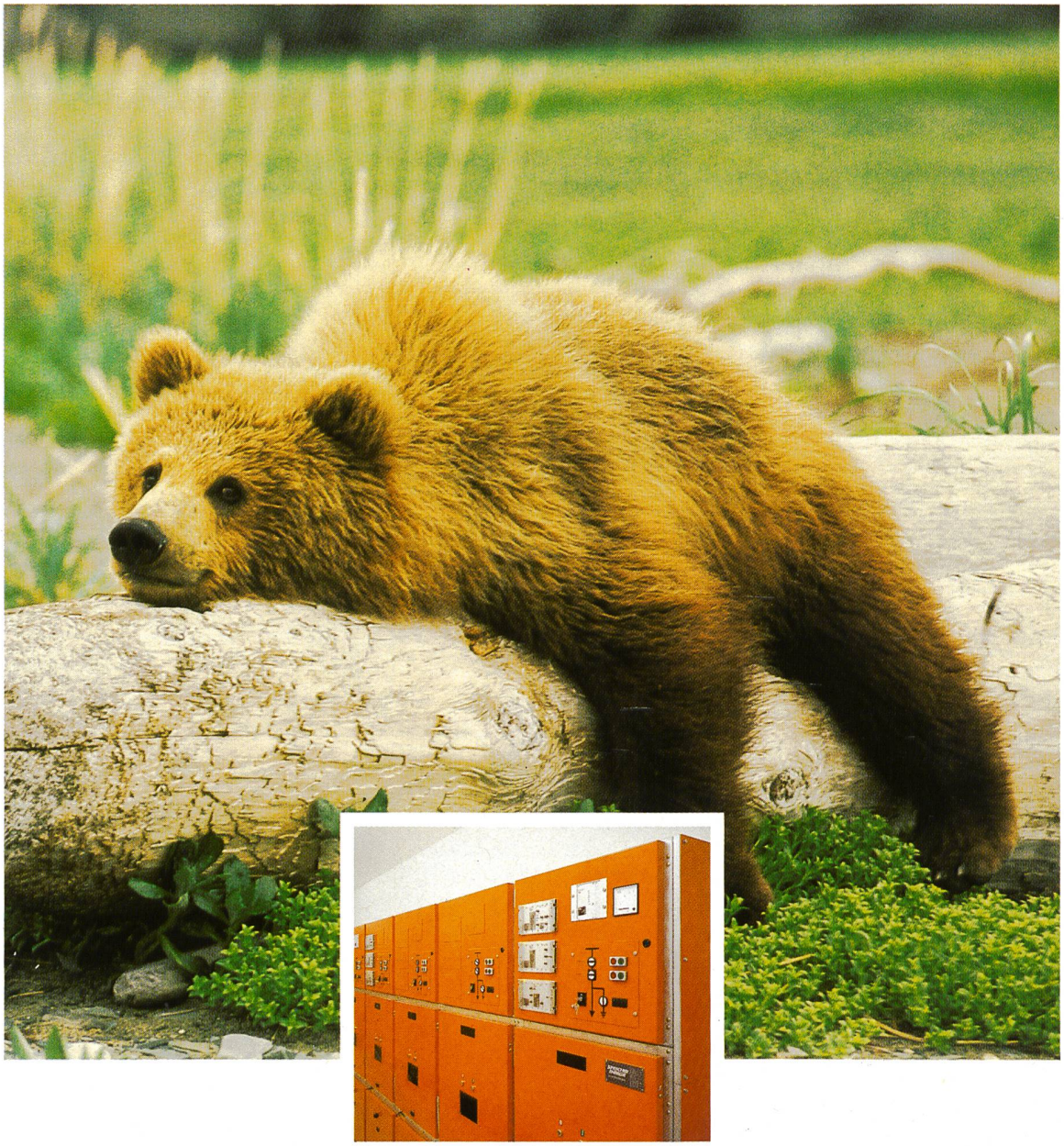
Le dimensionnement et la mise à la terre du blindage de câble à la lumière de différents aspects d'exploitation des réseaux

Lors du développement et de l'utilisation de câbles moyenne tension pour réseaux de distribution d'énergie électrique, il faut veiller à ce que la conception du blindage de câble soit adaptée à l'application concernée. L'article montre quels sont les aspects d'exploitation à considérer. Le principal facteur est la charge thermique du câble dans diverses situations de défaut; la gaine du câble doit être dimensionnée de manière à ne pas être endommagée par les courants de défaut. Les critères importants pour le dimensionnement sont le traitement du point neutre, les courants de défaut maximaux possibles et les délais de coupure des appareils de protection en cas de court-circuit à la terre. Enfin, le choix des matériaux doit tenir compte des conditions électrochimiques.

Les gaines de câbles jouent également un rôle très important dans le cadre de la mise à la terre et de la protection des installations. La mise à la terre du blindage aux deux extrémités fait que les prises de terre d'installations interconnectées sont mises en parallèle, ce qui aboutit à de faibles résistances de terre (fig. 1). Les différentes possibilités de traitement du point neutre, de mise à la terre des blindages et de réglage de la protection d'installation, compte tenu des prescriptions et des tensions de pas admissibles (fig. 2), font que les blindages sont soumis à des charges et risques différents dans les divers cas de défauts envisageables (fig. 3–7, tableaux I–IV). Il convient d'en tenir compte dans le dimensionnement des blindages de câble (fig. 8 et 9, tableau V).

Der SEV auf dem Internet:
http://www.sev.ch

Grosse Sicherheit – viel Entspannung



Die typengeprüften und metallgeschotteten Leistungsschaltanlagen PID 100 sind störlichtbogensicher und bieten daher grösstmögliche Personen- und Betriebssicherheit.

Das System wurde nach neuestem Stand der Technik entwickelt und wird in unserem Werk in Suhr gefertigt.

GEC ALSTHOM

GEC ALSTHOM T&D AG
Sprecher Mittelspannungstechnik, Reiherweg 2, CH-5034 Suhr
Tel. 062 855 77 33, Fax 062 855 77 35