Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 62 (1971)

Heft: 10

Artikel: Möglichkeiten der Beherrschung von Erdschlußströmen in Mittelspannungsnetzen

Autor: Utz, H.P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915823

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: 10.07.2025

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

Energie-Erzeugung und -Verteilung

Die Seiten des VSE

Möglichkeiten der Beherrschung von Erdschlußströmen in Mittelspannungsnetzen

Von *H. P. Utz*

1. Wachstum der Mittelspannungsnetze

Sobald ein Mittelspannungsnetz eine gewisse Dichte erreicht hat, dann weist seine Leitungslänge einen kleineren prozentualen Zuwachs auf als die vom Netz zu übertragende Leistung. Zwischen der Leitungslänge und der Netzlast besteht die Beziehung $l = k \cdot P^n$, wobei dann n kleiner als 1 ist (Fig. 1). Zur Veranschaulichung dieser Beziehung wurde das in Fig. 2 dargestellte, idealisierte Mittelspannungsnetz angenommen, wobei jede folgende Ausbauetappe einer Verdoppelung der in das Netz eingespiesenen Leistung mit Unterwerken gleicher Grösse entspricht und wobei die benachbarten Unterwerke durch Leitungen mit gleichem Übertragungsvermögen verbunden werden. In dem hier angenommenen Netz nimmt die Länge sämtlicher Leitungen proportional der zweiten Wurzel aus der Netzbelastung zu. Der Leitungslängenzuwachs wird jedoch kleiner sein, wenn bestehende Leitungen verstärkt und vorhandene Übertragungsreserven beansprucht werden. In Fig. 3 sind der prozentuale Belastungszuwachs und die prozentuale Zunahme der Netzlänge im 16-kV-Netz des AEW, einschliesslich der galvanisch verbundenen Leitungen der Gemeindewerke, dargestellt. Für dieses Netz weist der Exponent n der Beziehung $l = k \cdot P^n$ den Wert 0,255 auf.

Wesentlich für die folgenden Ausführungen ist die Feststellung, dass die Gesamtälnge der Leitungen in der Regel nicht in dem Masse zunimmt wie die vom Netz zu übertragende Leistung.

2. Einfluss der Verkabelung auf den Erdschlußstrom von Mittelspannungsnetzen mit isoliertem Sternpunkt

Die oben erwähnte Feststellung führt zu der Annahme, dass der Erdschlußstrom, bezogen auf die in das Netz eingespiesene Leistung — im folgenden als spezifischer Erdschlussstrom bezeichnet — mit zunehmender Last abnehmen wird. Dies trifft tatsächlich dann zu, wenn das Verhältnis der Länge

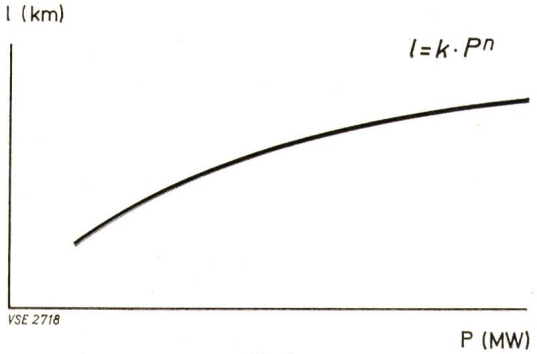

Fig. 1
Leitungslänge in Abhängigkeit der zu übertragenden Wirklast
l Länge der Leitungen; *k* Konstante; *P* übertragene Wirklast; *n* Exponent

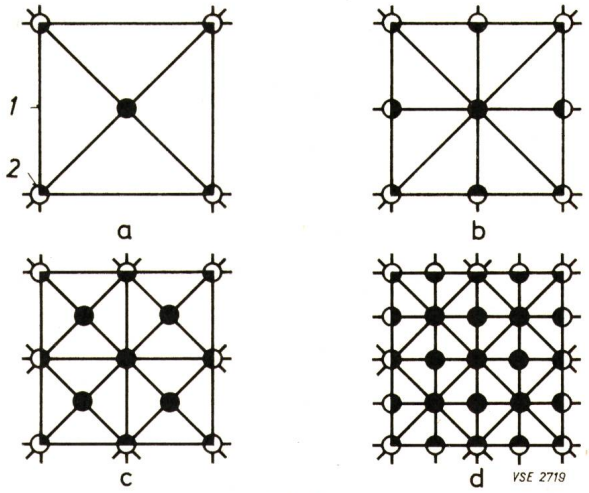

Fig. 2
Idealisiertes Mittelspannungsnetz bei fortschreitendem Ausbau (Ausschnitt)
1 Mittelspannungsleitungen gleichen Übertragungsvermögens; die den Netzausschnitt begrenzenden Leitungen sind lediglich mit 50 % in Rechnung zu setzen.
2 Unterwerke gleicher Leistung. Die schwarz dargestellte Sektorfläche entspricht dem in den Netzausschnitt eingespiesenen Leistungsanteil des Unterwerkes.

Bild	*Leistung* %	*Leistungslänge* %
a	100	100
b	200	140
c	400	200
d	800	280

sämtlicher Kabel zu der Gesamtlänge der Freileitungen auch bei wachsendem Netz gleich bleibt.

In gemischten Netzen (Kabel und Freileitungen), die dicht besiedelte Gebiete versorgen, kann der spezifische Erdschlussstrom mit wachsendem Netz grösser werden. Diese Entwicklung ist darauf zurückzuführen, dass der Anteil der Kabellänge an der gesamten Leitungslänge mit dem Ausbau des Netzes zunimmt, und dass ein Kabel mit Hochstädterschutz wegen seiner hohen Erdkapazität einen ca. 40 × grösseren Erdschlußstromanteil ergibt als eine Freileitung gleicher Länge.

Der Einfluss der zunehmenden Verkabelung auf den Erdschlußstrom eines Netzes wird deutlich, wenn angenommen wird, dass ein Freileitungsnetz bei gleichbleibender Gesamtlänge der Leitungen sukzessive durch Kabel ersetzt werde. Der Erdschlußstrom des Netzes wird dabei von 100 % auf ca. 4000 % ansteigen (Fig. 4).

Die Entwicklung des 16-kV-Netzes des AEW, einschliesslich der galvanisch verbundenen Netze der Gemeindewerke geht aus folgenden Darstellungen hervor:

Die Entwicklung des 16-kV-Netzes — Kabel, Freileitungen und die gesamte Leitungslänge — ist aus Fig. 5 ersichtlich.

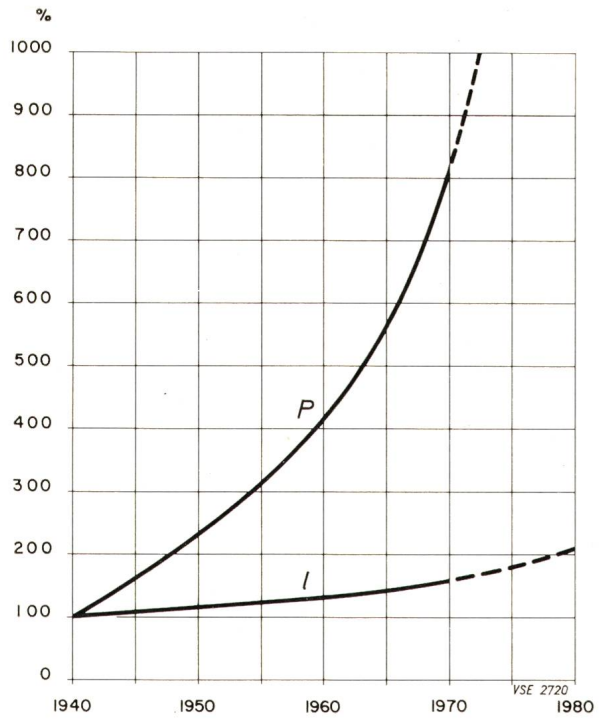

Fig. 3
16-kV-Netz des AEW; Entwicklung der Netzlast und der gesamten Leitungslänge, bezogen auf das Jahr 1940
P Belastung; *l* gesamte Leitungslänge

Auffallend ist die seit 1950 abnehmende Länge des Freileitungsnetzes.

In Fig. 6 ist der Verlauf des prozentualen Anteils der Kabel an der gesamten Leitungslänge dargestellt. Bis in ca. 5 Jahren wird das Netz bereits zur Hälfte in Kabeln bestehen.

Die Entwicklung des Erdschlußstromes (Summe der Erdschlußströme der Netze der Unterwerke) ist in Fig. 7 und der spezifische, d.h. der auf die in das Netz eingespiesene Leistung bezogene Erdschlußstrom ist in Fig. 8 dargestellt. Der Erdschlußstrom erreicht heute pro Unterwerk im Mittel 150 A.

Zusammenfassend sei festgestellt, dass in isoliert betriebenen Netzen mit zunehmender Verkabelung der Erdschlußstrom ansteigen kann, auch wenn das Netz nicht in dem Masse wächst, wie die Netzbelastung zunimmt. Das Anwachsen der Erdschlußströme stellt entsprechende

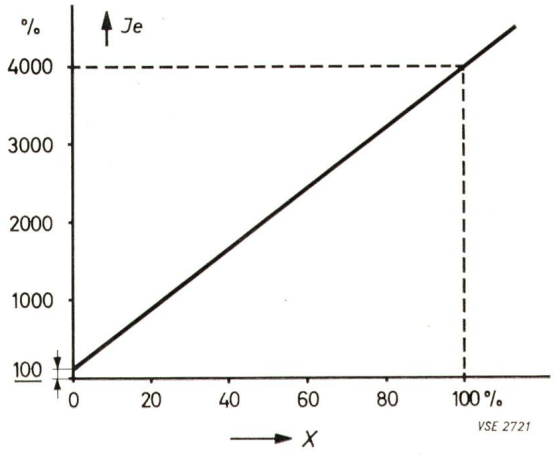

Fig. 4
Entwicklung des Erdschlußstromes in einem Mittelspannungsnetz gleich bleibender Leitungslänge bei zunehmender Verkabelung
X Anteil Kabellänge an der gesamten Leitungslänge

3. Anforderungen an die Erdungsanlagen

Die heute gültigen Bestimmungen der Eidg. Starkstromverordnung lassen Erderspannungen von höchstens 50 Volt zu. Die Erderspannung entspricht dem Produkt aus dem in das Erdreich übertretenden Strom und dem Erdungswiderstand. Hohe Erdschlußströme setzen — sollen die Vorschriften eingehalten werden können — derart kleine Erdungswiderstände voraus, dass diese selbst mit grossem Aufwand kaum mehr realisierbar sind. Über die Häufigkeit von Erdungswiderständen von Transformatorenstationen gibt die Darstellung der Fig. 9 Aufschluss.

Es stellt sich die Frage nach

4. Verbesserungs- und Änderungsmöglichkeiten

Folgende Möglichkeiten sind zu erwähnen:

4.1 Reduktion der Erdungswiderstände

In städtischen Versorgungsgebieten wird mit Vorteil von der Möglichkeit des Zusammenschlusses der Erdungsanlagen

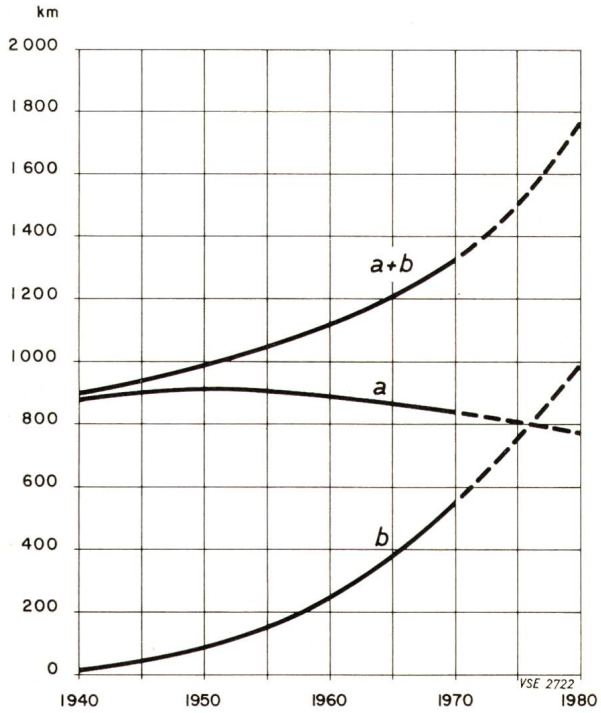

Fig. 5
16-kV-Netz des AEW. Entwicklung der gesamten Leitungslänge, Kabel und Freileitungen
a Freileitungen; *b* Kabel

mit Armierungen, Wasser- und Gasleitungen, Bahnschienen sowie leitenden Kabelmänteln Gebrauch gemacht, um bessere Erdungsverhältnisse zu erhalten. Vor allem wirkt sich die Verwendung leitender Kabelmäntel günstig aus.

4.2 Steuerung des Potentialverlaufes und Isolierung der Bedienungsstandorte

Durch Verlegung von Steuerelektroden kann der Potentialverlauf, ausgehend von der Erdschlußstelle, so beeinflusst werden, dass kleinere Schritt- und Berührungsspannungen entstehen. Als weitere Massnahme sei die Isolierung von Bedienungsstandorten erwähnt.

4.3 Reduktion der Erdschlußströme

Mit der Löschspule kann der kapazitive Erdschlußstrom an der Erdschlußstelle weitgehend, d.h. bis auf den Reststrom, reduziert werden. Der Nachteil der hohen Erdkurzschluss-

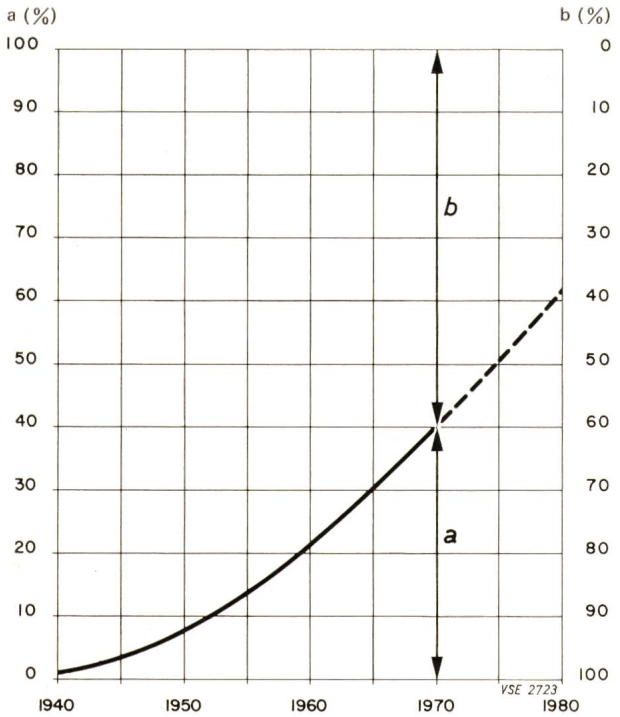

Fig. 6
16-kV-Netz des AEW; Entwicklung der Anteile Kabel- und Freileitungen an der gesamten Leitungslänge
a Kabel; *b* Freileitungen

ströme, die bei der direkten Sternpunkterdung auftreten, lässt sich vermeiden, wenn der Sternpunkt über einen niederohmigen Widerstand oder eine Drossel an Erde gelegt und damit die Erdschlußströme begrenzt werden.

4.4 Änderung der Vorschriften

Die heutigen Bestimmungen der Eidg. Starkstromverordnung betreffend die höchstzulässige Erderspannung lassen sowohl die Einwirkdauer wie auch die Wahrscheinlichkeit einer Gefährdung unberücksichtigt.

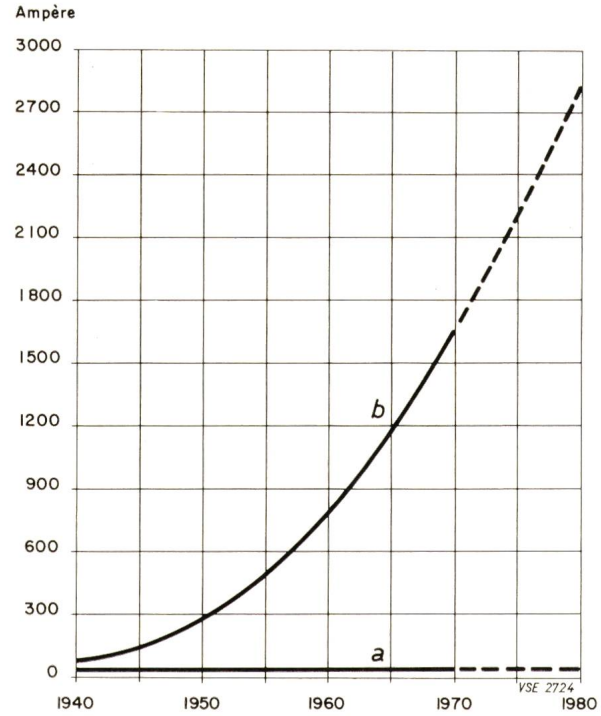

Fig. 7
16-kV-Netz des AEW; Entwicklung der Summe der Erdschlußströme; Unterwerke im Inselbetrieb
a Anteil der Freileitungen am Erdschlußstrom; *b* Gesamter Erdschlussstrom (Anteile Kabel und Freileitungen)

Eingehende Versuche haben ergeben, dass die Gefährdungsgrenze und damit die Gefährdungsspannung von deren Einwirkdauer abhängig sind. In seinem Vortrag über «die Erdung im modernen Hoch- und Niederspannungsnetz» (Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV am 27. November 1969, veröffentlicht im Bull. SEV 61 (1970) vom 21. Februar, S. 187) hat Herr Homberger ein, die neuesten Erkenntnisse berücksichtigendes Diagramm gezeigt, das die Einwirkspannung in Abhängigkeit der Einwirkzeit darstellt (Fig. 10). Die obere Kurve (Q = 100 mAs) ist als Gefährdungsgrenze, die untere Kurve (Q = 50 mAs) als tolerierbare Grenze zu betrachten.

Danach würde bei einer Einwirkzeit von 0,1 sec die zulässige Einwirkspannung 500 Volt betragen. Die Einwirkzeit von 0,1 sec entspricht der unverzögerten Abschaltzeit in einer modernen Schaltanlage.

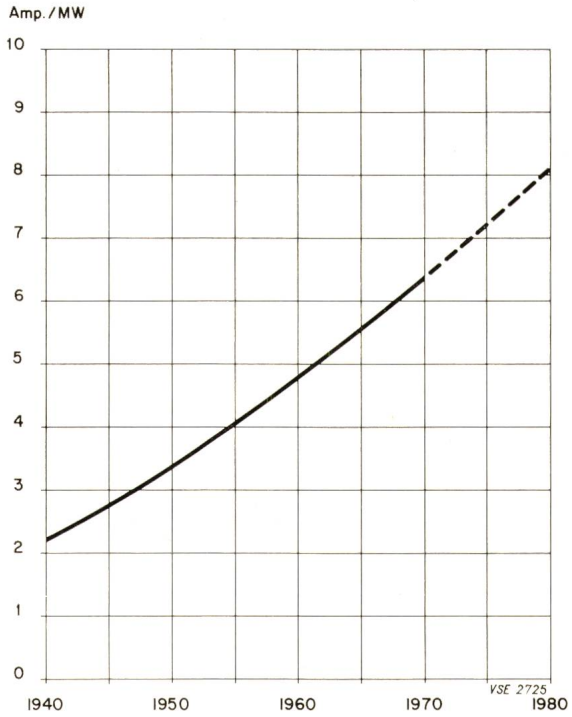

Fig. 8
16-kV-Netz des AEW; Entwicklung des spezifischen Erdschlußstromes (Erdschlußstrom/übertragene Leistung)

Eine entsprechende Änderung der Bestimmungen der Eidg. Starkstromverordnung würde die sofortige Abschaltung von Erdschlüssen in nicht gelöschten Netzen interessant werden lassen. Dank einer höheren zulässigen Gefährdungsspannung könnten höhere Erdschlußströme in Kauf genommen werden.

Bei einer Revision der Vorschriften sollte auch geprüft werden, ob die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Gefährdung berücksichtigt werden könnte.

5. Möglichkeiten der Sternpunktbehandlung

Für die Leistungsübertragung im Normalbetrieb ist es unerheblich, ob und wie der Sternpunkt eines Netzes mit Erde verbunden ist. Bei Erdschluss jedoch ist die Art der Sternpunkterdung von Einfluss auf die Betriebskontinuität, die Spannungsbeanspruchung des Materials, die Erdungsanlagen und den Netzschutz. Dabei sind die wirtschaftlichen Konsequenzen zu berücksichtigen.

Im folgenden sollen die Eigenschaften verschiedener Arten der Sternpunktbehandlung und deren Erfordernisse erörtert werden.

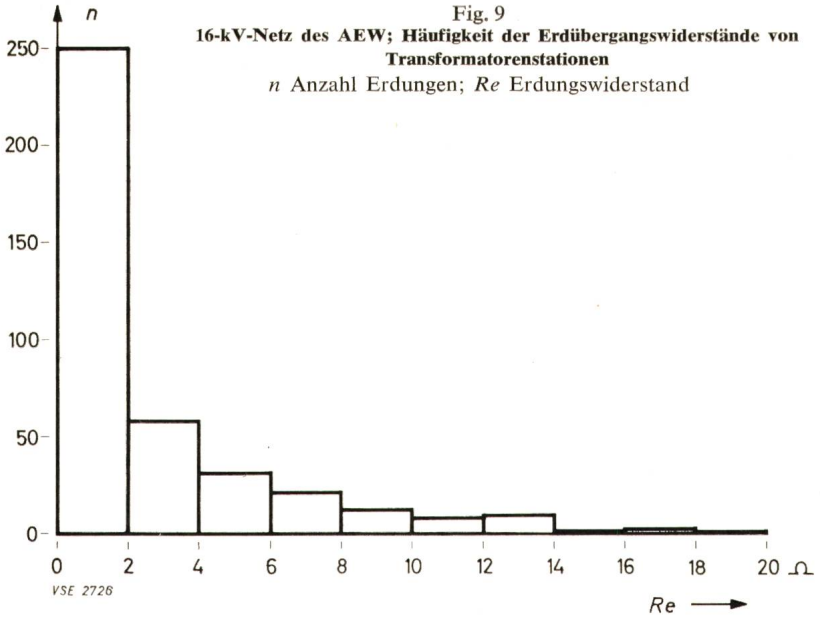

Fig. 9
16-kV-Netz des AEW; Häufigkeit der Erdübergangswiderstände von Transformatorenstationen
n Anzahl Erdungen; *Re* Erdungswiderstand

5.1 Isolierter Sternpunkt

In Freileitungsnetzen mit geringer Ausdehnung ist der Erdschlußstrom klein, so dass ein Lichtbogen ohne Abschaltung der Leitung löschen kann. Auf eine selektive Erdschlussanzeige wird normalerweise verzichtet. Die vom Erdschluss betroffene Leitung wird im Unterwerk durch Ab- und wieder Zuschalten gesucht.

In grösseren Netzen mit beträchtlichem Anteil Kabel, d.h. mit hohen Erdschlußströmen, ist diese Betriebsführung nicht mehr möglich. Entweder muss der Erdschlußstrom reduziert oder die Erdschlüsse abgeschaltet werden.

Die bevorstehende Berücksichtigung der Einwirkzeit der Gefährdungsspannung in den künftigen Vorschriften war einer der Gründe, die das AEW dazu bewogen haben, vorläufig beim isolierten Sternpunkt zu bleiben, Erdschlüsse jedoch, unter Anwendung der Schnellwiedereinschaltung, selektiv abzuschalten. Wesentlich ist dabei die selektive Erfassung der erdschlussbehafteten Leitung. Dazu sind zwei messtechnisch erfassbare Kenngrössen erforderlich: die eine ist die im Erdschlussfall auftretende Verlagerungsspannung, die andere der an der Meßstelle auftretende Summenstrom. Führt man diese Kenngrössen einem Messystem zu, so lässt sich die Richtung des Erdschlusses feststellen.

Die Verlagerungsspannung wird erhalten mittels Einphasenspannungswandlern mit zusätzlicher Wicklung oder mit Fünfschenkelwandlern, der Summenstrom mit Stromwandlern in sog. Holmgreenschaltung, oder mit Kabelstromwandlern (Fig. 11).

In einem nicht vermascht betriebenen Mittelspannungsnetz fliesst bei Erdschluss der Erdschlußstrom der «gesunden» Leitungen in Richtung Sammelschiene des Unterwerks und von dieser auf der erdschlussbehafteten Leitung zur Erdschlussstelle (Fig. 12). Die Richtung des Erdschlußstromes ist somit immer eindeutig. Der Erdschlußschutz, mit dem die 16-kV-Leitungsfelder in den Unterwerken ausgerüstet werden (Fig. 13), besteht im wesentlichen aus einem Blindleistungsrelais, den Wandlern zur Gewinnung des Summenstromes und der Verlagerungsspannung und dem Wiedereinschaltapparat, wobei derjenige des Kurzschlußschutzes verwendet wird. Eine hohe Empfindlichkeit der Relais ist nicht erforderlich.

Die Erfahrungen mit diesem Verfahren sind gut. Es ist auch keine nennenswerte Zunahme von Abschaltungen festzustellen. Die Lokalisierung der Erdschlußstellen war bis heute (dank der verhältnismässig hohen Erdschlußströme!) ohne Schwierigkeiten möglich.

Mit dem Abschalten der Erdschlüsse unter Anwendung der Schnellwiedereinschaltung ergeben sich folgende Betriebsbedingungen:

- kurze Einwirkzeit der Gefährdungsspannung,
- löschen vorübergehender Erdschlüsse durch kurzen Unterbruch,
- selektive, definitive Abschaltung bleibender Erdschlüsse.

Dabei ist in Kauf zu nehmen, dass jeder Erdschluss zu einem Unterbruch der betroffenen Leitung führt.

5.2 Erdung des Sternpunktes über eine Löschspule

Nebst der Abschaltung hoher Erdschlußströme besteht die Möglichkeit, den kapazitiven Erdschlußstrom an der Fehlerstelle mittels einer Löschspule bis auf den Reststrom zu kompensieren. Das Löschen weist folgende Vorteile auf:

- Vorübergehende Erdschlüsse werden ohne Schaltvorgang und somit ohne Betriebsunterbruch eliminiert.
- An der Erdschlußstelle fliesst lediglich der Reststrom.
- Ein spezieller Erdschlußschutz ist nicht erforderlich.

Aufwendig und nicht unbedingt betriebssicher ist eine selektive Erdschlussanzeige, vor allem in vermascht betriebenen Netzen. Einfacher zum Suchen der erdschlussbehafteten Leitung ist die sukzessive Ab- und Wiederzuschaltung der Leitungen im Unterwerk, womit jedoch Unterbrüche in Kauf zu nehmen sind.

Der Aufwand für das Löschen liegt zwischen Fr. 3000.— und Fr. 3500.— pro MVA installierter Transformatorenleistung im Unterwerk.

In Mittelspannungs-Freileitungsnetzen entstehen die meisten Erdschlüsse durch Überschläge und sind somit vorübergehender Natur. Das Löschen eignet sich daher vor allem für Freileitungsnetze.

In Netzen, die vorwiegend Kabel aufweisen, ist der Reststrom normalerweise so gross, dass ein Lichtbogen nicht mehr löscht. Ein Erdschluss in einem Kabel kann innert kurzer Zeit zu einem Durchschlag und Kurzschluss führen. In Kabelnetzen bringt das Löschen nicht die Vorteile wie im Freileitungsnetz.

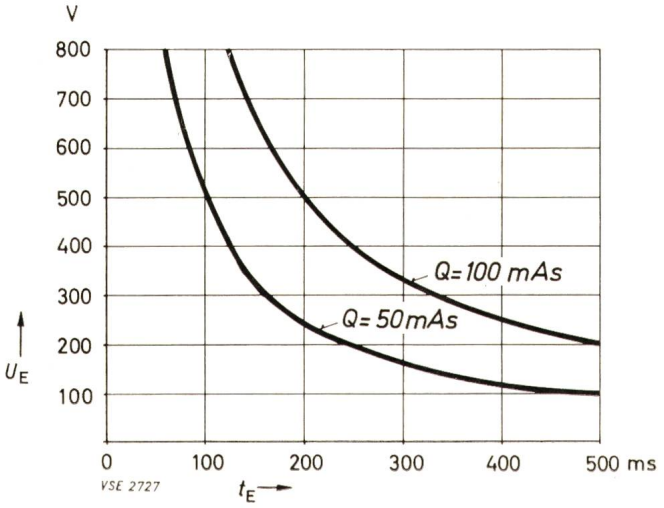

Fig. 10
Grenzen der Einwirkspannung in Abhängigkeit der Einwirkzeit
bei Elektrizitätsmengen von 50 und 100 mAs, Körperwiderstand 1000 Ω, u_E Einwirkspannung, t_E Einwirkzeit, Q Elektrizitätsmenge.
Q = 100 mAs Gefährdungsgrenze
Q = 50 mAs tolerierbare Grenze

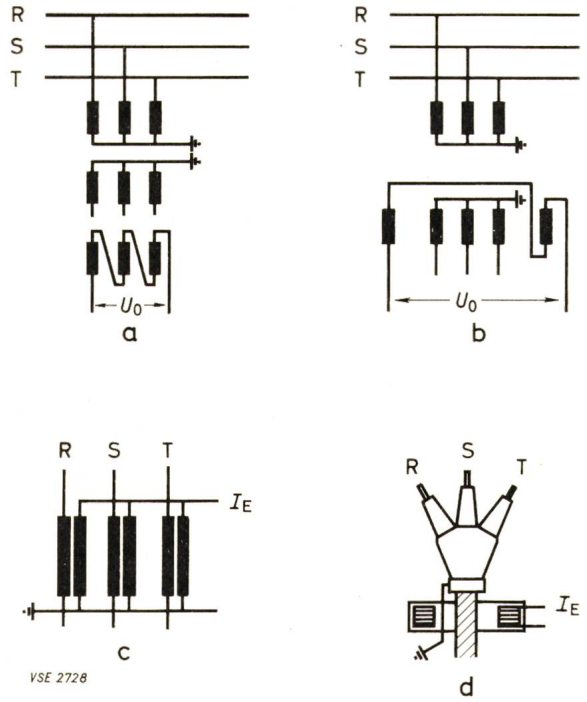

Fig. 11
Selektive Erdschlusserfassung in Mittelspannungsnetzen
Gewinnung der Verlagerungsspannung:
a 3 Einphasenspannungswandler
b Fünfschenkelwandler
Gewinnung des Summenstromes:
c Stromwandler in Holmgreen-Schaltung
d Kabelstromwandler

5.3 Starre oder wirksame Sternpunkterdung

Laut Definition ist die Sternpunkterdung wirksam, wenn bei Erdschluss die Nullpunkverlagerung höchstens 80 % erreicht. Die starre Sternpunkterdung kommt hauptsächlich bei Spannungen über 110 kV zur Anwendung. Die gegenüber isoliert oder gelöscht betriebenen Netzen geringere Spannungsbeanspruchung des Materials bei Erdschluss erlaubt die Abstufung der Isolation, was vor allem bei höheren Spannungen wirtschaftlich stark ins Gewicht fällt. Nachteilig ist der grosse Aufwand für die Erdungsanlagen.

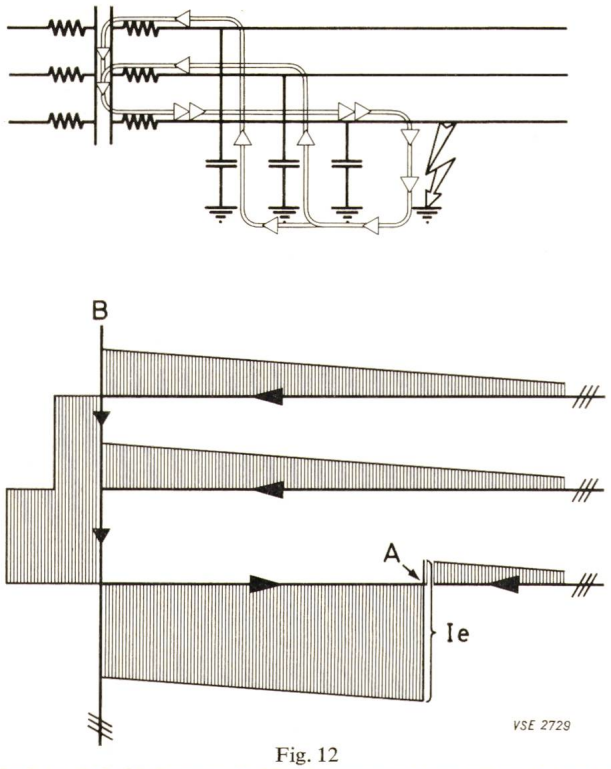

Fig. 12
Verlauf des Erdschlußstromes in Mittelspannungsnetzen mit isoliertem Sternpunkt (Strahlennetz)
A Erdschlußstelle; B Sammelschiene im Unterwerk

Um die Nachteile der hohen Erdkurzschlußströme bei starrer Sternpunkterdung zu vermeiden, kommt in Mittelspannungsnetzen die

5.4 Halbstarre Sternpunkterdung

zur Anwendung. Durch einen niederohmigen Widerstand (ohmscher Widerstand oder Drossel) zwischen Transformatorsternpunkt und Erde wird der Erdschlußstrom auf einen bestimmten, höchstzulässigen Wert begrenzt.

Die halbstarre Sternpunkterdung setzt, zusätzlich zum Kurzschlußschutz, einen separaten Erdschlußschutz voraus, da Erdschlußströme auftreten können, die kleiner sind als der Betriebsstrom der Leitungen.

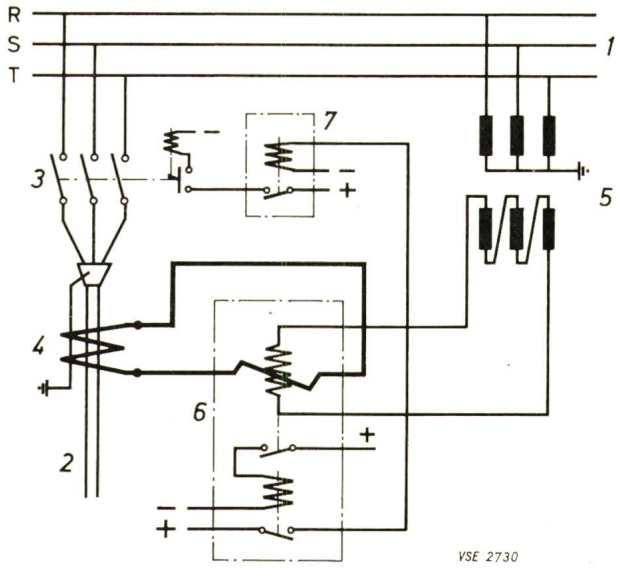

Fig. 13
Selektive Erdschlussabschaltung im Unterwerk eines Mittelspannungsnetzes (Strahlennetz) mit isoliertem Sternpunkt
1 Sammelschiene; *2* Kabelabgang; *3* Leistungsschalter; *4* Kabelstromwandler; *5* Spannungswandler; *6* Erdschlussrichtungsrelais; *7* Wiedereinschaltapparat

Als Vorteile der halbstarren Sternpunkterdung sind zu erwähnen:
- Geringere Spannungsbeanspruchung des Materials als in isolierten oder gelöschten Netzen,
- selektive Erdschlusserfassung, und
- kurze Einwirkzeit der Gefährdungsspannung.

Gegenüber dem gelöschten Netz ist als Nachteil in Kauf zu nehmen, dass jeder Erdschluss einen Unterbruch zur Folge hat.

Der Vollständigkeit halber sei auf eine weitere Möglichkeit aufmerksam gemacht, die einer Kombination des Löschens und der halbstarren Erdung entspricht. Die Löschspule wird innerhalb einer Sekunde durch einen niederohmigen Widerstand überbrückt. Dadurch werden Überschläge ohne Unterbruch gelöscht, bleibende Erdschlüsse jedoch selektiv abgeschaltet.

Die erwähnten Arten der Sternpunktbehandlung sind in der Praxis verwirklicht. Zur Beurteilung der einen oder anderen Methode sind vor allem die Charakteristiken eines Netzes, die betrieblichen Anforderungen sowie die gültigen Vorschriften zu berücksichtigen.

Adresse des Autors:
H. P. Utz, Vorstand der Abteilung Bau und Betrieb des Aargauischen Elektrizitätswerkes, Obere Vorstadt 40, 5000 Aarau.