

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 27 (1936)
Heft: 7

Artikel: Erdungs- und Erdschlussprobleme in Hochspannungsnetzen
Autor: Gastel, A. van
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061480>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 16.05.2025

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

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

VERLAG UND ADMINISTRATION:

A.-G. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zürich 4
Stauffacherquai 36/40

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXVII. Jahrgang

N^o 7

Mittwoch, 1. April 1936

Erdungs- und Erdschlussprobleme in Hochspannungsnetzen.

Referat, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV am 23. November 1935 in Olten.

Von A. van Gastel, Baden.

621.3.014.3 : 621.316.935

Es werden verschiedene Probleme erörtert, die sich beim Studium der Erdschlussfragen und des Schutzes gegen Erdschlüsse ergeben. Heute scheint die Tendenz weniger zur direkten Nullpunktserdung zu neigen als zur Erdung über Induktivität (Erdschluss-Spule, Löschspule), weshalb im folgenden die Netze mit Erdschluss-Spulen im Vordergrund stehen.

Es werden zunächst die Ströme, Spannungen und Leistungen im isolierten und im kompensierten Netz verglichen, dann werden die Eigentümlichkeiten des Erdschluss-Stromes behandelt und die verschiedenen Erdschlüsse und Netzkouplungen betrachtet. Ein weiterer Abschnitt handelt von der Erdschluss-Anzeige und schliesslich wird auf die Bauart der Löschspulen und der Zubehör eingegangen.

Anschliessend an das Referat folgt die Diskussion, in der wertvolle Erfahrungen aus dem Betrieb mitgeteilt werden.

L'auteur expose différents problèmes qui se posent lors de l'étude des défauts à la terre et des mesures de protection y relatives. Aujourd'hui, il semble que l'on abandonne de plus en plus la mise à la terre directe du neutre au profit de la mise à la terre par l'intermédiaire de bobines de self (bobines d'extinction), raison pour laquelle dans ce qui suit les réseaux à bobines d'extinction jouent un rôle prépondérant.

L'auteur compare tout d'abord un réseau isolé avec un réseau compensé, au point de vue des courants, des tensions et des puissances; il examine ensuite les particularités du courant de terre et les différents genres de perturbations à la terre et de couplage des réseaux. Un chapitre suivant traite des relais indicateurs de terre et un dernier de la construction des bobines d'extinction et des accessoires.

La conférence est suivie de la discussion au cours de laquelle les exploitants ont communiqué leurs expériences pratiques, précieuses à tous les points de vue.

I. Einleitung.

Noch vor wenigen Jahren stand das Problem der Nullpunktserdung im Mittelpunkt des Interesses der dieses Sondergebiet bearbeitenden Fachingenieure. Sowohl in der Literatur als auch an Diskussionsversammlungen wurde die Frage der für den Betrieb geeignetsten Erdung eifrig diskutiert. Weil sich aber die Vor- und Nachteile der beiden wichtigsten Erdungsmethoden, der direkten und der induktiven Erdung praktisch die Waage hielten, war es nicht möglich, ihre Anwendungsgebiete scharf zu trennen. Wenn dies auch heute noch zutrifft, so scheint sich doch in letzter Zeit in der Bewertung der Vor- und Nachteile eine Verschiebung zugunsten der induktiven Erdung bemerkbar zu machen.

Die ausgedehnte und intensive Forschung auf dem Gebiete des Schutzes gegen Gewitterüberspannungen hat zu wichtigen Erkenntnissen geführt. Diese betreffen die Dauer, die Steilheit und die Grösse der Ueberspannungen und der Stoßströme. Wenn man die wesentlichsten Resultate kurz zusammenfasst, ergibt sich etwa folgendes Bild:

Die durch indirekte Blitzschläge induzierten Ueberspannungen übersteigen selten Scheitelwerte von 100 kV. Gewöhnlich wird beim direkten Blitzschlag nur ein einziges Seil getroffen, mit Ausnahme allerdings von Masteinschlägen, die Ueberschläge an mehr als einer Phase zur Folge haben können.

Ein Erdseil oder, bei grösserer Ausladung der Traversen, deren zwei bis drei, schirmt als Blitzfänger die Phasenleiter ab, vorausgesetzt, dass das Erdseil an allen Masten geerdet wird. Solche Erdungen müssen, sollen sie wirksam sein, einen genügend kleinen Uebergangswiderstand aufweisen (ca. 15 Ohm oder weniger). Zwischen der Leitung und den Stationen empfiehlt sich die Schwächung der Isolation über eine Strecke von etwa 4 bis 5 Masten. Die Masterdungen dieser Strecke müssen möglichst gut ausgeführt werden.

Diese Resultate sind nicht ohne Rückwirkung auf die Bewertung der Nullpunktserdungen geblieben. Weil es sich als möglich erwies, auch bei Netzspannungen unter 50 kV, durch Verstärkung der Isolation das Netz von den Störungen durch indirekte Blitzschläge praktisch vollständig zu befreien, wurde die Isolation neuerer Anlagen nach diesem Gesichtspunkt gewählt. Diejenige bestehender Anlagen konnte vielfach durch Auswechslung der Isolatoren verbessert werden. Für solche Netze fällt aber ein Nachteil der induktiven Erdung bedeutend weniger ins Gewicht. Dieser Nachteil ist die Erhöhung der Spannung zweier Phasen gegen Erde durch den Erdschluss. Auch die Ueberspannungen, die in einem induktiv geerdeten Netz nach der Löschung des Erdschlusslichtbogens beim Uebergang zum normalen Betrieb auftreten, werden als unschädlich in Kauf genommen, um nicht den grossen Vorteil der induktiven Erdung, den Betrieb mit

Erdschluss weiterführen zu können, zu verlieren. — Es mag wohl sein, dass noch andere Faktoren mitgewirkt haben, so z. B. die Anwendung von Erdschlussrelais, mit denen im induktiv geerdeten Netz die Teilstrecke mit dem Erdschluss selektiv angezeigt wird; sicher ist, dass die Erdschlusskompensation in den letzten Jahren bedeutend an Boden gewonnen hat. Dabei hat sie auch in europäischen Ländern, wo neben dem Betrieb mit isoliertem Nullpunkt ausschliesslich die direkte Erdung angewendet wurde, zahlreiche Anhänger gefunden.

Aehnlich gestalten sich die Verhältnisse in der Schweiz; nachdem hier eine Anzahl Werke schon seit Jahren ihre Hochspannungsnetze mit über Löschspulen geerdetem Nullpunkt betreiben, sind neuerdings mehrere Werke zum kompensierten Betrieb übergegangen.

Trotz der grossen Verbreitung der Erdschlusskompensation kann beobachtet werden, dass die im Betrieb tätigen Elektrotechniker sich ungern mit den Erdschlussproblemen abgeben. Mit Vorliebe überlassen sie dieses Gebiet ihren mehr theoretisch veranlagten Kollegen. Aber gerade die Erdschlussprobleme haben für den Betrieb eine ausserordentlich grosse praktische Bedeutung. In allen Betrieben, seien ihre Netze nun nach den modernsten Gesichtspunkten isoliert oder nicht, wird der Erdschluss immer noch die am häufigsten auftretende Störung sein. Mit Rücksicht auf eine möglichst störungsfreie Energieversorgung ist deshalb die Bekämpfung des Erdschlusses geboten.

Im heutigen Vortrag möchte ich einen Ueberblick über verschiedene Erdschlussprobleme geben. Selbstverständlich ist es ausgeschlossen, in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit den ganzen Fragenkomplex eingehend zu behandeln. Manche an und für sich interessante Frage wird nur kurz gestreift; andere sogar werden überhaupt nicht erwähnt. Wenn trotz dieser Lücken der Vortrag ein einigermaßen abgerundetes Bild über den heutigen Stand der Erdschlussprobleme zu bieten vermag, halte ich damit seinen Zweck für erfüllt.

II. Der Erdschluss im isolierten Netz.

a) Spannungen.

Wir gehen von den denkbar einfachsten Verhältnissen aus: ein symmetrisches Netz, eine Erdschlussstelle ohne Uebergangswiderstand und schliesslich Leitungen und Erde ohne Spannungsabfälle. Die

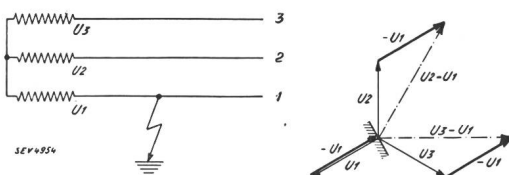


Fig. 1.
Dreiphasen-Netz mit Erdschluss (nicht kompensiert).
Spannungsverlagerung gegen Erde $-U_1$.

Sternspannungen werden mit U , die Spannungen gegen Erde mit V bezeichnet.

Die Spannungsverhältnisse im normalen Betrieb sind gegeben durch

$$V_1 = U_1 \quad V_2 = U_2 \quad V_3 = U_3 \quad V_0 = 0$$

Im Erdschluss sind sie (Phase 1 mit Erdschluss)

$$V_1 = 0 \quad V_2 = U_2 - U_1 \quad V_3 = U_3 - U_1 \quad V_0 = -U_1$$

In Worten heisst das: das ganze Netz wird durch den Erdschluss um die Spannung $-U_1$ gegen Erde verschoben, so dass die kranke Phase bezüglich Erde spannungslos wird und die gesunden Phasen verkettete Spannung gegen Erde annehmen (Fig. 1).

b) Ströme.

Die Stromverhältnisse sollen für den einfachen Fall einer einseitig gespeisten Leitung betrachtet werden. Der Erdschluss sei am Anfang der Leitung. Die Ladeströme gegen Erde sind, wenn die Kapazität einer Phase gegen Erde mit C , die Kreisfrequenz mit ω bezeichnet wird

$$0 \quad \omega C (U_2 - U_1) \quad \omega C (U_3 - U_1)$$

Im Normalbetrieb waren sie

$$\omega C U_1 \quad \omega C U_2 \quad \omega C U_3$$

Alle drei Phasen erhalten durch den Erdschluss eine zusätzliche Strombelastung $-\omega C U_1$. Offenbar ist sie eine direkte Folge der Spannungsverlagerung $-U_1$.

Ueber die Erdschlußstelle fliesst der Erdschlussstrom $I_e = -3\omega C U_1$ als Summe der beiden Ladeströme der gesunden Phasen. Das Stromdiagramm ist der Fig. 2 zu entnehmen; für ein Punkt P links

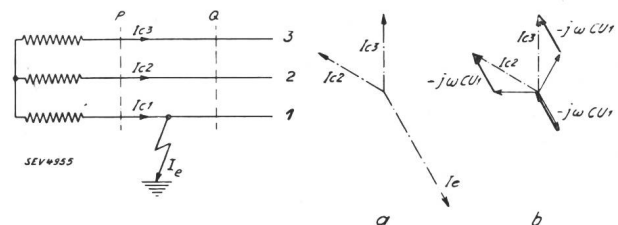


Fig. 2.

Dreiphasen-Netz mit Erdschluss (nicht kompensiert).
Kapazitätsströme.

a Links von der Erdschlußstelle.
b Rechts von der Erdschlußstelle.

von der Erdschlußstelle gilt das Diagramm Fig. 2a, für ein Punkt Q rechts von der Erdschlußstelle das Diagramm Fig. 2b.

c) Leistung.

Im Normalbetrieb ist die kapazitive Leistung pro Phase $\omega C U^2$, insgesamt für alle drei Phasen $3\omega C U^2$. Im Erdschluss sind die drei Phasen ungleich belastet; die kapazitive Leistung hat die Grösse

$$\begin{array}{ccc} \text{(Phase 1)} & \text{(Phase 2)} & \text{(Phase 3)} \\ 3 \omega C U^2 + & 1,5 \omega C U^2 + & 1,5 \omega C U^2 = 6 \omega C U^2 \end{array}$$

Zu beachten ist, dass diese Leistung nur in dem Netzteil vor der Erdschlußstelle übertragen wird. Auf der andern Seite des Erdschlusses ist wohl eine

aufgehoben. Praktisch gibt es heute nur noch die von der Firma Brown, Boveri & Cie. A.-G. vorgeschlagene sog. Dissonanzabstimmung der Löschspule. Mit ihr wird eine Begrenzung der Verlagerungsspannung in unsymmetrischen Netzen bezweckt. Trotzdem durch die Verstimmlung der Löschspule die Blindkomponente des Erdschlussstromes nicht ganz aufgehoben wird, hat sich gezeigt, dass die Löschung des Erdschlusslichtbogens einwandfrei vor sich geht, solange die Verstimmlung innerhalb zulässiger Grenzen gehalten wird. Als Grenzen für die Verstimmlung sind 25 bis 30 % bei Netzen mittlerer Hochspannung (bis etwa 50 kV) und 10 bis 15 % bei Netzen grösserer Spannungen anzunehmen. Die Grösse des Erdschlussstromes, die Anordnung und die Abstände der Leiter beeinflussen die Grenzen.

b) Die Wirkkomponente.

Der Erdschlussstrom enthält ferner eine Wirkkomponente, deren Grösse durch die Netzableitung gegeben ist. Dieser Wirkstrom wird selbstverständlich von dem induktiven Löschspulenstrom nicht kompensiert. Er wird im Gegenteil durch die Verluste der Spule vergrössert. Der Wirkstrom ist im Vergleich zum Blindstrom klein, nur etwa 5 bis 10 % (Verluststrom der Löschspule eingeschlossen). Bis jetzt wurde auf eine Kompensation des Wirkstromes immer verzichtet.

c) Die Oberwellen.

Der Oberwellengehalt des Erdschlussstromes ist von Netz zu Netz stark verschieden. Für das Auftreten der Oberwellen gibt es hauptsächlich zwei Ursachen:

1. *Spannungsoberwellen.* Wenn die Spannung der Generatoren Oberwellen enthält, dringen diese über die Transformatoren in das Netz hinein. Für diese Spannungsoberwellen bilden die Teilkapazitäten gegen Erde um so kleineren Widerstand, als die Ordnungszahl der Oberwelle grösser ist. Für die 7. Oberwelle ist beispielsweise der kapazitive Widerstand nur noch $\frac{1}{7}$ desjenigen der Grundwelle, so dass jedes Prozent Oberwellenspannung die Ursache von 7 % Oberwellen im Erdschlussstrom ist. Ist das Netz für die betreffende Oberwelle in Resonanz, d. h. bilden die Generatoren-, Transformatoren- und Leitungsinduktivitäten mit den Teilkapazitäten gegen Erde einen Resonanzkreis, so sind es sogar mehr als 7 %.

Ausser den Generatoren können die Transformatoren zu den Oberwellen im Erdschlussstrom beitragen. Bekanntlich braucht der Transformator zu seiner Magnetisierung Stromoberwellen, auch dann, wenn die angelegte Spannung der Sinuskurve folgt. Nun ist es aber denkbar, dass zufolge der Wicklungsschaltung bestimmte Magnetisierungsoberwellen nicht fließen können. Eine Verzerrung der Spannungskurve ist die Folge. Bei den Stromoberwellen, die von der Wicklungsschaltung der Transformatoren eventuell nicht durchgelassen werden, handelt es sich um Oberwellen mit den Ordnungs-

zahlen 3, 9, 15 usw. Die Dreieckschaltung gibt den vorerwähnten Oberwellen den Weg frei, die Sternschaltung ohne Nulleiter aber nicht. Deshalb arbeitet der Transformator in Stern-Sternschaltung mit verzerrter Spannungskurve.

2. *Stromoberwellen.* Wie bereits in Abschnitt II erwähnt wurde, wird als Folge des Erdschlusses das System der Ladeströme unsymmetrisch. Das System enthält als Komponente ein gegenläufiges symmetrisches System, welches die das Netz speisenden Generatoren belastet. Die Ströme des gegenläufigen Systemes erzeugen in der Statorwicklung ein Drehfeld. Dieses rotiert aber, bezogen auf die Drehrichtung des Polrades, in entgegengesetzter Richtung. Die Kraftlinien des Drehfeldes induzieren in der Rotorwicklung Spannungen der doppelten Frequenz. Falls die Rotorwicklung nur aus einer Erregerwicklung besteht, fließen in dieser Wicklung Ströme der doppelten Frequenz. Diese Ströme sind als Erregerströme zu betrachten. So wie die Gleichstromerregung des Polrades im Stator Spannungen der normalen Frequenz erzeugt, so werden die überlagerten doppelfrequenten Wechselströme in der Statorwicklung Spannungen dreifacher Frequenz erregen, die an der Erdschlussstelle einen Erdschlussstrom gleicher Frequenz hervorrufen.

Die Verhältnisse ändern sich, wenn der Erregerwicklung am Polrad noch eine Dämpferwicklung vorgelagert ist. Dem gegenläufigen Feld im Stator gegenüber verhält sich diese Wicklung wie eine Kurzschlusswicklung, so dass das Drehfeld sich nur noch als relativ schwaches Luftfeld ausbilden kann. Ein Feld im Eisen und mit ihm eine Erregung doppelter Frequenz gibt es dann praktisch nicht.

Noch ein Punkt muss erwähnt werden. Nicht nur die unsymmetrische Belastung als Folge eines Erdschlusses, sondern jede andere unsymmetrische Netzbelastung ruft ein gegenläufiges Drehfeld hervor. Folglich kann die Netzspannung auch im Normalbetrieb durch Spannungen dreifacher Frequenz verzerrt werden.

Weiter ist scharf zu unterscheiden zwischen Spannungen dreifacher Frequenz und oberen Harmonischen, ebenfalls der dreifachen Frequenz; beide können gleichzeitig in der Spannungskurve enthalten sein. Die Ursache ihrer Entstehung war eine ganz verschiedene: im einen Fall die unsymmetrische Belastung, im andern Fall die Magnetisierung, oder, genauer gesagt, die Sättigung. Während die Spannungen dreifacher Frequenz ein Drehstromsystem bilden, somit eine Phase mit der benachbarten Phase einen Winkel von 120° einschliesst, ist bei der dritten Harmonischen die Richtung der Oberwelle für jede Phase gleich, folglich das System als einphasig mit 3 parallel geschalteten Phasen zu betrachten. Eine Trennung der beiden ist möglich, denn die verketteten Spannungen können nur Spannungen dreifacher Frequenz enthalten und nicht dritte Oberwellen.

Die Oberwellen des Erdschlussstromes werden durch den Löschspulenstrom nicht oder nur ganz wenig kompensiert. Für die fünfte Oberwelle z. B.

ist der kapazitive Widerstand des Netzes gegen Erde fünfmal kleiner als für die Grundwelle, der induktive Widerstand der Löschspule fünfmal grösser. Deshalb wird nur $\frac{1}{25}$ oder 4 % der fünften Oberwelle kompensiert.

Zufolge der Eisensättigung der Löschspule treten ebenfalls Oberwellen auf. Im ungünstigsten Fall addieren sie sich mit denjenigen des Erdschlußstromes und vergrössern auf diese Art den Reststrom. Nun sind aber die Sättigungsoberwellen der Spulen klein. In einer Spule mittlerer Leistung betragen die Ampèrewindungen zur Magnetisierung des Eisenkerns höchstens etwa 10 % der gesamten Ampèrewindungszahl. Für eine Magnetisierungsoberwelle im Betrag von 30 % der Grundwelle gibt dies aber erst eine 3prozentige Oberwelle. Bei Spulen grösserer Leistung sind die Eisen-Ampèrewindungen den totalen Ampèrewindungen gegenüber noch kleiner, so dass für solche Spulen die Oberwellen ohne weiteres vernachlässigt werden dürfen.

Dagegen bietet der Anschluss der Löschspule den Vorteil, dass die gegenläufige Belastung der Generatoren, insofern diese von einem Erdschluss herührt, aufgehoben wird. Mit ihr verschwinden die Erdschlußströme dreifacher Frequenz.

Eine Kompensation der Oberwellen ist nötig, wenn sich nach dem Einbau von Erdschlußspulen zeigt, dass der Erdschlusslichtbogen zufolge des grossen Gehaltes an Oberwellen im Reststrom nicht einwandfrei löscht. Zur Beruhigung sei aber hinzugefügt, dass man wirklich selten Netzverhältnisse antrifft, bei denen eine Kompensation der Oberwellen sich als unerlässlich erweist.

V. Verschiedene Erdschlüsse.

a) Der Erdschluss mit Uebergangswiderstand.

Der Einfluss des Uebergangswiderstandes an der Erdschlußstelle kann an Hand der nachstehenden

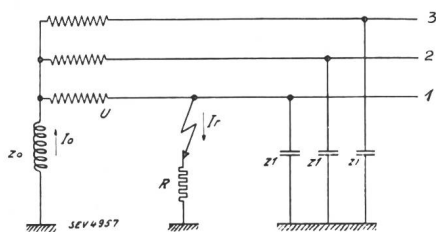


Fig. 4.

Dreiphasen-Netz mit Erdschluss (kompensiert).

Erdschluss mit Uebergangswiderstand.

Z_0 Impedanz der Löschspule.

Z_1 Kapazität einer Phase gegen Erde.

Formel für den Erdschlußstrom I_r (Reststrom) des kompensierten Netzes beurteilt werden. Es ist (Fig. 4)

$$I_r = U \frac{I_0 - I_e}{U + R(I_0 - I_e)}$$

I_0 Löschspulenstrom

I_e Erdschlußstrom des unkompenzierten Netzes

R Uebergangswiderstand an der Erdschlußstelle.

Die Formel zeigt, dass der Uebergangswiderstand für die Netzkompensation eine um so kleinere Rolle

spielt, als die Abstimmung der Löschspule genauer ist. Bei Resonanzabstimmung ist die Differenz $I_0 - I_e$ ein Minimum und gleich dem Wirkreststrom I_{rw} des satten Erdschlusses. In diesem Falle ist

$$I_r = \frac{U \cdot I_{rw}}{U + I_{rw} \cdot R}$$

Solange $I_{rw}R$ gegenüber U klein ist, darf der Einfluss von R ohne weiteres ausgeschaltet werden. Sind die Löschspulen verstimmt, so macht sich der Einfluss von R etwas mehr bemerkbar.

Als Beispiel sei ein Netz mit 20 kV Sternspannung und mit einem Erdschlußstrom von 100 A gewählt. Der Wirkreststrom bei satten Erdschluss wird zu 10 A angenommen. Für dieses Netz gibt Fig. 5

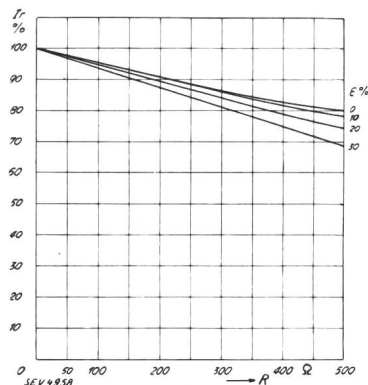


Fig. 5.

Einfluss des Uebergangswiderstandes R an der Erdschlußstelle auf den Reststrom I_r .

den Reststrom in Funktion des Uebergangswiderstandes bei Verstimmungen von 0, 10, 20 und 30 %. Dazu ist erstens zu bemerken, dass Uebergangswiderstände im Bereich von 0 bis 100 Ohm den Reststrom nur unwesentlich ändern und zweitens, dass durch den Uebergangswiderstand der Reststrom reduziert wird. So ist im gewählten Beispiel der Reststrom 21,7 A statt 31,6 A, wie aus dem Wirkstrom von 10 A und dem Blindstrom von 30 A bei einer Verstimmung von 30 % ohne Berücksichtigung des Widerstandes von 500 Ohm abgeleitet werden könnte.

b) Der zweipolige Kurzschluss mit Erdschluss.

In isolierten Netzen besteht die Gefahr, dass aus einem Lichtbogenerdschluss durch Uebergreifen des Lichtbogens auf eine gesunde Phase der Erdschluss in einen zweipoligen Kurzschluss über Erde entartet. In einem kompensierten Netz ist eine solche Gefahr nicht vorhanden, indem der Erdschlusslichtbogen sofort gelöscht wird. Trotzdem die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer solchen Störung im kompensierten Netz viel kleiner ist, als im nicht-kompensierten, darf doch diese Störungsart nicht völlig ausgeschaltet werden, kann doch die Ursache ihrer Entstehung eine ganz andere sein. Vielleicht ist ein Draht über die Leitung geworfen und berührt ausser zwei Phasen noch eine geerdete Traverse, oder es können z. B. zufolge eines Blitzschlages Isolatoren verschiedener Phasen an einem Mast

oder an benachbarten Masten defekt gehen. Wie verhält es sich in einem solchen Fall mit der Kompensation?

Das Diagramm zeigt Fig. 6. Rechts von der Erdschlußstelle sind die Spannungen gegen Erde $V_1 = 1,5 U$, $V_2 = 0$ und $V_3 = 0$. Der Erdschlußstrom ist $I_{e1} = 1,5 \omega C_1 U$, halb so gross wie für den einfachen

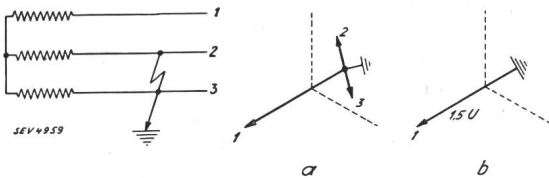


Fig. 6.
Dreiphasen-Netz mit zweipoligem Erdschluss.
Spannungen gegen Erde.
a Links von der Erdschlußstelle.
b Rechts von der Erdschlußstelle.

Erdschluss. Auf der anderen Seite der Erdschlußstelle sind die Spannungen gegen Erde $V_1 = 1,5 U$, V_2 und V_3 . Dabei ist aber $V_3 = -V_2$. Der Erdschlußstrom für die Strecke links des Erdschlusses ist $I_{e2} = 1,5 \omega C_2 U + \omega C_2 V_2 + \omega C_2 V_3 = 1,5 \omega C_2 U$. Der gesamte Erdschlußstrom ist demnach

$$I_e = I_{e1} + I_{e2} = 1,5 \omega (C_1 + C_2) U = 1,5 \omega C U.$$

Die Spannung an der Löschspule ist $V_0 = 1/2 U$, auch halb so gross wie beim gewöhnlichen Erdschluss. Eine Proportionalität zwischen Strom und Spannung der Löschspule vorausgesetzt, ergibt sich als Resultat dieser Betrachtung, dass die Kompensation des Erdschlußstromes auch beim zweipoligen Kurzschluss über Erde eingehalten wird. Wenn also der Erdschluss als Lichtbogen-Erdschluss auftritt, wird der Bogen sofort gelöscht und die Störung besteht als isolierter zweipoliger Kurzschluss weiter. Die Beseitigung dieser Störung muss selbstverständlich dem Kurzschlußschutz überlassen werden.

VI. Netzkopplung.

a) Metallische Kopplung.

Oft werden beim Zusammenschluss zweier Netze mit ungleichen, jedoch nicht stark verschiedenen Spannungen Transformatoren in Sparschaltung verwendet. Solche Transformatoren stellen eine metallische Verbindung der beiden Netze her, unter Zwischenschaltung der Seriwicklung des Transformators. Man muss sich fragen, ob in solchem Fall eine Kompensation des Erdschlußstromes des gesamten Netzes durchführbar ist und weiter, ob für die Löschspulen eine besondere Verteilung vorzusehen ist. Auch ist noch zu untersuchen, ob die Kompensation besondere Bedingungen an die Wicklungsschaltung des Autotransformators stellt.

Was die Kompensation anbetrifft, müssen die Löschspulen für die totale Kapazität gegen Erde ausgelegt werden, genau so, als ob die Netze direkt metallisch miteinander verbunden wären. Die Kompensation stimmt dann sowohl für einen Erdschluss in dem einen wie auch für einen Erdschluss in dem

andern Netz. Die Diagramme sind in Fig. 7 dargestellt, in Fig. 7a für eine Störung im Netz mit der grösseren Spannung und in Fig. 7b für eine Störung im Netz mit der kleinsten Spannung. Die Spannungsverlagerung gegen Erde ist, abgesehen vom Spannungsabfall in dem Autotransformator, verursacht durch den durchgehenden Erdschlußstrom,

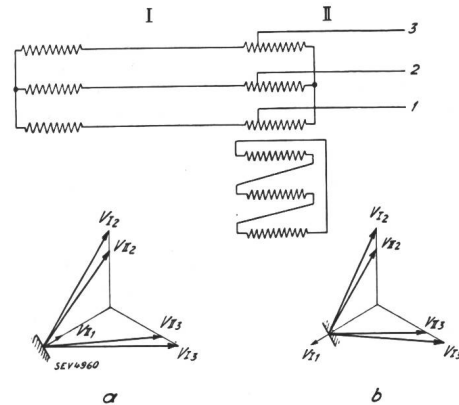


Fig. 7.
Netzkopplung über Autotransformator.
Spannungen gegen Erde.

a Erdschluss im Netz mit der grösseren Spannung.
b Erdschluss im Netz mit der kleineren Spannung.

für beide Netze gleich gross. Demzufolge werden die Spannungen der gesunden Phasen der beiden Netze gegen Erde gleich der verketteten Spannung des gestörten Netzes. Für das Netz mit der kleinsten Spannung ist das ein Nachteil, denn beim Erdschluss auf der anderen Seite des Autotransformators wird die Isolation der gesunden Phasen stärker beansprucht als ohne Kupplung und mit Erdschluss im eigenen Betrieb. Dieser Nachteil ist der Kupplung, nicht der Kompensation zuzuschreiben; er dürfte übrigens, da nur bei relativ kleinen Spannungsunterschieden über Autotransformatoren gekuppelt wird, auch bei Betrieb mit Erdschluss während längerer Zeit noch tragbar sein.

Die bei Autotransformatoren fast ausschliesslich angewandte Schaltung ist die Sternschaltung. Diese lässt nicht zu, dass in der Erregerwicklung Ströme fließen, welche die Gegenampèrewindungen bilden zu den Ampèrewindungen des Erdschlußstromes in der Serienwicklung. Dementsprechend verhält sich der Autotransformator ohne Ausgleich- oder Kompensationswicklung in Dreieckschaltung als eine Drosselspule. Leider ist ihre Induktivität mit der Netzkapazität in Serie geschaltet, so dass statt einer Abdrosselung des Erdschlußstromes eine Vergrösserung zu erwarten ist. Dieser Punkt allein spricht bereits für den Einbau einer Dreieckschaltung. Zudem wird mit einer solchen Wicklung auch die Jochstreuung unterdrückt und mit ihr die zusätzliche Erwärmung des Kastenbleches vermieden. Deshalb sollten bei der Projektierung von Kupplungstransformatoren in Sparschaltung solche mit Ausgleichwicklung unbedingt bevorzugt werden.

In bestehenden Anlagen kann bei Autotransformatoren ohne Ausgleichwicklung durch Anschluss

eines Ausgleichstransformators mit direkter Verbindung der Nullpunkte in der Schaltung nach Fig. 8 die Ausbildung von Gegen-Ampèrewindungen ermöglicht werden. Die Anwendung dieses Hilfsmittels setzt aber voraus, dass der Sternpunkt am Autotransformator entweder bereits ausgeführt ist oder nachträglich noch ausgeführt werden kann.

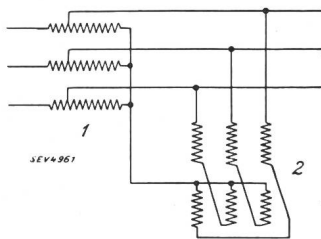


Fig. 8.
Schaltung zur Herabsetzung
der Nullimpedanz eines Auto-
transformators ohne
Ausgleichwicklung.
1 Autotransformator.
2 Ausgleichtransformator.

Schliesslich besteht noch ein Ausweg in der Verteilung der Löschspulen über beide Netze, so dass der Erdschlußstrom eines jeden Netzes für sich kompensiert ist.

b) Magnetische Kopplung.

Jeder an das kompensierte Netz angeschlossene Transformator mit getrennten Wicklungen bedeutet eine magnetische Kopplung entweder mit einem speisenden oder mit einem gespeisten Netz (das Wort Netz hier im weitesten Sinne auch für Generator und Verbraucher aufgefasst). Mit Ausnahme der Transformatoren, welche zum Anschluss von Löschspulen dienen, werden sie nicht vom Erdschlußstrom durchflossen. Folglich bildet bei diesen Transformatoren die Nullpunktsverlagerung ihrer an das Netz angeschlossenen Wicklung das einzige Kennzeichen dafür, dass sie an einem mit Erdschluss behafteten Netz angeschlossen sind. Die Spannungsverlagerung wird nicht auf die weiteren Wicklungen übertragen und so darf, vom Standpunkt einer Kompensation des Erdschlußstromes, jede beliebige Wicklungsschaltung gewählt werden.

Für die Transformatoren, welche zum Anschluss der Löschspulen benutzt werden, gelten andere Gesichtspunkte. Hier muss wieder, wie bei den Autotransformatoren, darauf geachtet werden, dass sich zu den Ampèrewindungen der Spulenbelastung die Gegen-Ampèrewindungen ausbilden können, soll das magnetische Gleichgewicht nicht gestört werden. Vom Anschluss der Löschspule an einen Transformator in Stern-Stern-Schaltung ohne Ausgleichwicklung ist deshalb abzuraten. Auch die Erdung des Sternpunktes auf der andern Seite hilft selbstverständlich nur dann, wenn der Rückstrom in der Erdverbindung ungedrosselt fließen kann. Die zusätzliche Erdung der Generator-Nullpunkte zu diesem Zweck würde die Schwierigkeiten nur auf den Generator übertragen, und dieser zeigt sich gegenüber einer Sternpunktsbelastung noch empfindlicher als der Transformator selbst. Am besten werden deshalb für den Anschluss der Erdschlußspulen Transformatoren in Stern-Stern-Schaltung mit Ausgleichwicklung oder dann solche in Stern-Dreieck-Schaltung gewählt. Selbstverständlich steht auch

dem Anschluss an eine Wicklung in Zickzack-Schaltung nichts entgegen.

Auf einen Punkt beim Anschluss von Löschspulen an Transformatoren in Stern-Stern-Schaltung sei hier noch aufmerksam gemacht. Meistens wird die Zulässigkeit des Anschlusses nur aus dem Gesichtspunkt der Erwärmung des Transformators beurteilt. Es sollte aber auch auf die Löschung des Erdschlusslichtbogens Rücksicht genommen werden. Hier zeigt sich nun, dass durch Anschluss der Löschspule an Transformatoren in Stern-Stern-Schaltung die Wirkkomponente des Reststromes nicht unerheblich vergrößert wird. Für die Löschung des Erdschlusslichtbogens bedeutet dies insofern einen Nachteil, als die Spannung nach der Löschung bei starker Netzdämpfung bedeutend schneller anwächst¹⁾.

c) Kapazitive Kopplung.

Die Wicklungen eines Transformators sind nicht nur magnetisch, sondern auch kapazitiv gekoppelt. Allerdings ist die Wicklungskapazität so klein, dass keine nennenswerte Uebertragung der Spannungsverlagerung des gestörten Netzes auf das andere Netz zu befürchten ist.

Dagegen ist die kapazitive Kopplung parallel laufender Leitungen zu berücksichtigen, besonders wenn sie Netzen verschiedener Spannung angehören. Ist in einem solchen Fall das Netz mit der kleinsten Spannung kompensiert, so muss zu einer Entkopplung der beiden Netze geschritten werden. Es würde aber zu weit führen, diese Entkopplungseinrichtungen hier zu behandeln, vielmehr sei auf die bestehende Literatur verwiesen.

VII. Die Erdschlussanzeige.

Obwohl die Erdschlusskompensation dem Betriebsleiter die Möglichkeit bietet, den Betrieb mit Erdschluss während kürzerer oder längerer Zeit weiterzuführen, wird er bestrebt sein, die Dauer der Störung einzuschränken. Während des Betriebes mit Erdschluss ist die Beanspruchung der Isolation der gesunden Phasen grösser als im normalen Betrieb; die Zeitdauer dieser erhöhten Beanspruchung wissentlich auszudehnen, wäre unverantwortlich, um so mehr, als bei einer weiteren, während dieser Zeit auftretenden Störung eine Abschaltung doch nicht mehr zu vermeiden wäre. Ohne Hilfsmittel ist aber die Bestimmung der kranken Teilstrecke eine zeitraubende Angelegenheit, besonders in stark vermaschten Netzen.

Mit dem Einbau von Erdschlussrelais wird eine rasche und vor allem auch leichte Feststellung des Fehlerortes durch Anzeige der kranken Leitungsstrecke erreicht.

In einem kompensierten Netz wird die Zunahme an Blindleistung als Folge des Erdschlusses von den angeschlossenen Löschspulen gedeckt. Die Verteilung dieser zusätzlichen Blindleistung über die Leitungen ist nur von der örtlichen Verteilung der Spulen über das Netz sowie von ihrer Einstellung

¹⁾ Bull. SEV 1934, Nr. 18, Fig. 16.

abhängig, dagegen nicht vom Ort des Erdschlusses. Folglich kann ein Erdschlussrelais, welches auf die Blindleistung als Messgrösse abgestimmt ist, niemals die kranke Leitungsstrecke anzeigen. Besser geht es mit der nicht kompensierten Wirkleistung als Messgrösse. Die Wirkleistung ist an der Erdschlußstelle ein Maximum und fliesst von dieser Stelle in das Netz hinein. Nun ist für die Meßstelle die Richtung des Leistungsflusses verschieden, je nachdem die Erdschlußstelle sich links oder rechts von der Meßstelle befindet.

Die Erdschlussrelais (Fig. 9) sind empfindliche wattmetrische Richtungsrelais. Sie werden an Stromwandler in Summenschaltung (Holmgreen-Schaltung) und an Spannungswandler zwischen Netznullpunkt und Erde angeschlossen. In dieser Schaltung messen sie die Richtung der über die Leitung fließenden Nullkomponente der Wirkleistung. Je nachdem diese Leistung auf das Relais zu- oder von dem Relais abfließt, schlägt dessen Drehsystem nach der einen oder nach der andern Richtung aus. Die Richtung des Ausschlags wird von einer einfachen Anzeigevorrichtung festgehalten.

An Hand der Anzeige, oder genauer gesagt, an Hand der Anzeigen der verschiedenen Relais, lässt sich auf einfache Weise die kranke Teilstrecke be-

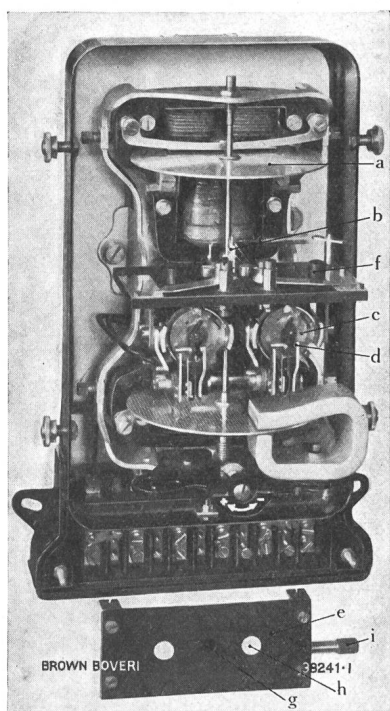


Fig. 9.

Ansicht des BBC-Erdschlussrelais.

- a Ferraris-System.
- b Kontaktvorrichtung zur Steuerung von Hilfsrelais.
- c Hilfsrelais.
- d Kontakte der Hilfsrelais.
- e Anzeigevorrichtung.
- f Einstellvorrichtung der Ansprechleistung.
- g Fallklappe.
- h Kontrollöffnungen.
- i Rückstellknopf.

stimmen. Die Fig. 10 gibt dafür drei verschiedene Beispiele, welche wohl keiner weiteren Erläuterung bedürfen.

Meistens genügt die Wirkkomponente der Nullleistung nicht, um, unter Berücksichtigung der Wandlerfehler, die untere Arbeitsgrenze der Relais in allen Fällen mit hinreichender Sicherheit zu überschreiten. Der Erdschlußstrom ist vielfach bedeutend kleiner als der Betriebsstrom; vom erstgenannten sind aber nur etwa 5 bis 10 % als Wirk-

komponente im Relais wirksam und dann ist noch mit der Verteilung dieses Wirkstromes über Doppelleitungen, Ringe und Maschen zu rechnen. Zudem ist die Uebersetzung der Stromwandler dem Betriebsstrom oder oft sogar dem Kurzschlußstrom angepasst. Da ist es leicht verständlich, wenn die Wandlerfehler, die sich auf die Nennübersetzung

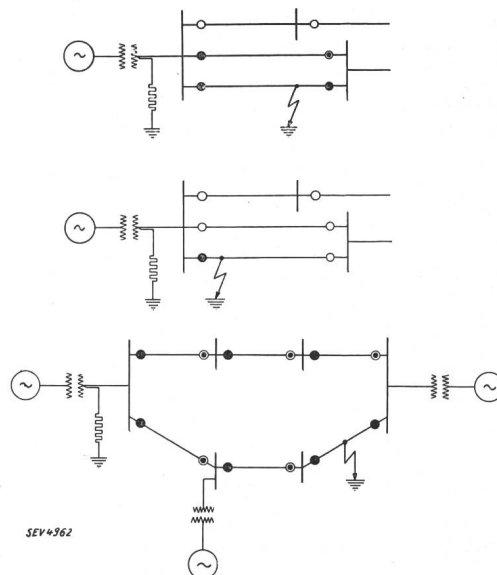


Fig. 10.

Beispiele für die Anzeige eines Erdschlusses durch Erdschlussrelais.

- zeigt auf Erdschluss
 - ⊙ zeigt vom Erdschluss weg
 - nicht angesprochen
- } von den Sammelschienen aus betrachtet.

der Wandler beziehen, die Grösse oder sogar die Richtung der Nulleistung so stark fälschen, dass die Relais entweder nicht ansprechen oder dann nach der falschen Richtung ausschlagen würden.

Um diesem Uebel abzuweichen, wird die Wirkkomponente des Erdschlußstromes künstlich vergrößert durch Einschaltung eines Ohmschen Widerstandes zwischen Netznullpunkt und Erde. Die Grösse des Widerstandes kann so gewählt werden, dass der totale Wirkstrom unter allen Umständen genügt, die Relais richtig arbeiten zu lassen.

Tabelle III.

Ohmscher Widerstand	kurzzeitig eingeschaltet	kurzzeitig ausgeschaltet
Vorteile	Günstige Lösbedingungen für den Erdschlusslichtbogen. Kleinste Spannungsabfälle an der Erdschlußstelle. Widerstand für kurzzeitige Belastung.	Anzeige aller Erdschlüsse. Empfindlichere Einstellung der Relais.
Nachteile	Keine Anzeige der vorübergehenden Erdschlüsse. Gröbere Einstellung der Relais.	Verspätete Löschung des Erdschlusslichtbogens. Größere Spannungsabfälle an der Erdschlußstelle. Widerstand für grössere Belastungsdauer.

Prinzipiell bestehen, was die Einschaltung des Widerstandes anbelangt, zwei verschiedene Schaltungen, welche beide ihre Vor- und Nachteile aufweisen. Der Widerstand kann im Normalbetrieb aus- oder eingeschaltet sein. In dem einen Fall wird er kurz nach der Entstehung des Erdschlusses eingeschaltet. Er bleibt dann nur so lange in Betrieb, als dies für das Ansprechen und die Anzeige der Relais erforderlich ist. Im andern Fall ist er dauernd

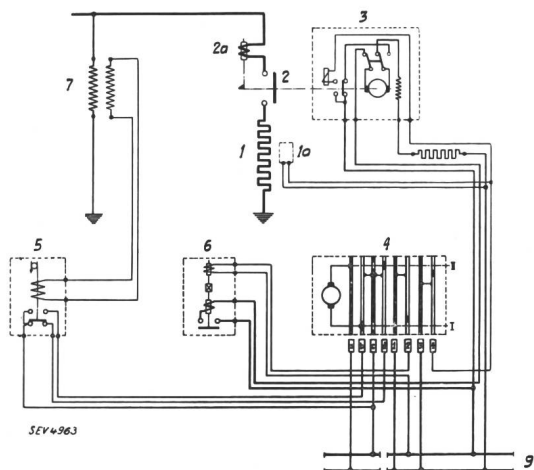


Fig. 11.

Einrichtung zur automatischen Ein- und Ausschaltung des Nullpunktswiderstandes.

- 1 Nullpunktswiderstand.
- 2 Schalter.
- 2a Maximalstromrelais.
- 3 Antrieb des Schalters.
- 4 Steuerwalze.
- 5 Kontaktrelais mit Zeitverzögerung.
- 6 Steuerschütz.
- 7 Spannungswandler zwischen Netzneutralpunkt und Erde.
- 8 Hilfsquelle (Wechselstrom).
- 9 Hilfsquelle (Wechselstrom oder Gleichstrom).

in Betrieb und wird kurz nach Auftreten des Erdschlusses kurzzeitig ausgeschaltet, um dem Erdschlusslichtbogen die Gelegenheit zur Löschung zu geben. Die Vor- und Nachteile der beiden Schaltungen sind in der Tabelle III zusammengestellt.

Je nachdem bestimmten Vor- oder Nachteilen eine erhöhte Bedeutung zugesprochen wird, wird man sich für die eine oder die andere Lösung entschliessen.

Die Ein- und Ausschaltung des Widerstandes kann selbstverständlich von Hand, besser noch vollständig automatisch erfolgen. In Fig. 11 ist das Schaltbild einer automatischen Einrichtung angegeben, mit welcher der Widerstand 1 kurzzeitig eingeschaltet wird. Die Einschaltung wird von dem Zeitrelais 5, das an die Nullpunktsspannung angeschlossen ist, eingeleitet. Die Weitergabe erfolgt über den Kontaktapparat 4 mit Steuerschütz 6 an den Motorantrieb 3 (evtl. auch Magnetantrieb) des Schalters 2.

Der Widerstand wird, wie im Beispiel Fig. 11, direkt zwischen Netzneutralpunkt und Erde geschaltet oder er kann von einer Sekundärwicklung der Löschspule gespeist werden, was den Vorteil hat, dass der Widerstand und der Schalter für eine kleinere Spannung gebaut werden können.

VIII. Die Bauart der Löschspule.

Der innere Aufbau der Löschspulen weicht in einigen Punkten bedeutend von demjenigen der Transformatoren ab. Aber wie fast überall war auch hier die Forderung eines Minimums an Herstellungskosten, bedingt durch die Krise, für die Entwicklung entscheidend, um so mehr, als dieser Forderung keine Einschränkungen bezüglich Wirtschaftlichkeit der Löschspule entgegenstanden. Selbstverständlich dürfte die Betriebssicherheit nicht unter der grösseren Ausnützung des Materials leiden. Allerdings bestand in dieser Hinsicht keine grosse Gefahr, indem die verschärften Prüfungsvorschriften dafür sorgten, dass die Verbilligung nicht auf Kosten der Betriebssicherheit gewonnen wurde. So musste die grössere Materialausnützung allein in einer Verbesserung der Konstruktion gefunden werden. Die Fortschritte, welche in dieser Beziehung in den letzten Jahren erzielt wurden, sind bemerkenswert.

a) Der Eisenkern.

Die Säulen werden in der Richtung quer zur Axe unterteilt, so dass einzelne Blechpakete entstehen, welche durch Zwischenlagen aus Hartpapier voneinander getrennt sind. Heute werden die Säulen so weitgehend unterteilt, dass die einzelnen Pakete nur noch wenige cm in der Höhe messen. Auf diese Art erreicht man eine sehr gleichmässige Verteilung des Luftspaltes über die ganze Säulenlänge. Die Streuflüsse von Paket zu Paket, deren genaue Bestimmung bei grossen Luftspalten zum mindesten eine umständliche Rechnung erfordert, können bei den kleinen magnetischen Spannungen der dünnen Luftspalte vernachlässigt werden. Der praktische Vorteil der Vielfachunterteilung liegt in der Herabsetzung der Zusatzverluste, welche durch die Streuflüsse in den äusseren Blechschichten hervorgerufen werden. Das ist aber nicht der einzige Vorteil. Es gibt noch eine andere Streuung, diejenige zwischen der Wicklung und dem Eisenkern. Bekanntlich werden diese Streuflüsse um so kleiner, als die Ampèrewindungen, welche zur Magnetisierung eines Kernes nötig sind, möglichst am Ort der Magnetisierung

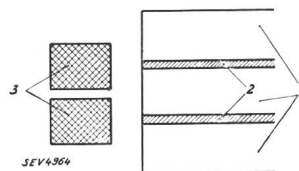


Fig. 12.
Anordnung der Spulen gegenüber den Luftspalten des Eisenkerns.

- 1 Blechpakete.
- 2 Luftspalte.
- 3 Spulen.

selbst erzeugt werden. Diesem Gesetz kann nun bedeutend besser entsprochen werden, wenn der Luftspalt stark unterteilt ist. Man nähert sich der günstigsten Verteilung, derjenigen nach Fig. 12, die jedem Luftspalt gegenüber eine Spule der Wicklung sieht. Eine solche Anordnung gestattet im voraus die genaue rechnerische Bestimmung der Induktivität. Nachträgliche Korrekturen, welche immer kostspielig sind, können dadurch vermieden werden.

Die Wahl der Eisensättigung spielt bei den Löschspulen nicht die gleich bedeutende Rolle wie bei

den Transformatoren, weil bei der sehr kleinen jährlichen Belastungsdauer der Spule von Wirtschaftlichkeit nicht die Rede sein kann. Die Verluste sind hier nur als Faktor im Erwärmungsproblem zu bewerten. Grössere Freiheit, die Eisen-sättigung höher zu wählen, hat man auch infolge des geringen Anteiles der Eisen-Ampèrewindungen an der gesamten Ampèrewindungszahl zur Magnetisierung des magnetischen Kreises. Dieser Anteil

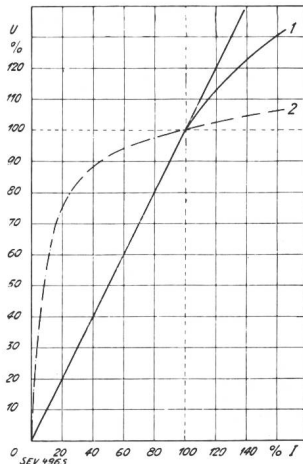


Fig. 13.

Magnetisierungskurve einer Löschspule (1) im Vergleich mit der Magnetisierungskurve eines Transformators (2) bei gleicher Säuleninduktion.

liegt im Bereich von 5 bis 10 % für Spulen kleinerer und mittlerer Leistung und im Bereich von 2 bis 5 % für grosse Einheiten. Er gibt dem Konstrukteur die Möglichkeit, Induktionen von 15 000 Gauss zu wählen oder sogar noch darüber zu gehen und trotzdem Spulen zu bauen, deren Induktivität im Bereich der üblichen Schwankungen der Netzspannung nicht allzu stark veränderlich ist. Als Beispiel ist in Fig. 13 die Magnetisierungskurve einer 5500-kVA-Spule mit einer Induktion von 15 000 Gauss dargestellt. In der gleichen Figur ist auch die Magnetisierungskurve für einen Eisenkern ohne Luftspalt, ebenfalls mit $B = 15 000$ Gauss, eingetragen, so dass der grosse Unterschied zwischen den beiden Kurven ersichtlich ist.

b) Wicklung.

Um den verschiedensten Betriebsbedingungen bezüglich Abschaltung gewisser Teilstrecken, Einfach- und Doppelleitungsbetrieb, Trennung in Separatbetriebe und Netzerweiterung entsprechen zu können, genügt es meistens nicht, die Löschspulenleistung über mehrere Einheiten zu unterteilen und diese bestimmten Netzteilen zuzuordnen. Es müssen die Wicklungen mit Anzapfungen versehen werden, und die diesen Anzapfungen entsprechenden Spulenströme sind den verschiedenen im Betrieb möglichen Werten des Erdschlußstromes möglichst genau anzupassen. Auch Transformatorenwicklungen werden häufig mit Anzapfungen ausgeführt, sei es, dass man die Uebersetzung ein- oder mehrmals, vielleicht sogar periodisch auf die geänderten Spannungsverhältnisse abstimmen will, oder dass man mit Lastschaltern die Spannung in einem bestimmten Netzknoten zu regulieren hat. Dabei hat der Konstrukteur ernsthafte Bedenken, den Anzapf-

reich der Wicklung zu gross zu machen. Und mit Recht, denn er will die Wicklungsunsymmetrie, die im Kurzschluss sehr rasch zu ausserordentlich grossen Axialkräften führt, vermeiden. So haben sich bei den Transformatoren z. B. die Anzapfungen $\pm 5\%$, bei Reguliertransformatoren $\pm 10 \times 1\%$ eingebürgert. Grössere Anzapfbereiche werden nur ungern ausgeführt.

Wie steht es nun in dieser Hinsicht mit dem Anzapfbereich bei den Löschspulen? Werden hier doch manchmal Spulenströme verlangt, die ein Verhältnis 1 : 2, 1 : 2,5 oder sogar 1 : 3 aufweisen. Und das bedeutet für die Windungszahlen Verhältnisse von 1 : 1,4, 1 : 1,5 und 1 : 1,7. Um den grössten Spulenstrom einzustellen, muss im letzten Fall die Windungszahl auf 59 % reduziert werden, d. h. 41 % der Windungen müssen abgeschaltet werden. Glücklicherweise hat man es bei den Löschspulen mit verhältnismässig kleinen Strömen zu tun, vor allem aber kennt die Löschspule keinen durchgehenden Kurzschluss, sonst wären solche Anzapfbereiche nicht ausführbar.

Immerhin wird der Konstrukteur auch bei der Spule versuchen, die Unsymmetrie in der Wicklungsanordnung tunlichst zu vermeiden oder zu begrenzen. Es gibt eine Anzahl Wicklungsschaltungen, bei denen diese Bedingung eingehalten wird. Der Gedanke lag nahe, jeder Anzapfung eine eigene Anzapfwicklung zu geben und diese wie die Stammwicklung über die ganze Säulenlänge zu verteilen (Fig. 14). Der Vorteil dieser Ausführung besteht in der Möglichkeit, jeder Anzapfwicklung die ihr passende Windungszahl zu geben. Bezeichnet man die Windungszahl der Stammwicklung mit w , die-

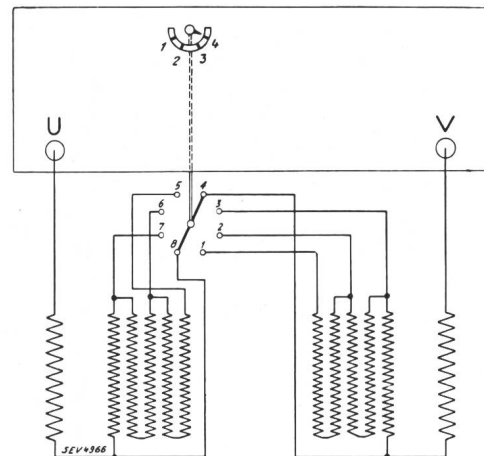


Fig. 14.

Anordnung der Anzapfwicklungen einer Löschspule.

jenige der Anzapfwicklungen mit w_1, w_2 usw., so verhalten sich die Spulenströme wie

$$\left(\frac{1}{w}\right)^2 : \left(\frac{1}{w + w_1}\right)^2 : \left(\frac{1}{w + w_1 + w_2}\right)^2 \text{ usw.}$$

Leider besitzt diese an und für sich sehr schöne Lösung den grossen Nachteil, dass sie die Abmessungen des Wicklungsraumes in radialer Richtung stark vergrössert und dadurch zu recht teuren Spulen

führt. Nach einer Variante dieser Schaltung werden zwei oder mehr Anzapfwindungen zusammen als Schraubenwicklung gewunden. Auf diese Weise



Fig. 15.
Ansicht des aktiven Teiles einer Löschspule.

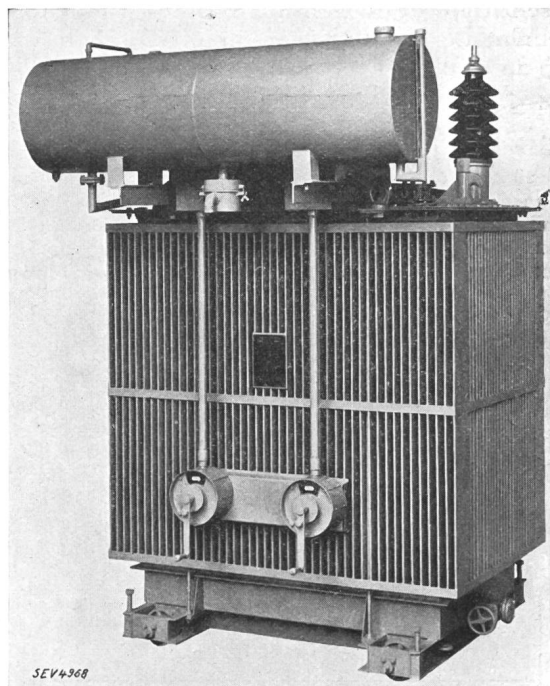


Fig. 16.
Löschspule für Freiluftaufstellung mit eingebautem Nullpunkttransformator.

Leistung: 1090 kVA, 24 Stunden.
Phasenspannung: $\frac{63\,000}{\sqrt{3}}$ V
Frequenz: 50/s.
Stromstärke: 30/22/16,5/11,5 A.

werden die Abmessungen schon bedeutend kleiner. Diesem Vorteil steht aber der Nachteil gegenüber, dass alle Anzapfwindungen die gleiche Windungs-

zahl w_1 haben, so dass die Ströme sich verhalten als

$$\left(\frac{1}{w}\right)^2 : \left(\frac{1}{w+w_1}\right)^2 : \left(\frac{1}{w+2w_1}\right)^2 \text{ usw.}$$

Nur zwei Ströme können beliebig gewählt werden, die übrigen sind dann gegeben durch die Wicklungsanordnung. Neuerdings werden die Anzapfungen mit der Stammwicklung zusammen als eine einzige Wicklung ausgeführt. Gewisse Unsymmetrien lassen sich dabei nicht vermeiden, aber die Erfahrung hat gezeigt, dass diese Unsymmetrien dank der mannigfaltigen Unterteilung des Luftspaltes innerhalb zulässiger Grenzen bleiben.

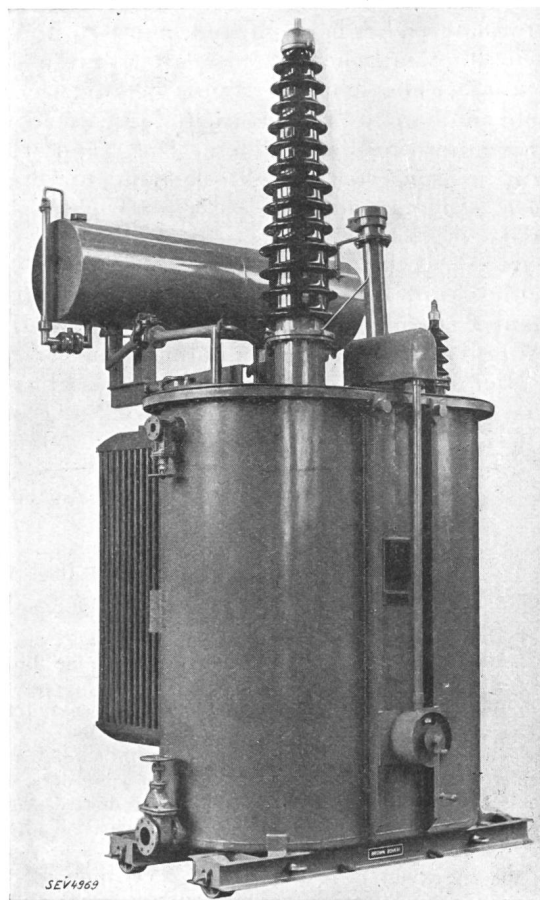


Fig. 17.
Löschspule für Freiluftaufstellung.
Leistung: 1730 kVA, 24 Stunden.
Phasenspannung: $\frac{150\,000}{\sqrt{3}}$ V
Frequenz: 50/s.
Stromstärke: 20/19/13/12 A.

Als Windungsisololation wird, wie bei den Transformatorwicklungen, nur noch dünnes, in mehreren Lagen um das Kupfer gewickeltes Papier verwendet. Ueber das Papier kommt noch eine Umhüllung aus Baumwolle, welche dem empfindlichen Papier einen mechanischen Schutz verleiht. Die Abstützung der Wicklung sieht, wie Fig. 15 zeigt, durch das Fehlen der Kurzschlussbeanspruchung, ganz einfach aus. Für genügende Distanzierung zwischen den Spulen

und zwischen der Wicklung und dem Kern muss natürlich mit Rücksicht auf eine einwandfreie Oelzirkulation gesorgt werden.

c) Zubehör.

Die Anzapfschalter sind mit Rücksicht auf die grossen Windungszahlen der Anzapfwicklungen besonders gut zu isolieren. Da die Anzapfwicklung immer über die beiden Säulen verteilt wird und die Enden dieser Wicklung an einander diametral gegenüberstehende Kontakte des Anzapfschalters geführt werden, beträgt die Spannungsdifferenz zwischen zwei benachbarten Kontakten nur die halbe Spannung der Anzapfwicklung. Diese Spannung ist immerhin noch so gross, dass an eine Verwendung von Lastschaltern, die von den Reguliertransformatoren her bekannt sind, meistens nicht zu denken ist. Sämtliche Anzapfschalter dürfen denn auch nur bei abgeschalteter Spule betätigt werden.

Mehr und mehr bürgert sich der Einbau von Stromwandlern in die Spule ein. Die Wandler dienen zur Speisung von Kontaktrelais und von Strommessern. Zudem kann eine Sekundärwicklung für 110 Volt eingebaut werden. Es darf aber nicht vergessen werden, dass die Löschspule, wenn sie beim Erdschluss unter Spannung steht, mit praktisch konstanter Spannung arbeitet. Je nach der Stellung des Anzapfschalters ist die Windungszahl verschieden. Hieraus folgt, dass der magnetische Fluss variabel ist und somit eine Sekundärwicklung nicht ohne weiteres konstante Spannung liefert. Bei der

verhältnismässig hohen Windungsspannung ist es manchmal ausgeschlossen, die Sekundärwicklung mit einer genügenden Zahl Anzapfungen zu versehen, so dass man damit rechnen muss, dass die Sekundärspannung gewissen Schwankungen unterworfen ist.

Fig. 16 gibt das Bild einer modernen Löschspule für ein 60-kV-Netz. Die Spule ist mit zwei Anzapfschaltern versehen, welche unabhängig voneinander betätigt werden können. Die Ausführung mit getrennten Antrieben erlaubt die Verdopplung der Anzahl Stellungen und damit die Einstellung einer grösseren Zahl Spulenströme. Die Spule ist im Freien aufgestellt und dementsprechend mit Oelschützer ausgeführt. Im Kasten ist ausser der Spule ein Nullpunktstransformator eingebaut, so dass die Spule direkt an das Netz angeschlossen werden kann. Im Gegensatz zu der Ausführung dieser Spule mit Wellblechkasten, zeigt die Fig. 17 eine Spule mit glattem Kasten und angebauten Radiatoren. Diese Spule schützt ein 150-kV-Netz und ist in der Ausführung deshalb interessant, weil sie, trotzdem ihr ein Netztransformator vorgeschaltet ist, ausserordentlich scharfen Prüfungsvorschriften zu genügen hatte. Nicht allein, dass sie für die volle verkettete Spannung zu isolieren war, sondern ihre Windungsisolation hatte einer dreistündigen Prüfung standzuhalten. Hoffen wir, dass solche scharfe Vorschriften für die Prüfung von Löschspulen keine Nachahmung finden, denn in diesem Fall wurde doch zu weit über das Ziel hinausgeschossen.

Diskussion.

Der **Vorsitzende** verdankt den Vortrag des Herrn van Gastel bestens und eröffnet mit einigen einführenden Worten die Diskussion.

Herr Dr. I. Goldstein, Zürich: Ich gestatte mir, zu dem interessanten Referat des Herrn van Gastel einige Bemerkungen zu machen, die, wie ich gleich betonen möchte, keinen Dogmenstreit im Hintergrund haben, sondern lediglich zur Klärung des Problems beitragen sollen. In diesem Sinne möchte ich zur Abstimmung der Löschspule folgendes sagen: Die vom Herrn Referenten angegebene Bemessung der Löschspule nach der Gleichung, nach welcher der induktive Widerstand der Spule der Summe der drei kapazitiven Phasenwiderstände gegen Erde gleich ist, entspricht der Abstimmung auf Resonanz. Dass eine starke «Verstimmung» die Lichtbogenlöschung erschwert, war aus den vorgeführten Oszillogrammen zu entnehmen. Man sah deutlich, wie mit der Verstimmung der Spule die Zeit für die Rückkehr der Spannung an der kranken Phase geringer wurde. Damit ist aber die Möglichkeit einer Rückzündung gegeben. Die Anhänger der Verstimmung der Löschspule wollen es mit der Notwendigkeit einer Herabsetzung der Nullpunkt-Spannung, die durch kapazitive Unsymmetrie bedingt ist, erklären. Nun zeigt aber die Rechnung, dass die Nullpunktspannung in Netzen mit hinreichender Verlustkomponente des Erdschlussstromes durch eine Verstimmung, die noch zulässig ist, nur unwesentlich geändert wird. Die Erzielung eines möglichst geringen Reststromes durch Resonanzabstimmung ist die beste Gewähr für die optimale Wirksamkeit des Schutzes mit Hilfe von Erdschlussspulen und ich habe auf Grund des Referates den Eindruck, dass diese Auffassung heute die allgemeine ist.

Praktisch wird eine gewisse Verstimmung nicht zu vermeiden sein, und es ist auch bei einem gewissen Grad der Verstimmung die Löschung des Lichtbogens nicht gefährdet.

Bezüglich des Oberwellenstromes im Reststrom möchte ich noch bemerken, dass die Oberwellenströme im Erdschlussstrom, die von der Verzerrung der Spannungskurve direkt herrühren, durch die Verminderung der kapazitiven Belastung der Generatoren in einem durch Erdschlussspule

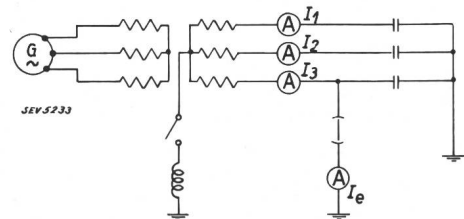


Fig. 1.
Versuch zur Demonstration der Erdschlussstrom-Kompensation.
Netzspannung 10 kV.

	Versuch 1 ohne Erdschluss ohne Spule A	Versuch 2 mit Erdschluss ohne Spule A	Versuch 3 mit Erdschluss mit Spule A
I_1	3,2	5,9	5,5
I_2	3,0	5,8	5,5
I_3	3,3	10,3	~ 0
I_e	0	$= I_3 = 10,3$	0,32

kompenzierten Netz gemildert werden. Dies trifft aber nicht zu in den Fällen, wo die Oberwellenströme von gesättigten Transformatoren herrühren. Aus der Praxis ist mir bekannt, dass die Oberwellen der 5. Ordnung mitunter Schwierigkeiten machen. In solchen Fällen muss man zu besonderen Kompensationseinrichtungen greifen, die die Unterdrückung die-

ser höheren Harmonischen bezwecken. Es dürfte bekannt sein, dass an der Technischen Hochschule in Darmstadt speziell ein Messgerät entwickelt wurde, welches die Ablesung des Prozentgehaltes der Oberwellenströme gestattet.

Nach diesen Bemerkungen möchte ich in Fig. 1 eine Versuchsschaltung vorführen, die sehr anschaulich die Wirkungsweise der Erdschlußspule zeigt. Dieser Versuch hat schon manchen ursprünglichen Gegner des Schutzes durch Löschspulen in einen leidenschaftlichen Anhänger verwandelt. Ein Transformator mit ausgeführtem Nullpunkt wird mit Kondensatoren belastet. Der Transformator hat auch eine Tertiärwicklung, die im Bilde nicht dargestellt ist. An dieser Einrichtung wurde die folgende Versuchsreihe mit 10 000 Volt ausgeführt. Der erste Versuch im erdschlussfreien Netz zeigt die Symmetrie der kapazitiven Belastung (die gemessenen Ströme: $I_1 = 3,2$ A, $I_2 = 3,0$ A, $I_3 = 3,3$ A). Der Nullpunkt kann über eine Erdschlußspule mittels eines Schalters geerdet werden. Ausserdem kann die Phase 3 mittels eines Trenners an Erde gelegt werden. Im zweiten Versuch war die Erdschlußspule nicht angeschlossen. Beim Öffnen des Trenners konnte man dann einen starken Lichtbogen beobachten. Der gemessene Erdschlußstrom betrug 10,3 A. Beim dritten Versuch war die Löschspule angeschlossen. Jetzt war das Öffnen des Trenners ganz funkenlos. Der Erdschlußstrom wurde bei scharfer Resonanzabstimmung zu 0,32 A gemessen.

Zur Ausführung und dem Bau von Löschspulen möchte ich an Hand von zwei Bildern, die mir von der AEG zur Verfügung gestellt wurden, noch einige Bemerkungen ma-

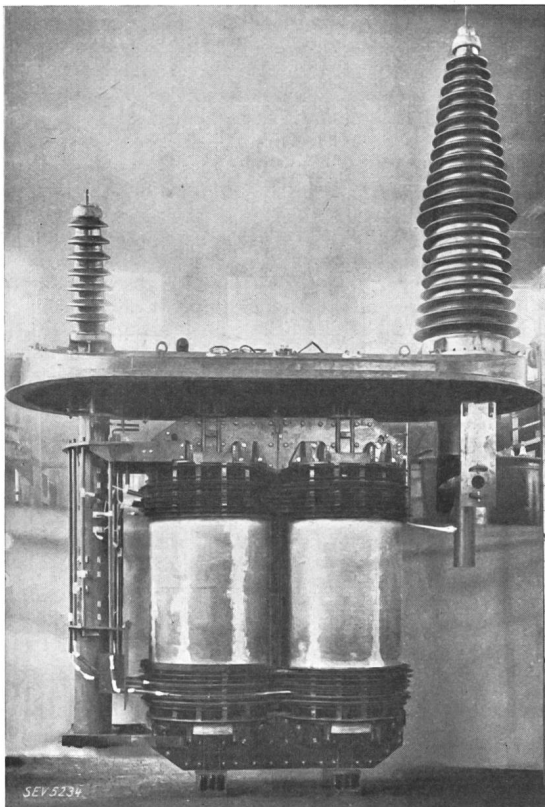


Fig. 2.

Erdschluss-Spule für 19 000 kVA, 220 kV Netzspannung.

chen. Die von Herrn van Gastel als unwirtschaftlich dargestellte Ausführung mit Zylinderspulen ist speziell am Platze, wo es sich um Spulen mit abgestufter Isolation handelt. Fig. 2 zeigt eine solche Spule, die für das RWE ausgeführt wurde. Man gewinnt an Raum in axialer Richtung, da man die inneren Zylinder länger bauen kann und nur für die sichtbaren Aussenspulen den grössten Jochabstand einhalten muss. Die Abschaltungen von Wicklungsteilen zur Abstimmung

werden mittels des Umschalters ausgeführt, und zwar so, dass jeweils ganze Spulen abgeschaltet werden. Die Isolation gegen die Joche wird durch eine grosse Anzahl von Winkelringen bewerkstelligt. Die Spulen mit abgestufter Jochisolation müssen durch Eigenerrögen auf Isolation geprüft werden. Wegen der hohen Blindleistung, die dazu nötig ist, gelingt dies nur, wenn man zu einer Prüfung in Resonanzschaltung mit einer erhöhten Frequenz schreitet. Die Spule wird über einen Transformator in Serie mit einer Kondensatorenbatterie geschaltet. Bei der Abstimmung der Prüfschaltung auf Resonanz gelingt es, mit verhältnismässig

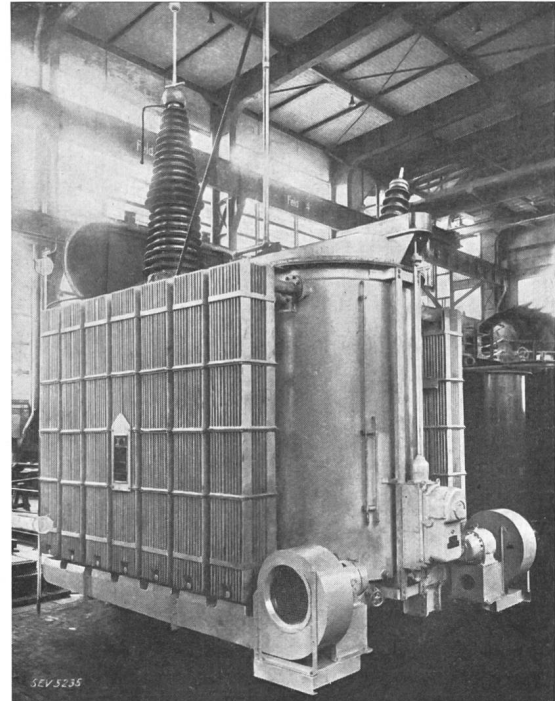


Fig. 3.

Erdschluss-Spule Fig. 2, im Kasten.

geringer Maschinenleistung auf sehr hohe Spannungen zu kommen. So konnten alle Spulen für 220 kV Netzspannung (wie Fig. 2) mit 440 kV durch Selbsterregung geprüft werden. In dieser Prüfungsschaltung hat man auch Gelegenheit, die Windungsprobe mit hoher Spannung auszuführen, was bei der normalen Schaltung und Frequenz wegen der zu hohen Blindleistung gar nicht möglich ist. Fig. 3 zeigt die gleiche Spule im Kasten. Der zweite Isolator, der für eine Nennspannung von 70 kV bemessen ist, dient zum Anschluss an eine Saugspule, die mit einem andern Pol an Erde liegt. Ferner sieht man im Bilde den Antrieb zum Reglerschalter, mit Hilfe dessen man die Spule auf ca. acht Stromstufen im stromlosen Zustand schalten kann. Wie aus dem Bilde hervorgeht, ist die Spule, die für eine Blindleistung von 19 000 kVA bemessen ist, mit einer Pressluftkühlung versehen. Man hat sich hier auf einen Dauererdschluss eingerichtet. In diesem Fall werden die Ventilatoren eingeschaltet und die Kühlluft (es handelt sich um Freiluftausführung) wird über einen Verteilerkasten den Radiatoren zugeführt. Jede Seite hat, wie ersichtlich, ihren eigenen Ventilator.

Herr V. Germann, seinerzeit Comp. Sevillana de Electricidad, Sevilla (*schriftlicher Beitrag*, vorgelesen): Im Anschluss an das Referat von Herrn van Gastel möchte ich mit Erlaubnis der Bank für elektrische Unternehmungen, Zürich, ein hervorragendes Beispiel der Wirkung der Löschspulen mitteilen, das ich während meiner mehrjährigen Tätigkeit bei der Compañia Sevillana de Electricidad (CSE) (Spanien) zu untersuchen Gelegenheit hatte. Es handelt sich um einen Vorfall im 50 kV-Ueberlandnetz mit ca. 75 A Erdschlußstrom und ca. 68 A Löschspulenstrom. Ich nehme die

Störungsursache voraus: Die Erdschlüsse waren bedingt durch Einknicken einer offenbar ungenügend beschwerten Hängekette einer Phase in stark kupiertem Gelände im Laufe einer Sturmnacht mit Temperatursturz im Jahre 1932. Die Lichtbogenspuren waren an der Traverse 40 cm vom Aufhängepunkt zu finden, am Eisenmast keine. Von 21.30 Uhr an setzten in immer rascherer Folge vorübergehende Erdschlüsse ein, ohne dass das Netz weiter in seinem Betrieb gestört wurde. Das Personal nahm deshalb mit Rücksicht auf die Netzkonfiguration, Zeit und Telefonverhältnisse bis nach Mitternacht keine Schaltungen zur Lokalisierung des Erdschlusses vor. So ereigneten sich nach dem Registrierstreifen ca. 150 vorübergehende Erdschlüsse, die immer sofort einwandfrei gelöscht wurden, so dass nach dem Diagramm bei 1 mm/min Vorschub keine Erdschlussdauer abgelesen werden konnte. Es ereignete sich dann eine lokale Abschaltung in einem andern Netzteil, die nachträglich nicht mit Sicherheit mit den genannten Erdschlüssen als Doppel-erdschluss in Verbindung zu bringen war. Von diesem Moment an begann das Personal die Störung zu lokalisieren, während welcher Zeit sich weitere ca. 20 einwandfrei gelöschte Erdschlüsse ereigneten, bis die gestörte Leitung unter den 22 Teilstrecken ausfindig gemacht worden war. Meines Erachtens legt dieses Beispiel ein eindeutig gutes Zeugnis ab, erstens für die gute Löschwirkung der Spulen, wenn man die Phasenabstände für 50 kV-Leitungen und die Löschschwierigkeiten bei einem Erdschlussstrom von 75 A für ungelöschtes Netz in Betracht zieht, und zweitens auch für den guten Isolationszustand des übrigen Netzes während Sturmwetter. Diese Störung gab seinerzeit Anlass zum Studium der Verwendung von Erdschluss-Richtungsanzeigerrelais an strategisch wichtigen Punkten zur Einkreisung von Erdschlüssen.

Noch eine weitere Erscheinung ist zu erwähnen, nämlich das Auftreten von Nullpunktüberschlägen bei nahen Gewitterentladungen in die Freileitung. Ich konnte sechs solcher Ueberschläge im Laufe von drei Jahren in den drei mit Löschspulen ausgerüsteten Stationen untersuchen, bzw. aus der Statistik ausfindig machen. Die Nullpunktsschiene ist für 30 kV isoliert. Dieses Phänomen bewog die CSE zur Anbringung von modernen Ueberspannungsableitern für 30 kV in Parallelschaltung zu den Spulen. Während 1½ Jahren weiterer Betriebszeit mit eingebauten Ableitern hat sich kein weiterer Nullpunktüberschlag mehr ereignet. Eine Zählvorrichtung für das Ansprechen der Ableiter war leider während dieser Zeit nicht eingebaut.

Herr M. Wettstein, Oberbetriebsleiter der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ), Zürich: Es wurde die Frage aufgeworfen, bis zu welcher Spannung man die Löschspulen verwenden sollte. Ich möchte die ergänzende Frage stellen, von welcher Spannung an soll man die Löschspulen verwenden?

Sicher hat die Löschspule eine grosse Bedeutung, sobald in einem Hochspannungsnetz der Erdschlussstrom eine gewisse Grösse annimmt. Sind die Erdschlussströme dagegen verhältnismässig niedrig, so kann mit der Anwendung der Löschspule nach meiner Auffassung keine wesentliche Betriebsverbesserung erzielt werden. Ich möchte diese Behauptung anhand von Betriebserfahrungen belegen. Die EKZ haben nämlich im Jahre 1923 in einem ihrer Hochspannungsnetze eine Löschspule eingebaut. Dieses Netz hat eine Leitungslänge von 230 km, welcher ein Erdschlussstrom von ca. 7 bis 8 A entspricht. In den andern Netzen sind keine Löschspulen eingebaut. Eine seit sieben Jahren auf Grund einer sorgfältigen Störungskontrolle aufgebaute Störungstatistik gibt nun ein gutes Bild über das Verhalten der Netze mit und ohne Löschspulen.

Für die Vergleichszahlen wurden alle Störungen, bei denen die Löschspule keinen Einfluss auszuüben vermochte, wie z. B. Kurzschlüsse bei Schneefall und Sturm, mechanische Beschädigungen von Leitungen durch Drittpersonen, Fehlschaltungen usw., nicht mitgezählt. Ausserdem können die Anzahl der Störungen der einzelnen Netze nicht direkt miteinander verglichen werden, weil die Netze nicht alle gleiche Längen haben und auch die einzelnen Leitungen ganz verschieden lang sind. Rechnet man aber die Störungen

der einzelnen Netze auf eine einheitliche Netzlänge, z. B. auf 100 km um, so kann ein Vergleich als genügend genau angesehen werden, besonders da alle Netze eine gleichwertige Isolation aufweisen und für den Vergleich der Mittelwerte eine verhältnismässig lange Zeitperiode benützt wird. Diese Umrechnung ist in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Bezeichnung der Netze	Netzlänge km	Zahl der Störungen der 7 jährl. Periode im Mittel	
		eff.	auf 100 km umgerechnet
Mattenbach mit Löschspule	230	12,7	5,5
Rüti ohne »	178	8,72	4,9
Eglisau » »	156	12,6	8,1
Seebach » »	150	9,85	6,6
Aathal » »	114	10,3	9,0

Aus dieser Zusammenstellung ist ersichtlich, dass die Löschspule im Netz Mattenbach offenbar keine wesentliche Betriebsverbesserung brachte. Es taucht deshalb die Frage auf, von welcher Spannung an in einem Netz von bestimmter Grösse, d. h. mit andern Worten, von welcher Erdschlussstromstärke an der Löschspule eine Bedeutung zukommt.

Ausserdem möchte ich noch auf einen andern wichtigen Punkt aufmerksam machen. Der Herr Referent empfiehlt den Einbau der Löschspulen hauptsächlich, um den Betrieb störungsfreier zu gestalten. Durch die Herabsetzung des Erdschlussstromes wird aber auch die Gefährdung von Personen und Tieren bei der Erdschlussstelle bedeutend vermindert. Treten bei einem Erdschluss grosse Ströme auf, so entstehen auch dann, wenn der Erdübergangswiderstand bei der Erdschlussstelle nur wenige Ohm beträgt, doch verhältnismässig grosse Berührungs- und unter Umständen grosse Schrittspannungen. Wird der Erdschlussstrom herabgesetzt, so wird auch die bei der Fehlerstelle entsprechende Spannung kleiner. Wenn dabei auch nicht jede Gefahr vermieden wird, so wird sie doch wesentlich vermindert.

Ganz besonders spielt die Herabsetzung des Erdschlussstromes beim Uebertritt von Hochspannung auf Niederspannung, z. B. bei einem Drahtbruch in einer Kreuzungsstelle, eine besondere Rolle. Es ist nämlich nicht möglich, in einem Niederspannungsnetz einen wirksamen Schutz gegen solche Ereignisse durchzuführen, wenn der Erdschlussstrom eine gewisse Grösse überschreitet. Für die Ermittlung des maximal zulässigen Erdschlussstromes muss man unterscheiden, ob in den Hausinstallationen des betreffenden Niederspannungsnetzes die Nullung oder ein anderes Schutzsystem angewendet wird. Wird die Nullung angewendet, so ist der Nulleiter im Netz nachgeführt und an verschiedenen Stellen geerdet. Da aber alle Gehäuse der Anschlussobjekte mit dem Nulleiter verbunden sind, so muss dafür gesorgt werden, dass zwischen Nulleiter und Erde keine gefährliche Spannung auftritt. Die Starkstromverordnung schreibt vor, dass diese Spannung nicht mehr als 50 Volt betragen oder dann nur wenige Sekunden lang bestehen bleiben dürfe. Weil ein Erdschluss aber längere Zeit bestehen bleiben kann, muss offenbar dafür gesorgt werden, dass die Spannung Nulleiter-Erde nicht mehr als 50 Volt beträgt. Da der Nulleiter an verschiedenen Punkten geerdet werden muss, so kann angenommen werden, dass der in Frage kommende Erdwiderstand im allgemeinen nicht gross sein wird. Die Erfahrungen, die die EKZ bis jetzt gemacht haben, zeigen, dass es in den meisten Fällen möglich ist, den Erdwiderstand der Nulleitererdung auf unter 3 Ohm zu halten. Nimmt man nun 3 Ohm als Grenzwert an, so darf der Erdschlussstrom nicht mehr als 17 A betragen, damit zwischen Nulleiter und Erde keine grössere Spannung als 50 Volt entsteht.

Wird in der Hausinstallation nicht die Nullung, sondern ein anderes Schutzsystem angewendet, so spielt die Spannung zwischen Netznullpunkt und Erde nicht mehr die gleiche Rolle wie bei Anwendung der Nullung. Es kommt in solchen Fällen nur darauf an, dass zwischen den Polleitern und der Erde keine so hohe Spannung auftritt, dass die Isolation in der Hausinstallation gefährdet wird. Diese Spannung wird

nun allerdings wiederum durch die zwischen Nullpunkt und Erde herrschende Spannung beeinflusst. Nimmt man in einem Drehstromnetz z. B. an, dass die Spannung zwischen den Polleitern und der Erde nicht mehr als die verkettete Netzspannung betragen dürfe (entsprechend den Verhältnissen, die bei einem Erdschluss im Niederspannungsnetz entstehen), so ist die maximal zulässige Spannung zwischen Nulleiter und Erde gegeben. Im ungünstigsten Fall ist nämlich die Spannung eines Polleiters gegen Erde gleich der Phasenspannung plus der Spannung Nulleiter-Erde. Die zulässige Spannung Nulleiter-Erde U_z ist also gleich der verketteten Spannung minus der Phasenspannung, und da die verkettete Spannung gleich $\sqrt{3}$ mal der Phasenspannung U ist, so ist

$$U_z = \sqrt{3} U - U = U(\sqrt{3} - 1) = 0,73 U.$$

Da in solchen Netzen sehr oft der Nulleiter nicht nachgezogen ist, ist in vielen Fällen nur der Transformatornullpunkt geerdet. Dementsprechend ist auch der Erdwiderstand dieser Erdung in der Regel verhältnismässig hoch. Wird in den Hausinstallationen die «Erdung» als Schutzsystem angewendet, so darf ausserdem der Widerstand der Nullpunktserdung einen gewissen Widerstand nicht unterschreiten. Andererseits bestimmt die Starkstromverordnung, dass dieser Widerstand nicht mehr als 20 Ohm aufweisen dürfe. Rechnet man mit diesem maximal zulässigen Widerstand und nimmt man z. B. ein Drehstromnetz von 500 Volt verketteter Spannung an und soll die Spannung der Polleiter gegen Erde nicht mehr als 500 Volt betragen, so darf der Erdschlussstrom zwischen Nullpunkt und Erde keine grössere Spannung als 73 % von 290 Volt $\cong$ 210 Volt erzeugen. Bei 20 Ohm Erdwiderstand dürfte der Erdschlussstrom also nicht mehr als rund 10 A betragen. Diese Rechnung stimmt aber nur dann, wenn im Ortstransformator eine andere als die Stern/Stern-Schaltung angewendet wird. Bei der Stern/Stern-Schaltung werden die Verhältnisse anders und sie müssen in jedem einzelnen Fall besonders bestimmt werden. Auf solche Sonderfälle will ich aber nicht näher eingehen. Ich wollte nur zeigen, welche Bedeutung der Anwendung von Löschspulen auch mit Rücksicht auf den Überspannungsschutz in Niederspannungsnetzen zukommt.

Zum Schlusse möchte ich noch kurz auf folgendes hinweisen. Der Herr Referent empfiehlt die Anwendung von Erdschlussanzeige-Relais, um rasch und auf möglichst einfache Weise die kranke Leitung herauszufinden. Solche Relais werden in vermaschten Netzen sicher sehr gute Dienste leisten. In Netzen mit offenen Leitungen kann man allerdings, wenn die Schaltanlage des Speisepunktes entsprechend eingerichtet ist, solche fehlerhafte Leitungen auch ohne Erdschlussanzeige-Relais und ohne Betriebsunterbrechungen auffinden. Es wird sich in solchen Fällen kaum lohnen, nur wegen einer gewissen Vereinfachung beim Aufsuchen der erdgeschlossenen Leitung solche Relais einzubauen, besonders wenn man bedenkt, dass die Zahl der bleibenden Erdschlüsse doch verhältnismässig klein ist. Die Störungsstatistik der EKZ über die 8 kV-Netze zeigt, dass im Laufe eines Jahres nicht mehr als eine solche Störung pro Leitung vorkommt; so sind z. B. im abgelaufenen Rechnungsjahr in allen unsern Netzen zusammen 37 Erdschlüsse aufgetreten, die sich auf 46 einzelne Leitungen verteilen. Wünschenswert wäre dagegen eine einfache Fehlerortsbestimmung; denn bei langen und verzweigten Leitungen ist das Aufsuchen des Erdschlusses manchmal sehr zeitraubend. Da aber ein Erdschluss, auch wenn der Erdschlussstrom klein ist, unter Umständen doch gewisse Gefahren in sich birgt, so hat ein rasches Auffinden der Erdschlussstelle eine grosse Bedeutung.

M. Ch. Jean-Richard, Forces Motrices Bernoises S. A., Berne: Les Forces Motrices Bernoises S. A. à Berne se sont occupées elles aussi de la mise à la terre aux réseaux haute tension. Nous avons posé et résolu, voici quatre ans, le problème à savoir comment on peut déterminer d'avance et sans inconvénient pour le réseau la puissance nominale d'une bobine d'extinction.

Vous avez compris d'emblée pourquoi nous avons posé le problème de cette façon. D'abord le calcul est compliqué: il faudrait connaître la disposition exacte des conducteurs

par rapport à la terre et par rapport l'un à l'autre. Tantôt il y a plus d'une ligne par poteau, tantôt la ligne suit une pente, traverse une forêt, chemine à travers champ. Le blé peut être haut, la forêt peut avoir poussé.

Puis les transformateurs présentent d'autres inconnues: il y a les petits transformateurs, il y en a qui sont bien plus puissants.

Donc, nous avons dit: mesurons! Seulement une objection se présente. Il faudra mesurer sans gêner l'exploitation. Nous n'admettrons pas de mise à la terre directe, nous chercherons à comprendre dans notre essai le réseau dans toute son étendue.

Voici la manière dont nous avons procédé, soutenus par la maison Brown, Boveri.

Nous avons pris un transformateur étoile/étoile 8000 kVA, 16/45 kV, nous en avons déterminé son impédance neutre, soit env. 100 ohms à 50 pér./s. Nous l'avons branché sur le réseau 45 kV comme d'habitude et avons appliqué entre le point neutre du côté haute tension et la terre un transformateur monophasé 50 kVA, 16/4 kV. La tension secondaire en a été réglée à volonté entre 0 et 3000 volts env.

Le courant et la tension de ce transformateur ont été oscillographiés.

Après quelques calculs sur la base de ces prises oscillographiques, calculs que je passe sous silence pour le moment, voici le résultat final:

Il nous faudrait des bobines d'extinction de 1720 kVA pour la compensation exacte et de 2300 kVA en tenant compte, ô souvenir lointain, d'une extension éventuelle du réseau.

La nature infiniment généreuse, même en pareille circonstance, nous a donné à l'occasion de ces essais un résultat inattendu: Nous avons vu que la manière dont ces essais ont été agencés permet d'établir plus exactement la puissance nominale d'une bobine d'extinction que la mise à la terre directe; cela tient à l'influence des transformateurs.

En outre les Forces Motrices Bernoises ont installé dans l'une de leurs centrales sur quelques départs 16 kV des relais des Ateliers de Construction Oerlikon destinés à signaler une mise à la terre par départ. Tout d'abord lors d'une mise à la terre sur n'importe quel départ, des relais à minimum de tension branchés sur les barres omnibus des départs signalent le fait qu'il y a quelque part une mise à la terre. A ce signal on intercale dans cette centrale entre le point neutre d'un des générateurs qui alimentent ces départs et la terre une résistance de 200 ohms. Ainsi le circuit est fermé entre le départ avarié, la mise à la terre, cette résistance auxiliaire et le générateur. Les trois phases de chaque départ sont munies de transformateurs d'intensité avec retour commun du côté secondaire. Ce retour commun devient à ce moment le siège d'un courant qui sert à actionner un relais à maximum de courant, dont le voyant signale en tombant le départ avarié. Ce résultat obtenu, la résistance de 200 ohms est déclenchée, de toute façon après quelques secondes au plus. Le déclenchement du départ avarié se fait à la main au moment opportun.

Nordostschweiz. Kraftwerke A.-G., Baden (NOK) (*schriftlicher Beitrag*, nachträglich eingegangen): Die starke Entwicklung des Energiekonsums in den Kriegs- und Nachkriegsjahren zwang viele Unternehmungen zu einem raschen Ausbau der Verteilungsanlagen. Der Ausbau geschah nicht bloss in der Erstellung weiterer Leitungen für die Hauptverteilung, sondern auch durch den Ersatz bisheriger Energietransporte niedrigerer Spannung durch solche mit erhöhter Spannung. Bei den NOK wurde hierbei die ursprüngliche Hauptverteilspannung von 25 kV immer mehr verlassen und an deren Stelle wurden Verteilungsanlagen mit ca. 50 kV Betriebsspannung in Betrieb genommen.

Die so rasch anwachsenden Verteilungsanlagen in 50 kV zeigten dann aber bald Erdschlussströme, welche zu betrieblichen Schwierigkeiten führten. Als Petersen (dazumal in Darmstadt) die bekannten Abhandlungen über die Erdschlussprobleme veröffentlichte und Mittel zur Bekämpfung der schädlichen Wirkungen der Erdschlussströme angab, schenken die NOK dieser Angelegenheit sofort volle Aufmerksamkeit, was dazu führte, dass bereits anfangs Januar 1919 eine

erste Erdschluss-Kompensationsanlage bei der Firma Emil Haefely & Co., A.-G., in Basel, welche die Patent-Lizenz für die Ausführung der Petersen-Erdschlußspule erwarb, in Auftrag gegeben wurde.

Verschiedene Umstände gaben dazumals Veranlassung, vom Anschluss der Löschspulen an die Nullpunkte der Netz-Transformatoren abzusehen und dafür besondere 50 kV-Nullpunkt-Apparate zu verwenden. Nachdem auf Grund der im Sommer 1919 durchgeführten Versuche noch einige Aenderungen vorgenommen worden waren, erfolgte im Herbst des gleichen Jahres die Inbetriebnahme der Erdschlusskompensationsanlage, welche im Hauptnetzpunkt Töss aufgestellt worden war. Die weiter ansteigende Länge des 50 kV-Netzes führte schon ein Jahr später zur Aufstellung einer zweiten Drosselspule, womit nun zwei Erdschlussdrosselspulen von je 1680 kVA, 28 kV und umschaltbar für 45/50/55/60 A Erdschlußstrom bei 50 Per./s im Betriebe waren.

Aus betriebs- und schalttechnischen Gründen erfolgte im Jahre 1925 eine Aufteilung der Erdschlusskompensationsanlage im Sinne einer Dezentralisation, wobei ein besonderer Nullpunktapparat samt vorhandener Drosselspule im Netzpunkt Beznau zur Aufstellung kam.

Ein Rückblick auf die 16jährige Betriebszeit mit Erdschlusskompensationseinrichtung lässt die Zweckmässigkeit einer solchen Anlage klar hervortreten. In der folgenden Zusammenstellung sind für die Jahre 1920 bis 1934 die Zahl der insgesamt aufgetretenen Erdschlüsse aufgeführt, ferner die Vorkommnisse mit Erdschlüssen, bei denen überhaupt keine Betriebsstörung auftrat, bei denen also die Energie-lieferung keine Beeinträchtigung erfuhr.

Jahr	Anzahl der Erdschlüsse aus eigenen und fremden, parallel geschalteten Anlagen	Hievon führten zu keiner Betriebsstörung	Längste Dauer eines Erdschlusses während welcher der Betrieb normal weitergeführt wurde min
1920	120	97	21
1921	164	125	24
1922	105	86	20
1923	44 ¹⁾	30	23
1924	98	66	23
1925	70	49	23
1926	80	58	26
1927	100	64	17
1928	140	100	12
1929	158	106	15
1930	172	120	16
1931	90	60	26
1932	81	62	13
1933	71	60	14
1934	58	47	7

¹⁾ gewitterarmes Jahr.

Aus der Zusammenstellung kann entnommen werden, dass bei etwa 70 bis 80 % aller Erdschlüsse sich keine weiteren Betriebsunregelmässigkeiten ausgebildet haben. In den übrigen Fällen war die Art der Betriebsstörungen meistens so, dass gleichzeitig mit dem Erdschluss auch Kurzschluss auftreten musste.

Die letzte Kolonne der Aufstellung enthält für jedes Jahr die längste Zeitdauer, die ein Erdschluss aufwies und während welcher Zeit jeweils der Betrieb normal weitergeführt wurde. In einem ausgedehnten Netze kann die Auffindung von Dauer-Erdschlüssen sehr zeitraubend werden. Einrichtungen, welche eine rasche Erkennung des fehlerhaften Netz-teiles gestatten, wären daher sehr zweckmässig. Voraussetzung für den Einbau solcher Einrichtungen ist natürlich, dass deren Angaben zuverlässig sind.

Nach unseren Erfahrungen ist der Einbau von Erdschluss-Löschspulen ganz allgemein sehr empfehlenswert, soweit es sich um ausgedehnte Netze mit erheblichem Erdschlußstrom handelt. Das Kriterium für die Frage des Einbaues liegt u. E. wohl weniger bei der Spannungshöhe, als fast ausschliesslich in der Höhe des Erdschlußstromes.

Herr Dr. A. Roth, Sprecher & Schuh A.-G., Aarau (schriftlicher Beitrag, nachträglich eingegangen): Die in

jedem Falle zweckmässigste Auslegung des Schutzes gegen die Folgen der Erdschlüsse ergibt sich aus den Eigenschaften der verschiedenen Schutzmittel. Diese Eigenschaften lassen sich leicht erkennen, wenn man sich die verschiedenen Wirkungen des Erdschlusses vergegenwärtigt, nämlich:

1. *Gefahr durch den Erdschlußstrom an der Erdschlussstelle und ihrer Umgebung* (Gefahr für Lebewesen infolge Spannungsgefälles im Erdboden, Zerstörung von Material infolge Lichtbogens).

2. *Relais-Frage*, d. h. Wünschbarkeit der sofortigen Abtrennung des mit Erdschluss behafteten Leitungsstückes, Möglichkeit, diese Abtrennung mit den ohnehin schon vorhandenen Ueberstrom-Relais vorzunehmen, Einbau besonderer Erdschluss-Relais oder Erdschlussanzeiger.

3. *Löschung des Lichtbogens* am Erdschlussort, Wünschbarkeit oder Notwendigkeit derselben.

4. *Unterdrückung der Ueberspannungen des aussetzenden Erdschlusses*.

In Europa führten sich hauptsächlich drei Mittel als Erdschlußschutz ein: Löschspulen, direkte Nullpunktserdung und Nullpunktserdung über niederohmige Reaktanzspulen.

Die *Löschspule* unterdrückt die Gefahr am Erdschlussort in möglichst vollkommener Weise, indem sie den Erdschlussstrom selbst auf verhältnismässig kleine Beträge heruntersetzt. Allerdings ist dazu nötig, dass die Abstimmung der Löschspule dem jeweiligen Betriebszustande entspricht, was sich durch Organisation des Betriebes und besondere automatische oder halbautomatische Vorrichtungen erreichen lässt. Die Relais-Frage wird durch die Verwendung von Löschspulen komplizierter; besondere Relais oder Erdschluss-Anzeigevorrichtungen werden nötig. Die Löschspule bewirkt bei richtiger Abstimmung die Löschung des Erdschlusslichtbogens und unterdrückt die Ueberspannungen des aussetzenden Erdschlusses.

Die *direkte Nullpunktserdung* erhöht einerseits die Gefahr am Erdschlussort, indem sie den Erdschlußstrom auf ein Vielfaches erhöht, anderseits vermindert sie die Gefahr dadurch, dass sie bei richtiger Disposition die normalen Ueberstromrelais zum Ansprechen bringt und so automatisch das Abschalten des defekten Leitungsstückes bewirkt. Sie darf also nur in Netzen verwendet werden, bei welchen die Gefährdung am Erdschlussort verhältnismässig klein ist, d. h. in Netzen mit nicht zu grossen Kurzschlußströmen (Höchstspannungsnetze) und mit sorgfältig geerdeten Isolatorenstützen, vor allem also für Netze auf Eisenmasten mit Erdseil. Unbedingt zu verwerfen ist sie in Netzen mit Holzmasten, es sei denn, dass auch dort die Isolatorenstützen über ein Erdseil geerdet wären, da sie bei Erdschluss die Phasenlage des Netzes aufrechtzuerhalten sucht und so zu Stangenbränden führen kann. Die Löschung des Lichtbogens vermag die direkte Nullpunktserdung natürlich nicht zu bewirken; dagegen unterdrückt sie die Ueberspannungen des aussetzenden Erdschlusses.

Die Erdung über *niederohmige Reaktanzspulen*, welche so dimensioniert sind, dass an der Erdschlußstelle ein Strom auftritt, welcher den normalen Betriebsstrom überschreitet, aber nur einen Bruchteil des Kurzschlußstromes der Anlage beträgt (nach Fallou), besitzt ähnliche Eigenschaften wie die direkte Nullpunktserdung, bietet aber dieser gegenüber den Vorteil, dass die auftretenden Ströme bedeutend kleiner sind als die Kurzschlußströme. Sie erlaubt so Fälle zu beherrschen, für welche die direkte Nullpunktserdung nicht mehr zulässig ist, wie z. B. Kabelnetze. Auch sie darf nur in Netzen angewendet werden, welche verhältnismässig gute Erdung von Isolatorenstützen usw. besitzen. Sie löst die Relais-Frage in einfacher Weise, bewirkt aber nicht die Löschung des Erdschlussbogens. Auch diese Schutzart eignet sich nicht für Netze mit Holzmasten.

Aus den Eigenschaften der drei Schutzmittel ergibt sich eine erste Ausscheidung für jede *Netzart*:

Netze hoher Spannung, über 80 kV, mit ihren verhältnismässig kleinen Kurzschlußströmen (einige 1000 A) können mit direkter Nullpunktserdung geschützt werden, sofern die Isolatorenträger sorgfältig geerdet sind. Niederohmige Nullpunkts-Reaktanzen dürften sich hier erübrigen, da die Kurzschlußströme nicht so grosse Werte erreichen. Löschspulen

bieten in solchen Anlagen der Nullpunktserdung gegenüber den Vorteil, vorübergehende Erdschlüsse, die hauptsächlich infolge von Blitzschlägen auftreten, zu löschen und so die Zahl der Betriebsunterbrechungen herunterzusetzen. Dagegen verursachen sie zusätzliche Kosten für die Spulen selbst und für besondere Relais oder Erdschlussanzeigevorrichtungen. Freileitungsnetze niedriger Spannung werden zweckmässig mit Löschspulen geschützt, da dort die Kurzschlußströme grössere Beträge annehmen. Wenn sie auf Holzmasten verlegt sind, dürfte wohl nur die Löschspule in Betracht kommen, da Nullpunktserdung direkt oder über Reaktanzen aus den angeführten Gründen nicht zu empfehlen ist.

Bei Netzen von Spannungen der Grössenordnung von 8 kV wird sich ein Schutzmittel überhaupt erübrigen in den Fällen, wo die Erdschlußströme verhältnismässig klein sind, d. h. in Netzen kleiner Ausdehnung. Diese Netze besitzen meist einen so hohen Sicherheitsgrad, dass die Ueberspannungen des aussetzenden Erdschlusses (höchstens 2,6 fache verkettete Spannung) dem Netze kaum mehr gefährlich werden dürften. Eine besondere Betrachtung verlangen Kabelnetze aller Spannungen, indem dort Erdschlüsse meistens Materialfehler sind und die defekte Strecke also raschestens ausgeschaltet werden sollte. Aus diesem Grunde dürfte eine Nullpunktserdung, welche Ueberstromrelais zum Ansprechen bringt, vorzuziehen sein. Direkte Nullpunktserdung ist wegen der auftretenden grossen Ströme am Erdschlussort gefährlich; es dürfte aus diesem Grunde die Nullpunktserdung über niederohmige Reaktanzen, die z. B. im gesamten 60 kV-Kabelnetz der Pariser Gegend angewendet wird, vorzuziehen sein.

Die besondern Verhältnisse betreffend Isolation, wünschbare Betriebssicherheit, aufzuwendende Kosten usw. werden den Entscheid des Erbauers auch in den oben aufgezählten Fällen im einen oder andern Sinne beeinflussen, immer unter Berücksichtigung der aufgezählten Eigenschaften der verschiedenen Schutzmittel.

Der Referent, Herr A. van Gastel, A.-G. Brown, Boveri, Baden, antwortet auf die verschiedenen Voten folgendes:

Mit Rücksicht auf die vorgerückte Zeit werde ich nur kurz zu einigen der von den Herren Diskussionsrednern angeschnittenen Problemen Stellung nehmen.

Ich kann es nur bedauern, dass Herr Dr. Goldstein die Frage der Verstimmung der Löschspule erwähnt hat, denn diese Frage wurde in der Fachliteratur wiederholt und aus-

föhrlich behandelt. Die Praxis hat gezeigt, dass in Netzen mit kapazitiver Unsymmetrie die Nullpunktsverlagerung durch eine noch zulässige Verstimmung der Löschspule wirksam bekämpft werden kann. Ich gehe darin mit Herrn Dr. Goldstein einig, dass die Resonanzabstimmung die günstigsten Löschbedingungen für den Erdschlusslichtbogen schafft, möchte aber andererseits hervorheben, dass kaum ein Betriebsleiter zu finden ist, welcher sein Netz dauernd mit grosser Nullpunktsverlagerung in Betrieb halten wird.

Selbstverständlich werden durch die Löschspulen nur die Oberwellen im Erdschlußstrom kompensiert, die von der unsymmetrischen, kapazitiven Erdschlussbelastung im nicht kompensierten Netz herrühren, so z. B. die 3., die 5. Oberwelle usw. Weil die dritte Oberwelle, herrührend von der Sättigung der Transformatoren nur in der Phasenspannung und praktisch nicht in der verketteten Spannung vorkommt, enthält der Erdschlußstrom des kompensierten, symmetrisch belasteten Netzes nur ganz wenig dritte Oberwelle. Die 5. und die höheren Sättigungsoberwellen werden zu einem geringen Teil von der Löschspule kompensiert, die 5. um etwa 4 %, die 7. um etwa 2 %. Nur ganz selten bedarf es einer zusätzlichen Einrichtung zur Kompensation dieser Oberwellen.

Die von Herrn Wettstein gestellte Frage, von welcher Spannung an man Löschspulen verwenden soll, sollte meines Erachtens lauten, von welchem Erdschlußstrom an soll man Löschspulen verwenden. Es ist vielmehr die Grösse des Stromes als diejenige der Spannung für die Löschung des Erdschlusslichtbogens von ausschlaggebender Bedeutung. Die Erfahrung hat gezeigt, dass manchmal bereits bei Erdschlussströmen von nur einigen Ampère sich der Einbau von Löschspulen rechtfertigt.

Aus an und für sich sehr interessanten Vergleichszahlen der in verschiedenen Netzen der EKZ aufgetretenen Störungen mit und ohne Löschspulen darf nicht ohne weiteres ein Rückschluss auf die Wirksamkeit der Löschspule gezogen werden, insofern keine Gewähr vorhanden ist, dass die verschiedenen Netze absolut gleiche Störowahrscheinlichkeit haben. Vielmehr sollte die Verbesserung der Betriebsverhältnisse auf Grund von gesammelten Erfahrungen im gleichen Netz, einmal vor und einmal nach Einbau der Löschspulen, beurteilt werden.

Der Vorsitzende dankt alle Diskussionsbeiträge aufs beste.

Die numerische Berechnung der Zustandsänderungen von Freileitungen.

Von Karl Grütter, Samaden.

621.315.056

Es wird auf eine recht einfache Methode zur Lösung der Zustandsgleichung von Freileitungen hingewiesen, welche in manchen Fällen mit verhältnismässig wenig Rechenarbeit zum Ziele führt.

L'auteur expose une méthode très simple pour la solution de l'équation fondamentale simplifiée des lignes aériennes, laquelle permet dans bien des cas d'arriver au but avec relativement peu d'opérations.

In seinem Aufsatz «Die Berechnung der Freileitungen mit Rücksicht auf die mechanischen Verhältnisse der Leiter»¹⁾ empfiehlt Maurer, die Lösung der kubischen Zustandsgleichung

$$p^3 + p^2 \left\{ \frac{\gamma_0^2 a^2 E}{24 p_0^2} + (t - t_0) \alpha E - p_0 \right\} = \frac{\gamma^2 a^2 E}{24} \quad (1)$$

durch ein zum Teil graphisches Verfahren vorzunehmen.

Nun lässt sich die Lösung dieser Gleichung auf eine so einfache Form bringen, dass sie eventuell mit Hilfe einer Tabelle hyperbolischer Funktionen, die z. B. in der «Hütte» zu finden ist, sehr rasch durchgeführt werden kann und oft weniger Rechenarbeit erfordert als das Verfahren nach Maurer.

¹⁾ Bull. SEV 1936, Nr. 2 (und 3).

Zur Abkürzung setzt man:

$$\frac{\gamma_0^2 a^2 E}{24 p_0^2} + (t - t_0) \alpha E - p_0 = m \quad (2)$$

$$\frac{\gamma^2 a^2 E}{24} = n \quad (3)$$

Dann hat die Zustandsgleichung die Form

$$p^3 + m p^2 = n \quad (4)$$

Durch die Substitution

$$p = x - \frac{1}{3} m \quad (5)$$

wird sie auf die Normalform gebracht