

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 26 (1935)
Heft: 5

Artikel: Beitrag zur Untersuchung von Normalspannungsnetzen in Bezug auf Fehlerströme und Berührungsspannungen beim Auftreten von Erdschlüssen
Autor: Ludwig, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060296>

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: 03.04.2025

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

ges Schalten, kleinste Schaltzeiten usw. in sich vereinigt. Zur Entwicklung dieses Prinzips bedurfte

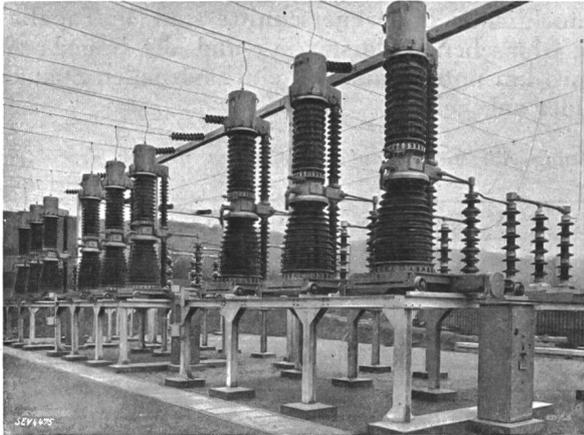


Fig. 9.
Schaltanlage Chèvres des E. W. Genf mit
135-kV-Konvektorschaltern.

es mehrerer tausend Abschaltungen, von denen jede einzelne sorgfältig ausgewertet und gedeutet

werden musste. Dazu kommen noch sehr viele Versuche, die Vergleichsergebnisse mit andern Schaltsystemen liefern mussten. Bis heute wurden trotz der verhältnismässig kurzen Zeit seit der Fabrikationsaufnahme über 100 Schalterpole bis zu den höchsten Spannungen ausgeführt. Die Schaltanlage des Kraftwerkes Chandoline der S. A. La Dixence wurde als erste mit 64- und 135-kV-Konvektorschaltern in Betrieb genommen. Gleichzeitig erfolgte auch die Inbetriebsetzung von Konvektorschaltern im Kraftwerk Bois Noir des E. W. Lausanne und in der Schaltanlage Chèvres des E. W. Genf (Fig. 9), wozu nächstens 3 weitere dreipolige Gruppen zur Aufstellung gelangen.

In Netzbetrieben werden die Abschaltungen durch den günstigen Einfluss der Parallelbelastung und der verhältnismässig kleinen auftretenden Eigenfrequenz der Stromkreise gegenüber den Beanspruchungen im Prüffeld stark erleichtert. Die Konvektorschalter wurden für einen Frequenzbereich entwickelt, der in den Anlagen nicht auftritt. Dies bedeutet für den praktischen Betrieb die Einführung eines weiteren Sicherheitsfaktors.

Beitrag zur Untersuchung von Normalspannungsnetzen in Bezug auf Fehlerströme und Berührungsspannungen beim Auftreten von Erdschlüssen.

Von H. Ludwig, Bern.

621.316.99

Beim Auftreten von Erdschlüssen in Normalspannungsnetzen können unter gewissen Bedingungen gefährliche Berührungsspannungen zwischen Erde und genullten Apparategehäusen usw. entstehen und unter Umständen zu Unfällen führen, wenn die Erdungsanlage des betreffenden Netzes nicht vorschriftsgemäss erstellt ist. Der Betriebstechniker muss deshalb in der Lage sein, sowohl neu zu erstellende als auch im Betriebe befindliche Netze in bezug auf die beim Auftreten von Erdschlüssen entstehenden Fehlerströme und Berührungsspannungen rasch und einwandfrei dimensionieren, bzw. nachprüfen zu können.

Nachstehend wird ein einfaches Rechnungsverfahren zur Lösung der Aufgabe angegeben, welches genaue Resultate liefert und sich auf alle praktisch vorkommenden Fälle anwenden lässt. Sodann wird ein Modell beschrieben, in welchem alle Netzdaten durch veränderliche Widerstände eingestellt und die beim Einleiten eines Erdschlusses auftretenden Fehlerströme und Berührungsspannungen an eingebauten Messinstrumenten abgelesen werden können. Zum Schluss folgen noch einige praktische Winke für die Durchführung von Erdwiderstandsmessungen und deren Verwertung bei der Bestimmung der Fehlerströme und Berührungsspannungen.

Zur Verhütung von Unfällen in Niederspannungsnetzen schreibt die «Verordnung über die Erstellung, den Betrieb und den Unterhalt von elektrischen Starkstromanlagen» vom 7. Juli 1933 in Art. 26 vor, dass beim Auftreten von Erdschlüssen keine Spannungen über 50 Volt gegenüber Erde an genullten, der Berührung ausgesetzten Apparategehäusen, Metallumhüllungen von Leitern und dergleichen auftreten, bzw. länger als einige Sekunden bestehen dürfen.

Als geeignete Schutzmassnahme zur Vermeidung gefährlicher Potentialdifferenzen zwischen Nulleiter und Erde dient in erster Linie die direkte Er-

Lors des pertes à la terre dans les réseaux à tension normalisée, des tensions dangereuses sous certaines conditions peuvent prendre naissance entre la terre et des carcasses d'appareils, etc., mises à la terre par le neutre, tensions qui peuvent occasionnellement être la cause d'accidents, si la mise à la terre du réseau en question n'est pas conforme aux prescriptions. L'exploitant doit donc être à même de dimensionner correctement et de contrôler rapidement aussi bien les réseaux neufs que ceux en service en vue de limiter les courants de fuite et les tensions dangereuses lors de mises à la terre.

Dans ce but, l'auteur expose une méthode de calcul simple qui donne des résultats exacts et s'applique à tous les cas pouvant se présenter en pratique. Il décrit ensuite un fantôme sur lequel on peut reproduire à l'aide de résistances variables toutes les caractéristiques d'un réseau et lire sur des instruments les courants de fuite et tensions dangereuses qui se produisent lors d'une perte à la terre. L'article se termine par quelques conseils pratiques pour la mesure de la résistance des terres et pour le calcul des courants de fuite et des tensions dangereuses à l'aide de ces valeurs.

dung des Systemnullpunktes der Wechselstrom-Niederspannungsanlagen. Ausserdem sind in den Hausinstallationen die nicht stromführenden Metallteile von Apparaten und Metallumhüllungen von Leitungen, soweit für diese besondere Schutzmassnahmen vorgeschrieben sind, an den geerdeten Nulleiter anzuschliessen («Nullung»). Da zwischen fehlerhaften genullten Objekten und der Erde immerhin gewisse Spannungen auftreten, welche dem Menschen und Tieren gefährliche Werte annehmen können, so sind gemäss Erläuterung zu Ziffer 4 Art. 26 die Verhältnisse der so auftretenden Spannungen und Kurzschlußströme sowie deren Dauer

bei Defekten bis zur selbsttätigen Abschaltung für jedes Netz mit Nullung sorgfältig zu untersuchen und abzuspannen.

Zur Feststellung, ob ein Normalspannungsnetz den gestellten Anforderungen in bezug auf zulässige Berührungsspannungen bzw. Fehlerstromstärken entspricht, kommen folgende Methoden in Betracht:

1. Berechnung der auftretenden Fehlerströme und Berührungsspannungen auf Grund der Netzkonstanten unter Annahme eines Erdschlusses in einem bestimmten Netzpunkte.

Diese Methode setzt die Kenntnis der Netzkonstanten voraus, wobei die Leiterquerschnitte und -längen aus einem Situationsplan entnommen werden können, während die Widerstände der Erdungsstellen auf Grund von zuverlässigen Messungen bekannt sein müssen.

Von den rein rechnerischen Verfahren sind die bekannten Methoden, z. B. mit Determinanten, zu umständlich und unübersichtlich, während die abgekürzten oder Näherungsverfahren in vielen Fällen zu wenig genaue Resultate liefern und keinen genügenden Einblick in die wirklichen Verhältnisse der Strom- und Spannungsverteilung gestatten.

Im folgenden wird ein Verfahren angegeben und an einem Beispiel erläutert, das auf dem Gesetz der widerstandstreuen Umgestaltung (Transfiguration und Rücktransfiguration) des Netzes beruht und gestattet, mit einfachen Formeln die Strom- und Spannungsverteilung bei beliebig vielen parallelen Erdwiderständen in offenen und geschlossenen Leitungsnetzen zu berechnen.

Beim Auftreten eines Schlusses zwischen einem Phasenleiter und dem Nulleiter tritt in dem betroffenen Leitungsstrang ein Fehlerstrom auf, dessen Grösse einerseits von der an der betreffenden Transformatorenphase herrschenden Klemmenspannung und andererseits von dem resultierenden Netz-widerstand abhängig ist. Um den durch den Kurzschlußstrom verursachten Spannungsabfall im Transformator erfassen zu können, wird die Kurzschlussimpedanz nach der Formel

$$z_k = \frac{U_v^2 \cdot E_k}{P \cdot 10^5} \text{ Ohm}$$

berechnet, wo

U_v die verkettete Leerlaufspannung in Volt,
 E_k die Kurzschlußspannung des Transformators in % und
 P die Transformatorleistung in kVA

bedeuten. Wird die verkettete Leerlaufspannung des Transformators zu rund 400 Volt und die Kurzschlußspannung zu rund 5 % angenommen, so vereinfacht sich die Formel zu

$$z_k = \frac{400^2 \cdot 5}{P \cdot 10^5} = \frac{8}{P} \text{ Ohm}$$

Der resultierende Netz-widerstand setzt sich aus dem Widerstand des Phasenleiters (Hinleitung) und dem Widerstand des Nulleiters mit parallelgeschalteten Erdungswiderständen (Rückleitung)

zusammen, wobei für die Leitungen die Wechselstromwiderstände und für die Erdungen die Ohmschen Widerstände einzusetzen sind. Für die gebräuchlichen Leiterquerschnitte sind in Tabelle I die Ohmschen Widerstände r und die Impedanzen z pro km unter Annahme eines normalen Stangenbildes angegeben.

Leitungswiderstände und -impedanzen pro km Tracélänge. Tabelle I.

d =	3	4	5	6	7	8	mm Ø
r =	2,48	1,40	0,89	0,62	0,46	0,35	Ohm/km
z =	2,51	1,44	0,96	0,71	0,56	0,47	Ohm/km

Schliesslich ist für den Uebergangswiderstand an der Kurzschlußstelle sowie für Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Leitungswiderstände ein Sicherheitszuschlag zu machen, der auf Grund von Erfahrungswerten zu rund 10 % des Schleifenwiderstandes (Phasenleiter- plus Nulleiterimpedanz) angenommen werden kann. Es ist dann

$$r_k = 0,1 (z_p + z_o) \text{ Ohm}$$

Der auftretende Kurzschlußstrom ergibt sich somit aus der Formel

$$I_k = \frac{U_o}{z_k + z_p + r_k + R'} \text{ A, wo}$$

U_o die Leerlaufphasenspannung = 240 V,

z_k die Kurzschlussimpedanz des Transformators = $\frac{8}{P}$ Ohm,

z_p die Impedanz des Phasenleiters von der Transformatorstation bis zur Fehlerstelle,

r_k den Uebergangswiderstand = $0,1 (z_p + z_o)$ Ohm und

R' den aus Nulleiter und Erdwiderständen gebildeten Ersatzwiderstand

bedeuten. Während sich die Grössen z_k , z_p und r_k ohne weiteres aus den bekannten Netzdaten ermitteln lassen, bietet die Bestimmung von R' gewisse Schwierigkeiten, sofern der Nulleiter über mehr als zwei Widerstände geerdet ist.

An folgendem *Beispiel* soll gezeigt werden, wie sich die Grösse R' bei vier parallelen Erdwiderständen ermitteln lässt und welche Strom- und Spannungsverhältnisse sich dabei ergeben. Durch sinngemässe Anwendung des Verfahrens lassen sich ohne weiteres alle praktisch vorkommenden Fälle behandeln. Es sei ein einfaches Netz mit zwei of-

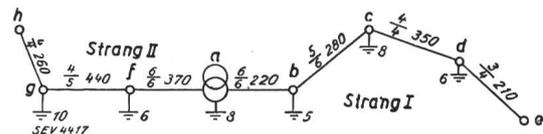


Fig. 1.

Örtlicher Netzplan.

a Transformator, 50 kVA, 380/220 V.

$\frac{5}{6} 280 = \frac{\text{Durchmesser des Phasenleiters in mm}}{\text{Durchmesser des Nulleiters in mm}} \cdot \frac{\text{Länge der Teilstrecke in m}}{\text{Zahl neben Erdung: Erdungswiderstand in Ohm.}}$

fenen Leitungssträngen auf die bei Erdschluss auftretenden Fehlerströme und Berührungsspannungen hin zu untersuchen, wobei das Verfahren nur für

einen Strang durchgeführt werden soll. Das Netz ist in Fig. 1 örtlich und in Fig. 2 schematisch dargestellt.

Die Leitungsimpedanzen ergeben sich auf Grund der eingetragenen Netzkonstanten nach Tabelle II.

Leitungsimpedanzen der Teilstrecken. Tabelle II.

Phasenleiter				Nulleiter			
Strecke	Länge km	Ω/km	$z_p \Omega$	Strecke	Länge km	Ω/km	$z_p \Omega$
a-b	0,22	0,71	0,16	a'-b'	0,22	0,71	0,16
b-c	0,28	0,96	0,26	b'-c'	0,28	0,71	0,20
c-d	0,35	1,44	0,50	c'-d'	0,35	1,44	0,50
d-e	0,21	2,51	0,52	d'-e'	0,21	1,44	0,30
a-f	0,37	0,71	0,26	a'-f'	0,37	0,71	0,26
f-g	0,44	1,44	0,63	f'-g'	0,44	0,96	0,42
g-h	0,26	1,44	0,37	g'-h'	0,26	1,44	0,37

Die Fehlerstelle liege im Netzpunkt e des Stranges I, und zwar bestehe dort ein *Phasenschluss an den Nulleiter*. Es ergibt sich für diesen Zustand das in Fig. 2 dargestellte schematische Netzbild, wobei die Erdungswiderstände des gesunden Netzstranges II die Nullpunktserdung im Netzpunkt a wie folgt beeinflussen:

$$10 + 0,42 = 10,42 \quad \left| \quad 3,8 + 0,26 = 4,06 \right.$$

$$\frac{10,42 \cdot 6}{16,42} = 3,8 \quad \left| \quad \frac{4,06 \cdot 8}{12,06} = 2,7 \text{ Ohm} \right.$$

Im Netzpunkt a ist somit dieser reduzierte Widerstand von 2,7 Ohm wirksam.

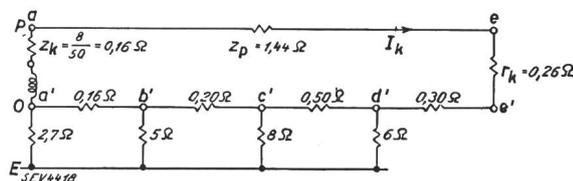


Fig. 2. Schematischer Netzplan.

Es stellt sich nun die Aufgabe, für das aus Nulleiter und Erdungswiderständen gebildete Leittersystem zwischen den Punkten a' und d' den resultierenden Ersatzwiderstand zu bestimmen, was am gewählten Beispiel gezeigt werden soll (Fig. 3a).

Durch Transfiguration werden die beiden Dreiecke a'-b'-E und c'-d'-E in den äquivalenten Sternwiderstand mit den neuen Knotenpunkten x und y

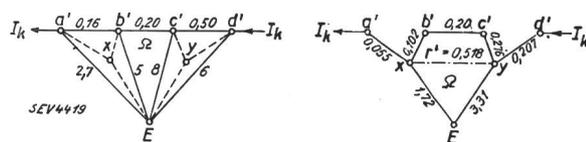


Fig. 3 a. Widerstandsbild vor der Transfiguration.

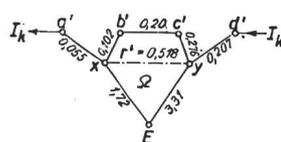


Fig. 3 b. Widerstandsbild nach der Transfiguration.

verwandelt, was durch folgende Gleichungen geschieht:

$$r_{a'x} = \frac{2,7 \cdot 0,16}{7,86} = 0,055 \Omega \quad r_{c'y} = \frac{8 \cdot 0,50}{14,50} = 0,276 \Omega$$

$$r_{b'x} = \frac{0,16 \cdot 5}{7,86} = 0,102 \Omega \quad r_{d'y} = \frac{0,50 \cdot 6}{14,50} = 0,207 \Omega$$

$$r_{Ex} = \frac{5 \cdot 2,7}{7,86} = 1,72 \Omega \quad r_{Ey} = \frac{6 \cdot 8}{14,50} = 3,31 \Omega$$

Wir erhalten somit das Widerstandsbild nach Fig. 3b.

Ersetzen wir die beiden zwischen x und y parallelgeschalteten Widerstände

$$r_{x'b} + r_{b'c'} + r_{c'y} = 0,578 \text{ Ohm}$$

und $r_{xE} + r_{Ey} = 5,03 \text{ Ohm}$

durch den äquivalenten Widerstand

$$r' = \frac{0,578 \cdot 5,03}{5,61} = 0,518 \text{ Ohm}$$

so erhalten wir den gesuchten Ersatzwiderstand zu

$$R' = 0,055 + 0,518 + 0,207 = 0,780 \text{ Ohm}$$

Der totale Netzwidestand setzt sich nun folgendermassen zusammen:

$$z_b = 0,16 \text{ Ohm}$$

$$z_p = 1,44 \text{ ,,}$$

$$r_b = 0,26 \text{ ,,}$$

$$r_{e'd'} = 0,30 \text{ ,,}$$

$$R' = 0,78 \text{ ,,}$$

$$R = 2,94 \text{ Ohm}$$

so dass sich ein Kurzschlußstrom von

$$I_k = \frac{240}{2,94} = 82 \text{ A}$$

ergibt.

Die Stromverteilung in den einzelnen Nulleiterstrecken und den parallelen Erdungswiderständen lässt sich durch Rücktransfiguration ermitteln. Der Kurzschlußstrom I_k teilt sich im Punkt y im umgekehrten Verhältnis der parallelgeschalteten Widerstände und zwar in

$$I_{y c'} = 82 \cdot \frac{5,03}{5,61} = 73,5 \text{ A}$$

und $I_{y E} = 82 \cdot \frac{0,578}{5,61} = 8,5 \text{ A}$

$$82,0 \text{ A}$$

und es ergibt sich das Strombild nach Fig. 4a.

Durch Rückverwandlung der Sternschaltung mit den beiden Sternpunkten x und y in die ursprüngliche Dreieckschaltung erhält man die Stromverteilung

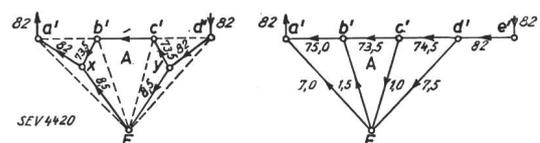


Fig. 4 a. Strombild vor der Rücktransfiguration.

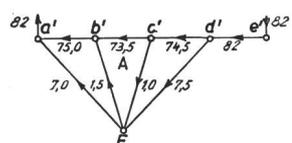


Fig. 4 b. Strombild nach der Rücktransfiguration.

lung nach Grösse und Richtung aus den folgenden Formeln, schematisch in Fig. 4b dargestellt, wobei die Stromrichtung von rechts nach links als negativ,

von oben nach unten ebenfalls als negativ und von unten nach oben als positiv angenommen wird.

$$I_{d'e'} = \frac{1}{0,50} (-82 \cdot 0,207 - 73,5 \cdot 0,276) = -74,5 \text{ A}$$

$$I_{d'E} = \frac{1}{6} (-82 \cdot 0,207 - 8,5 \cdot 3,31) = -7,5 \text{ A}$$

$$I_{c'E} = \frac{1}{8} (+73,5 \cdot 0,276 - 8,5 \cdot 3,31) = -1,0 \text{ A}$$

$$I_{b'a'} = \frac{1}{0,16} (-73,5 \cdot 0,102 - 82 \cdot 0,055) = -75,0 \text{ A}$$

$$I_{E b'} = \frac{1}{5} (+8,5 \cdot 1,72 - 73,5 \cdot 0,102) = +1,5 \text{ A}$$

$$I_{E a'} = \frac{1}{2,7} (+8,5 \cdot 1,72 - 82 \cdot 0,055) = +7,0 \text{ A}$$

Auf Grund dieses Strombildes lassen sich sofort die in den betreffenden Stromzweigen auftretenden Spannungsabfälle, bzw. die zwischen Erde und Null-

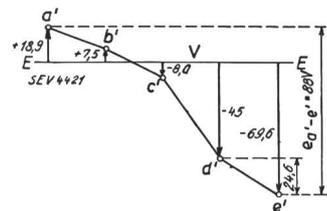


Fig. 5.
Spannungsbild längs des Nulleiters.

leiter herrschenden Berührungsspannungen berechnen (Fig. 5). Es ist

$$\begin{aligned} U_{a'E} &= +7,0 \cdot 2,7 = +18,9 \text{ V} \\ U_{b'E} &= +1,5 \cdot 5 = +7,5 \text{ V} \\ U_{c'E} &= -1,0 \cdot 8 = -8,0 \text{ V} \\ U_{d'E} &= -7,5 \cdot 6 = -45,0 \text{ V} \\ U_{d'e'} &= -82 \cdot 0,3 = -24,6 \text{ V} \\ U_{e'E} &= -69,6 \text{ V} \end{aligned}$$

Die dem geschlossenen Widerstandskreise aufgedrückte EMK von 240 Volt verteilt sich demnach auf die einzelnen Netzteile wie folgt:

Spannungsabfall:

im Transformator	$U_T = 82 \cdot 0,16 = 13 \text{ V}$
im Phasenleiter	$U_p = 82 \cdot 1,44 = 118 \text{ V}$
an der Kurzschlußstelle	$U_k = 82 \cdot 0,26 = 21 \text{ V}$
im Nulleiter (s. Fig. 5)	$U_o = 88 \text{ V}$
	<u>240 V</u>

Es zeigt sich, dass im Netzpunkt *e* eine Berührungsspannung von rd. 70 Volt auftritt, welche als gefährlich zu bezeichnen ist. Soll die Stationssicherung des betreffenden Stranges bei dem angenommenen Erdschluss innerhalb nützlicher Frist, d. h. einiger Sekunden, ansprechen, so darf deren Nennstromstärke im Maximum

$$I_s \text{ max} = \frac{82}{2,75} = 30 \text{ A.}$$

betragen. Ist dies mit Rücksicht auf den Betriebsstrom nicht zulässig, so sind von den in den Erläuterungen zu Ziffer 4 des Art. 26 angeführten

Hilfsmitteln diejenigen anzuwenden, welche sich wirtschaftlich am besten rechtfertigen lassen.

Erfolgt der *Phasenschluss* im Netzpunkt *e* nicht an den Nulleiter, sondern an «Erde», so lässt sich der Ersatzwiderstand für das Leitersystem zwischen *d'* und *a'* auf einfache Weise folgendermassen berechnen (Fig. 6).

$$R''' = \frac{8 \cdot 6,50}{14,5} = 3,60 \text{ Ohm}$$

$$R'' = \frac{5 \cdot 3,80}{8,80} = 2,16 \text{ Ohm}$$

$$R' = \frac{2,7 \cdot 2,32}{5,02} = 1,25 \text{ Ohm}$$

Die Grösse der Fehlerströme bzw. Berührungsspannungen ist von der Grösse des Erdübergangswiderstandes an der Fehlerstelle in hohem Masse abhängig. Es ist deshalb von Wichtigkeit, dass man über die Grössenordnung der in dem betreffenden Netze praktisch möglichen Uebergangswiderstände einigermaßen orientiert ist. Dabei ist zu beachten, dass sehr kleine Erdungswiderstände für den Phasenschluss an «Erde» nicht in Betracht kommen, da beim Vorhandensein guter Erden, wie z. B. Wasserleitungen, der Nulleiter an diese angeschlossen werden muss. Für den Phasenschluss an Erde kommen somit Objekte in Frage, deren Erdübergangswider-

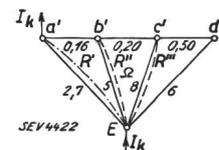


Fig. 6.
Widerstandsbild bei Phasenschluss an «Erde».

stand in der Regel über 2 Ohm liegen dürfte. Im vorliegenden Beispiel ergibt sich unter Annahme eines Uebergangswiderstandes von 5 Ohm ein Totalwiderstand von

$$\begin{aligned} z_k &= 0,16 \text{ Ohm} \\ z_p &= 1,44 \text{ »} \\ r_k &= 5 \text{ »} \\ R' &= 1,25 \text{ »} \\ R &= 7,85 \text{ Ohm} \end{aligned}$$

Der Kurzschlußstrom beträgt somit

$$I_k = \frac{240}{7,85} = 30,5 \text{ A}$$

und die Stromverteilung (Fig. 7) erfolgt nach den Gleichungen

$$I_{E a'} = 30,5 \cdot \frac{2,32}{5,02} = 14,1 \text{ A}$$

$$I_{b' a'} = 30,5 \cdot \frac{2,70}{5,02} = 16,4 \text{ A}$$

$$I_{E b'} = 16,4 \cdot \frac{3,80}{8,80} = 7,1 \text{ A}$$

$$I_{c' b'} = 16,4 \cdot \frac{5,00}{8,80} = 9,3 \text{ A}$$

$$I_{E' c} = 9,3 \cdot \frac{6,50}{14,5} = 4,2 \text{ A}$$

$$I_{a'e} = 9,3 \cdot \frac{8,00}{14,5} = 5,1 \text{ A}$$

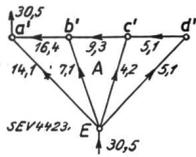


Fig. 7.

Strombild bei Phasenschluss
an «Erde».

Die Berührungsspannungen in den verschiedenen Netzpunkten ergeben sich somit zu

$$\begin{aligned} U_{a'E} &= 14,1 \cdot 2,7 = 38,0 \text{ V} \\ U_{b'E} &= 7,1 \cdot 5 = 35,5 \text{ V} \\ U_{c'E} &= 4,2 \cdot 8 = 33,6 \text{ V} \\ U_{a'E} &= U_{e'E} = 5,1 \cdot 6 = 30,6 \text{ V} \end{aligned}$$

Da die Ströme alle gleichgerichtet sind, nämlich von unten nach oben, also positiv, so haben auch die Berührungsspannungen alle das gleiche Vorzeichen. Die grösste Spannung zwischen Nulleiter und Erde tritt im Netzpunkt *a* (Transformatorstation) auf, doch liegt sie in diesem Beispiel unter 50 Volt. Es ist jedoch zu beachten, dass im zweiten Falle der Erdschlußstrom stationär bleibt, da die für den ersten Fall berechnete Sicherung von 30 A Nennstromstärke nicht durchschmelzen würde, weil der Kurzschlußstrom nur 30,5 A beträgt.

2. Bestimmung der auftretenden Fehlerströme und Berührungsspannungen durch Messungen im Netz selbst.

Durch direkte Messung der Fehlerströme und Berührungsspannungen bei Einleitung eines künstlichen Erdschlusses an einer geeigneten Netzstelle erhält man ein zuverlässiges Bild über die beim Auftreten eines Phasenschlusses an den Nulleiter bzw. an Erde tatsächlich auftretenden Strom- und Spannungsverhältnisse. Diese Methode lässt sich aber in der Praxis aus betriebstechnischen und wirtschaftlichen Gründen nicht allgemein durchführen und bringt unter Umständen die Gefahr von Betriebsstörungen und Unfällen mit sich. Diese Methode dürfte deshalb nur in Ausnahmefällen zu Kontrollzwecken Anwendung finden.

3. Messung der auftretenden Fehlerströme und Berührungsspannungen an einem Netzmodell.

Eine Kombination der beiden vorgenannten Methoden zur Bestimmung der Fehlerströme und Berührungsspannungen stellt das vom Verfasser entwickelte und im Auftrag der Bernischen Kraftwerke A.-G. hergestellte «Netzmodell» für offene Leitungsnetze (Ausführung A) dar (Fig. 8). Die auf Grund des Netzplanes ermittelten Leitungsimpedanzen, die berechnete Transformatoren-Kurzschlussimpedanz, der Uebergangswiderstand sowie die im Netz gemessenen Erdungswiderstände lassen sich im Modell durch geeignete, mit Skalen versehene Drehwiderstände einstellen, worauf nach Einleiten eines Phasenschlusses an den Nulleiter oder an Erde die auftretende Kurzschlußstromstärke an einem Ampèremeter und die in den verschiedenen Netzpunkten

herrschende Berührungsspannung durch Abtasten an einem Voltmeter direkt abgelesen werden können. Die «EMK» des Transformators wird mit einem regulierbaren Widerstand an einem besondern Voltmeter auf 240 Volt Skalenwert eingestellt und für alle Messungen konstant gehalten. Das Ampèremeter besitzt noch eine zweite, rote Skala, an welcher die max. zulässige Absicherungs-Nennstromstärke abgelesen werden kann. Die Stromquelle ist im Modell eingebaut, so dass der ganze Apparat, der ca. 7 kg wiegt, überall verwendet werden kann.

Das Netzmodell besitzt neben dem rein instruktiven Wert den grossen Vorteil, dass die zeitraubenden und oft komplizierten Rechnerarbeiten vollständig dahinfallen und dass die Massnahmen, welche zur Sanierung eines den Vorschriften nicht entsprechenden Netzes erforderlich sind, rasch und

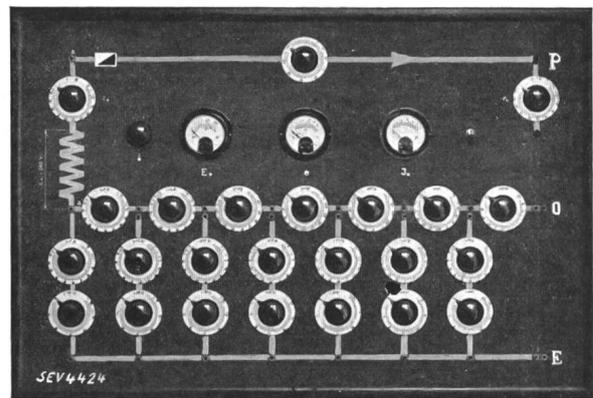


Fig. 8.

Ansicht des Modells zur Bestimmung der Fehlerströme und Berührungsspannungen in offenen Normalspannungsnetzen.

genau bestimmt werden können. Ferner lassen sich projektierte oder für den Umbau auf Normalspannung vorgesehene Netze hinsichtlich der zu erwartenden Erdschlussverhältnisse am Modell bequem untersuchen, wobei die günstigste Verteilung der Erdungsstellen unter Annahme der zu erwartenden Uebergangswiderstände im voraus bestimmt werden kann.

Bei geschlossenen Leitungsnetzen (Ringleitungen) ist die rechnerische Ermittlung der Strom- und Spannungsverteilung bei Erdschluss ganz besonders umständlich und zeitraubend, um so mehr, als der ungünstigste Netzpunkt nicht im voraus bestimmt werden kann, so dass die Rechnung für mehrere Netzpunkte wiederholt werden muss. Hier leistet das speziell für geschlossene Leitungsnetze bestimmte Netzmodell (Ausführung B) besonders wertvolle Dienste, indem die Strom- und Spannungsverhältnisse bei jedem beliebig angenommenen Fehlerort in wenigen Minuten festgestellt werden können.

Auf Grund der mit dem neuen Netzmodell (gesch.) gemachten Erfahrungen kann zusammenfassend gesagt werden, dass diese Methode der Netzuntersuchung einerseits einen klaren und instruktiven Einblick in die Erdschlussverhältnisse von Normalspannungsnetzen und andererseits eine

grosse Arbeits- und Zeitersparnis in der Projektierung und Kontrolle der Erdungsanlage bedeutet, indem sich durch einfaches Verändern der betreffenden Regulierwiderstände sofort feststellen lässt, welches der in den Erläuterungen zum Art. 26 der Starkstromverordnung vorgesehenen Mittel zur Herabsetzung der Berührungsspannung bei kleinstem Kostenaufwand den gewünschten Erfolg garantiert.

4. Messung von Erdwiderständen und deren Berücksichtigung für die Ermittlung der Strom- und Spannungsverhältnisse.

Die Messung von Erdübergangswiderständen erfolgt entweder nach der direkten Strom- und Spannungsmethode unter Verwendung einer besondern Fremdstromquelle oder mit den bekannten, transportablen Messbrücken von Hartmann & Braun oder Siemens & Halske. Während bei dem ersten Apparat das Stromminimum mit Telephon einreguliert wird, erfolgt die Abgleichung beim zweiten Apparat mit einem eingebauten Galvanometer. Die Telephonmessbrücke, welche mit Trockenbatterie und Summer arbeitet, hat den Vorteil eines geringen Gewichtes bei kleinen Abmessungen, weist aber den Nachteil auf, dass bei kleinen Erdwiderständen das Tonminimum sehr flach wird, so dass der gesuchte Widerstandswert nicht mehr eindeutig bestimmt werden kann. Ferner treten beim Vorhandensein von Erdströmen im Telephon Nebengeräusche auf, die eine Messung überhaupt verunmöglichen können. Bei der Siemens-Messbrücke sind diese Nachteile vermieden, doch besitzt dieser Apparat ziemlich grosse Dimensionen und ein verhältnismässig grosses Gewicht. Neuerdings ist ein Erdungsmesser der englischen Firma Evershed & Vignoles unter dem Namen «Meg» in den Handel gekommen, der, wie die von der gleichen Firma seit Jahren gebauten «Megger»-Erdungsprüfer auf dem Prinzip der Strom- und Spannungsmessung beruht, wobei die Stromquelle (Gleichstromdynamo) im Apparat eingebaut ist. Für die Erdmessung selbst wird der Gleichstrom in Wechselstrom umgeformt, während das Anzeigeinstrument nur von Gleichstrom durchflossen wird und den Quotienten Spannung : Stromstärke = Erdwiderstand auf einer logarithmisch eingeteilten Skala direkt in Ohm anzeigt. Wie bei den Messbrückengeräten sind auch bei diesem Apparat 2 Hilfelektroden im Abstände von ca. 25 und 50 m von der zu messenden Erdelektrode erforderlich, wobei die äussere als Strom- und die innere Elektrode als Spannungssonde dient. Der Apparat ist in einem Leichtmetallgehäuse eingebaut, hat nur kleine Abmessungen und ein Gewicht von 3,5 kg.

Für die Untersuchung der Strom- und Spannungsverhältnisse nach den vorbeschriebenen Methoden unter Ziffer 1 und 3 sind bezüglich der Erdungen in Normalspannungsnetzen folgende drei Fälle zu unterscheiden:

Fall 1. Sämtliche Erdelektroden sind voneinander unabhängig (Einzelerdungen), wobei die einzelnen Erdleitungen an künstliche Erdelektroden (Platten-, Band- oder kombinierte Elektroden) oder an natürliche Elektroden (Hauswasserversorgung, Pumpenanlage, Widderleitung usw.) an-

geschlossen sein können. Als wirksamer Erdungswiderstand kommt in diesem Fall der durch den Erdprüfer bei abgetrennter Erdleitung festgestellte Uebergangswiderstand jeder Einzelerdung in Betracht, gemäss dem Widerstandsbild nach Fig. 9. Für die Berechnung, bzw. im Netzmodell sind die gemessenen Einzelwiderstände der Erdungen einzusetzen bzw. einzustellen.

Fall 2. Sämtliche Erdleitungen sind an ein gemeinschaftliches zusammenhängendes Wasserleitungsnetz (Trinkwasserversorgung, Hydrantenanlage) angeschlossen. In diesem Fall

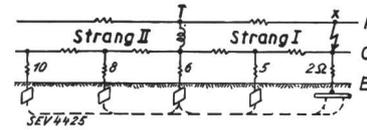


Fig. 9. Normalspannungsnetz mit Einzelerdungen. x Fehlerstelle; T Transformator.

spielt der Erdübergangswiderstand normalerweise keine Rolle, da sich die Fehlerstrombahn direkt über das Wasserleitungsnetz schliesst. Da der Eigenwiderstand der Rohrleitung von allgemeinen Wasserversorgungen praktisch vernachlässigt werden kann, kommt als wirksamer «Erdungswiderstand» nur der Uebergangswiderstand zwischen Erdleiter und Wasserleitungsrohr in Betracht. Bei sachgemässer Ausführung liegt derselbe auf Grund praktischer Messungen unter 0,1 Ohm. Da der genaue Uebergangswiderstand nicht von Fall zu Fall ermittelt werden kann, wird in den Berechnungen sowie im

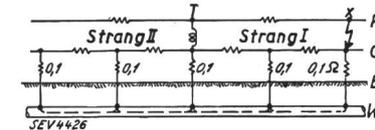


Fig. 10. Normalspannungsnetz mit gemeinschaftlicher Erdung. x Fehlerstelle; T Transformator.

Netzmodell sicherheitshalber durchwegs mit einem Uebergangswiderstand von 0,1 Ohm gerechnet. Das Widerstandsbild für Fall 2 geht aus Fig. 10 hervor.

Fall 3. Ein Teil der Erdleitungen ist an eine gemeinschaftliche Erdung (Wasserversorgungsnetz) und ein Teil an Einzelelektroden angeschlossen. Dieser Fall bietet hinsichtlich der genauen Ermittlung der Stromverteilung im Erdboden gewisse Schwierigkeiten, da die wirksamen Erdwiderstände der Grösse und Lage nach nicht eindeutig erfasst werden können. Um nicht zu extrem günstige oder ungünstige Resultate zu erhalten, wird das Netz so behandelt, als

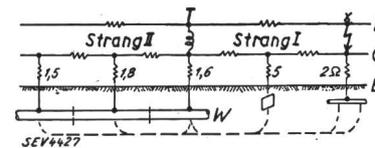


Fig. 11. Normalspannungsnetz mit gemischter Erdung. x Fehlerstelle; T Transformator.

ob das Wasserleitungsnetz nicht zusammenhängend wäre, d. h. als ob nur Einzelerdungen vorhanden wären, wobei die Uebergangswiderstände an jeder Erdungsstelle wie in Fall 1 durch Messung bestimmt werden. Das Widerstandsbild ist in Fig. 11 dargestellt.

Die Herstellung der Erdelektroden und ihrer Verbindungen sowie die Messung bestehender oder neu verlegter Erdungen sollte nur durch besonders geschultes und zuverlässiges Personal ausgeführt werden. In grössern Unternehmungen empfiehlt es sich, immer die gleichen Leute für diese Arbeiten zu verwenden. Diese erhalten im Laufe der Zeit eine grosse Routine im Feststellen und Anschliessen guter «Erden», so dass bei zweckmässiger Organisation der Erdungskontrolle in Verbindung mit dem Netzmodell die Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften mit kleinstem Zeit- und Kostenaufwand gewährleistet werden kann.