

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 45 (1954)
Heft: 2

Artikel: Die Ortskurven der Spannungen gegen Erde und des Erdschlussstromes bei direktem Erdschluss in einem Drehstrom-Hochspannungsnetz mit Löschspule
Autor: Wild, Jakob
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058790>

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: 18.01.2025

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

BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Die Ortskurven der Spannungen gegen Erde und des Erdschlußstromes bei direktem Erdschluss in einem Drehstrom-Hochspannungsnetz mit Löserspule

Von Jakob Wild, Zürich

621.3.014.7 : 621.316.935

Im Bulletin SEV 1937, Nr. 25, erschien eine Arbeit des Autors, die unter anderem den direkten Erdschluss in einem Drehstrom-Hochspannungsnetz mit isoliertem Sternpunkt behandelte. Die vorliegende Veröffentlichung ist eine Ergänzung der damaligen Arbeit und umfasst in allgemeiner Form die Netze mit und ohne Löserspule, sowie den Einfluss der Verstimmung der Löserspule. Die Kurven sind für 16-kV-Netze gezeichnet. An Hand der abgeleiteten Formeln ist es ohne weiteres möglich, die Ortskurven auch für andere Netzspannungen zu konstruieren. In Anlehnung an die frühere Arbeit wird in den Formeln und Vektordiagrammen wiederum mit elektromotorischen Kräften gerechnet.

Dans le Bulletin de l'ASE 1937, n° 25, un article de l'auteur traitait, entre autres, de la mise à la terre accidentelle directe dans un réseau triphasé à haute tension à point neutre isolé. Le présent article complète le précédent et traite d'une façon générale les réseaux avec et sans bobine d'extinction, ainsi que de l'influence du désaccord de cette bobine. Les diagrammes circulaires sont établis pour des réseaux à 16 kV, mais les formules indiquées permettent de construire facilement de tels diagrammes pour d'autres tensions de réseaux. Comme dans l'étude précédente, les formules et les diagrammes vectoriels sont calculés avec des forces électromotrices.

Einleitung

In Art. 23 der Eidgenössischen Verordnung über die Erstellung, den Betrieb und den Unterhalt von elektrischen Starkstromanlagen vom 7. Juli 1933 ist vorgeschrieben, dass bei einem Isolationsfehler in einer Hochspannungsanlage einer Transformatorstation die auftretende Berührungsspannung 50 V nicht überschreiten darf. Zur Berechnung dieser Spannung muss die Grösse des Erdschlußstromes bekannt sein. Mit zunehmender Verkabelung und Übergang auf höhere Betriebsspannungen in den Mittelspannungsnetzen steigen die Erdschlußströme in den Hochspannungsanlagen ganz bedeutend an. Die Erdungsanlagen von Transformatorstationen können in Überlandnetzen erfahrungsgemäss mit wirtschaftlich tragbaren Kosten nur bis zu Erdschlußströmen von ca. 10 A erstellt werden. In einem 16-kV-Netz wird dieser Grenzstrom, z. B. bei einer Ausdehnung des Freileitungsnetzes von ca. 170 km, erreicht, währenddem dies in Kabelnetzen bereits bei einer Ausdehnung der Kabelleitungen von nur ca. 4 km der Fall ist. Eine grössere Ausdehnung der Hochspannungskabelnetze erfordert demnach den Einbau einer Löserspule zur Kompensation des kapazitiven Erdschlußstromes. Es ist deshalb von allgemeinem Interesse, an Hand leicht für jede Netzverhältnisse zu konstruierenden Ortskurven den Einfluss aller wichtigsten Faktoren, die für die Grösse des Erdschlußstromes mitbestimmend sind, aufzuzeigen. Aus den Ortskurven sind die Verhältnisse des direkten Erdschlusses für isoliert betriebene Netze und für solche, deren Sternpunkt über eine Löserspule geerdet ist, für Resonanz- und Dissonanzeinstellung ersichtlich. Sie dienen aber auch dazu, um aus den Angaben der Erdschlussvoltmeter auf die Grösse des Widerstandes an der Erdschlußstelle zu schliessen.

I. Berechnung der Ortskurve der Erdschluss-Elektromotorischen-Kräfte bei direktem Erdschluss in einem Netz mit Löserspule

Der Erdschlußstrom sowie die elektromotorischen Kräfte (E.M.K.) der Polleiter gegen Erde eines Drehstrom-Hochspannungsnetzes werden bei einem direkten Erdschluss über einen Ohmschen Widerstand durch folgende Faktoren beeinflusst:

1. Betriebsspannung des Netzes.
2. Ausdehnung des Netzes, wobei insbesondere der Grad der Verkabelung zu berücksichtigen ist.
3. Vorhandensein einer Löserspule und deren Resonanz- oder Dissonanzeinstellung.
4. Ohmscher Widerstand an der Erdschlußstelle.

Um mit einfacheren Berechnungen auszukommen, werden folgende Voraussetzungen und Vereinfachungen gemacht:

- a) Netzfrequenz = 50 Hz.
- b) Die Netzspannung sei sinusförmig, d. h. sie enthalte keine Oberwellen.
- c) Die Kapazitäten der 3 Polleiter gegen Erde seien gleich gross. Diese Annahme trifft um so mehr zu, je grössere Hochspannungskabelstrecken im Netz eingeschlossen sind.
- d) Die Kapazitäten der Polleiter gegen Erde werden in einem Punkt konzentriert angenommen.
- e) Die Ohmschen und induktiven Widerstände der Hochspannungsleitungen werden vernachlässigt, da sie im allgemeinen gegenüber den Widerständen an der Erdschlußstelle klein sind.
- f) Der Ableitstrom der Mittelspannungsleitungen, der eine Erhöhung des Erdschlußstromes zur Folge hat, wird nicht berücksichtigt, da er für mittlere Betriebsspannungen erfahrungsgemäss höchstens wenige Prozente des kapazitiven Erdschlußstromes ausmacht.
- g) Der Ohmsche Widerstand der Löserspule wird vernachlässigt.

Der Berechnung der elektromotorischen Kräfte und der Erdschlußströme im Erdschlussfall sind die Schemata in den Fig. 1 und 2 zu Grunde gelegt.

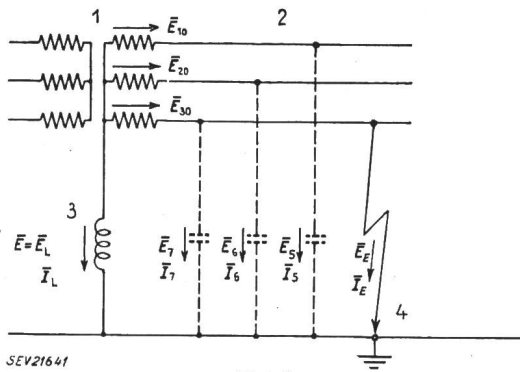


Fig. 1

Direkter Erdschluss über einem Ohmschen Widerstand in einem Drehstrom-Hochspannungsnetz mit Löschspule
 1 Haupttransformator im Unterwerk; 2 16-kV-Netz; 3 Löschspule; 4 Erdschlußstelle;
 Weitere Bezeichnungen siehe im Text

Es bedeuten:

- $\bar{E}_{10}, \bar{E}_{20}, \bar{E}_{30}$ die 3 Stern-E.M.K. der das Netz speisenden Unterwerktransformatoren;
- $\bar{E}_5, \bar{E}_6, \bar{E}_7$ die 3 Polleiter-E.M.K. gegen Erde;
- $\bar{E}_E = \bar{E}_7$ die E.M.K. an der Erdschlußstelle;

$$\bar{Z}'_7 = \frac{-j R_E \frac{1}{\omega C}}{-R_E + j \frac{1}{\omega C}}$$

Impedanz aus der Parallelschaltung von \bar{Z}_7 und \bar{Z}_E ;

$$\bar{Z}_L = -j \omega L$$

Impedanz der Löschspule.

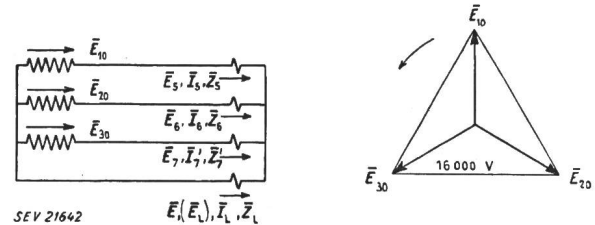


Fig. 2

Ersatzschaltbild

Unbekannt sind:

$$\bar{E}_5, \bar{E}_6, \bar{E}_7, \bar{E}, \bar{I}_5, \bar{I}_6, \bar{I}_7', \bar{I}_L, \bar{I}_E$$

Es gelten folgende Gleichungen:

1. $\bar{E}_5 = \bar{Z}_5 \bar{I}_5$
2. $\bar{E}_6 = \bar{Z}_6 \bar{I}_6$
3. $\bar{E}_7 = \bar{Z}'_7 \bar{I}_7'$
4. $\bar{E} = \bar{E}_L = \bar{Z}_L \bar{I}_L$
5. $\bar{I}_5 + \bar{I}_6 + \bar{I}_7' + \bar{I}_L = 0$
6. $\bar{E}_{10} + \bar{E}_5 - \bar{E}_L = 0$
7. $\bar{E}_{20} + \bar{E}_6 - \bar{E}_L = 0$
8. $\bar{E}_{30} + \bar{E}_7 - \bar{E}_L = 0$
9. $\bar{I}_E + \bar{I}_7 = \bar{I}_7'$

Die Berechnung der E.M.K. \bar{E}_L an der Löschspule führt auf die folgende Gleichung:

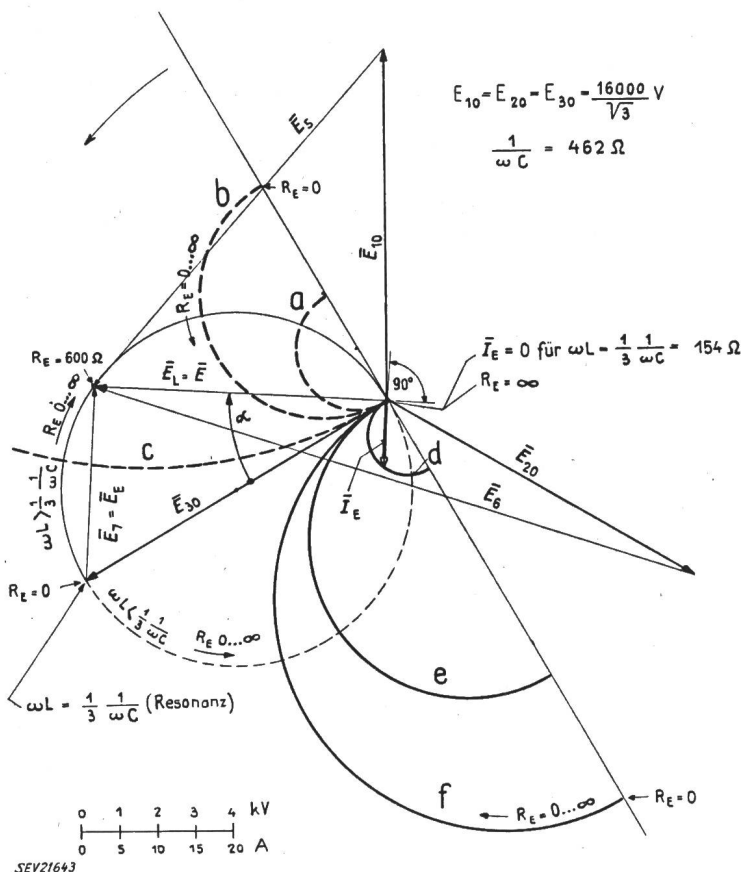
$$\bar{E}_L = -\bar{E}_{30} \bar{Z}_L \frac{\bar{Z}_7 - \bar{Z}}{2 \bar{Z}'_7 \bar{Z}_L + \bar{Z} \bar{Z}_L + \bar{Z} \bar{Z}'_7}$$

Fig. 3

Ortskurven der Erdschluss-Elektromotorischen Kräfte und des Erdschlußstromes in Funktion des Ohmschen Widerstandes an der Erdschlußstelle Direkter Erdschluss in einem Netz mit und ohne Löschspule

Beispiel: $\omega L = 184,8 \Omega$; $R_E = 600 \Omega$; $\text{tg } \alpha = 0,66$
 Ortskurven des Erdschlußstromes \bar{I}_E

- a $\omega L = 123,2 \Omega$ (+ 20 %)
- b $\omega L = 100 \Omega$
- c $\omega L = 50 \Omega$
- d $\omega L = 184,8 \Omega$ (- 20 %)
- e $\omega L = 500 \Omega$
- f $\omega L = \infty$ (Netz ohne Löschspule)



\bar{E} bzw. \bar{E}_L die E.M.K. zwischen dem Nullpunkt der Haupttransformatoren und der Erde, bzw. die E.M.K. an der Löschspule;

$\bar{Z}_5 = \bar{Z}_6 = \bar{Z}_7 = \bar{Z} = j \frac{1}{\omega C}$ die kapazitiven Impedanzen der Polleiter gegen Erde;

$\bar{Z}_E = -R_E$ Impedanz des Erdschlusswiderstandes;

Setzt man die Werte der Impedanzen in die Gleichung ein, so ergibt sich

$$\bar{E}_L = \bar{E}_{30} \frac{(\omega L)^2 + j[R_E \omega L - 3 R_E (\omega L)^2 \omega C]}{R_E^2 + (\omega L)^2 - 6 R_E^2 \omega L \omega C + 9 R_E^2 (\omega L)^2 (\omega C)^2}$$

Die graphische Darstellung dieser Gleichung führt auf die in der Fig. 3 dargestellte Ortskurve. Die

Spitze des Vektors \vec{E} (\vec{E}_L), oder mit andern Worten der Erdpunkt, wandert in Funktion des Ohmschen Widerstandes an der Erdschlußstelle auf einem Kreis mit dem Durchmesser der erdschlussbehafteten Phasen-E.M.K. (im Beispiel \vec{E}_{30}). In der früheren Arbeit des Autors im Bulletin SEV 1937, Nr. 25, wurde bereits gezeigt, dass der obere, ausgezogene Halbkreis für ein Netz ohne Löserspule gilt. Derselbe Halbkreis hat auch Gültigkeit für die Dissonanzeinstellung der Löserspule, wenn deren induktiver Widerstand in Bezug auf den Resonanzfall zu gross eingestellt ist ($\omega L > \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\omega C}$). Es ist aber zu beachten, dass die Spitze des Vektors \vec{E} bei gleich grossem Ohmschen Widerstand R_E an der Erdschlußstelle auf einem andern Punkt des Halbkreises liegt, je nachdem keine Löserspule in Betrieb steht oder wie stark ωL gegenüber $\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\omega C}$ in beschriebnem Sinne verstimmt ist. Ein Netz ohne Löserspule entspricht dem Grenzfall $\omega L = \infty$. Der untere, gestrichelt eingezeichnete Halbkreis der Spitze des Vektors \vec{E} gilt für die Dissonanzeinstellung der Löserspule im Sinne $\omega L < \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\omega C}$.

Für die Resonanzeinstellung der Löserspule, d. h. $\omega L = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\omega C}$ reduziert sich die Ortskurve des Erdpunktes in einen Punkt, der mit der Spitze der Phasen-E.M.K. der erdschlussbehafteten Phase zusammenfällt. Es heisst dies, dass unabhängig vom Ohmschen Widerstand an der Erdschlußstelle die E.M.K. \vec{E}_L an der Löserspule gleich der E.M.K. \vec{E}_{30} wird.

Um für ein Hochspannungsnetz mit einer bestimmten Ausdehnung ($1/\omega C$) und für einen bestimmten Ohmschen Widerstand an der Erdschlußstelle die Lage des Erdpunktes, d. h. des Schnittpunktes der elektromotorischen Kräfte $\vec{E}_5, \vec{E}_6, \vec{E}_7$ und \vec{E} mit dem Halbkreis zu erhalten, bestimmt man am zweckmässigsten den Tangens des Winkels α , der von den Vektoren \vec{E}_L und \vec{E}_{30} eingeschlossen wird. Dieser ergibt sich aus der Formel von \vec{E}_L :

$$\text{tg } \alpha = \frac{R_E \omega L - 3 R_E (\omega L)^2 \omega C}{(\omega L)^2} = \left(\frac{1}{\omega L} - 3 \omega C \right) R_E$$

$$\text{tg } \alpha = 0 \text{ für } \omega L = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\omega C} \quad (\text{Resonanz})$$

$$\text{tg } \alpha = \text{positiv, für } \frac{1}{\omega L} > 3 \omega C \quad (\text{gestrichelt eingezeichneter Halbkreis})$$

$$\text{tg } \alpha = \text{negativ, für } \frac{1}{\omega L} < 3 \omega C \quad (\text{ausgezogen eingezeichneter Halbkreis})$$

$\text{tg } \alpha$ in Funktion des Widerstandes an der Erdschlußstelle ist in Fig. 4 für ein Netz mit einem kapazitiven Widerstand pro Phase von $1/\omega C = 462 \Omega$ und verschiedene Verstimmungen der Löserspule dargestellt. Dieser Widerstand entspricht einem ungelöschten 16-kV-Netz mit einem maximalen Erdschlußstrom von $I_E = 60 \text{ A}$.

In Fig. 3 ist ferner als Beispiel für dasselbe Netz die Lage des Erdpunktes bei 600Ω Erdwiderstand und einer um 20% vergrösserten Induktivität der Löserspule gegenüber dem Resonanzfall dargestellt

$$\left(\omega L = 184,8 \Omega = 1,2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\omega C} = 0,4 \cdot 462 \right)$$

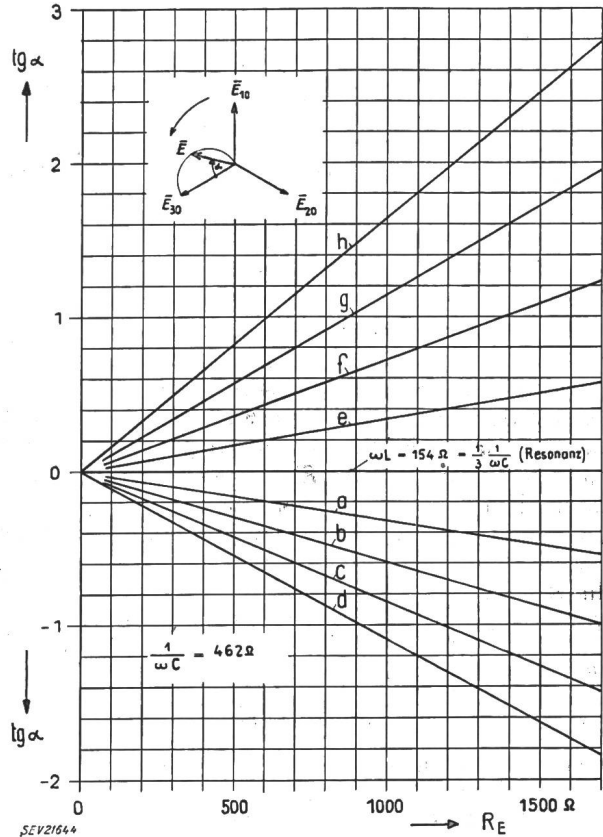


Fig. 4
 $\text{tg } \alpha$ in Funktion des Ohmschen Widerstandes an der Erdschlußstelle für verschiedene Einstellungen der Löserspule
 R_E Ohmscher Widerstand an der Erdschlußstelle

a	$\omega L = 161,7 \Omega$	(+ 5 %)
b	$\omega L = 169,4 \Omega$	(+ 10 %)
c	$\omega L = 177,1 \Omega$	(+ 15 %)
d	$\omega L = 184,8 \Omega$	(+ 20 %)
e	$\omega L = 146,3 \Omega$	(- 5 %)
f	$\omega L = 138,6 \Omega$	(- 10 %)
g	$\omega L = 130,9 \Omega$	(- 15 %)
h	$\omega L = 123,2 \Omega$	(- 20 %)

II. Berechnung der Ortskurve des Erdschlußstromes

Es gilt die Beziehung:

$$\vec{I}_5 + \vec{I}_6 + \vec{I}_7 + \vec{I}_E + \vec{I}_L = 0$$

$$\vec{I}_E = -\vec{I}_5 - \vec{I}_6 - \vec{I}_7 - \vec{I}_L =$$

$$= -\frac{\vec{E}_5}{\vec{Z}_5} - \frac{\vec{E}_6}{\vec{Z}_6} - \frac{\vec{E}_7}{\vec{Z}_7} - \frac{\vec{E}_L}{\vec{Z}_L}$$

$$\vec{Z}_5 = \vec{Z}_6 = \vec{Z}_7 = j \frac{1}{\omega C}$$

$$\vec{Z}_L = -j \omega L$$

$$\vec{I}_E = j \omega C \left(\vec{E}_5 + \vec{E}_6 + \vec{E}_7 - \frac{\vec{E}_L}{\omega L \cdot \omega C} \right)$$

$$\vec{E}_5 = -\vec{E}_{10} + \vec{E}_L$$

$$\vec{E}_6 = -\vec{E}_{20} + \vec{E}_L$$

$$\vec{E}_7 = -\vec{E}_{30} + \vec{E}_L$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_E &= j \omega C \left(-\bar{E}_{10} - \bar{E}_{20} - \bar{E}_{30} + 3\bar{E}_L - \frac{\bar{E}_L}{\omega L \cdot \omega C} \right) = \\ &= j \omega C \bar{E}_L \left(3 - \frac{1}{\omega L \cdot \omega C} \right) \end{aligned}$$

Den früher ermittelten Wert von \bar{E}_L eingesetzt, wird:

$$\bar{I}_E = \bar{E}_{30} \frac{\left[j \omega C \left(3 - \frac{1}{\omega L \cdot \omega C} \right) \right] [(\omega L)^2 + j (R_E \omega L - 3 R_E (\omega L)^2 \omega C)]}{R_E^2 + (\omega L)^2 - 6 R_E^2 \omega L \cdot \omega C + 9 R_E^2 (\omega L)^2 (\omega C)^2}$$

Durch Umformung dieser Gleichung erhält man:

$$\bar{I}_E = \bar{E}_{30} \frac{9 \omega L \cdot \omega C + \frac{1}{\omega L \cdot \omega C} - 6 + j \frac{1}{R_E} \left(3 \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{\frac{R_E}{\omega L \cdot \omega C} + \frac{\omega L}{R_E \cdot \omega C} - 6 R_E + 9 R_E \omega L \cdot \omega C}$$

Die Aufzeichnung dieser Gleichung führt wiederum auf Halbkreise, wie sie in Fig. 3 dargestellt sind. Der Vektor des Erdschlußstromes geht immer vom Sternpunkt der Stern-Elektromotorischen-Kräfte aus und steht senkrecht zum Vektor $\bar{E}_L = \bar{E}$. Je nach Einstellung der Löschspule (ωL) ändert sich der Durchmesser der Stromhalbkreise. Dabei entsprechen die dick ausgezogenen Ortskurven des Erdschlußstromes dem obern Halbkreis der Erdschluss-E.M.K., ($\omega L > \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\omega C}$), und die gestrichelt gezeichneten Stromhalbkreise dem gestrichelt gezeichneten Halbkreis der E.M.K. ($\omega L < \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\omega C}$). Die Durchmesser der Stromhalbkreise entsprechen dem maximalen Erdschlußstrom bei einem Erdwiderstand an der Erdschlußstelle von null Ohm. Für das Konstruieren der Ortskurven des Erdschlußstromes ist es am zweckmässigsten, wenn man den Durchmesser dieser Halbkreise berechnet.

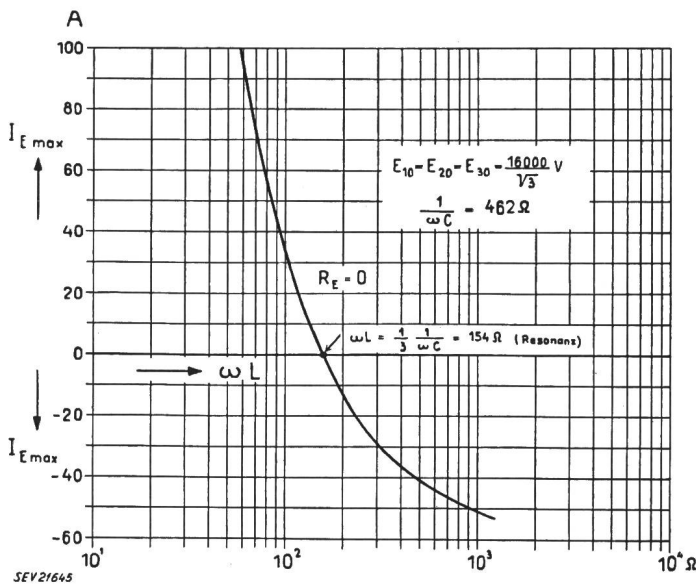


Fig. 5

Maximalwert des Erdschlußstromes $I_{E_{max}}$ in Funktion des induktiven Widerstandes ωL der Löschspule

Setzt man in der allgemeinen Formel für \bar{I}_E , $R_E = 0$ ein, so erhält man:

$$\bar{I}_E = j \bar{E}_{30} \left(3 \omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

Der Absolutwert $I_{E_{max}}$ wird dann

$$I_{E_{max}} = E_{30} \left(3 \omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

Fig. 5 stellt als Beispiel den Maximalwert des Erdschlußstromes in Funktion des induktiven Widerstandes der Löschspule für das 16-kV-Netz mit 60 A Erdschlußstrom dar.

III. Verlauf der Erdschluss-Elektromotorischen-Kräfte der Polleiter gegen Erde

Wie sich die E.M.K. E_5, E_6, E_7 der Polleiter gegen Erde in Funktion des Widerstandes an der

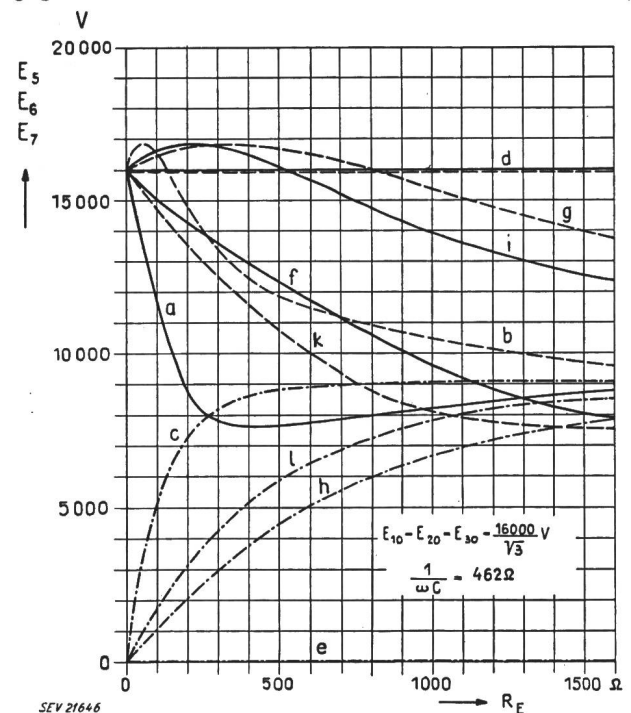


Fig. 6
Elektromotorische Kräfte $E_{5...7}$ der 3 Polleiter gegen Erde in Funktion des Ohmschen Widerstandes an der Erdschlußstelle R_E

Netz ohne Löschspule bzw. mit Löschspule und Resonanz sowie Dissonanzeinstellung
 a: E_5 ; b: E_6 ; c: E_7 für $\omega L = \infty$ (Netz ohne Löschspule)
 d: $E_5 = E_6$; e: E_7 für $\omega L = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\omega C} = 154 \Omega$ (Resonanz)
 f: E_5 ; g: E_6 ; h: E_7 für $\omega L = 184,8 \Omega$ (+20%)
 i: E_5 ; k: E_6 ; l: E_7 für $\omega L = 123,2 \Omega$ (-20%)

Erdschlußstelle bei verschiedenen Einstellungen der Löserspule verändern, geht aus der graphischen Darstellung Fig. 6 hervor. Da die E. M. K. E_5, E_6, E_7 durch die Erdschlussvoltmeter im speisenden Unterwerk angezeigt werden, ist es umgekehrt möglich, für ein bestimmtes Hochspannungsnetz ($1/\omega C$) aus diesen 3 E. M. K. über $\text{tg } \alpha$ den Widerstand an der Erdschlußstelle zu berechnen, was gewisse Anhaltspunkte über die Erdschlussursache erlaubt.

IV. Änderung des Erdschlußstromes in Funktion des Widerstandes an der Erdschlußstelle

Fig. 7 stellt diese Abhängigkeit für verschiedene Einstellungen der Löserspule im 16-kV-Netz mit 60 A maximalen Erdschlußstrom dar. Aus dieser Figur geht hervor, dass bei einer wesentlichen Verstimmung der Löserspule im Sinne einer Verkleinerung von ωL gegenüber dem Resonanzfall der Erdschlußstrom grössere Werte als im ungelöschten Netz annehmen kann.

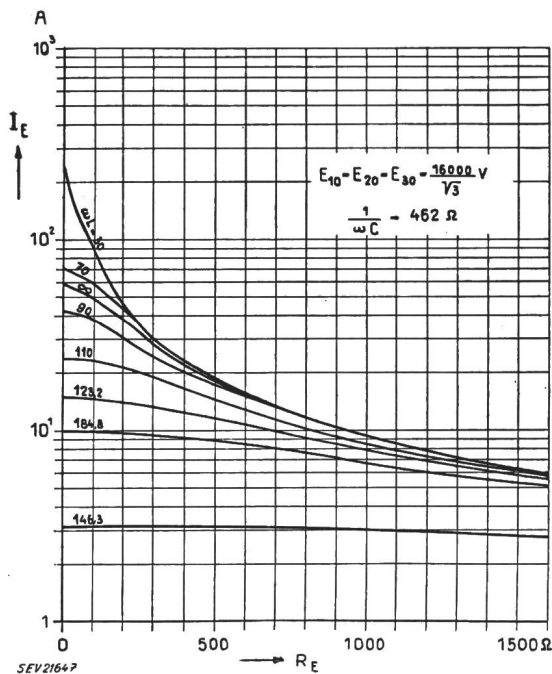


Fig. 7

Erdschlußstrom I_E in Funktion des Ohmschen Widerstandes an der Erdschlußstelle R_E

Netz ohne Löserspule bzw. mit Löserspule und Dissonanzeinstellung

V. Beispiele

Als Unterlage für die Berechnung von Beispielen dient Tabelle I.

Beispiel A

In einem 8-kV-Netz ohne Löserspule mit einer Ausdehnung von 100 km Freileitung und 10 km Gürtelkabel (10 kV, $3 \cdot 50 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$) ist der Erdschlußstrom, sowie $\text{tg } \alpha$ für die Erdwiderstände an der Fehlerstelle von 0 bzw. 500 Ω zu berechnen.

Aus Tabelle I geht hervor:

Maximaler Erdschlußstromanteil der Freileitungsstrecke = $\frac{100}{10} \cdot 0,29 = 2,90 \text{ A}$

Maximaler Erdschlußstromanteil der Kabelstrecke = 5,67 A

Gesamter Erdschlußstrom bei Fehlerwiderstand 0 $\Omega = 8,57 \text{ A}$

Erdschlussdaten von Hochspannungsleitungen pro 10 km Leitungslänge und 50 Hz Netzfrequenz

Tabelle I

Art der Leitung	Kapazitiver Erdschlussstrom im Netz ohne Löserspule bei $R_E = 0$ und 8 kV Netzspannung	Kapazitiver Widerstand pro Phase ($1/\omega C$)
	A	Ω
Freileitung 8 mm \varnothing Cu ¹⁾	0,29	47 800
15-kV-Gürtelkabel 50 mm ² Cu	4,75	2 920
15-kV-Gürtelkabel 70 mm ² Cu	5,40	2 570
10-kV-Gürtelkabel 50 mm ² Cu	5,67	2 450
10-kV-Gürtelkabel 70 mm ² Cu	6,20	2 240
15-kV-Höchstädterkabel 50 mm ² Cu	11,60	1 195
15-kV-Höchstädterkabel 70 mm ² Cu	13,33	1 040
10-kV-Höchstädterkabel 50 mm ² Cu	13,95	994
10-kV-Höchstädterkabel 70 mm ² Cu	15,85	875

¹⁾ Die Angaben gelten für ca. 8 m Höhe der Leiter ab Boden, für andere Drahtdurchmesser weichen sie nur unbedeutend ab.

Da dieser Erdschlußstrom stets dem dreifachen Wert des kapazitiven Stromes pro Phase gegen Erde im Zustand ohne Erdschluss entspricht, wird

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{8000 \cdot 3}{\sqrt{3} \cdot I_E} = \frac{8000 \cdot \sqrt{3}}{8,57} = 1616 \Omega$$

Setzt man in der allgemeinen Formel von I_E , $\omega L = \infty$ ein (Netz ohne Löserspule), und berechnet man den Absolutwert von I_E , so ergibt sich:

$$I_E = \frac{3 E_{30}}{\sqrt{9R_E^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Die Ansätze dieses Beispiels in I_E eingesetzt, wird:

$$I_E = \frac{3 \cdot 8000}{\sqrt{3 \cdot \sqrt{9 \cdot 500^2 + 1616^2}}} = 6,4 \text{ A}$$

$\text{tg } \alpha$ für $R_E = 0 \Omega$ wird gleich 0

Bestimmung von $\text{tg } \alpha$ für $R_E = 500 \Omega$:

$$\text{tg } \alpha = -3R_E \cdot \omega C = -3 \cdot 500 \cdot \frac{1}{1616} = -0,93$$

Beispiel B

In einem 16-kV-Netz steht eine Löserspule in Betrieb, die einen um 10 % grösser eingestellten induktiven Widerstand gegenüber dem Resonanzfall aufweist. Das Netz setze sich zusammen aus total 40 km Höchstädterkabel 15 kV, Leiterquerschnitt $3 \cdot 50 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ und 50 km Freileitung. Wie gross ist der maximale Erdschlußstrom und wie lautet die Beziehung $\text{tg } \alpha$ in Funktion von R_E ?

Der Erdschlußstrom bei Widerstand 0 berechnet sich nach der Formel

$$I_{E \text{ max}} = E_{30} \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

Zu dessen Bestimmung muss man vorerst den kapazitiven Widerstand pro Phase ($1/\omega C$) und den induktiven Widerstand ωL der Löserspule berechnen. Aus Tabelle I ergibt sich ein Erdschlußstrom im ungelöschten Netz von

$$\frac{16}{8} (4 \cdot 11,6 + 5 \cdot 0,29) = 95,7 \text{ A}$$

somit ist

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{16000 \cdot 3}{\sqrt{3} \cdot 95,7} = 289 \Omega$$

Für die Resonanzabstimmung der Löserspule wäre

$$\omega L = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\omega C} = 96,33 \Omega$$

Nun ist aber im Beispiel die Löserspule um 10 % verstimmt, d. h.

$$\omega L = 1,1 \cdot 96,33 = 106 \Omega$$

Somit wird:

$$I_{E_{max}} = \frac{16\,000}{\sqrt{3}} \left(\frac{3}{289} - \frac{1}{106} \right) = 8,6 \text{ A}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \left(\frac{1}{\omega L} - 3\omega C \right) R_E = \left(\frac{1}{106} - \frac{3}{289} \right) R_E = -0,00093 R_E$$

Mit diesen Angaben lassen sich die Ortskurven der elektromotorischen Kräfte und des Erdschlußstromes im Erdschlussfall auf einfache Art konstruieren.

VI. Schlussbemerkungen

Es empfiehlt sich, den maximalen Erdschlussstrom eines Hochspannungsnetzes durch Berechnung oder direkte Messung periodisch zu überprüfen. Für die direkte Messung des maximalen Erdschlussstromes in Netzen ohne Löschspule schaltet man am besten kurzzeitig mittels eines Leistungsschalters einen einpoligen Erdschluss über einen niederohmigen Erdwiderstand ein. In Netzen mit Löschspulen kann der Erdschlußstrom indirekt gemessen werden, indem man im erdschlussfreien Netz die Löschspule verstellt und bei jeder Einstellung die Spannung an der meistens vorhandenen, sekundären Messwicklung der Löschspule misst. Man erhält auf diese Art eine Resonanzkurve. Die Löschspuleneinstellung im Punkte der maximalen Spannung an

der Messwicklung entspricht der Resonanzeinstellung, d. h. die StromEinstellung der Löschspule in diesem Punkt (ersichtlich an der Stellungsanzeige der Spule) ist mit dem maximalen Erdschlußstrom identisch.

Bei der Messung des maximalen Erdschlussstromes muss man sich bewusst sein, dass je nach dem Oberwellengehalt der Netzspannung (verschieden je nach dem Belastungszustand des Netzes) im Erdschlußstrom auch Anteile höherer Harmonischer enthalten sind. Bei der 50-Hz-Resonanzabstimmung einer Löschspule kommt dies am deutlichsten zum Ausdruck. Nimmt man z. B. an, in einem Hochspannungsnetz mit 50 A maximalem Erdschlußstrom bei ausgeschalteter Löschspule betrage die 5. Harmonische (250 Hz) in der Netzspannung 3 % der Grundwelle, so macht der 250-Hz-Reststrom $0,03 \cdot 50 \frac{250}{50} = 7,5 \text{ A}$ aus. Je nach den vorliegenden Verhältnissen müssen daher zur Unterdrückung oder Kompensation des Oberwellen-Erdschlußstromes besondere Massnahmen ergriffen werden.

Adresse des Autors:

Jakob Wild, Betriebsleiter, Regensdorferstr. 160, Zürich 10/49.

Die Entwicklung der elektrischen Grossküche in der Schweiz im Jahre 1952

Vom Sekretariat des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes, Zürich (M. Gerber-Lattmann)

31 : 621.364.5 (494)

Im Jahre 1952 wurden 388 neue elektrische Grosskochenanlagen gemeldet, deren Verteilung auf die viererlei Standorte in Tabelle I angegeben ist. Die eigentlichen Küchen haben in allen drei Kategorien zugenommen; in Metzgereibetrieben wurden

Gliederung der im Jahre 1952 neu in Betrieb genommenen Grossküchen nach ihren Standorten

Tabelle I

Standort	Neue Anschlüsse 1952		Total Anschlüsse Ende 1952	
	Zahl	Anschlusswert kW	Zahl	Anschlusswert kW
Hotels und Restaurants	227	6 884	3 580	121 393
Öffentliche Anstalten .	112	4 345	1 980	77 836
Spitäler	22	1 079	472	25 113
Gewerbliche Betriebe . (Metzgereien usw.)	27	1 112	792	23 592
Total	388	13 420	6 824	247 934

weniger als im Vorjahre¹⁾, aber etwa gleich viel wie 1949 und 1950 gezählt, allerdings mit einem wesentlich höheren Gesamtanschlusswert als damals. Auch die Totalzahl (388 Anlagen) ist höher als diejenige der letzten drei Jahre, dagegen ist der Totalanschlusswert verhältnismässig geringer. Der

durchschnittliche Anschlusswert der 1952 eingerichteten Anlagen beträgt 34,6 kW gegenüber rund 43 kW für 1951; er ist auch etwas geringer, als derjenige sämtlicher bisher angeschlossener Anlagen, der auf Ende 1952 mit 36,33 kW im Rahmen des seit 1945 zwischen 36,0 und 36,6 kW variierenden Durchschnittes der jeweils summierten Jahreszahlen bleibt. Seit 1945 variiert der Durchschnitt aller bisher notierten Anschlüsse für Hotel- und Restaurant-Küchen zwischen 32,8 und 34,2 kW (33,9 kW auf Ende 1952), für Küchen in öffentlichen Anstalten zwischen 38,8 und 41,7 kW (39,3 kW Ende 1952), für Spitalküchen zwischen 50,6 und 53,4 kW (53,2 kW Ende 1952), für Metzgereianlagen zwischen 28,5 und 31,9 kW (28,5 kW Ende 1952). Da in den einzelnen Jahreszahlen auch der zusätzliche Anschlusswert von erweiterten und ausgebauten Küchen berücksichtigt wird, ohne dass diese als Anlagen neu gezählt werden, sind die Jahresdurchschnitte unecht; ein getreueres Bild gibt der erwähnte Durchschnitt aller Jahre.

Man kann wohl annehmen, dass die seit 1920 summierten Zahlen mindestens den heutigen Bestand darstellen, auch wenn verschiedene Anlagen nicht mehr bestehen sollten, da nicht alle Neueinrichtungen von der Statistik erfasst werden können.

¹⁾ vgl. Bull. SEV Bd. 44(1953), Nr. 1, S. 12.