

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 28 (1937)
Heft: 25

Artikel: Die Ortskurven der elektromotorischen Kräfte der Polleiter gegen Erde und der Erdschlussströme für erdschlussbehaftete Drehstrom-Hochspannungsnetze mit isoliertem Sternpunkt
Autor: Wild, Jakob
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059895>

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>

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

ADMINISTRATION:
Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Telephon 51.742
Postcheck-Konto VIII 8481

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

XXVIII. Jahrgang

N° 25

Mittwoch, 8. Dezember 1937

Die Ortskurven der elektromotorischen Kräfte der Polleiter gegen Erde und der Erdschlußströme für erdschlussbehaftete Drehstrom- Hochspannungsnetze mit isoliertem Sternpunkt.

Von Jakob Wild, Zürich.

621.3.014.7

Der einpolige Erdschluss in Drehstrom-Hochspannungsnetzen mit isoliertem Sternpunkt und mittlerer Betriebsspannung wird behandelt. In Ortskurven sind in Funktion der Widerstände an der Erdschlußstelle die Erdschlußströme und die Polleiter-EMKE gegen Erde für den am häufigsten vorkommenden direkten und für einen Spezialfall eines indirekten Erdschlusses dargestellt. Ferner wird gezeigt, dass im Netz angeschlossene Hochspannungs-Elektroheizkessel den Erdschlußstrom sehr stark erhöhen können und auf welche Art dieser unerwünschte Erdschlußstrom zeitlich beschränkt werden kann. Auf die Beeinflussung der Erdschluss-Prüfvorrichtung im speisenden Unterwerk durch solche angeschlossenen Elektroheizkessel wird aufmerksam gemacht. Alle entwickelten Ortskurven haben für die 8-kV-Netze der EKZ Gültigkeit, können aber durch einfache Umrechnungen auch für andere Netze Anwendung finden.

L'auteur étudie les courts-circuits unipolaires à la terre dans les réseaux triphasés à point neutre isolé et à moyenne tension d'exploitation. Par des lieux géométriques il représente les courants de court-circuit à la terre et les f. é. m. des conducteurs de pôle par rapport à la terre en fonction des résistances à l'endroit du défaut, et cela pour le cas le plus fréquent du court-circuit franc ainsi que pour un cas spécial de court-circuit indirect. Il montre en outre que des chaudières électriques à haute tension peuvent élever considérablement le courant de court-circuit et indique un moyen de réduire la durée de ce courant intempesif. Il rend finalement attentif à l'influence qu'exercent ces chaudières sur les dispositifs de contrôle des mises à la terre dans les sous-stations alimentant le réseau. Les lieux géométriques représentées sont valables pour le réseau à 8 kV des EKZ, mais on peut facilement les adapter à d'autres réseaux par une simple transformation mathématique.

Einleitung.

Das Erdschlussproblem in Hochspannungsdrehstromanlagen und die damit verbundenen Spannungsverlagerungen gehören zu den ältesten Erkenntnissen der Elektrotechnik. Die meisten Autoren lösten diese dreiphasigen Probleme der einfachen Berechnung wegen durch Einführung eines einphasigen Ersatzschemas, beschränkten sich aber grösstenteils auf die Berechnung der bei Erdschluss maximal auftretenden Spannung eines Polleiters gegen Erde, um in der Hauptsache die Beanspruchung der Anlageisolation durch solche Ueberspannungen kennenzulernen. Der Einfluss des Erdungswiderstandes an der Erdschlußstelle wurde meistens ausser acht gelassen.

Es dürfte aber von Interesse sein, einerseits von allen drei Polleiterspannungen gegen Erde Grösse und Richtung zu kennen, um z. B. die Erdschlussbilder einer Erdschlussprüfung (die aus drei gegen Erde über Spannungswandler an die Polleiter angeschlossenen Voltmeter bestehen kann) zu verstehen und andererseits den an der Erdschlußstelle fliessenden sogenannten «Erdschlußstrom» in Abhängigkeit des Erdungswiderstandes für verschiedene Erdschlussarten berechnen zu können. Die Kenntnis des Erdschlußstromes und speziell seine maximal mögliche Grösse ist sehr wichtig, wenn man zum Beispiel an die an der Erdschlußstelle

unter Umständen stundenlang auftretende grosse Spannung gegen absolute Erde denkt. Diese Spannungen können an normalerweise nicht unter Spannung stehenden, geerdeten Objekten auftreten und können Personen und Sachen gefährden (Gittermasten, Schutzerdung einer Transformatorenstation, Nulleiter eines Sekundärnetzes etc.). Ausserdem können an der Erdschlußstelle ebenfalls hohe Schrittspannungen entstehen, welche Menschen und Tieren gefährlich sein können. Diese kurzen Hinweise zeigen, wie wichtig für den Betriebsleiter die Kenntnis des Erdschlußstromes seiner Netze ist.

Unter dem «Erdschlußstrom» eines Netzes versteht der Techniker in der Regel den bei einem direkten Erdschluss eines Polleiters über die widerstandslos angenommene Erdschlußstelle fliessenden Strom. Die folgenden Ausführungen werden allerdings zeigen, dass dies nicht der maximal mögliche Erdschlußstrom ist, dass bei bestimmten andern einpoligen Erdschlussarten im gleichen Netz bedeutend grössere Erdschlußströme auftreten können. Es soll hier die Aufgabe gelöst werden, vorerst die Grösse des Erdschlußstromes für verschiedene Netzausdehnungen und Netzspannungen für den soeben erwähnten einfachsten Fall eines Erdschlusses zu berechnen und nachher für einige weitere einpolige Erdschlussarten die Ortskurven der Polleiter-

EMKe gegen Erde und andererseits die Ortskurven der Erdschlußströme zu entwickeln. In den Berechnungen wird immer mit elektromotorischen Kräften (EMKe), nicht mit Spannungen gerechnet. Die abgeleiteten Formeln haben bei Beachtung der gemachten Voraussetzungen allgemeine Gültigkeit; die Ortskurven dagegen sind für die speziellen Verhältnisse bei den Elektrizitätswerken des Kantons Zürich (EKZ) berechnet (Netzspannung 8 kV, «Erdschlußstrom» ca. 5 A). In einem Schlusskapitel werden noch interessante Erdschlussverhältnisse in Netzen mit angeschlossenen Hochspannungselektrokesseln behandelt.

Bei sämtlichen hier besprochenen Problemen wurden folgende Voraussetzungen und Vernachlässigungen gemacht:

1. Frequenz 50/s.
2. Die Stern-EMKe der das Netz speisenden Transformatoren seien symmetrisch.
3. Die Kapazitäten der drei Polleiter gegen Erde seien einander gleich. Diese Annahme ist in der Praxis zulässig, da der Drahtdurchmesser der Freileitungen im Verhältnis zum Leiterabstand vom Erdboden klein ist. Die Abweichung der drei Kapazitäten infolge ungleicher Höhe der Leiter vom Erdboden beträgt genau genommen nur ca. 1...2 %.
4. Die Kapazitäten der Polleiter gegen Erde werden konzentriert angenommen.
5. Da die Widerstände der Primärleitungen gegenüber den Erdungs- und Wicklungswiderständen der Transformatoren sehr klein sind, werden sie vernachlässigt.
6. Der Ableitungsstrom der Primärleitungen, der eine Erhöhung des Erdschlußstromes zur Folge hat, wird nicht berücksichtigt, da er für Hochspannungsfreileitungen mittlerer Betriebsspannung erfahrungsgemäss nur einige Prozent des kapazitiven Erdschlußstromes ausmacht.
7. Die Beeinflussung des Erdschlußstromes durch Oberflächen wird nicht berücksichtigt.

I. Die Berechnung des Erdschlußstromes bei direktem Erdschluss einer Phase und widerstandsloser Erdschlußstelle.

Normalerweise fließen im erdschlussfreien Netz in den drei an den Sternspannungen liegenden Polleiterkapazitäten gegen Erde drei sich im Erdboden zu Null ergänzende Ströme. Tritt ein direkter Erdschluss im Netz auf, so wird eine Leiterkapazität kurzgeschlossen, während die beiden übrigen

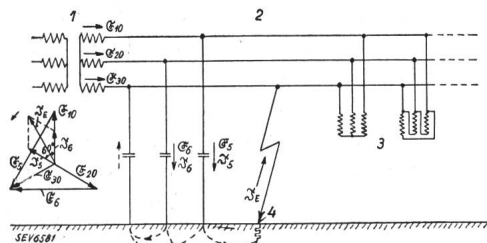


Fig. 1.

1 Haupttransformator. 2 Verteilleitung. 3 Ortstransformatoren. 4 Erdschlußstelle.

Kapazitäten an die verkettete Netzspannung gelegt werden. Die beiden kapazitiven Ströme der gesunden Phasen setzen sich geometrisch unter einem Winkel von 60° zum Erdschlußstrom zusammen, der über die Erdschlußstelle zum speisenden Transformator zurückfließt (Fig. 1).

Der Erdschlußstrom kann also auf einfache Weise durch Berechnung der Kapazität eines Polleiters gegen Erde und Annahme eines Widerstandes Null an der Erdschlußstelle bestimmt werden. Die Kapazität eines Polleiters gegen Erde setzt sich im allgemeinen aus drei Teilen zusammen.

a) Kapazität der Freileitungstrecken gegen Erde.

Der kapazitive Widerstand pro Polleiter gegen Erde berechnet sich zu:

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \cdot \frac{2h}{r}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot l} \text{ Ohm}$$

- h Abstand des Leiters vom Erdboden (cm).
- r Radius des Leiters (cm).
- l Länge der Leitung (km).

Als Beispiel sind für die Verhältnisse der EKZ-Netze in Fig. 2 die kapazitiven Widerstände eines Polleiters gegen Erde in Abhängigkeit der Netzausdehnung angegeben; ferner ist der Erdschlussstrom, unter Annahme einer Betriebsspannung von 8,4 kV, dargestellt. Aus dieser Figur ist unter an-

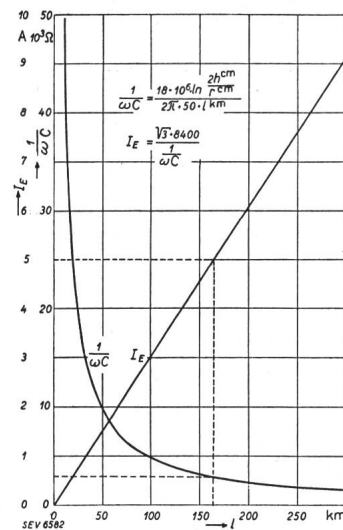


Fig. 2.

Kapazitiver Widerstand pro Phase und Erdschlußstrom für 8-kV-Drehstromleitungen mit 8 mm Leiterdurchmesser und 8 m Abstand vom Erdboden, in Abhängigkeit der Stranglänge.

dem ersichtlich, dass 164 km Freileitung ca. 5 A Erdschlußstrom entsprechen. Erdschlußströme für Netze anderer Betriebsspannung, aber denselben Leitungsdimensionen (mittlerer Leiterabstand ab Erdboden ca. 8 m, Drahtdurchmesser 8 mm) können durch Umrechnung im Verhältnis der Betriebsspannungen erhalten werden, da die Erdschlussströme direkt proportional der Betriebsspannung sind.

b) Kapazitäten in Kabelstrecken.

Da die Kabel viel grössere Kapazitäten der Polleiter gegen Erde als Freileitungen besitzen, sind diese Verhältnisse für 8,4 kV Betriebsspannung und Kabeltypen von 10 und 15 kV bei 50 und 70 mm² Querschnitt in Fig. 3 dargestellt. Die metallisierten, sogenannten Höchststätterkabel haben beträchtlich grössere Kapazitäten als die normalen Gürtelkabel. Aus Fig. 3, im Vergleich mit Fig. 2, ist ersichtlich, welchen Hauptanteil wenige km Kabelstrecke auf den totalen Erdschlußstrom haben, im

Gegensatz zu Freileitungen. Gürtelkabel haben ca. den 18fachen, metallisierte Kabel sogar den ca. 45fachen Erdschlußstrom eines Freileitungsstückes gleicher Länge. In Netzen mit Kabeln muss deshalb

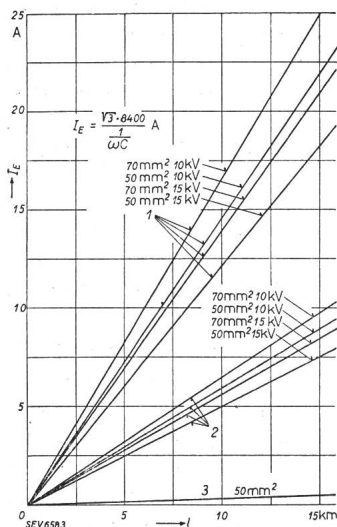


Fig. 3.

Erdschlußstrom in 8 kV in Funktion der Kabellänge für Drehstromkabel der gebräuchlichen Ausführungen. Netzspannung = 8,4 kV.
 1 Höchstständer (metallisiert).
 2 Gürtelkabel (rund und Sektor).
 3 Freileitung.

dem Erdschlußstrom ganz besondere Beachtung geschenkt werden, eventuell muss dieser durch Einbau von Löschspulen in erträglichen Grenzen gehalten werden.

c) Kapazitäten der Ortstransformatorenwicklungen gegen Erde.

Der durch die Kapazitäten der Transformatorenwicklungen eines Ortstransformators hervorgerufene Anteil des Erdschlußstromes liegt nach Messungen an einem 80-kVA-Transformator (8,4 kV) in der Größenordnung einiger mA. Der Anteil aller Ortstransformatoren am Erdschlußstrom eines Unterwerkes kann also besonders in Netzen mit Kabelstrecken ruhig vernachlässigt werden.

Im folgenden Kapitel wird der direkte Erdschluss einer genauern Betrachtung unterzogen und speziell die Aenderung des Erdschlußstromes mit dem Erdungswiderstand an der Erdschlußstelle berechnet.

II. Der direkte Erdschluss über ohmschen Widerstand.

Ein direkter Erdschluss liegt vor, wenn ein Polleiter ohne Bruch des Leiters Erdschluss hat

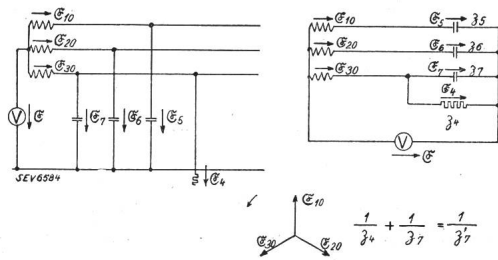


Fig. 4.

Direkter Erdschluss über ohmschen Widerstand.

(Fig. 4). Eine zweite Art eines direkten Erdschlusses liegt vor, wenn ein Polleiter bricht und dessen Unterwerk-seitiges Ende den Erdboden berührt.

Kann in diesem Falle die Kapazität des netzseitigen Endes des unterbrochenen Polleiters als sehr klein angenommen werden (Erdschluss in der Nähe des Strangendes), so kann auch dieses Erdschlussproblem nach demselben Ersatzschema berechnet werden.

Im Schema bedeuten:

- $\mathcal{E}_{10}, \mathcal{E}_{20}, \mathcal{E}_{30}$ die drei Stern-EMKe der das Netz speisenden Unterwerkstransformatoren.
- $\mathcal{E}_5, \mathcal{E}_6, \mathcal{E}_7$ die drei Polleiter-EMKe gegen Erde.
- $\mathcal{E}_4 = \mathcal{E}_7$ die EMK an der Erdschlußstelle.
- \mathcal{E} die EMK zwischen dem Nullpunkt des Unterwerkstransformators und der Erde absolut.
- $\delta_5, \delta_6, \delta_7 = j \frac{1}{\omega C}$ die kapazitiven Widerstandsoperatoren pro Polleiter gegen Erde.
- $\delta_4 = -R_4$ Widerstandsoperator des Erdungswiderstandes.
- \mathcal{S}_4 Erdschlußstrom.

Ist \mathcal{E} bekannt, so ist das ganze Vektordiagramm der EMKe und der Ströme bestimmt.

Berechnung von \mathcal{E} .

Es gelten folgende Gleichungen:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_5 &= \delta_5 \cdot \mathcal{S}_5 & (1) \\ \mathcal{E}_6 &= \delta_6 \cdot \mathcal{S}_6 & (2) \\ \mathcal{E}_7 &= \delta_7' \cdot \mathcal{S}_7' & (3) \\ \mathcal{S}_5 + \mathcal{S}_6 + \mathcal{S}_7' &= 0 & (4) \\ \mathcal{E}_{10} + \mathcal{E}_5 - \mathcal{E}_6 - \mathcal{E}_{20} &= 0 & (5) \\ \mathcal{E}_{10} + \mathcal{E}_5 - \mathcal{E}_7 - \mathcal{E}_{30} &= 0 & (6) \end{aligned}$$

Gl. (1), (2) und (3) in Gl. (4) eingesetzt ergibt

$$\frac{\mathcal{E}_5}{\delta_5} + \frac{\mathcal{E}_6}{\delta_6} + \frac{\mathcal{E}_7}{\delta_7'} = 0.$$

Aus Gl. (5) \mathcal{E}_6 berechnet, ergibt:

$$\mathcal{E}_6 = \mathcal{E}_{10} + \mathcal{E}_5 - \mathcal{E}_{20}$$

Aus Gl. (6) wird:

$$\mathcal{E}_7 = \mathcal{E}_{10} + \mathcal{E}_5 - \mathcal{E}_{30}$$

Gl. für \mathcal{E}_6 und \mathcal{E}_7 eingesetzt, ergibt:

$$\frac{\mathcal{E}_5}{\delta_5} + \frac{\mathcal{E}_{10}}{\delta_6} + \frac{\mathcal{E}_5}{\delta_6} - \frac{\mathcal{E}_{20}}{\delta_6} + \frac{\mathcal{E}_{10}}{\delta_7'} + \frac{\mathcal{E}_5}{\delta_7'} - \frac{\mathcal{E}_{30}}{\delta_7'} = 0.$$

Daraus:

$$\mathcal{E}_5 = \frac{\frac{\mathcal{E}_{20}}{\delta_6} + \frac{\mathcal{E}_{30}}{\delta_7'} - \frac{\mathcal{E}_{10}}{\delta_6} - \frac{\mathcal{E}_{10}}{\delta_7'}}{\frac{1}{\delta_5} + \frac{1}{\delta_6} + \frac{1}{\delta_7'}}$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{10} + \mathcal{E}_5 =$$

$$\frac{\mathcal{E}_{10} \delta_6 \cdot \delta_7' + \mathcal{E}_{20} \delta_5 \cdot \delta_7' + \mathcal{E}_{30} \delta_5 \cdot \delta_6}{\delta_6 \cdot \delta_7' + \delta_5 \cdot \delta_7' + \delta_5 \cdot \delta_6} \quad \left| \begin{aligned} \mathcal{E}_{10} &= (-0,5 - 0,866j) \cdot \mathcal{E}_{30} \\ \mathcal{E}_{20} &= (-0,5 + 0,866j) \cdot \mathcal{E}_{30} \end{aligned} \right.$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{30} \cdot \frac{\delta_5 \cdot \delta_6 - 0,5 \cdot \delta_6 \cdot \delta_7 - 0,5 \cdot \delta_5 \cdot \delta_7 + j 0,866 \cdot (\delta_5 \cdot \delta_7 - \delta_6 \cdot \delta_7)}{\delta_6 \cdot \delta_7 + \delta_5 \cdot \delta_7 + \delta_5 \cdot \delta_6}$$

$$\delta_5 = \delta_6 = \delta$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{30} \frac{\delta^2 - \delta \cdot \delta_7}{\delta^2 + 2 \delta \cdot \delta_7} = \mathcal{E}_{30} \frac{\delta - \delta_7}{\delta + 2 \cdot \delta_7}$$

$$\delta = j \frac{1}{\omega C_5} = j \frac{1}{\omega C_6} = j \frac{1}{\omega C}$$

$$\delta_7 = \frac{\delta_4 \cdot \delta_7}{\delta_4 + \delta_7} = \frac{-j R_4 \cdot \frac{1}{\omega C_7}}{-R_4 + j \frac{1}{\omega C_7}}$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{30} \frac{-\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}{-\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2 - j \cdot 3 \cdot R_4 \frac{1}{\omega C}}$$

$$= \mathcal{E}_{30} \frac{1}{-\frac{1}{\omega C} - j \cdot 3 \cdot R_4}$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{30} \frac{\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2 - j \cdot 3 \cdot R_4 \frac{1}{\omega C}}{9 \cdot R_4^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Für eine bestimmte Netzausdehnung bewegt sich die Spitze des Vektors \mathcal{E} in Funktion des ohmschen Widerstandes an der Erdschlußstelle auf einem über \mathcal{E}_{30} geschlagenen Halbkreis (Fig. 5). Die Spitze

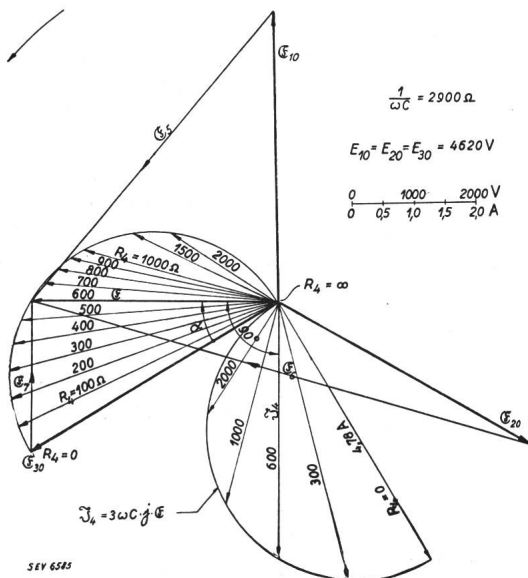
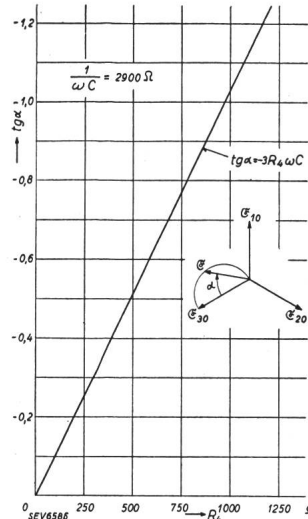


Fig. 5. Direkter Erdschluss über ohmschen Widerstand. Ortskurve der Spitzen von \mathcal{E} und \mathcal{J} .

dieses Vektors ist gleichbedeutend mit dem Erdpunkt. Das aufgezeichnete Diagramm gilt für ein 8-kV-Netz mit 5 A «Erdschlußstrom» ($\frac{1}{\omega C} = 2900$

Ohm). Will man für einen bestimmten Erdungswiderstand \mathcal{E} einzeichnen, so trägt man am einfachsten den Winkel α von \mathcal{E}_{30} aus ab, dessen Grösse sich aus der Gleichung für \mathcal{E} bestimmt zu:



$$\text{tg } \alpha = -3 \cdot R_4 \cdot \omega C$$

Durch den Schnittpunkt dieses Winkelstrahls mit dem Halbkreis erhält man die Spitze von \mathcal{E} . Für ein Netz mit 5 A «Erdschlußstrom» ist $\text{tg } \alpha$ in Abhängigkeit des ohmschen Widerstandes an der Erdschlußstelle auf Fig. 6 aufgezeichnet.

Fig. 6. Direkter Erdschluss über ohmschen Widerstand. Bestimmung des Winkels α .

Der Erdschlußstrom \mathcal{J}_4 ist in Fig. 5 ebenfalls als Ortskurve dargestellt; er eilt dem

EMK-Vektor \mathcal{E} immer um 90° voraus, wie folgende Ableitung zeigt.

Es gilt die Gleichung:

$$\mathcal{J}_4 = -\mathcal{J}_5 - \mathcal{J}_6 - \mathcal{J}_7 = j\omega C \mathcal{E}_5 + j\omega C \mathcal{E}_6 + j\omega C \mathcal{E}_7 = j\omega C (\mathcal{E}_5 + \mathcal{E}_6 + \mathcal{E}_7)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_5 &= -\mathcal{E}_{10} + \mathcal{E} \\ \mathcal{E}_6 &= -\mathcal{E}_{20} + \mathcal{E} \\ \mathcal{E}_7 &= -\mathcal{E}_{30} + \mathcal{E} \end{aligned}$$

$$\mathcal{J}_4 = j\omega C \cdot \underbrace{(-\mathcal{E}_{10} - \mathcal{E}_{20} - \mathcal{E}_{30} + 3 \cdot \mathcal{E})}_{=0} = j \cdot 3 \cdot \frac{1}{\omega C} + 9 \cdot R_4 \mathcal{E} = j \cdot 3 \cdot \omega C \cdot \mathcal{E} = \mathcal{E}_{30} \cdot \frac{j \cdot 3 \cdot \frac{1}{\omega C} + 9 \cdot R_4}{9 \cdot R_4^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Der Absolutwert des Erdschlußstromes bestimmt sich zu:

$$I_4 = \frac{E_{30}}{9 \cdot R_4^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \sqrt{9 \cdot \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2 + 81 \cdot R_4^2} = \frac{3 \cdot E_{30}}{\sqrt{9 \cdot R_4^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Aus der Ortskurve von \mathcal{E} ist ersichtlich, dass E_7 Werte zwischen Null und der Phasen-EMK, E_5 solche zwischen ca. 82 % der Phasen-EMK und der verketteten EMK, und E_6 solche zwischen der Phasen-EMK und der ca. 1,05fachen verketteten EMK des Netzes annehmen können. Die in Fig. 5 aufgezeichneten Ortskurven können auf einfache Art

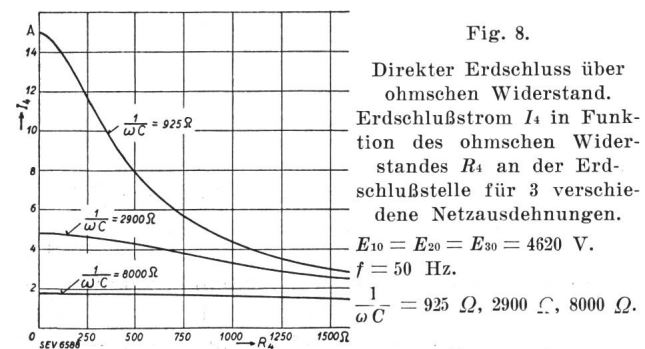
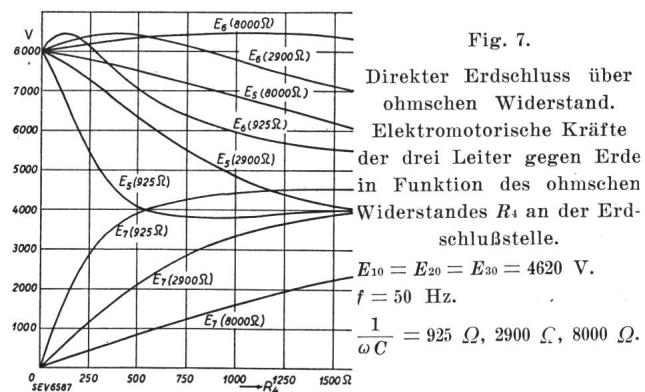
auch für andere Netzspannungen und Netzausdehnungen, bei Beachtung der folgenden Zusammenhänge, verwendet werden.

1. Alle EMKe und Ströme sind proportional der Betriebsspannung des Netzes.
2. Die EMK \mathcal{E} und damit auch die EMKe $\mathcal{E}_5, \mathcal{E}_6$ und \mathcal{E}_7 haben dieselbe Grösse und Richtung, wenn sich die Widerstände $\frac{1}{\omega C}$ und R_4 bei gleicher Netzspannung im selben Verhältnis verändern.
3. Der Erdschlußstrom \mathfrak{I}_4 ist bei konstanter Netzspannung und konstantem Vektor \mathcal{E} direkt proportional der Netzausdehnung (Leitfähigkeit ωC).

Beispiel.

Es sollen die Ortskurven für ein 8-kV-Netz mit einem kapazitiven Widerstand pro Polleiter gegen Erde von $\frac{1}{\omega C} = 1450 \text{ Ohm}$ (Netzausdehnung = ca. 328 km, bei Freileitung) konstruiert werden. Um nicht aus den abgeleiteten Gleichungen von \mathcal{E} und \mathfrak{I}_4 die Ortskurven konstruieren zu müssen, können dieselben Ortskurven wie in Fig. 5 gebraucht werden, nur mit der Aenderung, dass erstens die eingeschriebenen Werte der Widerstände \mathfrak{R}_4 mit $\frac{1450}{2900} = 0,5$ multipliziert werden müssen, und zweitens der Strommaßstab von $1 \text{ mm} = 0,125 \text{ A}$ in $1 \text{ mm} = 0,125 \cdot \frac{2900}{1450} = 0,25 \text{ A}$ zu ändern ist.

Um den Einfluss der Ausdehnung eines 8-kV-Netzes auf die Grösse der Polleiter-EMKe gegen Erde für bestimmte Erdungswiderstände zu zeigen, stellt Fig. 7 diese Verhältnisse für Netze mit kapazitiven Widerständen der Polleiter gegen Erde von $\frac{1}{\omega C} = 8000, 2900$ und $925 \text{ }\Omega$ dar (z. B. Freileitungsnetze von ca. 60, 164 und 520 km Ausdehnung, wie aus Fig. 2 ersichtlich). Fig. 8 stellt für die angenommenen Netzdaten den Erdschlußstrom in Abhängigkeit des ohmschen Widerstandes \mathfrak{R}_4 dar.



Im Erdschlusskreis können aber auch ausser ohmschen noch induktive Widerstände liegen. Diese Erdschlussart soll im nächsten Abschnitt behandelt werden.

III. Der direkte Erdschluss über ohmschen und induktiven Widerstand.

Dieser Fall kann dann auftreten, wenn ein primär in Stern geschalteter Ortstransformator in einer Primärphase (im Grenzfall am Nullpunkt der Primärwicklung, Nullpunktschalter) einen Erdschluss besitzt und in diesem Zustande polweise ans Netz geschaltet ist (Fig. 9).

Dieser Zustand kann vorkommen, wenn am defekten Transformator zwei Primärsicherungen durchgeschmolzen, oder wenn der Transformator in defektem Zustande polweise zugeschaltet wird. Beim Einschalten der ersten Phase tritt ein direk-

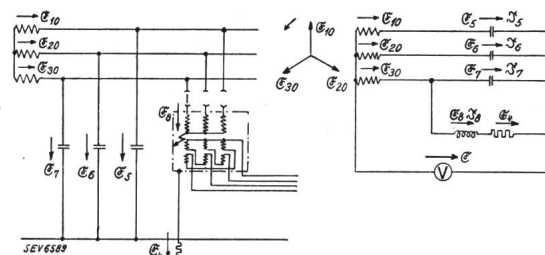


Fig. 9.

Direkter Erdschluss über ohmschen und induktiven Widerstand.

$$\mathfrak{I}_5 = \mathfrak{I}_6 = \mathfrak{I}_7 = j \frac{1}{\omega C} \quad \mathfrak{I}_4 = -R_4 \quad \mathfrak{I}_8 = -j \omega L_8$$

$$\mathfrak{I}' = \frac{\mathfrak{I}_7 (\mathfrak{I}_4 + \mathfrak{I}_8)}{\mathfrak{I}_7 + \mathfrak{I}_4 + \mathfrak{I}_8} = \frac{\frac{\omega L_8}{\omega C} - j \frac{R_4}{\omega C}}{j \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L_8 \right) - R_4}$$

ter Erdschluss über eine Phasenwicklung des Transformators und die Schutzerdung der Transformatorstation auf. Wird der Transformator im Leerlauf angenommen, so kann unter Berücksichtigung der Transformator-Verluste die Phasenwicklung im Ersatzschema durch eine Serieschaltung einer Induktivität und eines die Verluste darstellenden ohmschen Widerstandes dargestellt werden.

Wegen des eisenhaltigen Transformators muss mit stromabhängigen ohmschen und induktiven Widerständen gerechnet werden. Bezeichnet man mit ωL_8 den induktiven Widerstand der Transformatorwicklung, und mit R_4 den ohmschen Widerstand an der Erdschlußstelle (Schutzerdung der Transformatorstation + Verlustwiderstand des Transformators), so ergibt eine Berechnung der EMK \mathcal{E} nach dem Ersatzschema Fig. 9 den folgenden Ausdruck:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{30} \cdot \frac{1}{3 \omega L_8 - \frac{1}{\omega C} - 3 j R_4} = \mathcal{E}_{30} \cdot \frac{\left(\frac{1}{\omega C} \right)^2 - 3 \frac{\omega L_8}{\omega C} - j \cdot 3 R_4 \cdot \frac{1}{\omega C}}{9 (\omega L_8)^2 - 6 \frac{\omega L_8}{\omega C} + \left(\frac{1}{\omega C} \right)^2 + 9 \cdot R_4^2}$$

Dieser Ausdruck wurde erhalten durch Einsetzung der entsprechenden Widerstandsoperatoren in die bereits im Falle des gewöhnlichen direkten Erdschlusses über rein ohmschen Widerstand berechnete allgemeine Formel:

$$\mathfrak{E} = \mathfrak{E}_{30} \frac{3 - 3'}{3 + 2 \cdot 3'}$$

Für einige Spezialfälle, die das Aufzeichnen der Ortskurven sehr erleichtern, gelten die folgenden Beziehungen:

1. $R_4 = 0 : \mathfrak{E} = \mathfrak{E}_{30} \frac{1}{3 \omega L_8 - \frac{1}{\omega C}}$

2. $\omega L_8 = 0 : \mathfrak{E} = \mathfrak{E}_{30} \frac{1}{-\frac{1}{\omega C} - 3jR_4}$

3. $\omega L_8 = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\omega C}$ (Resonanzfall) : $\mathfrak{E} = j \cdot \mathfrak{E}_{30} \frac{1}{3 \cdot \omega C \cdot R_4}$

$$\text{tg } \alpha = \frac{3 \cdot R_4}{3 \omega L_8 - \frac{1}{\omega C}} \quad \text{tg } \alpha = \infty,$$

$$\alpha = 90^\circ \text{ für } 3 \omega L_8 = \frac{1}{\omega C} \text{ (Resonanz).}$$

Die diesbezüglichen Ortskurven der EMKe \mathfrak{E} , \mathfrak{E}_5 , \mathfrak{E}_6 und \mathfrak{E}_7 sind in Fig. 10 für ein 8-kV-Netz mit 5 A «Erdschlußstrom» aufgezeichnet. Darin sind einerseits Ortskurven für konstant angenommenen ohmschen Widerstand R_4 und variable Induktivität L_8 und andererseits konstante Induktivität und variable ohmsche Widerstände dargestellt. Aus der Fig. ist ersichtlich, dass die Polleiter-EMKe gegen Erde theoretisch ganz bedeutende Werte annehmen könnten. Am grössten werden dieselben bei Resonanz, wenn $\omega L_8 = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\omega C}$ und der Widerstand R_4 klein werden. (Die EMKe würden unendlich hohe Werte annehmen, wenn R_4 Null wäre.) In Wirklichkeit sind aber dem allzu hohen Ansteigen dieser EMKe Grenzen gesetzt. Einerseits wegen dem sehr rasch ansteigenden Magnetisierungsstrom der Transfor-

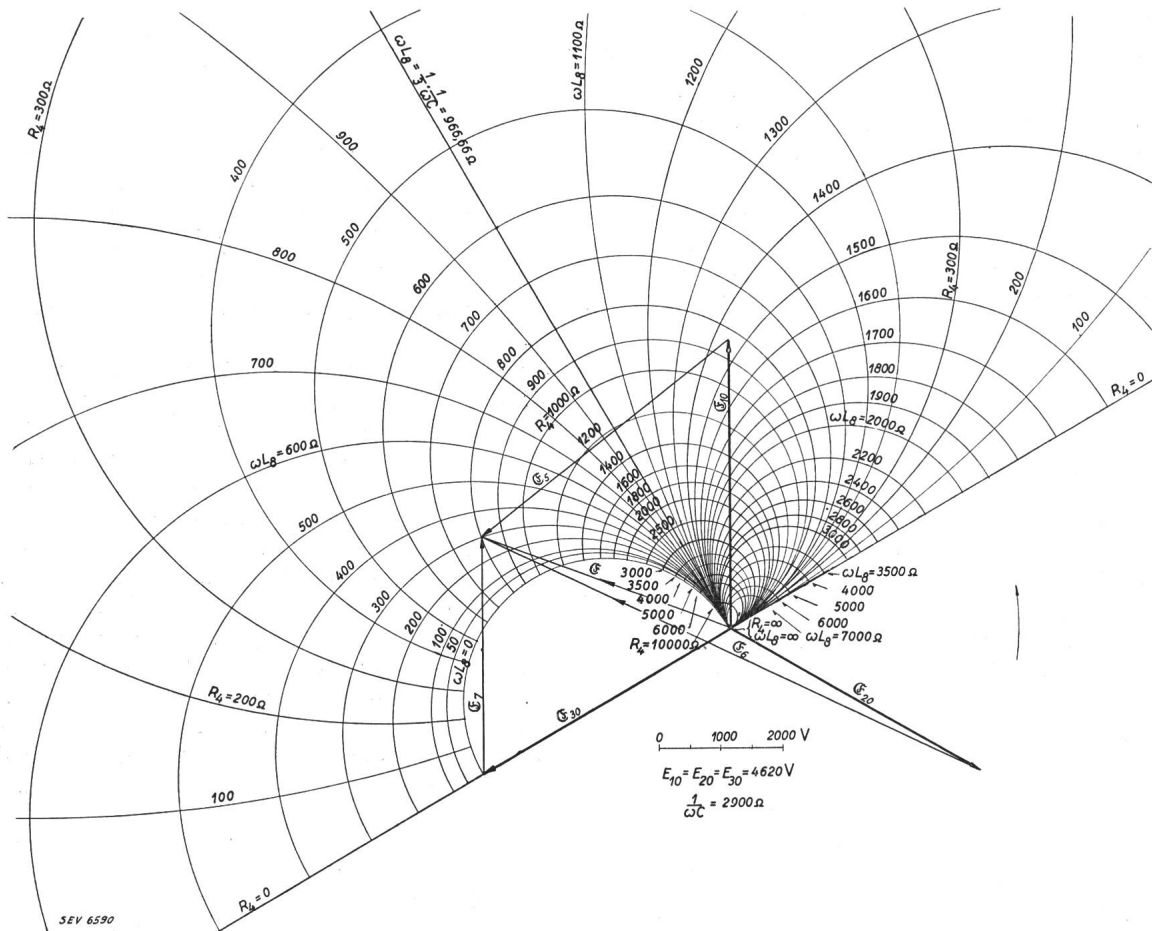


Fig. 10. Direkter Erdschluss über ohmschen und induktiven Widerstand. Ortskurven der Polleiter-EMKe gegen Erde.

Zur einfacheren Konstruktion der Ortskurven des Vektors \mathfrak{E} kann wie früher wiederum der Winkel zwischen den EMK-Vektoren \mathfrak{E}_{30} und \mathfrak{E} nach folgender Beziehung bestimmt werden:

maturen (es sind nur Ueberspannungen von ca. 50...70 % an den Transformatoren-Wicklungen möglich) und andererseits könnten diese sehr hohen Ueberspannungen nur sehr kurze Zeit bestehen, da

Beispiel.

In einem 8-kV-Freileitungsnetz von ca. 164 km Ausdehnung (entsprechend einem kapazitiven Widerstand von 2900 Ohm eines Polleiters gegen Erde) werde ein mit einem Erdschluss am Nullpunktschalter behafteter 145-kVA-Drehstromsternttransformator einphasig im Leerlauf an das Netz geschaltet.

Was für Spannungen nehmen die drei Polleiter des Netzes gegen Erde an? Der Widerstand der Schutzterdung des Transformators, der in der Regel in der Grössenordnung von ca. 1...20 Ohm liegt, darf, wie sich im Verlaufe der Lösung zeigen wird, vernachlässigt werden.

Zur Lösung dieser Aufgabe wurden an einem Transformator der genannten Grösse durch Messung die in Betracht kommenden Werte des induktiven Widerstandes ωL_s und

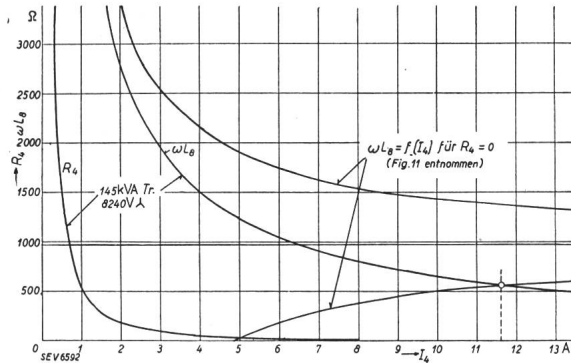


Fig. 12.

Erdschluss am Nullpunktschalter eines einphasig an Spannung liegenden 145-kVA-Drehstromtransformators. (Sternschaltung 8240 V.)

$$\frac{1}{\omega C} = 2900 \Omega.$$

Netzspannung = 8000 V.

I_4 Erdschlussstrom.

$R_4, \omega L_s$ Widerstände an der Erdschlußstelle.

des Verlustwiderstandes R_4 in Abhängigkeit des Stromes bestimmt. Daraus ergaben sich die in Fig. 12 eingezeichneten zwei Kurven. Der sich einstellende Erdschlussstrom I_4 ergibt sich einerseits aus den Ortskurven Fig. 11 und andererseits durch den den angenommenen Werten von ωL_s und R_4 zwangsläufig zugeordneten Strom aus Fig. 12. Durch mehrmaliges Einsetzen zusammengehörender Widerstände R_4 und ωL_s in die Ortskurven Fig. 11, erkennt man, dass für stationären Zustand der induktive Widerstand ωL_s zwischen 500 und 600 Ohm liegen muss. Aus Fig. 12 ist ersichtlich, dass bei dieser Grösse des induktiven Widerstandes der ohmsche Widerstand der Transformatorverluste nur einige wenige Ohm beträgt. Andererseits ersieht man aus den Ortskurven des Erdschlussstromes, dass bei ind. Widerstand von 500...600 Ohm eine Aenderung des ohmschen Widerstandes zwischen Null und 100 Ohm nur einen sehr kleinen Einfluss auf die Grösse des Erdschlussstromes hat. Auf Grund dieser Tatsache wurde auf Fig. 12 der aus der Ortskurve Fig. 11 entnommene Zusammenhang Erdschlussstrom und ind. Widerstand ωL_s für ohmschen Widerstand $R_4 = 0$ eingezeichnet, und man erkennt aus dem Schnittpunkt dieser Kurve mit der gemessenen induktiven Widerstandskurve des 145-kVA-Transformators, dass sich schlussendlich ein Erdschlussstrom von ca. 11,6 A einstellen wird, entsprechend einem ind. Widerstand ωL_s von ca. 560 Ohm. Dieses Beispiel zeigt, dass durch solch einen Erdschluss der sonst bei direktem Erdschluss auftretende Erdschlussstrom von maximal ca. 5 A auf ca. 11,6 A ansteigen kann. Der Fig. 10 kann entnommen werden, dass bei dem geschilderten Erdschluss die drei Polleiter folgende EMKe gegen Erde annehmen würden: $E_5 = \text{ca. } 14000 \text{ V}$, $E_6 = \text{ca. } 14000 \text{ V}$, $E_7 = \text{ca. } 6600 \text{ V}$ (gegenüber 4620 V im erdschlussfreien Netz).

Diese Zustände könnten solange andauern, solange der erdschlussbehaftete Transformator einphasig angeschlossen ist, da durch den Erdschlussstrom die Primärsicherung des Transformators nicht zum Schmelzen käme (Normalstrom des 145-kVA-Transformators = ca. 10,5 A).

Das nächste Kapitel behandelt einen ähnlichen Erdschlussfall, bei dem der Erdschlussstrom ebenfalls über Transformatorenwicklungen fließen muss.

IV. Indirekter oder verkehrter Erdschluss.

Ein sogenannter *indirekter* oder *verkehrter Erdschluss* tritt dann auf, wenn ein Polleiter bricht und sein netzseitiges Ende Erdschluss hat. In diesem Falle fließen Teilströme des an der Erdschlussstelle fließenden Erdschlussstromes durch die netzseitig der Erdschlussstelle angeschlossenen Ortstransformatoren. Es ist leicht einzusehen, dass auch in diesem Falle Resonanzzustände zwischen den Kapazitäten der Polleiter gegen Erde und den Induktivitäten der Transformatorwicklungen entstehen können. Fig. 13 zeigt das entsprechende Ersatzschema.

In diesem Ersatzschema bedeuten $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ die drei resultierenden Ersatzimpedanzen der parallelgeschalteten, auf Dreieckschaltung bezogenen Netztransformatoren. Die grössten Ueberspannungen der Polleiter gegen Erde werden sich offenbar dann einstellen, wenn die Ortstransformatoren nur schwach belastet sind. Unter diesen Umständen können Resonanzzustände sich am vollkommensten ausbilden. Die folgenden Ortskurven werden deshalb unter der Annahme leerlaufender Netztransformatoren, unter Vernachlässigung der Transformatorverluste (rein induktive Ersatzwiderstände) und Annahme dreier gleich grosser unverketteter Induktivitäten als Ersatzwiderstände der netzseitig angeschlossenen Ortstransformatoren berechnet. In der Praxis sind diese Vorgänge allerdings etwas komplizierter, da die magnetischen Flüsse der drei Schenkel eines Drehstromtransformators miteinander verkettet sind. Man ersieht, dass unter diesen Umständen diese Probleme durch eine genaue Berechnung nur schwer erfassbar sind. Es soll an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen werden. Berücksichtigt man, dass solche Leiterbrüche vor-

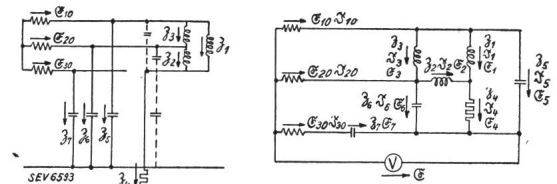


Fig. 13.

Indirekter Erdschluss.

wiegend an Stellen dünnern Drahtdurchmessers vorkommen, also gegen das Ende einer Freileitung hin, aber auch die meisten Unterwerke oder Werke mehrere abgehende Hochspannungsleitungen besitzen, so können die im Ersatzschema Fig. 13 punktiert eingezeichneten Kapazitäten ihrer Kleinheit wegen vernachlässigt werden, und es können deshalb der Einfachheit halber die drei kapazitiven Widerstände $\frac{1}{\omega C_5}, \frac{1}{\omega C_6}$ und $\frac{1}{\omega C_7}$ als einander gleich angenommen werden. Um die Ortskurven konstruieren zu können, berechnet man am besten wiederum die EMK \mathcal{E} vom Haupttransformator-Sternpunkt

gegen Erde. Nach der bekannten Rechnung bestimmt sich \mathfrak{E} zu:

$$\mathfrak{E} = -\mathfrak{E}_{30} \cdot \frac{\mathfrak{z}_5}{3 \cdot \mathfrak{z}_1 + 6 \cdot \mathfrak{z}_4 + 2 \cdot \mathfrak{z}_5}$$

Durch Einsetzen der betreffenden Widerstandsoperatoren in diese Gleichung ergibt sich:

$$\mathfrak{E} = \mathfrak{E}_{30} \cdot \frac{1}{3 \omega L \omega C - 2 - j 6 \cdot R_4 \omega C} = \mathfrak{E}_{30} \cdot \frac{3 \omega L \omega C - 2 + j 6 \cdot R_4 \omega C}{9 (\omega L \omega C)^2 - 12 \omega L \omega C + 4 + 36 \cdot R_4^2 \cdot (\omega C)^2}$$

Der Winkel α zwischen den EMK-Vektoren \mathfrak{E}_{30} und \mathfrak{E} wird:

$$\text{tg } \alpha = \frac{6 \cdot R_4 \cdot \omega C}{3 \omega L \omega C - 2}$$

Die Aufzeichnung der Ortskurve von \mathfrak{E} wird unter Berücksichtigung zweier Spezialfälle wesentlich erleichtert.

1. $R_4 = 0$; $\mathfrak{E} = \mathfrak{E}_{30} \cdot \frac{1}{3 \omega L \omega C - 2}$; $\text{tg } \alpha = 0 \cdot \alpha = 0^\circ$.

aus den drei Strömen $\mathfrak{I}_5, \mathfrak{I}_6$ und \mathfrak{I}_7 zusammensetzt, gilt wiederum unter Beachtung des Bezugsinns:

$$\mathfrak{I}_4 = j \cdot 3 \omega C \mathfrak{E} = \mathfrak{E}_{30} \cdot \frac{j \{9 \omega L (\omega C)^2 - 6 \omega C\} - 18 (\omega C)^2 \cdot R_4}{9 (\omega L \omega C)^2 - 12 \omega L \omega C + 4 + 36 \cdot R_4^2 \cdot (\omega C)^2}$$

Ortskurve des Erdschlußstromes für ein 8-kV-Netz mit 5 A «Erdschlußstrom» siehe Fig. 15.

Der absolute Betrag des Erdschlußstromes ergibt sich zu:

$$I_4 = \frac{3 \cdot E_{30} \cdot \omega C}{\sqrt{9 (\omega L \omega C)^2 - 12 \omega L \omega C + 4 + 36 \cdot (\omega C R_4)^2}}$$

Betrachtet man die Ortskurven der Polleiter EMKe gegen Erde, so ersieht man, dass, wenn der induktive Ersatzwiderstand der nach der Erdschlußstelle netzseitig angeschlossenen Transformatoren gleich $\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{\omega C}$ wird, die EMKe am grössten werden können (Resonanz). Nimmt man den Erdungswiderstand zu Null an, so wären theoretisch Spannungen bis gegen unendlich möglich. Praktisch sind aber diese Spannungen in weit erträglicheren Grenzen. Es darf

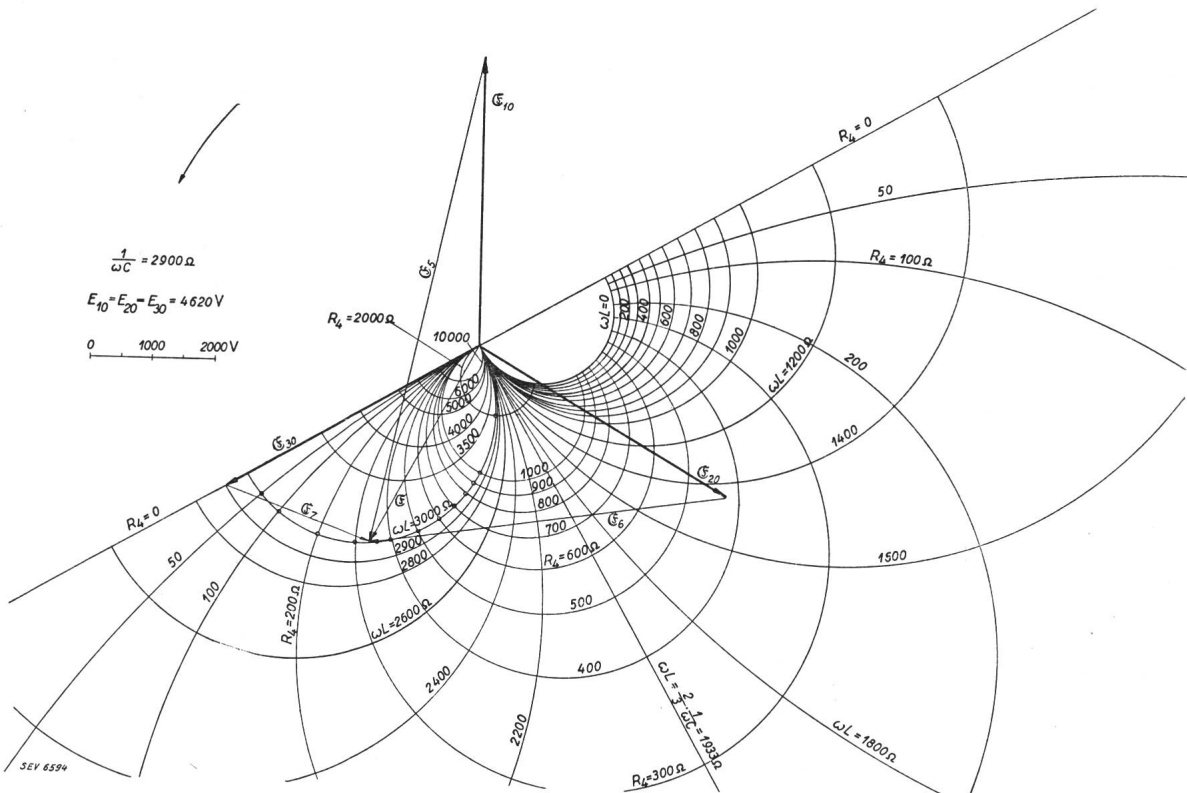


Fig. 14. Indirekter Erdschluss. Ortskurven der Polleiter-EMKe gegen Erde.

2. $\omega L = \frac{2}{3} \frac{1}{\omega C}$ (Resonanz) $\mathfrak{E} = \mathfrak{E}_{30} \cdot j \frac{1}{6 \cdot R_4 \cdot \omega C}$
 $\text{tg } \alpha = \infty. \alpha = 90^\circ$.

In Fig. 14 sind die Ortskurven der EMKe $\mathfrak{E}, \mathfrak{E}_5, \mathfrak{E}_6$ und \mathfrak{E}_7 für ein 8-kV-Netz mit 5 A «Erdschlußstrom» aufgezeichnet. Da sich der Erdschlußstrom

nicht ausser acht gelassen werden, dass das Netz auch des Sonntags und des Nachts nie ganz unbelastet ist, so dass die Ersatzwiderstände der Transformatoren nicht rein induktiv, sondern auch ohmsch und bedeutend kleiner als im Leerlauf sind. Deshalb können auch die Ueberspannungen nicht sehr hohe Werte annehmen. W. Petersen hat in einem Artikel in der ETZ vom 15. Juli des Jahres

1915 unter anderm auch den indirekten Erdschluss, d. h. die bei diesem maximal möglichen Spannungen der Polleiter gegen Erde berechnet. Er kommt dabei auf maximale Werte von ca. 4facher Phasen-

Bei den EKZ geschieht das Aufsuchen einer erdschlussbehafteten Leitung in einem Unterwerk durch Umschaltung jeder Leitung auf einen Separatbetrieb. Wenn bei dieser Umschaltung der Erdschluss auf dem Normalbetrieb verschwindet, aber auf der Erdschlussprüfeinrichtung des Separatbetriebes erscheint, so befindet sich der Erdschluss auf der auf den Separatbetrieb geschalteten Leitung. Je kleiner die Ausdehnung der erdschlussbehafteten Leitung im Vergleich zu der Ausdehnung des ganzen vom betr. Unterwerk aus gespeisenen Netzes ist, um so mehr sind die Erdschlussbilder bei den zwei Schaltungszuständen voneinander verschieden (Unterschied der kapazitiven Netzwidestände). Ein Beispiel soll dies zeigen.

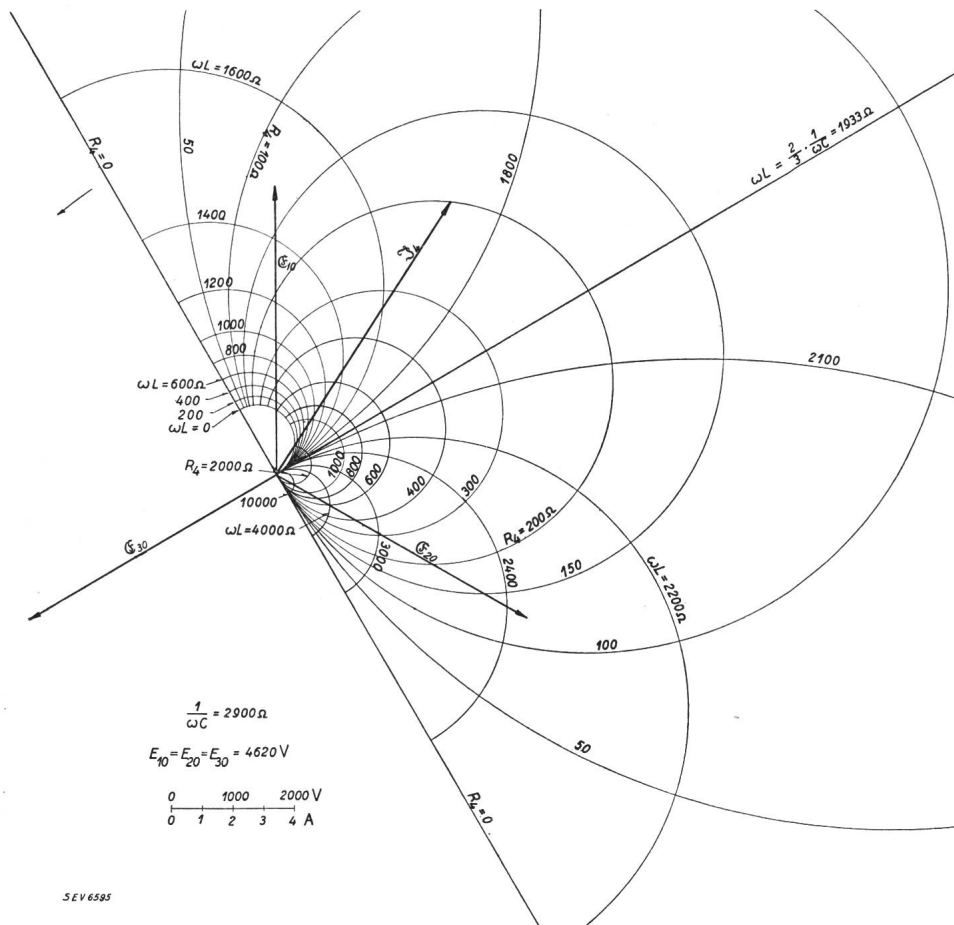


Fig. 15. Indirekter Erdschluss. Ortskurven des Erdschlußstromes.

spannung. Erfahrungsgemäss sind in den EKZ-8-kV-Netzen noch nie Werte von mehr als ca. 12 000 V (ca. 2,5fache Phasenspannung) gemessen worden (siehe das Beispiel am Schlusse dieses Kapitels). Es mag dies damit zusammenhängen, dass die an sich seltenen Drahtbrüche meistens an Stellen dünneren Drahtdurchmessers, also an den Enden der Leitungsstränge vorkommen, wobei dann auf der Netzseite der Erdschlußstelle im Vergleich zur Netzkapazität nur eine relativ kleine Transformatorenleistung angeschlossen ist. Die in den Fig. 14 und 15 gezeichneten Ortskurven können auch für Netze mit andern kapazitiven Widerständen Verwendung finden, wenn ähnlich wie früher berücksichtigt wird, dass die EMK \mathcal{E} gleich gross bleibt, wenn sich die Widerstände $\frac{1}{\omega C}$, ωL und R_4 im selben Verhältnis ändern und sich die Erdschlussströme bei gleicher EMK \mathcal{E} im selben Verhältnis der kapazitiven Leitfähigkeiten ωC der beiden Netze verhalten (gleiche Netzspannung vorausgesetzt). Es müssen deshalb nur die Anschriften der Ortskurven und der Strommaßstab der Erdschlussstrom-Ortskurve geändert werden.

Beispiel.

In einem EKZ-Unterwerk, welches ein 8-kV-Netz von 6 Freileitungen von total ca. 200 km Länge speist, trat ein Erdschluss auf. Die drei Voltmeter der Erdschlussprüfeinrichtung zeigten folgende Spannungen der Polleiter gegen Erde: Phase blau (E_5): 7200 V, Phase rot (E_6): 7000 V, Phase grün (E_7): 1500 V.

Nachdem die fehlerhafte Leitung von ca. 55 km Länge

separat gespeisen wurde, zeigten die Erdschlussvoltmeter des Separatbetriebes folgende Ausschläge: Phase blau: 7600 V, Phase rot: 5200 V, Phase grün: 12 000 V. Die regulierte Netzspannung betrug zur Zeit des Erdschlusses ca. 8400 V. Das Erdschlussobjekt war ein Ortstransformator, der in der Primärphase grün einen Erdschluss besass, und dessen Primärsicherung dieser Phase durchgeschmolzen war. Es ist dies auch ein indirekter Erdschlussfall, nur dass auf der Netzseite der Erdschlußstelle der fehlerhafte Transformator allein angeschlossen ist. Im geschilderten Beispiel können allerdings die beiden Erdschlussbilder nicht ohne weiteres in Beziehung gebracht werden, da im normalen Schaltungszustande der Leitungen im betreffenden Unterwerk eine Erdschluss-Löschspule eingeschaltet war.

Als letzte hier behandelte Erdschlussart werden im nächsten Abschnitt die Erdschlussverhältnisse beim Auftreten eines direkten Erdschlusses über ohmschen Widerstand in Netzen mit angeschlossenen Hochspannungselektrokesseln behandelt.

V. Direkter Erdschluss in einem Netz mit angeschlossenen Hochspannungs-Elektrokesseln.

Als weitere Erdschlussart soll noch der Fall untersucht werden, wo an ein Drehstromnetz mit isoliertem Sternpunkt ein oder mehrere *direkt in Hochspannung angeschlossenene Elektrokessel* vorhanden sind (Ersatzschema Fig. 16).

Die Untersuchung beschränkt sich auf den Erdschluss über ohmschen Widerstand.

Solche Elektrokessel können im Ersatzschema durch drei in Stern geschaltete ohmsche Widerstände dargestellt werden, deren Sternpunkt zugleich der metallene, geerdete Kessel ist. Da die Kessel sowieso mit Wasserleitungen in metallischer Verbindung stehen, die in der Regel Erdungswiderstände in der Grössenordnung einiger Ohm besitzen, so kann dieser Erdungswiderstand im Vergleich zu den ohmschen Phasenwiderständen des Elektrokessels vernachlässigt werden.

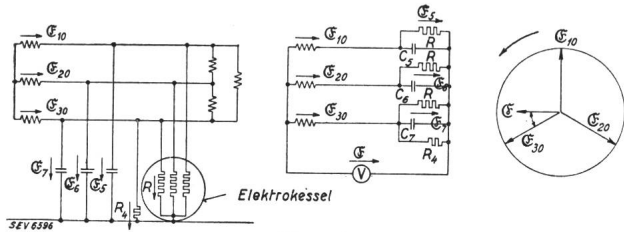


Fig. 16.

Direkter Erdschluss in Netz mit angeschlossenem Hochspannungselektrokessel.

Aus dem Ersatzschema ist ersichtlich, dass die ohmschen Phasenwiderstände des Kessels parallel zu den kapazitiven Widerständen der Polleiter gegen Erde liegen. Tritt in einem solchen Netz ein direkter Erdschluss auf, so bestimmen sich die EMK \mathcal{E} und der Erdschlußstrom \mathfrak{S}_4 folgendermassen:

Nach früherer Ableitung gilt die Gleichung:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{30} \frac{\mathfrak{z} - \mathfrak{z}'}{\mathfrak{z} + 2\mathfrak{z}'} \quad \left| \quad \mathfrak{z} = \frac{-Rj \frac{1}{\omega C}}{-R + j \frac{1}{\omega C}} \right.$$

$$\mathfrak{z}' = \frac{j \cdot R \cdot R_4}{-j \cdot R - j \cdot R_4 + \omega C \cdot R \cdot R_4}$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{30} \cdot \frac{-R \frac{1}{\omega C}}{-R \frac{1}{\omega C} - 3R_4 \frac{1}{\omega C} - 3j \cdot R \cdot R_4}$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{30} \cdot \frac{R^2 + 3 \cdot R_4 \cdot R - 3jR^2 \cdot R_4 \cdot \omega C}{R^2 + 6 \cdot R_4 \cdot R + 9 \cdot R_4^2 + 9 \cdot R^2 \cdot R_4^2 \cdot (\omega C)^2}$$

Der Winkel α zwischen den EMK-Vektoren \mathcal{E}_{30} und \mathcal{E} bestimmt sich zu:

$$\text{tg } \alpha = - \frac{3 \cdot R \cdot R_4 \omega C}{R + 3 \cdot R_4}$$

Der Erdschlußstrom setzt sich wiederum aus den drei Strömen \mathfrak{S}_5 , \mathfrak{S}_6 und \mathfrak{S}_7 , die aus einem ohmschen und einem kapazitiven Anteil bestehen, zusammen.

$$\mathfrak{S}_4 = -\mathfrak{S}_5 - \mathfrak{S}_6 - \mathfrak{S}_7 = -\frac{1}{\mathfrak{z}} \cdot 3 \mathcal{E} \quad \left| \quad \mathfrak{z} = \frac{-jR \frac{1}{\omega C}}{-R + j \frac{1}{\omega C}} \right.$$

$$\mathfrak{S}_4 = \mathcal{E} \cdot \left(\frac{3}{R} + 3j\omega C \right) =$$

$$\mathcal{E}_{30} \cdot \frac{3 \cdot R + 9 \cdot R_4 + 9 \cdot R^2 \cdot R_4 \cdot (\omega C)^2 + 3j \cdot R^2 \cdot \omega C}{R^2 + 6 \cdot R_4 \cdot R + 9 \cdot R_4^2 + 9 \cdot R^2 \cdot R_4^2 \cdot (\omega C)^2}$$

Trägt man die EMK \mathcal{E} in Funktion des Erdungswiderstandes R_4 an der Erdschlußstelle in einer Ortskurve für konstant angenommene Netzausdehnung (Kapazität C) und konstante Elektrokesselleistung (Widerstand R) auf, so erhält man Kreisbogen, deren Sehne identisch ist mit \mathcal{E}_{30} (Fig. 17).

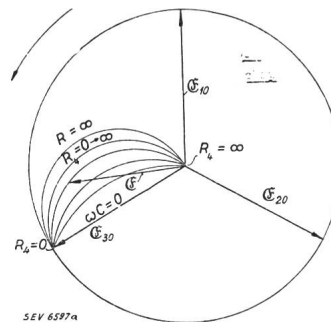


Fig. 17.

Ortskurven des Vektors \mathcal{E} für Hochspannungsnetz mit angeschlossenem Hochspannungselektrokessel.

Diese Kreisbogen gehen im Grenzfall, wenn kein Elektrokessel im Netz eingeschaltet ist ($R = \infty$) in einen Halbkreis über \mathcal{E}_{30} über (Fall des direkten Erdschlusses in einem Netz ohne Elektrokessel). In den meisten Netzen wird es so sein, dass der kapazitive

Widerstand eines Polleiters gegen Erde $\left(\frac{1}{\omega C} \right)$ das Vielfache des ohmschen Ersatzwiderstandes R der Phase des Elektrokessels ist. Nimmt man z. B. wiederum ein 8-kV-Netz mit 5 A «Erdschlußstrom» an, so beträgt $\frac{1}{\omega C} = 2900$ Ohm. Ist ein 8-kV-Elektrokessel im Netz mit einer Leistung von 400 kW eingeschaltet, so ist dessen Ersatzwiderstand $R = \text{ca. } 160$ Ohm. Man ersieht daraus, dass in diesem Fall der kapazitive Anteil des Erdschlußstromes nur ca. $\frac{160 \cdot 100}{2900} = 5,5 \%$ des ohmschen Anteiles beträgt.

Zudem setzen sich diese zwei Anteile unter einem Winkel von 90° zum totalen Erdschlußstrom zusammen. Als angenäherte Rechnung darf man deshalb ohne weiteres den kapazitiven Anteil des Erdschlußstromes in solchen Fällen vernachlässigen. Je grösser die Kesselleistung ist, desto eher ist natürlich diese Annahme zulässig. Die Berechnung der Erdschlussverhältnisse vereinfacht sich somit ganz bedeutend. Setzt man in den Schlussgleichungen für \mathcal{E} und \mathfrak{S}_4 den kapazitiven Widerstand $\frac{1}{\omega C} = \infty$ ein, so ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{30} \cdot \frac{R^2 + 3 \cdot R_4 \cdot R}{R^2 + 6 \cdot R_4 \cdot R + 9 \cdot R_4^2} = \mathcal{E}_{30} \cdot \frac{R}{R + 3 \cdot R_4}$$

$$\text{tg } \alpha = 0. \quad \alpha = 0^\circ.$$

$$\mathfrak{S}_4 = \mathcal{E}_{30} \cdot \frac{3 \cdot R + 9 \cdot R_4}{R^2 + 6 \cdot R_4 \cdot R + 9 \cdot R_4^2} = \mathcal{E}_{30} \cdot \frac{3}{R + 3 \cdot R_4}$$

Diese Gleichungen zeigen, dass der EMK-Vektor \mathcal{E} und der Erdschlußstrom \mathfrak{S}_4 in Phase mit \mathcal{E}_{30} sind. \mathcal{E} bleibt gleich gross, wenn sich die ohmschen Widerstände R und R_4 im selben Verhältnis ändern. Für ein 8-kV-Netz mit 5 A kapazitivem

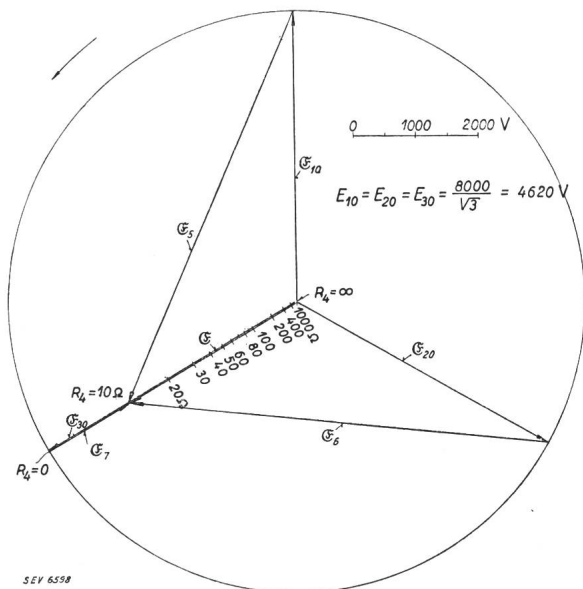


Fig. 18.

Ortskurve des Vektors \mathcal{E} für direkten Erdschluss in einem 8-kV-Netz mit angeschlossener Hochspannungselektrokessel von 1000 kW Leistung ($R = 64$).

«Erdschlußstrom» und einem eingeschalteten Elektrokessel von 1000 kW Leistung ist in Fig. 18 die Ortskurve der EMKe $\mathcal{E}_5, \mathcal{E}_6, \mathcal{E}_7$ und \mathcal{E} aufgezeichnet (kapazitiver Erdschlußstrom vernachlässigt).

Die geschilderten Verhältnisse zeigen ganz deutlich, dass durch den Anschluss von Elektrokesseln, die direkt an ein Hochspannungsnetz angeschlossen sind, der Erdschlußstrom des Netzes sehr stark erhöht wird, sofern bei Auftreten eines Erdschlusses im Netz der Kessel eingeschaltet ist. Unter Annahme eines Erdungswiderstandes Null an der Erdschlußstelle beträgt der vom Elektrokessel herrührende ohmsche Anteil des Erdschlußstromes das dreifache des vor dem Erdschluss vorhandenen Kesselstromes, da zwei Phasen des Kessels beim geschilderten Erdschluss an der verketteten Netzspannung liegen und diese beiden Teilströme sich unter einem Winkel von 60° zu dem ohmschen Erdschlußstrom zusammensetzen. Nimmt man z. B. einen 3000-kW-Elektrokessel in 8 kV an, so beträgt dessen Normalstrom ca. 215 A. Der maximal vom Kessel herrührende Erdschlußstrom wird also $3 \times 215 = 645 \text{ A}$.

Ein solcher Fall ist auch bereits in einem 8-kV-EKZ-Netz aufgetreten. An einer Stangentransformatorstation floss infolge eines defekten 8-kV-Isolators ein Erdschlußstrom von einigen hundert Ampères über die Schutzerdung der Station zur Erde (3000-kW-Kessel mit nahezu voller Leistung in Betrieb). Durch den grossen Strom schmolz die Erdleitung am Erdboden ab, und der Erdschlußstrom fand seinen Weg über ein Drahtgehege eines Hühnerhofes, der an der Stange der Station mittels eines die Schutzerdleitung berührenden Drahtes befestigt war, zur Erde. Die Folge davon war, dass der Hühnerhof zu brennen anfang und der Brand erst gelöscht werden konnte, nachdem die Station abgeschaltet worden war.

Um den Einfluss des Erdungswiderstandes R_4 und der Kesselleistung (Widerstand R) auf den Erdschlußstrom \mathfrak{S}_4 zu zeigen, ist unter Vernachlässigung des kapazitiven Anteiles des Erdschlußstromes der Erdschlußstrom in 8-kV-Netzen in Funktion des Widerstandes an der Erdschlußstelle in Fig. 19 durch Kurven für konstante Kesselleistungen dargestellt. Im selben Kurvenblatt ist ausserdem die Abhängigkeit des Ersatzwiderstandes R von der Kesselleistung eingezeichnet.

Man sieht, dass durch den Anschluss solcher Elektrokessel der Erdschlußstrom eines Netzes auf sehr enorme Werte ansteigen kann. Solch grosse Erdschlußströme sind natürlich sehr gefährlich, denkt man z. B. an einen Uebertritt dieses Stromes auf den Nullleiter eines genullten Sekundärnetzes (Drahtbruch einer Hochspannungsleitung, die auf demselben Gestänge mit einer Niederspannungsleitung montiert ist, oder Ueberschlag in einem Ortstransformator), etc.

Da diese Erdschlußströme, herrührend von eingeschalteten Hochspannungselektrokesseln, selbstverständlich nicht mit Löschspulen kompensiert werden können, so muss der Betriebsleiter eines Werkes von solchen Elektrokesselanlagen verlangen, dass beim Auftreten eines Erdschlusses in seinem Netz der Kessel automatisch abgeschaltet wird. Die meisten Elektrokessel besitzen drei direkt am Schalter aufgebaute Maximalstromrelais, deren Auslöseströme wenig über dem Normalstrom des Kessels eingestellt sein sollen. Bei Elektrokesseln ohne Leistungsregulierung, die also immer mit der vollen Leistung in Betrieb sind, kann unter Umständen der Einbau sogenannter Erdschlussrelais unter-

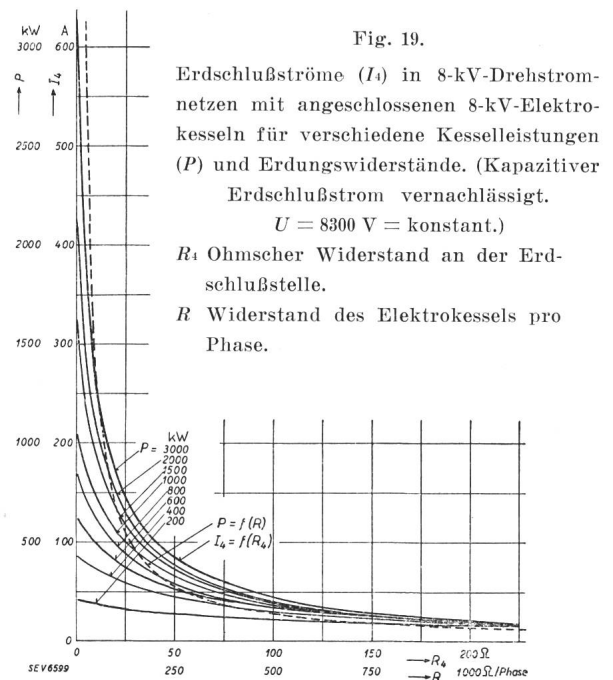


Fig. 19.

Erdschlußströme (I_4) in 8-kV-Drehstromnetzen mit angeschlossenen 8-kV-Elektrokesseln für verschiedene Kesselleistungen (P) und Erdungswiderstände. (Kapazitiver Erdschlußstrom vernachlässigt.)
 $U = 8300 \text{ V} = \text{konstant.}$
 R_4 Ohmscher Widerstand an der Erdschlußstelle.
 R Widerstand des Elektrokessels pro Phase.

lassen werden. Sobald nämlich eine Phase des Netzes Erdschluss hat, steigen die Kesselströme in den übrigen zwei Phasen, so dass die Maximalstromrelais den Schalter zum Auslösen bringen. Solche Elektrokessel findet man in der Praxis allerdings

nicht vor, denn einerseits sind vielerorts die Elektroden regulierbar eingerichtet und andererseits variiert auch die Leitfähigkeit des Wassers im Kessel. Es kommt vor, dass Kessel nur mit 25 % der maximalen Leistung in Betrieb stehen. Man sieht ohne weiteres ein, dass in solchen Fällen die Maximalstromrelais des Kessels unter Umständen beim Auftreten eines Erdschlusses im Netz nicht mehr zum Ansprechen kommen können. Nimmt man an, dass die Maximalstromrelais eines Kessels mit regulierbarer Leistung auf 10 % Ueberstrom bei Vollast des Kessels eingestellt seien, so dürfte seine Leistung nicht unter $\frac{1,1}{\sqrt{3}} \cdot 100 = 63,5\%$ der Maximalleistung sinken, dass bei einem direkten Erdschluss mit ohmschem Widerstand gegen Null die Maximalstromrelais gerade noch ansprechen würden. Wie Fig. 19 zeigt, sinkt bekanntlich der Erdschlussstrom mit zunehmendem Widerstand an der Erdschlußstelle, so dass unter Berücksichtigung dieses Umstandes die Kesselleistung nicht bis auf 63,5 % sinken darf. Es ist deshalb dringend nötig, bei Elektrokesselanlagen mit regulierbarer Leistung, die direkt an ein Hochspannungsnetz mit isoliertem Sternpunkt angeschlossen sind, ein besonderes Relais, nennen wir es Erdschlussrelais, einzubauen, welches bei Erdschlüssen im Netz auch bei Teilbelastungen des Kessels die Kesselanlage ausschaltet. Eine sehr einfache Lösung besteht darin, den Summenstrom der drei Primärstromwandler der Kesselanlage zur Betätigung einer Magnetspule zu verwenden, welche bei Erdschluss einen im Nullspannungsstromkreis eingeschalteten Kontakt öffnet. Dieser Summenstrom hat im erdschlussfreien Netz auch bei unsymmetrischer Elektrodenbelastung praktisch den Wert Null, sofern die kapazitiven Widerstände der Netzpolleiter gegen Erde gegenüber den ohmschen Phasenwiderständen des Elektrokessels gross sind. Das Relais spricht also nur an, wenn ein Erdschluss vor den Stromwandlern der Elektrokesselanlage auftritt. Auf Erdschlüsse am Kessel selbst reagiert es nicht. Sobald im Netz ein Erdschluss auftritt, nimmt der Summenstrom einen bestimmten Wert an, nämlich den mit dem Stromwandlerübersetzungsverhältnis umgerechneten Wert des Erdschlussstromes (kapazitiver Anteil vernachlässigt). Je kleiner der Ansprechstrom des Erdschlussrelais gewählt wird und je kleiner die Leistung des Elektrokessels ist (kleine Stromwandler), um so grösser darf der Widerstand an der Erdschlußstelle sein, damit der Kessel noch abgeschaltet wird (Empfindlichkeit des Erdschlussrelais). Zweckmässig ist es, mit dem Erdschlussrelais ein Zeitrelais mit einer Zeitverzögerung von ca. 2...3 Sekunden zu kombinieren, damit nicht bei jedem momentanen Erdschluss im Netz der Kessel ausgeschaltet wird. In den Netzen der EKZ sind bereits in 4 Anlagen Erdschlussrelais der beschriebenen Art im Betrieb, welche zur Zufriedenheit funktionieren.

Zum Schluss muss noch auf einen weiteren Punkt aufmerksam gemacht werden, der bei Netzen mit

Elektrokesseln in Betracht gezogen werden muss. Es betrifft dies die *Anzeige eines Erdschlusses im speisenden Unterwerk*. Diese Anzeige ist natürlich sehr wichtig, damit ein aufgetretener Erdschluss rasch behoben werden kann. Wenn auch das isolierte Netz mit einem einpoligen Erdschluss weiter betrieben wird, so ist doch die Wahrscheinlichkeit gross, dass infolge der erhöhten Beanspruchung der Leitungs- und Anlageisolation auf den erdschlussfreien Phasen an einer schwachen Stelle ein zweiter Erdschluss auf einer andern Phase als der erste entstehen kann (doppelpoliger Erdschluss), wobei dann unter Umständen sehr unangenehme Zustände entstehen, auf welche hier nicht näher eingegangen werden soll (hohe Spannungen an der Erdschlußstelle).

In den Netzen der EKZ bestehen diese Erdschlussprüfvorrichtungen aus einem elektromagnetischen Relais, welches zwischen dem sekundären Sternpunkt dreier primär an die drei Polleiter angeschlossenen Einphasenspannungswandlern und der Erde geschaltet ist. Dieses Relais spricht um so eher an, je grösser die Unsymmetrie in der Grösse der drei Polleiter-EMKe $\mathcal{E}_5, \mathcal{E}_6, \mathcal{E}_7$ gegen Erde, mit andern Worten: je grösser die EMK \mathcal{E} wird. Je nach dem Ansprechstrom dieses Relais werden nur Erdschlüsse bis zu einem bestimmten Wert des Widerstandes an der Erdschlußstelle damit angezeigt. Nimmt man ein bestimmtes erdschlussbehaftetes Netz mit bestimmtem Widerstand an der Erdschlußstelle an, so kann unter Umständen bei einem eingeschalteten Elektrokessel die Anzeige des Erdschlusses im Unterwerk verunmöglicht werden, da die Unsymmetrie der drei Polleiter-EMKe gegen Erde kleiner wird, wenn der Kessel in Betrieb ist, als wenn er ausgeschaltet ist. Man ersieht dies am besten an Hand eines Beispiels.

Beispiel.

Es sei ein 8-kV-Netz mit 5 A «Erdschlußstrom» angenommen, in welchem ein direkter Erdschluss über einen ohmschen Widerstand von 200 Ohm (z. B. Drahtbruch) aufgetreten sei. Am selben Netz sei ausserdem ein Elektrokessel von 3000 kW Leistung in Hochspannung angeschlossen ($R = \text{ca. } 21 \text{ Ohm}$).

a) Der Elektrokessel sei ausser Betrieb.

Nach Fig. 5 werden die drei Polleiter-EMKe gegen Erde sowie die Nullpunkts-EMK:

$$E_5 = 7450 \text{ V}$$

$$E_6 = 8350 \text{ V}$$

$$E_7 = 900 \text{ V (EMK am Erdungswiderstand)}$$

$$E = 4550 \text{ V}$$

b) Der Elektrokessel sei mit 3000 kW in Betrieb.

$$E_5 = 4700 \text{ V}$$

$$E_6 = 4700 \text{ V}$$

$$E_7 = 4465 \text{ V (EMK am Erdungswiderstand)}$$

$$E = 155 \text{ V} \left(4620 \cdot \frac{21}{21 + 3 \cdot 200} \right).$$

Man ersieht aus diesem Beispiel ausserdem, dass, wenn der Kessel eingeschaltet ist, erstens die Gesamt-EMK an der Erdschlußstelle sich von 900 auf ca. 4465 V erhöht (Schrittspannung!!) und zweitens, der Erdschlußstrom von ca. 4,5 auf 22,3 A ansteigt.

Sofern die Elektrokesselanlage mit einem genügend empfindlichen Erdschlussrelais versehen ist, wird dieser Zustand allerdings nur kurze Zeit

dauern, nämlich bis der Elektrokessel abgeschaltet ist. Nach dieser Abschaltung des Kessels kann die Erdschluss-Prüfeinrichtung im Unterwerk den Erdschluss normal anzeigen. Je nach der gewählten Ansprechstromstärke des Erdschlussrelais einer Elektrokesselanlage gibt es aber Erdschlussfälle, bei welchen der Kessel nicht abgeschaltet wird und Zustände wie im vorigen Bild gezeigt entstehen können.

Je kleiner der kapazitive Erdschlussstrom eines Netzes und je grösser die Leistung eines daran an-

geschlossenen Elektrokessels ist, desto eher zeigt die Erdschlussprüfeinrichtung den Erdschluss nicht an. Um solche unliebsame Zustände zu vermeiden, ist es daher zweckmässig, wo es angeht, die Elektrokessel über separate Leitungen, die ausserdem an einen Separatbetrieb im Unterwerk angeschlossen sein müssen, anzuschliessen. In diesem Falle werden die Anzeigen der Erdschlussprüfeinrichtung des Normalbetriebes und die EMK an der Erdschlussstelle nicht mehr vom Betriebszustande des Elektrokessels beeinflusst.

Hochfrequente Radiostörungen durch Drehstrom-Gleichstrom-Bahn-Mutatoren.

Von W. Gerber und H. Kölliker, Bern.

621.396.833

Die Natur der Radiostörungen, welche Drehstrom-Gleichstrom-Bahn-Mutatoren erzeugen, wird kurz beschrieben. Der massgebende Störungsträger ist in den meisten Fällen die Fahrleitung, d. h. die Gleichstromseite. Kennlinien zeigen die Abhängigkeit der Störspannung von der Belastung des Mutators. Aus den Messungen bei verschiedenen Frequenzen ist weiter ersichtlich, dass Mutatoren hauptsächlich langwellige Störer sind. Eisen- und Glasmutatoren sind hinsichtlich der Störwirkung nicht verschieden. Die gebräuchlichen Filter zur niederfrequenten Entstörung sind hochfrequent unwirksam. Für die Ausbreitungsdämpfung der Störwellen über die Fahrleitung einer Schmalspurbahn wird eine Betragsgleichung angegeben.

La nature des perturbations radioélectriques engendrées par les mutateurs polyphasé — continu pour chemins de fer est décrite succinctement. Dans la plupart des cas, les perturbations sont principalement transmises par le fil de contact, c'est-à-dire par le côté courant continu. Des diagrammes montrent la tension perturbatrice en fonction de la charge des mutateurs. Il ressort en outre des mesures effectuées avec différentes fréquences que les mutateurs sont principalement des éléments perturbateurs à ondes longues. Les mutateurs en fer et en verre ne présentent pas de différence en ce qui concerne l'effet perturbateur. Les filtres employés couramment pour l'élimination des perturbations de basse fréquence sont inefficaces dans le cas de la haute fréquence. Une formule indique l'affaiblissement de propagation des ondes perturbatrices sur le fil de contact d'un chemin de fer à voie étroite.

Infolge zahlreicher Störungen des Rundspruchempfanges durch Quecksilberdampf-Mutatoren der Strassen- und anderer Schmalspurbahnen führte die Telegraphen- und Telephonverwaltung statistische Erhebungen durch. Es wurden zwanzig störende Anlagen mit Eisen-Mutatoren und eine störende Anlage mit Glasmutatoren untersucht; Mutatoren mit Gittersteuerung waren nicht vertreten.

Störungsbild.

Hochfrequente Störungen werden durch die elektrischen Gasentladungen im Mutator erzeugt und auf die abgehenden Leitungen der Gleich- und Wechselstromseite übertragen. Die Störbeeinflussung der Empfangseinrichtungen erfolgt dabei vorwiegend durch das hochfrequente Nahfeld der Fahrleitungsanlagen. Eine Mutatoranlage kann aber auch über die Wechselstromseite störend wirken, besonders wenn die Primärleitung mit dem Ortsnetz gekoppelt ist. Zur Beurteilung einer Mutatoranlage werden hauptsächlich die Störspannungen am Speisepunkt, zwischen Fahrleitung und Erde, gemessen.

Entsprechend der Zusammensetzung aus störenden Entladungsvorgängen im Kessel sind die Störungen im Empfangslautsprecher mehr tönend oder geräuschartig kratzend.

Störkennlinien.

Die Störspannung der Quecksilberdampf-Mutatoren wird zweckmässig in Funktion der Gleich-

strombelastung bei verschiedenen Messfrequenzen aufgenommen. Man erhält dann Kennlinien, wovon Fig. 1 zwei typische Formen zeigt. Entsprechend

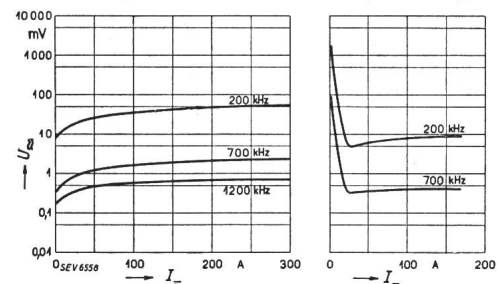


Fig. 1.

Typische Störkennlinien. Störspannung in mV in Funktion der Gleichstrombelastung in A von zwei verschiedenen Gleichrichteranlagen.

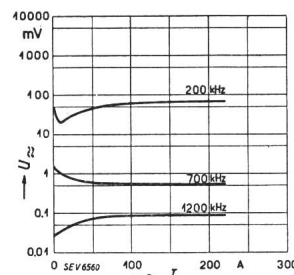


Fig. 2.

Zwischenformen von Störkennlinien.

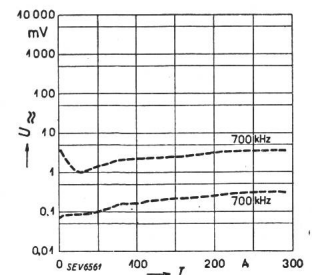


Fig. 3.

Unstabile Störkennlinien.

Fig. 2 bestehen weiter unzählige Zwischenformen, nach dem Aufbau der resultierenden Störspannung aus den einzelnen physikalischen Störkomponenten.