Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 64 (1973)

Heft: 19

Artikel: Die Resonanzabstimmung gekoppelter Erdschlusslöschsysteme

Autor: Millian, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915601

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.02.2026

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

Die Resonanzabstimmung gekoppelter Erdschlusslöschsysteme

Von *K. Millian*

621.315.1:621.316.99

Die auf einem gemeinsamen Mast untergebrachten zwei oder mehr Drehstromleitungen bereiten im Rahmen der Erdschlusslöschung nur dann Schwierigkeiten, wenn sie galvanisch getrennten Systemen angehören. Die für diesen Fall gültigen Lösch- und Abstimmbedingungen sollen im folgenden an Hand eines Modelles, das nur zwei Leitungen ohne Erdseil umfasst, betrachtet werden.

Deux ternes ou plus sur un même pylône ne donnent lieu à des difficultés, en ce qui concerne l'élimination de défauts à la terre, que s'ils appartiennent à des systèmes galvaniquement séparés. Les conditions d'élimination et d'accord, valables dans ce cas, sont considérées dans ce qui suit en ne prenant comme exemple que deux ternes, sans câble de terre.

1. Ersatzschaltbild (Fig. 1)

Für die sechs auf einem Mast befindlichen, isolierten Leiterseile gilt, dass sich an jedem Bezugsort die Potentiale der eigenen und der fremden Ladung addieren, oder in Matrixschreibweise

$$\boldsymbol{U} = [\underline{\Gamma}]\boldsymbol{Q} \tag{1}$$

Dabei ist $\boldsymbol{U}$ die Spaltenmatrix der Leiterspannung gegen Erde mit 6 Elementen, $\boldsymbol{Q}$ die Spaltenmatrix der Ladungen mit 6 Elementen und $[\underline{\Gamma}]$ die Matrix der Potentialkoeffizienten, deren 36 Elemente den folgenden Bildungsgesetzen gehorchen:

$$\gamma_{kk} = \frac{1}{2\pi\varepsilon} \ln \frac{2h_k}{r_k} \tag{2.1}$$

$$\gamma_{kl} = \gamma_{lk} = \frac{1}{2\pi\varepsilon} \ln \frac{D_{k'l}}{D_{kl}} \tag{2.2}$$

$[\Gamma]$ ist also eine symmetrische Matrix; diese Eigenschaft bleibt bei der Inversion bekanntlich erhalten. Die Auflösung der Gl. (1) nach den Ladungen ergibt

$$\boldsymbol{Q} = [\underline{\Gamma}]^{-1}\boldsymbol{U} = \boldsymbol{K}\boldsymbol{U} \tag{3}$$

worin die Matrix der Kapazitätskoeffizienten $\boldsymbol{K}$ die von jeder Leiterspannung verursachte Ladung pro Leiter angibt.

Gebräuchlicher ist es, die Ladung pro Leiter von der eigenen Spannung und der Spannungsdifferenz gegenüber den anderen Leitern abhängig darzustellen. Diese Form schreibt sich:

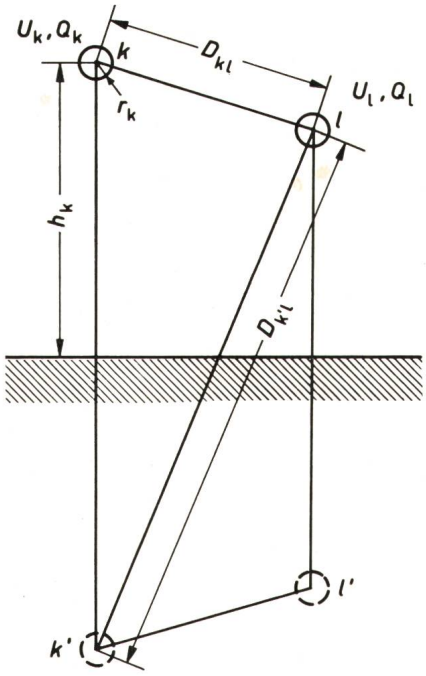

Fig. 1
Schema der Abstände zweier paralleler zylindrischer Leiter k und l

U	Spannung des Leiters gegen Erde
Q	Ladung des Leiters
h	Abstand des Leiters gegen Erde
D	Abstand Leiter gegen Leiter
k', l'	Spiegelbild der Leiter k, l, bezüglich der Erdoberfläche

$$\begin{aligned}
Q_1 &= C_{11}U_1 + C_{12}(U_1 - U_2) + C_{13}(U_1 - U_3) + C_{14}(U_1 - U_4) + C_{15}(U_1 - U_5) + C_{16}(U_1 - U_6)\\
Q_2 &= C_{21}(U_2 - U_1) + C_{22}U_2 + C_{23}(U_2 - U_3) + C_{24}(U_2 - U_4) + C_{25}(U_2 - U_5) + C_{26}(U_2 - U_6)\\
Q_3 &= C_{31}(U_3 - U_1) + C_{32}(U_3 - U_2) + C_{33}U_3 + C_{34}(U_3 - U_4) + C_{35}(U_3 - U_5) + C_{36}(U_3 - U_6)\\
Q_4 &= C_{41}(U_4 - U_1) + C_{42}(U_4 - U_2) + C_{43}(U_4 - U_3) + C_{44}U_4 + C_{45}(U_4 - U_5) + C_{46}(U_4 - U_6)\\
Q_5 &= C_{51}(U_5 - U_1) + C_{52}(U_5 - U_2) + C_{53}(U_5 - U_3) + C_{54}(U_5 - U_4) + C_{55}U_5 + C_{56}(U_5 - U_6)\\
Q_6 &= C_{61}(U_6 - U_1) + C_{62}(U_6 - U_2) + C_{63}(U_6 - U_3) + C_{64}(U_6 - U_4) + C_{65}(U_6 - U_5) + C_{66}U_6
\end{aligned} \tag{4}$$

Durch Ausmultiplizieren in Gl. (4), Ordnen nach den Leiter-Erdspannungen und Koeffizientenvergleich mit Gl. (3) erhält man folgende, für die Anschaulichkeit wichtige Beziehungen:

$$K_{kl} = K_{lk} = -C_{kl} = -C_{lk} \tag{5.1}$$

$$K_{kk} = \sum l\, C_{kl} \tag{5.2}$$

Wie aus Gl. (4) ersichtlich, hat die Matrix $\boldsymbol{C}$ aus physikalisch notwendiger Symmetrie maximal $6 + \frac{36-6}{2} = 21$ verschiedene Elemente. Diese sind in Fig. 2 dargestellt. Die Anwendung der einfachen und anschaulichen Berechnung mit symmetrischen Komponenten [1][1)] setzt aber bekanntlich die zyklische Symmetrie der Phasenimpedanzen voraus. Diese erfordert eine entsprechende Verdrillung nicht nur der einzelnen Leiter im System, sondern auch der Leiter der Systeme gegeneinander, über die Einzelheiten im einschlägigen Schrifttum zu finden sind. Die Matrix $\boldsymbol{C}$ hat in diesem Fall nur mehr 5 verschiedene Elemente:

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

$$
\begin{aligned}
C_{1E} &= C_{11} = C_{22} = C_{33} \\
C_{4E} &= C_{44} = C_{55} = C_{66} \\
C_{1L} &= C_{12} = C_{23} = C_{31} \\
C_{4L} &= C_{45} = C_{56} = C_{64} \\
C_{14} &= C_{15} = C_{16} = C_{24} = \ldots = C_{36}
\end{aligned}
\tag{6.1}
$$

Die Matrix $\boldsymbol{K}$ der Kapazitätskoeffizienten setzt sich daraus wie folgt zusammen:

$$
\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix}
(C_{1E}+2C_{1L}+3C_{14}) & -C_{1L} & -C_{1L} & -C_{14} & -C_{14} & -C_{14} \\
-C_{1L} & (C_{1E}+2C_{1L}+3C_{14}) & -C_{1L} & -C_{14} & -C_{14} & -C_{14} \\
-C_{1L} & -C_{1L} & (C_{1E}+2C_{1L}+3C_{14}) & -C_{14} & -C_{14} & -C_{14} \\
-C_{14} & -C_{14} & -C_{14} & (C_{4E}+2C_{4L}+3C_{14}) & -C_{4L} & -C_{4L} \\
-C_{14} & -C_{14} & -C_{14} & -C_{4L} & (C_{4E}+2C_{4L}+3C_{14}) & -C_{4L} \\
-C_{14} & -C_{14} & -C_{14} & -C_{4L} & -C_{4L} & (C_{4E}+2C_{4L}+3C_{14})
\end{bmatrix}
\tag{6.2}
$$

Die Bestimmung der symmetrischen Impedanzen kann grundsätzlich durch Anwendung der bekannten Symmetrierungs- und Entsymmetrierungsmatrizen auf $\boldsymbol{K}$ erfolgen. Weniger Rechenaufwand macht folgendes anschauliches Verfahren: Zur Bestimmung der Mitimpedanz des Systems [1; 2; 3] wird an dessen Klemmen ein Drehspannungssystem, das nur eine Mit-Komponente enthält, angelegt. Die inneren Spannungsquellen und die Klemmen des Systems [4; 5; 6] werden kurzgeschlossen. Wegen der zyklischen Symmetrie hat das auftretende Stromsystem ebenfalls nur eine Mitkomponente; Mit-Impedanz bzw. -Leitwert lassen sich leicht durch Quotientenbildung bestimmen. Für Gegen- und Nullsystem wird das analoge Verfahren angewandt. Man bezeichnet die Spaltenmatrizen der angelegten Spannungen wie folgt:

$$
\boldsymbol{U}^{M}{}_{[1,2,3]} = \begin{bmatrix} U_1 \\ a^2U_1 \\ aU_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
\tag{7.1}
$$

$$
\boldsymbol{U}^{0}{}_{[1,2,3]} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_1 \\ U_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
\tag{7.2}
$$

$$
\boldsymbol{U}^{M}{}_{[4,5,6]} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_4 \\ a^2U_4 \\ aU_4 \end{bmatrix}
\tag{7.3}
$$

Die Spaltenmatrizen der auftretenden Stromsysteme erhalten analoge Bezeichnungen, während die symmetrischen Impedanzen nach den obigen Voraussetzungen Diagonal-Matrizen sind.

Aus

$$
\boldsymbol{I}^{M}{}_{[1,2,3]} = \omega \boldsymbol{K} \boldsymbol{U}^{M}{}_{[1,2,3]} = \boldsymbol{Y}^{M}{}_{[1,2,3]} \boldsymbol{U}^{M}{}_{[1,2,3]}
\tag{8.1}
$$

bzw.

$$
\boldsymbol{I}^{0}{}_{[1,2,3]} = \omega \boldsymbol{K} \boldsymbol{U}^{0}{}_{[1,2,3]} = \boldsymbol{Y}^{0}{}_{[1,2,3]} \boldsymbol{U}^{0}{}_{[1,2,3]}
\tag{8.2}
$$

erhält man durch Koeffizientenvergleich

$$
\begin{aligned}
C^{M}{}_{[1,2,3]} &= C^{G}{}_{[1,2,3]} = C_{1B} + C_K \\
C^{0}{}_{[1,2,3]} &= C_{1E} + C_K
\end{aligned}
\tag{9}
$$

mit

$$
\begin{aligned}
C_{1B} &= C_{1E} + 3\,C_{1L} \\
C_K &= 3\,C_{14}
\end{aligned}
$$

und die analogen Gleichungen für das System [4; 5; 6]. Die so gewonnenen symmetrischen Impedanzen sind zusammen mit je einer reinen Mit-Spannungsquelle U_1 bzw. U_4 und den Erdschlusslöschspulen L_1 bzw. L_4 im Ersatzschaltbild Fig. 3 dargestellt.

2. Lösch- und Entkopplungsbedingungen

Tritt im Netz [1; 2; 3] ein Erdschluss der Phase 1 auf, so folgen aus den Phasen-Bedingungen $U_1 = 0$, $I_2 = I_3 = 0$ bekanntlich für die symmetrischen Komponenten

$$
I^0 = I^M = I^G = \frac{U^0{}_L + U^M{}_L + U^G{}_L}{Z^0 + Z^M + Z^G}
\tag{10}
$$

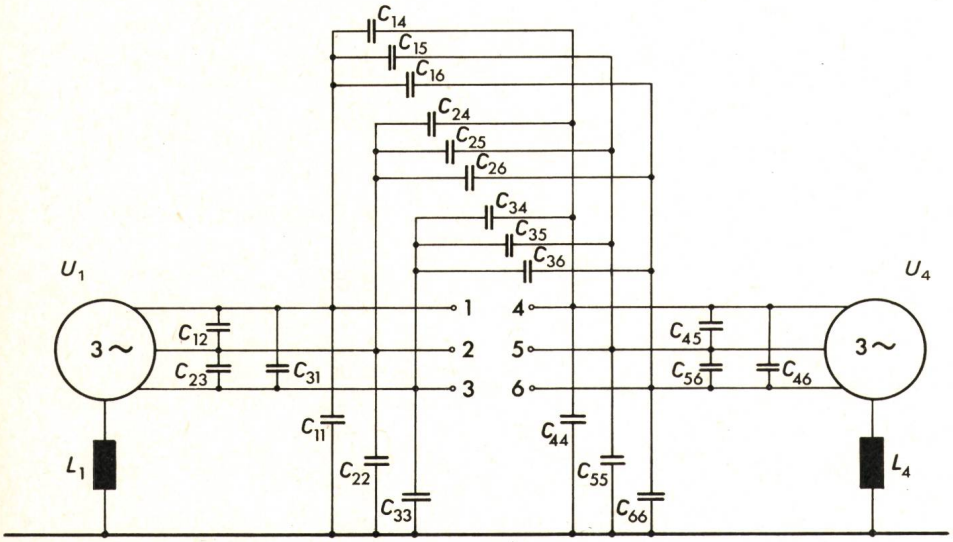

Fig. 2
Kapazitäten C_{kl} zweier galvanisch getrennter Drehstromsysteme mit Erdschlusslöschung

U Leiter-Erdspannung der Drehstromsysteme
L Erdschlusslöschspulen
C Kapazitäten

Über die treibende Spannung U_L gilt die obige Annahme; die resultierenden Mit- und Gegenimpedanzen sind gleich Null. Damit ergibt sich für den Erdschlußstrom des Systems [1; 2; 3] nach kurzer Zwischenrechnung:

$$I_{E[1,2,3]} = 3I^0{}_{[1,2,3]} = U_1\left[\left(\frac{1}{j\omega L_1} + j\omega \cdot 3\,C_{1E}\right) + \frac{j\omega \cdot 3\,C_K\left(\frac{1}{j\omega L_4} + j\omega \cdot 3\,C_{4E}\right)}{j\omega \cdot 3\,C_K + \frac{1}{j\omega L_4} + j\omega \cdot 3\,C_{4E}}\right] \tag{11}$$

$$I_{E[1,2,3]} = U_1\left[\left(\frac{1}{j\omega L_1} + j\omega \cdot 3\,C_{1E}\right) + \frac{\left(\frac{1}{j\omega L_K} + j\omega \cdot 3\,C_K\right)\left(\frac{1}{j\omega L_4} + j\omega \cdot 3\,C_{4E}\right)}{\left(\frac{1}{j\omega L_K} + j\omega \cdot 3\,C_K\right) + \left(\frac{1}{j\omega L_4} + j\omega \cdot 3\,C_{4E}\right)}\right] \tag{11a}$$

Es zeigt sich die interessante Tatsache, dass der Erdschlußstrom in einem System vom Löschmitteleinsatz in beiden Systemen abhängt, was zur Bezeichnung «gekoppelte Erdschlusslöschung» geführt hat. Die Bedingung $I_{E[1,2,3]} = 0$ liefert nur eine Gleichung für die beiden Veränderlichen ωL_1 und ωL_4, so dass man nach weiteren Bedingungen ausschauen muss. Wie man sich leicht überzeugen kann, gilt für die Nullspannung im System [4; 5; 6] folgender Ausdruck:

$$U^0{}_{[4,5,6]} = U_1 \frac{j\omega \cdot 3\,C_K}{j\omega \cdot 3\,C_K + \left(\frac{1}{j\omega L_4} + j\omega \cdot 3\,C_{4E}\right)} \tag{12}$$

Der naheliegende Wunsch, dass im System [4; 5; 6] keine Verlagerungsspannung bei einem Erdschluss im System [1; 2; 3] auftritt, ist also nicht erfüllbar. Bei Resonanz-Abstimmung im System [4; 5; 6] ist die Verlagerungsspannung dort gleich der Phasenspannung im System [1; 2; 3]. Bei Überkompensation im System [4; 5; 6] kann sogar der Nenner in Gl. (12) gleich Null werden, und damit ist die Verlagerungsspannung im System [4; 5; 6] nur mehr durch die Ohmschen Verluste beschränkt.

Eine Betriebsführung ist in dieser Konfiguration nicht möglich; ergänzt man eine Induktivität L_K parallel zur Koppelkapazität C_K, so erhalten die Gl. (11) und (12) folgende Gestalt:

$$U^0{}_{[4,5,6]} = U_1 \frac{\left(\frac{1}{j\omega L_K} + j\omega \cdot 3\,C_K\right)}{\left(\frac{1}{j\omega L_K} + j\omega \cdot 3\,C_K\right) + \left(\frac{1}{j\omega L_4} + j\omega \cdot 3\,C_{4E}\right)} \tag{12a}$$

Der Wunsch, einen Übertritt der Verlagerungsspannung von einem System in das andere zu verhindern, führt auf die Einstellvorschrift für die Induktivität L_K:

$$\omega L_K = \frac{1}{3\,\omega C_K} \tag{13.3}$$

Da nunmehr Erdschlußströme und -spannungen in den beiden Systemen voneinander unabhängig sind, nennt man Gl. (13.3) die Entkopplungsbedingung. Aus $I_E = 0$ ergibt sich dann die Abstimmvorschrift

$$\omega L_1 = \frac{1}{\omega \cdot 3\,C_{1E}} \tag{13.1}$$

bzw.

$$\omega L_4 = \frac{1}{\omega \cdot 3\,C_{4E}} \tag{13.2}$$

als Löschbedingung in jedem der beiden Systeme.

3. Verhalten im erdschlussfreien Zustand

Wegen der möglichen Gefährdung von Betriebsmitteln durch die in das gesunde Netz übertretende Nullspannung ist die Einhaltung der Entkopplungsbedingung (13.3) oft noch wichtiger als die Einhaltung der Löschbedingungen. Von allen Methoden, die der Abstimmkontrolle im erdschlussfreien Zustand dienen, hat sich das Verfahren der Resonanzabstimmung der Löschspulen [2] wegen seines einfachen gerätemässigen Aufbaues und seiner leichten Handhabung, besonders mit Tauchkern-Löschspulen [3], bevorzugt durchgesetzt. Ist dieses Verfahren auch auf gekoppelte Erdschlusslöscheinrichtungen anwendbar?

Zur Untersuchung dieser Frage muss die Voraussetzung der Impedanz-Symmetrie verlassen werden. Um trotzdem die bequeme und übersichtliche Methode der symmetrischen Komponenten anwenden zu können, wird der gleiche Kunstgriff wie in [2] herangezogen: In den Phasen 1 und 4 werden Zusatzkapazitäten ΔC_1 und ΔC_4 gegen Erde angenommen und als «Fehler» dem symmetrischen System überlagert. Für die Phasenbedingungen $I_2 = I_3 = 0$, $U_2 = U_3$ ergeben sich die Bedingungen für die symmetrischen Komponenten:

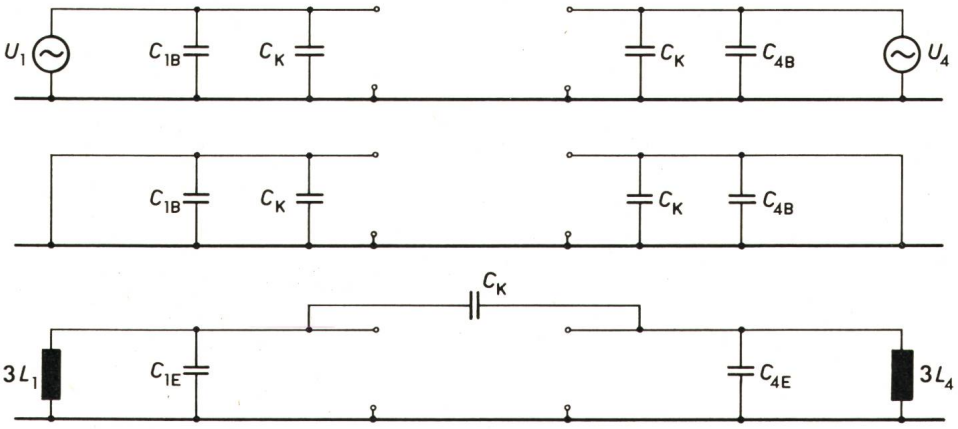

Fig. 3
Darstellung zweier zyklisch symmetrischer, erdschlussfreier Systeme in symmetrischen Komponenten
Bezeichnungen siehe im Text

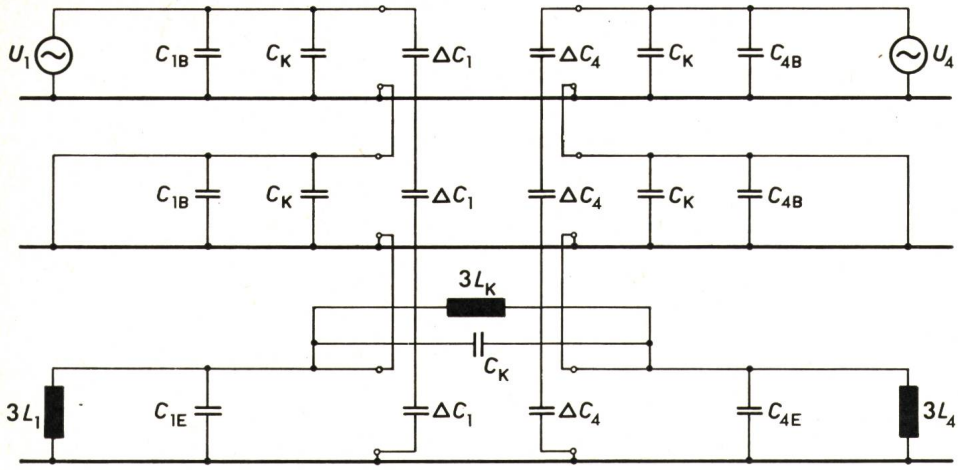

Fig. 4
Ersatzschaltbild für zwei, in je einer Phase unsymmetrische Systeme mit Entkopplungsspule
Bezeichnungen siehe im Text

$$I^0 = I^M = I^G = \frac{U^0{}_L + U^M{}_L + U^G{}_L}{Z^0 + Z^M + Z^G + 3\,Z_F} \qquad (14)$$

Diese sind unter denselben Voraussetzungen wie oben und mit $Z_F = \frac{1}{j\omega\Delta C}$ im Ersatzschaltbild für das unsymmetrische, erdschlussfreie System in Fig. 4 dargestellt.

Für die beiden Verlagerungsspannungen in den Systemen [1, 2, 3] und [4, 5, 6] sowie deren Differenz $U^0{}_{CK}$ ergeben sich folgende Ausdrücke:

$$U^0{}_{[1,2,3]} = \frac{j\omega \cdot \Delta C_1 U_1 - I_K}{\frac{1}{j\omega L_1} + j\omega \cdot 3\,C_{1E} + j\omega \cdot \Delta C_1} \qquad (15.1)$$

$$U^0{}_{[4,5,6]} = \frac{j\omega \cdot \Delta C_4 U_4 + I_K}{\frac{1}{j\omega L_4} + j\omega \cdot 3\,C_{4E} + j\omega \cdot \Delta C_4} \qquad (15.2)$$

$$U^0{}_{CK} = \frac{I_K}{\frac{1}{j\omega L_K} + j\omega \cdot 3\,C_K} \qquad (15.3)$$

Die Gl. (15.1), (15.2) und (15.3) sind voneinander abhängig in Analogie mit dem Verhalten des Erdschlußstromes in Gl. (11a). Das Maximum der Verlagerungsspannung $U^0{}_{[1,2,3]}$ ist jedoch auf alle Fälle durch das Minimum des Ausdruckes im Nenner bestimmt. Dieses Minimum tritt bei Erfüllung der Löschbedingung (13.1) für das unsymmetrische Netz ein. Die Gleichung für die Verlagerungsspannung $U^0{}_{[4,5,6]}$ ist analog aufgebaut. Es gilt also in beiden Netzen, und zwar unabhängig voneinander, dass die Bedingung für die grösste Verlagerungsspannung im erdschlussfreien Zustand (Resonanzbedingung) identisch ist mit der Löschbedingung im erdschlussfreien Zustand.

Wird die Entkopplungsspule L_K auf Resonanz mit der Koppelkapazität C_K abgestimmt, so wird die Spannung $U^0{}_{CK}$ ein Maximum, das nur durch die Ohmschen Verluste bestimmt ist. Die Erfüllung der Entkopplungsbedingung für den erdschlussbehafteten Zustand ist also identisch mit einem Maximum der Spannung zwischen den Sternpunkten im erdschlussfreien Zustand.

4. Andere Ausführungsformen von Entkopplungseinrichtungen

Die in Fig. 4 dargestellte Ausführung der Entkopplungseinrichtung ist selten, da die konstruktive Verwirklichung teuer ist. Eine andere Lösung beruht auf der Verwandlung der Dreieckschaltung der drei Induktivitäten in eine Sternschaltung. Die Ströme der beiden Löschspulen fliessen gemeinsam über eine Saugspule an Erde. Da diese Schaltung symmetrisch ist, ändert sich nichts Grundlegendes an dem in den beiden vorigen Kapiteln aufgestellten Formelapparat.

Unsymmetrisch ist hingegen die Schaltung der Entkopplungseinrichtung mit Saugtransformator. Wie aus Fig. 5 ersichtlich, liegt die eine Wicklung dieses Transformators T_S parallel zur Erdschlusslöschspule des einen Systems, die zweite Wicklung aber in Serie mit der Erdschlusslöschspule des anderen Systems. Die Untersuchung dieser Schaltung verläuft analog zur Untersuchung der Schaltung mit Ausgleichsspule, so dass nur die Ergebnisse angeführt seien.

Für das zyklisch symmetrische System gilt das Ersatzschaltbild in Fig. 5. In dieser sind die bereits wiederholt angeführten Voraussetzungen bezüglich Mit- und Gegensystem bereits berücksichtigt. Den Literaturstellen [4; 5] entnimmt man für Erdschluss in jeweils einem System die Löschbedingungen

$$\frac{1}{\omega L_1} = \omega \cdot 3\,C_{1E} + \omega \cdot 3\,C_K \qquad (16.1)$$

bzw.

$$\frac{1}{\omega L_4} = \omega \cdot 3\,C_{4E} + \frac{\omega \cdot 3\,C_K\,\omega \cdot 3\,C_{1E}}{\omega \cdot 3\,C_K + \omega \cdot 3\,C_{1E}} \qquad (16.2)$$

und die Entkopplungsbedingung, die eine Einstellvorschrift für die Übersetzung $\ddot{u}$ des Saugtransformators ist:

$$\ddot{u} = \omega^2 \cdot 3\,C_K L_1 \qquad (16.3)$$

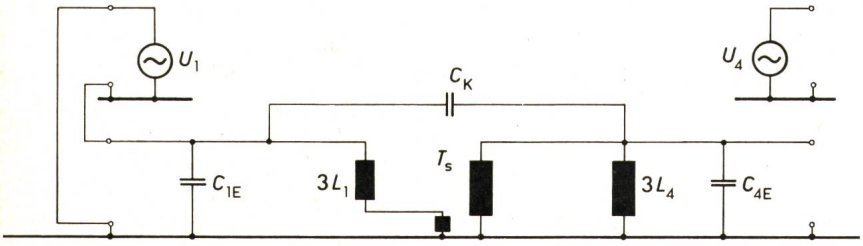

Fig. 5
Zwei zyklisch symmetrische Systeme mit Saugtransformator
Erdschluss in Phase 1
T_S Saugtransformator
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

Für das unsymmetrische, erdschlussfreie Netz, das in Phase 1 eine Zusatzkapazität ΔC_1 und in Phase 4 eine Zusatzkapazität ΔC_4 aufweist, gilt das Ersatzschaltbild gemäss Fig. 6. An ihm ermittelt man für die beiden Verlagerungsspannungen $U^0{}_{[1,2,3]}$ und $U^0{}_{[4,5,6]}$ sowie für deren Differenz $U^0{}_{CK}$ folgende Werte:

$$U^0{}_{[1,2,3]} = \frac{U_1\, j\omega \cdot \Delta C_1 - U^0{}_{[4,5,6]}\left(\frac{\ddot{u}}{j\omega L_1} + j\omega \cdot 3\, C_K\right)}{\left(\frac{1}{j\omega L_1} + j\omega \cdot 3\, C_{1E} + j\omega \cdot \Delta C_1 + j\omega \cdot 3\, C_K\right) + \left(\frac{\ddot{u}}{j\omega L_1} + j\omega \cdot 3\, C_K\right)} \tag{17.1}$$

$$U^0{}_{[4,5,6]} = \frac{U_4\, j\omega \cdot \Delta C_4 + U^0{}_{[1,2,3]}\left(\frac{\ddot{u}}{j\omega L_1} + j\omega \cdot 3\, C_K\right)}{\left(\frac{1}{j\omega L_4} + j\omega \cdot 3\, C_{4E} + j\omega \cdot \Delta C_4 + j\omega \cdot 3\, C_K + \frac{\ddot{u}^2}{j\omega L_1}\right) + \left(\frac{\ddot{u}}{j\omega L_1} + j\omega \cdot 3\, C_K\right)} \tag{17.2}$$

$$U^0{}_{CK} = \frac{I_K}{\left(\frac{\ddot{u}}{j\omega L_1} + j\omega \cdot 3\, C_K\right)} \tag{17.3}$$

Dem unsymmetrischen Aufbau entspricht die Unsymmetrie in den Löschbedingungen. Auch nach Erfüllung der Entkopplungsbedingungen (16.3) muss zwar die Einstellung der Löschspule L_1 nur die Erdkapazität im eigenen System berücksichtigen, die Einstellung der Erdschlusslöschspule L_4 hingegen hängt von den Erdkapazitäten in beiden Systemen ab.

Erfreulicherweise lassen sich die Einstellungen der Erdschlusslöschmittel wieder durch Resonanzabstimmung im erdschlussfreien Zustand finden. Die Erfüllung der Entkopplungsbedingung kann jederzeit an der Spannung $U^0{}_{CK}$ [Gl. (17.3)] kontrolliert werden. Ein relatives Maximum der Verlagerungsspannung $U^0{}_{[1,2,3]}$ entsteht nach Gl. (17.1) durch Erfüllung der Löschbedingung (16.1), ein absolutes Maximum nur bei gleichzeitiger Erfüllung der Entkopplungsbedingung (16.3). Die Suche nach einem Maximum der Verlagerungsspannung $U^0{}_{[4,5,6]}$ durch Erfüllung der Löschbedingung (16.2) hat erst anschliessend daran einen Sinn.

5. Anwendungsmöglichkeiten für die Resonanzabstimmung

Die folgenden Gedankengänge sollen nur Beispiele für die Anwendung des Resonanzprinzipes bei gekoppelten Erdschlusslöscheinrichtungen sein. Die zugehörigen Formeln können im Bedarfsfall leicht in Analogie zu den bei Resonanzabstimmung einfacher Erdschlusslöschsysteme geltenden hergeleitet werden.

Im Vordergrund steht die betriebsmässige Anwendung des Resonanzprinzipes für die bei Schaltungsänderungen im Netz notwendige Nachstimmung der Löschmittel. Voraussetzung ist der Einbau von drei Resonanzvoltmetern und wohl auch die Fernsteuerbarkeit der Löschspulen bzw. Saugspulen oder Saugtransformatoren von der Warte aus. Je nach der Konfiguration muss eine gewisse Reihenfolge der Abstimmversuche eingehalten werden, um den gegenseitigen Abhängigkeiten Rechnung zu tragen. Dies setzt ein gewisses Mitdenken des Schaltpersonals bzw. Erfahrung voraus.

Bei Inbetriebsetzungsversuchen kann man die Formeln für die Verlagerungsspannung benutzen, um die vorausberechneten Kapazitätswerte auch ohne Erdschluss zu kontrollieren. Die Aufnahme von drei relativen Maxima der Verlagerungsspannung genügt, um aus drei Gleichungen für die drei unbekannten Kapazitäten diese berechnen zu können. Derartige Versuche wurden an einer Schaltung mit Saugtransformator in einem 110-kV-Netz durchgeführt. Bei einer Auswertung nach Gl. (17.1) bis (17.3) ergab sich gute Übereinstimmung der Ergebnisse mit den Zahlenwerten nach anderen Methoden, und alle Erscheinungen bei den Abstimmversuchen konnten an dem in Fig. 6 dargestellten Modell erklärt werden.

Auch einem weiteren Eindringen in die Netzverhältnisse durch Resonanzversuche im erdschlussfreien Zustand stehen keine prinzipiellen Hindernisse entgegen. Unangenehm ist nur der gegenüber einfachen Erdschlusslöschsystemen umfangreichere Formelapparat. Die Resonanzüberhöhung der Verlagerungsspannung ist bekanntlich gleich dem Verhältnis $\beta =$ Wattreststrom/kapazitivem Erdschlußstrom. Der Wattreststrom kann also ohne Erdschlussversuch ermittelt werden. Bei gegebenem β ist die maximale Verlagerungsspannung durch die kapazitive Unsymmetrie $\delta = \omega \cdot \Delta C/\omega \cdot 3\, C_E$ bestimmt. Die Ermittlung des Wertes von ΔC gibt Hinweise auf entsprechende Abhilfemassnahmen.

6. Zusammenfassung

Für zwei parallellaufende Drehstromleitungen wird aus dem in Matrixform gegebenen Kapazitätsschema ein Ersatzschaltbild in symmetrischen Komponenten abgeleitet. Bei Erdschluss in einem der galvanisch getrennten Systeme tritt eine

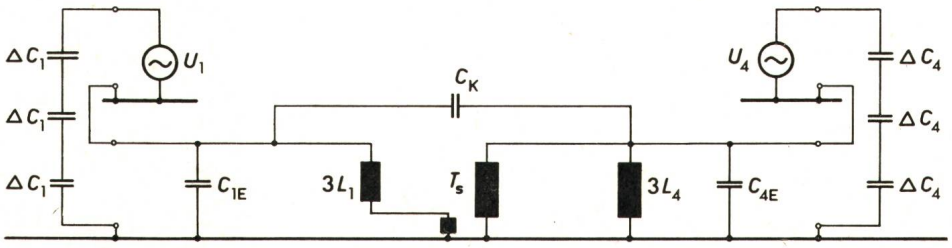

Fig. 6
Zwei erdschlussfreie Systeme mit Saugtransformator
Unsymmetrien in Phase 1 und 4
Bezeichnungen siehe im Text

Beeinflussung des anderen Systems auf, die durch die bekannten gekoppelten Erdschlusslöscheinrichtungen beseitigt wird. Für diese Löscheinrichtungen wird das Verhalten der Verlagerungsspannungen in kapazitiv unsymmetrischen Systemen unter Weiterverwendung des Ersatzschaltbildes diskutiert und die Gleichheit der Resonanzbedingungen im erdschlussfreien Zustand mit den Löschbedingungen im Erdschlussfall bewiesen. Für zwei wichtige Ausführungsformen werden die Formeln für die Verlagerungsspannungen angegeben und über deren Anwendungsmöglichkeiten in Versuchen und im Betrieb berichtet.

Literatur

[1] *A. Hochrainer:* Symmetrische Komponenten in Drehstromsystemen. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1957.

[2] *K. Millian:* Die Abstimmung von Erdschlusslöschspulen in unsymmetrischen Drehstromnetzen. ÖZE 23(1970)1, S. 12...18.

[3] *J. Hirmann* und *K. Millian:* Erdschlusslöschspulen in Tauchkernausführung für Mittelspannungsnetze. Elin-Z. 16(1964)3, S. 95...102.

[4] *R. Willheim:* Das Erdschlussproblem in Hochspannungsnetzen. Berlin, Julius Springer Verlag, 1936.

[5] *W. Diesendorf* und *E. Gross:* Entkopplungseinrichtungen für parallel geführte Hochspannungsleitungen. E und M, I. Teil. 53(1935)41, S. 481 ...486. II. Teil. 53(1935)51, S. 601...606.

Adresse des Autors:

Dr. techn., Dipl.-Ing. *Kurt Millian,* Tivoligasse 63, A-1120 Wien.

JOHN HOPKINSON

1849 — 1898

John Hopkins war als Sohn eines Maschineningenieurs am 27. Juli 1849 in Manchester geboren worden. Nach dem Durchlaufen des Owen-Colleges in Manchester und des Trinity-Colleges in Cambridge, wo er sich auch sportlich betätigte, bestand er 1871 sein Examen. Daran anschliessend machte er eine Praxis im Betrieb seines Vaters. Ein Jahr darauf wurde er Leiter der Leuchtturm-Beleuchtungsabteilung einer Fabrik optischer Instrumente. Die aufkommende Elektrizität schuf auch auf diesem Gebiet neue Möglichkeiten. Hopkinson interessierte sich immer mehr für den neuen Wissenszweig, verliess die Firma und etablierte sich als Elektrizitätsexperte in London. In einer 1879 publizierten Arbeit «Über elektrische Beleuchtung» stellte er das Verhalten der Dynamos erstmals graphisch dar (*Deprez* nannte diese Kurven später «Charakteristiken»).

1886 legte er zusammen mit seinem jüngern Bruder *Edward* der Royal Society eine Studie vor über die Mechanik der Dynamos, in der gezeigt wird, wie man auf wissenschaftlicher Basis solche Charakteristiken vorausberechnen kann.

1883 hatte er ein Synchronisier-Verfahren und den Weg zum Bau von Synchron-Motoren angegeben.

Unter seinen über 40 Patenten ist dasjenige über die Serie-/Parallelschaltung von Traktionsmotoren zu grosser praktischer Bedeutung gelangt. Den Elektrizitätswerken leistete sein Vorschlag des Doppeltarifes gute Dienste.

In der Spanne von 1880 bis 1890 war Hopkinson fast ausschliesslich als Experte tätig, oft für die Gerichte in Patentstreitigkeiten. Dies sei seine lukrativste Tätigkeit gewesen, sagte er später. 1881 wirkte er auch in der Jury der Pariser Elektrizitätsausstellung mit.

1890 wurde er als Professor für Elektrotechnik ans neugegründete Kings College der Universität London berufen. Dass bei ihm mathematisches Talent, wissenschaftliche Begabung und Verständnis für die Praxis vereint waren, kam ihm dabei sehr zustatten. Er war einer der wenigen, der gleichzeitig Mitglied der drei Institute der Civil-, Mechanical- und Electrical-Engineers war.

Hopkinson war ein begeisterter Alpinist und machte als solcher seit 1871 regelmässig in der Schweiz Ferien. Am 27. August 1898 stürzte er, zusammen mit seinem Sohn und seinen beiden Töchtern, am Petit Dent im Val d'Hérens zu Tode. *H. Wüger*