Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 34 (1943)

Heft: 1

Artikel: Die gegenseitige Beeinflussung benachbarter Hochspannungsleitungen verschiedener Betriebsfrequenz : (mit besonderer Berücksichtigung von Einphasensromübertragungen 16 Hz und Drehstromübertragungen 50 Hz am gleichen Gestänge)

Autor: Gross, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1061702

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: 08.08.2025

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

Die gegenseitige Beeinflussung benachbarter Hochspannungsleitungen verschiedener Betriebsfrequenz

(Mit besonderer Berücksichtigung von Einphasenstromübertragungen $16^2/_3$ Hz und Drehstromübertragungen 50 Hz am gleichen Gestänge)

Von *E. Gross*, Wien

621.3.013.7 : 621.315.051.025.3

Es wird untersucht, welche Beeinflussungen auftreten, wenn Uebertragungssysteme für Drehstrom 50 Hz und Bahnstrom geringerer Frequenz (beispielsweise 16⅔ Hz) in enger Nachbarschaft verlaufen und in dem einen oder andern System ein Erdschluss entsteht. Dabei wird angenommen, dass die Nullpunkte der beiden Uebertragungssysteme entweder isoliert sind, oder dass Erdschlußspulen (abgestimmt induktive Nullpunkterdung) vorgesehen sind. Die induktive Beeinflussung durch Erdschlüsse, falls die Nullpunkte direkt oder über geringe Widerstände geerdet sind, wird nicht untersucht, weil diese Fälle praktisch nicht von Bedeutung sind. Die Untersuchung zeigt, dass es nicht nötig ist, Einrichtungen zur Entkopplung der beiden Uebertragungssysteme vorzusehen; selbst im ungünstigsten Falle, wenn für die beiden Leitungen dasselbe Gestänge verwendet wird, sind Entkopplungseinrichtungen nicht erforderlich. Die auftretenden Erdspannungen bleiben unter jener Beanspruchung, die bei sattem Erdschluß jedes Systems auftritt. Die Anordnung von Erdschlußspulen bringt für die Beeinflussung des Bahnnetzes durch das erdgeschlossene Drehstromnetz keine wesentliche Veränderung. Hingegen erfährt die Beeinflussung des Drehstromnetzes bei Anordnung von Erdschlußspulen durch das erdgeschlossene Bahnnetz eine bedeutende Reduktion; das Drehstromnetz verhält sich in diesem Falle angenähert so, als ob sein Nullpunkt direkt geerdet wäre. Die theoretischen Ueberlegungen und Berechnungen werden durch oszillographische Aufnahmen praktischer Versuche gut bestätigt.

L'auteur examine les influences réciproques qui se produisent quand des systèmes de transport d'énergie en courant triphasé à 50 Hz et en courant de traction à fréquence plus faible (par exemple 16⅔ Hz) sont très rapprochés et qu'une mise à la terre accidentelle se produit dans l'un ou l'autre de ces systèmes. Il suppose que les points neutres des deux systèmes sont isolés ou que des bobines de terre sont prévues (mise à la terre inductive et graduée du point neutre). Il laisse de côté l'influence inductive résultant de mises à la terre accidentelles, car ces cas n'ont pratiquement que peu d'importance. Cette étude montre qu'il n'est pas nécessaire de prévoir des dispositifs de désaccouplement des deux systèmes de transmission, même dans le cas le plus défavorable, lorsque les deux lignes utilisent les mêmes pylônes. Les tensions à la terre demeurent inférieures à la sollicitation qui se présente lors d'une mise à la terre accidentelle caractérisée de chaque système. Le montage de bobines de terre ne modifie guère l'influence qu'exerce la ligne triphasée mise accidentellement à la terre sur la ligne du réseau de traction. Par contre, le montage de telles bobines réduit sensiblement l'influence qu'exerce la ligne de traction affectée d'une mise à la terre accidentelle sur la ligne triphasée. Dans ce cas, la ligne triphasée se comporte comme si son point neutre était directement mis à la terre. La justesse des considérations théoriques et des calculs est confirmée par les relevés oscillographiques obtenus au cours d'essais pratiques.

Die bekannten Untersuchungen über die gegenseitige Beeinflussung ganz oder teilweise parallel geführter Starkstrom-Hochspannungsleitungen betreffen Uebertragungen, die genau oder annähernd *dieselbe* Frequenz besitzen. Das wichtigste Problem ist dann die gegenseitige *kapazitive* Beeinflussung der beiden Leitersysteme, die in manchen Fällen die Anordnung von Entkopplungseinrichtungen [1]) nötig macht.

A. Systeme mit freiem Nullpunkt

Im folgenden soll untersucht werden, welchen Einfluss Uebertragungssysteme wesentlich *verschiedener Betriebsfrequenz* wechselseitig aufeinander ausüben; den Grenzfall stärkster Kopplung bildet die Beeinflussung zwischen Bahnstromsystem und Drehstromsystem am *gleichen* Gestänge. Im normalen, ungestörten Betrieb der Uebertragungen finden kapazitive Beeinflussungen — und nur solche sollen im folgenden behandelt [2]) werden — nicht statt, wenn die einzelnen Phasenleiter jedes Stromkreises im üblichen Ausmass verdrillt sind. Diese *kapazitiven* Beeinflussungen parallel geführter Hochspannungsleitungen bestehen in der Uebertragung von Nullpunktverlagerungen des einen Systems auf das andere. Dabei entstehen Nullpunktverlagerungen in der Hauptsache durch einpolige *Erdschlüsse*. Weil alle Phasenleiter eines Systems von der Verlagerung in gleicher Weise erfasst werden, können wir uns bei den grundsätzlichen Ueberlegungen darauf beschränken, nur die Nullpunktspannungen der Systeme zu untersuchen. Man hat sich also die einzelnen Phasenleiter zu einem einzigen Ersatzleiter zusammengefasst zu denken und dessen kapazitive Kopplungen gegen Erde und gegen den benachbarten Ersatzleiter zu betrachten. So entsteht das Schema der Fig. 1, in welchem der Ersatzleiter *1*

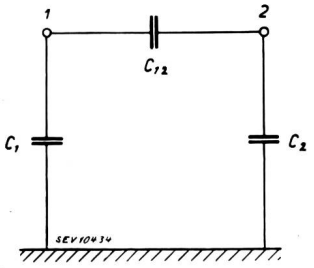

Fig. 1.
Ersatzschema benachbarter Uebertragungsleitungen.

das Leitungssystem *1* bezeichnet und der Ersatzleiter *2* das Leitungssystem *2*. Dann ist C_1 die Erdkapazität [3]) des gesamten Systems *1*, C_{12} die gegenseitige Kapazität zwischen beiden Systemen *1* und *2*, die also nur infolge der lokalen Parallelführungen auftritt, und C_2 die Erdkapazität des Systems *2*. Im folgenden soll mit *1* immer das System niedrigerer Frequenz, die Bahnübertragung (Leiter *D*, *E*), bezeichnet werden und mit *2* das System höherer Frequenz, die 50per. Drehstromübertragung (Leiter *A*, *B*, *C*). Entsteht im System *1*, beispielsweise durch

[1]) E. Gross und W. Diesendorf, C. I. G. R. E. Paris 1935, Bericht 341, und E. u. M., Bd. 53 (1935), S. 481.

[2]) In Netzen mit starr geerdetem Nullpunkt, die wir hier nicht betrachten wollen, treten bei Erdkurzschlüssen induktive Beeinflussungen auf.

[3]) Das ist also die gesamte Erdkapazität aller galvanisch miteinander verbundenen Leiter des Systems *1*. Im allgemeinen Fall wird das Uebertragungssystem aus Strecken bestehen, die mit den Strecken des Systems *2* parallel laufen und aus Strecken, die vom System *2* vollkommen unabhängig sind. Aehnliches gilt für das System *2*.

einen Erdschluss, eine Nullpunktverlagerung U_1, so wird sich diese im umgekehrten Verhältnis der Kapazitäten C_{12} und C_2 als Nullpunktverlagerung U_2 auch auf das System *2* übertragen; der aus dem System *1* über C_{12} nach *2* fliessende Strom muss über C_2 wieder nach der Erde abgeleitet werden. Bei gleichen Phasenwinkeln der übrigens verlustlos [4]) gedachten Kapazitäten C_1, C_{12} und C_2 gilt:

$$U_{12} \cdot C_{12} = U_2 \cdot C_2$$

und mit $U_1 = U_{12} + U_2$ wird

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{C_{12}}{C_{12} + C_2} \qquad (1)$$

Für ein bestimmtes Verhältnis zwischen der gegenseitigen Kapazität C_{12} und der Erdkapazität C_2 des Drehstromsystems gilt dann die Darstellung in Fig. 2: ein Teil der Verlagerungsspannung U_1 entfällt als U_2 auf das System *2*.

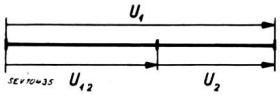

Fig. 2.
Beeinflussung von System *2* durch Erdschluss in System *1*.

Bei der Beeinflussung von Stromsystemen *gleicher Frequenz* entstehen die tatsächlichen Erdspannungen durch *vektorielle* Zusammensetzung der Schwerpunktspannungen mit der Nullpunktverlagerung. Im vorliegenden Fall kommen die Gesetze der Addition von Strömen bzw. Spannungen verschiedener Frequenz zur Anwendung. Die Schwerpunktspannungen des Drehstromsystems *2* sind 50-periodig, während der eben ermittelte Anteil U_2 der Nullpunktverlagerung U_1 der Bahnübertragung eine wesentlich niedrigere Frequenz (nämlich 25 Hz oder $16^2/_3$ Hz) aufweist. Demgemäss hat die Zusammensetzung nach Fig. 3 zu erfolgen, wo der

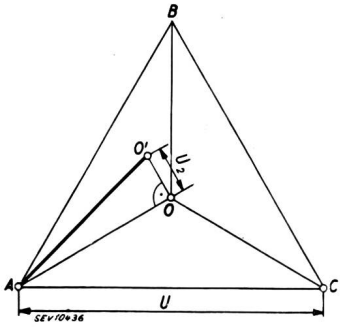

Fig. 3.
Ermittlung der Erdspannungen der Drehstromleiter *A, B, C*.

effektive Wert der Erdspannung des Phasenleiters *A* ermittelt ist. Zur Schwerpunktspannung $\overline{AO}$ dieses Leiters ist die Nullpunktverlagerung U_2 *rechtwinklig* zu addieren. Man kommt so zu Punkt O' und in $\overline{AO'}$ zum effektiven Wert der Erdspannung des Leiters *A*. Die Konstruktion kann für Drehstromsysteme nur nacheinander an jedem Leiter vorgenommen werden, weil es sich eigentlich um eine dreidimensionale Aufgabe handelt. Die Spannungsvektoren des Drehstromsystems erfüllen die Ebene *ABC*, so dass in *O* eine dazu Senkrechte über der Bildfläche zu errichten wäre. Es entsteht dann eine dreischenklige Pyramide mit der Grundfläche *ABC* und der Höhe U_2 ($\overline{OO'}$ umgeklappt).

Gleichartige Ueberlegungen gelten für die Uebertragung einer Nullpunktspannung U_2 des Drehstromsystems *2* auf das Bahnsystem *1*. Es ist schon aus Symmetriegründen:

$$U_1 = U_2 \cdot \frac{C_{12}}{C_1 + C_{12}} \qquad (2)$$

Für die graphische Darstellung gelten Fig. 4 und das Vektordiagramm der Fig. 5. Dabei ist mit *U* sowohl in Fig. 3 als auch in Fig. 5 die verkettete Spannung bezeichnet und in Fig. 4 mit U_1 die Nullpunktverlagerung, welche dem Bahnsystem *1*

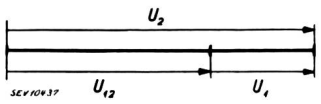

Fig. 4.
Beeinflussung von System *1* durch Erdschluss in System *2*.

durch den Erdschluss des 50periodigen Drehstromsystems *2* aufgedrückt wird.

Um festzustellen, ob es notwendig ist, Entkopplungseinrichtungen vorzusehen, müssen wir uns über die Grösse der auf das benachbarte System influenzierten Nullpunktverlagerung ein Bild schaffen. Aus den Gleichungen (1) und (2) ist zunächst zu entnehmen, dass die Erdkapazitäten C_2 bzw. C_1 die Grösse der auf das andere System übertragenen Nullpunktverlagerung wesentlich beeinflussen. Je grösser die Erdkapazitäten sind, um so kleiner ist der Anteil der auf das benachbarte System entfallenden Spannung. Im allgemeinen werden die

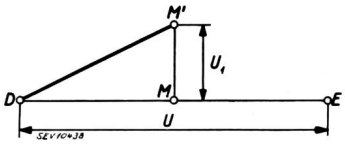

Fig. 5.
Ermittlung der Erdspannungen des isolierten Einphasensystems *D, E*.

Parallelführungen zwischen den frequenzverschiedenen Systemen nur Teilstrecken in jedem der beiden Gesamtnetze sein. Die Erdkapazitäten werden aus der Erdkapazität auf der Parallelführung durch Hinzufügung der Erdkapazität des übrigen Systems entstehen. Betrachten wir nun in einem Zahlenbeispiel Systeme, welche über ihre *ganze Länge* Parallelführungen engster Kopplung aufweisen, so sind die Ergebnisse eines solchen Zahlenbeispieles sicher *nicht zu günstig* gegriffen, so dass wir darnach *allgemeine* Aussagen über die Notwendigkeit der Anordnung von Entkopplungseinrichtungen machen können. In den praktisch vorkommenden Fällen sind die *verketteten Betriebsspannungen* der beiden einander beeinflussenden Systeme für die Uebertragung von Bahnstrom bzw. Kraft- und Lichtstrom *ungefähr gleich*. Wir wählen deshalb als Beispiel ein modernes Gestänge nach Fig. 6 für 110 kV verkettete Betriebsspannung sowohl im

[4]) Wir vernachlässigen sämtliche Verluste bei allen folgenden Ueberlegungen. Dies ist deshalb zulässig, weil die Berücksichtigung der Verluste nur eine unwesentliche Vergrösserung der Genauigkeit unserer Berechnungen, dabei jedoch eine bedeutende Komplikation bringen würde. Im Gegensatz hiezu spielen die Verluste bei Resonanzproblemen eine ausschlaggebende Rolle, siehe l. c. [1]).

Bahnsystem *D*, *E* als auch im Drehstromsystem *A*, *B*, *C*; die Uebertragungsleiter *A* bis *E* besitzen 120 mm² Kupferquerschnitt, die beiden Erdseile *F* und *G* sind aus Stahl 70 mm². Der mittlere Mastabstand betrage 230 m, dann ergeben sich für die Kupferleiter der Durchhang *DD'* und für die Erdseile der Durchhang *GG'*. Die genaue Berechnung nach die-

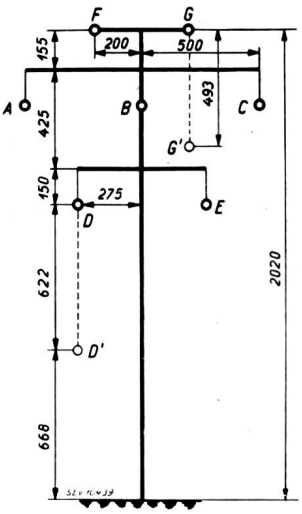

Fig. 6.
Mastbild für 110-kV-Hochspannungsleitungen mit Drehstrom (Leiter *A*, *B* und *C*) und Bahnstrom (Leiter *D*, *E*), Erdseile *F* und *G*. Maße in mm.

sem Mastbild liefert (ohne Berücksichtigung von Zuschlägen bei den Erdkapazitäten für den durch die Maste gebrachten zusätzlichen Einfluss der Erde) in μF/km die Werte: $C_1 = 0{,}0097$, $C_{12} = 0{,}0043$ und $C_2 = 0{,}0151$. Setzen wir diese Werte in Gleichung (1) ein, so folgt:

Beeinflussung des Drehstromsystems bei Erdschluss im Bahnsystem

$$U_2 = 0{,}23\, U_1 \qquad (1a)$$

und gemäss Gleichung (2) für die

Beeinflussung des Bahnsystems durch das erdgeschlossene Drehstromsystem

$$U_1 = 0{,}32\, U_2 \qquad (2a)$$

Die Werte in den Gleichungen (1a) bzw. (2a) sind kleiner, als für die Verlagerung in den Fig. 3 und 5 angenommen wurde. Man erkennt daraus, dass es im allgemeinen *nicht* nötig sein wird, Entkopplungseinrichtungen vorzusehen. Von Sonderfällen, die bei wesentlich verschiedenen verketteten Betriebsspannungen der Systeme *1* und *2* auftreten, muss natürlich abgesehen werden. Berechnen wir jetzt die Erdspannungen des Drehstromsystems *2*, so erhalten wir nach Fig. 3, wegen $U = 110$ kV mit $\overline{AO} = 63{,}5$ kV und $U_2 = 0{,}23 \cdot 55$ kV $= 12{,}6$ kV (wegen $U = 110$ kV ist $U_1 = {}^1/_2 \cdot 110$ kV $= 55$ kV), schliesslich $\overline{AO'} = \sqrt{(63{,}5)^2 + (12{,}6)^2} \approx 65$ kV. Aehnlich gilt für die Beeinflussung in der andern Richtung mit $U = 110$ kV und $\overline{DM} = 55$ kV der Fig. 5 wegen $U_1 = 0{,}32 \cdot 63{,}5$ kV $= 20{,}3$ kV, schliesslich $\overline{DM'} = \sqrt{55^2 + (20{,}3)^2} \approx 59$ kV. Da die Anlagen in beiden Fällen für Betrieb mit Dauererdschluss für *dauernd* 110 kV gegen Erde isoliert sind, ist eine derartige Beanspruchung *vollkommen unbedenklich*. Wenn die beiden Netze nicht starr, also durch Synchronumformer miteinander gekuppelt sind, sondern elastisch durch Asynchronumformer, oder überhaupt unabhängig voneinander sind, so dass das Frequenzverhältnis nicht konstant ist, sondern etwas schwankt, kann es vorkommen, dass als Höchstwerte Momentanwerte entstehen, welche aus der *algebraischen* Addition von Amplituden hervorgehen. Während also die Maximalamplituden bei sattem Erdschluss 155 kV betragen, entsprechend 110 kV verketteter Spannung, entstehen in diesen Fällen folgende ungünstigsten Werte: Gemäss Gleichung (1a) ist $U_{2max} = 0{,}23 \cdot {}^1/_2 \cdot 110 \cdot 1{,}41 \approx 18$ kV, so dass sich durch algebraische Addition dieses Wertes zum Maximalwert der normalen Erdspannung (das ist $63{,}5 \cdot 1{,}41 \approx 90$ kV) die Summe von 108 kV ergibt, die wesentlich unter den bei Erdschluss auftretenden 155 kV bleibt. Aehnlich gilt gemäss Gleichung (2a) für die Beeinflussung in der umgekehrten Richtung: $U_{1max} = 0{,}32 \cdot 63{,}5 \cdot 1{,}41 = 28{,}6$ kV, so dass durch algebraische Addition zum Maximalwert der normalen Erdspannung (das ist $55 \cdot 1{,}41 = 77{,}6$ kV) die Summe von 106 kV entsteht, die ebenfalls weit unter der noch zulässigen Grenze von 155 kV bleibt.

B. Der Einfluss von Erdschlußspulen

Bei den bisherigen Ueberlegungen wurde angenommen, dass die beiden einander im Erdschluss beeinflussenden Systeme mit freien Nullpunkten betrieben werden. Diese Betriebsweise kommt heute jedoch nur bei Netzen relativ geringen Umfanges vor, also bei Netzen, deren Erdschlußstrom verhältnismässig klein ist. In Netzen grösseren Umfanges werden die Nullpunkte in irgendeiner Weise mit der Erde verbunden, und zwar werden die Nullpunkte bei der einen Betriebsweise direkt über ohmsche Widerstände geerdet, bei der andern Betriebsweise werden *Erdschlußspulen* vorgesehen, die bei Betriebsfrequenz auf die Erdkapazität des gesamten Netzes abgestimmt sind. Wir wollen uns im folgenden nur mit dieser zweiten Möglichkeit beschäftigen, weil sie allein für die hier behandelten Untersuchungen über die gegenseitige Beeinflussung *von praktischem Interesse* ist.

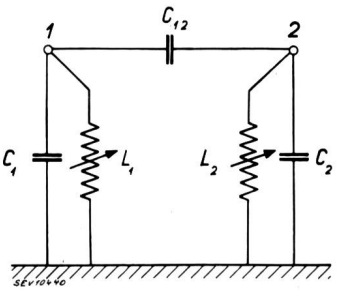

Fig. 7.
Ersatzschema benachbarter Uebertragungsleitungen, die mit Erdschlussspulen geschützt sind.

Bei Anordnung von Erdschlußspulen ist das Ersatzschema Fig. 1 um Induktivitäten zu erweitern, die parallel zu den Erdkapazitäten zwischen die Ersatzleiter und Erde geschaltet sind. Es entsteht so als neues Ersatzschema die Fig. 7, wobei sich die Grösse der Induktivitäten L_1 und L_2 aus den Abstimmungs-Gleichungen

$$\omega_1^2\, C_1\, L_1 = 1 \text{ und } \omega_2^2\, C_2\, L_2 = 1$$

ergibt. Wir vernachlässigen auch jetzt wieder zusätzliche Verlustwiderstände [4]) und nehmen ferner an, dass die Induktivitäten L ebenso wie die Kapazitäten C konstant sind, dass also die Eisensättigung der Drosselspulen (L_1 und L_2) nicht berücksichtigt werden muss. Das Ergebnis der Rechnungen wird die Berechtigung dieser Annahme nachträglich beweisen, denn Erdschlußspulen werden so gebaut, dass die Sättigung erst bei Spannungen, die in der Grössenordnung der Sternspannung liegen, einsetzt.

Wir nehmen nun wieder an, dass in System *1* ein Erdschluss entstehe, so dass das System *2* vom System *1* influenziert werde; System *1* steht unter der Nullpunktverlagerung U_1 (Kreisfrequenz ω_1). Um die Spannung U_2 zu bestimmen, welche jetzt im Drehstromsystem *2* auftritt, müssen wir in Gleichung (1) an Stelle von C_2 einen neuen Wert K_2 einsetzen. Dabei ist K_2 die «Ersatzkapazität», welche als Resultierende der Parallelschaltung von C_2 und L_2 bei ω_1 entsteht. Wir können also schreiben:

$$\omega_1 K_2 = \omega_1 C_2 - \frac{1}{\omega_1 L_2},$$

setzen jetzt die Abstimmungsbeziehung $\frac{1}{L_2} = \omega_2^2 \cdot C_2$ darin ein und erhalten

$$\omega_1 K_2 = \omega_1 C_2 \left(1 - \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2}\right)$$

also

$$K_2 = C_2 \left(1 - \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2}\right) \qquad (3)$$

Da ω_2 (Drehstromsystem) grösser ist als ω_1 (Bahnstromsystem), wird der Klammerausdruck und damit K_2 negativ. K_2 hat also «induktiven» Charakter. Diese Tatsache ist physikalisch durchaus einleuchtend, da C_2 und L_2 auf Resonanz bei der grösseren Frequenz (ω_2) abgestimmt sind, so dass bei kleinerer Frequenz (ω_1) vor allem der verringerte induktive Widerstand von L_2 ausschlaggebend ist. Gehen wir zu immer kleineren Frequenzen, im Grenzfall zu $\omega = 0$ zurück, dann entsteht wegen $\omega \cdot L_2 = 0$ die satte Nullpunkterdung, bei welcher eine Influenzspannung U_2 nicht auftreten kann. Es ist aus dieser grundsätzlichen Ueberlegung schon zu erkennen, dass die Anordnung einer Erdschlußspule im Drehstromsystem *2* gegenüber den Verhältnissen in Netzen mit freiem Nullpunkt eine Verringerung von U_2 bringt. Wir wollen die Verhältnisse aber auch noch zahlenmässig am Beispiel der Leitung nach Fig. 6 untersuchen. Bei $f_1 = 16^2/_3$ Hz ($\omega = 2\pi f$) und $f_2 = 50$ Hz wird gemäss Gleichung (3)

$$K_2 = -8\, C_2,$$

also nach Gleichung (1)

$$U_2 = -U_1 \cdot \frac{C_{12}}{8\, C_2 - C_{12}} =$$

$$= -U_1 \cdot \frac{0{,}0043}{8 \cdot 0{,}0151 - 0{,}0043} = -0{,}037 \cdot U_1 \qquad (1b)$$

U_2 hat jetzt umgekehrte Phasenlage wie früher [Gleichung (1a)], ist jedoch auf den sechsten Teil reduziert worden.

Eine schöne Bestätigung dieser Rechnung zeigen die Oszillogramme Fig. 8 und 9. Es handelt sich um

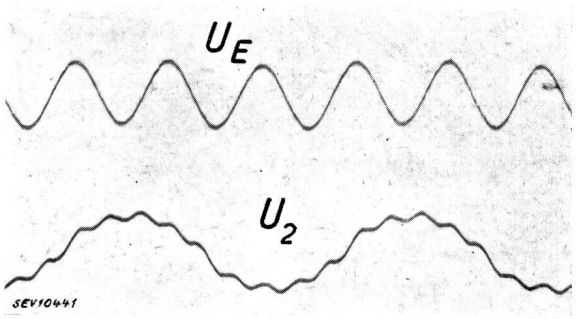

Fig. 8.
Beeinflussung des Drehstromsystems durch ein Einphasensystem mit Erdschluss. U_E Erdspannung einer Phase des Drehstromsystems. U_2 Nullpunktspannung des Drehstromsystems. Hiezu Ersatzschema Fig. 1.

die Beeinflussung einer Einphasen-Bahnleitung (16 kV Fahrdrahtspannung) auf eine Drehstromübertragung mit 16 kV verketteter Betriebsspannung, deren Leitungen teilweise am gleichen Gestänge verlegt sind. Die Bahnleitung wirkt wie ein einphasiges System ($16^2/_3$ Hz) mit Erdschluss eines Leiters und influenziert das benachbarte Drehstromsystem. Die Verhältnisse entsprechen also dem eben behandelten allgemeinen Fall. Fig. 8 enthält nun oben die 50periodige Spannung des Drehstromsystems, und zwar wurde im Oszillogramm eine Erdspannung U_E aufgenommen. Der Kurvenverlauf ist sinusförmig und zeigt einige nur schwach ausgeprägte Oberwellen. Der Effektivwert der Spannung U_E betrug 9,3 kV. Darunter gibt U_2 die Nullpunktspannung des Drehstromsystems wieder, wenn dessen *Erdschlußspule ausgeschaltet* war. Das Oszillogramm zeigt deutlich, dass U_2 vor allem aus der etwa dreimal geringeren Frequenz ($16^2/_3$ Hz) besteht und noch einige Oberwellen auftreten. Dabei betrug der Effektivwert von U_2 etwa 1,6 kV. U_2 wurde also in grösserem Maßstab als U_E oszillographiert.

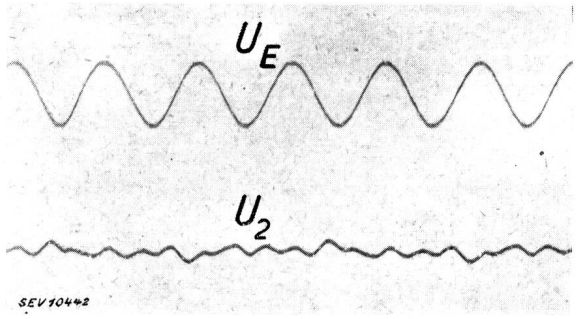

Fig. 9.
Beeinflussung wie bei Fig. 8, jedoch nach Zuschaltung der Erdschlußspule im Drehstromsystem gemäss Fig. 7.

Die Aenderung der Verhältnisse nach *Einschaltung der Erdschlußspule* des Drehstromsystems zeigt Fig. 9; dabei sind die Maßstäbe für U_E und

U_2 dieselben wie in Fig. 8. Der Wert von U_E blieb ungeändert. Der Effektivwert von U_2 wurde jedoch so gering, dass der Zeigerausschlag des entsprechenden Messinstrumentes in die Nähe der Nullage zurückging. Im Oszillogramm zeigt U_2 im wesentlichen nur noch die Oberwellen, die nach Einschaltung der Spule sogar etwas verstärkt werden müssen.

Bei der Diskussion der Oberwellen muss kurz auf den Einfluss eingegangen werden, den eine *besondere Oberwelle* des Bahnstromsystems, nämlich *die mit dem Drehstromsystem frequenzgleiche*, ausüben kann. Im besonderen handelt es sich also bei den beiden Frequenzen $16^2/_3$ Hz und 50 Hz um die dritte Oberwelle (50 Hz) des Bahnstromsystems. Im normalen Betrieb wird im Bahnstromsystem eine Spannung der dritten Harmonischen als Nullpunktspannung *nicht* auftreten. Dies ist ein Gegensatz zum Drehstromsystem, bei welchem ja die dritte Harmonische (150 Hz) als Nullspannung immer nachgewiesen werden kann. Wenn jedoch ein Erdschluss im Bahnsystem entsteht, dann erhält sein Nullpunkt zugleich mit einer Spannung der eigenen Frequenz ($16^2/_3$ Hz) auch eine Spannung mit der dritten Oberwelle (50 Hz). Bezeichnen wir sie mit $U_1^{(3)}$, so ist die Aufteilung *dieser* Spannung auf die Serienschaltung von C_{12} mit der Ersatzimpedanz Z_2 zu untersuchen, wobei Z_2 *jetzt* die Parallelschaltung von L_2 und C_2 bei der Kreisfrequenz $\omega_2 = \omega_1^{(3)}$ ist. Bei Resonanzabstimmung hat diese Ersatzimpedanz (Z_2) den Charakter eines rein ohmschen Widerstandes [1]). Prinzipiell liegt also derselbe Fall vor, wie bei der kapazitiven Beeinflussung zweier Drehstromleitungen, wenn zwar Erdschlußspulen, jedoch keine Entkopplungsvorrichtungen vorhanden sind. Eine genauere Betrachtung — auf die an dieser Stelle nicht eingegangen werden soll — zeigt, dass zu beachtende Beeinflussungen auch durch diese Oberwelle (50 Hz) nicht auftreten [5]).

Es ist schliesslich, wie unter A, als zweiter Fall noch die Beeinflussung zu ermitteln, welche das Drehstromsystem *2* mit Erdschluss auf das Bahnsystem *1* ausübt, wenn gemäss Fig. 7 auch im Bahnsystem eine Erdschlußspule vorhanden ist. Es gilt jetzt

$$\omega_2 K_1 = \omega_2 C_1 - \frac{1}{\omega_2 L_1},$$

also wegen

$$\frac{1}{L_1} = \omega_1^2 \cdot C_1$$

weiter

$$\omega_2 K_1 = \omega_2 C_1 - \frac{\omega_1^2 C_1}{\omega_2}$$

oder

$$K_1 = C_1 \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2}\right) \qquad (4)$$

Da ω_1 kleiner ist als ω_2, bleibt K_1 kapazitiv, ist jedoch etwas kleiner als C_1, so dass die Beeinflussung (U_1) gegenüber den Verhältnissen unter A eine Vergrösserung erfährt. Beim Frequenzverhältnis 1 : 3 wird $K_1 = \frac{8}{9} \cdot C_1$. Die Aenderung macht also nicht viel aus. Wir erhalten aus Gleichung (2) jetzt

$$U_1 = U_2 \cdot \frac{C_{12}}{\frac{8}{9} \cdot C_1 + C_{12}}$$

und für den ungünstigsten Fall der Kopplung über die gesamte Länge der Uebertragungsleitung, bei einem Mastbild nach Fig. 6, schliesslich,

$$U_1 = U_2 \cdot \frac{0{,}0043}{0{,}89 \cdot 0{,}0097 + 0{,}0043} \approx 0{,}33\, U_2 \qquad (2b)$$

Der Vergleich mit (2a) zeigt, dass der Unterschied praktisch vernachlässigt werden kann.

Zusammenfassend können wir auf Grund der allgemeinen Ueberlegungen und unter Berücksichtigung der Rechnungsergebnisse an einem charakteristischen Beispiel feststellen, dass die *gegenseitige Beeinflussung von Bahnstrom- und Drehstromleitungen vernachlässigt werden kann* und besondere *Einrichtungen zur Entkopplung nicht erforderlich sind.* Es ist sogar zulässig, solche Leitungen über die ganze Strecke der einen oder anderen Uebertragung am gleichen Gestänge zu führen.

C. Berechnung der Kapazitäten des Mastbildes nach Fig. 6

Aus dem Mastbild Fig. 6 ergeben sich für die Erdabstände der einzelnen Leiter als Grundlage für die genaue Berechnung [6]) die in Fig. 10 eingetragenen Entfernungen. Daraus folgt die Matrix der Maxwellschen Potentialkoeffizienten:

D	6,796	1,046	1,313	1,272	0,838	0,992	0,889
E	1,046	6,796	0,838	1,272	1,313	0,889	0,992
A	1,313	0,838	7,140	1,450	0,890	1,571	1,170
B	1,272	1,272	1,450	7,140	1,450	1,665	1,665
C	0,838	1,313	0,890	1,450	7,140	1,170	1,571
F	0,992	0,889	1,571	1,665	1,170	7,618	1,864
G	0,889	0,992	1,170	1,665	1,571	1,864	7,618

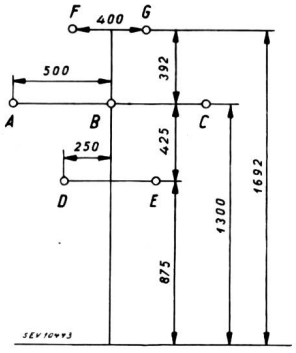

Fig. 10.
Reduzierte Erdabstände des Mastbildes Fig. 6 als Grundlage für die Berechnung der Kapazitäten aus den Maxwellschen Gleichungen.

Setzen [6]) wir nun $Q_D = Q_E$ und $Q_A = Q_B = Q_C = Q$, schliesslich $Q_F = Q_G = \overline{Q}$, so erhalten wir die Gleichungen

[5]) Diese Frage soll im Zusammenhang mit andern Betrachtungen, welche die Oberwellenprobleme betreffen, nächstens an anderer Stelle untersucht werden.

[6]) Vgl. z. B. R. Willheim, Das Erdschlussproblem in Hochspannungsnetzen, Verlag Springer, Berlin 1936, S. 262 u. folg.

$$7{,}842\ Q_E + 3{,}423\ Q + 1{,}881\ \overline{Q} = U_E$$
$$2{,}282\ Q_E + 9{,}667\ Q + 2{,}937\ \overline{Q} = U$$
$$1{,}881\ Q_E + 4{,}406\ Q + 9{,}482\ \overline{Q} = 0$$

daraus ergibt sich

$$C_1 = C_E = 0{,}0097\ \mu\text{F/km}$$
$$C_2 = C = 0{,}0151\ \mu\text{F/km}$$
und $$C_{12} = 0{,}0043\ \mu\text{F/km},$$

das sind die Werte, mit denen wir gerechnet haben.

Die genaue Berechnung der Kapazitäten gestattet, auch den Einfluss der Erdseile auf die gegenseitige Kapazität und die Erdkapazitäten der beiden Leitungssysteme zu ermitteln. Grundsätzlich gilt, dass die Gesamtkapazität (Betriebskapazität) einer Leitung durch die Anordnung von Erdseilen praktisch nicht beeinflusst wird. Erdseile ändern vielmehr nur die Verteilung der Teilkapazitäten. Nehmen wir an, dass wir ein Mastbild mit derselben Verteilung der Hauptleiter A bis E zu berechnen haben, welches jedoch keine Erdseile besitzt, dann wird die Erdkapazität C_2 des Drehstromsystems verkleinert, die gegenseitige Kapazität C_{12} vergrössert. Die grundlegenden Gleichungen lauten jetzt:

$$7{,}842\ Q_E + 3{,}424\ Q = U_E$$
$$2{,}282\ Q_E + 9{,}667\ Q = U$$

daraus ergibt sich

$$C_1 = 0{,}0089\ \mu\text{F/km}$$
$$C_2 = 0{,}0119\ \mu\text{F/km}$$
und $$C_{12} = 0{,}0049\ \mu\text{F/km}.$$

Man sieht, dass das Verhältnis zwischen Erdkapazitäten und gegenseitiger Kapazität geändert ist und solche Leitungen sich wechselseitig in etwas grösserem Masse beeinflussen würden. Eine Nachrechnung auf Grund der Gleichungen (1) und (2) zeigt aber, dass auch dieses Mastbild noch durchaus zulässige Werte für die influenzierten Spannungen ergibt.

Sollicitation des parafoudres à résistances variables par les courants de foudre de longue durée

Par *Stanislaw Szpor*, Winterthour.

621.316.93

L'auteur considère l'action des courants de foudre de longue durée sur les parafoudres à résistances variables et précise l'importance de la capacité thermique de ces appareils. La discussion met en évidence l'adoucissement radical des conditions par la mise directe à la terre du point neutre du réseau et l'effet moins marqué, mais encore très favorable de la bobine de Petersen. L'auteur examine également la possibilité d'une intervention de l'effet de couronne dans les lignes et la répartition du courant sur plusieurs parafoudres. Des formules sont déduites pour des calculs approximatifs dans les différents cas. Les conclusions pratiques concernent les conditions dans les réseaux, les propriétés des parafoudres et les études expérimentales désirables.

Die Wirkung des langdauernden Blitzstromes auf die Ueberspannungsableiter wird behandelt und die Bedeutung der Wärmekapazität dieser Apparate wird erläutert. Die Untersuchung beweist eine vollständige Milderung durch die direkte Erdung des Netz-Nullpunktes und eine nicht so starke aber noch sehr wirksame Verbesserung durch die Petersen-Spule. Die Hilfe der Glimmströme und die Verteilung des Blitzstromes unter mehrere Ableiter werden berücksichtigt. Einige Formeln ermöglichen annähernde Berechnungen in verschiedenen Fällen. Die praktischen Folgerungen betreffen die Bedingungen in den Netzen, die Eigenschaften der Ableiter und die zu empfehlenden experimentellen Untersuchungen.

Introduction

Le développement des parafoudres modernes à résistances variables s'est basé sur l'importance des courants de choc engendrés par les coups de foudre à proximité de ces appareils. Le pouvoir d'écoulement nominal atteint l'ordre de grandeur de 10 kA et les essais de laboratoire sont poussés jusqu'à 100 kA environ. Les durées de ces ondes étant comprises le plus souvent entre quelques μs et quelques dizaines de μs, les charges correspondantes sont de l'ordre de 0,1 à 1 C.

Cependant, Wilson a constaté [1]) des valeurs de plusieurs dizaines de coulombs, à la suite de nombreuses mesures des changements du champ électrique lors de coups de foudre. On sait aujourd'hui que ces charges élevées résultent de l'addition de plusieurs ondes de choc d'une foudre multiple et surtout de l'existence de courants comparativement faibles, mais de longue durée, entre les chocs successifs. En effet, si nous admettons un courant de 250 A pendant 0,1 s, ou des valeurs de 50 A et 0,5 s, ce qui répond sensiblement aux conditions réelles, nous obtenons des charges de 25 C. Les enregistrements directs opérés sur l'EmpireStateBuilding à New York [2]) ont même donné des résultats dépassant 100 C. Mc Eachron a suggéré à cette occasion qu'on pourrait attribuer certaines avaries des parafoudres à ces charges élevées.

Ce danger est exclu si des amorçages sur l'isolement de la ligne présentent un court-circuit pour la plus grande partie du courant de foudre, ce qui arrive le plus souvent. Les considérations suivantes concernent les cas relativement rares où les parafoudres empêchent la production des fortes décharges dans l'isolement des lignes. Une réduction de la contrainte est obtenue dans les réseaux avec des mises à la terre directes des points neutres, puisque les courants de longue durée peuvent passer hors des parafoudres. Cet effet a été discuté par

[1]) C. T. R. Wilson, On some Determinations of the Signe and Magnitude of Electric Discharges in Lightning Flashes. Proc. Royal Soc. 1916, A 92, p. 555. — Investigations on Lightning Discharges and on the Electric Field of Thunderstorms. Philos. Transactions Royal Soc. 1921, A 221, p. 73.
Pour des références plus complètes voir:
St. Szpor, Théorie de la formation de la foudre. Bull. ASE 1942, No. 1, p. 6...15.

[2]) K. B. Mc Eachron, Lightning to the Empire State Building. Electr. Engng. 1938, p. 493. — Electr. Engng., Transactions 1941, p. 885.