

**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. 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>**

## Die gegenseitige Beeinflussung benachbarter Hochspannungsleitungen verschiedener Betriebsfrequenz

(Mit besonderer Berücksichtigung von Einphasenstromübertragungen  $16\frac{2}{3}$  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  $16\frac{2}{3}$  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  $16\frac{2}{3}$  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<sup>1)</sup> 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<sup>2)</sup> 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 dar-

auf 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

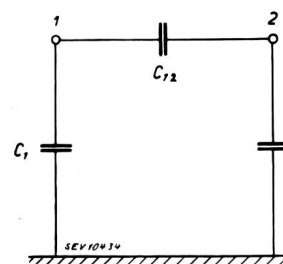


Fig. 1.

Ersatzschema benachbarter Uebertragungsleitungen.

das Leitungssystem 1 bezeichnet und der Ersatzleiter 2 das Leitungssystem 2. Dann ist  $C_1$  die Erdkapazität<sup>3)</sup> 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

<sup>3)</sup> 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. Ähnliches gilt für das System 2.

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

<sup>2)</sup> In Netzen mit starr geerdetem Nullpunkt, die wir hier nicht betrachten wollen, treten bei Erdkurzschlüssen induktive Beeinflussungen auf.

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<sup>4)</sup> 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

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

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.

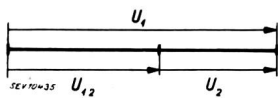


Fig. 2. Beeinflussung von System 2 durch Erdschluss in System 1.

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  $16\frac{2}{3}$  Hz) aufweist. Demgemäss hat die Zusammensetzung nach Fig. 3 zu erfolgen, wo der

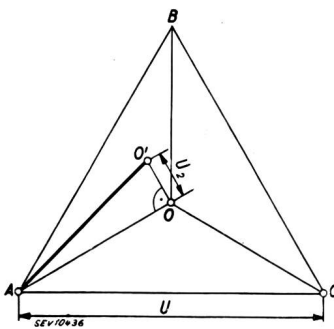


Fig. 3. Ermittlung der Erdspannungen der Drehstromleiter A, B, C.

effektive Wert der Erdspannung des Phasenleiters A ermittelt ist. Zur Schwerpunktspannung  $AO$  dieses Leiters ist die Nullpunktverlagerung  $U_2$  rechtwinklig zu addieren. Man kommt so zu Punkt  $O'$  und in  $AO'$  zum effektiven Wert der Erdspannung des Leiters A. Die Konstruktion kann für Drehstromsysteme nur nacheinander an jedem Leiter

<sup>4)</sup> 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 hierzu spielen die Verluste bei Resonanzproblemen eine ausschlaggebende Rolle, siehe l. c. 1).

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 dreiseitige Pyramide mit der Grundfläche  $ABC$  und der Höhe  $U_2$  ( $OO'$  umgeklappt).

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

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

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

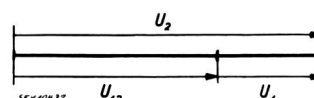


Fig. 4. Beeinflussung von System 1 durch Erdschluss in System 2.

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

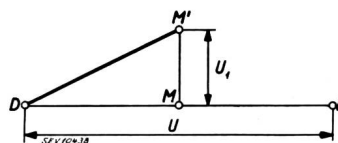


Fig. 5. Ermittlung der Erdspannungen des isolierten Einphasensystems D, E.

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 Zahlenbeispiels sicher nicht zu günstig ge-griffen, 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

Bahnsystem  $D, E$  als auch im Drehstromsystem  $A, B, C$ ; die Uebertragungsleiter  $A$  bis  $E$  besitzen  $120 \text{ mm}^2$  Kupferquerschnitt, die beiden Erdseile  $F$  und  $G$  sind aus Stahl  $70 \text{ mm}^2$ . Der mittlere Mastabstand betrage  $230 \text{ m}$ , dann ergeben sich für die Kupferleiter der Durchhang  $DD'$  und für die Erdseile der Durchhang  $GG'$ . Die genaue Berechnung nach die-

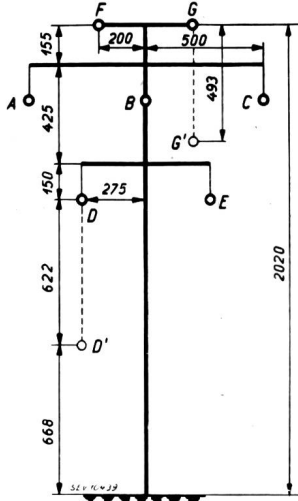


Fig. 6.

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  $\mu\text{F}/\text{km}$  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*

$$U_2 = 0,23 U_1 \quad (1a)$$

und gemäss Gleichung (2) für die

*Beeinflussung des Bahnsystems durch das erdgeschlossene Drehstromsystem*

$$U_1 = 0,32 U_2 \quad (2a)$$

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, Entkoppelungseinrichtungen 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  $U = 110 \text{ kV}$  mit  $\overline{AO} = 63,5 \text{ kV}$  und  $U_2 = 0,23 \cdot 55 \text{ kV} = 12,6 \text{ kV}$  (wegen  $U = 110 \text{ kV}$  ist  $U_1 = \frac{1}{2} \cdot 110 \text{ kV} = 55 \text{ kV}$ ), schliesslich  $\overline{AO'} = \sqrt{(63,5)^2 + (12,6)^2} \approx 65 \text{ kV}$ . Aehnlich gilt für die Beeinflussung in der andern Richtung mit  $U = 110 \text{ kV}$  und  $\overline{DM} = 55 \text{ kV}$  der Fig. 5 wegen  $U_1 = 0,32 \cdot 63,5 \text{ kV} = 20,3 \text{ kV}$ , schliesslich  $\overline{DM'} = \sqrt{55^2 + (20,3)^2} \approx 59 \text{ kV}$ . Da die Anlagen in beiden Fällen für Betrieb mit Dauererdschluss für *dauernd*  $110 \text{ kV}$  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 satterm Erdschluss  $155 \text{ kV}$  betragen, entsprechend  $110 \text{ kV}$  verketteter Spannung, entstehen in diesen Fällen folgende ungünstigsten Werte: Gemäss Gleichung (1a) ist  $U_{2max} = 0,23 \cdot \frac{1}{2} \cdot 110 \cdot 1,41 \approx 18 \text{ kV}$ , so dass sich durch algebraische Addition dieses Wertes zum Maximalwert der normalen Erdspannung (das ist  $63,5 \cdot 1,41 \approx 90 \text{ kV}$ ) die Summe von  $108 \text{ kV}$  ergibt, die wesentlich unter den bei Erdschluss auftretenden  $155 \text{ kV}$  bleibt. Aehnlich gilt gemäss Gleichung (2a) für die Beeinflussung in der umgekehrten Richtung:  $U_{1max} = 0,32 \cdot 63,5 \cdot 1,41 = 28,6 \text{ kV}$ , so dass durch algebraische Addition zum Maximalwert der normalen Erdspannung (das ist  $55 \cdot 1,41 = 77,6 \text{ kV}$ ) die Summe von  $106 \text{ kV}$  entsteht, die ebenfalls weit unter der noch zulässigen Grenze von  $155 \text{ kV}$  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.

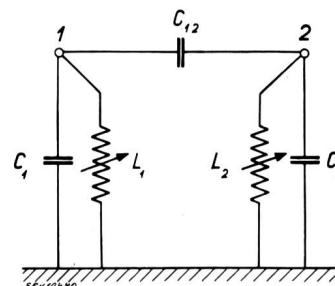


Fig. 7.

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<sup>4)</sup> 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 beeinflusst werde; System 1 steht unter der Nullpunktverlagerung  $U_1$  (Kreisfrequenz  $\omega_1$ ). 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  $\omega_1$  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

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

Da  $\omega_2$  (Drehstromsystem) grösser ist als  $\omega_1$  (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 ( $\omega_2$ ) abgestimmt sind, so dass bei kleinerer Frequenz ( $\omega_1$ ) 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)

$$U_2 = -U_1 \cdot \frac{C_{12}}{8C_2 - C_{12}} = -U_1 \cdot \frac{0,0043}{8 \cdot 0,0151 - 0,0043} = -0,037 \cdot U_1 \quad (1b)$$

$U_2$  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

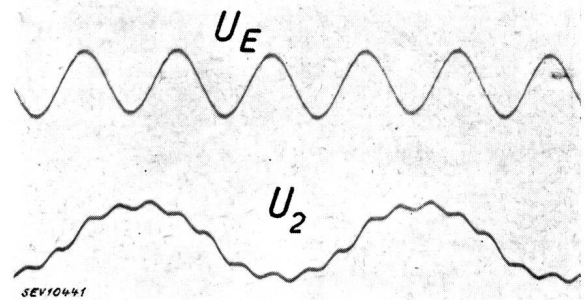


Fig. 8.

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

die Beeinflussung einer Einphasen-Bahnleitung (16 kV Fahrdrathspannung) 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 beeinflusst 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.

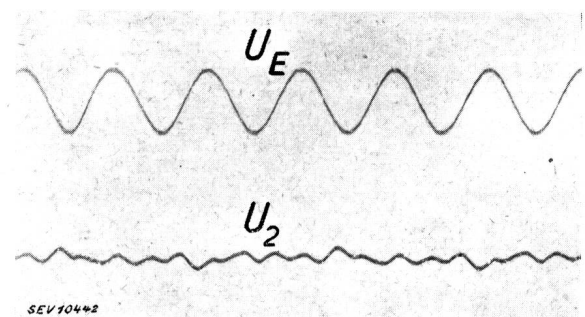


Fig. 9.

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 Nulllage 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  $16\frac{2}{3}$  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 ( $16\frac{2}{3}$  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<sup>1)</sup>. Prinzipiell liegt also derselbe Fall vor, wie bei der kapazitiven Beeinflussung zweier Drehstromleitungen, wenn zwar Erdschlusspulen, 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<sup>5)</sup>.

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 Erdschlusspule 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

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

Da  $\omega_1$  kleiner ist als  $\omega_2$ , bleibt  $K_1$  kapazitiv, ist jedoch etwas kleiner als  $C_1$ , so dass die Beeinflussung

<sup>5)</sup> Diese Frage soll im Zusammenhang mit andern Betrachtungen, welche die Oberwellenprobleme betreffen, nächstens an anderer Stelle untersucht werden.

( $U_1$ ) gegenüber den Verhältnissen unter A eine Vergrösserung erfährt. Beim Frequenzverhältnis 1 : 3 wird  $K_1 = \frac{8}{9} \cdot C_1$ . Die Änderung 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,

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

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<sup>6)</sup> die in Fig. 10 eingezeichneten Entfernungen. Daraus folgt die Matrix der Maxwell'schen 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

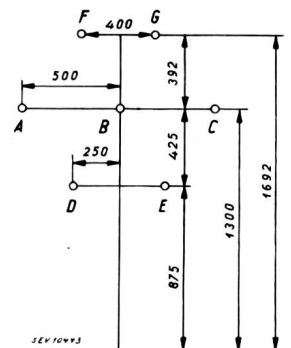


Fig. 10.

Reduzierte Erdabstände des Mastbildes Fig. 6 als Grundlage für die Berechnung der Kapazitäten aus den Maxwell'schen Gleichungen.

Setzen<sup>6)</sup> wir nun  $Q_D = Q_E$  und  $Q_A = Q_B = Q_C = Q$ , schliesslich  $Q_F = Q_G = Q$ , so erhalten wir die Gleichungen

<sup>6)</sup> Vgl. z. B. R. Willheim, Das Erdschlussproblem in Hochspannungsnetzen, Verlag Springer, Berlin 1936, S. 262 u. folg.

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

daraus ergibt sich

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

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 be-

rechnen 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:

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

daraus ergibt sich

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

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  $\mu\text{s}$  et quelques dizaines de  $\mu\text{s}$ , les charges correspondantes sont de l'ordre de 0,1 à 1 C.

Cependant, Wilson a constaté<sup>1)</sup> 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 comparative-

ment 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<sup>2)</sup> 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

<sup>1)</sup> 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.

<sup>2)</sup> K. B. Mc Eachron, Lightning to the Empire State Building. Electr. Engng. 1938, p. 493. — Electr. Engng., Transactions 1941, p. 885.