Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 42 (1951)

Heft: 5

Artikel: Die Leitungscharakteristiken des erdschlussbehafteten Drehstromsystems

Autor: Königshofer, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060982

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

Literatur

[1] *Sachse, W.:* Temperaturabhängige Widerstände (Heissleiter) und ihre Anwendung in der Technik. Siemens Z. Bd. 19(1939), Nr. 5, S. 214...218.

[2] *Roloff, C. C.:* Thermo-Variable Resistors. Electr. Rev. Bd. 140(1947), Nr. 3612, S. 315...316.

[3] *Lange, J.:* Zur physikalischen Chemie der Elektrolythe. Naturwissenschaften Bd. 31(1943), Nr. 31/32, S. 353...366.

[4] *Grimm, H. G.,* u. *H. Wolff:* Atombau und Chemie. In: *Geiger-Scheel:* Handbuch der Physik. Bd. 24. Aufbau der zusammenhängenden Materie. — Berlin, 1933. — S. 954.

[5] *Becker, J. A., C. B. Green* u. *G. L. Pearson:* Properties and Uses of Thermistors — Thermally Sensitive Resistors. Electr. Engng. Transactions section Bd. 65(1946), Nr. 11, S. 711...725.

[6] *Wagner, C.:* Über den Mechanismus der elektrischen Stromleitung im Nernststift. Naturwissenschaften Bd. 31 (1943), Nr. 23/24, S. 265...268.

[7] *D'Ans-Lax:* Taschenbuch für Chemiker und Physiker. — Berlin, 1943. — S. 1585.

[8] *Friedrich, E.:* Z. Physik Bd. 34(1925), S. 637.

[9] *Dowell, K. P.:* Thermistors as Components Open Product Design Horizons. Electr. Manufacturing Bd. 1948, S. 84...95.

[10] *Verwey, E. J. W., P. W. Haayman* u. *F. S. Romeyn:* Halbleiter mit grossem negativen Temperaturkoeffizient des Widerstandes. Philips techn. Rdsch. Bd. 9(1947/48), Nr. 8, S. 239...249.

[11] *Meyer-Hartwig, E.:* Studien über Halbmetalle mit kontinuierlichen Übergangseigenschaften zwischen Metall und Keramik: Kapillarhalbleiter V. Österr. Chemiker-Z. Bd. 49(1948), Nr. 10/11, S. 197.

[12] *Gantenbein, A.:* Neuere Forschungsergebnisse im Überspannungsableiterbau. Bull. SEV Bd. 32(1941), Nr. 25, S. 695...699.

[13] *Deeter, E. L.:* Null Temperature Bridge — The Electron Art. Electronics Bd. 21(1948), Nr. 5, S. 180...186.

[14] O. S. R. D. Report No. 4699, Appendix C: The Use of Thermometers to measure Temperature and Wind Velocity u. S. Dept. of Commerce, Bureau of Publication Report No. PB 13103.

[15] *Drummeter, L. F.,* u. *W. G. Fastie:* A simple Resistance Thermometer for Blood-Temperature Measurements. Science Bd. —(1947).

Adresse der Autoren:

E. Meyer-Hartwig und *H. Federspiel,* Laboratorio Terlano della FES., Via Marconi, Terlano (Italien).

Die Leitungscharakteristiken des erdschlussbehafteten Drehstromsystems

Von *E. Königshofer,* Wien

621.315.025.3

Unter den Charakteristiken eines Energieübertragungsmittels ist die Betriebskapazität die Resultierende zweier Komponenten, deren Anteile von der Spannung und somit vom Isolationszustand abhängen. Ein genaues Verfahren zu ihrer quantitativen Erfassung wird besprochen und die Abhängigkeit der Grösse der Betriebskapazität vom Isolationszustand der Leitung, das heisst von der Verlagerungsspannung untersucht.

Parmi les valeurs caractéristiques d'un moyen de transmission d'énergie la capacité de service représente la résultante de deux composantes, dont les parties dépendent de la tension et de l'isolement. Un procédé exact pour sa détermination quantitative sera développé. Les relations entre la grandeur de la capacité de service et l'isolement de la ligne de transmission seront étudiées.

Die Übertragungsfähigkeit eines Leitungssystems ist durch den Wellenwiderstand bestimmt, der beim Drehstromsystem die Grösse

$$\bar{Z} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

aufweist (R Ohmscher Widerstand, ω Kreisfrequenz, L Selbstinduktionskoeffizient, G Ableitung [Leitwert] und C Betriebskapazität des Übertragungsmittels). Für Aufgaben der Praxis ist es zulässig, die Ableitung zu vernachlässigen und mit dem Werte

$$\bar{Z} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}}$$

zu rechnen. R und L sind charakteristische Grössen des Leitermaterials, der Leiterstärke und -anordnung, welche durch das Auftreten eines Erdschlusses im Zuge des Übertragungsmittels nicht beeinflusst werden. Die Betriebs- oder Netzkapazität C ist hingegen ein aus dem Zusammenwirken von Erdkapazität C_e und gegenseitigen Kapazitäten C_p resultierender Wert; die Anteile der Komponenten werden durch die jeweiligen Spannungsverhältnisse beeinflusst. Ausser als Komponente des Wellenwiderstandes ist C — neben der Betriebsspannung und der Frequenz — das Mass für Ladestrom und -leistung. Die Komponenten C_e und C_p sind, wie jede Kapazität, durch Abmessung und Lage der Beläge bestimmt, ihre Anteile erfahren jedoch bei einer erdschlussbehafteten Leitung Änderungen, die durch die Verzerrung des Spannungsdreieckes bedingt sind. Eine vollkommen verdrillte Drehstromleitung weist Gleichheit der Betriebskapazitäten der drei Pole auf und bei Symmetrie des Spannungsdreieckes auch Gleichheit der Ladeströme und -leistungen. Es ist allgemein üblich, Ladestrom I_C und Ladeleistung P_C wie folgt zu bestimmen (l Länge des Übertragungsmittels in km, U verkettete Spannung, $U_p = \frac{U}{\sqrt{3}}$ Polspannung in V, C Betriebskapazität in μF/km):

$$I_C = l\, U_p\, \omega C \qquad \text{A}$$

und

$$P_C = l\, U^2\, \omega C \cdot 10^{-3} \text{ kVA}$$

Diese Ausdrücke sind jedoch nur als Näherungsformeln zu werten. Für die Kraftübertragung auf weite Entfernungen lassen sich I_C und P_C genau nach den diese Übertragung erfassenden Berechnungsverfahren ermitteln: Zwischen den Strömen und Spannungen am Anfang des Übertragungsmittels $\bar{I}_1$ und $\bar{U}_1$, an seinem Ende $\bar{I}_2$ und $\bar{U}_2$, bzw. $\bar{I}$ und $\bar{U}$ an einem beliebigen Punkt der Leitung im Abstand x vom Anfangs- bzw. Endpunkt, bestehen die Beziehungen

$$\bar{U} = \bar{U}_1 \cosh \gamma x - \bar{I}_1 \bar{Z} \sinh \gamma x$$

$$\bar{I} = \bar{I}_1 \cosh \gamma x - \frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}} \sinh \gamma x$$

und $$\overline{U} = \overline{U}_2 \cosh \nu x + \overline{I}_2 \overline{Z} \sinh \nu x$$

$$\overline{I} = \overline{I}_2 \cosh \nu x + \frac{U_2}{\overline{Z}} \sinh \nu x$$

Hiebei ist unter weiterer Vernachlässigung der Ableitung

$$\nu = \sqrt{(R + j\omega L) \cdot j\omega C} = a + jb$$

$$a = \sqrt{\tfrac{1}{2}\,\omega C \left(\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} - \omega L\right)}$$

$$b = \sqrt{\tfrac{1}{2}\,\omega C \left(\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} + \omega L\right)}$$

ferner ist

$$\sinh \nu x = \sinh ax \cdot \cos bx + j \cosh ax \cdot \sin bx$$

$$\cosh \nu x = \cosh ax \cdot \cos bx + j \sinh ax \cdot \sin bx$$

Für Aufgaben der Praxis sind folgende Vereinfachungen zulässig:

$$\cosh ax \approx 1 \quad \text{und} \quad \sinh ax \approx ax$$

dann ist

$$\sinh \nu x = ax \cdot \cos bx + j \sin bx$$

$$\cosh \nu x = \cos bx + j\, ax \cdot \sin bx$$

Bei am Ende offener Leitung ($\overline{I}_2 = 0$) ergibt sich gemäss den vorstehenden Formeln

$$\overline{U}_1 = \overline{U}_2 \cosh \nu l \quad \text{und} \quad \overline{I}_1 = \overline{I}_C = \frac{\overline{U}_2}{\overline{Z}} \sinh \nu l$$

hieraus folgt

$$\boxed{\overline{I}_C = \frac{\overline{U}_1}{\overline{Z}} \operatorname{tgh} \nu l}$$

Wird $\overline{I}_C$ für eine 100 km lange Freileitung für $U = 200$ kV ($U_p = 115\,600$ V) und $R = 0{,}12\ \Omega/\text{km}$ mit den üblichen Mittelwerten $\omega L = 0{,}4\ \Omega/\text{km}$ und $C = 0{,}01\ \mu\text{F/km}$ nach den zwei Formeln ermittelt, so ergibt die Näherungsformel $I_C = 36$ A, die genaue Formel 33 A. Dies ist immerhin ein 10%iger Unterschied, der die Mehrarbeit der Anwendung der zweiten Formel als begründet erscheinen lässt. Es ist allgemein bekannt, dass bei einer vollkommen verdrillten Drehstromleitung

$$C = C_e + 3\, C_p$$

ist, dass somit die Erdkapazität am Ladestrom im Ausmass

$$\frac{C_e}{C} = 1 - \frac{3\, C_p}{C}$$

und die gegenseitige Kapazität im Ausmass

$$\frac{C_p}{C} = \frac{1}{3}\left(1 - \frac{C_e}{C}\right)$$

beteiligt sind.

Tritt im Zuge der Leitung ein Erdschluss auf (es sei nur der einpolige Erdschluss vorausgesetzt), so erfährt das Spannungsdreieck eine Verzerrung, indem sich dem Systemnullpunkt die Verlagerungsspannung

$$V_e = \frac{n}{100} \cdot U_p$$

aufdrückt. Diese kann je nach der Lage der Erdschlußstelle und der Grösse des Erdwiderstandes jede beliebige Richtung und n jeden beliebigen Wert zwischen 0 und 100 aufweisen. Durch die Verlage-

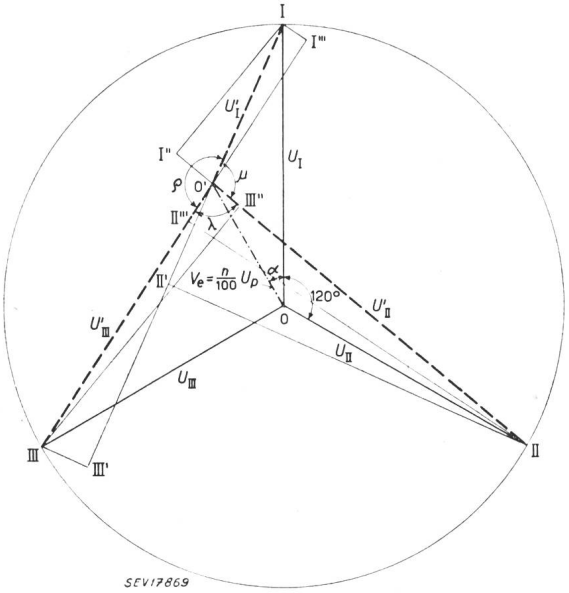

Fig. 1
Verzerrtes Spannungsdreieck infolge eines einpoligen Erdschlusses
Erklärungen siehe im Text

rung des Nullpunktes von 0 nach 0′ nehmen die im gesunden Zustand gleich gross gewesenen Polspannungen U_{I}, U_{II} und U_{III} die untereinander ungleichen Werte

$$U'_{\mathrm{I}} = k_{\mathrm{I}} \cdot U_{\mathrm{I}}$$

$$U'_{\mathrm{II}} = k_{\mathrm{II}} \cdot U_{\mathrm{II}}$$

$$U'_{\mathrm{III}} = k_{\mathrm{III}} \cdot U_{\mathrm{III}}$$

die Winkel von 120 ° der Spannungen untereinander die Werte μ, λ und ϱ an. Bei Betrachtung der Fig. 1 ist leicht einzusehen, dass

$$k_{\mathrm{I}} = \sqrt{\left(\frac{n}{100}\right)^2 - \frac{n}{50} \cos \alpha + 1}$$

$$k_{\mathrm{II}} = \sqrt{\left(\frac{n}{100}\right)^2 - \frac{n}{50} \cos (120 + \alpha) + 1}$$

$$k_{\mathrm{III}} = \sqrt{\left(\frac{n}{100}\right)^2 - \frac{n}{50} \cos (120 - \alpha) + 1}$$

sind; es gilt ferner für die Winkel

$$\mu = \arcsin\left(\frac{U_p}{U'_{\mathrm{I}}} \sin \alpha\right) + \arcsin\left[\frac{U_p}{U'_{\mathrm{II}}} \sin (60 - \alpha)\right]$$

$$\lambda = \arcsin\left[\frac{U_p}{U'_{II}}\sin(120+\alpha)\right] + \arcsin\left[\frac{U_p}{U'_{III}}\sin(120-\alpha)\right]$$

Ist $n = 100$, so ist der Erdschluss ein satter, der erdschlussbehaftete Pol nimmt das Erdpotential null, der Sternpunkt gegenüber Erde die Polspannung und die isolierten Leiter gegenüber Erde die verkettete Spannung an.

Im erdschlussbehafteten System treten die folgenden Elektrizitätsmengen auf:

$$Q'_I = C_e \cdot U'_I + C_p(U'_I - U'_{II}\cos\mu) + C_p(U'_I - U'_{III}\cos\varrho)$$

$$Q'_{II} = C_e \cdot U'_{II} + C_p(U'_{II} - U'_I\cos\mu) + C_p(U'_{II} - U'_{III}\cos\lambda)$$

$$Q'_{III} = C_e \cdot U'_{III} + C_p(U'_{III} - U'_I\cos\varrho) + C_p(U'_{III} - U'_{II}\cos\lambda)$$

Ausser der quantitativen Erfassung der Kapazitätskoeffizienten des vorstehenden Gleichungssystems mit Hilfe der abgeleiteten Formeln lassen sich jene aus der Figur direkt abgreifen:

$$Q'_I = C_e \cdot \overline{O'I} + C_p \cdot \overline{I\,II'} + C_p \cdot \overline{I\,III'}$$

$$Q'_{II} = C_e \cdot \overline{O'II} + C_p \cdot \overline{II\,I''} + C_p \cdot \overline{II\,III''}$$

$$Q'_{III} = C_e \cdot \overline{O'III} + C_p \cdot \overline{III\,I'''} + C_p \cdot \overline{III\,II'''}$$

allgemein ergibt sich das folgende Gleichungssystem:

$$Q'_I = (C_e + x_1 C_p)\,U'_I$$

$$Q'_{II} = (C_e + x_2 C_p)\,U'_{II}$$

$$Q'_{III} = (C_e + x_3 C_p)\,U'_{III}$$

d. h. die Betriebskapazität einer jeden Phase des Drehstromsystems hat die allgemeine Form

$$\boxed{C = C_e + xC_p}$$

Die isolierte Leitung als Sonderfall aufgefasst weist für x den Wert 3 auf. Die jeweiligen Werte x sind rechnerisch zu ermitteln oder Fig. 1 zu entnehmen:

$$Q'_I = (C_e + 1{,}62\,C_p + 2{,}75\,C_p)\cdot U'_I = (C_e + 4{,}37\,C_p)\,U'_I$$

$$Q'_{II} = (C_e + 1{,}12\,C_p + 0{,}9\,C_p)\cdot U'_{II} = (C_e + 2{,}02\,C_p)\,U'_{II}$$

$$Q'_{III} = (C_e + 1{,}55\,C_p + 0{,}85\,C_p)\cdot U'_{III} = (C_e + 2{,}4\,C_p)\,U'_{III}$$

Unter der Annahme, dass $C_e = 0{,}004$, $C_p = 0{,}002$ ist ($C = 0{,}01\ \mu F/km$), ergeben sich bei der gezeichneten Verlagerung

$$C'_I = 0{,}01274,\ C'_{II} = 0{,}00804,\ C'_{III} = 0{,}00880\ \mu F/km$$

und mit den Spannungen des geerdeten Systems $U'_I = 72$, $U'_{II} = 168$ und $U'_{III} = 128$ kV, errechnen sich die folgenden Ladeströme:

$$I'_{CI} = 28{,}8,\ I'_{CII} = 42{,}4 \text{ und } I'_{CIII} = 35{,}4 \text{ A}$$

und die folgenden Ladeleistungen 6240, 21 450, 13 650 kVA.

Im kranken Pol wird sich nicht dieser Stromwert einstellen, vielmehr der um die Erdkapazitätsströme der zwei intakten Pole vermehrte und um den Erdkapazitätsstrom des kranken Pols verminderte Strom: Der Stromkreis der ersten zwei Ströme setzt sich aus Maschinenwicklung — Erdkapazität des gesunden Pols — Erdschlußstelle — kranker Pol zusammen, während der Stromkreis des Erdkapazitätsstromes des kranken Pols aus Erdkapazität — Erdschlußstelle — kranker Polleiter besteht, ohne die Maschinenwicklung einzuschliessen. Es darf daher der Erdschlußstelle die Wirkung eines Generators zugemutet werden, der die Erdkapazitätsströme bis zu den Enden des kranken Polleiters liefert.

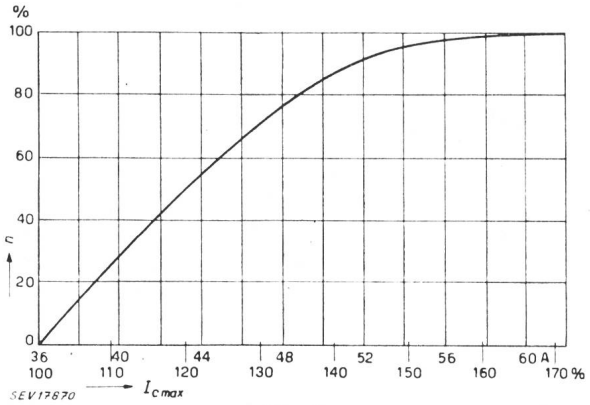

Fig. 2
Bestimmung der Verlagerungsspannung V_e aus der maximalen Ladestromstärke I_{cmax}
n prozentuale Änderung der Verlagerungsspannung

Die Ladeströme sind zu 31, 50 bzw. 45 % auf die Erdkapazität der betreffenden Phase zurückzuführen.

Besteht im Betrieb ein Interesse für die Frage, wie weit aus einer ermittelbaren Ladestromstärke auf die Verlagerungsspannung geschlossen werden kann und umgekehrt, so kann diese Abhängigkeit zeichnerisch auf Grund der vorstehenden Ausführungen unter Heranziehung einer der bisher besprochenen ähnlichen Zeichnung ermittelt werden. Die Kurve in Fig. 2 zeigt diese Abhängigkeit zwischen dem grössten der drei Polladeströme der herangezogenen Freileitung und der Verlagerungsspannung. Die durch diese Kurve angedeutete Abhängigkeit gilt nur angenähert, da sie mit dem Winkel α streut.

Adresse des Autors:
Dr. techn. *E. Königshofer*, Krotenthallergasse 10/7, Wien VIII/65.