Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des

Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises

électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein; Verband Schweizerischer

Elektrizitätsunternehmen

Band: 67 (1976)

Heft: 6

Artikel: Der Einfluss der Konstruktionsmerkmale von Freileitungen auf deren

elektrischen Kenndaten

Autor: Hager, H. / Tlapa, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915138

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: 01.12.2025

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

Der Einfluss der Konstruktionsmerkmale von Freileitungen auf deren elektrische Kenndaten

Von H. Hager und J. Tlapa

621.315.1:621.3.013.7

Nach einer kurzen Erklärung der Theorie der symmetrischen Komponenten wird auf die Berechnung der Mitimpedanz, Nullimpedanz und kapazitiven Queradmittanz im Mitsystem und im Nullsystem an Hand typischer Freileitungen des schweizerischen Hochspannungsnetzes eingegangen. Dann wird die Abhängigkeit dieser Leitungsparameter von den Konstruktionsmerkmalen der Leitungen, wie Bündelleiter, Anzahl und Querschnitt der Erdseile, Durchhang sowie von der Bodenleitfähigkeit untersucht. Kurvenblätter veranschaulichen die quantitativen Zusammenhänge.

Après une brève explication de la théorie des composantes symétriques, les auteurs traitent le calcul de l'impédance directe, de l'impédance homopolaire et de l'admittance transversale capacitive dans le système direct et dans le système homopolaire, en se basant sur des lignes aériennes typiques du réseau suisse à haute tension. Ils examinent ensuite la relation entre ces paramètres et les particularités de construction des lignes, telles que conducteurs en faisceaux, nombre et section des câbles de garde, flèche et conductivité du sol. Des diagrammes mettent en évidence les relations quantitatives.

1. Symmetrische Komponenten

Bei der Berechnung von Drehstromkreisen wird oft angenommen, dass das Spannungssystem überall symmetrisch ist und durch die einzelnen Phasen gleich grosse Ströme fliessen. In Wirklichkeit sind aber die Drehstromnetze oft unsymmetrisch belastet, besonders durch die einphasigen Kleinverbraucher, durch Schweisstransformatoren und Elektroöfen in Industrieunternehmungen, sowie durch die ungleichmässige Verteilung der Beleuchtung. Unsymmetrische Spannungs- und Stromverteilungen entstehen aber auch bei Erdschlüssen oder bei zweiphasigem Betrieb der Drehstromnetze. Im weiteren ist auch die Anordnung der Leiter unter sich und gegen Erde unsymmetrisch. Diese Unsymmetrie wird bei vielen Elektrizitätsversorgungs-Unternehmen durch Verdrillung bekämpft. Dabei wird nach einer gewissen Länge (10...20 km) die Anordnung der Leiter am Mast gegenseitig vertauscht, so dass jede Phase alle drei möglichen Positionen am Mast einnimmt.

Die unsymmetrischen Belastungen verursachen im Netz ein unsymmetrisches Spannungs- und Stromsystem. Die direkte Berechnung des unsymmetrischen Systems ist sehr schwierig, weil die Phasen R, S, T miteinander gekoppelt sind. Deshalb muss man das unsymmetrische System mit Hilfe der Theorie der symmetrischen Komponenten in symmetrische Systeme transformieren, wobei bei symmetrischem Aufbau der Netzelemente die Kopplungen zwischen den Systemen verschwinden.

Das unsymmetrische Drehstromsystem der Ströme und Spannungen kann man daher in drei symmetrische Systeme zerlegen, von denen jedes für sich einphasig berechnet werden kann. Das Mitsystem ist ein symmetrisches Drehstromsystem mit Vektoren gleicher Grösse mit einer Phasenverschiebung von je $1\times120^{0}=120^{0}$; die Phasenfolge ist im Uhrzeigersinn definiert. Das Gegensystem ist für Netze mit nicht rotierenden Elementen gleich dem Mitsystem; es unterscheidet sich nur in der Phasenverschiebung von $2\times120^{0}=240^{0}$, welche daher eine Phasenfolge im Gegenuhrzeigersinn verursacht. Das Nullsystem ist ein symmetrisches Drehstromsystem mit drei Vektoren, die gegeneinander um $3\times120^{0}=360^{0}$ verschoben sind, d. h. in ihrer Richtung und Grösse übereinstimmen.

Die Theorie der symmetrischen Komponenten kann einerseits im mathematischen Sinn als Transformation aufgefasst werden, anderseits haben die Komponentenwerte auch eine physikalische Bedeutung, weil man sie messen kann [1; 2]¹). Die im folgenden definierten Leitungsparameter stellen bereits transformierte Grössen dar, welche getrennt für das Mit- und Nullsystem gelten.

2. Die Berechnung der Leitungsparameter

Die Leitungsparameter, die das elektrische Verhalten von Freileitungen charakterisieren, können durch Berechnung oder direkte Messung einer bestehenden Leitung bestimmt werden. Für die Nachrechnung von Betriebszuständen, d. h. für die Berechnung bestehender Netze ist die Benützung von gemessenen Grössen selbstverständlich vorteilhafter, weil diese der Wirklichkeit besser entsprechen und genauer sind. Der Planungsingenieur, welcher Unterlagen für den Ausbau von neuen Leitungen oder den Umbau von veralteten Leitungen zu liefern hat, muss sich die nötigen Leitungsparameter beschaffen, um sie für Netzberechnungen verschiedener Art (Lastfluss, Kurzschluss, Stabilität usw.) zu verwenden [3; 4].

Eine Freileitung kann als System einer Anzahl parallel laufender Leiter aufgefasst werden (Fig. 9). Das elektrische Verhalten dieser Anordnung wird allgemein durch die Längsimpedanz-Matrix Z und die Queradmittanz-Matrix Y beschrieben (Gl. 1 und Gl. 4 im Anhang 2). Die Elemente der Matrizen sind durch die Gl. (2), (3), (5) und (6) bestimmt.

Für die weitere Berechnung eliminiert man die Zeilen und Spalten der Matrizen, welche den Erdseilen oder geerdeten Phasenleitern entsprechen, durch Gaußsche Elimination (Annahme: ΔU und U dieser Leiter gleich Null). Die reduzierten Matrizen werden in symmetrische Komponenten transformiert (Anhang 3). In den transformierten Matrizen befinden sich die Längsimpedanzen bzw. Queradmittanzen im Mit-, Gegen- und Nullsystem in der Hauptdiagonalen, während die übrigen Glieder entweder definitionsgemäss zu Null werden oder aber den Grad der Unsymmetrie der Leitung anzeigen.

Das elektrische Verhalten der Freileitungen wird durch die Matrizen \mathbf{Z}_{TR} und \mathbf{Y}_{TR} charakterisiert. In der Hauptdiagonalen liegen die Längsimpedanzen $\underline{Z}_0 = R_0 + \mathrm{j} X_0$ und $\underline{Z}_1 = R_1 + \mathrm{j} X_1$ bzw. die Queradmittanzen $\underline{Y}_0 = G_0 + \mathrm{j} B_0$ und $\underline{Y}_1 = G_1 + \mathrm{j} B_1$ mit den üblichen Bezeichnungen R ohmscher Widerstand, X Reaktanz, G ohmsche Ableitung und B kapazitive Admittanz. Die Nebendiagonale der \mathbf{Z}_{TR} -Matrix enthält auch Kopplungsglieder zwischen parallel laufenden Leitungen im Nullsystem. Die Berechnung dieser Parameter erfolgt zweckmässigerweise nach den Formeln in diversen Handbüchern [z, B, 5; 6].

Die ohmsche Ableitung G_1 bzw. G_0 ist im allgemeinen sehr klein und wurde, wie in den meisten Fällen üblich, auch in dieser Untersuchung vernachlässigt.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes

3. Die Einflussgrössen

Die Grösse der Leitungsparameter ist von folgenden Merkmalen abhängig:

- Mastkonstruktion
- Material und Aufbau der Leiterseile
- Anzahl, Material und Aufbau der Erdseile
- Anzahl von parallel geführten Leitungssträngen
- Bodenleitfähigkeit entlang der Leitung

Aus der Mastkonstruktion erhält man die geometrische Anordnung der Phasenleiter und Erdseile, womit die Distanz der Leiter untereinander für jedes System festgelegt ist (Fig. 1). Leiterseile und Erdseile sind in der Berechnung durch ihren Durchmesser, ihren Seilauf bau und ihr Material definiert. Die Grösse der Bodenleitfähigkeit ist abhängig vom geologischen Auf bau des Gebietes, durch welches die Leitung führt.

Da die Anzahl Leitungen bei gleichbleibenden Platzverhältnissen ständig steigt, entsteht ein Trasseeproblem, das zur Kumulation von vielen Leitungen längs eines Trassees (oft auf einem Mast) führt. Dies hat eine induktive und kapazitive Kopplung zwischen den Systemen zur Folge, welche bei der Netzberechnung in bestimmten Fällen mitberücksichtigt werden muss.

Im folgenden wird die Frage untersucht, wie die Leitungsparameter von den erwähnten Merkmalen abhängen. Der Überblick über den Einfluss der Leitungsmerkmale auf das elektrische Verhalten ist aus mehreren Gründen interessant. Bei der Projektierung ist es z. B. wichtig zu wissen, wie die Konstruktionsmerkmale die Leitungsparameter beeinflussen und welche Tendenz und Stärke dieser Einfluss hat.

Um diesen Überblick gewinnen zu können, musste eine grosse Zahl von Vergleichsrechnungen mit variablen Konstruktionsmerkmalen und Bodenleitfähigkeiten durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wurde das Freileitungsdatenprogramm von IBM «Symmetrische Komponenten» auf einem IBM System 1130 verwendet. Parallel zu diesen Berechnungen wurden auch Vergleichsrechnungen mit dem BBC-Programm (Leitungskonstanten) ausgeführt, deren Formeln dem Lehrbuch [1] entnommen sind (Anhang). Die Resultate weichen nur unwesentlich voneinander ab.

Um eine einwandfreie Vergleichsgrundlage zu haben, musste die Anzahl der möglichen Leitungstypen reduziert werden. Als Grundlage der Berechnung wurden daher Masten und Seile angenommen, die im schweizerischen Höchstspannungsverteilnetz verwendet werden. Die Grundelemente wurden folgendermassen gewählt:

Masten: Gittermasten für 380 (220) kV gemäss Fig. 1

Leiterseile: 300 mm² Aldrey einfach und Zweierbündel

600 mm² Aldrey einfach, doppelt, dreifach

und vierfach (Bündel)

Erdseil: 100 mm² Al, 185 mm² (nutzbar 147 mm²)

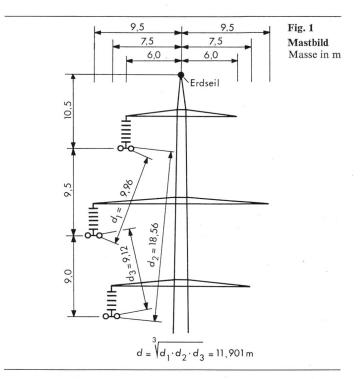
AwAd mit Koaxialkabel und 400 mm² (nutzbar 364 mm²) AwAd

mit Koaxialkabel

Betriebsspannung: 220 und 380 kV, 50 Hz Bodenleitfähigkeit: 10, 50, 100 und 500 μS/cm

Für jede ausgewählte Leitung wurden für das Mitsystem (Index 1) und Nullsystem (0) berechnet:

- Längsimpedanz R + jX
- Queradmittanz G + jB
- Die induktiven und kapazitiven Koppelwerte bei parallelen Leitungen



4. Auswertung der Untersuchungen

In Tabelle I sind die qualitativen Einflüsse der Anzahl Bündelleiter, der Leiterdistanzen, des Querschnitts und der Anzahl der Erdseile, des Durchhanges sowie der Bodenleitfähigkeit auf die Leitungsparameter dargestellt. Die Untersuchung wurde unter Variation eines Merkmales bei Konstanthaltung aller anderen Merkmale durchgeführt.

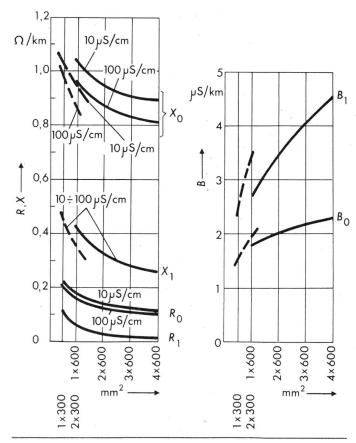


Fig. 2 Kenndaten in Abhängigkeit von der Anzahl Bündelleiter mit der Bodenleitfähigkeit als Parameter

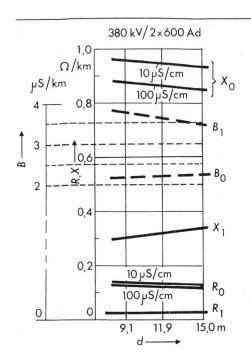


Fig. 3
Kenndaten in
Abhängigkeit von der
mittleren
Leiterdistanz d

4.1 Anzahl Bündelleiter

Wie in Fig. 2 ersichtlich, sinken die Längsimpedanzen R_1 , X_1 , R_0 und X_0 mit steigender Anzahl Bündelleiter, die Queradmittanzen B_1 und B_0 steigen jedoch an. Dies hat seinen Grund in einem grösseren äquivalenten Radius eines Bündelleiters gegenüber einem einfachen Seil und wirkt sich stark auf die Parameter aus.

4.2 Leiterdistanzen

Neben den Normalabmessungen gemäss Fig. 1 wurden verkleinerte und vergrösserte Leiterabstände betrachtet (Fig. 3). Wachsende Leiterdistanzen bei gleicher durchschnitt-

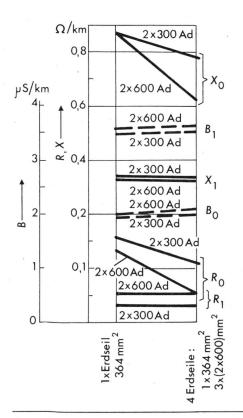


Fig. 4 Kenndaten in Abhängigkeit von der Anzahl der Erdseile

licher Höhe über Boden führen zu einer zunehmenden Entkopplung der Leiter. Die Beträge von Z_{ik} , P_{ik} nehmen rascher ab als diejenigen von Z_{ii} , P_{ii} , weil die Abstände zwischen den Leitern schneller zunehmen als diejenigen zu den gespiegelten Leitern (Fig. 10). Gemäss Anhang 3 ergibt sich daraus ein Abfallen von Z_0 und Y_1 und ein Ansteigen von Z_1 und Y_0 . Dies betrifft jedoch die ohmschen Anteile nicht, weil diese nur in den Eigenimpedanzen eine Rolle spielen.

4.3 Anzahl und Querschnitt der Erdseile

Die Erdseile haben, grob gesprochen, denselben Effekt wie eine Annäherung der Leiterseile an die Erde. Davon werden zunächst die Queradmittanzen B_1 und B_0 betroffen, welche mit der Anzahl der Erdseile leicht ansteigen (Fig. 4). Die Nullimpedanz sinkt dagegen stark ab, da die Kombination Erdseil/Boden einen besseren Rückfluss des Nullstromes ermöglicht. R_0 und X_0 sinken bis zu einem Erdseilquerschnitt von 150 mm² AwAd relativ schneller, als bei grösseren Querschnitten (Fig. 5). Die Mitimpedanz ist vom Einfluss der Erdseile unabhängig.

Eine Vergrösserung des Querschnittes der Erdseile zeigt dieselbe Tendenz wie die Vergrösserung der Anzahl, ist aber weniger ausgeprägt.

4.4 Durchhang

Die Vergrösserung des Durchhanges hat eine Reduktion der mittleren Höhe der Freileitungsseile über Boden zur Folge und vergrössert daher die kapazitiven Queradmittanzen B_1 und B_0 (Fig. 6). Der Effekt ist jedoch bescheiden. Auf die Längsimpedanzen R_0 und X_0 konnte kein wesentlicher Einfluss festgestellt werden, während $R_1 + jX_1$ vom Durchhang unabhängig ist, weil bei symmetrischem Betrieb die Summe der durch die Leiter fliessenden Ströme Null ist und sich das Magnetfeld ohne Einbeziehung der Erde um die Leiter schliesst.

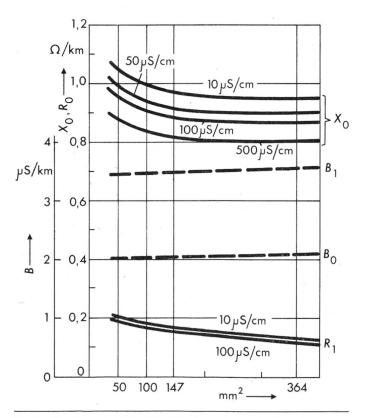


Fig. 5 Kenndaten in Abhängigkeit des Querschnittes des Erdseils

4.5 Bodenleitfähigkeit

Die zunehmende Bodenleitfähigkeit hat auf die Nullreaktanz X_0 einen stark vermindernden Einfluss (Fig. 7). Die übrigen Parameter werden davon nicht beeinflusst (vgl. Carsonsches Korrekturglied c_2 im Anhang). Die grösste Abnahme der Nullreaktanz ist im Bereich der Bodenleitfähigkeit von 0...150 μ S/cm festzustellen; dann ist die maximale Fähigkeit des Bodens erreicht, zur Verbesserung der Stromwege beizutragen.

In der Schweiz sind vor allem die Bodenleitfähigkeiten im Bereich 0...200 $\mu S/cm$ interessant [1]. Bei Böden im Flachland und Schwemmland kommen jedoch auch höhere Leitfähigkeiten vor, so dass in Fig. 7 die Verhältnisse bis zu 500 $\mu S/cm$ dargestellt wurden.

4.6 Parallel laufende Leitungen

Im Mitsystem kann man die elektrischen Werte für parallele Leitungen wegen der geringen Kopplung im allgemeinen nach den üblichen Regeln der Parallelschaltung ermitteln. Im Nullsystem sind jedoch für die Längsimpedanz R_0+jX_0 Kopplungsglieder Z_{0k} zu berücksichtigen, welche 40...60 % der Eigenimpedanz einer Leitung erreichen können (Fig. 8). Dies führt dazu, dass z. B. die Nullreaktanz zweier gleicher paralleler Leitungsstränge zusammen nur wenig kleiner ist als die der Einzelleitung. Z. B. sinkt die Nullreaktanz der Leitung $2\times3\times(2\times600~\text{mm}^2)$ Ad bei einer Bodenleitfähigkeit von $100~\mu\text{S/cm}$ von $0.868~\Omega/\text{km}$ für die Einfachleitung auf 0.668~m/km, wenn beide Leitungen elektrisch parallel laufen.

Wenn ein Strang einer Doppelleitung abgeschaltet wird, sind folgende Fälle möglich:

- a) die abgeschaltete Leitung ist an beiden Enden geerdet z. B. wenn auf der Leitung gearbeitet wird, oder dies durch die Vorschriften verlangt wird;
- b) die Leitung wird abgeschaltet (ohne Erdung), damit sie später schnell wieder in Betrieb genommen werden kann.

Im Fall a) wird die betriebliche Leitung sozusagen vier Endseile haben – das eine, mit welchem die Leitung tatsächlich ausgerüstet ist, z. B. $400~\text{m}^2$ AwAd, sowie die geerdeten Leiterseile der zweiten Leitung, z. B. $3\times(2\times600~\text{mm}^2)$ Ad. Wie sich dabei die Nullimpedanz verhält, ist aus Fig. 7 ersichtlich.

Im Fall b) wird die Nullreaktanz der in Betrieb stehenden Einfachleitung durch die Anwesenheit der parallelen, nicht geerdeten Leitung nicht verändert, weil in dieser kein Strom fliessen kann, welcher sonst die gemeinsame Kopplungsimpedanz beanspruchen würde (Fig. 8).

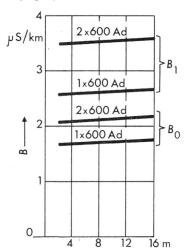


Fig. 6 Kenndaten in Abhängigkeit des Durchhanges Mitte Spannweite

5. Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass die Leitungsparameter nicht auf alle Einflussmerkmale gleich empfindlich reagieren. Relativ gross ist der Einfluss der Anzahl und Anordnung der Bündelleiter auf alle Parameter, der Anzahl der

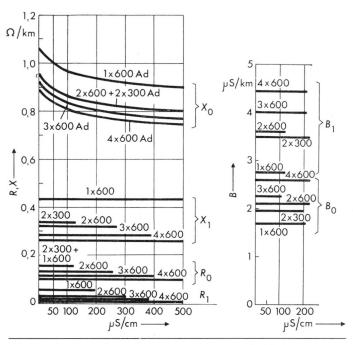
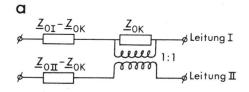


Fig. 7 Kenndaten in Abhängigkeit von der Bodenleitfähigkeit



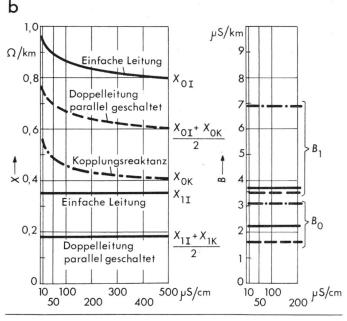


Fig. 8 Parallele Leitungen

- a Ersatzschaltbild für die Längsimpedanz im Nullsystem
 - Z_{0I} Nullimpedanz der Leitung I allein
 - ZoII Nullimpedanz der Leitung II allein
 - Z_{0K} Kopplungsimpedanz
- b Kenndaten einfacher und paralleler Leitungen in Abhängigkeit der Bodenleitfähigkeit

Übersicht über die Abhängigkeit der Leitungsparameter

kein Einfluss

kein wesentlicher Einfluss

steigende Tendenz

fallende Tendenz

stark steigende Tendenz

stark fallende Tendenz

							1 abene 1
Zunehmendes Einflussmerkmal	R ₁	X ₁	R _O	x _o	В ₁	ВО	Fig.
Bündel n = 1,2,3,4,	`	1	1	`	1	1	2
Distanzen	\sim	12	~	1	14	1	3
Anzahl Erdseile			`	`	1	1	4
Erdseil Quer – schnitt			1	14	1	1	5
Durchhang			\sim	~	1	1	6
Bodenleitfähig– keit			?	`	· ·		7

Erdseile auf die Nullimpedanz und der Bodenleitfähigkeit auf die Nullreaktanz. Für überschlägige Berechnungen genügt es also, diese Einflüsse zu erfassen und die übrigen zu vernachlässigen. Auch schwache Einflüsse samt ihrer Tendenz sind aus Tabelle I ersichtlich.

Anhang 1: Liste der verwendeten Symbole

Ι	Matrix der Leiterströme IA, IB	[A]
\mathbf{I}'	Matrix der Ströme Leiter-Erde $\underline{I}_{A'}$, $\underline{I}_{B'}$	[A/km]
P	Matrix der Potentialkoeffizienten P_{ii} , P_{ik}	[km/F]
c_1, c_2	Carsonsche Korrekturglieder für endliche Bodenleitfähigkeit	[-]
\mathbf{T}	Entsymmetrierungsmatrix	[-]
U	Matrix der Spannungen Leiter-Erde $\underline{U}_{\mathrm{A}}, \underline{U}_{\mathrm{B}}$	[V]
$\Delta \mathbf{U}$	Matrix der Spannungsabfälle längs der Leiter $\Delta \underline{U}_{A}$, $\Delta \underline{U}_{B}$	[V/km]
X_1	Innere Selbstreaktanz eines Leiters	[R/cm]
$\mathbf{Y}, \mathbf{Y}_{\text{TR}}$	Queradmittanzmatrix Y_{ii} , Y_{ik}	[S/km]
$\mathbf{Z}, \mathbf{Z}_{\mathrm{TR}}$	Längsimpedanzmatrix $Z_{\mathrm{ii}}, Z_{\mathrm{ik}}$	$[\Omega/km]$
$f, \omega = 2\pi f$	Netzfrequenz	[Hz]
n	Anzahl Bündelleiter/Phase	[-]
q	Querschnitt eines Leiters	[mm ²]
03	Dielektrizitätskonstante	[F/km]
μ_0	Permeabilität	[H/cm]
ϱ	Spezifischer Leiterwiderstand	$[\Omega \cdot mm^2/cm]$
κ	Spezifische Bodenleitfähigkeit	[S/cm
r, D, h	Distanzen (Fig. 10)	[m]

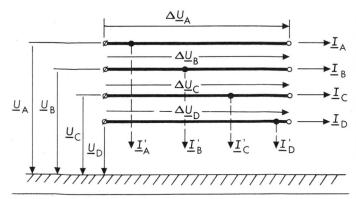


Fig. 9 Darstellung zur Definition der Eigen- und Kopplungseffekte

Anhang 2: Gleichungen zur Bestimmung der elektrischen Kenngrössen nach Fig. 9 [1]

Längsimpedanz $\Delta \mathbf{U} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I}$

$$\begin{bmatrix}
\Delta \underbrace{U_{A}}{\Delta \underbrace{\overline{U}_{B}}} \\
\Delta \underbrace{\overline{U}_{B}} \\
\vdots \\
\Delta \underbrace{U_{k}}
\end{bmatrix} =
\begin{bmatrix}
\underline{Z_{1i} \dots Z_{1k}} \\
\vdots \\
\vdots \\
\underline{Z_{1k}}
\end{bmatrix} \cdot
\begin{bmatrix}
\underline{I_{A}} \\
\underline{\overline{I}_{B}} \\
\vdots \\
\vdots \\
\underline{I_{k}}
\end{bmatrix}$$
(1)

Darin betragen

$$\underline{Z}_{11} = \left\{ \frac{\varrho}{q \cdot n} + 2 \mu_0 f c_1 + j \left[\mu_0 f \left(\ln \frac{2 h_1}{r} + 2 c_2 \right) + X_1 \right] \right\} 10^5$$
 (2)

$$\underline{Z}_{1k} = \left\{ 2\,\mu_0 f \,\mathbf{c}_1 + \mathrm{j}\mu_0 f \left(\ln \frac{D_{1k}'}{D_{1k}} + 2\,\mathbf{c}_2 \right) \right\} 10^5 \, \tag{3}$$

$$\begin{array}{ll} \text{mit} & X_{\mathrm{i}} = \mu_{0} \cdot f \cdot \ln \frac{r}{r_{\mathrm{q}}} & r_{\mathrm{q}} \approx 0,779 \ r \\ & c_{1} \approx \frac{\pi}{8}, \ c_{2} \approx -0,0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{\lambda} \\ & \lambda = 1,6 \ \pi \ A \ \sqrt{\kappa \, \mu_{0} f} \\ & A = h_{\mathrm{i}} \ \text{für} \ \underline{Z}_{\mathrm{ii}} \ \text{und} \ A = \frac{D_{\mathrm{ik}}}{2} \ \text{für} \ \underline{Z}_{\mathrm{ik}} \end{array}$$

Queradmittanz
$$\mathbf{I}' = \mathbf{j} \ \mathbf{Y} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{j} \omega \ \mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{U}$$

$$\mathbf{U} = -\frac{\mathbf{j}}{\omega} \ \mathbf{P} \cdot \mathbf{I}'$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{\mathrm{A}} \\ \underline{U}_{\mathrm{B}} \\ \vdots \\ \underline{U}_{\mathrm{k}} \end{bmatrix} = -\frac{\mathrm{j}}{\omega} \begin{bmatrix} P_{\mathrm{1i}} \dots P_{\mathrm{1k}} \\ \vdots \\ \vdots \\ P_{\mathrm{1k}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{\mathrm{A}'} \\ \underline{I}_{\mathrm{B}'} \\ \vdots \\ \underline{I}_{\mathrm{k}'} \end{bmatrix}$$
(4)

Darin betragen

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi \, \epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r} \tag{5}$$

$$P_{ik} = \frac{1}{2\pi \,\varepsilon_0} \ln \frac{D_{ik}'}{D_{ik}} \tag{6}$$

Anhang 3

Transformation in symmetrische Komponenten

$$\mathbf{Z}_{\text{TR}} = \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{T} \quad \mathbf{Y}_{\text{TR}} = \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{T}$$

$$\mathbf{T} = \frac{1}{b} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{vmatrix}$$

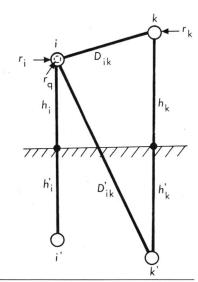
Reihenfolge in T: Null-, Mit-, Gegensystem b = 1 für nichtnormierte Komponenten

 $b = \sqrt{3}$ für normierte Komponenten

Fig. 10

Gegenseitige Lage zweier Leiter mit Spiegelung

an der Erdoberfläche



Bei symmetrischen Leitungen (\underline{Z}_{ii} , \underline{Z}_{ik} , P_{ii} und P_{ik} untereinander gleich) lautet das Ergebnis der Transformation:

$$egin{array}{lll} Z_0 &= Z_{1\mathrm{i}} + 2\,Z_{1\mathrm{k}} & & & (Z_{1\mathrm{k}} > 0) \ Z_1 &= Z_{1\mathrm{i}} - Z_{1\mathrm{k}} & & & & (Y_{i\mathrm{k}} > 0) \ Y_0 &= Y_{i\mathrm{i}} + 2\cdot Y_{i\mathrm{k}} & & & (Y_{i\mathrm{k}} < 0) \end{array}$$

$$Z_1 = Z_{\mathrm{ii}} - Z_{\mathrm{ik}}$$

$$\overline{Y}_0 = \overline{Y}_{ii} + \overline{2} \cdot Y_{ij}$$

$$(Y_{ik} < 0)$$

$$Y_1 = Y_{ii} - Y_{ik}$$

Literatur

- H. Koettnitz und H. Pundt: Mathematische Grundlagen und Netzparameter. 2. Auflage. Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze, Band 1. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1973.
 P. M. Anderson: Analysis of faulted power systems. Ames/Iowa, Iowa State University Press, 1973.

- State University Press, 1973.
 [3] H. Hager: Untersuchung von Energieversorgungsnetzen mit digitalen Rechenprogrammen. Brown, Boveri Mitt. 56(1969)1, S. 19...24.
 [4] K. Reichert und H. Hager: Analyse elektrischer Energieversorgungssysteme auf einheitlicher Datenbasis mit dem Digitalrechner. Brown, Boveri Mitt. 59(1972)7, S. 332...336.
 [5] A. Hoppner: Handbuch für Planung, Konstruktion und Montage von Schaltanlagen. 3. Auflage. Herausgegeben von der Brown, Boveri & Cie. AG, Mannheim. Essen, Girardet-Verlag, 1964.
 [6] Electric transmission and distribution reference book. Pittsburgh, Westinghouse Electric Corporation, 1964.

Adressen der Autoren

Dipl. Ing. Helmut Hager, Abt. KCT, BBC Brown Boveri & Cie AG, 5401 Baden, und Josef Tlapa, Studien- und Planungsbüro der NOK Nordostschweizerische Kraftwerke AG, 5401 Baden

Corrigendum:

Im Aufsatz «Elektrische Phänomene des Knochens» (Heft 4/ 1976) hat sich auf S. 189 ein Irrtum eingeschlichen. Mit der dort erwähnten Ärztekommission des SEV ist die Ärztekommission zum Studium der Starkstromunfälle, des VSE, gemeint.