Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 53 (1962)

Heft: 9

Artikel: Die Anwendung der Elementenprüfung und die Verwendung künstlicher Leitungen bei Abstandskurzschluss-Prüfungen von Leistungsschaltern

Autor: Jussila, J. / Rieder, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916932

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: 08.07.2025

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

Das soeben behandelte Beispiel könnte als Wellenfilter im Zuge der Leitung nach Fig. 6 verwendet werden. Wenn die gesamte Leitung eine Wendelleitung ist, wird man nicht solch grosse Dämpfung der HE_{12}-Welle verlangen. Man kann dann z. B. durch Verkleinerung des Verhältnisses d_1/d_2 eine entsprechend niedrigere Dämpfung der H_{01}-Welle erhalten.

6. Schlussfolgerung

In den Abschnitten 4 und 5 wurde gezeigt, dass vom physikalischen Standpunkt aus die Ringglieder- oder Wendelleitung ein sehr günstiger Übertragungsweg für die H_{01}-Welle ist. Eine solche Leitung erfordert jedoch einen grossen technologischen Aufwand und ist demzufolge teuer. Die aus glatten Metall-Hohlleitungen bestehende Leitung ist aber für eine Fernübertragung der H_{01}-Welle unbrauchbar. Der mit einer dielektrischen Schicht versehene Hohlleiter nach Fig. 2 kann durch zwischengeschaltete Filter, die als Wendelleitung aufgebaut sind, in seinen Übertragungseigenschaften wesentlich verbessert werden. Es ist zu erwarten, dass eine solche mit Filtern versehene Leitung ein guter Kompromiss sein wird.

Literatur

[1] *Stöhr, W.:* Nachrichten-Weitverkehr über Hohlleitungen. Siemens-Z. 33(1959)11, S. 685...690.

[2] *Schnetzler, K.:* Übertragung elektrischer Signale durch Hohlleiter. Bull. SEV 53(1962)1, S. 1...6.

[3] *Piefke, G.:* Wellenausbreitung in der Scheiben-Leitung. AEÜ 11(1957)2, S. 49...59.

[4] *Piefke, G.:* Theorie der Wendel-Leitung endlicher Drahtdicke mit Anwendung auf die Drehung der Polarisationsebene von Hohlleiter-Wellen. AEÜ 12(1958)7, S. 309...316.

[5] *Piefke, G.:* The Influence of Helix Wire Diameter on the Modes in a Helix Waveguide. Proc. IEE-B, Suppl. 103(1956)13, S. 110...118.

[6] *Larsen, H.* und *W. Janssen:* Messungen an dielektrisch belasteten H_{01}-Hohlleitern. Frequenz 15(1961)10, S. 332...338.

Adresse des Autors:

Dr. *G. Piefke*, Zentrallaboratorium der Siemens & Halske AG, Hofmannstrasse 51, München 25 (Deutschland).

Die Anwendung der Elementenprüfung und die Verwendung künstlicher Leitungen bei Abstandskurzschluss-Prüfungen von Leistungsschaltern

Von *J. Jussila* und *W. Rieder*, Baden

621.3.064.1 : 621.316.542.064.45

Die Vorgänge beim Unterbrechen eines Abstandskurzschlusses hängen nicht nur von den Netzkonstanten ab, sondern werden wesentlich durch den Schalter mitbestimmt. Der Aufsatz behandelt einige aus der Wechselwirkung zwischen Netz und Schalter um den Stromnulldurchgang herum resultierende Erscheinungen. Unter anderem wird gefolgert, dass neben der bisher üblichen Schalterprüfung bei klassischem Kurzschluss eine besondere Prüfung bei Abstandskurzschluss nötig ist. Soll dabei an Stelle einer wirklichen Freileitung eine künstliche Leitung verwendet werden, so muss diese mindestens etwa zehn Glieder (Π oder T) besitzen. Für die Prüfung eines Einzelelementes eines Schalters mit Vielfachunterbrechung bei Abstandskurzschluss werden theoretisch hergeleitete notwendige Ähnlichkeitsbedingungen angegeben. Weitere praktische Versuche mit Elementenprüfung sind vorgesehen.

Les phénomènes qui caractérisent la coupure d'un défaut kilométrique ne dépendent pas seulement des paramètres du réseau mais sont aussi sensiblement influencés par le disjoncteur. Dans cet article on analyse quelques-uns des phénomènes qui résultent de l'action réciproque de change entre disjoncteur et réseau dans le voisinage de zéro du courant. Entre autre on arrive à la conclusion qu'il est nécessaire d'effectuer, à côté des essais classiques de court-circuit, un essai spécial de défaut kilométrique. Désire-t-on employer en ce cas, au lieu d'une ligne naturelle une ligne artificielle, celle-ci doit comporter, au minimum, environ dix cellules (en Π ou en T). Pour l'essai d'un élément séparé d'un disjoncteur à plusieurs éléments de coupure on donne, sur la base de considérations théoriques, les conditions d'équivalence nécessaires. Des essais pratiques supplémentaires d'après la méthode des essais par éléments séparés sont prévus.

1. Zum Wesen des Abstandskurzschlusses

Beim Abstandskurzschluss ist die Kurzschluss-Stromstärke wegen der Leitungsimpedanz zwischen Schalter und Kurzschlußstelle gegenüber dem Klemmenkurzschluss vermindert. Man würde daher zunächst erwarten, dass dieser Schaltfall nicht besonders streng sei. Beim näheren Studium glaubte man sodann, dass die bekannte hochfrequente Schwingung des leitungsseitigen Spannungsverlaufes (nach der Stromunterbrechung) die wesentliche Erschwerung bringe. In den folgenden Ausführungen wird nun dargelegt, dass auch diese Auffassung zu einfach ist und die Zusammenhänge tiefer liegen.

Wie Fig. 1 zeigt, haben die Spannungskurven bei Klemmen- und Abstandskurzschluss wesentlich anderen Verlauf, insbesondere wenn man die (in Wirklichkeit stets vorhandene) Bogenspannung vernachlässigt und den Einschwingvorgang erst im Augenblick des Stromnulldurchganges beginnen lässt. Unter dieser Annahme weist nämlich die Kurve der wiederkehrenden Spannung des Klemmenkurzschlusses eine horizontale Anfangstangente auf, während die Dreieckschwingung der Leitung mit ziemlich hoher Steilheit ansteigt [1; 2][1]).

Praktisch beginnt allerdings wegen der stets vorhandenen Bogenspannung der Einschwingvorgang schon vor dem Nulldurchgang, so dass auch bei Klemmenkurzschluss die Anfangssteilheit der wiederkehrenden Spannung im Augenblick des Spannungsnulldurchganges durchaus grösser als Null ist.

Wegen der Vernachlässigung der Bogenspannung bei den diesbezüglichen Überlegungen und wegen der Modellvorstellung vom Wettrennen der unabhängigen Grössen «dielektrische Verfestigung» und «wiederkehrende Spannung» lag die Annahme nahe, dass allein die hohe Anfangssteilheit der wiederkehrenden Spannung für das Grenzausschaltvermögen bei Abstandskurzschlüssen verantwortlich sei. In diesem Falle könnte die Beanspruchung des Schalters auch ohne Zuhilfenahme einer Leitung simuliert werden, wenn nur die Spannungssteilheit entsprechend erhöht wird, was grundsätzlich sowohl bei direkter Prüfung als auch mit Hilfe synthetischer Prüfeinrichtungen möglich wäre.

Genauere experimentelle und theoretische Untersuchungen, vor allem auf Grund exakter Messungen des Stromverlaufes in unmittelbarer Umgebung des Stromnulldurchganges, haben jedoch gezeigt, dass die Besonderheit des Abstandskurzschlusses keineswegs allein durch den steilen Spannungsverlauf erklärt werden kann [3; 4; 5; 6], und dass es deshalb auch bei der Prüfung nicht nur auf diesen Punkt ankommt, und zwar aus folgenden Gründen:

a) Alle wirklichen Schalter weisen eine mehr oder weniger grosse Lichtbogenspannung auf, weshalb der Einschwingvorgang

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

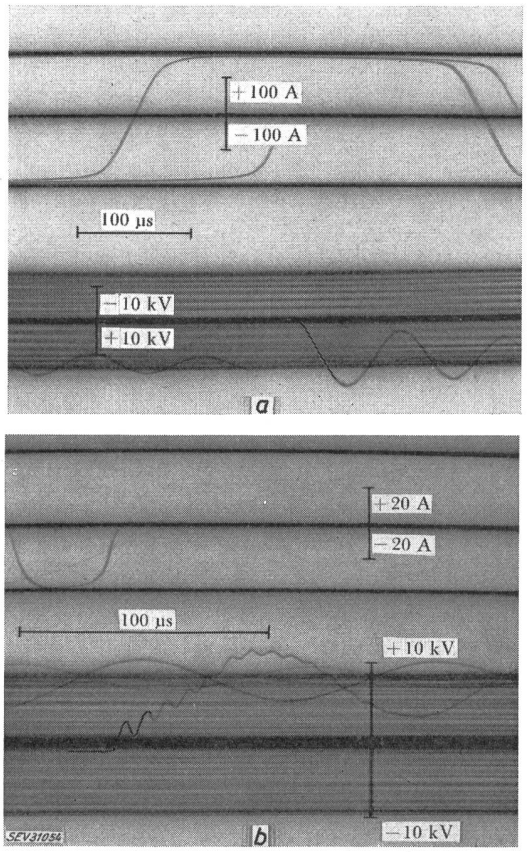

Fig. 1
Wiederkehrende Spannung nach Löschungen ohne Reststrom
a Klemmenkurzschluss (13,8 kA, 14,6 kV, 0,5 kV/µs); *b* Abstandskurzschluss 200 m (9,6 kA, 6,5 kV, 1,14 kV/µs)

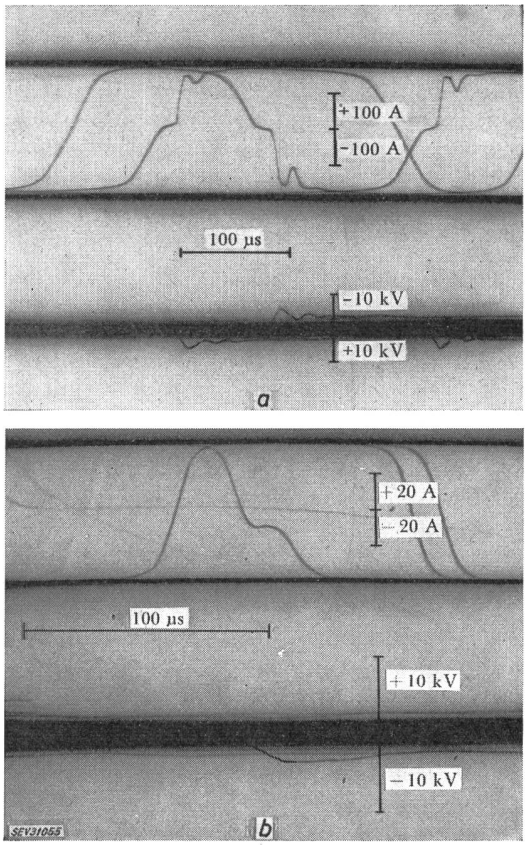

Fig. 2
Spannungsverlauf bei thermischen Wiederzündungen
a Klemmenkurzschluss (14,7 kA, 15,5 kV, 0,55 kV/µs);
b Abstandskurzschluss 200 m (9,1 kA, 6,3 kV, 0,38 kV/µs)

bereits vor dem Stromnulldurchgang beginnt und die wiederkehrende Spannung nach dem Spannungsnulldurchgang am Schalter nie mit horizontaler Anfangstangente, sondern stets mit endlicher Steilheit einsetzt.

b) Wiederkehrende Spannung und dielektrische Festigkeit sind keine voneinander unabhängigen Grössen. Bereits die Tatsache, dass die wiederkehrende Spannung immer mit von Null verschiedener Anfangssteilheit ansteigt, zeigt, dass ihr Verlauf durch die Eigenschaften des Schalters und die Vorgänge vor dem Nulldurchgang wesentlich mitbestimmt wird. Bei endlicher Restleitfähigkeit der Schaltstrecke wird der Spannungsverlauf auch noch nach dem Stromnulldurchgang durch den Schalter (Reststrom) laufend stark beeinflusst. Der Verlauf der wiederkehrenden Spannung ist also das Ergebnis einer recht komplexen *Wechselwirkung* zwischen Schalter und Stromkreis, die jedenfalls schon vor dem Stromnulldurchgang beginnt und weit über denselben fortdauert [3; 7].

c) Auch der Zustand der Schaltstrecke ist nicht nur eine Eigenschaft des Schalters und der Stromstärke. Er wird in allen Fällen schon vor dem Stromnulldurchgang durch die *Wechselwirkung* Schalter—Anlage wesentlich beeinflusst, weil der Verlauf der Bogenspannung sowie die Grösse und Lage der Kapazitäten und Induktivitäten des Stromkreises den Stromverlauf während der entscheidenden Mikrosekunden vor dem Nulldurchgang stark verändern [3; 6]. Fliesst zudem noch ein Reststrom, so führt dieser der Schaltstrecke auch nach dem Nulldurchgang Energie zu, wodurch die Verfestigung durch die Anlage nicht nur verzögert, sondern sogar verhindert, und die Bogensäule wieder aufgeheizt werden kann [3; 5].

d) Bei Abstandskurzschlüssen wurden im Gebiet des Grenzausschaltvermögens der Schalter bisher vorwiegend thermische Wiederzündungen registriert. Bei diesen wird die wiederkehrende Spannung durch den Reststrom so stark gedämpft, dass sie vom Spannungsverlauf bei Klemmenkurzschluss kaum mehr zu unterscheiden ist (Fig. 2). Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Schaltfällen kann deshalb nicht nur im Spannungsverlauf liegen.

e) Diese Behauptung wird auch dadurch bestätigt, dass das Ausschaltvermögen bei den in Fig. 38 von [4] zusammengestellten Versuchsreihen weder für den Klemmen- noch für den Abstandskurzschluss von den gemessenen Spannungssteilheiten (0,1...2,5 kV/µs) abhängig ist, dass jedoch der untersuchte Versuchsschalter bei gleicher Anfangssteilheit im Falle des Abstandskurzschlusses nur etwa die halbe Abschaltleistung bewältigen kann, wie im Falle des Klemmenkurzschlusses. An diesem Ergebnis wird nichts geändert, wenn man an Stelle der gemessenen die inhärente Spannungssteilheit aufträgt.

f) Überbrückt man bei einem einphasigen Abstandskurzschluss die abgehende Leitung unmittelbar am Schalter mit einem Kondensator, so werden durch diesen die Eigenfrequenz der leitungsseitigen Schwingung und die Steilheit der wiederkehrenden Spannung reduziert, die Schaltleistung aber nur in jenen Fällen erhöht, in welchen das Wiederzünden durch einen dielektrischen Durchschlag eingeleitet wird; bei endlicher Restleitfähigkeit der Schaltstrecke wird jedoch das thermische Wiederzünden erleichtert, weil in diesem Falle nicht nur die Spannungssteilheit, sondern noch mehr der durch die Lage und den Energieinhalt der Kapazitäten beeinflusste Verlauf des Reststromes das Wiederzünden verursacht (Fig. 14 in [5]).

g) Aus demselben Grunde liegt die Leistungsgrenze eines Prüfschalters bei gleicher Spannungssteilheit wesentlich tiefer, wenn die Leitung durch einen konzentrierten Schwingkreis ersetzt wird (Fig. 3 in [6]). Unter anderen Bedingungen wurde aber auch das Gegenteil festgestellt.

2. Die Elementenprüfung bei Abstandskurzschluss

2.1 *Allgemeine Voraussetzungen*

Wegen des Mangels hinreichend leistungsstarker Prüfanlagen, können Hochspannungsschalter in der

Regel nicht mit der vollen Kurzschlussleistung geprüft werden. Besteht jedoch ein Schalterpol aus mehreren gleichen, synchron schaltenden Elementen (Schaltkammern), welche in Serie geschaltet sind, dann ist es möglich, ein einzelnes Element unter jenen Bedingungen zu prüfen, unter welchen es bei gleichmässiger Spannungsverteilung innerhalb des Schalterpoles wirklich beansprucht wird, und daraus auf die Schaltleistung des ganzen Schalters zu schliessen. Diese Elementenprüfung hat sich seit langem praktisch bewährt und wird allgemein anerkannt, sofern bestimmte Ähnlichkeitsbedingungen zwischen dem Prüfkreis für ein Element (index e) und dem Originalprüfkreis für den ganzen Schalterpol aus n Elementen (Index o) erfüllt sind. Bei der Elementenprüfung müssen alle Spannungsgrössen um den Faktor $a = 1/n$ reduziert werden:

$$U_e = a\,U_o, \tag{1}$$

während alle Zeit- und Stromgrössen erhalten bleiben

$$t_e = t_o \tag{2}$$

$$i_e = i_o \tag{3}$$

Diese Forderungen werden erfüllt, indem man sowohl die EMK des Generators als auch alle Widerstandsgrössen (R, ωL, $1/\omega C$) um den Faktor a reduziert. Es gelten deshalb ganz allgemein die Ähnlichkeitsbedingungen:

$$U_{generator\ e} = a\,U_{generator\ o} \tag{4}$$

$$R_e = a\,R_o \tag{5}$$

$$L_e = a\,L_o \tag{6}$$

$$C_e = \frac{1}{a}\,C_o \tag{7}$$

Es bleiben dann automatisch alle Eigenfrequenzen, und Stromänderungs-Geschwindigkeiten erhalten, während die Energiegrössen und Spannungssteilheiten um den Faktor a reduziert werden:

$$\omega_e = \frac{1}{\sqrt{L_e\,C_e}} = \frac{1}{\sqrt{L_o\,C_o}} = \omega_o \tag{8}$$

$$i_{Ce} = C_e\frac{\mathrm{d}U_e}{\mathrm{d}t} = C_o\frac{\mathrm{d}U_o}{\mathrm{d}t} = i_{Co} \tag{9}$$

$$U_{Le} = L_e\frac{\mathrm{d}i_e}{\mathrm{d}t} = a\,U_{Lo} \tag{10}$$

$$\frac{1}{2}\,C_e U_e^2 = \frac{1}{2}\,a\,C_o U_o^2 \tag{11}$$

$$\frac{1}{2}\,L_e i_e^2 = \frac{1}{2}\,a\,L_o i_o^2 \tag{12}$$

Das bedeutet, dass bei Beobachtung der Ähnlichkeitsgesetze in Gl. (4) bis (7) nicht nur der betriebsfrequente Strom und der inhärente Verlauf der wiederkehrenden Spannung richtig transformiert werden, sondern auch alle jene Vorgänge um den Stromnulldurchgang, welche als Folge der Wechselwirkung zwischen Schalter und Anlage die bekannten Abweichungen des Stromes von der Sinusform und der wiederkehrenden Spannung vom inhärenten Verlauf verursachen (Stromabbruch, Zusatzstrom, stromlose Pause, Reststrom, thermisches Wiederzünden) [3].

2.2 *Abweichungen*

Die Spannungsverteilung auf die Unterbrechungsstellen des Schalters wird vor dem Nulldurchgang bzw. während eines allfälligen Reststromes durch die Lichtbogencharakteristik, nach erfolgter Stromunterbrechung durch Widerstände oder Kondensatoren gesteuert.

Ist die Spannung über mehrere in Serie geschaltete Lichtbögen nicht gleichmässig verteilt, dann wird jener Entladung mehr Energie zugeführt, an der eine höhere Spannung liegt. Erhöhte Energiezufuhr bewirkt aber ein Aufheizen des Entladungskanals und ein Sinken seines Widerstandes und somit bei gegebener Stromstärke auch ein Sinken der Bogenspannung, also eine automatische Gleichverteilung der Spannung, sofern nur die Entladungsbedingungen für alle Teillichtbögen die gleichen sind. Dies gilt vor allem auch im Falle eines Reststromes [2].

Haben die Bogenstrecken ihre Leitfähigkeit verloren und sind die einzelnen Schaltkammern mit Parallelwiderständen versehen, so erzwingen diese — besonders wenn sie nicht zu hochohmig sind — eine gleichmässige Spannungsverteilung. Auch Steuerkondensatoren können dasselbe bewirken, soferne sie gross gegen die Erdkapazitäten der Schaltkammern sind. Ist dies nicht der Fall, dann ist die Spannungsverteilung vom Schaltfall abhängig, jedoch prinzipiell berechenbar.

Abweichungen von den idealen Verhältnissen sind vor allem durch die statistischen Schwankungen der Löschbedingungen (Strömung) in den einzelnen Kammern eines Schalters gegeben. Sie können trotz des beschriebenen Stabilisierungseffektes eine ungleichmässige Verfestigung bewirken, so dass der Strom in einem Mehrkammerschalter rascher nach Null gezwungen wird, als dies im ungünstigsten Fall in einer Einzelkammer geschieht. Dies bewirkt weiter, dass die Gesamtverfestigung eines Mehrkammerschalters rascher vor sich geht als im ungünstigsten Fall in einer Einzelkammer, sofern die Löschmittelströmung stromunabhängig ist. (Für das Schaltvermögen eines Mehrkammerschalters ist ein mittleres Schaltvermögen der einzelnen Kammern massgebend, für einen Einkammerschalter jedoch die unterste Grenze.)

Gibt man deshalb für einen Mehrkammerschalter nur das entsprechende Vielfache der untersten Leistungsgrenze einer Einzelkammer als Gesamtschaltvermögen an, so liegt dieser Wert zu tief und das Ergebnis der Elementenprüfung ist zu streng. Einer exakten Angabe müsste eine statistische Betrachtung zugrunde liegen, die — der Wirklichkeit entsprechend — höhere Leistungen des Gesamtschalters ergibt.

2.3 *Ähnliche Leitungen*

Wendet man die Ähnlichkeitsgesetze des Kapitels 2.1 im besonderen auf eine Leitung an, so ergibt sich für die gesamte Leitungskapazität C_L und die Leitungsinduktivität L_L:

$$L_{Le} = aL_{Lo} = a\,(l_o L'_o) = \underbrace{(a l_o)}_{l_{e1}}\,\underbrace{L'_o}_{L'_{e1}} = \underbrace{l_o}_{l_{e2}}\,\underbrace{(aL'_o)}_{L'_{e2}} \tag{13}$$

$$C_{Le} = \frac{1}{a}\,C_{Lo} = \frac{1}{a}\,(l_o C'_o) = \underbrace{(a l_o)}_{l_{e1}}\,\underbrace{\frac{1}{a^2}\,C'_o}_{C'_{e1}} = \underbrace{l_o}_{l_{e2}}\,\underbrace{\left(\frac{1}{a}\,C'_o\right)}_{C'_{e2}} \tag{14}$$

Es ergeben sich also zwei Möglichkeiten:

α) Verkürzung der Leitung bei gleichem Induktivitätsbelag (Leiterabstand) aber erhöhtem Kapazitätsbelag.

β) Belassung der Leitungslänge aber Verringerung des Leiterabstandes, wodurch — allerdings nur in engem Bereich bis maximal 1:2 — sowohl L als auch C ungefähr in gewünschter Weise verändert werden. (Genau genommen müsste auch der Leiterdurchmesser geändert werden.)

Beide Varianten genügen den gestellten Forderungen hinsichtlich der Leitungsschwingung; vor allem entsprechen Leitungsfrequenz, Schwingstrom, Schwingenergie und Wellenwiderstand den Ähnlichkeitsgesetzen. Praktisch lässt sich wohl nur die Variante α) realisieren, indem man die Leitung mit Zusatzkondensatoren ausstattet, da eine Änderung von ε und μ nicht realisierbar ist. Die diskontinuierlichen Zusatzkondensatoren verursachen allerdings Abweichungen von den wirklichen Verhältnissen, die umso mehr ins Gewicht fallen, je kleiner die Zahl der Zusatzkondensatoren ist.

Aber auch in Wirklichkeit ist die gleichmässige Verteilung der Leitungskapazität durch die Befestigungsisolatoren und Maste gestört, wozu oft am Leitungsanfang noch die Kapazität von Strom- und Spannungswandlern, Sperrdrosselspulen und Kopplungskondensatoren tritt.

2.4 *Die erforderliche Anzahl von Zusatzkondensatoren*

Es ist zu erwarten, dass die Prüfbedingungen umso wirklichkeitsgetreuer sind, je gleichmässiger die Zusatzkapazitäten längs der Leitung verteilt werden. Um jedoch für die Anzahl der Zusatzkondensatoren x eine untere Grenze festzulegen, müssen zwei Fragen beantwortet werden:

1. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Zahl der Zusatzkondensatoren und den Abweichungen von den Bedingungen einer natürlichen Leitung?
2. Welche Abweichungen können zugelassen werden?

Die erste Frage bezieht sich sowohl auf den Verlauf der wiederkehrenden Spannung als auch auf den mindestens ebenso wichtigen Stromverlauf unmittelbar vor und eventuell auch nach dem Stromnulldurchgang. In diesem Kapitel soll zunächst der theoretisch und messtechnisch leichter erfassbare Spannungsverlauf untersucht werden.

Die zweite Frage ist — wie jede Festlegung von Toleranzen — grundsätzlich nur mit einer gewissen Willkür zu beantworten, die allerdings nicht die Grössenordnung betrifft.

Um den Verlauf der wiederkehrenden Spannung im Originalstromkreis und im Prüfkreis für ein Element (mit Zusatzkondensatoren) zu vergleichen wird folgender Weg beschritten:

a) Bestimmung der Eigenfrequenzen und ihres Amplitudenverhältnisses für den Originalkreis. Dies kann durch harmonische Analyse der Dreieckschwingung einer Leitung ohne Zusatzkondensatoren geschehen (Fig. 3).

b) Bestimmung der Eigenfrequenzen einer Leitung mit x Zusatzkondensatoren der erforderlichen Grösse für die entsprechende Elementenprüfung (für eines von n Elementen). Diese Rechnung ist in Anhang 1 exakt ausgeführt. Sie ergibt Eigenfrequenzen ($f_{e1,k}$), die kleiner als jene der Originalleitung ($f_{o,k}$) sind. Der Frequenzfehler für die k-te Oberwelle:

$$\Delta_k = \frac{f_{e1,k} - f_{o,k}}{f_{o,k}} \tag{15}$$

ist durch Gl. (35) gegeben. Beträgt dieser Fehler

$$\Delta_k = -\frac{1}{k} \tag{16}$$

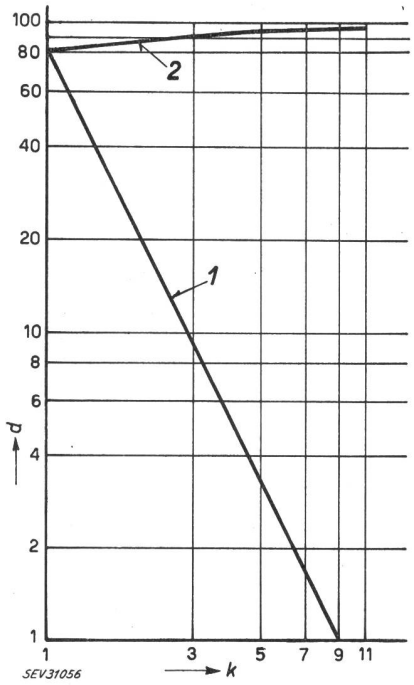

Fig. 3
Harmonische Analyse einer Dreieckschwingung
1 Anteil der k-ten Oberschwingung; *2* Anteil aller Oberschwingungen 1...k

dann folgt daraus wegen $f_{o,k} = k f_{o1}$:

$$f_{e1,k} = (k-1) f_{o,k} = f_{o,k-1} \tag{17}$$

Für $|k \cdot \Delta k| = 1$ ergibt sich demnach statt der ungeradzahligen k-ten Oberwelle der Originalleitung ein geradzahliges Vielfaches der Grundwelle im Falle der Elementenprüfung, wodurch die Spannungsform natürlich störend verändert wird, selbst wenn das Amplitudenverhältnis unverändert erhalten bleibt (was in erster Näherung wohl angenommen werden darf).

Soll die Dreieckschwingung nicht stark verzerrt werden, muss zumindest für die ersten Eigenfrequenzen gefordert werden, dass:

$$|k \cdot \Delta_k| \ll 1 \tag{18}$$

ist.

Wie der Fig. 3 entnommen werden kann, beträgt für die Originalleitung die Amplitude der Grundwelle 82% der Amplitude der Dreieckschwingung, während die Beiträge der 3., 5. und 7. Oberwelle 9%, 3,2% bzw. 1,7% ausmachen.

Alle Oberwellen bis zur 9. bestreiten 97% der Gesamtschwingung, so dass die Forderung sinnvoll erscheint, dass die Bedingung in Gl. (18) bis etwa $k = 9$ erfüllt werden soll.

Die nach den Gl. (35) und (36) berechneten Werte von $k \cdot \Delta_k$ für verschiedene Werte von x, k und a Tabelle I

x	k	$k\,\Delta_k$		
		$a = 1/3$	$a = 1/10$	$a = 0$
3	3	—0,244	—0,28	—0,286
	5	—0,18	—1,12	—1,126
5	3	—0,094	—0,108	—0,112
	5	—0,406	—0,434	—0,466
	7	—1,10	—1,174	—1,202
	9		—2,24	—2,32
10	3	—0,018	—0,028	—0,029
	5	—0,056	—0,132	—0,134
	7	—0,28	—0,336	—0,342
	9	—0,662	—0,690	—0,702
	11	—1,044	—1,22	—1,234
20	3	—	—	—0,007
	5	—	—0,034	—0,034
	7	—	—0,092	—0,092
	9	—	—0,160	—0,162
	11	—	—0,324	—0,326

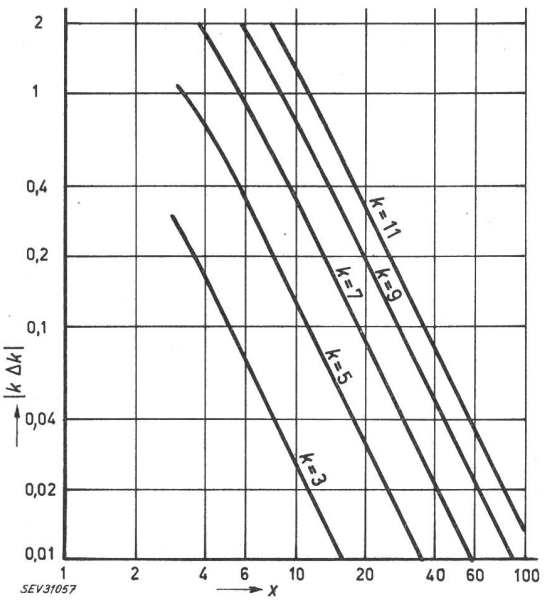

Fig. 4

$k\,\Delta_k$ **als Funktion der Zahl der Zusatzkondensatoren** x **für** $a \rightarrow 0$ **(künstliche Leitung)**

In Tabelle I sind die Werte $k\Delta_k$ für verschiedene Werte von a, x und k zusammengestellt. Man erkennt sofort, dass der Betrag von $k\Delta_k$ durch a nur wenig beeinflusst wird. Jedenfalls ist der Fehler für $a \rightarrow 0$ am grössten. Hingegen ist der Einfluss von x sehr wesentlich.

Die Grösse $k\Delta_k$ wurde für $a \rightarrow 0$, also den ungünstigsten Fall, in Fig. 4 auch graphisch über x aufgetragen für alle Werte von $k \leqq 11$.

Für $x = 20$ beträgt $k\Delta_k$ für die 9. Oberwelle 20% und für die 11. 34%, was wohl gut tragbar ist. Für $x = 10$ ist hingegen $k\Delta_k$ für $k = 7$ bereits ziemlich gross (35%) und für $k = 9$ sogar 80%, weshalb $x = 10$ keinesfalls unterschritten werden sollte.

Vorstehende Überlegungen erfolgten unter Vernachlässigung der Kapazität der Leiter gegen Erde und nur im Hinblick auf den Verlauf einer dreieckigen wiederkehrenden Spannung. Die geforderte Gliederzahl von 10...20 betrifft deshalb nur die Spannungsform, ist aber keine hinreichende Bedingung, falls die Kondensatoren den Stromverlauf in untragbarer Weise beeinflussen oder störende Eigenfrequenzen des ersten halben Leitungsabschnittes $a l_o/2x$ auftreten, wie dies in Fig. 6b zu sehen ist.

Das in Fig. 6a wiedergegebene Oszillogramm wurde mit zwei Phasen der Versuchsleitung der Brown Boveri-Kurzschlussanlage (eines Dreileitersystems mit Erdseil) gewonnen, wobei zwischen Schalter und Leitungsanfang Sammelschienen, Durchführungen, Spannungsteiler und -wandler mit nennenswerten Kapazitäten vorhanden waren. Diese wegen der geringen Leitungslänge (500 m) stark ins Gewicht fallenden konzentrierten Kapazitäten sowie die Unsymmetrie der Leitung und der Erdeinfluss bewirken Abweichungen der Leitungsschwingung von der Dreieckform. In welchem Sinne und wie stark diese Abweichungen schon in der kritischen Umgebung des Stromnulldurchganges wirksam sind, ist schwer zu sagen.

3. Probleme der künstlichen Leitung

Die in Kapitel 1 zusammengefassten Tatsachen zeigen deutlich, dass es nicht möglich ist, einen Abstandskurzschluss wirklichkeitsentsprechend zu simulieren, indem man einfach die Steilheit der wiederkehrenden Spannung nach einem Klemmenkurzschluss entsprechend anpasst oder die Leitung durch einen Schwingkreis mit konzentrierter Kapazität ersetzt. Auf diese Weise gewonnene Ergebnisse können von der Wirklichkeit sehr stark abweichen, wobei sich nicht einmal das Vorzeichen des Fehlers allgemeingültig voraussagen lässt, der aus der Wechselwirkung des Schalters mit dem Ersatzprüfkreis entsteht. Dieser Fehler hängt nämlich auch wesentlich vom Schalter selbst ab, insbesondere davon, ob der Schalter unter den gegebenen Bedingungen zu einer thermischen oder dielektrischen Wiederzündung neigt [5].

Anderseits stehen in den wenigsten Prüfstationen geeignete Versuchsleitungen zur Verfügung, und meistens fehlt auch das erforderliche Gelände, um eine solche aufzustellen. Es besteht deshalb der Wunsch, Abstandskurzschluss-Prüfungen mit Hilfe künstlicher Leitungen durchzuführen.

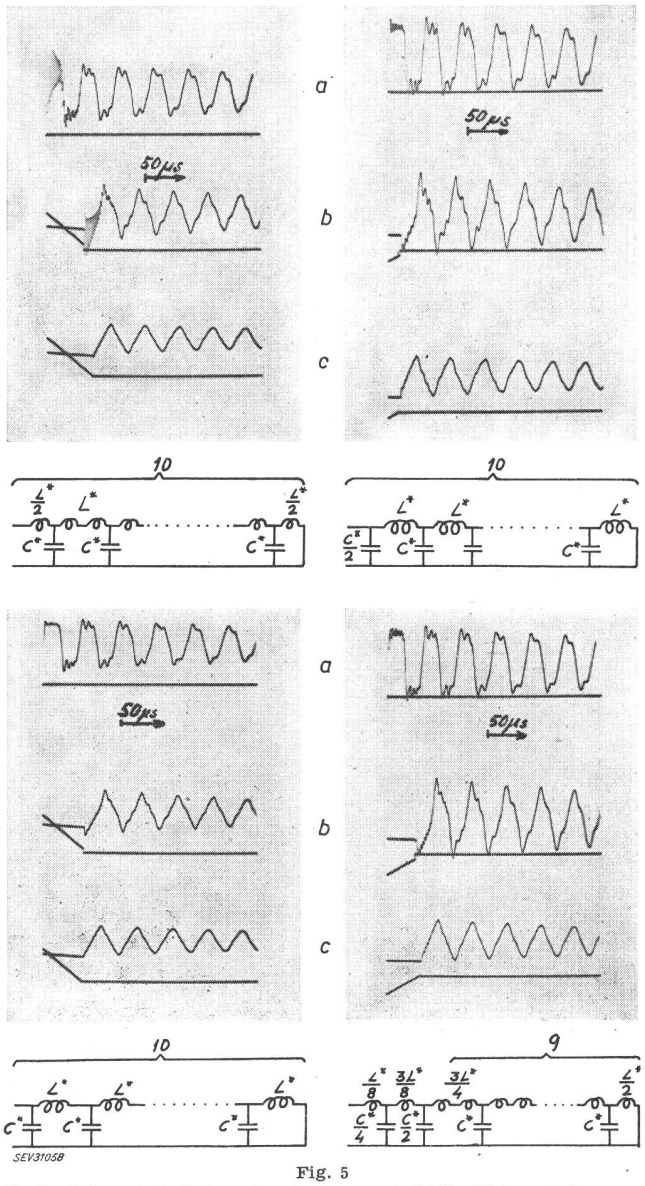

Fig. 5

Verlauf der wiederkehrenden Spannung bei künstlichen Leitungen mit je 10 Gliedern verschiedener Art (Kleinmodell)

(Der obere Strahl bedeutet jeweils die wiederkehrende Spannung, der untere den Strom)

a Unterbrechung im Strommaximum; *b* Unterbrechung vor dem natürlichen Stromnulldurchgang; *c* Unterbrechung im natürlichen Stromnulldurchgang

Zur Prüfung dieser Möglichkeit sind zunächst zwei Fragen zu beantworten:

a) Kann eine am Ende kurzgeschlossene Doppelleitung mit bekanntem Induktivitäts- und Kapazitätsbelag durch eine künstliche Leitung ersetzt werden, ohne dass dadurch die Prüfbedingungen des Abstandskurzschlusses geändert werden?

b) Können die Bedingungen eines Abstandskurzschlusses mit Erdberührung in einem Drehstromnetz durch einen erdfreien Abstandskurzschluss eines Zweileitersystems wirklichkeitsgetreu simuliert werden?

Die Frage a) führt zu zwei weiteren Fragen, welche den Aufbau der künstlichen Leitung betreffen, nämlich:

α) Wie müssen die einzelnen Glieder einer künstlichen Leitung beschaffen sein?

β) Aus wievielen Gliedern muss eine künstliche Leitung zusammengesetzt sein?

Die Fragen α) und β) wurden rechnerisch und experimentell untersucht. Die Versuche wurden zum Teil an einer natürlichen Starkstromleitung mit und ohne Zusatzkondensatoren als wirklichkeitsgemässe Abstandskurzschluss-Prüfungen durchgeführt (Fig. 1, 2, 6), zum Teil als Modellversuche mit einer künstlichen Leitung aus 10 Π-, T- oder Γ-Gliedern (Fig. 5). Das Modell der künstlichen Leitung wurde mit 28 V, 50 Hz, betrieben und entsprach einer Leitungslänge von 37,5 km.

Die Frage b) wurde an anderer Stelle erörtert [6].

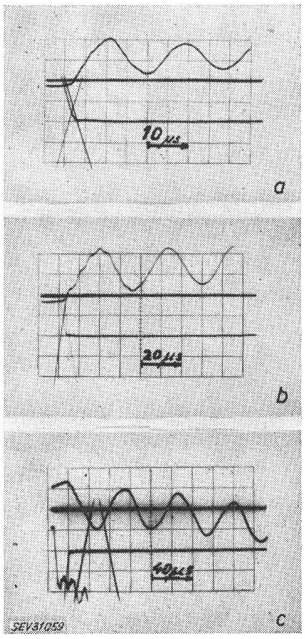

Fig. 6

Leitungsschwingungen bei 500 m Länge

a ohne Zusatzkondensatoren; *b* mit 10 Zusatzkondensatoren von je 3300 pF; *c* mit 10 Zusatzkondensatoren von je 10 000 pF; *oberer Strahl:* wiederkehrende Spannung; *unterer Strahl:* Strom

Bei Verwendung einer künstlichen Leitung zeigt die wiederkehrende Spannung Störfrequenzen (Fig. 5), deren Amplituden theoretisch von der Zahl der Glieder unabhängig sind; mit der Gliederzahl wächst jedoch ihre Frequenz [9]. Wegen des Skineffektes werden höherfrequente Schwingungen rascher gedämpft, so dass praktisch auch die Amplitude der Störfrequenz mit wachsender Gliederzahl abnimmt. Jedenfalls ist aber gezeigt worden, dass die Beschränkung auf ein einziges Glied ganz untragbare Fehler verursacht (sowohl hinsichtlich der Spannungsform als auch hinsichtlich der Beeinflussung des Stromverlaufes vor und nach dem Nulldurchgang). Die Fragen sind deshalb in dem Sinne zu verstehen, dass die Abweichungen für alle zu prüfenden Schalter unter einer noch festzusetzenden Grenze des Tragbaren liegen sollen. Es muss betont werden, dass nicht nur der durch ein konventionelles Spannungsoszillogramm leicht messbare Verlauf der wiederkehrenden Spannung, sondern auch der zwar weniger leicht messbare aber ganz bestimmt nicht weniger bedeutende Stromverlauf um den Stromnulldurchgang in Betracht zu ziehen ist.

3.1 *Aufbau der Glieder einer künstlichen Leitung*

Ersetzt man eine natürliche Leitung (Länge l_o, Kapazitätsbelag C', Induktivitätsbelag L') durch eine künstliche Leitung, aus x gleichen Gliedern, dann muss jedes Glied die Kapazität $C^* = C' l_o/x$ und die Induktivität $L^* = L' l_o/x$ besitzen. Üblicherweise benützt man entweder T-Glieder ($L^*/2 - C^* - L^*/2$) oder Π-Glieder ($C^*/2 - L^* - C^*/2$).

Der zeitliche Spannungsverlauf einer natürlichen Leitung hat Dreieckform, wenn der Strom genau im natürlichen Stromnulldurchgang unterbrochen wurde; die Spannungskurve hat Rechteckform, wenn die Unterbrechung im Strommaximum erfolgte. Im allgemeinen Fall (z. B. bei Stromabbruch vor dem natürlichen Stromnulldurchgang) ergibt sich eine Schwingung, die aus einer Dreieck- und einer Rechteckkomponente zusammengesetzt ist.

Eine künstliche Leitung aus T-Gliedern zeigt ausserdem in jedem Falle noch eine sehr hohe Störfrequenz, welche der Eigenfrequenz der ersten Induktivität ($L^*/2$) mit ihrer natürlichen, verteilten Kapazität entspricht (Fig. 5). Ersetzt man die T- durch Π-Glieder, dann gehen die Störungen stark zurück. Sie verschwinden vollständig, so dass der Spannungsverlauf nahezu ideal ist, wenn man Γ-Glieder ($C^* - L^*$) verwendet.

Wie in Kap. 1 bewiesen wurde, ist allerdings der Spannungsverlauf keineswegs allein entscheidend. Vielmehr kann bei gleichem oder nahezu gleichem Verlauf der wiederkehrenden Spannung der Stromverlauf unmittelbar vor dem Stromnulldurchgang sowie der Verlauf des Reststromes unmittelbar nachher durch verschiedene Lage der Kapazitäten in bezug auf den Schalter verändert werden. «Unmittelbar» bedeutet hier einige thermische Zeitkonstanten des Lichtbogens, die in Leistungsschaltern von der Grössenordnung weniger Mikrosekunden sind. Dass solche kleinen und nur sehr schwer messbaren Änderungen des Stromverlaufes das Schaltvermögen eines Schalters vergrössern oder verringern können, wurde bereits erörtert [3; 4; 5; 6].

Aus diesem Grunde ist wohl das T-Glied vorzuziehen, weil bei diesem das Verhältnis der ersten Teilkapazität zu der vor ihr liegenden Teilinduktivität am ehesten der Wirklichkeit entspricht, während beim Γ-Glied die ganze Kapazität C^* unmittelbar am Schalter liegt. Denselben Nachteil hat ein Π-Glied, wenn dabei auch die frei zugängliche Kapazität am Schalter nur halb so gross ist.

Hinsichtlich der zumindest in sehr vielen Fällen entscheidenden Zugänglichkeit der ersten Kapazität (vom Schalter aus gesehen) sind also gerade jene Elemente besonders ungünstig, welche die wiederkehrende Spannung am saubersten wiedergeben.

Selbstverständlich ist der Fehler, sowohl hinsichtlich des Strom- als auch hinsichtlich des Spannungsverlaufes umso geringer, je grösser die Gliederzahl ist.

Der Fehler des Spannungsverlaufes ergibt sich aus der Berechnung für Leitungen mit Zusatzkondensatoren für sehr kleine Werte von a und erfordert gemäss den Überlegungen am Ende des 3. Kapitels 10...20 Glieder.

Wie Fig. 5 zeigt, kann eine Leitung aus 10 T-Gliedern tatsächlich die erste Halbwelle einer Dreieck-

schwingung gut wiedergeben, wenn man von der hochfrequenten Schwingung der ersten Induktivität absieht.

Um den Einfluss dieser Störung herabzusetzen, müsste die Zahl der Glieder noch wesentlich erhöht, oder zumindest der Anfang der Leitung feiner unterteilt werden. Entsprechende Versuche mit einer künstlichen Modell-Leitung aus T-Gliedern, die am Eingang feiner unterteilt ist:

$$\frac{L^*}{8} - \frac{C^*}{4} - \frac{3L^*}{8} - \frac{C^*}{2} - \frac{3L^*}{4} - C^* - L^* - C^* - L^* \ldots$$

ergaben eine Spannungskurve, die weniger Störungen als die Leitung aus Π-Gliedern aufweist. Zudem muss eine solche am Anfang feiner abgestufte künstliche Leitung aus T-Gliedern auch hinsichtlich der Beeinflussung des Stromverlaufes besser der Wirklichkeit entsprechen.

In Wirklichkeit weichen die Eigenschaften jeder Leitung von jenen eines idealen Lechersystems ab, wie bereits zu Fig. 6a bemerkt wurde. Die konzentrierten Kapazitäten der Sammelschienen, Durchführungen, Strom- und Spannungswandler, die Asymmetrie der Leitung, die Aufhängung der Seile, der Erdeinfluss sowie die stärkere Dämpfung der Oberwellen höherer Ordnung durch den Skineffekt runden die Spitzen der unter idealen Bedingungen zu erwarteter Dreieckschwingung stets mehr oder weniger ab, insbesondere bei späteren Perioden. Es erscheint deshalb wohl vertretbar, bei Prüfungen mit künstlichen Leitungen Abweichungen vom idealen Strom- und Spannungsverlauf zuzulassen, wie sie auch in Wirklichkeit auftreten. Weil oft am Anfang der Leitung grössere konzentrierte Kapazitäten vorhanden sind, könnten die Einwände gegen Π-Glieder sowie der Vorschlag zu einer feineren Unterteilung des Leitungsanfanges rein akademisch erscheinen.

Das wäre aber nur dann der Fall, wenn eine konzentrierte Kapazität am Leitungsanfang die Schaltbedingungen stets erschwerte, oder stets vorhanden wäre. Tatsächlich ist jedoch eine konzentrierte Kapazität nicht immer vorhanden und die Kapazität kann das Ausschalten ebenso erleichtern wie erschweren, je nachdem, welcher Wiederzündmechanismus in dem betreffenden Schalter unter den gegebenen Bedingungen wirksam ist [5]. Man muss sich folglich davon überzeugen, dass der Schalter den Abstandskurzschluss sowohl mit als auch ohne Zusatzkapazität bewältigt.

Ehe man die Zahl und Art der Glieder für künstliche Leitungen in Prüfvorschriften endgültig und allgemeinverbindlich festlegt, sollte man noch mehr über ihren Einfluss vor allem auf den Stromverlauf in unmittelbarer Umgebung des Nulldurchganges und auf das Schaltvermögen verschiedenartiger Schalter wissen, als dies heute der Fall ist.

4. Zusammenfassung

Der Abstandskurzschluss unterscheidet sich vom Klemmenkurzschluss nicht nur hinsichtlich der Steilheit der wiederkehrenden Spannung, sondern auch — wegen der verschiedenen Anordnung der Kapazitäten — hinsichtlich des Stromverlaufes unmittelbar vor und nach dem Nulldurchgang. Infolgedessen ist der Zustand der Schaltstrecke im Augenblick des Stromnulldurchganges in beiden Fällen sehr stark verschieden und ebenso der Verlauf eines allfälligen Reststromes.

Aus diesen Gründen entspricht eine Kurzschlussprüfung mit veränderter Spannungssteilheit oder eine Prüfung in einem zweifrequenten Kreis mit konzentrierten Kapazitäten keineswegs den Bedingungen des Abstandskurzschlusses.

Es erscheint möglich, ein am Ende kurzgeschlossenes, erdfreies Zweileitersystem durch eine künstliche Leitung hinreichend wirklichkeitsgetreu zu ersetzen, soferne man die Zahl der Glieder hinreichend gross wählt und nicht mit einem frei zugänglichen Kondensator beginnt. Um den (dreieckigen) Spannungsverlauf richtig wiederzugeben erscheinen etwa 10 Glieder nötig, doch stört dann noch die Eigenfrequenz der ersten Induktivität stark, weshalb vorgeschlagen wird, den Anfang der künstlichen Leitung feiner zu unterteilen. Anderseits entsprechen auch die Gegebenheiten in einem Netz nicht den idealisierten Annahmen, weshalb gewisse Konzessionen gerechtfertigt erscheinen, sobald genügend quantitative Untersuchungen vorliegen.

Zur endgültigen Beurteilung der Möglichkeiten künstlicher Leitungen scheinen in Ergänzung der hier erwähnten Versuche mit wirklichen Leitungen und mit Miniaturmodellen künstlicher Leitungen, vor allem noch vergleichende Leistungsversuche mit künstlichen Leitungen erforderlich.

Die Frage, ob ein Erdkurzschluss auf einer dreiphasigen Leitung durch ein Zweileitersystem bzw. eine künstliche Leitung simuliert werden kann, ist damit noch nicht beantwortet [6].

Anhang 1

Berechnung der Eigenfrequenzen von Leitungen mit Zusatzkondensatoren und ihrer Abweichungen von idealen Leitungen

Unterteilt man ein Zweileitersystem der Länge l in x gleiche Abschnitte (Fig. 7), dann gelten für die Spannungen (von Leiter zu Leiter) am Anfang bzw. am Ende des m-ten Abschnittes, U_{m1} bzw. U_{m2}, und für die entsprechenden Ströme I_{m1} bzw. I_{m2} die Gl. [8]:

$$\begin{aligned} U_{m1} &= U_{m2} \cos \frac{l_o \omega_o}{x v_o} + I_{m2}\, \mathrm{j} \sqrt{\frac{L'_o}{C'_o}} \sin \frac{l_o \omega_o}{x v_o} \\ I_{m1} &= U_{m2}\, \mathrm{j} \sqrt{\frac{C'_o}{L'_o}} \sin \frac{l_o \omega_o}{x v_o} + I_{m2} \cos \frac{l_o \omega_o}{x v_o} \end{aligned} \tag{19}$$

wobei ω die Kreisfrequenz einer betrachteten Leitungsschwingung und

$$v_o = 1/\sqrt{L_o C_o} \tag{20}$$

die Wellengeschwindigkeit auf der Leitung ist. Mit

$$Z_o = \sqrt{\frac{L'_o}{C'_o}} \tag{21}$$

und

$$\Phi_o = \frac{l_o \omega_o}{x v_o} \tag{22}$$

entspricht den Gl. (19) die Matrix:

$$\begin{pmatrix} \cos \Phi_o & \mathrm{j}\, Z_o \sin \Phi_o \\ \frac{\mathrm{j}}{Z_o} \sin \Phi_o & \cos \Phi_o \end{pmatrix} \tag{23}$$

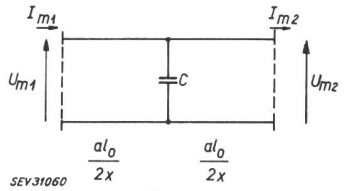

Fig. 7
Leitungsabschnitt mit Zusatzkondensatoren

Für eine am Ende kurzgeschlossene Leitung ist:

$$\frac{U_L}{I_L} = \mathrm{j} Z_o \frac{\sin x\Phi_o}{\cos x\Phi_o} \tag{24}$$

wobei U_L bzw. I_L die Werte der Spannung bzw. des Stromes am Anfang der Leitung bedeuten.

Voraussetzungsgemäss ist für $v_o = c$ (Lichtgeschwindigkeit)

$$\omega_{ok} = k \frac{\pi}{2} \cdot \frac{c}{l_o} \tag{25}$$

eine Eigenfrequenz der am Ende kurzgeschlossenen Leitung (k Ordnungszahl der Oberwelle).

Bei Elementenprüfungen gemäss Kapitel 2.3 Variante α) wird die um den Faktor a verkürzte Leitung mit x Zusatzkondensatoren ausgestattet, welche jeweils in der Mitte der x gleichen Leitungsabschnitte angebracht seien. Die Länge eines Leitungsabschnittes beträgt somit

$$\frac{l_{e1}}{x} = \frac{a l_o}{x} \tag{26}$$

seine verteilte Kapazität $C'_o a l_o / x$. Gemäss Gl. (14) ist die Zusatzkapazität je Abschnitt C so zu wählen, dass:

$$C = C'_o \frac{l_o}{x} \left(\frac{1}{a} - a\right) \tag{27}$$

ist.

Ein Leitungsabschnitt gemäss Fig. 7 besteht aus drei Teilen, nämlich einem Leitungsstück der Länge $a\, l_o/2x$, einem Zusatzkondensator C und einem zweiten Leitungsstück $a l_o/2x$. Für einen solchen Leitungsabschnitt mit Zusatzkondensator tritt an die Stelle der Matrix (23) das Produkt der entsprechenden Matrizen der genannten drei Teile; oder mit anderen Symbolen analog Gl. (23):

$$\begin{pmatrix} \cos\Psi & \mathrm{j} Y \sin\Psi \\ \frac{\mathrm{j}}{Y} \sin\Psi & \cos\Psi \end{pmatrix} \tag{28}$$

wobei

$$\cos\Psi = \left(1 - \frac{1}{2}\omega C Z_o \operatorname{tg} \Phi_o a\right) \cos \Phi_o a = \\ = \cos \Phi_o a - \frac{1}{2}\omega C Z_o \sin \Phi_o a \tag{29}$$

ist.

Die Resonanzfrequenzen der verkürzten Leitung mit Zusatzkondensatoren folgen wieder aus der Bedingung

$$\cos x\Psi = 0 \tag{30}$$

Es ist jedoch schwierig, $\cos x\Psi$ aus Gl. (29) zu berechnen und auf diese Weise die Nullstellen der Gl. (30) zu suchen. Das Problem wurde deshalb graphisch gelöst.

Durch Einsetzen der Gl. (21), (22) und (27) in (29) folgt:

$$\cos\Psi = \cos a\Phi_o - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{a} - a\right) \Phi_o \sin a\Phi_o = F(\Phi_o) \tag{31}$$

Gl. (30) ist erfüllt, wenn

$$F(\Phi_o) = \cos \frac{\pi k}{2x} \; (= \cos\Psi) \tag{32}$$

ist.

Um die Nullstellen der Gl. (30) zu finden, wurden in Fig. 8 zunächst die Werte

$$\Phi_{ok} = \frac{\pi k}{2x}$$

sowie die zugehörigen Funktionswerte $\cos \Phi_o$ (voll ausgezogene Kurve) markiert. Die parallelen Geraden zur Abszisse verbinden gleiche Funktionswerte von $F(\Phi_o) = \cos\Psi$ und $\cos \Phi_o$ gemäss Gl. (32). Die Abszissenwerte der Schnittpunkte dieser Geraden mit $F(\Phi_o)$ entsprechen somit den Nullstellen der Gl. (30).

Die gestrichelte Kurve $F(\Phi_o)$ gestattet nun die unmittelbare Bestimmung jener Werte $\Phi_{e1,k}$, welche den Eigenfrequenzen der verkürzten, mit Zusatzkondensatoren ausgerüsteten Leitung entsprechen. Das bedeutet wegen Gl. (22)

$$\omega_{e1,k} = x\Phi_{e1,k} \frac{v_{e1}}{l_{e1}} = x\Phi_{e1,k} \frac{c}{l_o} \tag{33}$$

Die Eigenfrequenzen der Prüfleitung weichen von jenen der Originalleitung ab, insbesondere für höhere Werte von k.

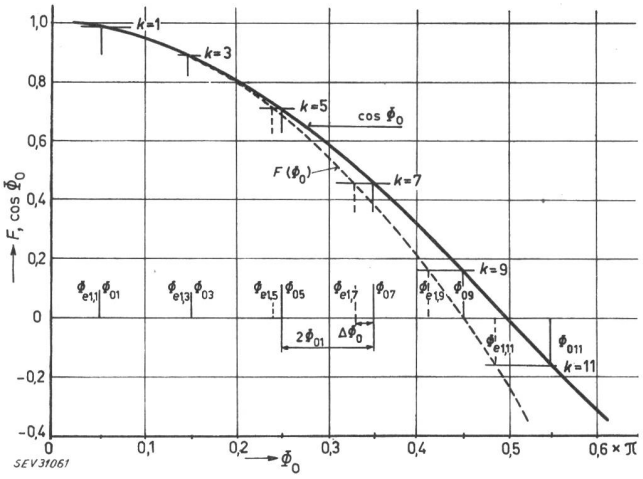

Fig. 8

Bestimmung der Frequenzfehler der Oberschwingungen einer Leitung mit Zusatzkondensatoren

k Ordnungszahl der Oberwelle; F nach Gl. (32); Φ_0 nach Gl. (22)

Der Fehler beträgt

$$\Delta_k = \frac{\Phi_{e1,k} - \Phi_{o,k}}{\Phi_{o,k}} = \frac{\omega_{e1,k} - \omega_{o,k}}{\omega_{o,k}} \tag{34}$$

Näherungsweise gilt[1]):

$$\Delta_k = -\frac{2x}{k\pi} \cdot \\ \cdot \frac{\cos\frac{k\pi}{2x} - \cos\frac{ak\pi}{2x} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{a} - a\right)\frac{k\pi}{2x}\sin\frac{ak\pi}{2x}}{a\sin\frac{ak\pi}{2x} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{a} - a\right)\sin\frac{ak\pi}{2x} + \frac{1}{2}(1 - a^2)\frac{k\pi}{2x}\cos\frac{ak\pi}{2x}} \tag{35}$$

und für $a \ll 1$:

$$\Delta_k = -\left(\frac{2x}{k\pi}\right)^2 \cdot \left[\cos\frac{k\pi}{2x} - 1 + \frac{1}{2}\left(\frac{k\pi}{2x}\right)^2 - \frac{a^2}{12}(1 - a) \cdot \left(\frac{k\pi}{2x}\right)^4\right] \tag{36}$$

Für kleine Werte von a wird schliesslich die Leitungskapazität klein gegen die Zusatzkapazitäten und man erhält die Beschreibung einer synthetischen Leitung gemäss Fig. 9 (vgl. Kap. 3).

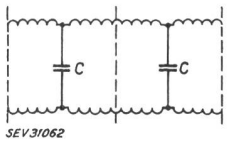

Fig. 9

Leitung mit Zusatzkondensatoren für $a \to 0$

Literatur

[1] *Hochrainer, A.:* Der Abstandskurzschluss. ETZ-A 80(1959)3, S. 65...70.

[2] *Baltensperger, P.* und *E. Ruoss:* Der Abstandskurzschluss in Hochspannungsnetzen. Brown Boveri Mitt. 47(1960)5/6, S. 329...339.

[3] *Rieder, W.* und *J. Passaquin:* Sur la décroissance du courant vers zéro et le courant résiduel dans les disjoncteurs. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 18. Session 1960, Bd. 2, Rapp. 105.

[4] *Rieder, W.:* Diskussion Gr. 13. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 18. Session 1960, Bd. 1, S. 403...404.

[5] *Rieder, W.* und *H. D. Kuhn:* Bedeutung und Schwierigkeiten der sogenannten «Nachstrom»-Messungen. STZ 58(1961)29/30, S. 609...619.

[6] *Eidinger, A.* und *W. Rieder:* Problèmes du défaut kilométrique. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 19. Session 1962, Bd. 2, Rapp. 103.

[7] *Browne, T. E.:* An Approach to Mathematical Analysis of A-C Arc Extinction in Circuit Breakers. Diskussion: *W. Rieder.* Trans. AIEE-III 77(1958)40, Febr. 1959, S. 1514...1515.

[8] *Küpfmüller, K.:* Einführung in die theoretische Elektrotechnik. 6. Aufl. Berlin u. a.: Springer 1959.

[9] *Hosemann, G., W. Frey* und *D. Oeding:* Digitale Berechnung der wiederkehrenden Spannung in Hochspannungsnetzen. BBC-Nachr. 43(1961)2, S. 55...70.

Adressen der Autoren:

J. Jussila, Ingenieur der AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG) und Dr. *W. Rieder,* Physiker der AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

[1]) Die für grosse Werte von x und kleine k näherungsweise berechneten kleinen Fehler sind nicht sehr genau, doch wächst die Genauigkeit mit zunehmendem Fehler bzw. zunehmendem Betrag der Neigung der Kurve $F(\Phi_o)$ (Fig. 8).