Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 63 (1972)
Heft: 9

Artikel: Überspannungsschutz von gekapselten Anlagen mit Kabeleinführungen
Autor: Stephanides, H.V.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915688

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: 02.10.2025

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

Überspannungsschutz von gekapselten Anlagen mit Kabeleinführungen

Von *H. V. Stephanides*, Oberentfelden

621.316.91:621.31-182.77

Es wird untersucht, mit welchen Massnahmen gekapselte Anlagen und Transformatoren mit direkt eingeführten Kabeln von maximal 1000 bis 2000 m Länge wirksam gegen Blitzüberspannungen geschützt werden können. Man benötigt auf der Freileitung mehrere Blitzschutz-Erdseile und niederohmige Erdelektroden der Masten über der 0,5...2,0-fachen Länge der Kabel und der gekapselten Anlageteile vor dem Kabelendverschluss, sowie mindestens einen Satz Überspannungsableiter beim Kabelendverschluss. Ein zweiter Ableitersatz an der Freileitung, eine Spannweite hinter dem Anfang der Schutzzone, kann die Schutzwirkung verbessern. Für die Berechnung der Überspannungen bzw. der Länge der benötigten Blitzschutzzone werden einfache Formeln abgeleitet. Mit diesen erzielt man eine gute Übereinstimmung der Resultate mit Messungen am Anlagemodell.

On étudie par quelles mesures des installations et des transformateurs blindés, avec entrée directe des câbles d'une longueur maximale de 1000 à 2000 m, peuvent être protégés efficacement contre les surtensions provoquées par la foudre. Sur les lignes aériennes, on doit disposer à cet effet de plusieurs conducteurs de terre de protection, ainsi que des supports pourvus d'électrodes de terre de faible résistance, cela sur une longueur de 0,5 à 2 fois la longueur des câbles et de l'installation blindée, avant les boîtes d'extrémité du câble. Monter également un jeu de parafoudres à proximité immédiate de ces boîtes d'extrémité. Un second jeu de parafoudres disposés sur la ligne aérienne derrière le début de la zone de protection, peut améliorer l'effet de protection. Des équations simples sont présentées pour le calcul des surtensions, resp. de la longueur exigée de la zone protégée contre la foudre. Ces équations fournissent une excellente concordance de leurs résultats avec les mesures effectuées sur le modèle de l'installation.

1. Einleitung

Schaltanlagen und wichtige Objekte in den Schaltanlagen werden häufig mittels Überspannungsableitern gegen Blitzüberspannungen [1][1]) geschützt. Diese Ableiter müssen in der Regel möglichst nahe bei dem zu schützenden Objekt eingebaut sein, da nur so eine genügende Schutzwirkung erzielt wird [2].

Schwierigkeiten bereiten dabei Transformatoren, die über längere, direkt in den Transformatorkessel hineingeführte Kabel an die Freileitung angeschlossen sind [3; 4; 5]. Gewöhnliche Überspannungsableiter lassen sich bei ihnen nicht auf einfache Art genügend nahe bei dem zu schützenden Transformator einbauen. Dasselbe gilt für Einführungen von Freileitungen in SF_6-gekapselte Schaltanlagen [6] unter Zwischenschaltung eines längeren Kabelstückes.

In beiden Fällen besteht grundsätzlich die Möglichkeit, den Überspannungsableiter ebenfalls zu kapseln und so nahe bei dem zu schützenden Objekt einzubauen. Die Schutzmethode mit gekapselten Überspannungsableitern wird aber oft als nachteilig empfunden. Die vorliegende Arbeit befasst sich deshalb mit anderen einfacheren Schutzmethoden. Die Schutzwirkung von Überspannungsableitern, die beim Übergang von der Freileitung zum Kabel eingebaut sind, wird dabei rechnerisch ermittelt, unter Verwendung einer einfachen, durch Modellversuche überprüften Formel. Zusätzlich berücksichtigt wird dabei die Schutzwirkung von Überspannungsableitern, die auf einem Freileitungsmast in verschiedenen Entfernungen vom freileitungs-seitigen Kabelendverschluss eingebaut sind.

Bei dieser untersuchten Schutzmethode spielt der Blitzschutz der Freileitung mittels Erdseilen und niederohmigen Erdelektroden bei den Freileitungsmasten eine wichtige Rolle. Ein solcher Blitzschutz ist erforderlich in einer genau definierten Schutzzone vor dem Kabelendverschluss.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2. Verwendete Buchstabensymbole

U_0 (Fig. 1)	Summe der Restspannung des Ableiters 2 und der Scheitelwerte der Spannungsabfälle am Mast 2 und an seiner Erdelektrode während der Front der ersten Welle
U_0 (Fig. 2)	Spannung an der Leitung beim Mast 1, bei dem ungünstigsten Blitzschlag, bei dem die Station noch sicher geschützt werden soll
T_s (Fig. 1)	Laufzeit der Wellen zwischen den beiden Ableitern
T_s (Fig. 2)	Laufzeit der Wellen zwischen dem Anfang der Schutzzone und dem Ableiter 1
T_s'	Für den Scheitelwert der Überspannung massgeblicher Wert von T_s
T_{sm}	Oberer Grenzwert von T_s'
T_1	Anstiegsdauer der Spannung am Ableiter 1
T_k	Grösste Laufzeit der vom Endverschluss ausgehenden Wellen in Kabeln und gekapselten Anlagen
$u(t)$	Spannungsverlauf am Ableiter 1
U_{as}	Ansprechspannung des Ableiters 1
$\hat{u}_w$	Scheitelwert der betriebsfrequenten Wechselspannung

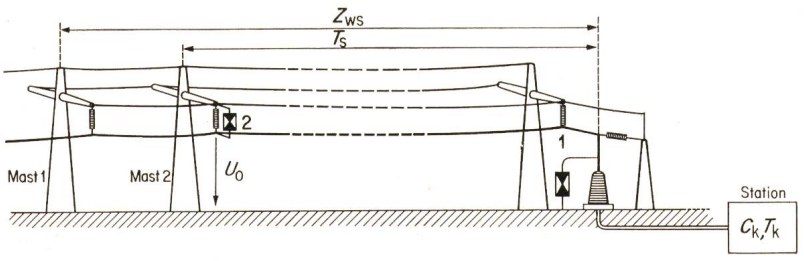
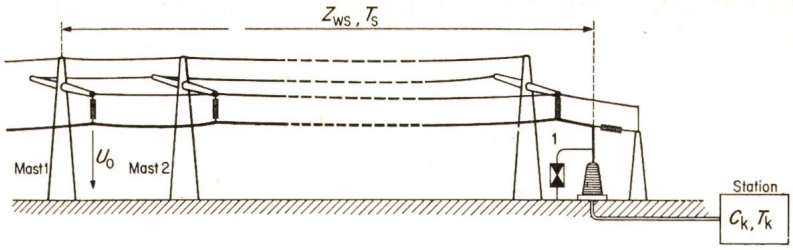


Fig. 1
Schutz einer gekapselten Station durch eine Schutzzone und zwei Sätze von Überspannungsableitern (*1* und *2*)

U_0	Summe der Restspannung des Ableiters 2 und der Scheitelwerte der Spannungsabfälle am Mast 2 und an seiner Erdelektrode während der Front der ersten Welle
Z_{WS}	Wellenwiderstand der Freileitung in der Schutzzone
T_S	Laufzeit der Wellen zwischen den beiden Ableitern
C_k	Summe der Erdkapazitäten der Kabel, gekapselten Anlagen und Transformatoren
T_k	grösste Laufzeit der vom Endverschluss ausgehenden Wellen in Kabeln und gekapselten Anlagen

Fig. 2
Schutz einer gekapselten Station durch eine Schutzzone und einen Satz von Überspannungsableitern (1) beim Stationseingang



U_0 Spannung an der Leitung beim Mast 1, bei dem ungünstigsten Blitzschlag, bei dem die Station noch sicher geschützt werden soll

T_S Laufzeit der Wellen zwischen dem Anfang der Schutzzone und dem Ableiter 1

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

$\hat{u}$ Scheitelspannung in der Station bzw. Isolationsniveau (BIL) der Anlagen

Z_{WS} Wellenwiderstand der Freileitung in der Schutzzone

L_S Induktivität des Freileitungsstückes zwischen dem Punkt mit der Spannung U_0 und dem Endverschluss des Kabels bzw. der gekapselten Anlage

C_k Erdkapazität der Kabel, gekapselten Anlagen und Transformatoren

3. Wirkung der Blitzschutz-Erdseile

Betrachtet sei vorerst der Vorgang an einem Leiterseil innerhalb der Schutzzone gemäss der Fig. 1 mit dem ungünstigsten möglichen Störungsfall, dem Einschlag eines stromstarken Blitzes mit grosser Anfangssteilheit [2]) am Einschlagspunkt unmittelbar vor dem Anfang der Schutzzone.

Durch den Mast 1 (gemäss Fig. 1 und 2) am Anfang der Schutzzone fliesst während der ersten Mikrosekunden fast der ganze Blitzstrom zur Erde. Dabei entsteht ein Spannungsabfall ähnlich der Kurve in Fig. 3. Die hohe Spannungsspitze stammt vom induktiven Spannungsabfall des Blitzstromes während seiner Anstiegsdauer. Sie kann bis 2 MV erreichen, ist aber nach 1,5 µs fast völlig abgeklungen. Man hat danach

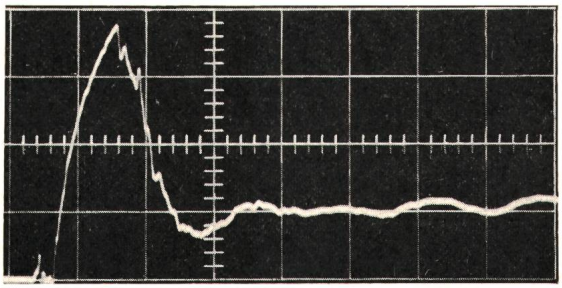


Fig. 3
Spannung am Leiterseil beim Mast 1, bei einem besonders gefährlichen Blitzschlag

nur den Ohmschen Spannungsabfall an der Erdelektrode, der im allgemeinen *wesentlich* kleiner ist [7].

Die in die Schutzzone hineinlaufende Welle hat den gleichen Verlauf wie dieser Spannungsabfall. Ihr Strom ist meist kleiner als 10 % des Blitzstromes. Für die Begrenzung dieser Welle durch den Ableiter 2 am Mast 2 genügt folglich ein verhältnismässig kleiner Ableiterstrom.

Die Spannungsabfälle am Mast und an seiner Erdelektrode sind folglich meist wesentlich kleiner als die Ableiterrestspannung. Die resultierende Spannung am Leiterseil darf deshalb in brauchbarer Näherung durch eine angenommene konstante Spannung U_0 approximiert werden. Man befindet sich dabei auf der sicheren Seite, wenn für U_0 die Summe des Nennwertes der Ableiterrestspannung und des Scheitelwertes der Spannungsabfälle am Mast 2 und an seiner Erdelektrode während der Front der ersten Wanderwelle eingesetzt wird.

Bei Anlagen mit Nennspannungen von 123...420 kV liegen die so bestimmten Werte von U_0 zwischen 105 und 150 % des Nennwertes der Ableiterrestspannung. Der oberen Grenze (150 %) entsprechen dabei niedrige Nennspannungen, hohe Masten und Erdungen mit Überspannungswiderständen $> 10\ \Omega$, der unteren (105 %) die umgekehrten Bedingungen.

Fehlt der Ableiter 2 am Mast 2, so hat man die Schaltung in Fig. 2. Auch hier, wie bei der Schaltung in Fig. 1 wird die Spannung U_0 als konstant angenommen. Die dadurch bedingten Vernachlässigungen sind ziemlich gross. Die Spannung U_0 ist gleich dem Spannungsabfall des Blitzstromes an Mast und Erdelektrode. Dieser Spannungsabfall schwankt stärker als die Spannung am Ableiter 2 in der Schaltung von Fig. 2 (siehe Beispiel in Fig. 3). Die Unsicherheiten bei der Berechnung sind dementsprechend grösser.

Für beide Schutzschaltungen lassen sich somit die Überspannungen anhand der gleichen Ersatzschaltung berechnen (Fig. 4). Alle in diesem Abschnitt besprochenen Vereinfachungen sind in ihr berücksichtigt.

4. Das Verhalten der Station vor dem Ansprechen der Ableiter

Anhand der Ersatzschaltung in Fig. 4 sei nun das Verhalten des ganzen, aus Station und Schutzzone bestehenden Komplexes berechnet. Zunächst sei dabei der erste Teil des Vorgangs betrachtet, also die Spannung vor dem Ansprechen des Ableiters 1.

Entscheidende Bedeutung hat in diesem Vorgang die Art der Berechnung und der Reflexion der Wandlerwellen [8]. Wie sich diese im resultierenden Vorgang auswirken, ist im Abschnitt 8 gezeigt. Vor dem Ansprechen des Ableiters 1 weichen die exakt berechneten Spannungskurven nur wenig ab von den Spannungskurven, die anhand von einfachen Ersatz-

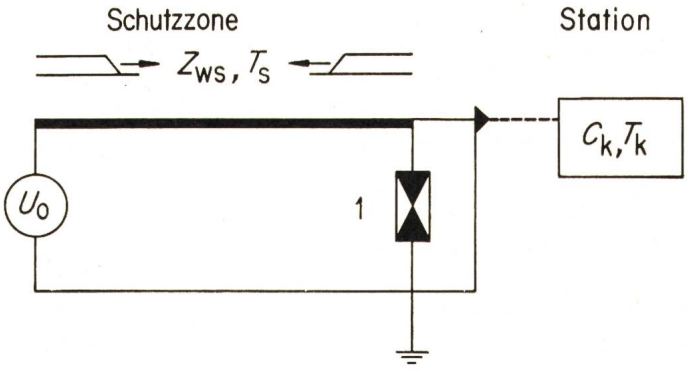


Fig. 4
Ersatzschaltung der Schutzzone mit der Station
Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 2

[2]) Angenommen ist dabei ein zweiter oder folgender Teilblitz eines negativen Abwärtsblitzes [1]. Dieser hat eine Anstiegsdauer von weniger als 1 µs, eine Steilheit von maximal 80 kA/µs und einen Scheitelwert von maximal 60 kA.

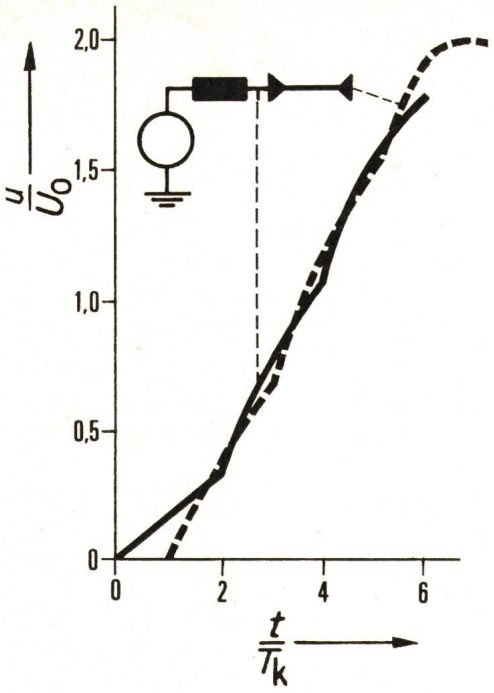


Fig. 5
Spannungsverlauf an den beiden Enden eines ungeschützten Kabels bei $Z_{ws}T_sC_k/T^2_k = 5$
u Spannungsverlauf am Ableiter 1
t Zeitvariable
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 2

schaltungen mit konzentrierten Kapazitäten und Induktivitäten ermittelt sind. Man erkennt dies anhand der Spannungskurven an den Enden eines ungeschützten Kabels in Fig. 5. Diese sind unter Berücksichtigung der Wandlerwellenvorgänge im Kabel berechnet. Sie weichen nur wenig voneinander ab und sind demnach auch ähnlich den Kurven bei der Annahme einer konzentrierten Kabelkapazität.

Bis zum Zeitpunkt T_1 des Ansprechens des Ableiters 1 am Kabelende dürfen daher Kabel, gekapselte Schienen und Transformatoren als konzentrierte Kapazität betrachtet werden. Bis zu diesem Zeitpunkt darf demnach mit der vereinfachten Ersatzschaltung in Fig. 6 gerechnet werden. Darin sind die Erdkapazitäten aller Kabel, Transformatoren und gekapselten Anlagen in einer konzentrierten Kapazität C_k zusammengefasst berücksichtigt, unter Vernachlässigung aller zwischen ihnen liegenden Induktivitäten.

Mit dieser Ersatzschaltung (Fig. 6) erhält man in zwei Bereichen ein verschiedenartiges Verhalten. Ist die doppelte Laufzeit $2\,T_s$ kleiner als die Anstiegsdauer T_1, so beeinflussen die am Anfang der Schutzzone reflektierten Wellen die Spannung an den Kapazitäten C_k. Ist die doppelte Laufzeit $2\,T_s$ dagegen grösser, so hat man bis zum Ansprechen des Ableiters 1 nur eine einzige zur Station laufende Welle. Die dadurch bedingten Zusammenhänge zeigt Tabelle I.

Gemäss Tabelle I ist der Rechenwert der Wellenlaufzeit T_s':

$$\begin{aligned} T_s' &= T_s \qquad \text{wenn } 2\,T_s \leqq T_1 \\ T_s' &= \frac{1}{2}\,T_1 \qquad \text{wenn } 2\,T_s > T_1 \end{aligned} \tag{1}$$

5. Berechnung der Spannung vor dem Ansprechen der Ableiter 1

Vor dem Ansprechen der Ableiter 1 gilt die Ersatzschaltung in der Fig. 7 mit der Erdkapazität C_k der Station und der

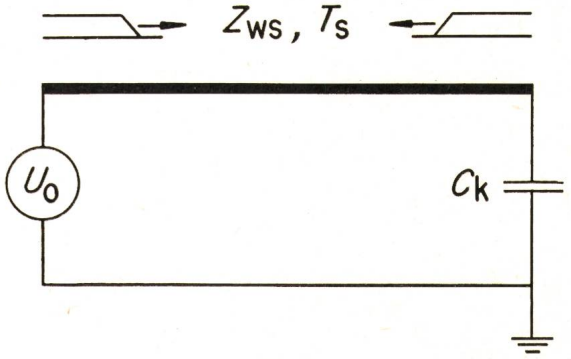


Fig. 6
Ersatzschaltung vor dem Ansprechen des Ableiters 1
Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 2

Induktivität L_s des Leitungsstückes. Die Spannung $u(t)$ an der Station wird anhand dieser Ersatzschaltung berechnet durch Aufstellen und Lösen der zugehörigen Differentialgleichung

Rechenwert der Laufzeit in der Freileitung T'_s in der Ersatzschaltung gemäss Fig. 7 bei verschiedener Anstiegsdauer der Spannung am Kabel T_1

Tabelle I

Verhältnis Laufzeit zu Anstiegsdauer	Einfluss der Wellenreflexionen an der Freileitung auf die Überspannung	Rechenwert der Wellenlaufzeit T_s', massgeblich für Induktivität $L_s = Z_{ws}T_s'$ in der Ersatzschaltung von Fig. 7	Begründung
$2\,T_s < T_1$	Wellenreflexionen am Ableiter 2 bzw. am Erdüberschlag (Spannung U_0) und an der Kapazität C_k beeinflussen den Anstieg der Spannung $u(t)$	$T_s' = T_s$ (T_s = Laufzeit am Freileitungsstück zwischen dem Kabel und dem Mast mit der Spannung U_0)	Zusätzliche, im Punkt mit der Spannung U_0 reflektierte Wellen erreichen das Kabel
$2\,T_s = T_1$	Die erste an der Kapazität C_k reflektierte Welle erreicht nach Reflexion am Ableiter 2 bzw. an einem Erdüberschlag den Kabelendverschluss zur Zeit des Ansprechens des Ableiters 1	$T_s' = T_s = T_{sm}$ (Rechenwert der Laufzeit erreicht seinen oberen Grenzwert $T_s' = T_{sm}$)	Grenzfall, in dem noch die gleichen Formeln verwendet werden dürfen wie bei $2\,T_s < T_1$ (Zulässig aufgrund der in Abschnitt 8 beschriebenen Kontrollversuche)
$2\,T_s > T_1$	Wellenreflexionen an der Freileitung beeinflussen den Anstieg der Spannung $u(t)$ nicht	$T_s' = T_{sm}$ (T_s' ist gleich dem oberen Grenzwert T_{sm} von T_s)	Die Spannung $u(t)$ ist gleich wie im Grenzfall $2\,T_s = T_1$, nachdem vor dem Ansprechen des Ableiters 1 nur die erste Welle am Kabel eintrifft (gleich wie im Grenzfall $T_s' = T_{sm}$)

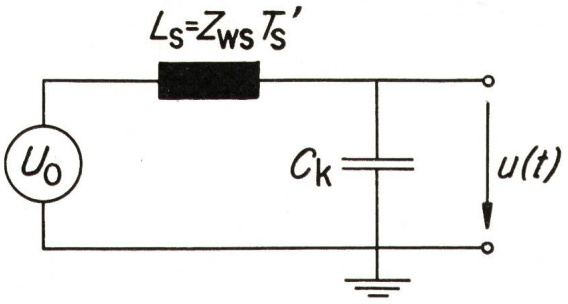


Fig. 7
Vereinfachte Ersatzschaltung für die Berechnung des Spannungsanstieges vor dem Ansprechen des Ableiters 1
Bezeichnungen siehe Fig. 1, 2 und 5

mit verschwindenden Anfangswerten zur Zeit $t = 0$, also mit der Formel

$$u(t) = U_0 (1 - \cos \omega t) \tag{2}$$

mit der Kreisfrequenz

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_s C_k}} \tag{3}$$

Den Wert von L_s berechnet man darin aus dem Wellenwiderstand Z_{ws} der Freileitung und aus dem Rechenwert der Wellenlaufzeit T_s' [s. Gl. (1)] mit Hilfe der Formel

$$L_s = Z_{ws} T_s' \tag{4}$$

Die Anstiegsdauer T_1, nach welcher die Spannung $u(t)$ den Ansprechwert der Ableiter U_{as} erreicht, berechnet man durch Einsetzen der Werte gemäss den obenstehenden Formeln in die Gleichung:

$$u(T_1) = U_{as}$$

Man erhält somit die Formel:

$$T_1 = \sqrt{Z_{ws} T_s' C_k} \arccos \left(\frac{U_0 - U_{as}}{U_0} \right) \tag{5}$$

Die Wellenlaufzeit T_s' kann in dieser Formel zwei Werte haben, wie anhand von Gl. (1) zu erkennen ist. Ihr Wert muss daher ermittelt werden, bevor die Überspannungen berechnet werden können. Dies geschieht durch Berechnung des Grenzwertes T_{sm} des Rechenwertes der Wellenlaufzeit T_s'. Gemäss Tabelle I ist dieser definiert als Grenzwert von T_s, im Grenzfall $2\ T_s = T_1$. Man berechnet diesen Grenzwert T_{sm} durch Einsetzen der Werte

$$T_1 = 2\ T_{sm} \qquad T_s' = T_{sm}$$

in Gl. (5) und durch Auflösen nach T_{sm}. Man erhält so die Formel:

$$T_{sm} = \frac{1}{4} Z_{ws} C_k \arccos^2 \left(\frac{U_0 - U_{as}}{U_0} \right) \tag{6}$$

Gl. (1) lässt sich damit anschreiben in der Form:

$$\begin{aligned} T_s' &= T_s \qquad \text{wenn } T_s \leqq T_{sm} \\ T_s' &= T_{sm} \qquad \text{wenn } T_s > T_{sm} \end{aligned} \tag{7}$$

6. Überspannungen nach Ansprechen des Ableiters 1

Berechnet sei nun die höchste Scheitelspannung $\hat{u}$ im Innern der Station durch Überlagerung des zusätzlichen, vom Ansprechen des Ableiters 1 hervorgerufenen Vorgangs über die ursprüngliche Spannungskurve gemäss Gl. (2).

Anfangs besteht der zusätzliche Vorgang allein aus der ersten Welle, welche durch das Ansprechen des Ableiters 1 am betrachteten Leiter hervorgerufen wird. Die Steilheit dieser Welle ist entgegengesetzt gleich der Anstiegssteilheit der ursprünglichen Spannung $u(t)$, da die resultierende Spannung am Ableiter nur wenig von der Stärke des abgeleiteten Stromes abhängt, also praktisch konstant ist.

Die Laufzeit der Welle bis zu dem am weitesten entfernten Ende der Station sei T_k. Sie lässt sich anhand des Schaltschemas der Station einfach bestimmen und darf als bekannt vorausgesetzt werden. Während ihrer Dauer hat das Ansprechen des Ableiters noch keinen Einfluss auf die Spannung am Stationsende. Diese erreicht folglich den Wert $u(T_1 + T_k)$. Dieser Wert ist zugleich identisch mit der höchsten innerhalb der Station auftretenden Scheitelspannung $\hat{u}$, da nach dem Eintreffen der ersten zusätzlichen Welle die Spannung sofort abfällt oder wenigstens nicht mehr nennenswert ansteigt.

Dies ergibt sich aus folgenden Überlegungen: Besteht die Station aus einer einzelnen Schiene, so kompensiert die erste vom Ableiter 1 ausgehende Welle den ursprünglichen Spannungsanstieg. Am offenen Ende wird diese Welle reflektiert. Es tritt hier also eine neue Welle hinzu, was zu einem Abfallen der resultierenden Spannung mit einer zum ursprünglichen Spannungsanstieg entgegengesetzten Steilheit führt. Auch an Stationen mit mehreren Schienen können keine höheren Spannungen auftreten. Das Wellenspiel bewirkt auch an ihnen eine Begrenzung der Überspannungen auf den berechneten Wert. In der nachfolgenden Schwingung wird der Spannungswert $u(T_1 + T_k)$ meist nicht mehr erreicht. Wird er ausnahmsweise doch überschritten, so bleibt die Überschreitung äusserst klein, wie die im Abschnitt 8 beschriebenen Kontrollversuche zeigen. Es ist daher:

$$\hat{u} = u(T_1 + T_k) = U_0 [1 - \cos \omega (T_1 + T_k)] \tag{8}$$

Für die praktische Berechnung werden in dieser Formel für die Kreisfrequenz ω und die Anstiegdauer T_1 die Ausdrücke gemäss den Gl. (3) und (5) eingesetzt. Die Funktion $\sin \omega T_k$ und $\cos \omega T_k$ werden näherungsweise ersetzt durch die ersten Glieder ihrer Reihenentwicklungen, gemäss den Ansätzen:

$$\begin{aligned} \sin \omega T_k &\approx \omega T_k \\ \cos \omega T_k &\approx 1 \end{aligned} \tag{9}$$

Mit einigen Umformungen erhält man so die Formel:

$$\hat{u} = U_{as} + U_0 T_k \sqrt{\frac{1}{Z_{ws} T_s' C_k}} \sqrt{\frac{U_{as}}{U_0} \left(2 - \frac{U_{as}}{U_0} \right)} \tag{10}$$

Diese lässt sich einfach anwenden, da alle darin vorkommenden Grössen unmittelbar aus den Anlagedaten bestimmt werden können.

Ist das Isolationsniveau der Station festgelegt, also die maximal zulässige Scheitelspannung $\hat{u}$ vorgegeben, so kann die erforderliche Laufzeit innerhalb der Schutzzone T_s berechnet werden. Dazu bestimmt man zunächst aus der Gl. (10) den erforderlichen Wert von T_s'. Danach überprüft man, ob sich unter den angenommenen Bedingungen überhaupt ein ausreichender Schutz erzielen lässt. Gemäss dem Ansatz (7) muss dazu $T_s \leqq T_{sm}$ gelten, da nur in diesem Fall die modifizierte Laufzeit T_s' mit der wirklichen Laufzeit identisch ist,

während andernfalls keine Lösung existiert. Es müssen demnach die beiden folgenden Ungleichungen erfüllt werden:

$$T_s \geqq \frac{U_{as}\,(2\,U_0 - U_{as})}{(\hat{u} - U_{as})^2} \cdot \frac{T_k^2}{Z_{ws}\,C_k} \leqq T_{sm} \qquad (11)$$

Ist dabei die rechte Bedingung nicht erfüllt, so muss das Verhalten der Station verbessert werden. Einerseits ist dies möglich durch Senken der Werte von U_0 und U_{as}. Anderseits kann aber auch die zulässige Scheitelspannung $\hat{u}$ erhöht werden, durch Heben des Isolationsniveaus der Station.

7. Der Einfluss der betriebsfrequenten Wechselspannung

Bisher wurde angenommen, dass die Leitung im Augenblick des Blitzschlages völlig entladen ist. In grober Näherung ist dies sicher zulässig. Eine Berücksichtigung der betriebsfrequenten Wechselspannung erhöht aber doch die erzielbare Genauigkeit. Es genügt dafür die Annahme einer Aufladung der Leitung auf eine konstante Gleichspannung, da sich die Wechselspannung während der Dauer der Überspannung nur unmerklich ändert.

Im ungünstigsten Fall hat man eine Aufladung auf den Scheitelwert der Wechselspannung $-\hat{u}_w$ mit zur Überspannung entgegengesetzter Polarität. Den Einfluss dieser Aufladung überblickt man anhand von Fig. 8. Der Einschwingvorgang wird angeregt durch einen um den Wert $\hat{u}$ erhöhten Spannungssprung $U_0 + \hat{u}_w$ am Mast 1. Anderseits ist die Station anfangs aufgeladen auf die Spannung $-\hat{u}$. Der Ableiter 1 spricht demnach erst an, nachdem sich die Spannung um den Betrag $U_{as} + \hat{u}_w$ geändert hat. ($\hat{u}_w$ bei Abführen der ursprünglichen Aufladung, U_{as} bei der anschliessenden Aufladung auf die Ansprechspannung.)

Für die auf $-\hat{u}_w$ geladene Station lässt sich demnach der Spannungsverlauf ebenfalls mit den bereits abgeleiteten Formeln berechnen. Die Spannungswerte müssen dafür in allen Formeln durch transformierte Werte ersetzt werden, nämlich die Werte $U_0' = U_0 + \hat{u}_w$, $U_{as} = U_{as} + \hat{u}_w$, $\hat{u}_w' = \hat{u} + \hat{u}_w$. Der Grenzwert der Laufzeit T_{sm} steigt dabei auf den Wert:

$$T_{sm} = \frac{1}{4} Z_{ws}\,C_k \arccos^2\left(\frac{U_0 - U_{as}}{U_0 + \hat{u}_w}\right) \qquad (12)$$

Die maximale Überspannung $\hat{u}$ erreicht den erhöhten Wert:

$$\hat{u} = U_{as} + (U_0 + \hat{u}_w)\,T_k \sqrt{\frac{1}{Z_{ws}\,T_s'\,C_k}} \sqrt{\frac{U_{as} + \hat{u}_w}{U_0 + \hat{u}_w}} \sqrt{\left(2 - \frac{U_{as} + \hat{u}_w}{U_0 + \hat{u}_w}\right)} \qquad (13)$$

Die beiden Ungleichungen (11) für die Berechnung der erforderlichen Laufzeit in der Schutzzone erhalten damit die Form:

$$T_s \geqq \frac{(U_{as} + \hat{u}_w)\,(2\,U_0 - U_{as} + \hat{u}_w)}{(\hat{u} - U_{as})^2} \cdot \frac{T_k^2}{Z_{ws}\,C_k} \leqq T_{sm} \qquad (14)$$

Im übrigen gilt auch hier das im Abschnitt 6 Gesagte.

8. Grenzen des Anwendungsbereiches

Bei der Entwicklung der Schutzschaltung wurden verschiedene Annahmen gemacht und Vernachlässigungen vorgenommen. Diese seien nun zusammengestellt und im Hinblick auf ihre Zulässigkeit geprüft.

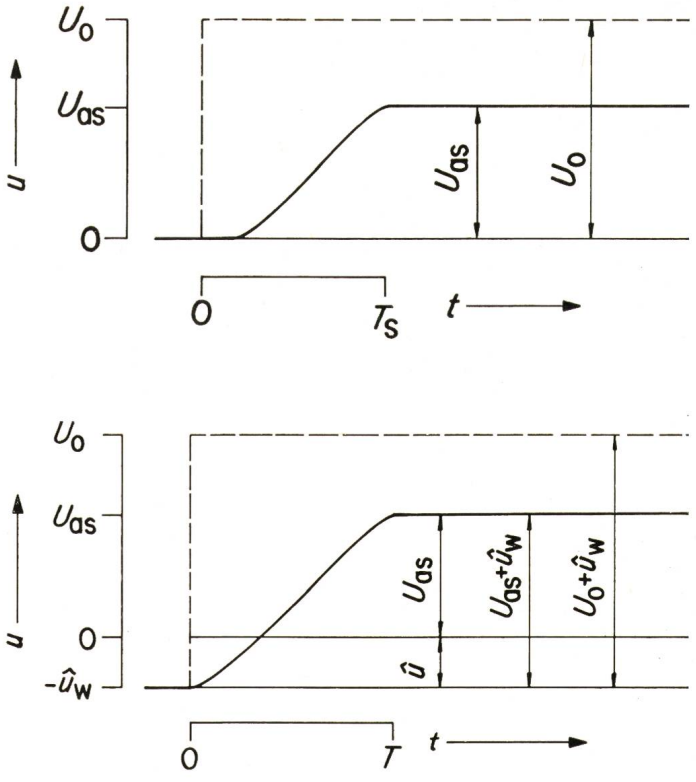


Fig. 8
Einfluss des Momentanwertes der Wechselspannung $\hat{u}_w$ zur Zeit des Blitzschlages

a bei Blitschlag in ungeladene Leitungen [Gl. (6)...(11)]
b bei Blitzschlag in Leitungen mit Aufladung auf den negativen Scheitelwert der Wechselspannung $-\hat{u}_w$ [Gl. (12)...(14)]
– – – anregende Spannung U_0
——— Spannung am Ableiter 1 $u(t)$
U_{as} Ansprechspannung des Ableiters 1
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1, 2 und 5

Die Berechnung ist aufgebaut auf der Berücksichtigung der folgenden grundsätzlichen Zusammenhänge:

a) Der Wellenwiderstand von gekapselten Schienen und/oder von Kabeln Z_{wk} hat nur einen Bruchteil des Wertes des Wellenwiderstandes Z_{ws} einer Freileitung. Beim Eintreten einer Wanderwelle von einer Freileitung in eine solche Anordnung sinken deshalb die Amplitude und die Steilheit der Wellenspannung auf einen Bruchteil ihres ursprünglichen Wertes.

b) Solange kein Ableiter anspricht, bleiben die Spannungsdifferenzen innerhalb von Station und Kabel sehr klein, da sich von den in beiden Richtungen laufenden Wellen die Wirkungen der Laufzeit im Mittel aufheben.

Mit den folgenden Annahmen befindet man sich immer auf der sicheren Seite:

a) Am vorgelagerten Ableiter 2 wird eine konstante plötzlich einsetzende Spannung angenommen, also eine Spannung mit der grössten denkbaren Anstiegssteilheit. Ihr Wert U_0 wird dem Scheitelwert der Spannung am Leiterseil während der ersten Welle bei dem ungünstigsten möglichen Blitzschlag gleichgesetzt. In den meisten Fällen ist dies die höchste mögliche Scheitelspannung.

b) Bei der Berechnung des Vorganges vor dem Ansprechen des Ableiters 1 wurden die Erdkapazität des Freileitungsstückes in der Schutzzone und die Induktivitäten innerhalb der Station vernachlässigt.

Die übrigen Annahmen und Vernachlässigungen führen zu verschiedenen, teils positiven und teils negativen Verfälschungen:

c) Es wird angenommen, dass in der Station die höchste Spannung an dem vom Ableiter 1 am weitesten entfernten Ende auftritt, unmittelbar vor dem Eintreffen der ersten, vom Ableiter ausgehenden Zusatzwelle.

d) Glieder der Grössenordnung von $T_k^2/Z_{ws}T_s'C_k$ wurden gegen 1 vernachlässigt.

Eine theoretische Abschätzung der resultierenden Verfälschungen ist kaum möglich, da die Anzahl der vorgenommenen Vereinfachungen sehr gross ist. Die Formeln wurden deshalb durch Messungen am Anlagemodell [9], im ganzen möglichen Anwendungsbereich, bei Bedingungen

$$4 \leqq Z_{ws}C_k/T_k \leqq 25$$

$$0{,}2 \leqq T_s/T_k \leqq 5{,}0$$

$$1{,}0 \leqq U_0/U_{as} \leqq 2{,}0$$

überprüft.

Bei extrem steilen Wellen lagen die Messwerte meist zwischen dem 0,94...0,99fachen, in allen Fällen zwischen dem 0,89...1,02fachen der mit der Formel (10) berechneten Werte. Bei kleiner Steilheit der Wellen lagen die Werte meist um 0...2 %, gelegentlich auch um 2...6 % tiefer.

Bei der Anwendung der Formeln (10)...(14) befindet man sich folglich meist auf der sicheren Seite. Alle beobachteten Überschreitungen der berechneten Scheitelspannungen sind äusserst klein, also praktisch bedeutungslos.

9. Anwendungsbeispiel

Eine 245-kV-Station mit einer SF_6-isolierten gekapselten Schiene soll mit der Schutzschaltung gemäss der Fig. 1 gegen Blitzüberspannungen geschützt werden. Die erforderliche Mindestlaufzeit der Wellen zwischen den beiden Ableitersätzen soll berechnet werden.

Die Station hat ein Isolationsniveau (BIL) von 825 kV. Die Schiene hat eine Erdkapazität $C_k = 0{,}033$ µF und eine Länge von 600 m, also eine Laufzeit von $T_k = 2$ µs. Sie endet an einer Stelle bei einem offenen Schalter; am anderen Ende ist sie an eine Freileitung angeschlossen mit dem Wellenwiderstand von $Z_{ws} = 380\ \Omega$. Die Ableiter haben eine Ansprechspannung von $U_{as} = 550$ kV. Die Gegend ist gebirgig mit einem schlecht leitenden Erdboden. Es werden hohe Leitungsmasten benötigt und es muss mit hohen Übergangswiderständen der Erdungen gerechnet werden. Dementsprechend sei ein hoher Wert von $U_0 = 750$ kV angenommen. Betrachtet seien dabei die ungünstigsten Bedingungen, mit einer Aufladung der ganzen Anlage auf den Scheitelwert der Wechselspannung $\hat{u}_w$.

Der Grenzwert T_{sm} der Laufzeit gemäss Gl. (12) ist mit diesen Werten:

$$T_{sm} = \frac{1}{4} \cdot 380 \cdot 0{,}033 \arccos^2\left(\frac{750 - 550}{750 + 200}\right) 10^{-6} =$$

$$= 3{,}13 \arccos^2(0{,}210) \cdot 10^{-6} = 5{,}8\ \mu s$$

Die beiden Bedingungen in Gl. (14) haben damit die Form:

$$T_s = \frac{(550 + 200)(1500 - 550 + 200)\,2^2}{(825 - 550)^2\,380 \cdot 0{,}033} 10^{-6} = 3{,}6\ \mu s \leqq T_{sm}$$

Die rechte Bedingung ist mit dem obenstehenden Wert von T_{sm} erfüllt. Die Station ist folglich ausreichend geschützt mit einer Laufzeit von mehr als 3,6 µs zwischen den Ableitersätzen 1 und 2. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen in der Freileitung etwa 300 m/µs ist, entspricht dem ein Mindestabstand von $3{,}6 \cdot 300 = 1080$ m. Die Schutzzone muss noch um eine Spannweite von mindestens 150 m länger sein.

10. Schlussfolgerungen

a) Für den Blitzschutz von gekapselten Anlagen und Transformatoren mit direkt eingeführten Kabeln oder SF_6-isolierten Schienen, mit weniger als 1000...2000 m Länge, genügen Massnahmen an der Freileitungsseite der Kabel bzw. der SF_6-isolierten Schienen. Bei jedem freileitungsseitigen Endverschluss benötigt man dazu je einen Überspannungsableiter. Ausserdem müssen alle Freileitungen in einer davorliegenden Schutzzone gegen Blitzschläge in die Leiterseile und gegen rückwärtige Überschläge von den Masten zu den Leiterseilen geschützt werden. Erforderlich dafür sind mehrere Erdseile, niedrige Masten mit kleinen Induktivitäten und niederohmige Erdungen.

b) Mit einem zusätzlichen Ableitersatz 2 am ersten Mast hinter dem Anfang der Schutzzone gemäss Fig. 1 erzielt man auch bei den ungünstigsten Blitzschlägen einen sicheren Schutz der Anlage. Die Überspannungen hängen bei Einbau dieses Ableitersatzes nur mehr wenig ab von der Steilheit und der Amplitude des Blitzstromes bzw. der von der Freileitung kommenden Wellen und vom Einschlagpunkt des Blitzes.

c) Der Überspannungsschutz der gekapselten Anlagen kann aufgrund von einfachen Formeln dimensioniert werden. Diese Formeln wurden anhand von vereinfachten Ersatzschemata abgeleitet. Nachmessungen am Anlagemodell ergaben gute Übereinstimmung mit der Rechnung.

—

Der Verfasser dankt der Sprecher & Schuh AG, Aarau, für die Gelegenheit zu den dieser Arbeit zugrunde liegenden Untersuchungen und *Th. Heinemann* für Anregungen und Vorschläge.

Literatur

[1] *K. Berger* und *E. Vogelsanger:* Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1963 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 56(1965)1, S. 2...22.

[2] *H. Stephanides:* Wir helfen Ihnen beim Problem «Wo baut man Ableiter ein?» Eine Wegleitung für den Einbau von Überspannungsableitern in Mittelspannungsanlagen mit Kabeleinführung bis 52 kV. Aarau, Sprecher und Schuh AG, 1968.

[3] *M. Christoffel, E. Fischer* und *G. Hosemann:* Überspannungsschutz von Transformatoren mit direkt eingeführtem Kabel bei Blitzeinschlag in die vorgelagerte Freileitung. ETZ-A 83(1962)23, S. 761...772.

[4] *J. A. Giaro:* Surtensions aux extrémités d'un câble raccordé à une ligne aérienne frappée de coups de foudre au-delà de la zone critique. Rapport CIGRE No. 310, 1964.

[5] *A. S. Beliaev* e. a.: Protection contre la foudre des postes de tension supérieure ou égale à 220 kV. Rapport CIGRE No. 33-11, 1970.

[6] *J. Raimbault* e. a.: L'alimentation en énergie électrique des grandes agglomérations et le matériel blindé pour réseaux à 225 kV. Rapport CIGRE No. 136, 1966.

[7] *H. V. Stephanides* und *E. Eichenberger:* Überspannungen an Generatoren in Blockschaltung und Massnahmen zu ihrer Begrenzung. Bull. SEV 61(1970)1, S. 2...7.

[8] *A. Roth*: Hochspannungstechnik. 4. Auflage. Wien, Springer-Verlag, 1959.

[9] *H. Stephanides:* Lösung von Überspannungsschutzproblemen durch Anlagemodelle. Bull. SEV 55(1964)6, S. 256...260.

Adresse des Autors:
H. V. Stephanides, Sprecher & Schuh AG, 5036 Oberentfelden.