Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 61 (1970)

Heft: 1

Artikel: Überspannungen an Generatoren in Blockschaltung und Massnahmen zu ihrer Begrenzung

Autor: Stephanides, H.V. / Eichenberger, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915893

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: 09.07.2025

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

Überspannungen an Generatoren in Blockschaltung und Massnahmen zu ihrer Begrenzung

Von *H. V. Stephanides*, Aarau, und *E. Eichenberger*, Baden

441-452

621.313.12.015.38

In einem Kraftwerk wurden die Überspannungen an Generatoren in Blockschaltung bei Blitzschlägen untersucht. Die Blitzschläge wurden bei kleiner Spannung nachgebildet, die Überspannungen in der Anlage oszillographiert. Dabei zeigte sich, dass eine mittelfrequente Schwingung am Generator gefährliche Amplituden erreichen kann. Bei Naheinschlägen wird diese Schwingung zweimal angeregt, einmal durch den Frontanstieg, das zweitemal durch einen Spannungszusammenbruch. Dies kann zu einer Verdoppelung der Amplitude führen. Die Begrenzung dieser Schwingung kann durch Überspannungsableiter zwischen den Phasen im Generatorkreis erfolgen. Bei einer Kabelverbindung zum Generator genügen diese Ableiter. Bei einer Schienenverbindung können auch die Ladeströme der Streukapazitäten des Transformators zu Spannungsabfällen am Generator führen. Man kann diese durch Ableiter zwischen den generatorseitigen Transformatorklemmen und der Erde begrenzen.

Dans une usine génératrice, on a étudié les surtensions d'origine atmosphériques à des alternateurs directement couplés aux transformateurs. Les coups de foudre furent simulés sous faible tension et les surtensions dans l'installation enregistrées oscillographiquement. Une oscillation à moyenne fréquence peut atteindre des amplitudes dangereuses pour l'alternateur. Lors d'impacts à proximité de l'installation, cette oscillation est doublement excitée par l'accroissement du front et par une annulation de la tension, l'amplitude pouvant être deux fois plus grande. Cela peut être limité par des parafoudres entre phases dans le circuit de l'alternateur, ce qui suffit lorsqu'il est relié par un câble. Dans le cas d'une liaison à des barres, les chutes de tension à l'alternateur, dues aux courants de charge des capacités parasites du transformateur, peuvent être limitées par des parafoudres entre bornes du transformateur côté alternateur et terre.

1. Einleitung

An Generatoren und Motoren, die in Blockschaltung über Transformatoren an Freileitungen angeschlossen sind, treten bei Blitzschlägen gelegentlich Defekte auf [1] [1]). Die Folge davon sind Betriebsunterbrüche, die schwerwiegende Folgen haben können. Schutzmassnahmen gegen die auftretenden Überspannungen sind deshalb unumgänglich notwendig. Über die Art und das Ausmass der erforderlichen Massnahmen herrscht aber vorläufig noch Unklarheit, da die Vorgänge trotz verschiedener Untersuchungen [2; 3; 4; 5] noch nicht voll abgeklärt sind.

Im Auftrage der Kraftwerke Zervreila AG wurden deshalb im Kraftwerk Safien Versuchsreihen durchgeführt, bei denen die Überspannungen bei verschiedenen Blitzschlägen und unter verschiedenen Bedingungen oszillographiert wurden. Die Blitzschläge wurden dabei mit Hilfe eines speziellen Keilwellengenerators [6] bei niedrigen Spannungen simuliert, mit einer Nachbildung von Ferneinschlägen in speisende 50- und 150-kV-Leitungen und von Naheinschlägen in die 50-kV-Leitung. Die Transformatoren hatten zwei in Stern geschaltete Hochspannungswicklungen und eine in Dreieck geschaltete generatorseitige Wicklung (übliche Schaltgruppe bei Blockschaltungen). Die Bedingungen innerhalb der Anlage wurden vielfach variiert.

Das grundsätzliche Verhalten blieb dabei immer gleich. Auch in anderen Anlagen mit Transformatoren mit gleicher Schaltgruppe sind deshalb ähnlich verlaufende Vorgänge zu erwarten. Der Mechanismus dieser Vorgänge lässt sich anhand von verhältnismässig einfachen Ersatzschaltungen überblicken.

Die mit Abstand gefährlichste Spannungskomponente [7] stammt von mittelfrequenten Schwingungen des aus der Induktivität des Transformators und den Erdkapazitäten bestehenden Kreises. Wie die Versuche zeigten, wird diese Komponente bei Naheinschlägen zweimal angeregt. Es überlagern sich dadurch zwei Schwingungen mit den gleichen Frequenzen, was unter ungünstigen Umständen zu einer Verdoppelung der Spannung am Generator führen kann. Weitere Schwingungen mit höheren Frequenzen werden durch die Ströme in den Streukapazitäten des Transformators hervorgerufen [7]. Bei einer Kabelverbindung zum Generator werden die zugehörigen Ströme durch die Kabelkapazität zur Erde abgeleitet. Bei Verbindung über eine Schiene können sie gewisse Spannungsabfälle am Generator hervorrufen. Dies wird anhand von einigen ausgewählten Oszillogrammen erläutert, wobei auch die erforderlichen Schutzmassnahmen diskutiert werden.

Ein guter Schutz des Generators lässt sich einfach erzielen. Man benötigt dazu in erster Linie einen Satz von Überspannungsableitern zwischen den Phasen der Verbindungsleitung zwischen dem Transformator und dem Generator. Es ist dabei jede beliebige Aufstellung zulässig, da die Schutzwirkung dieser Ableiter vom Aufstellungsort praktisch unabhängig ist.

Ein über Kabel angeschlossener Generator ist mit diesen Überspannungsableitern in der Schaltung von Fig. 1 in allen Fällen ausreichend geschützt. Bei einem über Schienen angeschlossenen Generator sollte dagegen die Schutzschaltung in Fig. 2 verwendet werden, mit zusätzlichen Ableitern zwischen den Transformatorklemmen und dem geerdeten Transformatorkessel.

In der Hochspannungsanlage sollte mindestens ein Satz von Überspannungsableitern eingebaut werden. Bei der Wahl der Aufstellungsorte dieser Ableiter muss nur auf den Schutz

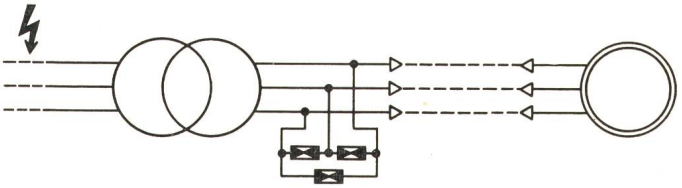


Fig. 1
Schutz eines Generators in Blockschaltung mit Kabelverbindung durch Überspannungsableiter

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

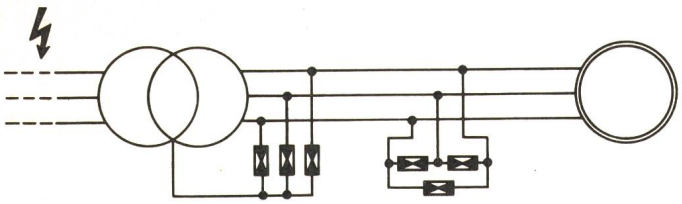


Fig. 2
Schutz eines Generators in Blockschaltung mit Schienenverbindung durch Überspannungsableiter

der Hochspannungsanlage geachtet werden. Der Schutz des Generators ist von ihnen praktisch unabhängig.

Wichtig ist auch ein möglichst weitgehender Schutz der Freileitung gegen direkte Blitzschläge und gegen rückwärtige Überschläge im Nahzonenbereich (bis zum Abstand von etwa 1000 m von der Station). Dieser lässt sich erzielen mit mehreren gut schirmenden Erdseilen, mit niederohmigen Erdelektroden und mit niedrigen, induktionsarmen Masten. Das Isolationsniveau sollte in der ganzen Schutzzone gleich sein und möglichst etwas über dem Isolationsniveau der Freileitung liegen. Eng eingestellte Funkenstrecken (Pegelfunkenstrecken) sind im Nahzonenbereich nicht zulässig, da an ihnen bevorzugt rückwärtige Überschläge auftreten.

Mit derart ausgeführten hochspannungsseitigen Zuleitungen erhält man am Generator die kleinsten Überspannungen. Dies gilt auch bei Anwendung der Schutzschaltungen Fig. 1 und Fig. 2, in denen die Ableiterströme und damit auch die Ableiterrestspannungen verhältnismässig klein bleiben.

2. Vorgänge in der Freileitung

Die Überspannungen am Generator werden durch Überspannungen an den Hochspannungsklemmen des vorgeschalteten Transformators hervorgerufen. Der Verlauf dieser Überspannungen hängt von den Bedingungen in der Hochspannungsanlage ab (Schaltzustand, Daten und Aufstellung der Ableiter, Ort und Art des Blitzschlages). Es wird daher zunächst der Spannungsverlauf an den hochspannungsseitigen Transformatorklemmen bei verschiedenen Blitzschlägen betrachtet.

Fig. 3 zeigt die vereinfachte Schaltung der Anlage. Die 150-kV-Leitung ist direkt eingeführt. Die anschliessende Schaltanlage wird durch einen Satz von Überspannungsableitern geschützt. (Aufgrund der Versuchsergebnisse wurde der Einbau eines weiteren Ableitersatzes beim Stationseingang empfohlen.) Die 50-kV-Leitung ist über ein Kabel mit der Schaltanlage verbunden. Der Schutz gegen Überspannungen erfolgt durch zwei Sätze von Ableitern, einer in der Schaltanlage beim Endverschluss des Kabels, der andere in der Nähe des Transformators. Der Generator hat eine Nennspannung von 14 kV und eine Nennleistung von 56 MVA. Mit der Hochspannungsanlage ist er über einen Dreiwicklungstransformator in Blockschaltung verbunden. Als Schaltverbindung dienen dabei 5 parallelgeschaltete, 155 m lange Kabel. Bei einem Teil der Versuche wurden diese durch eine improvisierte 130 m lange Verbindung mit kleiner Erdkapazität ersetzt.

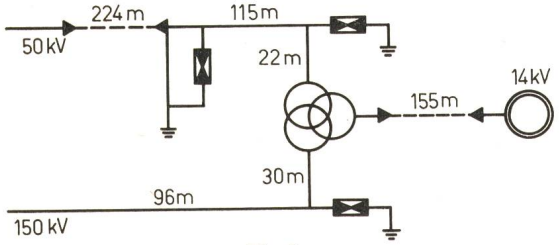


Fig. 3
Ersatzschaltung der Anlage

2.1 Von der Freileitung kommende Wanderwellen

Bei Blitzschlägen in eine Freileitung bilden sich Wanderwellen. In der Station wird die Scheitelspannung dieser Wellen auf die Restspannung der Ableiter begrenzt. An den Hochspannungsklemmen erhält man dabei Spannungskurven ähnlich dem Oszillogrammbeispiel in Fig. 4. Die Spannung

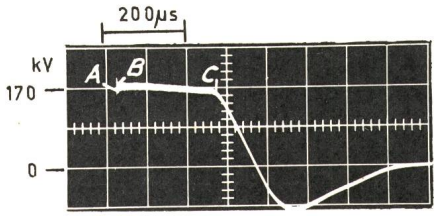


Fig. 4
Spannung an der 50-kV-Klemme eines Transformators (Phase T) bei einer einlaufenden Wanderwelle

steigt zunächst steil an, bis beim Punkt A ein Ableiter zündet. Es folgt ein Einschwingvorgang von einigen Mikrosekunden Dauer. Beim Punkt B ist dieser abgeklungen. Die Spannung behält danach noch einige Zeit den Wert der Ableiterrestspannung. Bei Verschwinden des Ableiterstromes (Punkt C) beginnt sie zu sinken. Es folgt ein Abklingvorgang, in dem auch ein Unterschwingen zu negativen Spannungswerten möglich ist.

2.2 Blitzschlag in die Freileitung nahe der Station

Ein Blitzschlag in die Freileitung kann ein Leiterseil treffen. Die Überspannung führt dann zu Erdüberschlägen an einem oder mehreren Leitungsmasten. Er kann aber auch ein Erdseil treffen. Es besteht dann die Möglichkeit von

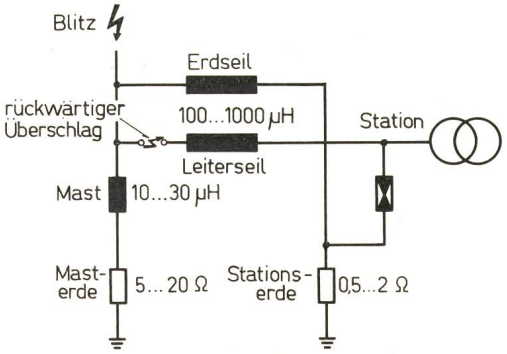


Fig. 5
Ersatzschaltung der 50-kV-Anlage bei einem rückwärtigen Überschlag an einem Leitungsmast

rückwärtigen Überschlägen zu Leiterseilen. Die Vorgänge sind in beiden Fällen ähnlich. Nur die Front hat einen andern Verlauf, was bei den betrachteten Vorgängen praktisch ohne Einfluss bleibt. Beide Fälle sollen gemeinsam diskutiert werden. Betrachtet wird der gefährlichste Fall eines Blitzschlages in der unmittelbaren Nähe der Station. Bei einem solchen Blitzschlag gilt die Ersatzschaltung gemäss Fig. 5, die den Betrachtungen zugrundegelegt werden soll.

Anfangs fliesst der grösste Teil des Blitzstromes durch den betroffenen Mast zur Erde. Dabei verursacht er Span-

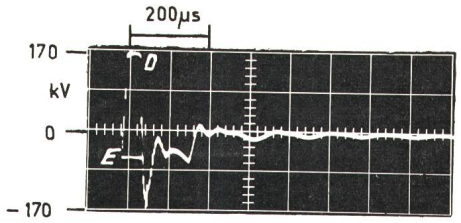


Fig. 6
Spannung an der 50-kV-Klemme eines Transformators (Phase T) bei einem rückwärtigen Überschlag an einem Leitungsmast

nungsabfälle an Mast und Erdung, welche bewirken, dass der Blitzstrom langsam zum Erdseil kommutiert und sich so über die Erdungen der Station und der andern Masten verteilt. Den derart hervorgerufenen Erdseilstrom sucht nun die Induktivität des Erdseiles weiter aufrechtzuerhalten, wenn die Stärke des Blitzstromes später wieder abnimmt. Wird dabei der Blitzstrom kleiner als der Strom im Erdseil, so wird der fehlende Stromanteil aus der Erdelektrode des betroffenen Mastes herausgesaugt. Der Erdstrom und damit auch der Spannungsabfall an der Erdelektrode ändern dabei ihre Richtung.

Das Leiterseil ist bei diesem Vorgang durch den Überschlag mit Mast und Erdseil verbunden. Die Spannung in der Station folgt deshalb in Form einer Schwingung der Spannung am betroffenen Leitungsmast. Dabei kommt es zum Ansprechen der Stationsableiter. Diese bilden zusammen mit dem Leiterseil und den Erdelektroden einen Stromkreis, in dem der Strom zunächst ansteigt, später abnimmt und schliesslich verschwindet. Fig. 6 zeigt den unter diesen Bedingungen oszillographierten Spannungsverlauf an einer Transformatorklemme. Während der ersten 40 µs verläuft die Spannung praktisch gleich wie in Fig. 4. Beim Punkt D beginnt sie plötzlich abzufallen. Innerhalb von 5 µs erreicht sie dabei einen negativen Spannungswert [2]). Nach dem Punkt E folgt eine Schwingung zwischen den Stationskapazitäten und der Leitungsinduktivität, in welcher die Spannung starke negative Werte erreichen kann. Die Kurve hat zwei aufeinanderfolgende Fronten, deren Wirkung noch näher betrachtet werden soll.

[2]) Bedingt ist dies bei technischen Ableitern durch die rasche Änderung des Spannungsabfalls am nichtlinearen Widerstand des Ableiters kurz vor dem Verschwinden des Stromes. Bei der Annahme eines idealen Ableiters ist die Frontdauer dieses Spannungsabfalles durch die Zeitkonstante bestimmt, mit welcher die Stationskapazitäten über die Freileitung entladen werden.

3. Schwingungen im Transformator—Generator-Block

Generatoren in Blockschaltung sind meist von der Freileitung galvanisch getrennt. Eine Übertragung von Überspannungen zum Generator ist deshalb nur über die Kapazitäten und Gegeninduktivitäten des Transformators möglich. Es gibt dabei zwei Gattungen von übertragenen Spannungskomponenten.

3.1 Kapazitiv-induktive Komponenten

Bei Stoßspannungen entstehen innerhalb des Transformators Eigenschwingungen, deren Verlauf vor allem von der Art und Anordnung der Transformatorwicklungen abhängt [8]. Bei diesen Schwingungen werden die Streukapazitäten zwischen der betroffenen Wicklung und Erde aufgeladen. Ein Teil der Ströme fliesst zum Generator und kann dort Überspannungen hervorrufen, in denen sich Komponenten mit verschiedenen Frequenzen überlagern. Man sieht diese Schwingungen am Anfang der Spannungskurven von Fig. 7a. Die Vorgänge sind darin durch eine Überspannung in der 150-kV-Anlage angeregt, bei einer 130 m langen kapazitätsarmen Verbindung zwischen dem Generator und dem Transformator. Die Schwingungen sind beim Transformator wesentlich stärker als beim Generator.

3.2 Induzierte Komponenten

Wie bei den Wechselspannungen werden auch bei transienten Vorgängen in den Transformatorwicklungen Spannungen induziert. Diese können ihrerseits Eigenschwingungen anregen, die sich den Spannungskurven überlagern. Es sind dies die Schwingungen mit den niedrigsten Frequenzen in den Oszillogrammen Fig. 7 und Fig. 11.

Der Mechanismus dieser Schwingungen ist kompliziert. Trotzdem wurde versucht, den Vorgang anhand einer Ersatzschaltung zu berechnen. Die Spannung u_0 an den Hochspannungsklemmen des Transformators (siehe Oszillogramm Fig. 4) wurde dabei durch eine plötzlich einsetzende konstante Spannung approximiert. Die Rückwirkung der Vorgänge innerhalb der Generatorwicklung [5] auf die Spannung an den Generatorklemmen wurde dabei vernachlässigt. Vorerst betrachte man die Ersatzschaltung in Fig. 8. Die Spannung u_0 ist darin mit dem Proportionalitätsfaktor k multipliziert. Dieser hängt ab vom Übersetzungsverhältnis und von der Schaltung des Transformators. Die Dämpfung ist bestimmt durch den Widerstand R, die Eigenfrequenz durch die Streuinduktivität L_σ, die Parallelinduktivität L_t und die Erdkapazität C_t des Transformators, die Induktivität L_s und die Erdkapazität C_s der Verbindung und die Induktivität L_g und die Erdkapazität C_g des Generators. Da im allgemeinen $L_\sigma > L_s$ ist, dürfen verschiedene Elemente dieser Ersatzschaltung zusammengezogen werden. Man erhält so die vereinfachte Ersatzschaltung gemäss Fig. 9. Die Werte

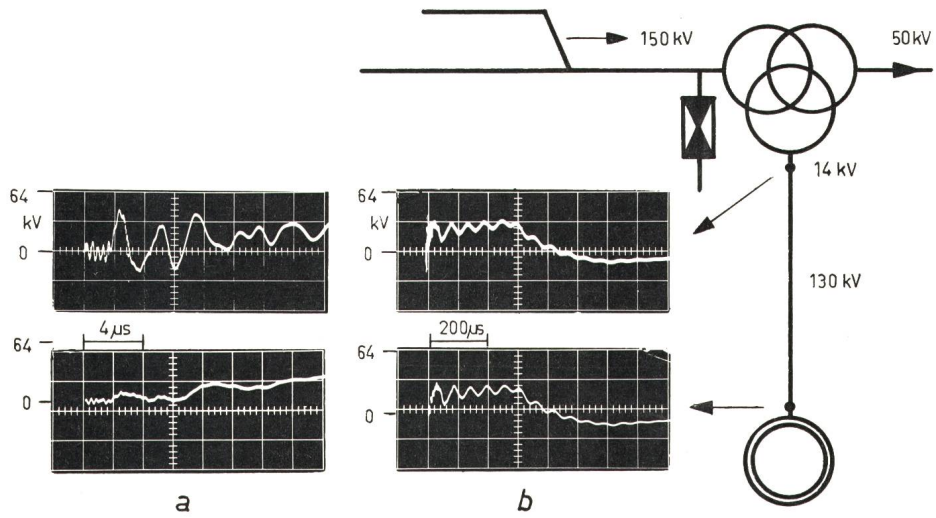


Fig. 7
Differenzspannungen zwischen den Phasen S und T im Generatorkreis bei einer Welle in der Phase T der 150-kV-Anlage bei einer 130 m langen Verbindung mit kleiner Erdkapazität zwischen Generator und Transformator
a Zeitablenkung schnell; *b* Zeitablenkung langsam

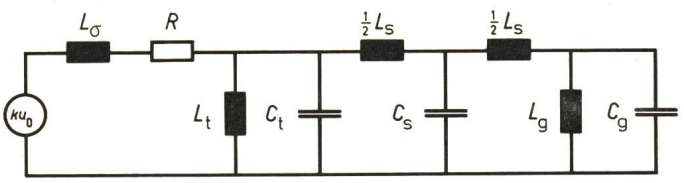


Fig. 8
Ersatzschaltung zur Berechnung der induzierten Schwingung
Bezeichnungen siehe im Text

aller Kapazitäten und der Induktivitäten L_σ und L_s konnten ermittelt werden. Die Induktivitäten L_t und L_g sowie der Widerstand R waren dagegen nicht bekannt. Um realistische Werte dieser Grössen zu erhalten, wurde folgenderweise vorgegangen:

Auf einem Kurvenblatt wurde das berechnete Maximum der Spannung Phase–Erde an den Generatorklemmen und die berechnete Eigenfrequenz des Kreises bei verschiedenen angenommenen Werten der Induktivität $L_t + L_g$ und des Widerstandes R zusammen mit den entsprechenden Messresultaten aufgetragen. Bei bestimmten Werten der Induktivität $L_t + L_g$ und des Widerstandes R konnte dabei eine Übereinstimmung zwischen Rechenwerten und Messwerten erzielt werden. Mit diesen Werten wurde der Spannungsverlauf an den Generatorklemmen berechnet. Er ist in Fig. 10 wiedergegeben. Dabei konnte eine sehr gute Übereinstimmung mit der bei gleichartigen Bedingungen oszillographierten Spannungskurve in Fig. 11 an der Phase S erzielt werden.

4. Übertragene Spannungen in Dreiphasensystemen

Blitzschläge können in Hochspannungsanlagen zu 1-, 2- oder 3-poligen Überspannungen führen. Im Falle von 1-poligen Überspannungen werden die zum Generator übertragenen Spannungen am höchsten, wie die durchgeführten Versuche zeigten. Dieser ungünstigste Fall möge auch der folgenden Diskussion des Verhaltens des Generatorkreises zugrundegelegt werden.

4.1 Überspannungen bei einer Kabelverbindung zwischen Generator und Transformator

Eine Kabelverbindung hat eine sehr grosse Kapazität C_s. Für die kapazitiv-induktiven Komponenten bildet diese praktisch einen Kurzschluss. Die Spannungskurven in Fig. 11 haben folglich den gleichen Verlauf wie die Komponenten mit der Ersatzschaltung in Fig. 9. Am grössten ist dabei die Differenzspannung zwischen den Klemmen S und T (Enden der Spule der Dreieckwicklung am Schenkel des Transformators mit der Hochspannungsspule der vom Blitz getroffenen Phase T). Die Schwingung hat eine Frequenz von 5,5 kHz.

Die Spannungen an den Phasenklemmen S und T sind entgegengesetzt gleich und haben den halben Wert dieser Differenzspannung. Die dritte Klemme ist praktisch spannungslos.

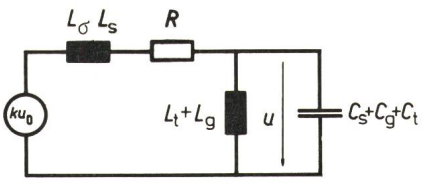


Fig. 9
Vereinfachte Ersatzschaltung zur Berechnung der induzierten Schwingung

4.2 Überspannung bei einem Naheinschlag in die Freileitung

Bei einem Naheinschlag in die Freileitung hat man an einer Hochspannungsklemme des Transformators die Spannungskurve Fig. 6. Diese hat zwei aufeinanderfolgende Fronten, durch welche die induzierte Schwingung (siehe Ersatzschaltung in Fig. 9) zweimal angeregt wird. Durch die Überlagerung beider Komponenten erhält man das Oszillogramm gemäss Fig. 12. Während der ersten 40 µs, also bis zum Anfang der zweiten Front der Spannung an der Hochspannungsklemme, ist der Spannungsverlauf gleich wie in dem entsprechenden Oszillogramm von Fig. 11. Danach biegt die Spannungskurve nach unten ab. Nach einiger Zeit erreicht sie bei negativer Polarität ihren Scheitelwert. Dieser ist um den Faktor 1,7 grösser als der Scheitelwert der Differenzspannung S—T in Fig. 11. Anschliessend folgt eine mässig gedämpfte Schwingung, in welcher der Vorgang langsam ausklingt.

Auch bei einem rückwärtigen Überschlag vom Mast zum Leiterseil wird ein gleichartiger Vorgang angeregt. Die bisher als möglich betrachteten Überspannungen [7] können bei einem solchen Vorgang weit überschritten werden.

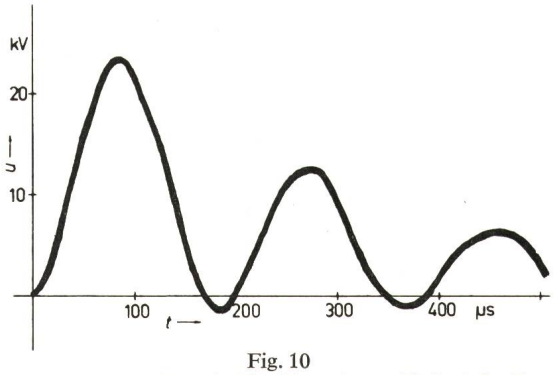


Fig. 10
Aufgrund der Ersatzschaltung in Fig. 9 berechneter Verlauf der Spannung u bei konstantem ku_0 in einer Anlage mit den Daten:

$L_\sigma + L_s = 2{,}50 \cdot 10^{-3}$H
$L_t + L_g = 4{,}00 \cdot 10^{-3}$H
$C_s + C_g + C_t = 0{,}54 \cdot 10^{-6}$F
$R = 25\ \Omega$
t Zeit nach Einsetzen der Spannung ku_0
$k = 0{,}16$
$u_0 = 160 \cdot 10^3$ V

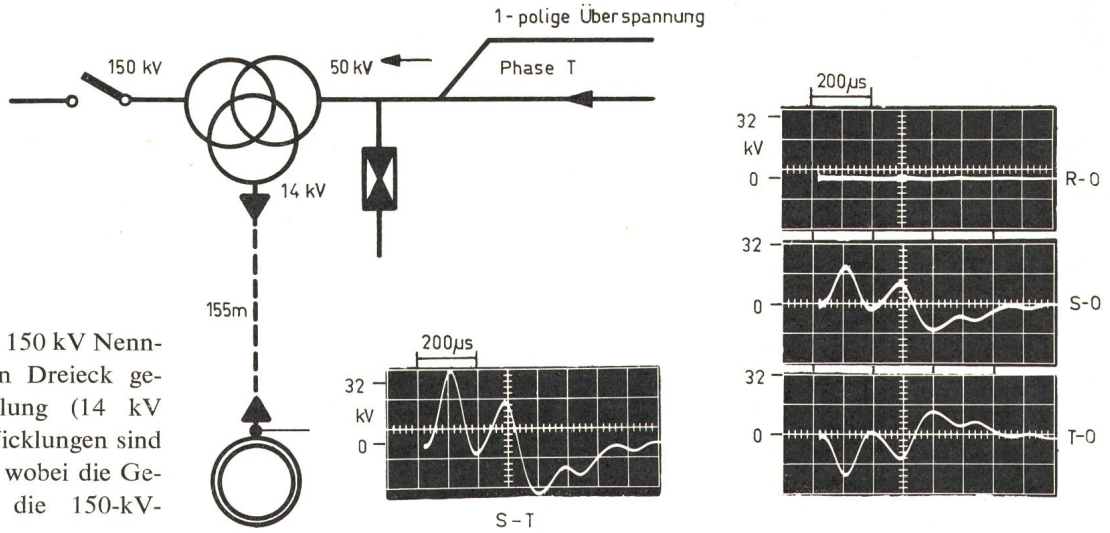
4.3 Überspannungen bei Anschluss des Generators über eine Verbindungsschiene

Eine Verbindungsschiene hat eine kleine Kapazität C_s. Diese kann die Ströme der kapazitiv-induktiven Komponenten nur teilweise zur Erde abführen. An der Schiene führen diese Ströme folglich zu starken Spannungsabfällen, die beispielsweise in den Oszillogrammen Fig. 7a erkennbar sind. Bei den Generatorklemmen sind die Amplituden dieser Komponenten wesentlich kleiner als bei den Transformatorklemmen, was wohl auf den Einfluss der Generatorkapazität C_g zurückgeführt werden kann. Innerhalb von 30 µs sind diese Komponenten verschwunden. Es bleibt nur mehr die induzierte Komponente zurück. Die Eigenfrequenz dieser Komponente (18 kHz) ist verhältnismässig hoch, die Dämpfung ziemlich schwach. Die übrigen Eigenheiten wurden bereits besprochen.

4.4 Der Einfluss der dritten Wicklung eines Dreiwicklungstransformators

Die untersuchte Anlage enthält Dreiwicklungstransformatoren [10]. Diese haben in Stern geschaltete Hochspan-

Fig. 11
Spannungen im Generatorkreis bei einer Welle in der Phase T der 50-kV-Anlage bei einer 155 m langen Kabelverbindung zwischen Generator und Transformator
Sternpunkt der 50-kV-Wicklung ungeerdet



nungswicklungen (50 und 150 kV Nennspannungen) und eine in Dreieck geschaltete Generatorwicklung (14 kV Nennspannung). Diese Wicklungen sind konzentrisch angeordnet, wobei die Generatorwicklung innen, die 150-kV-Wicklung aussen liegt.

Bei dieser Anordnung zeigten sich folgende Eigenheiten:

a) Bei Überspannungen an den 150-kV-Klemmen hat der Schaltzustand der 50-kV-Wicklung (angeschlossen oder unbelastet) keinen Einfluss auf die Überspannungen am Generator.

b) Bei Überspannungen an den 50-kV-Klemmen kann sich die induzierte Spannungskomponente am Generator nur ausbilden, wenn die 150-kV-Wicklung unbelastet ist. Wird diese Wicklung dagegen mit einer langen Leitung (Laufzeit grösser als Schwingungsdauer) belastet, so sinkt die Amplitude der Schwingung auf ca. 15 %.

c) Bei Überspannungen in der 50-kV-Anlage wirkt die 150-kV-Wicklung für die kapazitiv-induktiven Komponenten als Schirm. Die Amplituden dieser Komponenten sind folglich sehr klein.

d) In einer unbelasteten Transformatorwicklung können starke Eigenschwingungen auftreten. Diese sind oft mit der Schwingung im Generatorkreis verkoppelt und können deshalb auch den Spannungsverlauf am Generator beeinflussen.

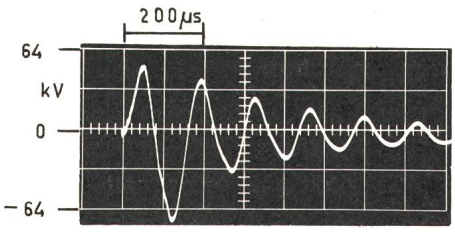
5. Schutz der Generatoren gegen Überspannungen

Zum Schutz gegen diese Überspannungen müssen Überspannungsableiter im Generatorkreis eingebaut werden. Für die Aufstellung dieser Ableiter sollen einige Regeln angegeben werden. Es seien dabei drei Fälle unterschieden:

5.1 Schienenverbindung zwischen dem Transformator und dem Generator

Bei Schienenverbindungen kann der Schutz des Generators durch zwei Sätze von Überspannungsableitern erfolgen (Fig. 2). Die drei Ableiter zwischen den Phasen dienen zur Begrenzung der induzierten Spannungskomponente. Sie dürfen nach betriebsmässigen Gesichtspunkten angeordnet werden, da ihre Schutzwirkung vom Aufstellungsort praktisch unabhängig ist. Die drei Ableiter zwischen den Phasen und der Erde sind erforderlich, da Schienenverbindungen eine kleine Erdkapazität haben und folglich an der Schiene starke kapazitiv-induktive Spannungskomponenten auftreten können. Die Aufstellung dieser Ableiter erfolgt zweckmässig unmittelbar beim Transformator zwischen den Transformatorklemmen und dem geerdeten Transformatorkasten. Einerseits erzielt man so die wirksamste Spannungsbegrenzung, anderseits bleibt der Transformator auch bei abgeschaltetem Generator geschützt.

Fig. 12
Differenzspannung zwischen den Phasen S und T im Generatorkreis bei einem rückwärtigen Überschlag zur Phase T der 50-kV-Leitung
155 m lange Kabelverbindung zwischen Generator und Transformator



5.2 Kabelverbindung zwischen dem Transformator und dem Generator

Für die kapazitiv-induktiv übertragenen Spannungskomponenten bilden die Kabel im Generatorkreis praktisch einen Kurzschluss. Der Generator muss deshalb nur gegen die induzierten Überspannungen geschützt werden. Dies geschieht zweckmässig gemäss der Schaltung in Fig. 1, mit einem Satz von Ableitern zwischen den Phasen. Die Schutzwirkung dieser Ableiter ist vom Aufstellungsort praktisch unabhängig. Beim Einbau zwischen Transformator und Kabel und beim Einbau zwischen Kabel und Generator erhält man eine gleich gute Spannungsbegrenzung.

6. Schlussfolgerungen

Aus dem Gesagten können folgende Folgerungen gezogen werden:

a) Am gefährlichsten werden die Überspannungen am Generator bei Leitereinschlägen und rückwärtigen Überschlägen an der Freileitung in der Nähe der Station.

b) An Leitungsmasten montierte, eng eingestellte Funkenstrekken provozieren bei Blitzschlägen in das Erdseil rückwärtige Überschläge zu den Leiterseilen. Man sollte deshalb auf den Einbau solcher Funkenstrecken in der Nähe der Station verzichten.

c) Vorgänge beim Blitzschlag in eine Freileitung können dazu führen, dass die Spannung in der Station nach einigen 10 µs plötzlich die Polarität wechselt. Die mittelfrequenten Schwingungen im Transformator–Generator-Block können dadurch stark erhöhte Amplituden erhalten.

d) Die zum Generator übertragene Spannung besteht aus zwei Anteilen, den kapazitiv-induktiven, durch Eigenschwingungen und kapazitive Ladeströme im Transformator hervorgerufenen Schwingungen und der von der induzierten Spannung hervorgerufenen Schwingung.

e) Die Begrenzung der kapazitiv-induktiven Spannungskomponenten geschieht zweckmässig durch den Einbau von Überspannungsableitern Phase–Erde bei den generatorseitigen Transformatorklemmen.

f) Bei induzierten Spannungsanteilen ist der höchste Wert der Spannung Phase–Phase praktisch doppelt so gross wie der höchste Wert der Spannung Phase–Erde. Induzierte Spannungen werden deshalb durch Ableiter Phase–Phase am wirksamsten begrenzt.

g) Verbindungskabel zwischen Generator und Transformator bilden für die Ströme der kapazitiv-induktiven Schwingungskomponenten praktisch einen Kurzschluss. Bei induzierten Schwingungen führen sie zu einer Erniedrigung der Eigenfrequenzen.

Die Autoren danken der Sprecher & Schuh AG, der Motor-Columbus AG und der Kraftwerke Zervreila AG für Unterstützung und Hilfe bei der Durchführung der Untersuchungen.

Literatur

[1] *L. I. Sirotinski:* Hochspannungstechnik. Äussere Spannungen. Wanderwellen. Berlin, Verlag Technik, 1965.

[2] *H. R. Armstrong, S. B. Howard* and *I. B. Johnson:* Field investigation on the surge performance of a large unit-connected steam turbine generator. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 71(1952)3, p. 1023...1029.

[3] *A. P. Hayward, J. K. Dillard* and *A. R. Hileman:* Lightning protection of unit-connected turbine generators. Field and laboratory studies. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 75(1956)28, p. 1370...1381.

[4] *B. C. Robinson:* The penetration of surge voltages through a transformer coupled to an alternator. Proc. IEE Part A: Power Engineering 103(1956)10, p. 341...354.

[5] *W. Böning:* Vereinfachte Theorie des Spannungsstosses auf die Ständerwicklung von Turbogeneratoren. Arch. Elektrotechn. 46(1961)3, S. 125...140.

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

[7] *K. H. Chang* and *T. B. Thompson:* Surge protection of unit-connected generators. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 78(1959)46, p. 1580...1590.

[8] *H. Stephanides:* Untersuchungen der durch Stosswellen angeregten Schwingungsvorgänge in Regeltransformatoren. Elin-Z. 5(1953)1, S. 33...40 + 7(1955)2, S. 106...117.

[9] *E. Beck:* Lightning protection for electric systems. New York/London, McGraw-Hill, 1954.

[10] *P. A. Abetti* and *H. F. Davis:* Surge transfer in 3-winding transformers. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 73(1954)15, p. 1395...1407.

Adresse der Autoren:

Dr. *H. V. Stephanides,* Sprecher & Schuh AG, Hochspannungsfabrik, 5036 Oberentfelden und Dipl.-Ing. *E. Eichenberger,* Motor-Columbus AG, 5400 Baden.

Ein Laboratorium für Supraleitfähigkeit für Versuche in starken magnetischen Feldern und mit grossen Strömen wurde in Culham, Grossbritannien, eingerichtet. Prüfobjekte mit maximalen Abmessungen von 5 cm können in einem Feld von 80 kG untersucht werden. Eine Stromquelle kann bis zu 15 kA abgeben. Dieses Laboratorium ergänzt die Prüfeinrichtung in Malvern, wo kleine Bauteile in einem Feld von 150 kG untersucht werden können.

Ein Luft-Frühwarnsystem für Westeuropa wird von einem Konsortium, an dem Firmen von sechs Staaten beteiligt sind, für einen Betrag von 300 Millionen Dollar gebaut. Das System wird über ungefähr 80 Stationen verfügen, die mit Radargeräten, Datenverarbeitungs- und Anzeigesystemen sowie Übertragungsanlagen eingerichtet sind. Weitbereich-Radaranlagen sollen jeden Einflug in das überwachte Gebiet feststellen, verfolgen und einer Befehlszentrale melden.

Eine Einkomponenten-Dichtungsmasse auf Siliconbasis lässt sich gut vergiessen. Dünnere Schichten als 3 mm härten innerhalb von 24 h bei Raumtemperatur vollständig aus. Schichten bis 15 mm Dicke brauchen bis zum vollständigen Durchhärten einige Tage. Die Oberfläche verhärtet jedoch sehr rasch, so dass die beschichteten Teile kurz nach dem Auftragen der Dichtungsmasse weiterverarbeitet werden können.

Der Preis von Tantalkondensatoren, der früher sehr hoch war, konnte stark reduziert werden. Durch die Verwendung von Sintertantal liessen sich die Abmessungen der Tantalkondensatoren verkleinern, während ihre Zuverlässigkeit zunahm. Solche Kondensatoren sind in einem Temperaturbereich von –80...+125 °C verwendbar. Sie haben einen kleinen Rückstrom und sind in hermetisch geschlossenen Gehäusen eingebaut.

Zwei neue Ziffernanzeigeröhren aus England haben eine besondere Anodenstruktur. Die Anode besteht aus einem feinen Drahtgitter, das praktisch unsichtbar bleibt, wenn eine Zahl aufleuchtet. Die Ziffernhöhe ist 15,5 mm; die Röhren haben 19 mm Durchmesser und 47,5 mm Länge. Die Anodenspannung beträgt 170 V, der mittlere Anodenstrom 2,5 mA. Die Umgebungstemperatur kann im Betriebszustand zwischen –50 °C und +70 °C liegen.

Ein Magnetplattenspeicher aus den USA kann während 20 s mit einer grossen Zahl von Informationen im Frequenzbereich von 400 Hz...2 MHz versehen werden. Danach können die Informationen nach Bedarf über einen beliebig langen Zeitraum aus dem Speicher entnommen werden. Jeder Punkt der Speicherspirale lässt sich in kurzer Zeit einstellen. Die Einrichtung dient zur Analyse von Radarsignalen, für akustische und Vibrationsversuche sowie für Untersuchungen in verschiedenen Zweigen der Technik.

Ein 5-MHz-Quarzoszillator aus Deutschland erreicht nach einer kurzen Anlaufzeit eine Frequenzstabilität von besser als $5 \cdot 10^{-10}$/d. Die Betriebsspannung kann zwischen 10 und 30 V liegen. Die Leistungsaufnahme ist 2,5 W. Die Umgebungstemperatur des Oszillators kann während des stabilen Betriebes –40...+60 °C haben.

Ein Messvorsatz für Schreiber aus Deutschland kann Wirk- und Blindleistungen in Einphasen-, Dreiphasen- und Vierphasen-Netzen sowie Gleichstromleistungen erfassen. Der Messvorsatz kann auch elektrische Grössen multiplizieren, dividieren, quadrieren oder radizieren. Das Prinzip des Messvorsatzes beruht auf der Drehmoment-Kompensation. Zur Anwendung kommen zwei elektro-dynamische oder Drehspul-Messwerke.

«Tag der offenen Türen» im EIR Würenlingen. Erstmals seit der Inbetriebnahme hat das Eidg. Institut für Reaktorforschung in Würenlingen die Bevölkerung der Umgebung kürzlich zu einer Besichtigung eingeladen. Der «Tag der offenen Türen» wurde zu einem grossen Erfolg, liessen sich doch über 3200 Besucher in Ausstellungen und Demonstrationen die Reaktoren und Apparate zeigen und über die Bedeutung der Forschungsarbeiten orientieren.