

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 53 (1962)

Heft: 8

Artikel: Schaltvorgänge in Hochspannungsnetzen

Autor: Baltensperger, P.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916921>

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: 21.01.2026

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

besseren Schalter verlangt, dass er diese Schaltfälle beherrscht. Auch beim Unterbrechen von kapazitiven und kleinen induktiven Strömen genügt ein moderner Schalter viel höher geschraubten Anforderungen als einer, der vor 20 oder 25 Jahren erhältlich war. Wir dürfen also wohl mit der technischen und preislichen Entwicklung in diesem Zeitraum zufrieden sein.

Die SEV-Vortragsveranstaltungen dauern normalerweise nur einen Tag. Da es sich aber bei den Schaltern um einen außerordentlich grossen Fragenkomplex handelt, haben wir ausnahmsweise zwei Tage vorgesehen. Wir gewinnen dabei zusätzlich noch etwas Zeit, indem wir am ersten Tag etwas später aufhören und am zweiten etwas früher beginnen können als gewöhnlich, wenn die Besucher, die von weit her kommen, diesmal über nacht in Zürich bleiben.

Der erste Tag ist im wesentlichen den Freiluftschaltern, der zweite den Innenraumschaltern gewidmet. Es gibt aber ein paar Vorträge allgemeiner Art, die sich nicht streng oder überhaupt nicht in dieses Schema einteilen lassen. Wir haben diese Vorträge so zweckmäßig wie möglich auf die beiden Tage verteilt.

Für den ersten Tag haben wir nun folgendes vorgesehen: Zunächst hören Sie einen Vortrag über die Schaltvorgänge in Hoch-

spannungsnetzen, der die grundsätzlichen Schalterfragen behandelt und damit als Grundlage für die ganze Tagung dienen soll, sowohl für die Freiluft- wie für die Innenraumschalter. Nachher folgen zwei Vorträge über die verschiedenen Arten der Freiluftschalter, wobei sich der eine mit den ölärmigen und der andere mit den Druckluft- und Druckgasschaltern befasst.

Am Nachmittag wird zunächst Dr. Jancke über Schalterfragen in den schwedischen Hochspannungsnetzen berichten. Schweden ist ja bekanntlich das Land, das die Spannung von 420 kV zuerst eingeführt und damit die längsten Betriebserfahrungen hat, so dass es bestimmt wertvoll sein wird, darüber etwas zu vernehmen, wobei Dr. Jancke auch viel Interessantes über die 220- und 130-kV-Netze wird berichten können. Nachher werden die schweizerischen Verhältnisse behandelt, wobei der folgende Vortrag das Problem der ständigen wachsenden Kurzschlussleistungen und die daraus sich ergebenden Grenzleistungsprobleme aufgreift. Hierauf folgen Ausführungen über Einbaufragen der Freiluftschalter und schweizerische Betriebserfahrungen mit solchen Schaltern. Am Schluss wird man dann noch etwas über Freilufttrenner hören, da das Thema der Schalttagung etwas weit gefasst wurde und somit auch die Trennschalter mit einbezogen sind.»

Schaltvorgänge in Hochspannungsnetzen

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 30. und 31. Januar 1962 in Zürich,
von P. Baltensperger, Baden

621.316.57.027.1

Die einen Hochspannungsschalter am stärksten beanspruchenden Schaltfälle, wie Kurzschluss, Abstandskurzschluss, Phasenopposition, kapazitive und kleine induktive Ströme, kritisches Stromgebiet und Umschlagstörung, werden nach ihren wesentlichen Merkmalen besprochen. Eine allgemeine Betrachtung über die Vorgänge bei der Lichtbogenlöschung schliesst den Vortrag ab.

Le conférencier traite des caractéristiques essentielles des cas de couplage qui sollicitent le plus fortement un disjoncteur à haute tension, tels que court-circuit classique, court-circuit se produisant dans la ligne à une certaine distance du disjoncteur, opposition de phases, courants capacitatifs et faibles courants induktifs, zone de courant critique et défaut évolutif. Il termine par des considérations générales sur les phénomènes qui se déroulent lors de l'extinction de l'arc.

1. Einleitung

Ein moderner Hochspannungsschalter muss zahlreichen Schaltfällen genügen, die ihn auf die verschiedensten Arten beanspruchen. Der geläufigste Fall, das Ein- und Ausschalten normaler Last, gibt zu keinen besonderen Bemerkungen Anlass. Man darf wohl annehmen, dass jeder handelsübliche Schalter seinen Betriebsstrom bei einem $\cos \varphi$ von etwa 0,7 oder höher, und bei normaler Betriebsspannung einwandfrei einschalten, führen und unterbrechen kann. Von diesem Fall wird in den folgenden Ausführungen nicht mehr gesprochen. Es soll vielmehr ein Überblick über die wichtigsten extremen Schaltfälle gegeben werden. Diese sind in Fig. 1 schematisch zusammengestellt. Die Schemata stellen die auf die einfachste Form zurückgeführten einphasigen Stromkreise dar. Die Fälle werden zuerst kurz vorgestellt und nachher einzeln eingehender behandelt.

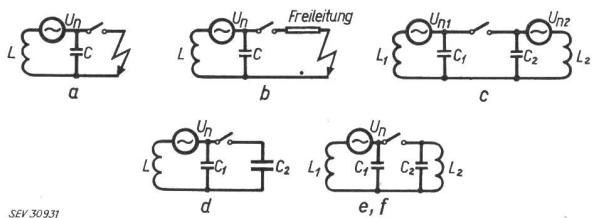


Fig. 1

Einphasige Prinzipschemata der wichtigsten extremen Schaltfälle
a klassischer Kurzschluss; b Abstandskurzschluss; c Phasenopposition; d leerlaufende Leitung oder Kabel, Kondensatoren; e kleine induktive Ströme; f kritisches Stromgebiet
Bezeichnungen siehe im Text

Fig. 1a zeigt einen klassischen Kurzschluss an der Schalterklemme. U_n ist die treibende Spannung, L bedeutet die konzentriert angenommene resultierende Induktivität des speisenden Stromkreises und C die zugehörige Ersatzkapazität. Fig. 1b stellt einen sog. Abstandskurzschluss dar. Dieser unterscheidet sich vom vorhergehenden Fall dadurch, dass er nicht an der Schalterklemme, sondern in einer gewissen Entfernung vom Schalter, auf einer Freileitung auftritt. Fig. 1c zeigt das Prinzipschema für ein Austrittsfallen von zwei Netzen, d. h. der treibenden Spannungen U_{n1} und U_{n2} . Ein ganz anderer Schaltfall ist in Fig. 1d gezeigt, nämlich das Schalten eines kapazitiven Stromes. Die Kapazität C_2 stellt hier in grober Vereinfachung eine leerlaufende Leitung oder ein leerlaufendes Kabel, oder aber eine Kondensatorbatterie dar. Der Stromkreis von Fig. 1e entspricht dem Schalten eines kleinen induktiven Stromes. Der ausgeschaltete Stromkreis, dargestellt durch L_2 und C_2 , kann hier z. B. ein leerlaufender oder belasteter Transformator oder eine Drosselpule sein. Beim sog. kritischen Stromgebiet handelt es sich um vorwiegend induktive Ströme zwischen einigen hundert und einigen tausend Ampère. Der Stromkreis hiefür kann z. B. ähnlich demjenigen der Fig. 1e sein. Als letzter Schaltfall der Betrachtungen sei die Umschlagstörung erwähnt.

2. Der klassische Kurzschluss

Beim klassischen Kurzschluss ist zunächst zu bemerken, dass bei mehrpoligen Kurzschläßen die Ausschaltbedingungen für den erst-, zweit- und drittlöschen Schalterpol meistens nicht gleich sind. Es

gelingt aber immer, für jeden Schalterpol einen äquivalenten einphasigen Kurzschlusskreis zu finden. In der Regel ist der erstlöschende Schalterpol am schwersten beansprucht.

Der klassische Kurzschluss an der Schalterklemme kann in Fig. 2 verfolgt werden. Der speisende Stromkreis ist wieder durch ein vereinfachtes Schema dargestellt. Solange der Schalter geschlossen ist, treibt die Spannungsquelle U_n den Kurzschlussstrom I durch den Schalter S . Nach der Unterbrechung des Kurzschlusses erscheint die Spannung U_s über dem Schalter. Unter dem Schema ist der zeitliche Verlauf des Kurzschlussstromes und der wiederkehrenden Schalterspannung dargestellt. Der Kurzschlussstrom ist hier als asymmetrisch beginnend und bis zum Ausschaltmoment ungefähr auf symmetrisch abgeklungen gezeichnet. Die zugehörige Schalterspannung ist bis zur Kontakttrennung Null. Von da an bis zur Stromlöschung ist sie gleich der Spannung des Schalterlichtbogens.

Nach der Stromunterbrechung schwingt die Schalterspannung in Form einer gedämpften Schwingung auf die betriebsfrequente treibende Spannung ein. Die Eigenfrequenz f dieser Schwingung ist durch L und C bestimmt und beträgt $1/2\pi\sqrt{LC}$. Schliesslich sei bemerkt, dass die Ausschalteistung P eines Schalterpoles definiert ist als Produkt von Schalterstrom (vor der Ausschaltung) mal betriebsfrequente Schalterspannung (nach der Ausschaltung).

Die transitorische wiederkehrende Spannung verläuft beim klassischen Kurzschluss meistens nicht so einfach wie in Fig. 2. Einige typische in Netzen vorkommende Fälle zeigt Fig. 3.

Im Fall a) wird ein einfaches Kraftwerk betrachtet, bei welchem die EMK direkt auf einen Kurzschluss speist (Schema oben). Dieser Fall wurde gerade vorher betrachtet. Er führt im wesentlichen auf einen einfrequenten transitorischen wiederkehrenden Spannungsverlauf, der sich leicht aus den Stromkreiskonstanten berechnen lässt. Im Beispiel II wird angenommen, dass ein übergeordnetes Netz mit entfernten Kraftquellen über einen Transformator T auf einen Kurzschluss speist. Das einpolige Ersatzschema führt hier auf einen Schwingkreis mit zwei Eigenfrequenzen.

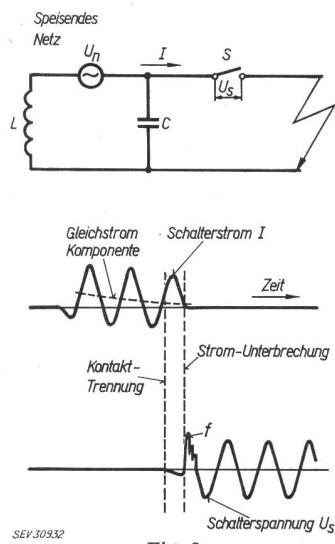


Fig. 2

Kurzschluss an der Schalterklemme

Einphasiges Schema, Strom- und Spannungsverlauf

$$\text{Eigenfrequenz } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{Ausschalteistung } P = U_s S$$

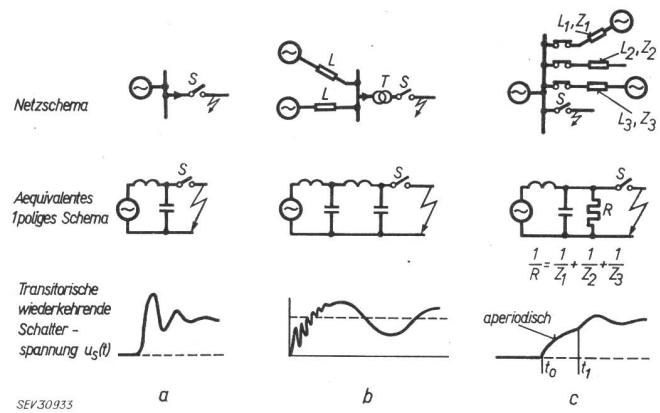


Fig. 3

Einige typische Beispiele von Kurzschlüssen bzw. von Verläufen der transitorischen wiederkehrenden Spannung

a Kraftwerk allein; b übergeordnetes Netz speist über Transformatormotor auf Kurzschluss; c vermaschtes Netz

EMK; T Transformator; L Freileitung; Z Wellenwiderstand; S unterbrechender Schalter

Die kleine Eigenfrequenz ist durch das übergeordnete Netz, und die hohe durch den Transformatormotor bedingt. Die Amplituden der beiden Teilschwingungen lassen sich leicht bestimmen; sie stehen zueinander im gleichen Verhältnis wie die Kurzschlussimpedanz des speisenden Netzes zur Kurzschlussimpedanz des Transformators. Ein solcher Schaltfall tritt indessen nie mit gleichzeitig grösster Kurzschlussleistung auf; diese bleibt wegen der Transformatormimpedanz begrenzt. Wird die Kurzschlussleistung grösser, z. B. wenn noch zuspeisende Leitungen auf der Schalterseite des Transformators angeschlossen sind, so wird dafür die hochfrequente Teilschwingung radikal gedämpft.

Der Schaltfall c) entspricht einem Kurzschluss im vermaschten Netz. Der Kurzschluss wird z. T. durch das nahe Kraftwerk sowie durch weiter entfernt liegende Kraftwerke via Übertragungsleitungen gespeist. Es leuchtet wohl ein, dass hier der Verlauf der transitorischen wiederkehrenden Spannung nicht mit einfachen Rechnungen ermittelt werden kann. Indessen lässt sich der Anfang dieses Verlaufes recht gut abschätzen. Man beachte nämlich, dass jede speiseseitig angeschlossene Freileitung bei einem Strom- oder Spannungsimpuls so wirkt, wie wenn ein Ohmscher Widerstand gleich dem Wellenwiderstand, parallel zum Schalter angeschlossen wäre, gleichgültig, ob die Leitung zu einem Kraftwerk oder zu einem Verbraucher führt, oder ob sie leerlaufend ist. Man kann also für den anfänglichen Spannungsverlauf das einfache Schema Mitte rechts in Fig. 3 zu Grunde legen. Die Induktivität und die Kapazität entsprechen dabei nur dem lokalen Kraftwerk. Der Widerstand R ist gleich dem resultierenden Wellenwiderstand aller angeschlossenen Freileitungen und Kabel einzusetzen. R ist oft so niedrig, dass die Spannung aperiodisch verläuft. Diese Rechnung gilt natürlich nur bis zur ersten Rückkehr der am Leitungsende reflektierten Welle, z. B. zwischen den Zeitpunkten t_0 und t_1 in dem in Fig. 3 unten gezeigten Spannungsverlauf. Dieser Schaltfall gewinnt mehr und mehr an Bedeutung, weil er bei den grössten Kurzschlussleistungen auftritt.

Je mehr Leitungen angeschlossen sind, d. h. je grösser die Kurzschlussleistung ist, umso kleiner wird der resultierende Wellenwiderstand, und umso wirksamer ist die Dämpfung der wiederansteigenden Span-

nung. Beim klassischen Kurzschluss gilt dieses Gesetz ganz allgemein: Die grösste Kurzschlussleistung in einem Netzpunkt ist gepaart mit dem harmlosesten Verlauf der transitorischen wiederkehrenden Spannung. Diese Tatsache wurde auch in den Schalterregeln des SEV bei der Festlegung der Eigenfrequenzen berücksichtigt.

In den vergangenen Jahren hat man den Verlauf der transitorischen wiederkehrenden Spannung stets angenähert als eine gedämpfte Schwingung mit einer einzigen Eigenfrequenz betrachtet, und man hat diese Schwingung durch 2 Parameter, z. B. Eigenfrequenz und Amplitude charakterisiert. Die gezeigten Beispiele lassen erkennen, dass eine so grobe Vereinfachung meistens nicht vertretbar ist. Es sind heute Bestrebungen im Gang, diesen Verlauf nicht durch 2, sondern durch 4 Parameter zu kennzeichnen, was eine bessere, und in vielen Fällen genügende Näherung gestattet.

Die Grösse der betriebsfrequenten wiederkehrenden Spannung kann beim 3poligen Kurzschluss für die erst-, zweit- und drittlöschende Phase verschieden sein. Der am stärksten beanspruchte erstlöschende Schalterpol spürt bei einem 3poligen Kurzschluss im isolierten oder hochohmig geerdeten Netz die 1,5fache Phasenspannung. Dasselbe gilt für den 3poligen isolierten Kurzschluss im Netz mit starr geerdetem Sternpunkt. Ist hingegen sowohl der Netzsternpunkt als auch der Kurzschluss direkt mit der Erde verbunden, so wird der erstlöschende Schalterpol mit der 1- bis 1,3fachen Phasenspannung beansprucht. Der Faktor 1,3 röhrt daher, dass das Erdpotential an der Kurzschlussstelle höher liegen kann als das Erdpotential des speiseseitigen Sternpunktes, wegen der stromdurchflossenen Nullimpedanz. In den Schalterregeln des SEV ist dieser Faktor 1,3 für Netze mit starr geerdetem Nullpunkt und Nennspannungen von 110 kV und höher festgelegt.

Auch das Einschalten auf Kurzschluss und das Führen von Kurzschlussstrom stellt grosse Anforderungen an den Schalter, namentlich an die elektrodynamische und thermische Festigkeit des Kontaktsystems. Fig. 4 zeigt Beispiele von Strom- und Spannungsverläufen bei Einschaltungen mit symmetrischem und asymmetrischem

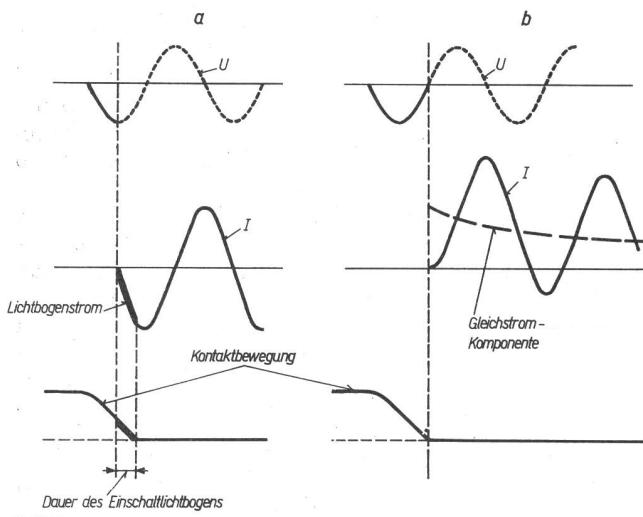


Fig. 4
Einschalten auf Kurzschluss
Zeitlicher Verlauf von Spannung und Strom sowie der Kontaktbewegung
a symmetrisch; b asymmetrisch

schem Kurzschlussstrom. Wenn, wie Fig. 4a, die Einschaltbewegung der Kontakte so verläuft, dass gerade bei einem Maximum der betriebsfrequenten Spannung die Kontaktberührung bzw. die Zündung des Einschaltlichtbogens erfolgt, erscheint der Strom symmetrisch. Im anderen Extremfall (Fig. 4b), wenn die Einschaltung gerade in einem Spannungs-Nulldurchgang erfolgt, wird der Strom voll asymmetrisch. Besitzt ein Kontaktssystem eine grosse Einschaltgeschwindigkeit, wie z. B. zuunterst gezeichnet, so hat man beim symmetrischen Einschalten mit einem längeren Einschaltlichtbogen, d. h. mit grösserem Kontaktbrand zu rechnen, als beim asymmetrischen Einschalten. Schalten hingegen die Kontakte wesentlich langsamer ein, so kann der Einschaltlichtbogen viel länger dauern, wobei unter Umständen auch beim asymmetrischen Einschalten der höchste Stromscheitelwert noch während des Lichtbogenstadiums auftritt. Eine rasche Bewegung der Kontakte ist daher nicht nur beim Ausschalten, sondern auch beim Einschalten erwünscht.

3. Der Abstandskurzschluss

Beim Abstandskurzschluss befindet sich die Fehlerstelle in einer gewissen Entfernung, z. B. 2 km vom Schalter, auf der Freileitung. Schema und Schaltvorgang können in Fig. 5 betrachtet werden.

Fig. 5a zeigt das grundsätzliche Schema. Die Spannung U_n treibt jetzt den Kurzschlussstrom I durch die speiseseitige Impedanz $Z_1 = \omega L_1$ sowie über den Schalter durch die Impedanz des Leitungsstückes $Z_l = \omega l$. In Fig. 5b sind die Spannungsabfälle auf der Speiseseite und längs des Leitungsstückes, im Augenblick der Stromunterbrechung gezeichnet. Die Spannung ist hier quasi in Funktion der Anlage- und Leitungslänge aufgetragen, d. h. längenkonform zur Fig. 5a. In Fig. 5c sieht man den zeitlichen Verlauf der transitorischen wiederkehrenden Spannungen an der speiseseitigen und leitungsseitigen Schalterklemme, und in Fig. 5d den Spannungsverlauf über dem Schalter. Die Spannung auf der Leitung fällt dabei nach den Wanderwellengesetzen in Form einer sägezahnförmigen gedämpften Schwingung auf Null. Demgegenüber schwingt das

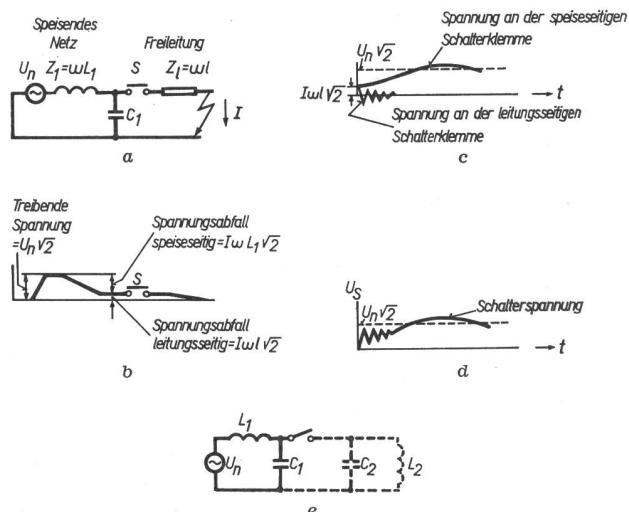


Fig. 5
Abstandskurzschluss
Schemata und Spannungsverlauf
t Zeit
Erklärungen siehe Text

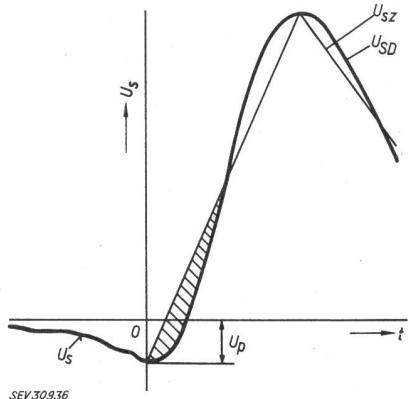


Fig. 6

Zeitlicher Verlauf der Schalterspannung bei Abstandskurzschluss (U_{sd}) und im Falle einer konzentrierten Reaktanz zwischen Schalter und Kurzschlußstelle (U_{sz}), ohne Berücksichtigung der Restleitfähigkeit des Schalters
 u_p Löschspitze der Lichtbogenspannung

Potential der speiseseitigen Schalterklemme, ausgehend vom gleichen Anfangswert, auf den Scheitelwert der betriebsfrequenten treibenden Spannung ein, und zwar mit der verhältnismässig kleinen Eigenfrequenz des speisenden Stromkreises. Auf den Schalter wirkt dabei die Überlagerung dieser beiden Spannungen. Die Steilheit und Amplitude der hochfrequenten Teilschwingung sind dem Kurzschlußstrom proportional. Der theoretisch leicht berechenbare zackenförmige Spannungsverlauf auf der Leitung wird in Wirklichkeit oft durch Reflexionen am Leitungsende, Vorgänge auf den Nachbarphasen u. a. m. verzerrt. Der wesentliche Unterschied zwischen Abstandskurzschluss und Kurzschluss an der Schalterklemme liegt jedoch stets darin, dass die Anfangssteilheit der transitorischen wiederkehrenden Schalterspannung beim Abstandskurzschluss viel grösser ist. Der Vollständigkeit halber sei beigegeben, dass der Abstandskurzschluss in Kabelnetzen viel harmloser ist als auf Freileitungen. Denn beim Kabel ist die Steilheit des Spannungsanstieges etwa 10mal kleiner wegen des kleineren Wellenwiderstandes.

Das Originalschema in Fig. 5a kann in grober Näherung durch das Schema der Fig. 5e ersetzt werden. In diesem ist die Freileitung durch eine konzentrierte Induktivität L_2 und Kapazität C_2 dargestellt. Es gibt Prüfstationen, welche die beiden Stromkreise als gleichwertig betrachten und nach dem einfacheren Schema in Fig. 1e prüfen. Indessen besteht zwischen den beiden Auffassungen ein grundlegender Unterschied: Der Schwingkreis L_2, C_2 von Fig. 5e ergibt eine sinusförmige Schwingung der wiederkehrenden Spannung, während die wirkliche Freileitung einen sägezahnförmigen Verlauf ergibt. Diesen Unterschied zeigt Fig. 6. Man hat festgestellt, dass das Schaltvermögen eines Schalters bei diesen beiden, scheinbar äquivalenten Stromkreisen wesentlich verschieden sein kann.

Der Abstandskurzschluss, der schon immer existierte, ist erst in den letzten Jahren aktuell geworden, nämlich seit in einigen Netzen die Kurzschlußströme sehr grosse Werte z. B. 30...40 kA erreicht haben.

4. Der Kurzschluss bei Phasenopposition

Fig. 7 zeigt einige Fälle von Phasenopposition. Zunächst ist in Fig. 7a ein allgemeines 3phasiges Schema mit zwei zusammengehängten, jedoch voll ausser Tritt

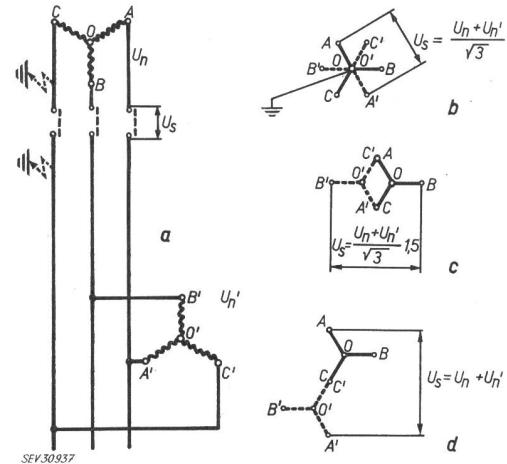
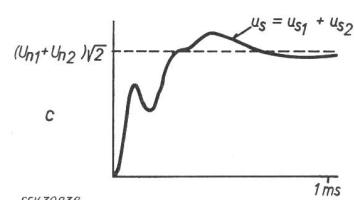
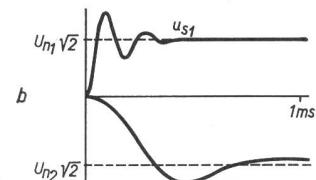
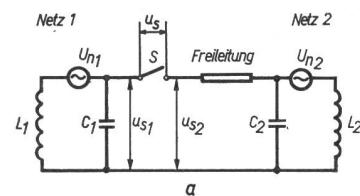


Fig. 7
Phasenopposition

3phasiges Schema und drei Beispiele mit verschiedener betriebsfrequenter wiederkehrender Spannung
b Netznullpunkte starr geerdet; **c** Netznullpunkt isoliert oder hochohmig geerdet; **d** isoliertes Netz mit Doppelerdenschluss in der Phase C

laufenden Netzen mit den treibenden Spannungen U_n bzw. U_n' dargestellt. Fig. 7b zeigt das Spannungsvektor-Diagramm in einem Netz mit starr geerdeten Sternpunkten. Jeder öffnende Schalterpol wird hier mit der Summe der Phasenspannungen der beiden Netze belastet. Fig. 7c basiert auf der Annahme, dass die Netzzternpunkte isoliert oder hochohmig geerdet sind. Der erstlöschründende Schalterpol hat dann die 1,5fache Phasenspannung des ersten plus die 1,5fache Phasenspannung des zweiten Netzes auszuhalten.

In Fig. 7d wird ein Doppelerdenschluss in der Phase C in einem Netz mit isolierten Sternpunkten betrachtet. Bei Phasenopposition erscheint über den Schalterpolen der gesunden Phasen A und B je die Summe der verketteten Spannungen der beiden Systeme, also ungefähr die doppelte verkettete Spannung.



$$u_s = u_{s1} + u_{s2}$$

1 ms

Fig. 8
Phasenopposition

Einphasiges Schema und zeitlicher Verlauf der transitorischen wiederkehrenden Spannung an den Schalterklemmen
Bezeichnungen und Erklärungen siehe Text

Auch bei Phasenopposition lässt sich für jeden öffnenden Schalterpol ein vereinfachtes einpoliges Prinzipschema zeichnen. Ein solches ist in Fig. 8a gezeigt. Die beiden Netze sind im allgemeinen Fall miteinander durch eine Übertragungsleitung verbunden. Bei geschlossenem Schalter hat man es mit einer Art Kurzschlusskreis zu tun, bei dem die treibende Spannung gleich der Summe der beiden Netzspannungen ist. Die Spannung U_{n2} kann dabei z. B. um den Spannungsabfall längs der Übertragungsleitung grösser sein als die Spannung U_{n1} . Zudem können U_{n1} oder U_{n2} oder beide beim Ausschalten unter Umständen auf höhere Werte springen, wenn z. B. die betreffenden Netze schwach sind. Bei langen Übertragungsleitungen kann auch der sog. Ferranti-Effekt, d. h. die Spannungserhöhung am offenen Leitungsende eine weitere Zunahme der wiederkehrenden Schalterspannung bedingen. Der Strom kann bei der Phasenopposition bekanntlich höchstens halb so gross werden, als wenn beide Netze synchron sind und gemeinsam auf einen Kurzschluss speisen.

In Fig. 8b sind noch, nur als Beispiel, die Verläufe der transitorischen wiederkehrenden Spannung an den beiden Schalterklemmen gegen Erde (u_{s1}, u_{s2}) gezeichnet. Diese Spannungen der beiden voneinander getrennten Netzteile schwingen unabhängig jede für sich ein. Die Schalterspannung, gleich der Differenz der beiden Klemmenspannungen, ist in Fig. 8c gezeigt.

5. Ausschalten kapazitiver Ströme

Kapazitive Ströme kommen, wie schon erwähnt, vor bei Kondensatorbatterien, leerlaufenden Kabeln und Freileitungen. In Fig. 9a ist das einphasige Prinzipschema gezeigt. Der kapazitive Strom wird im wesentlichen durch die treibende Spannung U_n und die Kapazität C_2 bestimmt. Wie der Strom im Schalter

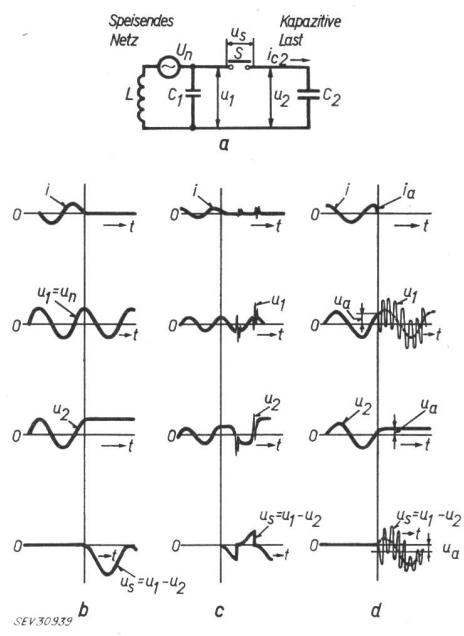


Fig. 9

Schalten kapazitiver Ströme

Schema und Spannungsverläufe

b ideale rückzündungsfreie Ausschaltung; c Ausschaltung mit Rückzündungen; d Ausschaltung mit Abreissen des Stromes vor dem natürlichen Nulldurchgang, ohne Rückzündungen

Weitere Erklärungen siehe Text

und die Spannungen an und zwischen den Schalterklemmen verlaufen können, ist an den 3 Beispielen der Fig. 9b, 9c, 9d veranschaulicht.

Fig. 9b zeigt den Idealfall. Der Strom i verläuft sinusförmig bis zu seinem Nulldurchgang und wird dort definitiv unterbrochen. Die treibende Spannung u_1 läuft dann normal weiter, während das Potential u_2 der ausschaltseitigen Schalterklemme auf dem Scheitelwert der betriebsfrequenten treibenden Spannung hängen bleibt. Zwischen den Schalterklemmen erscheint dann die Differenz u_s . Insbesondere folgt daraus, dass der Schalter schon nach einer Halbwelle den doppelten Scheitelwert der betriebsfrequenten treibenden Spannung aushalten muss. Kann er das nicht, so zündet die Schaltstrecke zurück. Ein solcher Fall ist in Fig. 9c dargestellt. Es ist bekannt, dass daraus Spannungserhöhungen und weitere Rückzündungen, in schlimmen Fällen sogar Überschläge und Zerstörung von Schaltern und Transformatoren entstehen können.

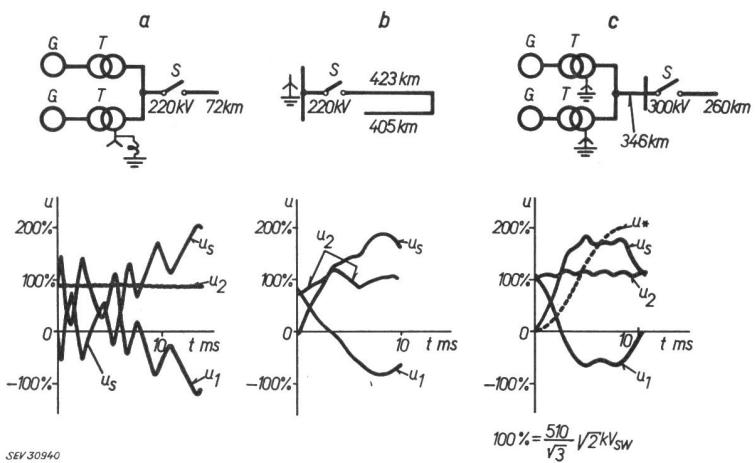
Eine andere, in Fig. 9d gezeigte Erscheinung möge hier noch erwähnt werden: das Abreissen des betriebsfrequenten Stromes vor dem natürlichen Nulldurchgang. Dieses Abreissen kommt namentlich bei kleinen Strömen vor. Wenn das speisende Netz stark und starr ist, spielt dies keine Rolle. Ist das Netz aber schwach, so kann sich der speisenden Spannung im Ausschaltmoment eine transiente Schwingung überlagern, d. h. es kann dort wie in Fig. 9d eine Überspannung entstehen. Oben ist das Abreissen des Stromes gezeigt. Im Moment, da der Strom abreisst, entsteht an der speiseseitigen Schalterklemme eine Spannungsschwingung u_1 , die sich der Betriebsspannung überlagert. Das Potential u_2 auf der ausgeschalteten Seite «spürt» davon nichts, d. h. es bleibt konstant, sofern die Schaltung rückzündungsfrei verläuft. Hingegen wird der Schalterpol entsprechend streng beansprucht (u_s).

Es gibt noch weitere Erscheinungen beim Ausschalten kapazitiver Ströme, wie z. B. das teilweise Zusammenfallen der speisenden Spannung bei schwachen Netzen, ferner bei leerlaufenden Leitungen die Spannungserhöhung am Leitungsende gegenüber dem Leitungsanfang (Ferranti-Effekt), Wanderwellen, Spannungserhöhung auf der erstunterbrechenden Leitungsphase infolge Beeinflussung durch die beiden noch unter Spannung stehenden Nachbarphasen, u. a. m.

Drei Beispiele von Spanningsverläufen, die bei Netzversuchen in Schweden, Frankreich und Kanada oszillographisch gemessen wurden, sind in Fig. 10 zusammengestellt. Es handelt sich um Ausschaltungen leerlaufender Leitungen. Oben sind je die Netzschemata, und unten die zugehörigen Spannungen u_1, u_2 zwischen Schalterklemmen und Erde, sowie die Spannung u_s über dem Schalterpol gezeigt. Man sieht, dass die Spanningsverläufe weit von der klassischen Form abweichen; dabei verliefen alle Schaltungen rückzündungsfrei. Einen besonders strengen Fall stellt Fig. 10c dar. Die gestrichelte Linie u^* entspricht der Spannungsbeanspruchung über dem Schalter nach der klassischen Berechnung, während die wirkliche Beanspruchung gemäss u_s verlief. Der Schalter musste hier ungefähr den doppelten Scheitelwert der betriebsfrequenten Phasenspannung schon nach $1/4$ Periode (60 Hz) aushalten. Es handelt sich bei diesem Fall um Versuche in einem kanadischen 300-kV-Netz bei einer Betriebsspannung von über 500 kV.

Fig. 10

Gemessene transitorische wiederkehrende Spannungsverläufe beim Ausschalten leerlaufender Leitungen in Hochspannungsnetzen
Erstlöschende Phase bei dreiphasigen Ausschaltungen
 u_1 speiseseitige Spannung; u_2 leitungsseitige Spannung;
 u_s Spannung über dem Schalterpol



Bevor nun der nächste Schaltfall besprochen wird, soll eine allgemeine Betrachtung über das Einschalten und über den Begriff der Rückzündung angestellt werden. Dabei kann die Fig. 11 hilfreich sein. Eine Rückzündung ist im Prinzip stets eine Einschaltung. Sie wird zwischen den offenen Schalterkontakte durch elektrischen Durchschlag eingeleitet. Das Zünden bedeutet einen Spannungssprung der Potentiale der beiden Schalterkontakte, derart, dass die beiden Potentiale nach einem meist hochfrequenten transienten Einschwingvorgang einen gemeinsamen Endwert annehmen. Die Steilheit des Spannungssprungs bei einer Rückzündung kann in extremen Fällen einer Frontdauer von etwa $1\mu s$, ähnlich wie beim Normstoss, entsprechen. Die Amplituden der Spannungssprünge an den beiden Schalterkontakten hängen von der Beschaffenheit der angeschlossenen Leitungen und Netzteile ab. Sind an den Schalterklemmen längere Leitungen oder Kabel angeschlossen, so steht die Grösse der Spannungssprünge an den betreffenden Schalterklemmen im gleichen Verhältnis wie die Wellenwiderstände dieser Leitungen oder Kabel. Jeder Sprung pflanzt sich auf seiner Leitung als Wanderwelle fort.

Unter dem Schema der Fig. 11a, zeigen die Fig. 11b und 11c Beispiele von Spannungssprüngen. In Fig. 11b ist angenommen, dass die Leitungen beidseitig des Schalters gleiche Wellenwiderstände haben. Die Spannungssprünge sind daher gleich gross: $\Delta u_1 = \Delta u_2$. Im Falle von Fig. 11c sei speiseseitig eine Freileitung und ausschaltseitig ein Kabel angeschlossen. Das Kabel hat einen Wellenwiderstand von etwa 50Ω , die Freileitung hingegen einen von etwa 500Ω . Der Spannungssprung ist daher auf der Ausschaltseite klein, auf der Speiseseite aber etwa 10mal grösser. Dieser Spannungs-

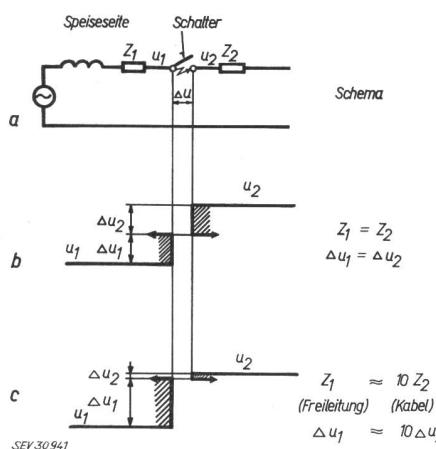


Fig. 11
Spannungssprünge bei der Zündung des Einschaltlichtbogens
oder bei einer Rückzündung

a einpoliges Schema; b gleiche Wellenwiderstände beidseitig des Schalters haben gleiche grosse Spannungssprünge bzw. Amplituden der Wandlerwellen beidseitig des Schalters zur Folge; c Wellenwiderstand und Spannungssprung auf der Speiseseite gross, auf der Ausschaltseite klein

stoss pflanzt sich dann z. B. zum speisenden Transistor fort und belastet dessen Wicklung fast mit voller Steilheit und Grösse.

Diese Vorgänge treten bei jeder Art von Einschaltung oder Rückzündung auf, haben jedoch bei kapazitiven Strömen die grösste Bedeutung.

Im besonderen Falle einer Kondensatorenbatterie verdient übrigens nicht nur der Spannungssprung, sondern auch der damit verbundene Stromstoss beim Einschalten erwähnt zu werden. Beim Einschalten eines Kondensators wird der stationäre betriebsfrequente Strom erst nach einem hochfrequenten Einschwingvorgang erreicht. Die Stromspitze kann dabei in normalen Fällen ein mehrfaches des stationären Stromes erreichen. Besonders gross kann diese Einschaltspitze werden, wenn von mehreren nahe beieinander liegenden Batterien einige schon eingeschaltet sind, und weitere zugeschaltet werden. Fig. 12 zeigt ein solches Beispiel. Die Batterie A (Fig. 12 a) sei schon im Betrieb, die Batterie B werde zugeschaltet. Fig. 12b zeigt

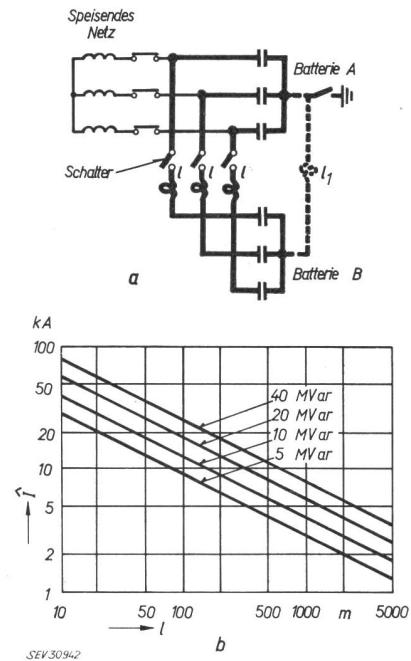


Fig. 12
Einschalten einer Kondensatoren batterie B, wenn eine gleich grosse Batterie A schon in Betrieb steht
a dreiphasiges Schema; b maximale Stromspitzen I beim ungeämpften Einschalten der Batterie B, in Funktion der Länge l der Verbindungsleitung zwischen den Batterien. Batterienennleistung als Parameter

hiezu die Stromspitzen I beim normalen Einschalten, in Funktion der Länge der Verbindungsleitung l zwischen beiden Batterien. Die Nennleistung der Batterie ist als Parameter variiert. Wie man sieht, können hier die Stromspitzen u. U. beträchtlich werden, und insbesondere bei Rückzündungen viele kA erreichen.

Dabei ist zu bedenken, dass diese grossen Stromwerte stets als Lichtbogen auftreten und dass dadurch unter Umständen gefährliche Druckstöße im Schalter entstehen können.

6. Ausschalten kleiner induktiver Ströme

Die Vorgänge beim Ausschalten kleiner induktiver Ströme können in Fig. 13 verfolgt werden. Der leerlaufende Transformator ist durch die Leerlauf-Induktivität L_2 und die Kapazität C_2 dargestellt, das speisende Netz durch die bereits bekannten charakteristischen Parameter. (l bedeutet die Induktivität der Verbindungsleitung zwischen der Stromquelle und dem leerlaufenden Transformator.) Würde beim Ausschalten der Strom im Schalter nicht vor seinem natürlichen Nulldurchgang abreissen, so wäre über diesen Schaltfall nichts Besonderes zu berichten. Das Abreissen des Stromes kann jedoch etliche Komplikationen verursachen.

Im Augenblick des Abreissens des Stromes besitzt der leerlaufende Transformator eine magnetische Energie gleich dem Quadrat des Abreißstromes mal halbe Leerlaufinduktivität. Da jetzt der Strom nicht mehr durch den Schalter weiterfliessen kann, tobt sich diese Energie im Schwingkreis, gebildet aus C_2 und L_2 , aus. Dies geschieht in Form einer gedämpften Schwingung, sofern der Schalter nicht rückzündet. Das analoge

tritt auf der speisenden Seite auf, besonders wenn es sich um ein schwaches Netz handelt, was übrigens auch bei den kapazitiven Strömen erwähnt wurde.

In Fig. 13b sind die prinzipiellen Verläufe (von oben nach unten) des Stromes i , der Spannung u_1 speiseseitig und u_2 ausschaltseitig des Schalters, sowie die Spannung u_s zwischen den Schalterkontakte aufgezeichnet. Das Abreissen des Stromes ist hier fast im betriebsfrequenten Scheitelwert angenommen. Ferner ist angenommen, dass die Schaltung rückzündungsfrei verläuft. In Wirklichkeit treten aber meistens zahlreiche Rückzündungen auf. Da der Strom klein ist, kann er nach einer Rückzündung jeweils sofort wieder unterbrochen werden. Daher ist ein fortgesetztes Rückzündungsspiel möglich, wie es in Fig. 13c für die Spannung zwischen den Schalterklemmen dargestellt ist. Die Rückzündungen sind hier, im Gegensatz zu den Rückzündungen bei kapazitiven Strömen, erwünscht. Denn mit jeder Rückzündung fliesst ein Teil der magnetischen Energie in das Netz zurück, was sich zugunsten kleinerer Überspannungen auswirkt.

Auch das Ausschalten von Hochspannungsmotoren kann übrigens noch zum Gebiet der kleinen induktiven Ströme gezählt werden, weil dort ganz ähnliche Erscheinungen auftreten. Es betrifft insbesondere Motoren mit Nennspannungen von beispielsweise 3...8 kV, und Leistungen von höchstens einigen 100 kW. Dieser Schaltfall kann namentlich dann besonders streng werden, wenn der Motor noch während des Anlaufens ausgeschaltet wird.

7. Ausschalten im kritischen Stromgebiet

Als weiterer Schaltfall sei jetzt noch das Ausschalten im sog. kritischen Stromgebiet erwähnt. Als einphasiges Ersatzschema kann hierfür z. B. wieder die Fig. 13a dienen. Doch stellt jetzt L_2 , C_2 nicht mehr einen leerlaufenden, sondern eher einen induktiv belasteten Transformator dar. Obwohl der Strom hier grösser ist, kann er immer noch abgerissen, oder doch vor seinem natürlichen Nulldurchgang von der betriebsfrequenten Sinusform stark abgedrängt werden. Daraus ergibt sich ein steileres Ansteigen und eine höhere Amplitude der transitorischen wiederkehrenden Spannung. Zündet es zwischen den Kontakten zurück, so folgt darauf nicht das wiederholte Rückzündungsspiel wie beim kleinen induktiven Strom. Denn der Strom ist hier so gross, dass er beim Rückzünden nicht sofort wieder löschen kann; er brennt vielmehr bis zum nächsten betriebsfrequenten Nulldurchgang weiter, und hat erst dort wieder eine Chance zu löschen. In der Regel äussert sich das kritische Stromgebiet in einer längeren Lichtbogendauer.

8. Umschlagstörungen

Als letzter der extremen Schaltfälle sei nun noch die Umschlagstörung betrachtet und an einem Beispiel erklärt. In Fig. 14a ist angenommen, dass während der Ausschaltung eines leerlaufenden Transformators T infolge von Überspannungen an der Stelle Z ein Überschlag zwischen der Transformatorklemme U und Erde, und gleichzeitig eine Rückzündung im Schalterpol U stattfinden. Somit entsteht in diesem Augenblick ein Kurzschlusskreis in der Phase U , der sich über die Erde schliesst; dieser Kreis ist in Fig. 14b herausgezeichnet. Der Schalterpol U , der seine Schaltbewegung schon teilweise oder ganz ausgeführt hat, muss somit

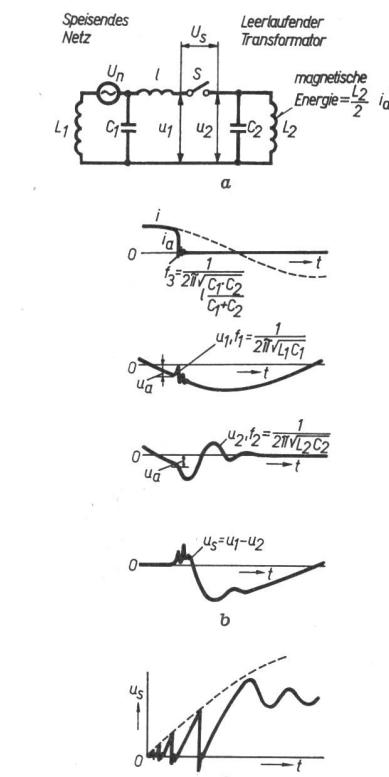


Fig. 13
Schalten kleiner induktiver Ströme
Schema und Spannungsverläufe
Erklärungen und Bezeichnungen siehe Text

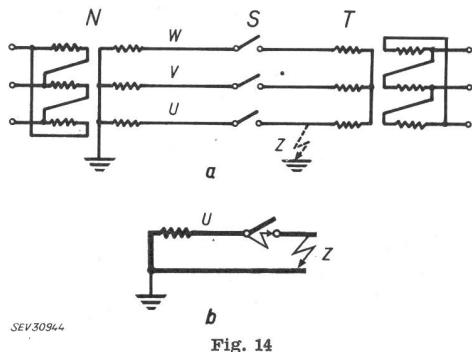


Fig. 14
Umschlagstörung
Schemata
Erklärungen siehe Text

jetzt noch den Kurzschluss ausschalten können. Dies ist nicht immer ganz leicht, weil wegen der schon grossen Kontaktionsdistanz der Lichtbogen länger, die Lichtbogenarbeit grösser und daher die Druckentwicklung im Schalter unter Umständen unzulässig gross werden kann. Fig. 15 zeigt das Oszillogramm einer solchen Umschlagstörung. Von oben nach unten sieht man im Oszillogramm der Reihe nach die Schalterspannung ΔU , den Leerlaufstrom $I_0 = 34 \text{ A}$, die speisende Spannung $U_N = 132 \text{ kV}$, nochmals den Strom im Schalter I_K in anderem Maßstab, und die Spannung an der ausgeschalteten Transformatorklemme $U_T = 132 \text{ kV}$. Beim Auftreten der Überspannung erfolgte der Überschlag und die Einleitung des Kurzschlusses. Der Schalter hatte dann den Kurzschlussstrom bei dessen nächstem Nulldurchgang unterbrochen, womit die Umschlagstörung definitiv behoben war.

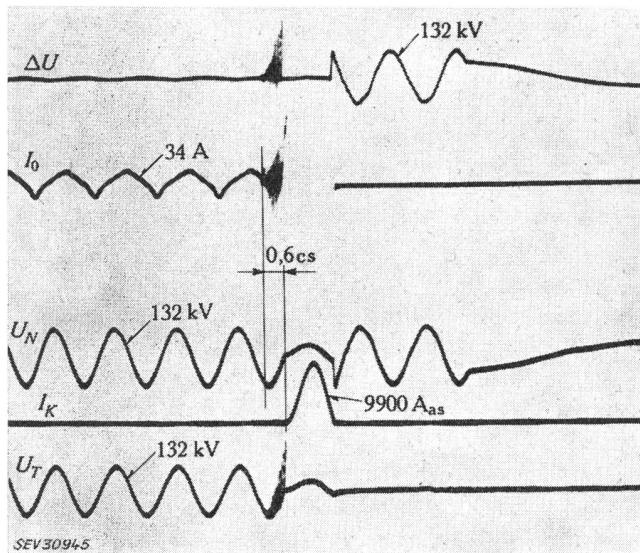


Fig. 15
Oszillogramm einer Umschlagstörung
Erklärungen siehe Text

9. Vorgänge in der Schaltkammer und Wechselwirkung zwischen Schalter und Netz

Im Vorhergehenden wurden einige wesentliche Merkmale der vorkommenden extremen Schaltfälle besprochen. Die Betrachtungen waren jedoch fast ausschliesslich auf die netzeigenen Grössen beschränkt, d. h. der Einfluss des Schalters auf die Schaltvorgänge

wurde nicht oder nur am Rande gestreift. Es möge jetzt noch eine Bemerkung zur inneren Physik des technischen Lichtbogenschalters angestellt werden.

Fig. 16 zeigt noch einmal das einpolige Schema eines einfachen Kurzschluss-Stromkreises, und darunter den prinzipiellen Verlauf des Schalterstromes und der Schalterspannung um den Strom-Nulldurchgang herum. Der Schalter ist hier als zeitveränderlicher Ohmscher Widerstand dargestellt, welcher dem Lichtbogenwiderstand entspricht. i_0 ist der sinusförmige Stromverlauf bei geschlossenem Schalter. Wenn die Kontakte offen sind und dazwischen ein Lichtbogen brennt, wird der Strom von der idealen Sinusform abgedrängt. Er würde etwa gemäss der gestrichelten Linie i_L verlaufen, wenn keine Kapazität vorhanden wäre. Die Kapazität, welche elektrisch parallel zum Schalter liegt, wird jedoch durch die Lichtbogenspannung aufgeladen. Nach dem Erreichen der Löschspitze X fällt die Lichtbogenspannung und damit die Kapazitäts-Spannung gegen Null. Dabei entlädt sich die Kapazität, und ihr Entladestrom fliesst in Form eines Zusatzstromes i_C mehrheitlich durch den Schalter. Der totale Schalterstrom i_S geht daher etwas langsamer gegen Null, was für die Löschung günstig ist (siehe Stelle b). Man sieht daraus, dass das Gelingen oder Misserfolg der Ausschaltung schon wesentlich durch die Vorgänge vor dem Strom-Nulldurchgang bestimmt wird.

Es kommt auch vor, dass der Schalterstrom nicht nur wie in der Fig. 16 gegen Null geht, sondern über die Nulllinie hinausschwinge und erst später definitiv gegen Null läuft. Man spricht dann etwa von Nachstrom oder Reststrom. Dieser kommt beim Ansteigen der transitorischen wiederkehrenden Spannung zu stande, sofern die Schaltstrecke noch nicht restlos entionisiert ist, d. h. eine Leitfähigkeit besitzt. Man hat indessen die Bezeichnung Nachstrom neuerdings verlassen und spricht statt dessen vom Stromverlauf um den Nulldurchgang herum. Denn der Übergang vom Lichtbogen über den ionisierten Restpfad zum voll-

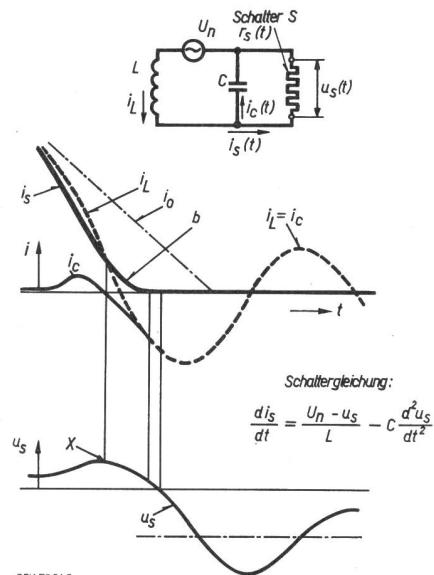


Fig. 16
Strom- und Spannungsverläufe in der Umgebung des Strom-Nulldurchgangs

i_0 idealer Stromverlauf bei geschlossenem Schalter; i_L Strom in der speiseseitigen Induktivität L ; i_S Strom im Schalter; i_C Strom in der Kapazität C ; u_S Spannung zwischen den Schalterklemmen; X Löschspitze der Lichtbogenspannung

ständig entionisierten Zustand vollzieht sich ja kontinuierlich. Es gibt in diesem Zusammenhang überhaupt keine begriffliche Abgrenzung zwischen Lichtbogenstadium und einem Stadium der Restleitfähigkeit.

Man kann nun zwischen Schalterstrom i_s und Schalterspannung u_s , unter Verwendung der elektrischen Grundgesetze, eine Beziehung herleiten, wenn man annimmt, dass die Schaltstrecke ein zeitveränderlicher Ohmscher Widerstand ist. Diese Schaltgleichung ist in Fig. 16 angegeben.

Bei Schaltversuchen gelingt es meistens, die Spannung um den Strom-Nulldurchgang herum recht genau und mit genügender Zeitauflösung oszillographisch zu messen, während die Messung des zugehörigen Stromverlaufes sehr schwierig, und ohne kostspielige Spezialeinrichtungen gar nicht möglich ist. Man kann daher z. B. mittels dieser Gleichung unter Verwendung des gemessenen Spannungsverlaufes den zugehörigen Stromverlauf berechnen, was in der Regel mit einer Schritt-für-Schritt-Methode gelingt. Oder, falls Spannung und Strom gemessen werden, kann man die Messung dank der Gleichung kontrollieren. Diese Gleichung sagt selbstverständlich weiter nichts aus über die noch wenig bekannten komplexen elektrischen, thermodynamischen und pneumatischen Vorgänge im Schalter.

Zusammenfassend und abschliessend sei festgehalten, dass an einen Schalter zahlreiche extreme Forderungen gestellt werden, die einander z. T. zuwiderlaufen. Z. B. verlangt man beim Ausschalten kapazitiver Ströme eine sehr rasche und sehr gross werdende elektrische Wiederverfestigung zwischen den Kontakten, um Rückzündungen zu vermeiden. Bei kleinen induktiven Strömen hingegen wünscht man eine schwache und langsam ansteigende Festigkeit, um die Schaltüberspannungen auf möglichst kleine Werte zu begrenzen. Oder beim gewöhnlichen Kurzschluss kann es z. B. eine optimale Distanz zwischen den Kontakten geben, welche dem grössten Ausschaltvermögen entspricht, während zur Bewältigung der hohen Phasenoppositions-Spannung eventuell eine grössere Distanz nötig ist.

Es ist verhältnismässig leicht, einen Schalter zu bauen, der nur einem einzigen extremen Schaltfall genügen muss. Ein universeller Schalter jedoch, der alle Fälle beherrschen muss, wird stets einen Kompromiss darstellen, sowie eventuell teilweise überdimensioniert und entsprechend teuer sein.

Adresse des Autors:

Dr. P. Baltensperger, Chef des Schalterversuchslabors, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

Ölarme Schalter für Freiluftaufstellung

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 30. und 31. Januar 1962 in Zürich,
von A. W. Roth, Aarau

621.316.57.064.25—742

1. Rückblick

Die heutige Situation im Bau von Hochspannungsschaltern ist gekennzeichnet durch eine Vielzahl der angewendeten prinzipiellen und konstruktiven Lösungen. Es ist deshalb angezeigt, in einem kurzen Rückblick den Weg zu skizzieren, der zur ölarmen Bauweise geführt hat.

Von der Jahrhundertwende bis 1930 wurde das Bild von den Ölkerschaltern beherrscht, es waren dies einfache Apparate, die den Einbau von Wandlern gestatteten. Ihre Nachteile, hohes Gewicht, Schwierigkeiten der Revision und die Brandgefahr führten dazu, dass zumindest im kontinentalen Europa neue Lösungen gesucht und gefunden wurden. Ab 1930 sehen wir immer häufiger die ölarme oder ölfreie Bauart, die sich mit Ausnahme der unteren Spannung 1945 vollständig durchsetzen. Die neuen Geräte wiesen gegenüber dem Nachteil der mechanischen Komplizierung viele entscheidende Vorteile auf: kleines Gewicht, gute Isolation gegen Erde, leichte Revisionsmöglichkeit und beseitigte Brandgefahr. Wer 1945 auf Grund des erreichten hohen Standes der Schaltertechnik eine rasche Abklärung der Schaltersystemfrage erwartete, muss heute feststellen, dass die Vielzahl der Lösungen zunimmt (Schwefelhexafluor- und Vakuumsschalter). Diese Tatsache ist kein Zufall, sondern dem Umstand zuzuschreiben, dass im wesentlichen erst ab 1945 die äusserst komplexen Vorgänge, die sich beim Schalten von Netzteilen ergeben, nach und nach durch umfangreiche Messungen und Vertiefung der Theorien bekannt wurden. Diese breite Forschungsarbeit hat gezeigt, dass es weder ein physikalisches Prinzip noch

ein chemisches Medium gibt, durch dessen alleinige Anwendung ein Lichtbogen immer «ideal» gelöscht wird. Je nach dem die eine oder andere Eigenschaft als massgebend in den Vordergrund gerückt wurde, behauptete man die Überlegenheit dieses oder jenes Systems. Die Praxis der Übertragungsnetze hat sich mit Recht abwartend verhalten, eine Haltung, die auch heute noch charakteristisch ist.

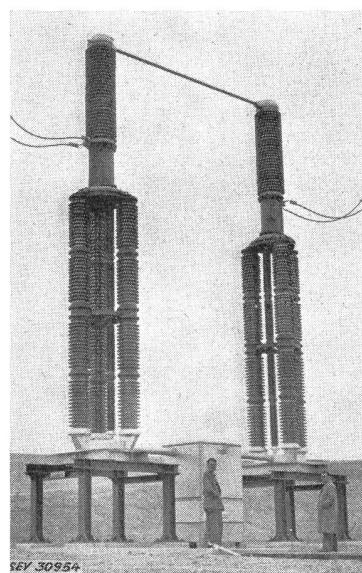


Fig. 1
Der erste 420-kV-Schalter aus dem Jahre 1952