

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 53 (1962)
Heft: 10

Artikel: Schaltüberspannungen und ihre Begrenzungsmöglichkeiten
Autor: Berger, K.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916937>

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: 16.01.2026

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

Schaltung nach *Weil* und ist einfacher in seiner Arbeitsweise und hinsichtlich seiner Bedienung. Er lässt sich ferner leichter anwenden für die Prüfung von Schaltgeräten mit Lichtbogendauern von mehreren Halbwellen, indem es nur erforderlich ist, bei jedem Wiederzünden des Prüflings auch den Hilfsschalter erneut zu zünden. Zudem erlaubt der Prüfkreis auch die Anwendung der von der CEI empfohlenen Prüfzyklen, indem ebenfalls die Ein-Schaltung nachgebildet werden kann.

Aus obigen Darlegungen ist ersichtlich, dass man in der Verwendung synthetischer Schalterprüfkreise den Schritt vom rein experimentellen Laboratoriumsversuch zum praktischen Einsatz in der Gross-Versuchsanlage bereits getan hat. Trotzdem bietet dieses Gebiet der Schalterprüfung noch ein reiches Betätigungsfeld, das auch von verschiedenen Seiten intensiv bearbeitet wird und auf dem laufend weitere Fortschritte und Erfahrungen zu erwarten sind. Entsprechend dem heutigen Stand der Schalterprüftechnik akzeptiert man allgemein die Verwendbarkeit synthetischer Prüfverfahren für die Entwicklung von Schaltgeräten; eine umfassende Anerkennung ihrer Anwendung für Typen- und Abnahmeversuche dagegen ist ihnen allerdings bis anhin noch versagt geblieben.

Es verbliebe nun noch eine Abwandlung der Probleme auf andere Fälle der Schalterprüfung bei gestörten und ungestörten Betriebsverhältnissen. Dies z. B. einerseits hinsichtlich der Unterbrechung bei Phasenopposition und Erdschlussfehlern, bei Distanzfehlern, Umschlagstörungen, andererseits aber auch hinsichtlich der Unterbrechung von kapazitiven und induktiven Betriebsströmen. In all diesen Fällen handelt es sich einmal darum, die besonderen Bedingungen der betreffenden Prüfung nachzubilden, wobei bei den Versuchen bezüglich gestörte Betriebsverhältnisse sich zudem das Problem stellt, auch die notwendige Kurzschlussleistung aufzubringen. Es würde in diesem Rahmen zu weit führen, auf alle diese Fälle eingehen zu wollen. Immerhin ist es interessant, darauf hinzuweisen, dass man heute zum Beispiel Ersatzprüfschaltungen zur Nachbildung des Distanzfehlers ausgearbeitet hat. Auch bezüglich der Unterbrechung kapazitiver Ströme liegen Beispiele von Ersatzprüfkreisen vor. Neuerdings versucht man, im Rahmen des CIGRE-Komitees Nr. 3 mit ähnlichen Mitteln auch allmählich zu einem einheitlichen Prüfverfahren für die Unterbrechung kleiner induktiver Ströme zu gelangen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die in den Kurzschlussprüfanlagen heute oder in nächster Zukunft für direkte Prüfungen verfügbare Leistung in vielen Fällen immerhin schon Werte zwischen 3000...5000 MVA erreicht hat, und dass es möglich sein wird, Schalter bis zu Ausschaltleistungen von rund 5000 MVA zumindest einphasig mit direkter Kurzschlussleistung zu prüfen. Sehr wesentliche Bedeutung

kommt zudem dem elementenweisen Prüfverfahren mit direkter Prüfleistung zu, obschon die Anwendung dieser Methode ganz bestimmte konstruktive Eigenschaften der zu prüfenden Geräte zur Voraussetzung hat. Die verfügbaren Prüfleistungen einerseits und die Zuhilfenahme der einpoligen und elementenweisen Prüfverfahren andererseits erlauben bereits heute schon für eine grosse Zahl von Schaltgeräten eine volle Prüfung mit direkter Prüfleistung. Die Anwendung synthetischer Prüfkreise hat bis heute vor allem im Gebiet der Typen- und Abnahmeversuche noch nicht allgemeine Anerkennung gefunden, und sehr viele Prüffelder werden heute noch unter Verwendung direkter Prüfleistungen weiter ausgebaut. Trotzdem ist man sich einig, dass in weiterer Zukunft synthetische Prüfmethoden zur Anwendung kommen müssten. Wie rasch die Entwicklung in dieser Richtung weiterschreiten wird, dürfte allerdings wesentlich von den Bauformen abhängen, welche unsere zukünftigen Schalter haben werden, als auch vom Ausmass mit welchem die Kurzschlussleistung in unseren Energieversorgungsnetzen noch weiter ansteigt.

Literatur

- [1] *Thorén, B.*: Synthetic Methods for Interruption Tests on Circuit-Breakers. Trans. Roy. Inst. Technol., Stockholm. (Prom. Arbeit). Göteborg: Erlander 1955.
- [2] *Thorén, B.*: Synthetic Circuit Breaker Testing. ASEA Res. (1958)1, S. 163...182.
- [3] *Slamecka, E.*: Die Weil-Schaltung, eine Schaltung zur Prüfung von Hochleistungsschaltern. Das Hochspannungsinstitut der AEG. Festschrift zur Eröffnung des Instituts in Kassel; 1953. S. 52...57.
- [4] *Biermanns, J.*: Montage de Weil pour essais de disjoncteurs à haute tension et capacité de rupture élevée. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 15. Session 1954, Bd. 2, Rapp. 102.
- [5] *Becker, H.*: Synthetische Schalterprüfung. Neues von Sprecher Schuh (1955)3, S. 27...29.
- [6] *Becker, H.*: Réalisation d'une installation d'essais synthétiques pour disjoncteur à haute tension. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 16. Session 1956, Bd. 2, Rapp. 117.
- [7] *Vogelsanger, E.*: Les essais indirects des disjoncteurs. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 12. Session 1948, Bd. 2, Rapp. 122.
- [8] *Zajic, V.*: High Voltage Circuit Breakers. Prag: 1957, S. 307...316.
- [9] *Commission Electrotechnique Internationale*: Règles de la CEI pour les disjoncteurs à courant alternatif. Chapitre I: Règles relatives au fonctionnement lors de court-circuits. = Publ. 56, 2. Ausg., 1954. Additif a) au Chapitre I: Recommandations pour les essais par la méthode d'essai direct sur des éléments séparés, relatifs aux pouvoirs de fermeture et de coupure des disjoncteurs. = Publ. 56-1-A, 1959. Chapitre II: Règles pour les conditions en service normal; 3^{me} partie: Coordination des tensions nominales, des pouvoirs de coupure nominaux et des courants nominaux en service continu. = Publ. 56-3. 1. Ausg., 1959. Genf: Bureau Central de la CEI.
- [10] *Becker, H.*: Hochleistungs-Prüffeld. Neues von Sprecher Schuh (1955)3, S. 12...26.
- [11] *Gantenbein, A.*: Die neue Hochleistungs-Prüfanlage. Bull. Oerlikon (1954)305, S. 55...68.
- [12] *Mauray, E., M. Lavaut und J. Vigreux*: Le CERDA, centre d'essai et de recherches Delle-Alsthom. Rev. gén. Electr. 69(1960)3, S. 135...173.
- [13] *Nimsch, G.*: Der Kurzschlussgenerator des Hochleistungs-Versuchsfeldes. Das Hochspannungsinstitut der AEG. Festschrift zur Eröffnung des Instituts in Kassel; 1953. S. 38...45.
- [14] *Langguth, P. O.*: High Voltage Circuit Breakers Under Short-Circuit Conditions. Current. Engng. Practice. Sonderdruck von Vol. 2, Nr. 12; Vol. 3, Nr. 1 und 2 (combined).

Adresse des Autors:

P. Joss, dipl. Ingenieur, Chef des Schalter-Versuchslokals, Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich 50.

Schaltüberspannungen und ihre Begrenzungsmöglichkeiten

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 30. und 31. Januar 1962 in Zürich, von K. Berger, Zürich

621.316.57.015.3

In diesem Referat sollen lediglich die zwei wichtigsten Fälle von Schaltüberspannungen besprochen werden, nämlich jene, die beim Ausschalten leerlaufender Transformatoren und leerlaufender Leitungen in Hochspannungsanlagen entstehen.

I. Das Ausschalten leerlaufender Transformatoren mit dem technischen Lichtbogenschalter

Zwei Definitionen seien vorangestellt:

a) Unter einem idealen Wechselstromschalter soll ein Schalter verstanden sein, dessen Lichtbogenspan-

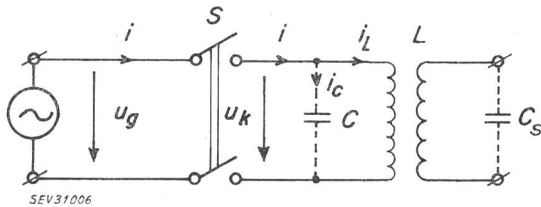


Fig. 1

Schema der Transformatorabschaltung

S Schalter; L Transformator; C Eigenkapazität Primärseite; C_s Eigenkapazität Sekundärseite; u_g Netzspannung; u_k Klemmenspannung des Transformators; i Schalterstrom; i_c Kapazitätsstrom

nung gleich Null ist, und dessen elektrische Festigkeit im Moment des Stromnulldurchganges plötzlich auf beliebig hohe Werte steigt.

b) Unter einem technischen Lichtbogenschalter ist demgegenüber ein Schalter mit fallender Lichtbogencharakteristik verstanden, dessen elektrische Festigkeit nach dem Nullwerden des Stromes nur in begrenztem Tempo ansteigt. Die daraus folgenden Merkmale des technischen Lichtbogenschalters sind einerseits das Abreissen kleiner Ströme und die Entstehung von Rückzündungen nach stromlosen Pausen irgendwelcher Dauer.

Was passiert, wenn man mit einem technischen Lichtbogenschalter den Leerlaufstrom eines Transformators bei irgend einem Momentanwert i₀ plötzlich annulliert, d. h. den Lichtbogen plötzlich abreisst? Gemäss dem Schema der Fig. 1 muss der vom Schalter abgerissene, im Transformator aber notwendigerweise weiterfliessende Strom sich über die Klemmenkapazität C des Transformators schliessen. Der Einfachheit halber lasse man dabei die Wirkung einer sekundären Unterspannungskapazität C_s weg.

Man sagt: Die magnetische Energie i₀²L/2 schwingt hinüber in den elektrischen Speicher C als elektrische Energie u_c²C/2, so dass ohne Verluste die folgende Gleichung gilt:

$$u_c = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Dies tönt sehr einfach. Die grosse Frage ist bei näherer Betrachtung die: Was bedeutet L im leerlaufenden Transformator? Zur Erklärung ist es üblich, die Magnetisierungskurve heranzuziehen. Im linearen Kreis ist L der Fluss pro Stromeinheit, oder die Flussverkettung pro Stromeinheit. Beim gesättigten Eisen ist dieser Wert keine Konstante; der Fluss Φ pro Stromeinheit nimmt mit grösserem Strom stark ab. Fig. 2 zeigt die Hysteresiskurve des Eisens.

Wenn

u_k die Klemmenspannung des Transformators,

u_i die vom Fluss Φ induzierte Spannung,

i den Leerlaufstrom,

R den Ohmschen Widerstand des Transformators

bedeuten, dann ist der Hysteresisverlust pro Periode der Wechselspannung gegeben durch

$$\int u_i i dt = \int (u_k - iR) i dt = W_{el} - W_w = \int i d\Phi$$

∫ i dΦ stellt die umfahrene Fläche dar, die bei den Maxima-Punkten scharfe Spitzen aufweist, wenn die Frequenz f = 50 Hz oder ein niederes Vielfaches davon ist. Bei höheren Frequenzen entstehen grössere

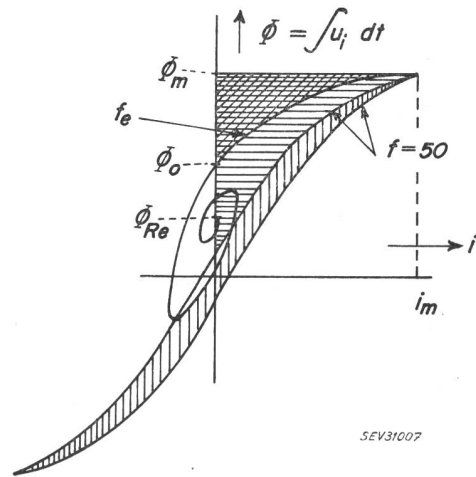


Fig. 2

Stationärer und eigenfrequenter Flussverlauf in einem Transformator

i Strom; Φ Fluss; f Frequenz; f_e Eigenfrequenz des Transformators; u_i induzierte Spannung

Wirbelströme in massiven Eisenteilen, so dass die Schleife sich stark rundet¹⁾.

Die aus dem Eisenkern freiwerdende magnetische Energie kann dargestellt werden durch das Integral:

$$\int_{i_0}^0 i d\Phi \text{ vom Abreiss-Strom } i_0 \text{ bis zum Strom } i = 0$$

Dieses Integral ist durch die horizontal schraffierte Fläche der Fig. 2 dargestellt, sofern der Strom nach dem Abreissen mit f = 50 Hz weiterfliessen würde. Das tut er aber nicht, sondern er schwingt mit der Eigenfrequenz f_e des Transformators, die wenige 100 Hz bis viele 1000 Hz betragen kann, je nach Spannung und Leistung des Transformators. Es ist somit nötig, die wirkliche Ausschwingkurve oszilloskopisch zu messen, um die freiwerdende magnetische Energie bei der Eigenfrequenz f_e zu bestimmen. Für die in Fig. 2 hypothetisch angenommene Ausschwingkurve ist diese Fläche kreuzweise schraffiert worden. Man erkennt, dass sie wesentlich kleiner ist als bei f = 50 Hz, und noch kleiner, als sie für ein konstantes L, ohne Sättigung, wäre.

Die rückgewinnbare magnetische Energie und damit die Höhe der Schaltüberspannung hängt somit vom verwendeten Eisen ab. Sie hängt bei gegebener Sättigung B aber auch von der Grösse des Luftspaltes im magnetischen Kreis ab. Fig. 3 zeigt die an zwei geometrisch genau gleichen Ringkern-Mustern aus verschiedenen Eisen gemessenen Schaltüberspannungen als Funktion der Eisenqualität und des Luftspaltes, bei einer Eigenfrequenz f_e = 480 Hz²⁾.

Versuche an grossen Leistungstransformatoren, wie sie vorstehend geschildert wurden, sind von der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) geplant. Das Hauptproblem bildet dabei ein Schalter, der ein plötzliches, genau reproduzierbares Abreissen des Stromes erlaubt.

Nachdem der grundsätzliche Einfluss des Transformators auf die Höhe der Leerschalt-Überspannung gezeigt wurde, muss auch der Schaltereinfluss erwähnt

¹⁾ Siehe Dissertation von G. Weissenberger, Kabelwerke Brugg, Brugg.

²⁾ Einer Untersuchung an der ETH von B. Staub und J. Marty entnommen.

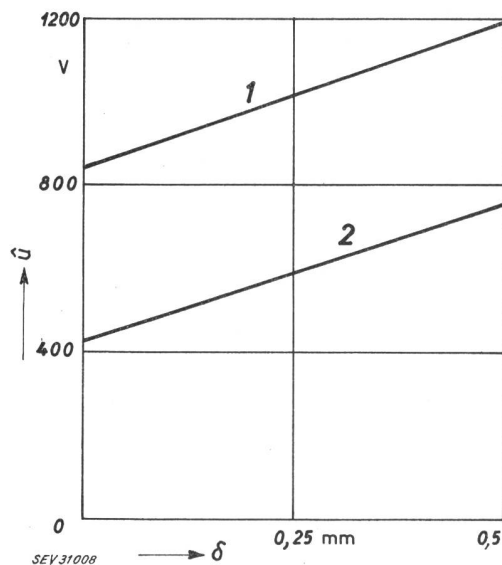


Fig. 3

Ausschaltüberspannung \hat{U} an zwei Mustern kleiner Transformatorkerne in Funktion des Luftspaltes δ
1 Dynamoblech; 2 korngerichtetes Blech

werden. Je steiler die Lichtbogen-Charakteristik fällt, und je kräftiger der Lichtbogen mit Fremdenergie beblasen wird, um so grössere Ströme i_0 werden abgerissen. Grundsätzlich muss jeder technische Lichtbogenschalter infolge der bei kleinen Strömen fallenden Lichtbogen-Charakteristik einen Abreisseffekt aufweisen. Die Eigenschaften des ausgehenden Lichtbogens sind auch noch zu wenig erforscht. Kurz vor dem Stromnulldurchgang zeigt ein solcher Bogen z.B.

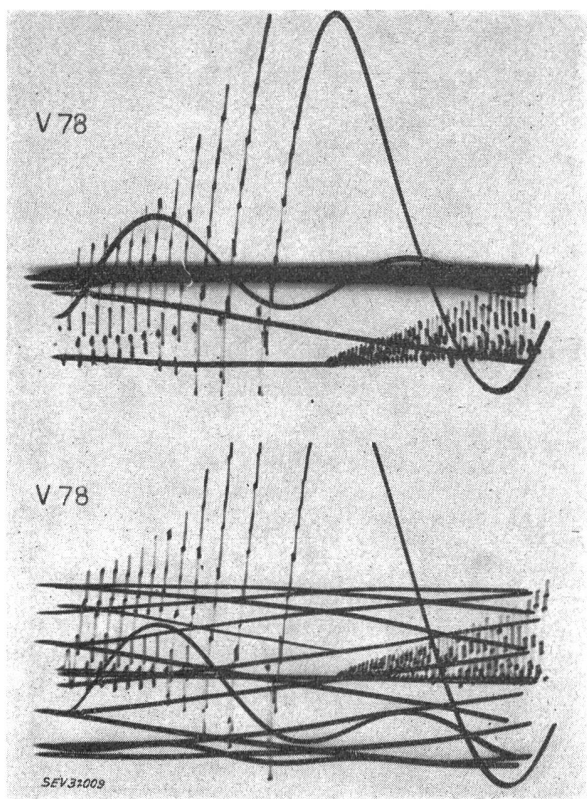


Fig. 4

Ausschaltüberspannung an Transformator 16 kV, 16 % Hz, mit Druckluftschalter

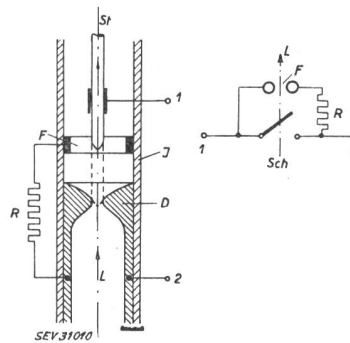


Fig. 5

Schema des Schalters mit Widerstand R und Begrenzungsfunkstrecke F

eine Durchschlagfestigkeit, die kaum anders ist als jene eines heissen Gases.

Was passiert nun, wenn die aus dem Magnetfeld zurückgewonnene Energie zu übermässigen Aufladungen der Transformator-Kapazität C führt? Dieser Fall tritt naturgemäss am häufigsten bei kleinen Kapazitätswerten und kleinen Nennspannungen auf.

Offenbar muss die Energie irgendwie abgeführt werden, z.B. über Rückzündungen an das speisende Wechselstromnetz, oder in besondere Schalterwiderstände, oder in Ableiter. Die Fig.4...6 geben einige Beispiele des bekannten Zünd- und Löschspieles, das im öffnenden Schalter einsetzt³⁾. Die Bilder sind in einem Bahnstrom-Netz bei $16\frac{2}{3}$ Hz aufgenommen; Fig.4 bezieht sich auf einen Druckluftschalter ohne Schalterwiderstand. In der kritischen Halbwellen entsteht eine Sägezahnkurve mit steigender Amplitude entsprechend der Verfestigung im Schalter, die in erster Linie mechanisch durch die zunehmende Öffnung der Schalt-

³⁾ Siehe K. Berger und Ch. Jean-Richard, Bull. SEV, 1944, Nr. 20.

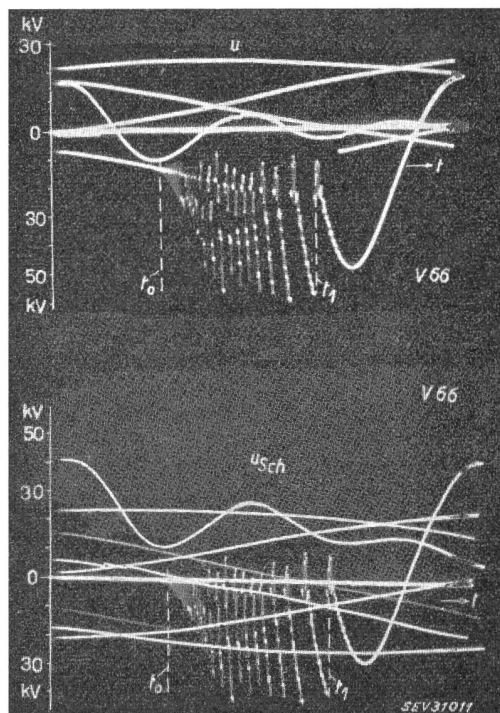


Fig. 6

Ausschaltüberspannung an Transformator 16 kV, 16 % Hz, Druckluftschalter nach Fig. 5

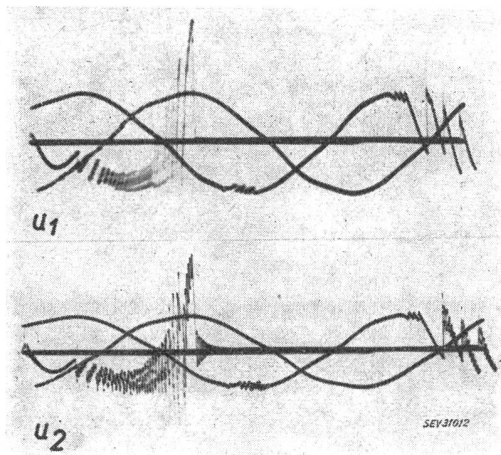


Fig. 7

Ausschaltüberspannung an zwei parallelen Transformatoren je 4000 kVA, 50 Hz, 45/56 kV, bei 81 % Sättigung, mit ölarmem Schalter
Zusatzkapazität zu den Transformatoren 12 300 pF
 u_1 Primärspannung; u_2 Sekundärspannung am Transformator

strecke bedingt ist. Der Vorgang legt eine einfache Methode zur Messung der Schalterverfestigung nahe.

Fig. 5 gibt das Schema des Schalters mit Widerstand R und Begrenzungsfunkstrecke F .

In Fig. 6 erkennt man die Begrenzung der Überspannungs-Amplituden durch das Ansprechen der beblasenen Funkenstrecke F .

Der Schalterwiderstand R war in diesem Fall so niederohmig, dass keine Verlangsamung des Spannungsanstieges erkenntlich ist. Wenn die definitive Ausschaltung innert einer Halbwelle erfolgt, lässt sich die grösstmögliche Überspannung aus dem Tempo der Verfestigung der Schaltstrecke, das heisst aus der Hüllkurve der Zündspitzen berechnen³⁾.

Fig. 7 bildet ein typisches Beispiel der Ausschaltüberspannungen bei 50 Hz, das mit Ölschalter an zwei Versuchstransformatoren der FKH von je 4 MVA gemessen ist. In der sekundären Überspannung ist deutlich die Schwingung über die Transformatorenstreuung ersichtlich.

Welches sind nun die Begrenzungsmöglichkeiten der geschilderten Überspannungen?

4 Möglichkeiten seien nachstehend erwähnt:

1. **Konstruktive Massnahmen am Transformator.** Hieher gehört in erster Linie die Verwendung eines Eisens mit kleiner rückgewinnbarer magnetischer Energie, wie das bereits geschildert wurde. Kaltgewalztes Blech ist in dieser Beziehung günstiger als übliches

³⁾ Siehe K. Berger und Ch. Jean-Richard, Bull. SEV 35(1944)20.

warmgewalztes Dynamoblech, wie Fig. 3 zeigte. Bei geschachtelten Transformatoren sind kleinere Überspannungen zu erwarten als bei Transformatoren mit grossem Luftspalt. Diese Massnahmen versprechen leider nur bei Höchstspannungs-Transformatoren Erfolg, während bei mittleren Spannungen der Fall der Fig. 4...7 praktisch die Regel sein dürfte.

2. **Blockschaltung** des Transformators mit der Zuleitungskapazität, z.B. mit dem direkt in den Transformator eingeführten Kabel hoher Spannung. In Tabelle I ist die ungefähre Kabellänge berechnet worden unter der Annahme, dass die gesamte magnetische Energie $i_m^2 L/2$ des Transformators für die Aufladung der Kapazität C auf den Scheitelwert der verketteten Betriebsspannung $U_B/\sqrt{2}$ zur Verfügung steht. L ist dabei aus dem Leerlaufversuch bei 50 Hz bestimmt. Die gerechneten C -Werte sind daher zu pessimistisch, und es sind in Klammern die C -Werte beigelegt worden, die einer rückgewinnbaren Energie von $1/2$ des $i_m^2 L/2$ -Wertes entsprechen; die Wirklichkeit dürfte näher bei den eingeklammerten Werten liegen.

Es zeigt sich, dass bei Höchstspannungen wenige 100 m Kabel genügen, um Überspannungen praktisch zu verhindern. Dies ist z.B. der Fall bei unseren Kavernen-Zentralen, mit Kabelverbindungen in Höchstspannung zu den Freiluft-Schaltanlagen. Ähnlich ist es in allen Schaltanlagen mit in die Transformatoren eingeführten Kabeln, wie z.B. in Mettlen. Fig. 8 und 9 zeigen die mit zwei verschiedenen Schaltern gemess-

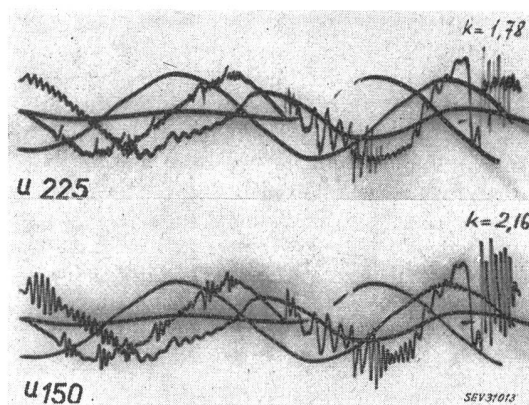


Fig. 8

Ausschaltüberspannung an 100-MVA-Transformatorengruppe 200/150 kV, bei 114 % Sättigung, mit ölarmem Schalter, primär (220 kV) und sekundär (150 kV) gemessen
 k Überspannungsfaktor

Überspannungsschutz mit einer Kabelkapazität C

Tabelle I

P_n MVA Δ	U_B kV	$I_0 = \frac{50 P_n}{U_B \sqrt{3}}$ A (eff) ¹⁾	$L = \frac{U_B}{\omega I_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$ H ¹⁾	$\frac{i_m^2 L}{2} = I_0^2 L$ kW s	$C = L \frac{I_0^2}{U_B^2}$ μF ²⁾	Kabellänge l pro Phase ³⁾ m ³⁾		
10	150	1,92	144 H	0,53	0,0234	93	(47)	
30	150	5,75	47,8	1,580	0,070	280	(140)	
100	150	19,2	14,4	5,3	0,234	932	(466)	
30	220	4,42	91,5	1,78	0,032	128	(64)	
100	220	13,1	30,9	5,3	0,110	440	(220)	
100	380	7,6	91	5,25	0,036	144	(72)	
300	380	22,8	30,6	16	0,11	440	(220)	

¹⁾ Vorausgesetzt ist ein Leerlaufstrom von 5 % des Nennstromes und eine Kabelkapazität von 0,25 $\mu F/km$, Werte L und C pro Phase.

²⁾ Kapazität C bzw. Kabellänge l wird durch $I_0/\sqrt{2}$ auf verkettete Spannung $U_B/\sqrt{2}$ aufgeladen.

³⁾ Die eingeklammerten Werte sind praktische Näherungswerte, welche die Reduktion der rückgewinnbaren magnetischen Energie infolge unkonstanten L -Werten nach Fig. 2 berücksichtigen sollen.

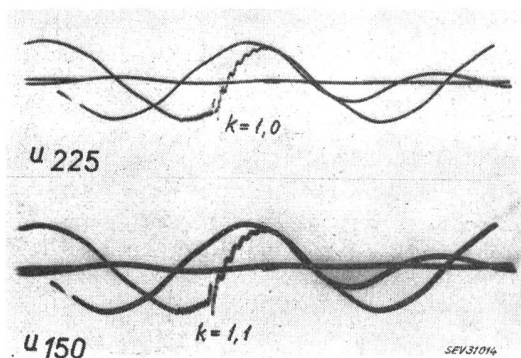


Fig. 9

Wie Fig. 8, jedoch mit Druckluftschalter

senen Überspannungen am gleichen Transformator. Der eine Schalter ist ein Ölschalter mit Rückzündungen, der andere ein Luftschalter ohne Rückzündungen. Bei mittleren und kleinen Hochspannungen sind die üblichen Kabellängen zu klein, um einen nennenswerten Schutz gegen Schaltüberspannungen zu gewährleisten.

3. *Zweistufige Abschaltung über Schalterwiderstand.* Beim Öffnen des Schalters wird nach Fig. 10 ein Widerstand R in Serie geschaltet. Der Strom wird dadurch vom Wert i_1 auf i_2 reduziert, und sein Phasenwinkel φ verkleinert. Wird der Widerstand R z.B. derart bemessen, dass der Leerlaufstrom des Transformators daran einen Spannungsabfall gleich der normalen Betriebsspannung liefert, so wird dadurch der Strom auf $1/\sqrt{2} = 70\%$ reduziert. Selbst beim Abreißen des Lichtbogens beim vollen Scheitelwert des Stromes entsteht dann keine Überspannung. Der reduzierte Strom i_2 wird dann von einem zweiten Schaltorgan beim nächsten Nulldurchgang unterbrochen, wie die Fig. 10 zeigt. Ein höherer Widerstand R bewirkt beim Überschalten höhere Spannung am Schalter, reduziert aber den Strom i_2 stärker.

Dieser zweistufige Schalter, kurz Widerstandschalter genannt, wird besonders dann mit Erfolg angewendet:

a) Wenn es sich um einen raschen Schalter handelt, d.h. einen solchen, der nicht zu späten Rückzündungen (Neuzündungen) führt. Rückzündungen nach ungefähr einer Halbwelle verursachen stark unsymmetrische Wiedereinschaltströme, bei denen die Anpassung des Widerstandes nicht mehr vorhanden ist, so dass der Schutzwert fraglich wird.

b) Wenn es gelingt, die Steuerwiderstände von Schaltern mit Vielfachunterbrechung so niederohmig auszuführen, dass sie als Überspannungsschutz wirksam werden. Dies ist eine rein thermische Forderung, die wieder bei Schnellschaltern am besten verwirklicht werden kann.

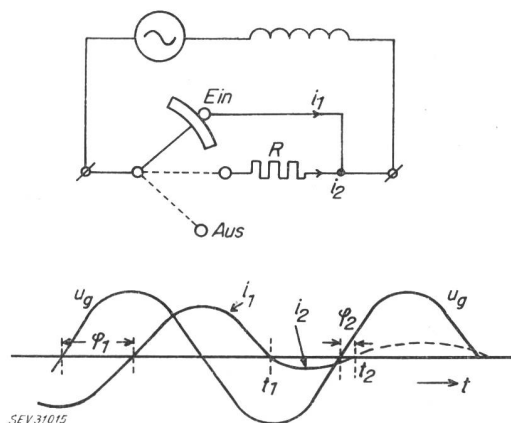


Fig. 10

Schema des Schalters mit Schalterwiderstand R

i_1 Strom im eingeschalteten Zustand; i_2 Strom im Schalterwiderstand R ; u_g Netzspannung; φ_1 und φ_2 Phasenverschiebungen von i_1 und i_2

Die Ohmzahl des Widerstandes muss gewählt werden im Hinblick auf den grössten Momentanwert des Lichtbogenstromes, der vom Schalter noch abgerissen wird. Dieser Strom dürfte in der Höhe von 10...50 A liegen. Die heutige Entwicklung der Schnellschalter mit Vielfachunterbrechung scheint diesen Weg mit Erfolg zu beschreiten.

4. *Ableiterschutz.* Theoretisch ist der Schutz der Transformatoren gegen unzulässig hohe Leerschalt-Überspannungen mit Hilfe eines für atmosphärische Überspannungen gebauten Ableiters möglich, da die im Transformator gespeicherte Energie und umso mehr die rückgewinnbare Energie kleiner bleiben als die von einem Ableiter beim Nennableitstrom von 10 kA aufgenommene Stossenergie. Die beiden Energiewerte sind in Tabelle II gegenübergestellt.

Nun ist die Form des vom Ableiter abgeleiteten Stromes allerdings recht verschieden; vor allem ist die Stromdauer beim Ableiten von Leerschalt-Überspannungen viel grösser als bei atmosphärischen Stromstössen, und dafür die Stromstärke viel kleiner. Seitdem aber Ableiter auch mit langdauernden Strömen der Dauer einiger ms mit mehreren 100 A geprüft werden, dürfte Gewähr dafür bestehen, dass der atmosphärische Ableiter auch für die Ableitung von Leerschalt-Überspannungen von Transformatoren ein geeignetes Mittel ist.

Währenddem früher gewünscht wurde, die Ableiter-Ansprechspannung bei nicht atmosphärischen Überspannungen höher zu legen, besteht heute oft die Tendenz, die Ansprechspannung in Funktion der Steilheit oder Frequenz der Überspannung festzulegen, so dass

Magnetischer Energie-Inhalt von Transformatoren und Energieaufnahme von Ableitern bei Nennstoss 10 kA

Tabelle II

P MVA Δ	U_B kV	I_0 A	L H	$W_{mag.} \approx$ $I_0^2 L$ kWs	$10^4 \cdot 2,5 U_B \sqrt{2} \cdot \frac{W_{abl.} \approx 20 \mu s}{\sqrt{2} kWs} \approx 0,5 U_B$ [kV]
10	150	1,92	144	0,53	≈ 75
30	150	5,75	47,8	1,58	≈ 75
100	150	19,2	14,4	5,3	≈ 75
30	220	4,42	91,5	1,78	≈ 110
100	220	13,1	30,9	5,3	≈ 110
100	380	7,6	91	5,25	≈ 190
300	380	22,8	30,6	16	≈ 190

auch in dieser Richtung Gewähr für einen sicheren Schutz geboten werden kann. Die FKH ist schon mehrfach in die Lage gekommen, Ansprechspannungen grosser Ableiter bei Frontzeiten von 1...500 μ s zu messen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Schutz der Transformatoren gegen Schaltüberspannungen auf folgende Weise mit Erfolg realisiert werden kann:

- Durch Schalterwiderstände, deren Ohmzahl der Leerlaufimpedanz des Transformators bzw. dem grösstmöglichen Abreissstrom des Schalters angepasst ist.
- Durch Blockschaltung von Transformatoren und Anschlusskabeln derart, dass das Kabel die magnetische Energie des Transformators ohne wesentliche Überspannungen aufnimmt. Diese Methode verspricht nur bei Höchstspannung Erfolg.
- Durch Ableiter an den Transformatorklemmen oder doch möglichst nahe bei diesen. Diese Methode ist nicht möglich bei Transformatoren mit direkt eingeführten Kabeln grosser Länge.

II. Ausschalten leerlaufender Leitungen mit Lichtbogenschaltern

P. Baltensperger hat in seinem Einführungsreferat⁴⁾ das Grundsätzliche für das Ausschalten einer lokalen Kapazität bereits geschildert.

Im idealen Schalter löscht der Lichtbogen beim stationären Nulldurchgang des Ladestromes i nach Fig. 11, d.h., praktisch beim Scheitelwert der Speisenspannung U_g . Die Kapazität C bleibt voll geladen zurück, während die Speisenspannung weiter pulsiert. Die Spannung über die Schaltstrecke wächst entsprechend der vertikalen Schraffur. Sie erreicht nach einer Halbwelle der Betriebsfrequenz den doppelten Scheitelwert von U_g . Verfestigt der Schalter rascher als die Schraffur, so entsteht keine Rückzündung und die Ausschaltung ist schmerzlos vorüber.

Auch wurde bereits erwähnt, dass beim Abschalten mit dem technischen Lichtbogenschalter in Hochspannungsanlagen grundsätzlich zwei Einflüsse des Schalters eine Rolle spielen, nämlich das Abreissen des Lichtbogens und die Rückzündungen.

1. Wirkung des Abreissens des Lichtbogens. Der Strom folgt in diesem Fall nicht der stationären Sinus-Linie bis zu ihrem Nulldurchgang, sondern

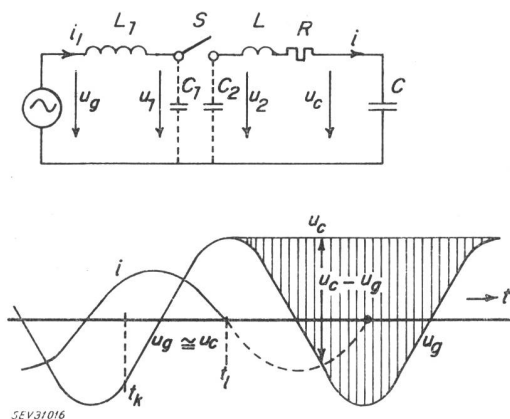


Fig. 11

Schema der Leitungsabschaltung

C_1, C_2 Kapazitäten; L, R Induktivität bzw. Widerstand der Leitung; L_1 Induktivität der Speiseseite; i Leitungsstrom; i_l Netzstrom; u_g Netzspannung; u_c Leitungsspannung; u_1, u_2 Spannungen beidseitig des Schalters; S Schalter; t_k Zeitpunkt der Kontaktöffnung; t_l Zeitpunkt der Lichtbogenlöschung

⁴⁾ Siehe Bull. SEV 53(1962)8, S. 370.

fällt rascher; er wird vom Lichtbogen «abgerissen». Dieses Abreissen wird gefördert durch das Zusammenwirken der fallenden Lichtbogen-Charakteristik mit der zum Schalter parallelen Kapazität⁵⁾. Auf der speisenden Seite entsteht dadurch eine der momentanen Betriebsspannung gleichsinnig überlagerte Überspannungs-Schwingung.

Das plötzliche Verschwinden eines Stromes von der Grösse des Abreisswertes bewirkt andererseits eine Wanderwelle iZ , deren Spannung bei gegebenem Abreissstrom auf der Freileitung 10...20mal grösser ist als an Kabeln. P. Baltensperger hat den Fall gezeigt, wo auf sehr langen Freileitungen eine wellige Spannung, ähnlich der stationären Spannung eines Gleichrichters, zum Vorschein kommt. Ich möchte Ihnen ein anderes Beispiel zeigen, das sich auf eine der in der Schweiz

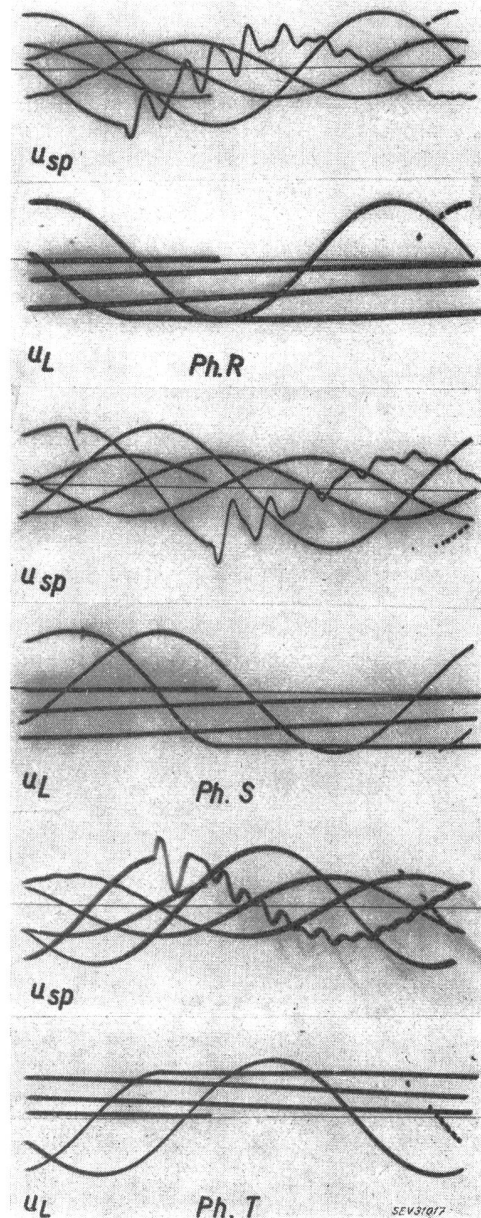


Fig. 12

Leerschalten einer 220-kV-Leitung mit $2 \times 6,5$ km Kabel

Ph.R, Ph.S, Ph.T Phasen R, S, T; u_{sp} Spannung speiseseitig; u_l Spannung leitungsseitig

⁵⁾ Siehe H. Puppikofer, Bull. SEV Bd. 1939, Nr. 13.

üblichen kurzen Leitungen, hier 49 km, bezieht, die aber eine 6,5 km lange Kabelstrecke mit zwei parallelen 220-kV-Kabeln enthält. Die Leitung wurde mit einem neuen Ölschalter mit Achtfach-Unterbrechung geschaltet. Fig. 12 zeigt die speise- und leistungsseitigen Spannungen der drei Phasen. Das Abreißen des Lichtbogens bewirkt speiseseitig eine Eigenschwingung, die sich in den drei Phasen ausserordentlich genau reproduziert. Trotz dieses Abreisens bleibt die Spannung der ausgeschalteten Kabel sehr angenähert auf dem Scheitelwert und klingt dann langsam ab. Die Schaltung verläuft überspannungsfrei und äusserst einfach.

Es ist als grosser Fortschritt zu buchen, dass heute rückzündfreie Schalter bis zu den höchsten Betriebsspannungen erhältlich sind, sowohl mit Druckluft als auch mit Öl als Löschmedium.

2. Wirkung der Rückzündungen im Schalter, Entstehung transienter Stromnulldurchgänge. Wir kommen hier zu den wichtigsten Vorgängen, die zu Schaltüberspannungen in Anlagen führen. Eine einzelne Wiederschaltung des Lichtbogens kurz nach einem Stromnulldurchgang ist in jedem Schalter möglich, wenn nämlich die Kontaktöffnung unmittelbar vor dem Stromnulldurchgang stattfand. Die Öffnungsdistanz ist dann zu klein, um der wiederkehrenden Spannung standzuhalten (Fig. 11). Diese Zündung bewirkt einen Wiedereinschaltvorgang der Kapazität C , der in vielen Fällen harmlos ist, der aber, wenn er spät erfolgt, andere Auswirkungen haben kann als der übliche Einschaltvorgang, weil er sich bei steigender Kontaktöffnung abspielt. Die vielfachen Untersuchungen, die wir bei der FKH durchführen konnten, lassen zwei grundsätzlich verschiedene Netzanordnungen erkennen, die sich als Überspannungserreger sehr verschieden auswirken.

Der erste Fall ist dadurch gekennzeichnet, dass sich der Schalter S in unmittelbarer Nähe der allein speisenden Generator-Transformatorgruppe T befindet (Fig. 13a). In diesem Fall ist der Strom im Schalter i identisch mit dem Strom der speisenden Gruppe i_1 . Da dieser wegen der induktiven Gruppe nicht rasch ändern kann, kann dies auch der Schalterstrom nicht. Wenn z.B. bei einer Zündung im Schalter der Strom i_1 zu fließen beginnt und ansteigt, so muss auch der Schalterstrom i langsam ansteigen. Er kann somit nicht mehr null werden bis zum nächsten stationären 50-Hz-Nulldurchgang. Der Lichtbogen brennt somit über eine volle Halbwelle ohne Unterbruch, und hört dann auf, oder dauert bei einem älteren Schalter eine weitere Halbwelle, bis schliesslich die definitive Löschung erfolgt. Dieser Vorgang ist bezüglich Überspannungen meistens harmlos.

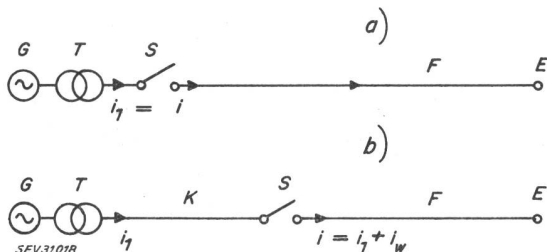


Fig. 13

Schema zweier Schalterdispositionen (a, b)

F Freileitung; E Leitungsende; G Generator; K Kabel; S Schalter; T Transformator; i_1 Transformatorstrom; i_w Wellenstrom; i Gesamtstrom

Im zweiten Fall (Fig. 13b), wo der Schalter S mit der speisenden Gruppe T über ein Stück Freileitung oder ein Kabel verbunden ist, muss die Gleichheit $i_1 = i$ nicht erfüllt sein, weil auf der Leitung ein Wellenstrom i_w bestehen kann, der zwischen den Leitungsenden T und E hin- und herpendelt, ohne in die Induktivität des Transformators T einzudringen (Fig. 13b). Damit sich wesentliche Wellenvorgänge ausbilden können, muss die Leitungslänge ein Vielfaches der Frontlänge der Wellen betragen.

Die Gefährdung entsteht dann dadurch, dass der Wellenstrom $i_w = U_B Z$ bei hohen Betriebsspannungen auf Freileitungen Werte einiger 100 A bis etwa 1000 A aufweist. Er übertrifft damit den Leerlaufstrom von Transformatoren. Bei schwachem Maschineneinsatz an Höchstspannungsnetzen kann er die Grösse des Kurzschlußstromes erreichen.

Es ist daraus ersichtlich, dass der aus einem langsam veränderlichen Speisestrom i_1 und dem auf der Leitung pendelnden Wellenstrom i_w zusammengesetzte Schalterstrom i kurzzeitige, transiente Nulldurchgänge aufweisen kann⁶⁾. Bei kleiner Steilheit des Stromes im Nulldurchgang wird der Schalter seine Pflicht, den Lichtbogen in diesem Moment zu unterbrechen, tun. Von diesem Moment an pendeln die Wellenströme beidseitig des nun offenen Schalters unabhängig voneinander weiter. Auf der Speiseseite staut sich überdies der Transformatorstrom i_1 auf der Leitung bis zum Schalter. Die Überspannung über den Schalter leitet in vielen Fällen wieder eine Zündung des Lichtbogens ein, womit wieder ein wellenartiger Ausgleichsvorgang über die zusammenhängende Leitung

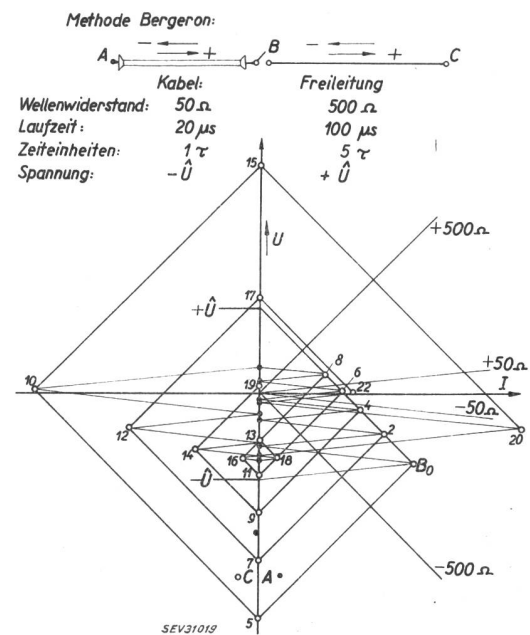


Fig. 14

Beispiel eines Bergeron-Diagramms für das Schliessen des Schalters in B bei beidseitigen Spannungen $+U$ und $-U$

I Strom als Abszisse; U Spannung als Ordinate;

○ Punkte auf der Ordinatenaxe ($i = 0$): Spannungen des Punktes C;

● Punkte auf der Ordinatenaxe ($i = 0$): Spannungen des Punktes A;

○ Punkte der Zeichenebene: Spannungen und Ströme im Schalter B;

Ziffern bedeuten Vielfache der Laufzeit τ

⁶⁾ Siehe A. Gantenbein und E. Vogelsanger, Bull. MFO 1956, Nr. 316.

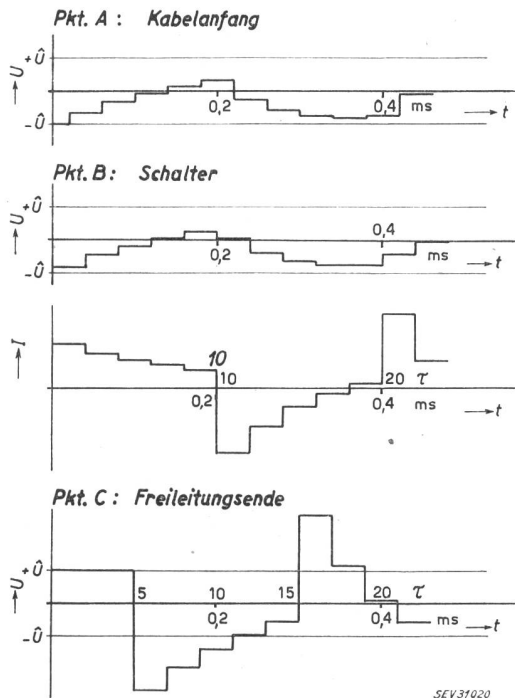


Fig. 15

Aus dem Bergeron-Diagramm (Fig. 14) entnommener Spannungs- und Stromverlauf der Punkte A, B und C über der Zeit t in ms oder als Vielfache von τ

eingeleitet wird. Es ist kaum möglich, das derart entstehende gesamte Zünd- und Löschspiel im Schalter zu reproduzieren. Dagegen besteht eine Methode, die auf einfache Weise erlaubt, das Wellenspiel infolge einer einzelnen Zündung genau zu erfassen. Es ist dies die graphische Methode, die 1937 vom Hydrauliker und Elektriker *Bergeron* angegeben wurde⁷⁾.

Es ist ausgeschlossen, diese Methode hier zu erläutern. Ich möchte lediglich ein Beispiel vorführen, das sich auf Fig. 13b bezieht und von Herrn Burger, Assistent im Hochspannungslabor der ETH, graphisch durchgerechnet wurde. Fig. 14 zeigt die gewählten Annahmen im Schema, ferner das Bergeron-Diagramm dazu. Jede Leitung wird darin durch gerade Linien dargestellt, deren Neigung dem Wellenwiderstand Z entspricht. Die Schnittpunkte solcher Geraden liefern die Punkte A_v, B_v, C_v , welche den Spannungen in den Punkten A, B, C nach der v -Reflexion entsprechen. Da zwischen zwei aufeinanderfolgenden Werten die doppelte Laufzeit der Wellen verstreicht, lässt sich aus dem Bergeron-Diagramm sofort das zeitliche Diagramm, d. h. das Oszillogramm der Spannungen zeichnen, wie das in Fig. 15 geschehen ist.

Aus dem Beispiel sollen folgende Schlüsse gezogen werden. Für einen bestimmten Netzzustand lässt sich der aus einer Zündung folgende wellenartige Schwingungszustand des Netzes für jeden Zeitpunkt mit Hilfe des Bergeron-Diagrammes genau bestimmen. Was hingegen nicht vorausgesagt werden kann, sind die Momente, wo nun tatsächlich der Schalter-Lichtbogen löscht oder neu zündet. Dieses von der Turbulenz des Löschmediums und von der Lichtbogenhysterese im Schalter abhängige Zünd- und Löschspiel lässt sich auch bei einer Wiederholung einer Schaltung unter äusserlich gleichen Bedingungen nie genau reproduzieren. Eine Vorausberechnung des genannten Schalt-

⁷⁾ Siehe *Maudutt*, Rev. Gén. d'El. 19, April 1954, Seite 191.

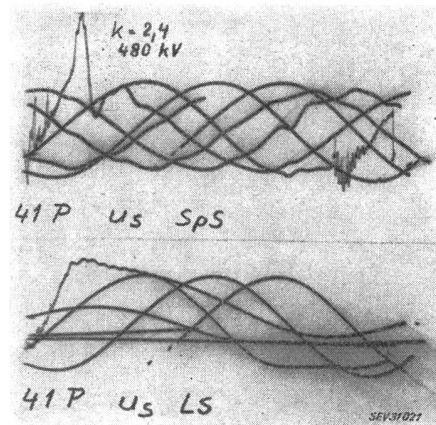


Fig. 16

Ausschalten einer 49 km langen 220-kV-Leitung mit $2 \times 6,5$ km Kabel, mit ölarmem Schalter mit 4 k Ω Widerstand
SpS Speise-seite; LS Leitungs-seite; k Überspannungsfaktor

vorganges scheint aus diesen Gründen gänzlich hoffnungslos.

Wir sind für die Kenntnis des tatsächlichen Vorganges mit Rückzündungen restlos auf Messungen in Hochspannungsanlagen angewiesen, und ich möchte Ihnen deshalb wenige Beispiele solcher Aufnahmen vorführen.

Fig. 16 zeigt eine Leitungsabschaltung mit einem nicht rückzündfreien 220-kV-Schalter, der mit 4000 Ω Schalterwiderstand versehen wurde. Das Oszillogramm wurde im genau gleichen Netzzustand aufgenommen wie Fig. 12 (rückzündfreier Schalter).

Um die Spannung über dem Schalter sichtbar und die Kurven besser lesbar zu machen, sind in Fig. 17 die beidseitigen Schalterspannungen im gleichen Massstab über dieselbe Nulllinie gezeichnet.

Fig. 18 gibt ein weiteres Beispiel einer 220-kV-Leitungsschaltung, mit einem Überschlag im Zug der Leitung. Auch hier sind die beidseitig des Schalters gemessenen Spannungskurven in der Fig. 19 über dieselbe Nulllinie nachgezeichnet worden. Wo sich beide Kurven decken, ist der Schalter elektrisch geschlossen; wo sie getrennt verlaufen, ist er offen. Der Wechsel dieser zwei Zustände erfolgt während der Abschaltung mit Zeitintervallen von etwa 1 Halbperiode bis herunter zu weit weniger als 1 ms. Der Takt der raschen Wiederzündungen ist durch die Leitungslänge mitbestimmt.

Die FKH verfügt über eine Menge solcher Aufnahmen und ich glaube nicht, dass sich im Fall rückzündender Schalter zwei gleiche Kurvenbilder darunter befinden. Zu erwähnen ist noch, dass es bei diesem Zünd- und Löschspiel nicht selten zu späten Überschlägen

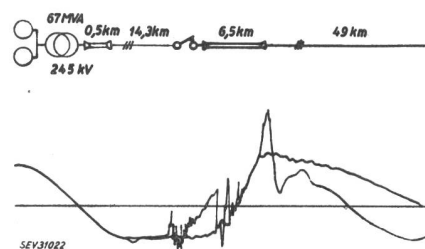


Fig. 17

Wie Fig. 17, aber Spannungen beidseitig des Schalters im gleichen Maßstab über derselben Nulllinie gezeichnet

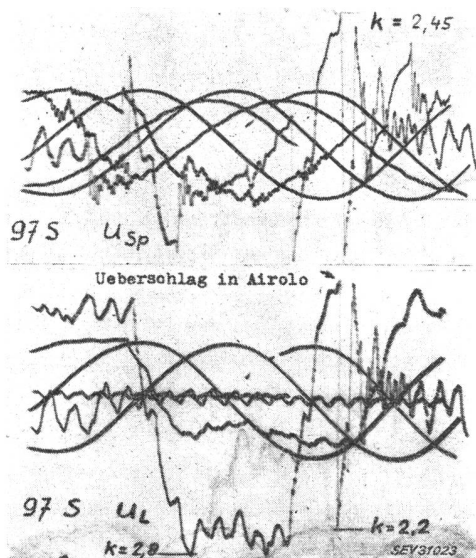


Fig. 18

Ausschalten einer 175 km langen 220-kV-Leitung mit ölarmem Schalter, Überschlag mit Umschlagstörung

kommt, die sich bezüglich der Schalterbeanspruchung wie Umschlagsstörungen auswirken.

In diesem Zusammenhang sind auch die bereits historischen Aufnahmen aus dem Jahr 1929 an der 132-kV-Leitung Vernayaz—Rupperswil der SBB zu erwähnen, die uns erstmals die Bedeutung des Wellenspiels auf der Leitung mit dem damals frisch entwickelten Kathodenstrahl-Oszillographen erkennen liessen⁸⁾.

Zusammenfassend möchte ich betonen, dass es müssig wäre, die Ursachen der geschilderten Überspannungen nur im Schalter oder nur im Netz zu suchen. Nur das Zusammenwirken beider kann bei hohen Betriebsspannungen, insbesondere bei Speisung aus separaten Gruppen, zum gefürchteten Hackspiel führen. Ist aber der Schalter imstande, Rückzündungen zu verhindern, so fällt dieses ganze Hackspiel weg, und der Vorgang reduziert sich bei unsern kurzen Leitungen auf jenen der Fig. 12. Solange man mit rückzündenden Schaltern rechnen muss, wird es der FKH nicht an Arbeit zur Abklärung von Schaltüberspannungen fehlen. Wenn aber einmal die Rückzündungen praktisch verschwunden sein werden, wird es möglich sein, mit einem «transienten Netzmodell» jeden Schaltvorgang in Netzen abzubilden, mögen diese noch so kompliziert sein. Bezüglich der Bemessung der erforderlichen Isolation von Höchstspannungsleitungen ist damit ein Fortschritt zu erwarten.

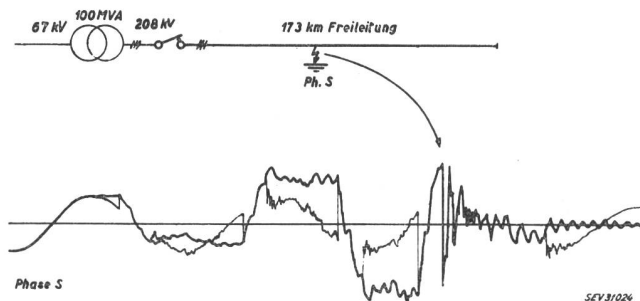


Fig. 19

Wie Fig. 18, aber Spannungen beidseitig des Schalters im gleichen Maßstab über derselben Nulllinie gezeichnet

⁸⁾ Siehe K. Berger und H. Habich, Bull. SEV, 1929, Nr. 20.

Ein solches Netzmodell konnte für das Hochspannungslabor der ETH angeschafft werden. Es steht für praktische Probleme zur Verfügung.

Welches sind nun die Massnahmen zur Verhinderung unzulässiger Überspannungen beim Schalten von leerlaufenden Leitungen?

Zunächst ist zu bemerken, dass bei Verwendung rückzündfreier Schalter das Überspannungsproblem sich auf die Wirkung des Abreißstromes und die wohl bekannten 50-Hz-Spannungserhöhungen durch Kapazitätslast reduziert. Beim Schalten leerlaufender Leitungen von schweizerischer Kürze sind dabei gefährliche Überspannungen im allgemeinen nicht zu erwarten. Die folgenden Ausführungen beziehen sich somit auf die mit Rückzündungen behafteten Schalter, die heute noch einen grossen Teil der im Betrieb befindlichen bilden.

In erster Linie wird man versuchen, die im Netz begründeten Ursachen hoher Überspannungen zu beseitigen. Das ist praktisch oft möglich durch Verhinderung eines allzu knappen Maschineneinsatzes in Höchstspannungsnetzen, wie das ja auch zur Verhinderung übermässiger 50-Hz-Spannungserhöhungen an langen Leitungen oder gar Kabeln nötig ist. Je stärker das speisende Netz, umso kleiner die Überspannung.

Denken wir uns zum Beispiel den Fall, wo ein mässig grosses Kraftwerk über eine Übertragsleitung auf ein sehr starkes Verbrauchernetz mit grosser Kurzschlussleistung arbeitet, und durch irgend einen Grund eine plötzliche Abschaltung der Übertragsleitung erfolgt. Dann sollte grundsätzlich danach getrachtet werden, zuerst die Kraftwerkschalter auszulösen und eine oder wenige Perioden später den netzseitigen Leitungsschalter, damit dieser die Leerabschaltung der Leitung vollzieht. Dies vor allem dann, wenn der Maschineneinsatz des Kraftwerkes nicht des Mehrfachen der kapazitiven Ladeleistung der Leitung beträgt.

In zweiter Linie kommt auch beim Leitungsschalten ein zweistufiger Schalter in Frage, d. h. ein Schalter mit Widerstand und Hilfsschalter, ähnlich wie beim Ausschalten leerlaufender Transformatoren.

In dritter Linie können Ableiter oder Schutzfunkenstrecken, d. h. auf das Schutzniveau eingestellte Stabfunkenstrecken zur Überspannungsbegrenzung an Leitungen herangezogen werden.

Bis 50 kV besteht keine Schwierigkeit für den Einbau von Ableitern an Leitungsenden, wofür bei ausgedehnten Anlagen mit Holzstangenleitungen ein gewisses Bedürfnis im Hinblick auf atmosphärische Überspannungen besteht. Funkenstrecken kommen wohl nur bei Höchstspannungen mit leitenden Masten in Frage. Sie führen beim Ansprechen zum Erdschluss und Kurzschluss und für den Schalter bei Leerabschaltungen zu einer Art «Umschlagsstörung» (Fig. 18). Da jedoch beim Schalten einer offenen Leitung die Überschläge zum grössten Teil am freien Leitungsende oder dann auf der Speiseseite entstehen, ist im ersten Fall der Kurzschluss am Leitungsende praktisch harmlos, auch für den Schalter. Für die speiseseitige Überspannung nach dem Öffnen des Schalters wirkt andererseits der beim Transformator eingebaute Ableiter als Schutz. Auf diese in unsern Höchstspannungsnetzen übliche Weise des Schutzes wird vermieden, dass ein Ableiter die grosse elektrische Ladungsenergie einer langen Leitung aufnehmen muss, und es ist in allen Fällen ein wirksamer Überspannungsschutz der ganzen Anlage vorhanden.

Diese Praxis hat sich bei unsern Betriebsspannungen von 150 kV und darüber recht gut bewährt. Insbesondere hat sich gezeigt, dass die auf das CEI-Schutzniveau eingestellten Schutzfunkenstrecken ganz ausserordentlich selten ansprechen.

Zum Schluss kommend möchte ich allen meinen

Mitarbeitern bei der FKH und an der ETH bei dieser Gelegenheit für ihre Mitarbeit bei den Versuchen und deren Auswertung recht herzlich danken.

Adresse des Autors:

Dr. sc. techn. K. Berger, Prof. ETH, Versuchsleiter der FKH, Seefeldstrasse 301, Zürich 8.

Druckluftschalter und Magnetschalter für Innenraum-Anlagen

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 30. und 31. Januar 1962 in Zürich, von J. Schneider, Zürich

621.316.57.064.45-744

In der Bauart der Hochspannungsschalter haben sich bis heute noch keine einheitlichen Ansichten herausgebildet, wie z. B. im Elektromaschinenbau. Das steht damit im Zusammenhang, dass Schaltvorgänge zu den schwierigsten Problemen der Elektrotechnik gehören. Die Verschiedenartigkeit und die grosse Zahl der zu beachtenden Vorgänge bringt es mit sich, dass man mit Verallgemeinerungen und der Überwertung einzelner Eigenschaften sehr vorsichtig sein muss.

1. Druckluftschalter für Innenraum-Anlagen

1.1 Entwicklungsstufen

Anlässlich der Schaltertagung von 1938 sind die einzelnen geschichtlichen Entwicklungsstufen eingehend behandelt worden. Ergänzend seien hier nur noch einige interessante Ausführungsformen erwähnt. Ein rasches und sicheres Löschen des Lichtbogens wird durch eine Relativbewegung von Lichtbogen und

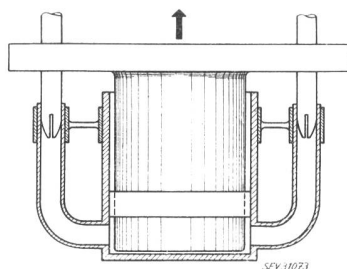


Fig. 1

Schalterkonstruktion aus dem Jahre 1900 mit axialer Lichtbogenbeblasung und konzentrischer Luftströmung

Löschmedium zueinander erreicht. Auf dieser Erkenntnis basieren bereits die ersten Schalter, die Luft als Löschmittel verwendeten.

Fig. 1 zeigt eine Schalterkonstruktion von Brown Boveri aus dem Jahre 1900. Durch Herausziehen der

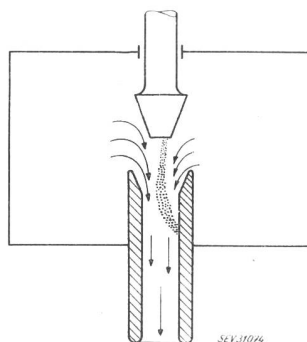


Fig. 2

Löschkammer-Konstruktion aus dem Jahre 1923 mit der Unterbrechungsstelle im Druckluftbehälter

Traverse mit dem Luftkolben entsteht an den beiden Unterbrechungsstellen eine starke Luftströmung. Diese Konstruktion dürfte einer der ersten Schalter mit axialer Lichtbogenbeblasung und konzentrischer Luftströmung gewesen sein. Bei der Schalteranordnung nach Fig. 2 wurde vor allem Wert darauf gelegt, dass das zum Löschen erforderliche Druckgas in einer unmittelbar die Kontakte umgebenden Druckkammer gespeichert war und ohne Druckverlust den Lichtbogen beblasen konnte. Dieser Schalter wurde 1923 gebaut.

Die Erkenntnis, dass der Druckluftschalter mit fremd erzeugtem Druck kürzeste Unterbrechungszeiten gestattet, führte dann in Verbindung mit dem Bau grosser Kurzschlussanlagen zu sehr leistungsfähigen Schaltern. Die wichtigste konstruktive Forderung bestand in einer symmetrischen Anordnung des Festkontaktes und der Düse mit axialem Lichtbogen, so dass diesem ein Ausweichen in irgend einer Richtung unmöglich gemacht wird und zugleich die Fusspunkte intensiv beblasen werden. Fig. 3 zeigt die Abhängigkeit der Ausschaltleistung von der Unterbrechungsdistanz. Bei zu geringen Öffnungen ist die Durchschlagfestigkeit zu klein, bei zu grossen Unterbrechungsdistancen geht der Effekt der Luftzusammendrängung vor der Düse und dem Festkontakt verloren, so dass die Durchschlagfestigkeit wieder sinkt. Daraus ergibt sich eine günstigste Löschkammer. Düsendurchmesser, das Verhältnis der Zuflussquerschnitte, der Druckverlauf wäh-

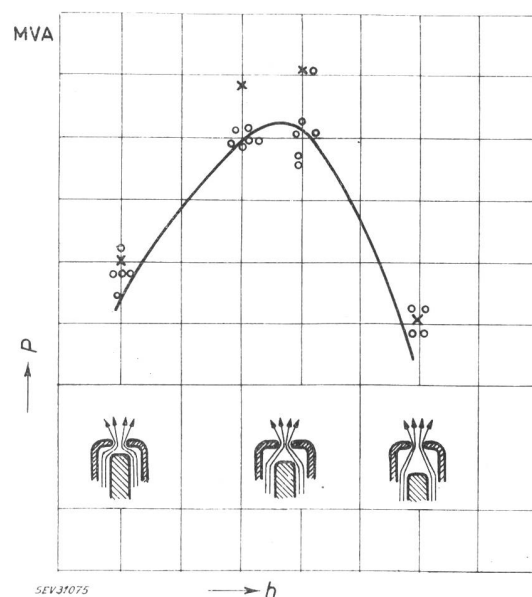


Fig. 3

Abhängigkeit der Ausschaltleistung von der Unterbrechungsdistanz eines Druckluftschalter-Leistungskontaktes
P Ausschaltleistung; h Hub