

Überspannungen beim Schalten leerlaufender Transformatoren und Leitungen

Von

K. Berger, Zürich

Sonderabdruck

aus dem Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Jahrgang 1953, Nr. 9

Überspannungen beim Schalten leerlaufender Transformatoren und Leitungen

Zusammengestellt von K. Berger, Zürich,

unter Mitwirkung eines Ausschusses des Fachkollegiums 17 A (Hochspannungsschalter) des Schweiz. Elektrotechnischen Komitees

621.316.542.027.3 : 621.314.2.015.3 + 621.315.1.015.3

Der Bericht enthält eine Zusammenfassung der Resultate von oszillographischen Messungen über die Grösse der Überspannungen, die beim Ausschalten leerlaufender Transformatoren und Leitungen in Hochspannungsanlagen entstehen. Die Messungen sind zum Teil von der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) in der Schweiz, zum Teil von schweizerischen Fabrikanten von Hochspannungsschaltern in ausländischen Anlagen durchgeführt worden. Die Zusammenstellung aller Messwerte erfolgte durch die FKH im Auftrage des Comité d'Etudes No 17 (Schalter) der CEI; der Bericht wurde diesem in seiner Sitzung von Scheveningen im Herbst 1952 vorgelegt.

Ce rapport récapitule les résultats de mesures oscillographiques sur la grandeur des surtensions de déclenchement de transformateurs à vide et de lignes ouvertes dans des installations à haute tension. Ces mesures ont été exécutées en partie par la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension (FKH), en Suisse, et en partie par des fabricants suisses de disjoncteurs à haute tension dans des installations à l'étranger. Toutes ces mesures ont été collationnées par les soins de la FKH, sur demande du Comité d'Etudes no 17 (Appareils d'interruption de la CEI, auquel ce rapport a été présenté, lors de la réunion de Schéveningue, en automne 1952.

Die Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) hat auf Anregung des Fachkollegiums 17 A (Hochspannungsschalter) des Schweiz. Elektrotechnischen Komitees (CES) alle verfügbaren Messwerte von Überspannungen beim Schalten von leerlaufenden Transformatoren und Leitungen zusammengestellt. Diese Messungen stammen zum Teil aus Schaltversuchen in schweizerischen Hochspannungsanlagen, welche die FKH im Auftrag von Elektrizitätswerken durchführte. Weitere Messreihen sind von schweizerischen Fabrikationsfirmen für Hochspannungsschalter in ausländischen Anlagen durchgeführt worden. Der Bericht enthält alle diese uns zugänglichen Messwerte. Die Resultate des Berichtes wurden im Herbst 1952 in Scheveningen dem Comité d'Etudes No 17 der Commission Electrotechnique Internationale (CEI), vorgelegt, welches seinerzeit eine solche Information über die Höhe von Schaltüberspannungen gewünscht hatte. Sämtliche Messungen betreffen Hochspannungsschalter schweizerischen Ursprungs¹⁾.

Eine Liste der ausgeführten Messreihen mit Angaben über Anlage, Spannung, Transformatoren und Schalterart zeigt Tabelle I.

Die Resultate jeder Messreihe zeigen die Fig. 1...23, eine Zusammenfassung aller Resultate die Fig. 24 und 25.

Zu den Figuren ist zu bemerken, dass infolge der bekanntlich im allgemeinen grossen Streuung der Einzelwerte der Überspannungen es am besten ist, alle Einzelwerte als Messpunkte anzugeben. In den zusammenfassenden Tabellen dagegen ist lediglich der Streubereich der Messungen sowie der Mittelwert der gemessenen Überspannungen angegeben.

¹⁾ Die Zusammenstellung ist im Herbst 1952 abgeschlossen worden; über weitere Messungen soll evtl. später berichtet werden.

Bedeutung der in den Figuren 1...25 benützten Symbole und Bezeichnungen

A. Daten der Versuchsanlage

- U_B Effektivwert der verketteten Netzspannung während der Versuche. Falls diese Spannung nicht genau bekannt ist, gilt die Nennspannung des Netzes.
- f Netzfrequenz (50, 60 oder $16\frac{2}{3}$ Hz).
- Art der Nullpunktserdung (NPE): direkt, isoliert oder über Löschspule.
- P_{KS} ungefähre Kurzschlussleistung im speisenden Netzpunkt. Im Fall der Speisung aus einem separaten Transformator gilt die Kurzschlussleistung dieses Transformators.

B. Daten des im Leerlauf abgeschalteten Objektes

a) Transformator

Typ und Herstellungsjahr.

P_n Nennleistung.

$\ddot{u} = \frac{U_{\text{primär}}}{U_{\text{sekundär}}}$: Leerlaufübersetzung. Im Falle eines Transformators mit Stufenregulierung: Stellung des Stufenschalters.

Transformator-Schaltung: Stern—Stern, Stern—Dreieck oder Dreieck—Stern.

ε Kurzschlußspannung in %.

I_μ Magnetisierungsstrom in A für Leerlaufspannung, Effektivwert.

b) Leitungen

L Länge der Leitung in km (Länge des Leiters, wenn die Versuche auf nur einer Phase durchgeführt wurden).

I_c kapazitiver Ladestrom der Leitung in A (bzw. des Leiters, wenn nur einphasiger Versuch), Effektivwert.

Zusammenstellung der im Bericht angeführten Messreihen

1. Messreihen über Schaltüberspannungen beim Ausschalten von Transformatoren

Tabelle Ia

Ort der Messung	Spannung der Anlage kV	Frequenz Hz	Art des verwendeten Schalters	Leistung des ausgeschalteten Transformators MVA	Messresultate in Fig.
Siebnen	50	50	Ölschalter (Kesselschalter) . . .	16,5	1
Siebnen	150	50	Ölschalter (Kesselschalter) . . .	16,5	2
Bickigen	150	50	Ölschalter (Kesselschalter) . . .	3×15	3
Bickigen	150	50	Ölstrahlschalter	3×15	4
Bickigen	50	50	Ölstrahlschalter	3×15	5
Laufenburg	50	50	Druckluftschalter	5,75	6
Laufenburg	6	50	Druckluftschalter	5,75	7
Rempen	50	50	Ölstrahlschalter	16,5	8
Bottmingen	50	50	Ölstrahlschalter	23,3	9
Bottmingen	150	50	Druckluftschalter	23,3	10
Bottmingen	150	50	Ölarmer Schalter	23,3	11
Bottmingen	150	50	Ölarmer Schalter	23,3	12
Bottmingen	50	50	Ölstrahlschalter	23,3	13
Grütze	15	16 $\frac{2}{3}$	Ölstrahlschalter und Ölschalter . .	3...9	14
Stadsforsen	220	50	Druckluftschalter	(2...66 A)	15

2. Messreihen über Schaltüberspannungen beim Ausschalten von Leitungen

Tabelle Ib

Ort der Messung	Spannung der Anlage kV	Frequenz Hz	Art des verwendeten Schalters	Länge der ausgeschalteten Leitung km	Freileitung F oder Kabel K	Mess- resultate in Fig.
Siebnen	150	50	Ölschalter	8 und 45	F	16
Bickigen	150	50	Ölstrahlschalter und Ölschalter . .	25	F	17
Grand Coulee	230	60	Druckluftschalter	$(1...3) \times 160$	F	18
Fontenay	220	50	Druckluftschalter	136...828	F	19
Fallou	220	50	Ölarmer Schalter	20...240	F	20
Fontenay	220	50	Ölstrahlschalter	18...420	F	21
St. Johann	110	50	Ölstrahlschalter	35 + 16	F + K	22
Stadsforsen	220	50	Druckluftschalter	72 und 480	F	23

C. Daten des Schalters

Typ und Herstellungsjahr.

- U_n Nennspannung.
 P_{KS} Abschaltleistung.
 n Anzahl der Unterbrechungsstellen pro Phase.
 p Betriebsdruck der Luft bei Druckluftschaltern.
 v Öffnungsgeschwindigkeit der Kontakte bei Ölschaltern.
 R Widerstandswert in Ohm der im Stromkreis liegenden Widerstände der Schalter, die die Löschung in 2 Operationen bewerkstelligen. [Ein Strich (—) bedeutet: Schalter ohne Widerstand.]

D. Überspannungen

Sofern nicht andere Angaben gemacht werden, sind alle Überspannungen mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen mit Hilfe kapazitiver Spannungsteiler gemessen worden.

Die Ausschaltüberspannung ist die höchste Spannung gegen Erde (u_{max} , momentaner Spitzen- oder Scheitelwert) gemessen im Verlaufe einer vollständigen Ausschaltoperation des Schalters. Der Ausschaltvorgang beginnt mit dem Speisen der Auslösespule des Schalters und ist beendet, wenn die Ausgleichsspannungen zwischen den drei Phasen verschwunden sind.

In den Fig. 1...25 ist jede Überspannung graphisch dargestellt durch ihren Relativwert, bezogen

auf den Scheitelwert der betriebsfrequenten Pol-(Phasen-)Spannung, ausgedrückt durch den Faktor k .

Für jede aufgenommene Abschaltung ist der Faktor k gemessen worden für jede der Phasen R , S und T . Sie sind in den Darstellungen der Fig. 1...23 entsprechend bezeichnet.

Beim Abschalten leerlaufender Transformatoren sind die Überspannungsfaktoren sowohl an den Klemmen der Primär- (k_{Pr}) als auch an denjenigen der Sekundär- (k_{sek}) Spannung bestimmt worden. Beim Abschalten leerlaufender Leitungen sind die Überspannungsfaktoren für die Leitungsseite (k_L) und für die Netzseiten (k_N) (im Falle der direkten Speisung aus dem Netz) bzw. für die Transformatorseite (k_T) (im Falle der Speisung der Leitung durch einen einzelnen Transformator) bestimmt worden.

Die verkettete Netzspannung im Moment der Ausschaltung wurde grösstenteils bestimmt durch Multiplikation des Mittelwertes der drei Spannungen gegen Erde mit $\sqrt{3}$. Die Phasenspannung wurde aus dem Scheitelwert, aufgenommen auf dem Oszillogramm vor dem Öffnen der Kontakte, durch Dividieren mit $\sqrt{2}$, bestimmt. Bei nicht sinusförmiger Spannungskurve können die so erhaltenen Werte um einige Prozent vom wirklichen Effektivwert abweichen. Dasselbe gilt für die Ströme.

Die Definitionen der Überspannungsfaktoren und die Symbole, die in den Darstellungen erwähnt wurden, sind die folgenden:

$k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	Überspannungsfaktor auf der Primärseite des Transformators	bei der Abschaltung eines leerlaufenden Transformators	m	Anzahl der bei gleichen Bedingungen untersuchten Abschaltungen
$k_{Sek} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}} \ddot{u}$	Überspannungsfaktor auf der Sekundärseite des Transformators			Überspannung begrenzt durch das Ansprechen eines Überspannungsableiters.
$k_L = \frac{u_{max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	Überspannungsfaktor auf Leitungsseite		$\int$	Überspannung begrenzt durch Überschlag einer Klemme auf Erde
$k_N = \frac{u_{max N}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	Überspannungsfaktor auf Seite des speisenden Netzes	bei der Abschaltung leerlaufender Leitungen	$\int$	Überspannung ruft einen Überschlag zwischen benachbarten Klemmen hervor
$k_T = \frac{u_{max T}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	Überspannungsfaktor auf Seite des speisenden Transformators			
$U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}$	Polspannung, Scheitelwert Mittel der drei Phasen			

Resultate

Die Resultate der Messreihen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Der Vergleich der Tabellen der Fig. 24 und 25 zeigt zunächst, dass die Überspannungen beim Leerschalten von Transformatoren wesentlich grösser sind als jene beim Leerschalten von Leitungen. Die ersteren erstrecken sich gemäss Fig. 24 auf 1...6,05-fache geschaltete Phasenspannung. Die grössten Überspannungen beim Leerschalten von Transfor-

Messungen Siebnen, 50 kV

Fig. 1

A. Netz

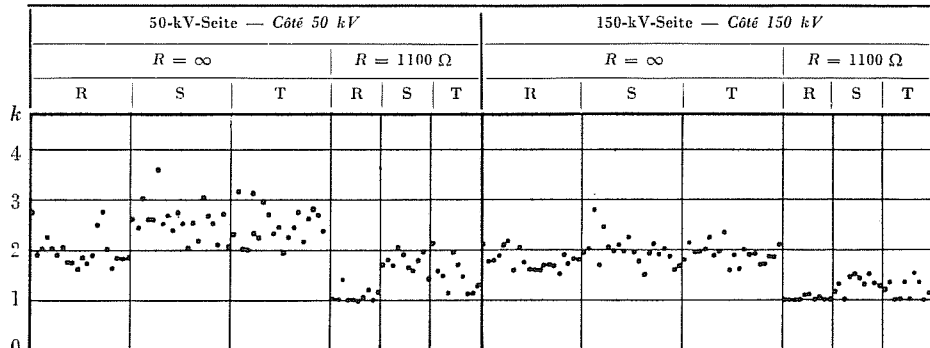
$U_B = 50 \text{ kV}$; $f = 50 \text{ Hz}$
NPE über Löschspule
 $P_{Ks} \approx 1500 \text{ MVA}$

B. Transformator 1925

$P_n = 16,5 \text{ MVA}$
 $\ddot{u} = 50,4/141 \text{ kV}$
Schaltung: $\uparrow/\uparrow$
 $I_\mu \approx 11 \text{ A}$; $\varepsilon = 10,5 \%$

C. Schalter 1925

3-Kessel-Ölschalter mit Löschkammern
 $U_n = 50 \text{ kV}$
 $P_{Ks} \approx 1000 \text{ MVA}$; $n = 2$
 $V \approx 2,6 \text{ m/s}$
($V_{Trav.} \approx 1,3 \text{ m/s}$)
 $R = \infty/1100 \Omega/\text{Phase}$



D. Überspannungen

$$m = 20$$

$$k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$$

$$k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$$



Messungen Siebnen, 150 kV

Fig. 2

A. Netz

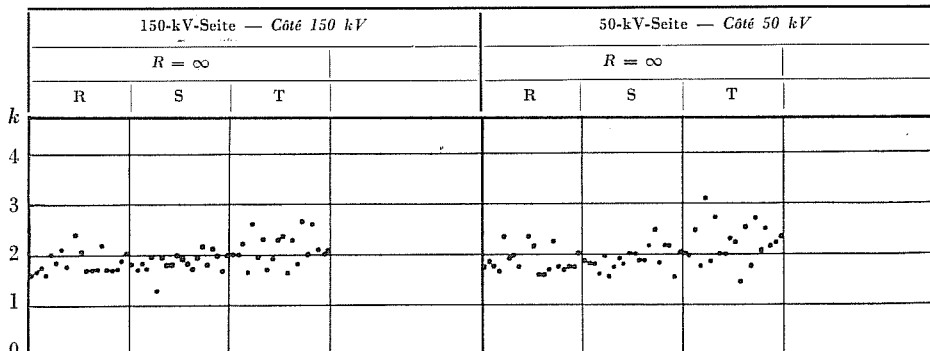
$U_B = 145 \text{ kV}$; $f = 50 \text{ Hz}$
NPE über Löschspule
 $P_{Ks} \approx 1500 \text{ MVA}$

B. Transformator 1925

$P_n = 16,5 \text{ MVA}$
 $\ddot{u} = 141/50,4 \text{ kV}$
Schaltung: $\uparrow/\uparrow$
 $I_\mu \approx 4 \text{ A}$; $\varepsilon = 10,5 \%$

C. Schalter 1925

3-Kessel-Ölschalter mit Löschkammern
 $U_n = 150 \text{ kV}$
 $P_{Ks} \approx 1500 \text{ MVA}$; $n = 2$
 $v \approx 3,9 \text{ m/s}$
($v_{Trav.} \approx 1,95 \text{ m/s}$)
 $R = -$



D. Überspannungen

$$m = 20$$

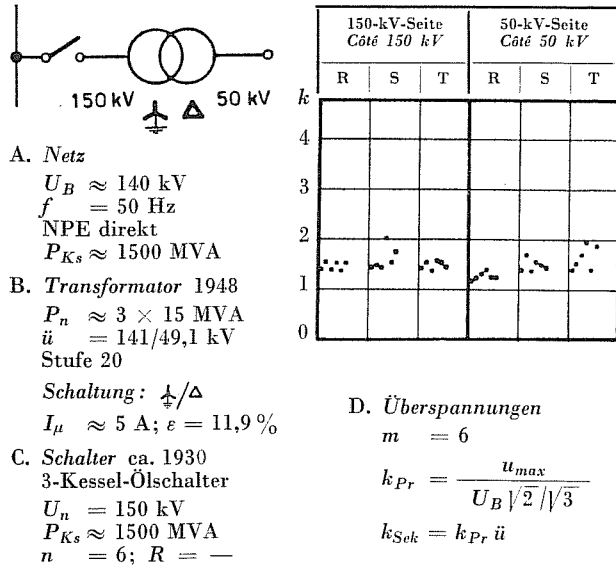
$$k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$$

$$k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$$



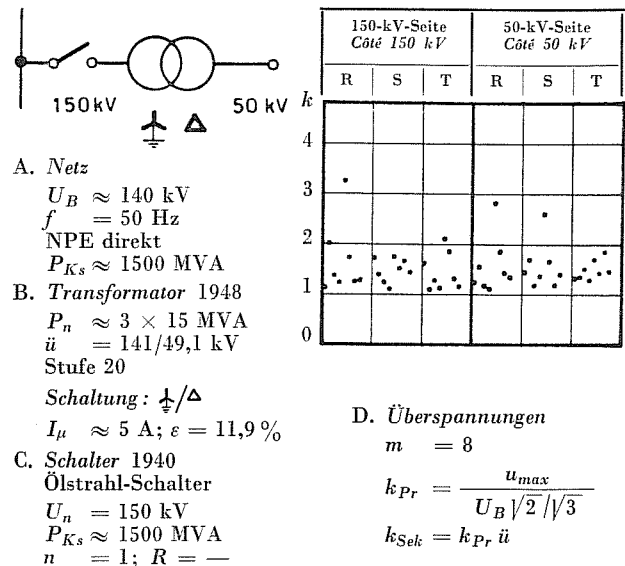
Messungen Bickigen, 150 kV

Fig. 3



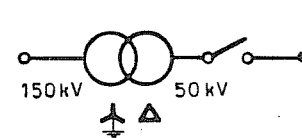
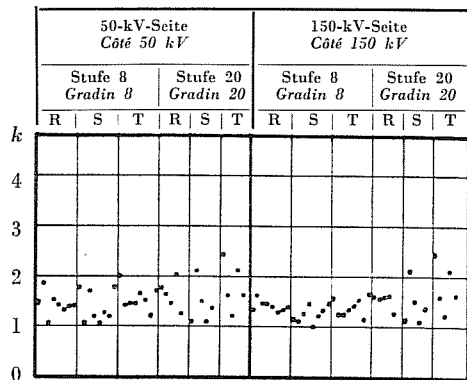
Messungen Bickigen, 150 kV

Fig. 4



Messungen Bickigen, 50 kV

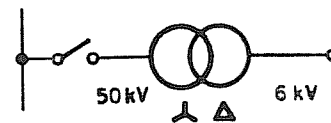
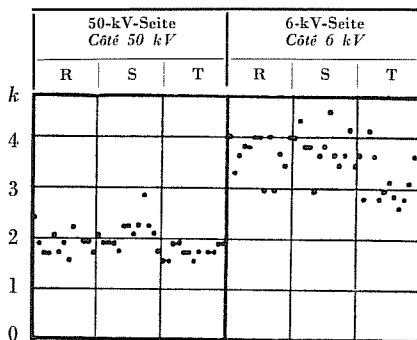
Fig. 5



Schaltung: Δ/Δ
 $I_\mu \approx 15,5 \text{ A}$
 $\varepsilon = 9,7/11,9 \%$

Messungen Laufenburg, 50 kV

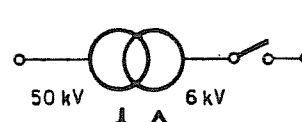
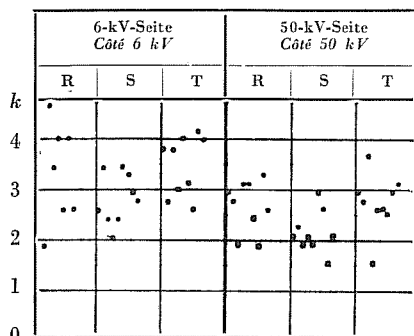
Fig. 6



Schaltung: Δ/Δ
 $I_\mu \approx 3 \text{ A}; \varepsilon = 3,43 \%$

Messungen Laufenburg, 6 kV

Fig. 7

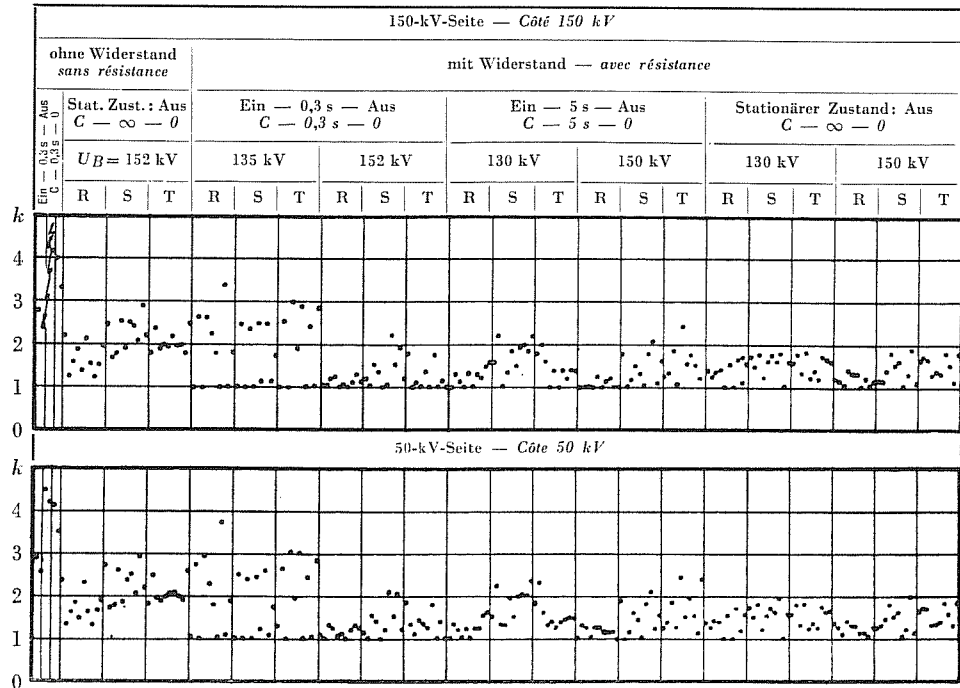


Schaltung: Δ/Δ
 $I_\mu \approx 24 \text{ A}; \varepsilon = 3,43 \%$

Messungen Bottmingen, 150 kV

Fig. 10

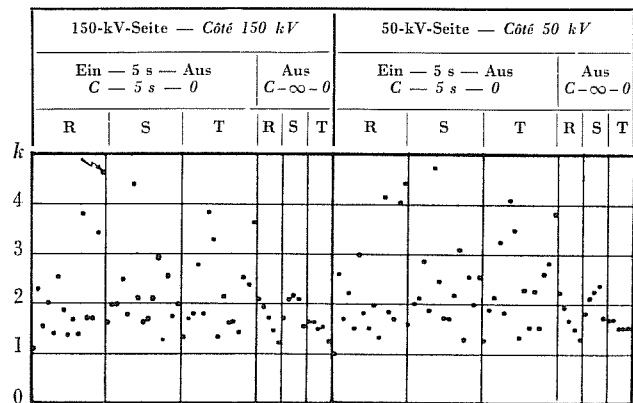
- A. Netz
 $U_B \approx 130/150$ kV
 $f = 50$ Hz
 NPE Löschspule, isoliert
 $P_{Ks} \approx 750/200$ MVA
- B. Transformator 1947
 $P_n = 23,3$ MVA
 Stufe 24: 167/64,1 kV
 Stufe 23: 167/63,28 kV
 Stufe 15: 167/56,7 kV
 Schaltung: $\frac{1}{2}/\frac{1}{2}$
 $\varepsilon = 10\%$
 $I_\mu \approx 4$ A (5,5 %)
- C. Schalter 1948
 Druckluft-Schalter
 $U_n = 150$ kV
 $P_{Ks} = 2500/3500$ MVA
 $n = 4$
 $R = \infty/\text{veränderlich}$
 $p = 15$ kg/cm²
- D. Überspannungen
 $m = 2...10$
 $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$
 $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$



Messungen Bottmingen, 150 kV

Fig. 11

- A. Netz
 $U_B = 143/156$ kV
 $f = 50$ Hz
 NPE über Löschspule
 $P_{Ks} \approx 750$ MVA
- B. Transformator 1947
 $P_n = 23,3$ MVA
 $\ddot{u} =$ Stufe 15:
 167/56,7 kV
 Schaltung: $\frac{1}{2}/\frac{1}{2}$
 $I_\mu \approx 4$ A; $\varepsilon = 10\%$
- C. Schalter 1949
 Ölarmer Schalter
 $U_n = 150$ kV
 $P_{Ks} = 1500$ MVA
 $n = 1$; $R = -$
- D. Überspannungen
 $m = 5...15$
 $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$
 $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$



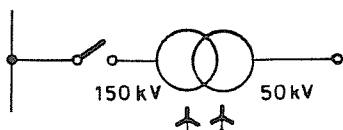
matoren erscheinen stets an den Klemmen dieser Transformatoren nach ihrer Abtrennung vom Netz. Demgegenüber können die grössten Überspannungen beim Ausschalten von leerlaufenden Leitungen in besondern Fällen, nämlich beim Speisen aus einem einzelnen Transformator ohne Nullpunkterdung, am speisenden Transformator selber erscheinen. Diese Überspannungen variieren zwischen 1...4,5-facher Phasenspannung. Die Überspannungen an der ausgeschalteten Leitung selber sind wesentlich kleiner als an ausgeschalteten Transformatoren; sie bleiben gemäss Fig. 25 stets innerhalb 1...2,5facher Phasenspannung. Diese Unterschiede sind verständlich, weil der physikalische Vorgang beim Ausschalten von Transformatoren und Leitungen ganz verschieden ist. Beide Fälle lassen sich nicht in einen Tiegel werfen; sie werden nachstehend getrennt besprochen.

a) Die Überspannungen beim Ausschalten leerlaufender Transformatoren oder allgemein bei der Unterbrechung kleiner induktiver Ströme entstehen infolge des vorzeitigen Abreissens des labilen Schalterlichtbogens vor dem stationären Nulldurchgang des Stromes. Die Grösse der Überspannungen ist, abgesehen von den Daten der Netzteile beidseitig des Schalters (Transformator, Drosselspulen usw.), bedingt durch die Art und Weise der elektrischen Verfestigung der Lichtbogenstrecke im Verlauf des Spieles rasch aufeinander folgender Rückzündungen im Schalter, ohne welche die Überspannung im Transformator unzulässige Werte erreichen würde [1]¹⁾. Diesen rasch aufeinander folgenden Rückzündungen im Schalter kommt hier eine durchaus erwünschte Wirkung im Sinne einer Begrenzung der Überspannungen zu. In der Tat kann man sich die Über-

¹⁾ siehe Literatur am Schluss.

Messungen Bottmingen, 150 kV

Fig. 12



A. Netz

$U_B = 150 \text{ kV}; f = 50 \text{ Hz}$
 NPE über Löschspule
 $P_{Ks} \approx 750 \text{ MVA}$

C. Schalter 1949

Ölarmer Schalter
 $U_n = 150 \text{ kV}$
 $P_{Ks} = 1500 \text{ MVA}$
 $n = 1$
 $R = 10000 \Omega$

B. Transformator 1947

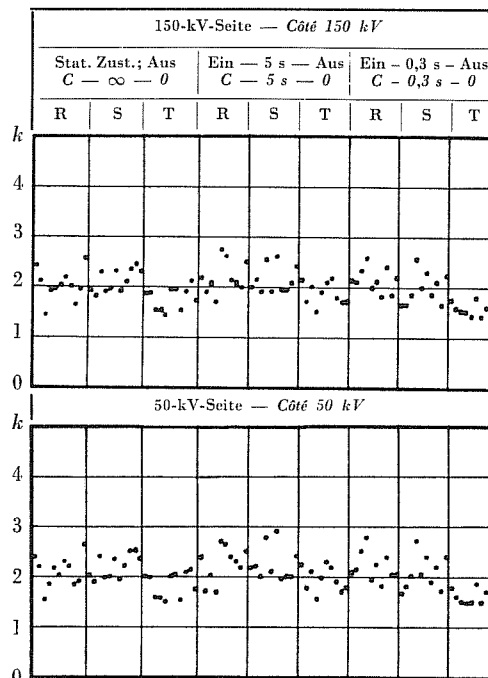
$P_n = 23,3 \text{ MVA}$
 $\ddot{u} = \text{Stufe 15:}$
 167/56,7 kV

D. Überspannungen

$m = 10 \dots 11$
 $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$
 $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$

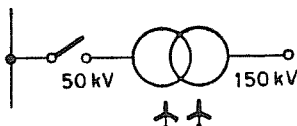
Schaltung: $\uparrow/\uparrow$

$I_\mu \approx 4 \text{ A}; \varepsilon = 10 \%$



Messungen Bottmingen, 50 kV

Fig. 13



A. Netz

$U_B = 47 \text{ kV}; f = 50 \text{ Hz}$
 NPE isoliert
 $P_{Ks} \approx 500 \text{ MVA}$

B. Transformator

$P_n = 23,3 \text{ MVA}$
 $\ddot{u} = \text{Stufe 15: } 56,7/167 \text{ kV}$
 $\ddot{u} = \text{Stufe 3: } 46,8/167 \text{ kV}$

Schaltung $\uparrow/\uparrow$

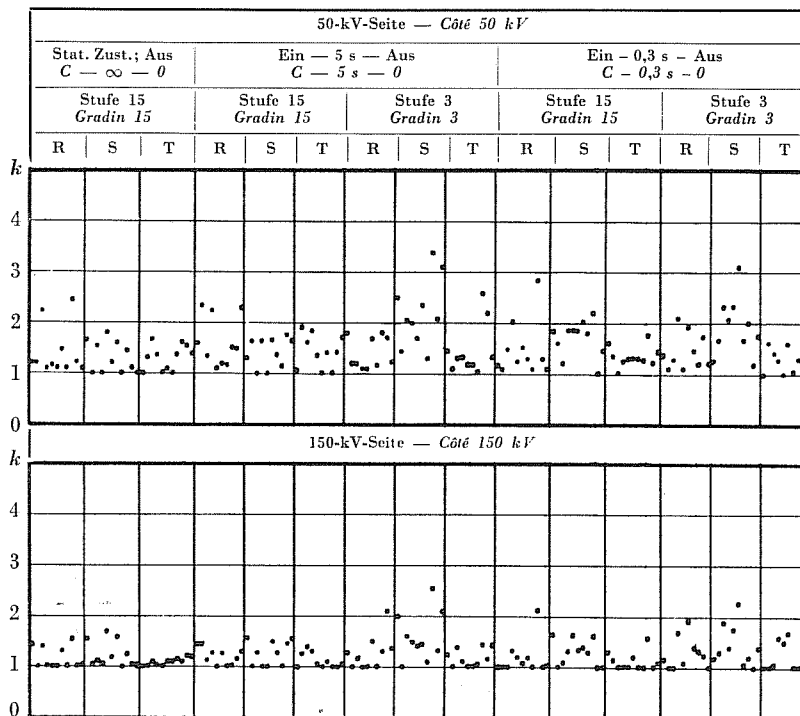
$I_\mu \approx 12 \text{ A}; \varepsilon = 10 \%$

C. Schalter 1952

Ölstrahl-Schalter
 $U_n = 60 \text{ kV}$
 $P_{Ks} = 435 \text{ MVA}; n = 1$
 $R = 2000 \Omega$

D. Überspannungen

$m = 10 \dots 11$
 $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$
 $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$



spannung am Transformator stets zusammengesetzt denken als Spannung des Netzes plus oder minus Spannung über den Schalter.

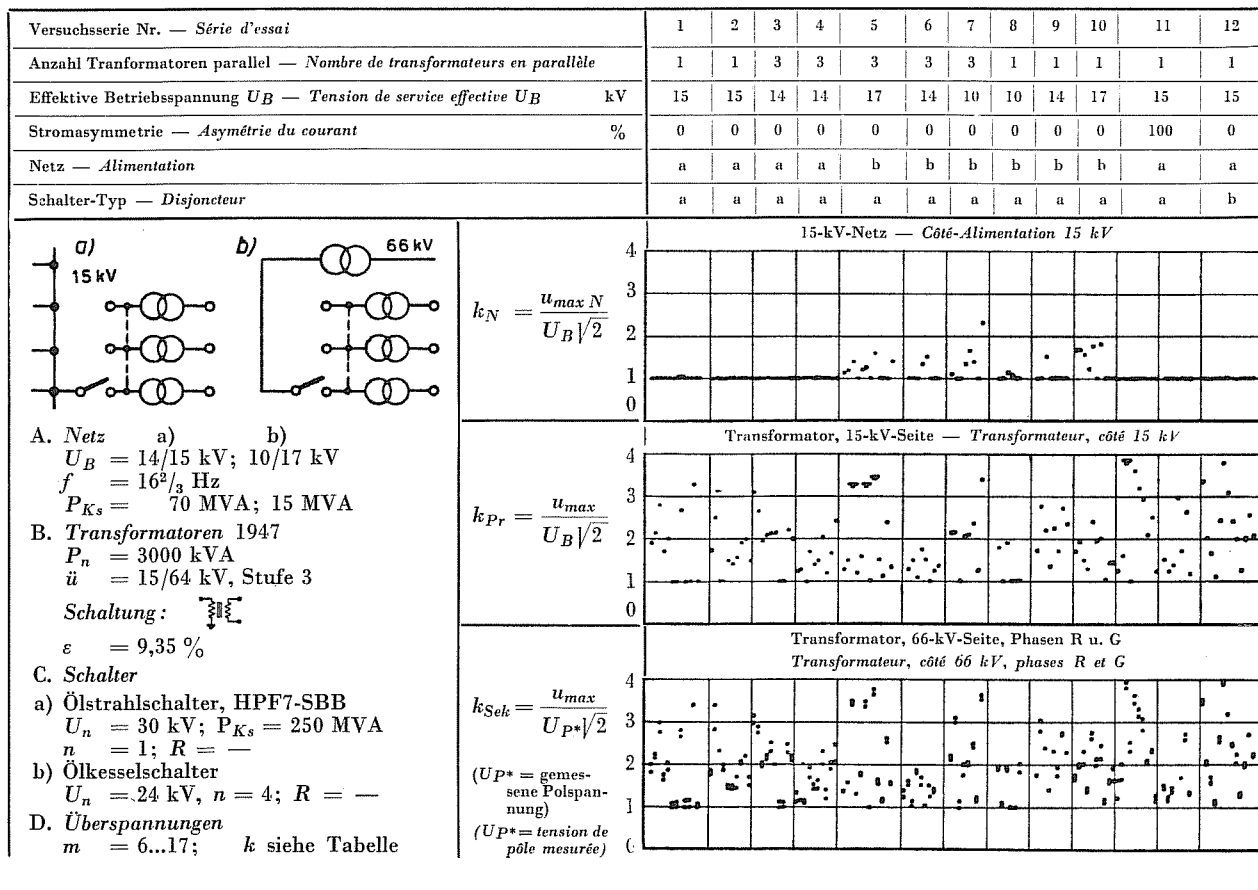
Für ein sehr starkes speisendes Netz begrenzt die höchstmögliche Spannung über den Schalter, das heisst entweder die Rückzündspannung des Schalters, oder die Restspannung an Überbrückungswiderständen die Überspannung am Transformator. Für ein «weiches», das heisst nicht starres speisendes Netz kann bei diesen Rückzündungen auch die

speisende Netzspannung etwas von ihrer normalen Form abweichen, so dass in diesem Fall auch das speisende Netz einen gewissen Einfluss auf die Höhe der Überspannung am Transformator ausüben kann [2; 3]. Es handelt sich hier nicht ausschliesslich um ein Schalterproblem, sondern um ein Schalter- und Netzproblem.

Für den Schalter ist ferner in Betracht zu ziehen, dass er im Betrieb nicht nur kleine induktive Ströme, sondern auch grosse Kurzschlußströme oder leer-

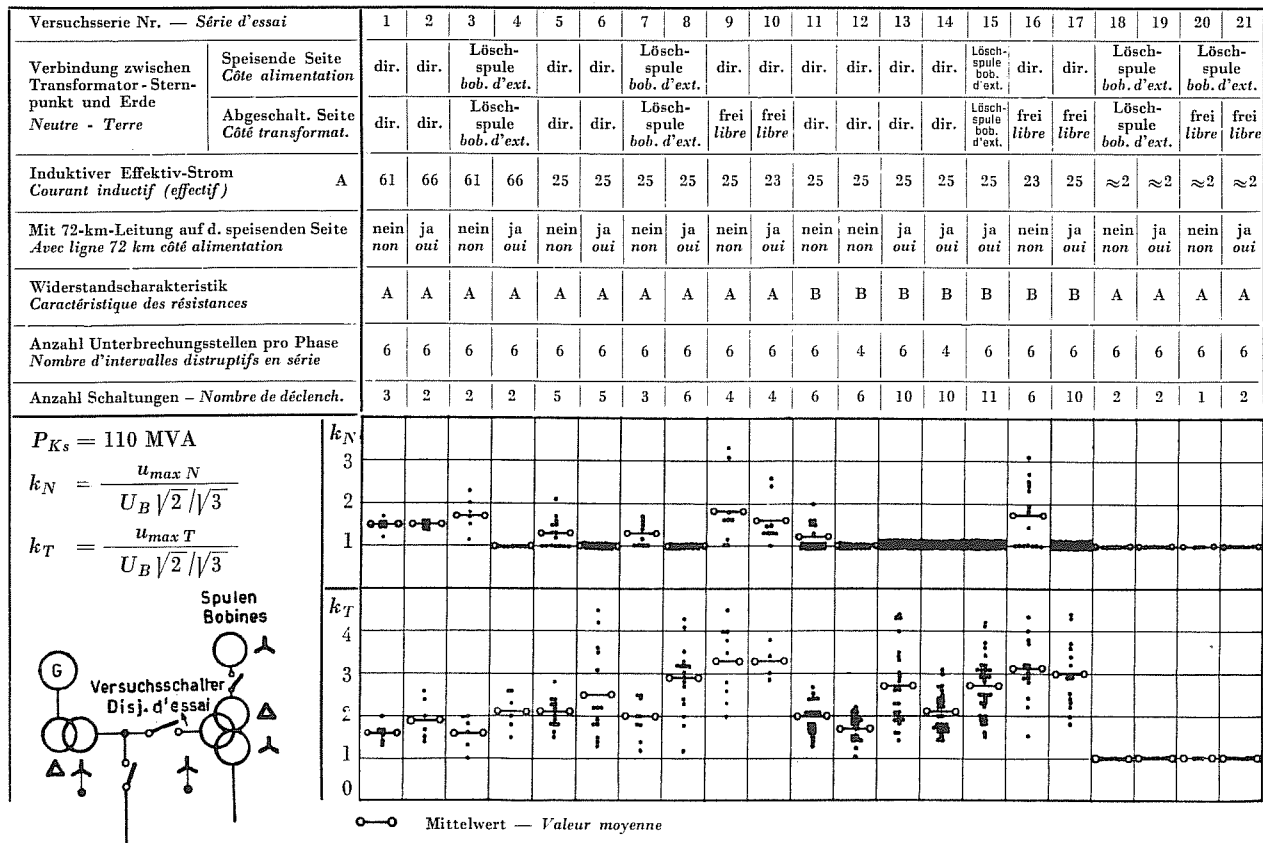
Messungen Grütze, 15 kV

Fig. 14



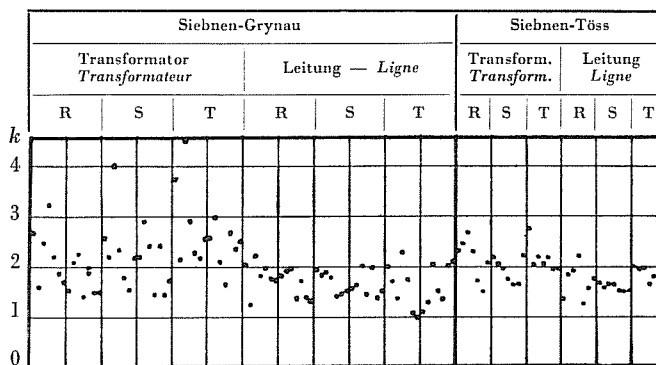
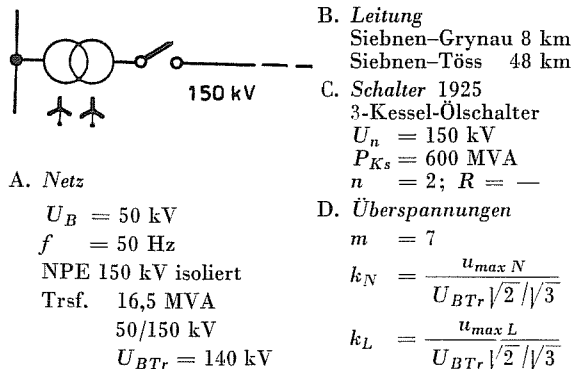
Messungen Stadtsforsen, 220 kV

Fig. 15



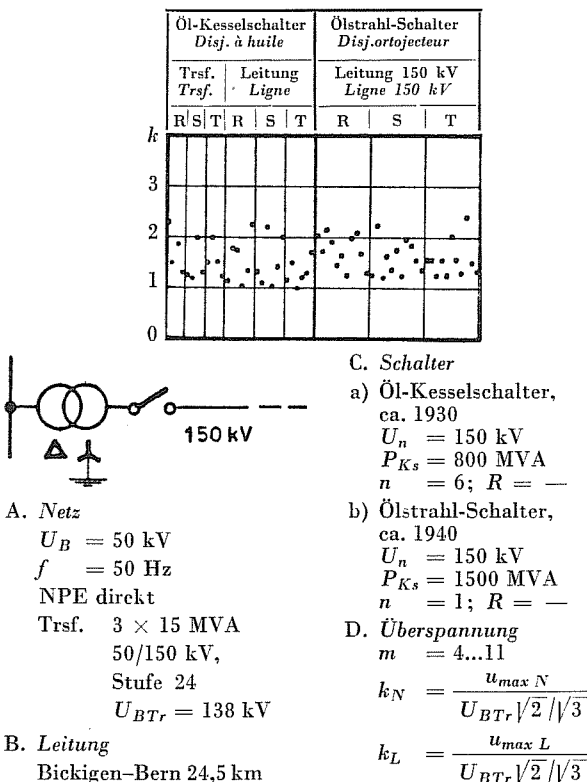
Messungen Siebnen, 150-kV-Leitung, Siebnen-Grynau-Töss

Fig. 16



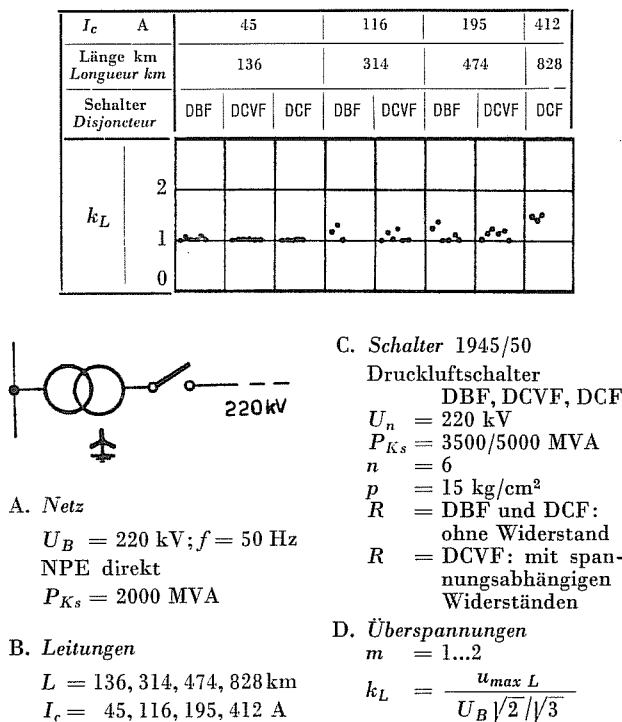
Messungen Bickigen, 150-kV-Leitung, Bickigen-Bern

Fig. 17



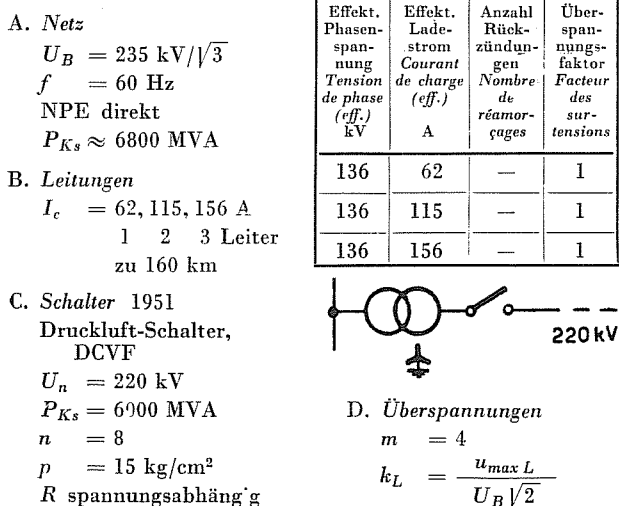
Messungen Fontenay, 220-kV-Leitungen

Fig. 19



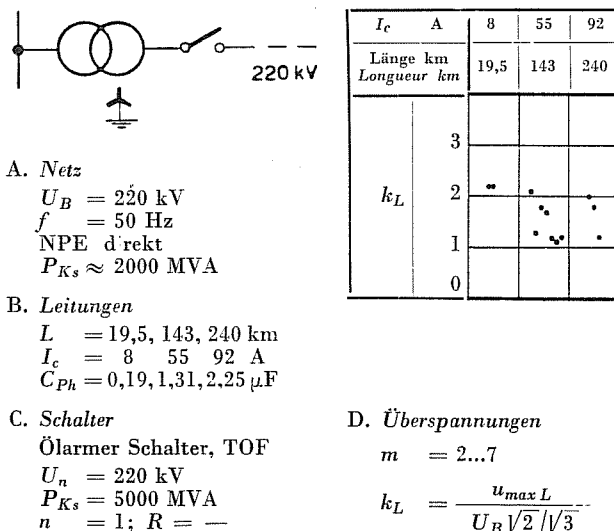
Messungen Grand Coulee, 220-kV-Leitungen

Fig. 18



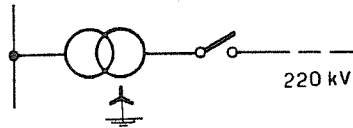
Messungen Fallou, 220-kV-Leitungen

Fig. 20



Messungen Fontenay, 220-kV-Leitungen

Fig. 21



A. Netz

$U_B = 220 \text{ kV}; f = 50 \text{ Hz}$
NPE direkt

C. Schalter

Ölstrahlschalter
HPF-14
 $U_n = 220 \text{ kV}$
 $P_{Ks} = 5000 \text{ MVA}$
 $n = 1; R = -$

B. Leitungen

$L = 18, 214, 420 \text{ km}$
 $I_c = 8,5, 63, 102 \text{ A}$

D. Überspannungen

$$m = 1 \dots 14$$

$$k_L = \frac{u_{\max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$$

$$k_N = \frac{u_{\max N}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$$

I_c A	8,5	63	102
Länge km Longueur km	18	214	420
k_L	4		
	3		
	2		
	1		
	0		
k_N	4		
	3		
	2		
	1		
	0		

Messungen St. Johann, 110-kV-Leitung St. Johann—Mallnitz

Fig. 22

A. Netz

$U_B = 110 \text{ kV}$
 $f = 16^{2/3} \text{ Hz}$
NPE über Löschspule

C. Schalter

Ölstrahl-Schalter, HPF 11
 $U_n = 110 \text{ kV}$
 $f = 16^{2/3} \text{ Hz}$
 $n = 1; R = -$

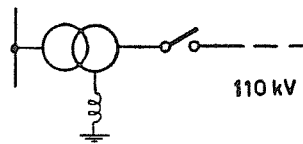
B. Leitung

St. Johann—Mallnitz
 $L = 35,2 \text{ km}$
Freileitung
+ 15,7 km Kabel
 $I_c = 60 \dots 78 \text{ A}$

D. Überspannungen

$$m = 8$$

$$k_L = \frac{u_{\max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$$

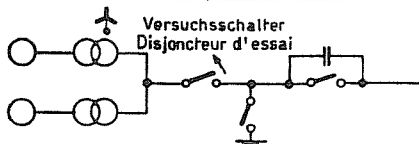


Phase	Phase
U	V
2	
1	
0	

Messungen Stadtforsen, 220 kV

Fig. 23

Verbindung zwischen Transformator-Sternpunkt und Erde Neutre — Terre	direkt direct	über Löschspule par bobine d'extinction	über Löschspule par bobine d'extinction	direkt direct	direkt direct	über Löschspule par bobine d'extinction	über Löschspule par bobine d'extinction	über Löschspule par bobine d'extinction
Mit Serie-Kondensator 31000 kVA ungefähr Mitte Leitung — Avec condensateur 31000 kVA en série env. au milieu de la ligne	nein non	nein non	nein non	nein non	ja oui	ja oui	ja oui	nein non
Leitungslänge — Longueur de la ligne km	72	72	72	480	480	480	480	480
Mit Erdschluss einer Phase Avec mise à terre d'une phase	nein non	nein non	ja oui	nein non	nein non	nein non	ja oui	ja oui
Effektiver Strom — Courant (eff.) A	27	27	36/0	190	190	190	280/0	280/0
Anzahl Schaltungen — Nombre de déclenchements	4	4	4	4	3	1	2	2
A. Netz $U_B = 220 \text{ kV}; f = 50 \text{ Hz}$ NP starr geerdet, über Löschspule $P_{Ks} = 320 \text{ MVA}$ 2 Transformatoren à 50 MVA, 9,8/230 kV	k_N	$\frac{u_{\max N}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{\max N}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{\max N}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{\max N}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{\max N}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{\max N}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{\max N}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$
	3							
	2							
	1							
	0							
B. Leitungen $L = 72; 480 \text{ km}$ $I_c = 27; 190 \text{ A}$ ohne Erdschluss 36/0; 280/0 mit Erdschluss	k_L	$\frac{u_{\max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{\max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{\max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{\max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{\max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{\max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{\max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$
	3							
	2							
	1							
	0							
C. Schalter 1951 Druckluftschalter, DCVF $U_n = 220 \text{ kV}$ $P_{Ks} = 5000 \text{ MVA}; n = 6$ $p = 15 \text{ kg/cm}^2$ R spannungsabhängig								
	3							
	2							
	1							
	0							
D. Überspannungen $m = 1 \dots 4$ k_N und k_L : siehe Tabelle								
	3							
	2							
	1							
	0							



$U_B = 220 \text{ kV}$

— Mittelwert
Valeur moyenne

● Maximalwert — Valeur maximum

Überspannungen beim Abschalten leerlaufender Transformatoren

Fig. 24

Fig.	Ort	Netz		Netzdaten		Kurzschlussleistung		Nennspannung kV	Schalter		Nennleistung MVA	Mit Spulen	Abgeschaltete Transformatoren		Abschaltungen		Überspannungen		Schema	
		Netz	Strompunkt geerdet oder isoliert	Frequenz Hz	50	1500	Typ		Parallelwiderstand Ω	Ab-schalt-leistung MVA			Bau-jahr	ε	u	Betriebs-spannung kV	Eff.Leit-lauf-strom A	Zahl		Cyklus
1	Stöben	AKW/NOK	Löschspule	50		1500	50	Kesselschalter	1100	1000	1925	16,5	10,5	141/50,4	50	11	20	C- ∞ -0	3,60 2,80 2,12 1,50 2,65 3,10	
2							150			1500										
3	Bicklingen	BKW	direkt	50		1500	150	Kesselschalter		1500	1930	3x15	11,9	141/48,1	140	5	6	C- ∞ -0	2,09 1,90 3,28 2,80 2,40 2,40	
4						1000	45	Ölschalter		1000			9,7/11,9		46	15,5	8			
5																	13			
6	Laufenburg	ATEL	Löschspule	50		500	50	Druckluftschalter		600	1946	5,75	3,43	48,2/6,3	48	3	13	C- ∞ -0	2,85 4,50 4,66 3,65	
7			isoliert				11			700					6,2	24	9			
8	Rampen	AKW	Löschspule	50		500/200	60	Ölschalter	5000/10000	750	1940	16,5	9,3	50/9,6	50	6,7	35	C- ∞ -0	4,42 7,05 2,85 3,02	
9	Bollmingen	ATEL	isoliert	50		500	60	Ölschalter		435	1940	23,3	10	107/46,56	46/53	12	9	C- ∞ -0	4,15 2,88 5,15 3,60 6,05 4,34	
10			Löschspule			750/200	150	Druckluftschalter		2500	1948				150	4	10	C- ∞ -0	2,90 2,95 4,30 4,50	
11									variabler Widerstand	3500							2	C-0,3 s-0	1,90 2,00 2,45 2,45 3,42 3,75	
12						750		Ölarmers Schalter	10000	1500	1949						5	C- ∞ -0	2,15 2,38 4,65 4,75	
13			isoliert			500	60	Ölschalter	2000	435	1952				47	12	11	C- ∞ -0	2,60 2,80 2,45 1,70 3,40 2,55	
14	Grüze	SBB		16 ² /3		70/15	30	Ölschalter		250		3	9,35	64/15	10/17		63		3,80 3,95 3,45 3,79 3,80 4,00	
15	Stadtsforsen	Kungliga Vattenfallens strömen	direkt	50	nein	110	220	Druckluftschalter	variabler Widerstand	5000	1951	60	21,4 (9,9/220 kV)	9,9/132/220	220	61	3	C- ∞ -0	1,70 2,00 1,60 2,60 2,30 2,00 1,00 2,60 2,10 2,80 1,05 4,50 1,70 2,50 1,05 4,30 3,30 4,50 2,60 3,80 1,00 1,00	

Legende der graphischen Darstellung:
Minimal-Wert
Maximal-Wert
arith. Mittelwert
Überschlag

Überspannungen bei Abschaltversuchen leerlaufender Leitungen in Hochspannungsnetzen

Fig. 25

Fig.	Netzdaten			Schalter			Speisende Transformatoren	Leerlaufende Leitung		Max. Überspannungsfaktor k			Prinzipschema					
	Ort	Netz	Nullpunkt geerdet oder isoliert	Frequenz Hz	Kurzschlussleistung MVA	Nennspannung kV		Typ	Parallelwiderstand Ω	Abschaltleistung MVA	Baujahr	Betriebsspannung kV		Länge km	Leerlaufstrom A	Anzahl Abschaltungen	speiseseitig	leitungseitig
16	Siebnen	Leitung Töss Grynau	isoliert	50		150	Kesselölschalter	—	600	1925	16,5 MVA 50/150 kV	140	48		7	2,8 4,5	2,2 2,3	
17	Blickigen	Leitung Bern	direkt	50		150	Kesselölschalter Ölstrahlschalter	—	800 1500	1930 1940	3 × 15 MVA 50/150 kV	138	24,5		6 11	2,3 —	2,3 2,4	
18	Coulée Dam		direkt	60	6800	220	Druckluftschalter	variabler Widerstand	6000	1951		235 / $\sqrt{3}$	160	62 115 156	4	1,0		
19	Fontenay		direkt	50	2000	220	Druckluftschalter	mit und ohne Parallelwiderstand	3500/5000	1945/1950		220	136 314 474 828	45 116 195 412	4 2	1,1 1,2 1,3 1,6		
20	Fallou		direkt	50	2000	220	Ölärmer Schalter	—	5000			220	19,5 143 240	8 55 92	2 7 3	2,2 2,1 2,0		
21	Fontenay		direkt	50		220	Ölstrahlschalter	—	5000			220	18 214 420	8,5 63 102	1 9 14	— 1,65 1,85	1,10 1,80 2,05	
22	St. Johann	Leitung Malnitz	Löschspule	16 $\frac{2}{3}$		110	Ölstrahlschalter	—				110	35,7 Leitung + 15,7 Kabel	60...78	8	1,6		
23	Stadsforsen		direkt Löschspule direkt Löschspule	50	320	220	Druckluftschalter	variabler Widerstand	5000	1951	60 MVA 9,8/132/220 kV	220	72	27 36/0 190	4	1,0 1,9 1,4 1,3 1,2 1,6 2,0 2,0	1,1 1,0 1,0 1,2	

- 1) 1 Leiter von 160 km, einphasige Versuche
2) 2 Leiter von 160 km, einphasige Versuche
3) 3 Leiter von 160 km, einphasige Versuche
- 4) $k = \frac{I_{max}}{220 / \sqrt{2}}$; mit einer Phase geerdet
5) mit Serie-Kondensator, Mitte Leitung
6) mit Serie-Kondensator, mit einer Phase geerdet
7) ohne Serie-Kondensator, mit einer Phase geerdet

Legende der graphischen Darstellung:
min. Wert
max. Wert
arithmetischer Mittelwert

aufende Leitungen oder in Opposition befindliche Netze schalten muss. Die sich daraus ergebenden Forderungen widersprechen sich besonders hinsichtlich der wünschbaren Verfestigung der Lichtbogenstrecke [4; 5]. Werden daher Schalter so gebaut, dass sie einer Anforderung gut entsprechen, so werden sie dafür gegenüber andern Anforderungen, die betrieblich ebenso wichtig sein können, vielleicht verschlechtert. Ein Beispiel dafür bildet der unter b) noch zu besprechende Vorgang beim Ausschalten leerlaufender Leitungen. Während dort die Unterdrückung hoher Überspannungen in erster Linie von der Vermeidung von Rückzündungen, das heisst von der möglichst raschen Verfestigung der Lichtbogenstrecke bedingt ist, gilt bei der Ausschaltung leerlaufender Transformatoren gerade das Gegenteil.

Aus diesem Grunde muss eine gewisse Überspannung zugelassen werden. Die Frage ist lediglich die nach der zulässigen Höhe. Mit Hilfe von Widerständen im Schalter ist es möglich, in jenen Fällen, wo der widerstandslose Schalter zu hohe Überspannungen am leergeschalteten Transformator ergibt, diese Überspannungen auf unschädliche Werte zu reduzieren. Die Messungen zeigen, dass die gefährlichsten Überspannungen beim Ausschalten induktiver Ströme der Grössenordnung von effektiv 5...40 A entstehen. Die Tatsache, dass die Abreissströme im Schalter bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten, macht es auch möglich, die Leerschaltüberspannungen mit Hilfe üblicher Überspannungsableiter zu begrenzen, welche am Transformator gegen Erde angeschlossen werden. Hinsichtlich der aus dem Magnetfeld des Transformators aufzunehmenden Energie werden diese Ableiter nicht höher beansprucht als durch jene Energie, die sie beim Ansprechen im Betrieb infolge atmosphärischer Überspannungen aufzunehmen imstande sein müssen.

b) Die Überspannungen beim Ausschalten leerlaufender Leitungen entstehen infolge von Schwingungen, die zwischen speisendem Netz und offener Leitung im Moment von Rückzündungen im Schalter einsetzen. Die Amplitude dieser Schwingungen ist gegeben durch die Differenz der Spannungen zu beiden Seiten des Schalters im Moment einer Rückzündung. Die eine dieser Spannungen ist die speisende Netzspannung, die andere die Spannung der noch geladenen Leitungskapazität. Diese Spannungsdifferenz ist am grössten jeweils eine halbe Periode nach einem Nulldurchgang des stationären Ladestromes. Der Schalter soll einen solchen Verlauf seiner wiederkehrenden Festigkeit aufweisen, dass dieses spezielle Rückzündungstempo äusserst unwahrscheinlich wird, oder dass überhaupt keine Rückzündungen auftreten. Die Messungen zeigen, dass diese Bedingungen im allgemeinen erfüllt werden können. Für die untersuchten schweizerischen Schalter und alle, selbst recht beträchtliche Leitungslängen, sind die gemessenen Überspannungen durchaus bescheiden. Auf diese Überspannungen kommt es aber an, nicht auf die Anzahl Rückzündungen.

Im Vergleich zu den Überspannungen beim Ausschalten kleiner induktiver Ströme sind jedenfalls

die Überspannungen beim Ausschalten von Leitungen beträchtlich kleiner. Sie bleiben bei allen durchgeführten Messungen durchaus gefahrlos.

c) Bei den unter a) und b) aufgeführten Versuchen ist sodann nicht ausser acht zu lassen, dass bei allen Schaltüberspannungen die Streuung und damit die Wahrscheinlichkeit des Auftretens hoher Werte eine grosse Rolle spielt. Es handelt sich durchwegs um ein statistisches Problem; Überspannungen sind um so seltener, je höher sie sind. Aus diesem Grunde spielt auch die Anzahl Messungen bei ein und derselben Anordnung eine ganz beträchtliche Rolle hinsichtlich des Maximalwertes der gemessenen Überspannungen: Je mehr Messungen, um so höher wird die grösste gemessene Überspannung irgend-einer Messreihe sein [6].

Ferner ist bei den Messreihen a) bezüglich der Leerschaltüberspannungen an Transformatoren zu bemerken, dass die angeführten Versuche zum Teil Anlagen betrafen, in welchen im Betrieb bereits Überspannungen oder Überschläge infolge von Überspannungen beobachtet worden waren. Es mag viele Stellen geben, wo die Überspannungen beim Schalten kleiner bleiben als in den hier gemessenen Anlagen, und bei der Verallgemeinerung der Resultate ist deshalb auch hier eine gewisse Vorsicht nötig.

Schliesslich ist darauf aufmerksam zu machen, dass in den Fig. 1...25 ausschliesslich die Höhe der Überspannungen dargestellt wird, nicht aber die Steilheit der Spannungsänderungen. Letztere hängt in erster Linie von der Grösse des Spannungssprunges (Δu) und von der Zeitkonstante oder Eigenzeit des Stosskreises in unmittelbarer Umgebung des Schalters ab (Kapazität des Transformators und seiner Zuleitungen, Distanz der Nullpunktserdung usw.). Im Gegensatz hierzu wird diese Steilheit der Spannungsänderung vom Schalter selber kaum beeinflusst, mindestens, solange er keine Widerstände enthält.

Literatur

- [1] Berger, K. und R. Pichard: Die Berechnung der beim Abschalten leerlaufender Transformatoren, insbesondere mit Schnellschaltern, entstehenden Überspannungen. Bull. SEV Bd. 35(1944), Nr. 20, S. 560...570.
- [2] Baltensperger, P.: Surtensions lors du déclenchement de faibles courants inductifs. CIGRE Bd. 2(1950), rap. 116.
- [3] Meyer, H.: Die grundlegenden Probleme der Hochspannungsschalter. Brown Boveri Mitt. Bd. 37(1950), Nr. 4/5, S. 108...123.
- [4] Vogelsanger, E.: Etude des courants et tensions maxima pouvant solliciter un disjoncteur dans un réseau monophasé ou polyphasé lors de la coupure de courts-circuits. CIGRE Bd. 1(1946), rap. 119.
- [5] Meyer, H.: Compte-rendu des essais sur réseau exécutés avec un nouveau type de disjoncteur pneumatique à très haute tension. CIGRE 1952, rap. 115.
- [6] Pichard, R.: Comparaison des surtensions survenant lors du déclenchement d'une ligne ouverte alimentée par un transformateur dont le neutre est isolé ou mis directement à la terre. CIGRE 1952, rap. 114.
- [7] Baltensperger, P.: Abschaltung eines leerlaufenden Transformators mit einem modernen 150-kV-Brown Boveri Druckluftschalter im Unterwerk Böttmingen der ATEL. Brown Boveri Mitt. Bd. 39(1952), Nr. 8/9, S. 335...340.
- [8] Baltensperger, P.: Abschaltung leerlaufender Leitungen und kleiner induktiver Ströme mit einem modernen 220-kV-Brown Boveri Druckluftschalter im schwedischen Kraftwerk Stadforsen. Brown Boveri Mitt. Bd. 38(1951), Nr. 12, S. 391...410.
- [9] Killgore, C. L. und W. Wanger: Essais d'un disjoncteur pneumatique Brown Boveri à la centrale de Grand Coulee 230 kV 10 000 MVA. CIGRE 1952, rap. 137.
- [10] Amstutz, A. und H. Meyer: Netzversuche mit Druckluftschaltern. Brown Boveri Mitt. Bd. 37(1950), Nr. 4/5, Seite 136...143.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. sc. techn. K. Berger, Versuchsleiter der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH), Seefeldstrasse 301, Zürich 8.



AG. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei