Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 51 (1960)

Heft: 21

Artikel: Schnellwiedereinschaltung bei Höchstspannungsübertragung

Autor: Baltensperger, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-917084

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: 10.07.2025

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

leren Hochspannungen, der andere dagegen diejenigen Probleme, die für sehr hohe Spannungen von 220 kV und darüber typisch sind.

Bevor die Vorträge beginnen, möchte ich noch ein paar Worte über die Terminologie der Schnellwiedereinschaltung sagen. Wir haben diesen Ausdruck in der Schweiz seinerzeit eingeführt als Übersetzung des gebräuchlichen englischen Ausdrucks «high-speed» oder «rapid reclosing», wobei sich im Französischen eine ganz ähnliche Bezeichnung, nämlich «réenclenchement» oder «refermeture rapide» einbürgerte. Die Deutschen haben statt dessen ein paar Jahre lang «Kurzschlussfortschaltung» gesagt und sind dann auf den Ausdruck «Kurzunterbrechung» übergegangen. Neuestens erscheint nun in einem VDE-Entwurf neben «Kurzunterbrechung» auch der Ausdruck «Schnellwiedereinschaltung». Für uns gilt gemäss den Regeln für Wechselstrom-Hochspannungsschalter (Publ. Nr. 0186 des SEV) immer noch «Schnellwiedereinschaltung» und auf französisch «refermeture rapide».

Schnellwiedereinschaltung bei Höchstspannungsübertragung

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 1. Juni 1960,

von *P. Baltensperger*, Baden

621.316.57.064.22 : 621.316.13.027.8

1. Einleitung

Der Vortrag behandelt die Schnellwiedereinschaltung in Höchstspannungsnetzen von 220 kV und mehr. Bei den höchsten Spannungen sind die Vorgänge im Netz und am Fehlerort z. T. komplizierter als bei Mittelspannungen. Es sollen daher zuerst diese Vorgänge behandelt werden, sodann Versuchsresultate und Betriebserfahrungen; schliesslich wird auf die moderne Schnellwiedereinschalttechnik und die dabei verwendeten Einrichtungen eingegangen.

der Praxis werden somit 2- und 3polige Fehler durch 3polige Schnellwiedereinschaltung behoben, während 1polige Fehler entweder durch 3polige oder mehr und mehr durch die hiefür vorteilhaftere 1polige Wiedereinschaltung bewältigt werden.

Auf Grund von Fig. 2 kann der Verlauf einer 1poligen Schnellwiedereinschaltung verfolgt werden. Die Figur zeigt von oben nach unten der Reihe nach Spannung und Strom in der gesunden Phase *T*, in der gesunden Phase *S* und in der Fehlerphase *R*. Die Schemata geben die verschiedenen elektrischen

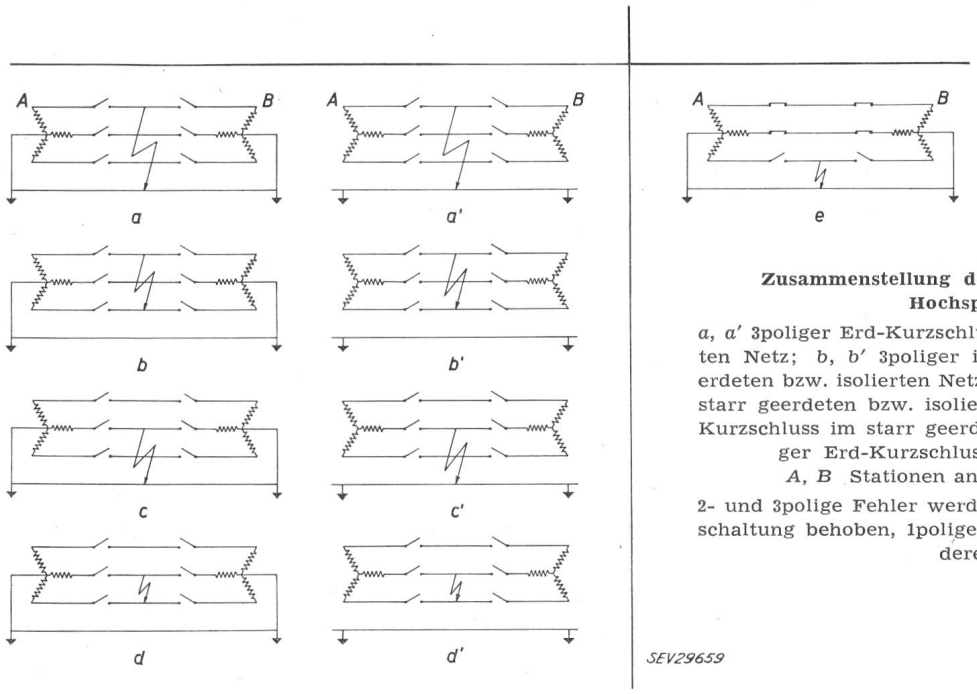


Fig. 1
Zusammenstellung der wichtigsten Fehlerfälle in Hochspannungsnetzen

a, *a'* 3poliger Erd-Kurzschluss im starr geerdeten bzw. isolierten Netz; *b*, *b'* 3poliger isolierter Kurzschluss im starr geerdeten bzw. isolierten Netz; *c*, *c'* 2poliger Erd-Kurzschluss im starr geerdeten bzw. isolierten Netz; *d*, *d'* 2poliger isolierter Kurzschluss im starr geerdeten bzw. isolierten Netz; *e* 1poliger Erd-Kurzschluss im starr geerdeten Netz
A, *B* Stationen an den beiden Leitungsenden

2- und 3polige Fehler werden durch 3polige Schnellwiedereinschaltung behoben, 1polige durch 3- oder 1polige Schnellwiedereinschaltung

Fig. 1 gibt einen Überblick über die grundsätzlich möglichen Fehlerfälle. Die Fig. 1a...d zeigen 3- und 2polige Kurzschlüsse mit und ohne Erdschluss im starr geerdeten Netz, die Fig. 1a'...d' dasselbe im isolierten oder Löschspulennetz. Fig. 1e stellt einen 1poligen Erdkurzschluss im starr geerdeten Netz dar. Bei Höchstspannungen sind heute die Netznullpunkte fast ausschliesslich starr geerdet. Die folgenden Ausführungen beziehen sich vorwiegend auf diesen Fall, gelten aber sinngemäss auch für isolierte oder hochohmig geerdete Netze. Es sei vorweggenommen, dass heute nur die 3- und die 1polige Schnellwiedereinschaltung üblich sind. Bei 2poligen Fehlern würde eine 2polige Wiedereinschaltung praktisch keinen Gewinn, wohl aber eine Komplikation der Schutzeinrichtungen bringen. In

Zustände der Leitung während der Störung an. Der Verlauf der Störung kann in 5 Stadien zergliedert werden. I stellt den Zustand vor der Störung dar. Während II brennt ein einpoliger Kurzschluss-Lichtbogen zwischen der Phase *R* und der Erde. III entspricht dem Zustand nach der Unterbrechung des Kurzschlusses an beiden Enden der Phase *R*. Dabei ist angenommen, dass an der Fehlerstelle ein Restlichtbogen stehen bleibt, welcher durch die Potentialdifferenz und die Kapazitäten zwischen den beiden gesunden Phasen und der Fehlerphase gespeist wird. Dies ist in Höchstspannungsnetzen, im Gegensatz zu den Mittelspannungsnetzen, möglich. Zu Beginn des Intervalles IV verlöscht der Restlichtbogen, und der ionisierte Pfad am Fehlerort kann sich wieder verfestigen. Der Abschnitt V

stellt den normalen Betrieb nach erfolgreicher Wiedereinschaltung dar. Die totale Störungsdauer setzt sich aus den Abschnitten II, III, IV zusammen. Bei 3poliger Schnellwiedereinschaltung fällt der Abschnitt III weg, weil dort kein Restlichtbogen brennen kann.

Leistungen der miteinander verbundenen Netzteile, Länge der Übertragungsleitung, Fehlerort, 1-, 2-, 3-poliger Kurzschluss, Kurzschlüsse mit und ohne Erdberührung, Zahl der parallelen Leitungen, 1- oder mehrpolige Schnellwiedereinschaltung u. a. m.

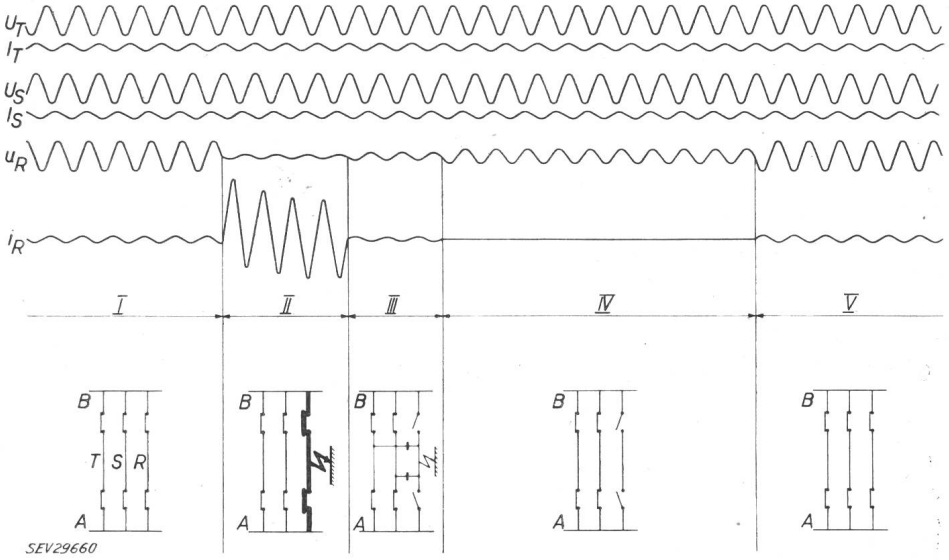


Fig. 2
Zeitlicher Verlauf einer 1poligen Schnellwiedereinschaltung
U_T, I_T Spannung und Strom in der «gesunden» Phase T
U_S, I_S Spannung und Strom in der «gesunden» Phase S
u_R, i_R Spannung und Strom in der Fehlerphase R
I und *V* normaler Betrieb; *II* 1poliger Erd-Kurzschluss; *III* Restlichtbogen brennt; *IV* stromlose Pause; *A*, *B* Stationen an den beiden Leitungsenden

Zwei Fragen sind nun von fundamentaler Bedeutung:

1. Wie gross darf die Stördauer sein, damit der Betrieb stabil bleibt?
2. Wieviel Zeit brauchen der Restlichtbogen zum Verlöschen und die ionisierte Zone zur Wiederverfestigung?

Nur wenn diese beiden Fragen befriedigend beantwortet werden können, hat die Anwendung der Schnellwiedereinschaltung einen Sinn.

2. Stabilität

Die dynamische Stabilität, welche bei der Schnellwiedereinschaltung massgebend ist, hängt von einer grossen Zahl von Parametern ab, wie z. B. Betriebspannung, Kurzschlussdauer, Dauer des Restlichtbogens und stromlose Pause, übertragene Leistung,

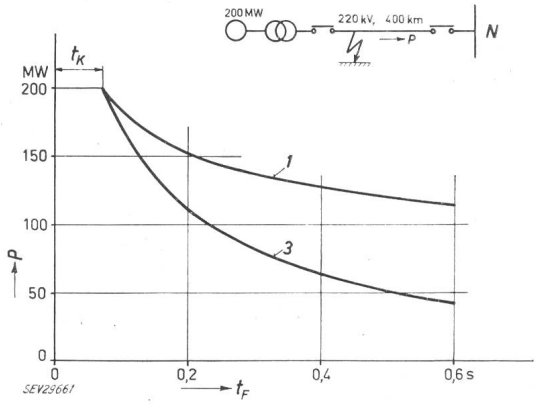


Fig. 3
Übertragbare Leistung *P* (ohne Betriebsunterbruch) in Funktion der Stördauer t_F bei einpoligem Fehler auf einer einzigen Übertragungsleitung
t_K Kurzschlussdauer; t_F Stördauer = Kurzschlussdauer plus Restlichtbogendauer plus stromlose Pause; *N* starkes Netz; *1* 1polige Schnellwiedereinschaltung; *3* 3polige Schnellwiedereinschaltung
Das Beispiel wurde aus [1] übernommen

Fig. 3 zeigt an einem einfachen Beispiel die übertragbare Leistung *P* in Funktion der Stördauer t_F. Dabei liegen folgende Annahmen zugrunde: Speisendes Kraftwerk von 200 MW, 220-kV-Übertragung auf einer einzigen 400 km langen Leitung, 1poliger Erdfehler, am Ende der Leitung ein starkes Netz [1] [1]). Der Vorteil der 1poligen gegenüber der 3poligen Schnellwiedereinschaltung ist hier offensichtlich. Ebenso die Notwendigkeit einer kurzen Stördauer.

Es wurde hier absichtlich ein pessimistisches Beispiel gewählt. Schon bei Annahme einer parallel angeschlossenen zweiten Übertragungsleitung wird die Stabilität viel besser.

Auf die Fülle von Varianten und Problemen kann man hier nicht eingehen. Einige wichtige Resultate und Erfahrungen seien jedoch folgendermassen zusammengefasst:

a) Stark vermaschte Netze sind im allgemeinen reichlich stabil, sowohl bei 3poliger als auch bei einpoliger Schnellwiedereinschaltung.

b) Im schwach vermaschten Netz und insbesondere bei einer einzigen Übertragungs- oder Verbindungsleitung ist die Stabilität bei 1poliger Schnellwiedereinschaltung wesentlich besser als bei 3poliger. Praktisch heisst das, dass bei 1poliger Schnellwiedereinschaltung bedeutend mehr Betriebsleistung ohne Unterbruch übertragen werden kann.

c) Die Dauer der Störung soll auf ein Minimum beschränkt werden. Besonders ungünstig wirkt eine lange Kurzschlussdauer auf die Stabilität.

3. Restlichtbogen und Entionisierung

Gerade umgekehrt stellen sich nun die Forderungen für den Restlichtbogen und die Entionisierung des Lichtbogenpfades. Der Restlichtbogen braucht Zeit zum Löschen. Anschliessend ist eine minimale stromlose Pause nötig, bis die noch ioni-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

sierte Fehlerstelle genügend regeneriert ist, um die Wiedereinschalt-Spannung zu halten.

Die Dauer des Restlichtbogens hängt vor allem von der Grösse des Reststromes ab. Zwar wirken noch eine Reihe anderer Parameter mit, wie Betriebspannung, Leitungslänge, Leitungskapazität, Lichtbogenlänge bzw. Überschlagdistanz an der Fehlerstelle. Der kapazitive Reststrom ist aber proportional zur Betriebspannung und zur Leitungslänge bzw. Leitungskapazität. Anderseits ist die Überschlagdistanz angenähert proportional zum Isolationsniveau bzw. zur Nennspannung. Die pro Einheit der Lichtbogenläge aufzubringende und tatsächlich verfügbare Spannung ist daher in grober Näherung konstant. Somit ist der Reststrom praktisch der einzige charakteristische netzeigene Parameter für das Verhalten des Restlichtbogens. In Fig. 4 sind Restlichtbogenzeiten t_R in Funktion des Reststromes eingetragen, die anlässlich von Versuchen in Hochspannungsnetzen in der Schweiz, Frankreich, Schweden, Kanada und Russland ermittelt wurden. Die Punkte mit nach oben gerichteten Pfeilen bedeuten misslungene, alle übrigen Punkte gelungene Schnellwiedereinschaltungen. Die Darstellung zeigt z. B., dass Restströme bis zu 10 A in der Regel spätestens nach 0,2 s verlöschen. Besonders günstig liegen die Verhältnisse in der Schweiz, weil keine langen Übertragungsleitungen vorhanden sind, und praktisch keine Restlichtbögen vorkommen. Dies konnte man z. B. bei Schnellwiedereinschaltversuchen auf der 100 km langen 220-kV-Lukmanierleitung Mettlen—Lavorgo der Aare-Tessin AG für Elektrizität sowie auf der 105 km langen 220-kV-Leitung Mühleberg—Riddes der Bernischen Kraftwerke AG feststellen [9].

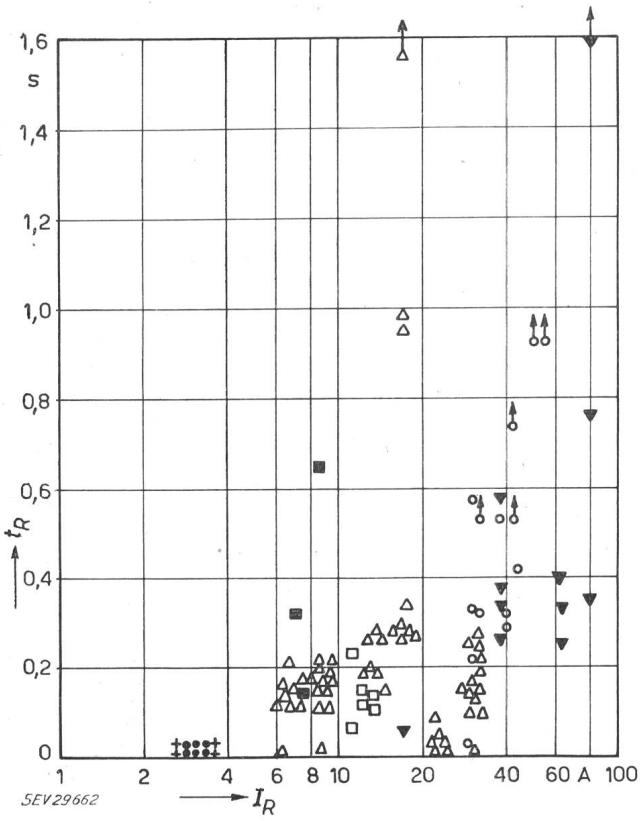


Fig. 4

Dauer des Restlichtbogens t_R in Funktion des Reststromes I_R nach der Unterbrechung eines 1poligen Erdkurzschlusses

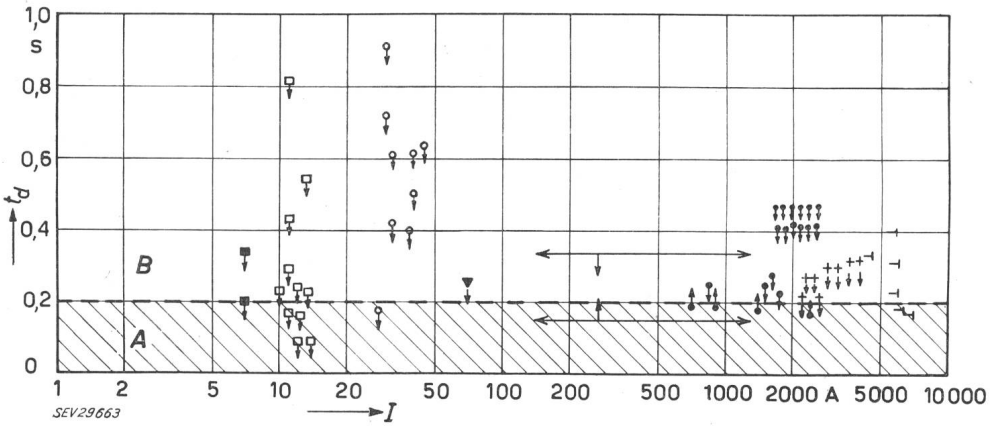
○ Schweden 380 kV; □ Schweden 220 kV;
● Schweiz 220 kV, Erstfeld (ATEL);
+ Schweiz 220 kV, Mühleberg (BKW);
△ Frankreich 220 kV; ■ Kanada 230 kV, Shawinigan;
▼ Russland 400 kV (zum Teil Kompensationsdrosselspulen in der Leitung);
↑ erfolglose Wiedereinschaltung

Die kleinste zulässige stromlose Pause, welche auf das Verlöschen des Kurzschluss- oder Restlichtbogens folgt, wurde ebenfalls in einer Reihe von Versuchen ermittelt. Fig. 5 zeigt Resultate, dargestellt in Funktion des Lichtbogenstromes I. In dieser Darstellung sind 1-, 2- und 3polige Störungen zusammengefasst, da die Entionisierungsbedingungen ungefähr gleich sind. Die Ströme unter 100 A entsprechen Restlichtbögen, diejenigen über 100 A Kurzschluss-Lichtbögen. Die Punkte mit aufwärts gerichteten Pfeilen stellen erfolglose Wiedereinschaltungen dar, diejenigen mit abwärts gerichteten Pfeilen erfolgreiche, wobei in den meisten Fällen eine kleinere stromlose Pause auch genügt hätte. Aus den zahlreichen Ermittlungen folgt, dass eine stromlose Pause von 0,2 s im allgemeinen zur Wiederverfestigung genügt, und dass diese Grenze praktisch nicht von der Grösse des Stromes abzuhängen scheint. Bei den bereits erwähnten Versuchen auf der Leitung Mettlen—Lavorgo konnte festgestellt werden, dass die maximal nötige Entionisierungszeit ziemlich genau 0,2 s beträgt.

Fig. 5

Entionisierungszeit t_d in Funktion des Lichtbogenstromes I nach dem Unterbrechen von 1- und mehrpoligen Lichtbogenkurzschlüssen bzw. nach dem Verlöschen von 1poligen Restlichtbögen

A Entionisierungszeit nicht immer genügend; *B* Entionisierungszeit genügend
⊣ England 132 kV
↔ USA BPA 230 kV (Betriebserfahrung);
↑ die Zeit genügt nicht zum Entionisieren
↓ zum Entionisieren hätte auch weniger Zeit genügt
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 4



Aufschlussreicher als diese Detailresultate ist indessen die Betrachtung der 1poligen Wiedereinschaltzyklen als ganzes, wie dies in Fig. 6 möglich ist [12]. Diese Abhängigkeit zwischen Leitungslänge l und Betriebspannung U zeigt wieder viele in verschiedenen Ländern erzielte Mess- und Versuchsresultate. Die Zahlen bei den Messpunkten bedeuten die Zahl der Versuche. Ohne auf Einzelheiten einzugehen, sei hier folgendes festgehalten: «links» und «unterhalb» der Kurve *I* sind alle Schnellwiedereinschaltungen gelungen. «Rechts» und «oberhalb» der Kurve *II* sind sie meistens misslungen. Zwischen den Kurven *I* und *II* sind sowohl erfolgreiche als auch erfolglose Fälle vorgekommen. Aus der Figur folgt z. B., dass 1polige Schnellwiedereinschaltungen bei 220 kV bis zu Leitungslängen von etwa 300 km gelingen. Man kann auf Grund dieser Darstellung auch annehmen, dass die 1polige Schnellwiedereinschaltung bei den kommenden schweizerischen 380-kV-Übertragungen wegen der verhältnismässig kurzen Leitungslängen erfolgreich angewendet werden kann. Vollständigkeitshalber muss bemerkt werden, dass die Stabilität bei vielen dieser Versuche nicht besonders stark beansprucht wurde, da die übertragene Leistung meist verhältnismässig klein war. Anderseits vermittelt die Darstellung ein zu pessimistisches Bild, da bei diesen Versuchen die künstlich gezündeten Lichtbögen stets minimale Längen hatten und z. T. vor Wettereinflüssen geschützt waren. Dabei ist bekannt, dass schon ein schwacher Wind wesentlich zum Löschen und Entionisieren beiträgt.

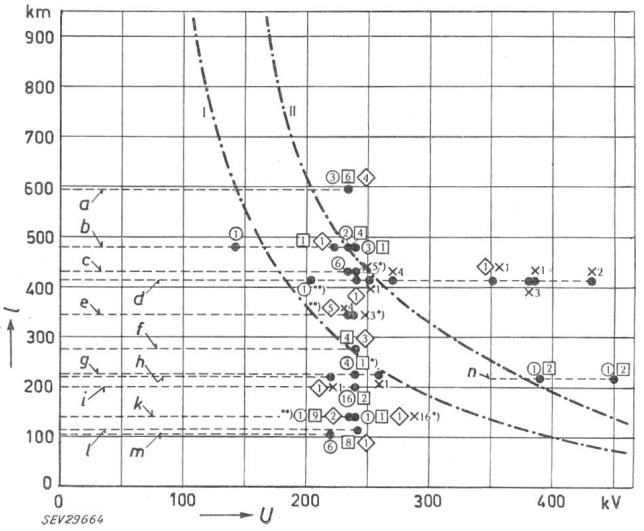


Fig. 6
Versuchsergebnisse aus verschiedenen Hochspannungsnetzen liefern ein Bild des Verhaltens des Restlichtbogens bei 1poliger Kurzunterbrechung in Funktion der Betriebspannung U und der Leitungslänge l [12]

Im Gebiet links von der Kurve *I* gelingt die einpolige Wiedereinschaltung, rechts von der Kurve *II* hingegen nicht. Zwischen *I* und *II* ist der Erfolg der einpoligen Wiedereinschaltung fraglich

● Messpunkte;
○ Dauer des Restlichtbogens 0...0,1 s;
□ Dauer des Restlichtbogens 0,1...0,2 s;
◇ Dauer des Restlichtbogens 0,2...0,3 s;
× Dauer des Restlichtbogens 0,3 s, spannungslose Pause 0,53 s

Die Zahlen in oder neben den Zeichen bedeuten die Zahl der Versuche

*) Zündung des Lichtbogens zwischen den Funkenhörnern einer Zündstrecke von 120 cm Länge mit Windschutz
**) Überschlag über eine Isolatorkete ohne Windschutz

a Fontenay—Chevilly—Breuil—La Mole—Eguzon; *b* Alfta; *c* Fontenay—Chevilly—Breuil; *d* Storfinnforsen; *e* Fontenay—Eguzon I; *f* Fontenay—Eguzon II; *g* Fontenay—Marmagne; *h* Shawinigan Co; *i* Hydro-Electric Power of Ontario; *k* Fontenay—Chaingy I; *l* Fontenay—Chaingy II; *m* Erstfeld; *n* Kilforsen

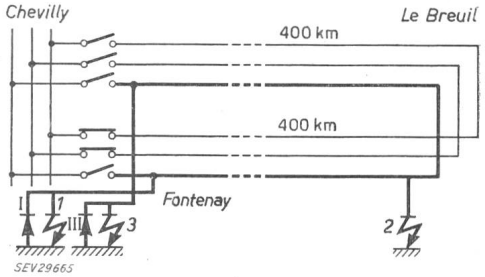


Fig. 7
Einpolige Wiedereinschaltversuche im 220-kV-Netz der Electricité de France mit Shuntung des Restlichtbogens durch Wasserstrahlen
Leitungslänge 800 km
I, III Wasserstrahlen in Fontenay; *1, 2, 3* künstlich eingeleiteter einpoliger Erdkurzschluss mit anschliessendem Restlichtbogen in Fontenay 1 oder 3 bzw. 2 in Le Breuil

Bei den höchsten Spannungen und grössten Leitungslängen, wo die 1polige Schnellwiedereinschaltung aus den eben erwähnten Gründen eventuell nicht mehr anwendbar ist, kann man sich z. B. auf folgende Arten helfen:

a) Bei Auftreten eines Fehlers auf der Leitung wird in den beiden Endstationen im Sammelschienensystem je die Fehlerphase mit der Erde kurzgeschlossen, wofür besondere Kurzschlussschalter verwendet werden. Der Lichtbogen am Fehlerort wird dadurch geshuntet und erlischt. Hierauf unterbrechen die beiden Kurzschluss-Schalter ihre Kurzschlüsse.

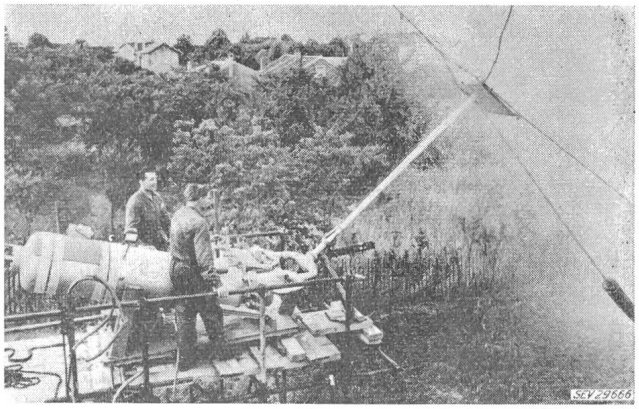


Fig. 8
Wasserstrahlkanone in Aktion

b) Eine andere Methode besteht darin, dass die Schalter an beiden Leitungsenden bei Eintritt eines Fehlers zunächst den Kurzschlußstrom unterbrechen. Dann werden die beiden Enden der Fehlerphase durch Schnelltrenner oder Flüssigkeits-Strahlen mit der Erde verbunden. Der Restlichtbogen verliert dadurch seine Existenzmöglichkeit und ver-

schwindet. Vor der Wiedereinschaltung sind dann die Trenner wieder zu öffnen bzw. die Flüssigkeitsstrahlen zu unterbrechen. Solche Versuche wurden z. B. im 245-kV-Netz der Electricité de France in Zusammenarbeit mit Brown Boveri mit Erfolg durchgeführt, wobei bis zu 800 km lange Leitungen wieder eingeschaltet werden konnten [12]. Fig. 7 enthält das Prinzipschema dieser Versuche. Die 800 km lange Leitung führte von Paris-Fontenay nach Le Breuil im Massiv Central und zurück nach Paris-Fontenay. Der Lichtbogenerdschluss wurde wahlweise am einen oder anderen Leitungsende oder in der Mitte der Leitung eingeleitet. Der Restlichtbogen verlöschte stets in kürzester Zeit. Fig. 8 zeigt einen Flüssigkeitsstrahl in Aktion. Als Flüssigkeit verwendete man Ammoniumchlorid-Lösung, welche ein besonders guter elektrischer Leiter ist. Die Lösung befand sich in der unteren Hälfte des Behälters, während die obere mit Druckluft gefüllt war. Die Druckluft diente zum Herauspressen der Flüssigkeit und nach Abstellen des Strahles zum Beblasen und Entionisieren des Raumes zwischen den Elektroden.

c) Eine weitere Hilfe für die 1polige Schnellwiedereinschaltung besteht bei höchsten Spannungen darin, dass aus anderen Gründen Drosselspulen zwischen Leitungsphasen und Erde verwendet werden. Solche Drosselspulen sind vor allem zur Kompensation des Ferranti-Effektes, d. h. zur Verhinderung grosser Spannungserhöhungen an den Enden leerlaufender Leitungen nötig. Sie shunten aber anderseits 1polige Lichtbogen-Erdschlüsse und erleichtern die Löschung des Restlichtbogens. Ausgeführt ist dieses Prinzip z. B. bei der 815 km langen russischen 400-kV-Übertragung Kuibischew—Moskau [14]. Auch bei Projekten für 650-kV-Übertragungen hat man entsprechende Hochspannungs-Drosselspulen vorgesehen. Die Drosselspulen müssen natürlich so abgestimmt sein, dass sie im Übertragungssystem keine Resonanz verursachen.

4. Betriebserfahrungen

Die endgültige Antwort über Nutzen oder Nachteile der Schnellwiedereinschaltung kann freilich nur die Betriebserfahrung geben. In Fig. 9 sind einige der Literatur entnommene Statistiken von Netzen in den USA, Russland und Deutschland dargestellt. Die Darstellung links zeigt die absoluten, diejenigen rechts die prozentualen Zahlen der während des Betriebes aufgetretenen gelungenen und misslungenen Schnellwiedereinschaltungen. Diese Statistiken lehren folgendes:

a) Fast alle Fehler sind Lichtbogenkurzschlüsse oder vorübergehende Fehler anderer Art. Permanente Kurzschlüsse kommen sehr selten vor.

b) Die 1poligen Fehler sind weit häufiger als die mehrpoligen.

c) Die weitaus meisten Fehler können durch Schnellwiedereinschaltung behoben werden. So zeigen z. B. die Darstellungen für die USA und für Deutschland, dass 77...90 % aller Wiedereinschaltungen erfolgreich waren.

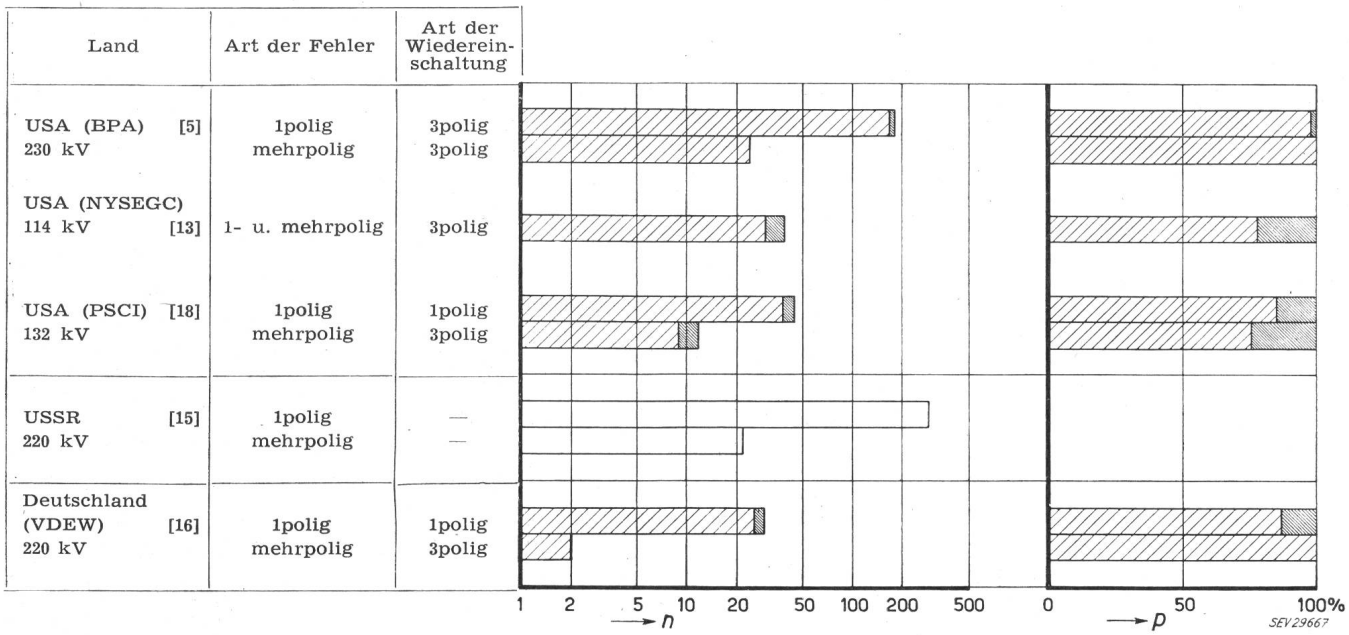


Fig. 9
Betriebserfahrungen mit Schnellwiedereinschaltung
[5; 13; 15; 16; 18]

n absolute Zahl der Störungen; *p* prozentuale Zahl der Störungen; *BPA* Bonneville Power Administration; *NYSEGC* New York State Electric and Gas Corporation; *VDEW* Vereinigung deutscher Elektrizitätswerke; ▨ erfolgreiche Schnellwiedereinschaltungen; ▩ erfolglose Schnellwiedereinschaltungen; □ Total der gelungenen und misslungenen Schnellwiedereinschaltungen

Seit einigen Jahren sind auch 380-kV-Übertragungen mit Schnellwiedereinschaltung im Betrieb, so z. B. in Frankreich die Leitung von Genissiat nach Plessis-Gassot und in Deutschland die 340 km lange Leitung Rommerskirchen—Hoheneck der Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerke. Diese Leitung wird nur mit 1poliger Schnellwiedereinschaltung betrieben. Auf den beiden Leitungen sind schon eine Reihe von Störungen, dank der Schnellwiedereinschaltung, erfolgreich eliminiert worden.

Wenn man zu den beiden eingangs gestellten Hauptfragen betreffend Stabilität und Wiederverfestigung der Fehlerstelle zurückkehrt, können die wichtigsten Schlussfolgerungen gezogen werden:

a) Wenn es auch leicht gelingt, theoretische und pessimistische Beispiele zu konstruieren, besonders dort, wo eine einzige Übertragungsleitung besteht, so beweist doch die Praxis, dass die Schnellwiedereinschaltung fast bei allen vorkommenden Übertragungen mit grossem Vorteil anwendbar ist. Die Schnellwiedereinschaltung würde sich sogar auch lohnen, wenn z. B. nur ca. 50 % aller Störungen behoben werden könnten.

b) Bei 1poligen Störungen ist die 1polige Schnellwiedereinschaltung der 3poligen aus Stabilitätsgründen vorzuziehen. Da überdies die meisten Störungen 1polig sind, drängt sich die Verwendung der 1poligen Schnellwiedereinschaltung, als Zusatz zur 3poligen, besonders auf.

c) Bei den schweizerischen Höchstspannungsübertragungen hat man dank den relativ kurzen Leitungen kaum mit Restlichtbögen zu rechnen. Die Stördauer kann daher auf ein Minimum, d. h. auf ca. 0,4 s beschränkt, und die Stabilität besser ausgenützt werden.

5. Technische Hilfsmittel für die Schnellwiedereinschaltung

Zur technischen Verwirklichung der Schnellwiedereinschaltung braucht es einen schnell arbeitenden Schutz sowie Schnellschalter. Mit modernen Apparaten ist es möglich, die Kurzschlussdauer auf 3½ bis 4 Perioden zu beschränken.

Als Schutzsysteme sind heute die Übergreifschaltung und die Hochfrequenz-Auslösekupplung bekannt. Beide Systeme gestatten ein rasches und fast gleichzeitiges Unterbrechen der beiden Enden der Fehlerphasen.

Bei der Übergreifschaltung wird für die erste Ausschaltung die Reichweite der Schnellstufe etwa 15 % über die zu schützende Leitung hinaus verlängert, um auch Fehler, die in der Nähe einer Station liegen, noch mit Schnellstufe zu erfassen. Der Vorteil der Übergreifschaltung liegt im einfachen Aufbau der gesamten Schutzeinrichtung. Doch kann man nicht ganz vermeiden, dass hie und da ein Schalter zuviel auslöst. Die Forderung nach kürzesten Fehlerzeiten hat zum Bau von Einperioden-Distanzschutzrelais geführt. Diese Relais sind als schnelle Vorstufe zu den normalen Distanzschutzrelais ausgebildet. Fig. 10 zeigt ein Einperioden-Distanzschutzrelais. Es beansprucht den unteren Teil des Kastens bis etwa über die Mitte, während im oberen Teil die Einrichtungen für die Phasenwahl eingebaut sind.

Moderner und eleganter kann man das Problem mit der Hochfrequenz-Auslösekupplung lösen, welche zusätzlich zu den Schnelldistanzrelais verwendet wird. Damit werden Fehler auf der gesamten Leitungsstrecke, d. h. vom Stromwandler der Sendestation bis zum Stromwandler der Gegenstation, mit Schnellstufe erfasst. Beim ungestörten Betrieb sendet jede Station über die Leitung ein Ruhesignal. In der gegenüberliegenden Station überwacht eine Einrichtung das Vorhandensein des Ruhesignals und wertet es frequenzmässig so aus, dass die Schaltkreise für die Befehlsauswertung gesperrt werden. Tritt ein Fehler auf, so erteilt das Schnelldistanzrelais den «Aus»-Befehl sowohl dem Leistungsschalter der betreffenden Station als auch über die HF-Einrichtung dem Leistungsschalter am gegenüberliegenden Leitungsende. Dabei wird zunächst das Ruhesignal unterbrochen; unmittelbar danach wird das Befehlssignal gesendet und in der Empfangsstation ausgewertet. Die frequenzmässige Aus-

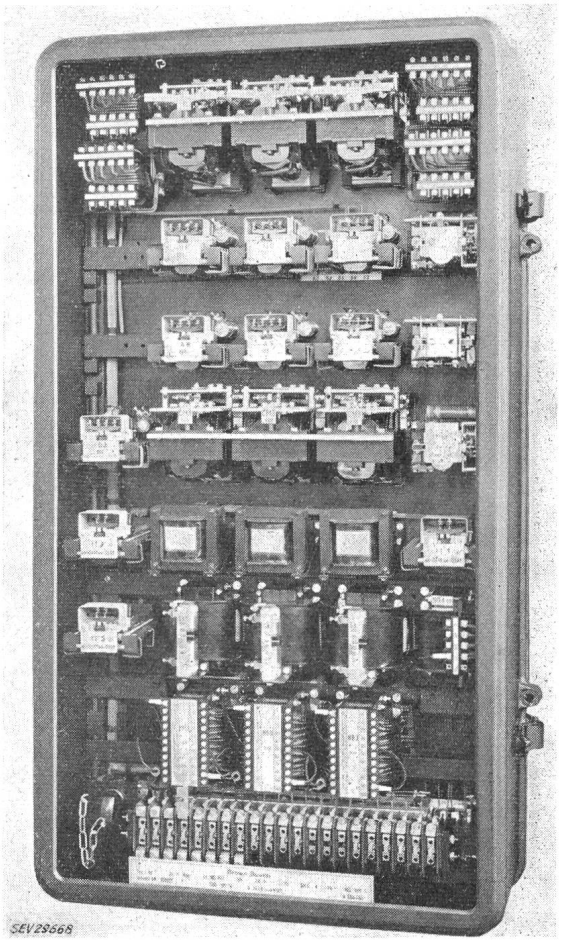


Fig. 10
Einperioden-Distanzschutzrelais für starr geerdete Höchstspannungsnetze mit einphasiger, ein- und dreiphasiger oder dreiphasiger Wiedereinschaltung
Dieses Relais ist ein Zusatz zum Drehfeld-Distanzschutzrelais

wertung des empfangenen Befehlssignals bewirkt die Anregung des Befehlsrelais, und dessen Kontakte geben das «Aus»-Kommando über die Phasenwahlrelais im Schnelldistanzschutz ohne jegliche Verzögerung auf die Spule des Leistungsschalters. In Fig. 11 ist die Vorder- und Rückseite einer Station für Hochfrequenzübertragung zu sehen. Dieses Gerät wurde speziell passend zum 1-Perioden-Schnell-Distanzschutz entwickelt. Seine Übertragungszeit beträgt 0,012 s [12].

Eine sehr wichtige Aufgabe kommt dem Leistungsschalter zu. Er muss den Kurzschluss innert kürzester Zeit eliminieren, die Schnellwiedereinschaltung durchführen und für eine allfällige zweite definitive Ausschaltung bereit sein. Der Druckluftschalter ist für diese Aufgabe gut geeignet, denn die Druckluft ist einerseits ein erstklassiger Energie-

speicher für Steuerung und Antrieb und erlaubt nicht nur ein schnelles Ausschalten, sondern auch ein praktisch beliebig rasches Wiedereinschalten. Anderseits ist Druckluft ein bewährtes Lichtbogen-Löschmittel, welches auch bei der zweiten Ausschaltung frisch zur Verfügung steht. Fig. 12 gibt eine

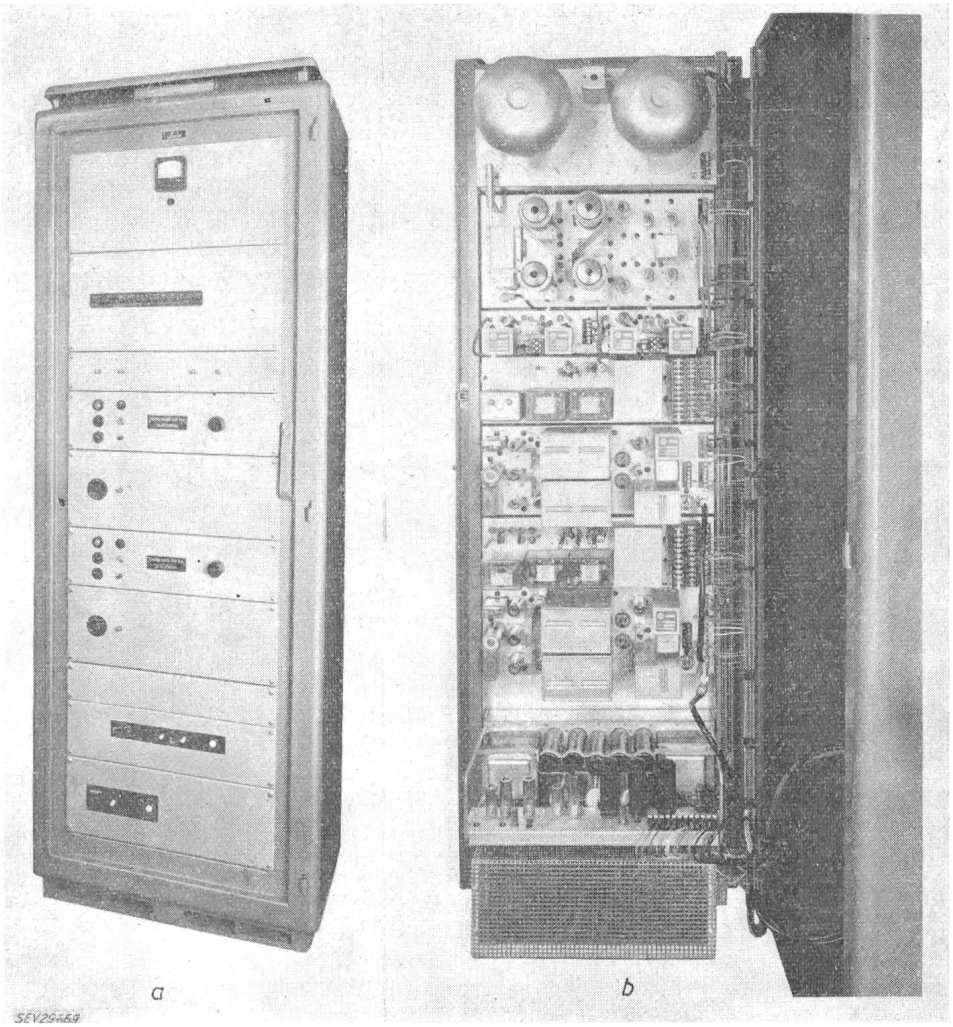


Fig. 11
Trägerfrequenzkupplung für Einperioden-Schnelldistanzschutz, ausgeführt zur gleichzeitigen Übertragung der Kriterien für zwei Leitungssysteme
a Vorderseite
b Rückseite mit geöffneter Türe
Ausgangsleistung 100...150 W. Im geöffneten Gerät sind von oben nach unten sichtbar: Gemeinsames Sendefilter und gemeinsame Endstufe, die Einheit mit den zwei Oszillatorpaaren, zweimal je ein Prüfgerät und ein Empfänger für die Signale von der Gegenstation sowie der geregelte Netzanschluss für die Empfänger. Zu unterst befindet sich die Energieversorgung für die Endstufe

der 380-kV-Übertragung Hoheneck—Rommerskirchen erfolgreich im Betrieb.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit der modernen Technik, den Schnelldistanzrelais, den Einrichtungen für die Phasenwahl, der Hochfrequenz-Kupplung und den Schnell-

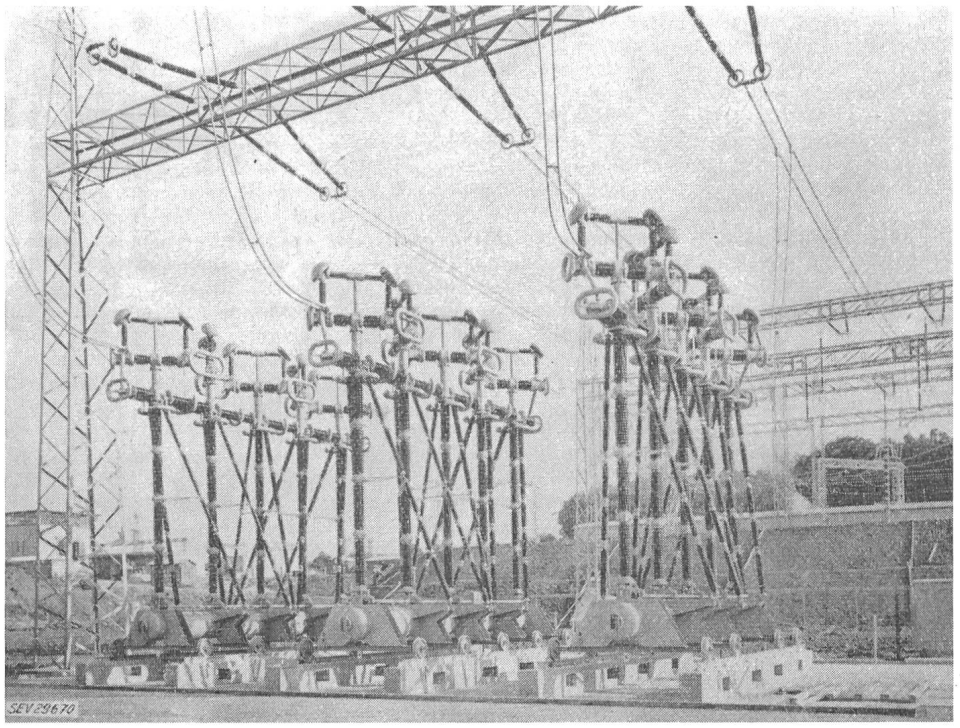


Fig. 12
Druckluftschnellschalter für 380 kV, 12 000 MVA in der Transformatorenstation Hoheneck der Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerke
Der Schalter schützt die 340 km lange 380-kV-Leitung Hoheneck—Rommerskirchen

Gesamtansicht eines 380-kV-Druckluftschnellschalters; sein Ausschaltvermögen beträgt 12 000 MVA, seine totale Ausschaltzeit 3 Perioden. Schalter wie in Fig. 12 gezeigte sind seit einigen Jahren als Schutz schaltern die vielen Probleme der 1- und mehrpoligen Schnellwiedereinschaltung beherrscht werden können. Zahlreiche seit Jahren im Betrieb stehende Anlagen beweisen dies. Man verfügt somit über die

Mittel, die zur Aufrechterhaltung einer rationellen und störfreien Energie-Übertragung unentbehrlich sind.

Literatur

[1] *Robert, R.:* Comparaison sous l'angle de la stabilité des divers types de réenclenchement sur les réseaux de transport et d'interconnexion. Bull. Soc. franç. Electr. 7. Ser., Bd. 2(1952), Nr. 21, S. 516...525.

[2] *Meyer, H.:* Der Brown-Boveri-Druckluftschnellschalter für das 380-kV-Netz. Bull. SEV Bd. 44(1953), Nr. 4, S. 157...162.

[3] *Cabanes, L., C. Dietsch* und *Divan:* La longueur des lignes limite-t-elle l'emploi du réenclenchement automatique monophasé dans les réseaux de transport d'énergie à très haute tension? Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 15. Session 1954, Bd. 2, Rapp. 142. 12 S.

[4] *Matthey-Doret, A.* und *A. Leuthold:* Netzschutzversuche mit Schnellwiedereinschalten in einem Höchstspannungsnetz. Brown Boveri Mitt. Bd. 41(1954), Nr. 9, S. 351...353.

[5] *Gillies, D. A.:* Operating Experience with 230 kV Automatic Reclosing on Bonneville Power Administration System. Trans. AIEE, Part 3, Power App. & Syst., Bd. 73(1954), Nr. 16 (Febr. 1955), S. 1692...1696.

[6] *Norlin, L.:* Snabbåterinkoppling av högspänningsbrytare. Tekn. Tidskr. Bd. 85(1955), Nr. 9, S. 177...180.

[7] *Quervain, A. de:* Einsatz von Trägerfrequenzgeräten in Hochspannungsnetzen. Brown Boveri Mitt. Bd. 42(1955), Nr. 7/8, S. 251...261.

[8] *Hahn, C.:* Frequency-Shift-Kanäle und ihr Einsatz zum Fernsteuern, Rückmelden und Kuppeln des Schnelldistanzschutzes. Brown Boveri Mitt. Bd. 42(1955), Nr. 7/8, S. 288...291.

[9] *Schär, F.* und *P. Baltensperger:* Kurzschlussversuche mit Schnellwiedereinschaltung auf der 220-kV-Leitung Mettlen—Lavorgo. Bull. SEV Bd. 46(1955), Nr. 17, S. 762...784.

[10] *Frey, W.:* Die Stabilitätsprobleme des Parallelbetriebes. Diss. ETH. Zürich: Truninger 1956.

[11] *Thommen, H.:* Les progrès les plus récents réalisés dans le domaine des disjoncteurs pneumatiques. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 16. Session 1956, Bd. 2, Rapp. 119, 23 S.

[12] *Müller, M. F., F. Gygax, C. Hahn* und *P. Baltensperger:* Schutz von Höchstspannungsnetzen unter Berücksichtigung der einphasigen Wiedereinschaltung bei sehr langen Leitungen. Brown Boveri Mitt. Bd. 45(1958), Nr. 6, S. 243...253.

[13] *Dana, G.:* Experience with High-Speed Reclosing. Electr. Engng. Bd. 67(1948), Nr. 10, S. 942...944.

[14] *Maikopar, A. S.* und *N. N. Beljakow:* Arcing Short-Circuits on 400 kV Transmission Lines and Methods of Dealing with Them. Elektritschestwo Bd. -(1958), Nr. 1, S. 19...25. (Ref. in ETZ-A Bd. 80(1959), Nr. 6, S. 185.)

[15] *Berkowitsch, M. A.* und *W. A. Semjonow:* Schadenstatistiken bei russischen 110- und 220-kV-Leitungen und Vorschläge zur Vereinfachung des Relaisschutzes. Arch. Energiewirtsch.-Z. Energiewesen Bd. 13(1959), Nr. 8, S. 324...335. (Aus Elektritscheskije stanzii Bd. -(1959), Nr. 1, S. 61...65.)

[16] *Spriegel, W.:* Kurzunterbrechung in Höchstspannungsnetzen mit starr geerdetem Sternpunkt. BBC-Nachr. Bd. 42 1960), Nr. 8, S. 421...428.

[17] *Crawford, F. W.* und *H. Edels:* The Reignition Voltage Characteristics of Freely Recovering Arcs. Proc. IEE Bd. 107 (1960), Part A, Nr. 32, S. 202...212.

[18] *Trainor, J. J.* und *C. E. Parks:* Single-Pole Relaying and Reclosing on a High-Voltage System. Electr. Engng. Bd. 66 1947), Nr. 5, S. 467...470.

Adresse des Autors:

Dr. sc. math. *P. Baltensperger,* AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

Diskussionsbeiträge

Dr. sc. techn. W. Wanger, Direktor der AG Brown, Boveri & Cie, Baden: Ich möchte noch einen Punkt aus dem Vortrag von Dr. *P. Baltensperger* kurz herausgreifen. Er machte darauf aufmerksam, dass die Stabilität in stark vermaschten Netzen im allgemeinen recht gut ist, auch wenn man dreipolig unterbricht und wieder einschaltet; dass dagegen die Verhältnisse bedeutend ungünstiger liegen, sofern zwei Netzteile nur durch eine einzige Übertragungsleitung miteinander verbunden sind. Hier kann meistens die Stabilität bei voller Belastung der Leitung nicht gesichert werden, wenn man dreipolig unterbricht und wieder einschaltet. In diesem Fall bietet daher die einpolige Schnellwiedereinschaltung einen grossen Vorteil.

Bei einer einzigen Übertragungsleitung sind die Vorteile der Schnellwiedereinschaltung überhaupt am einleuchtendsten; denn bei einer blossen Abschaltung der gestörten Leitung würden ja die beiden Netzteile vollständig getrennt, während die Methode der Schnellwiedereinschaltung zum mindesten in der Mehrzahl der Fälle ermöglicht, dass die Netzteile nach Eliminierung der Störung verbunden bleiben und die Stabilität des Parallelbetriebes gewahrt wird.

Man kann sich nun aber fragen, was denn der Nutzen dieser Methode in einem stark vermaschten Netz sei. Es gibt Fälle mit mehreren Verbindungsleitungen, bei denen eine vollständig unterbrochen werden könnte, ohne dass deswegen die Stabilität des Parallelbetriebes gestört würde. *R. Robert* von der Electricité de France hat bereits 1953 auf diese Verhältnisse hingewiesen und in diesem Zusammenhang darauf aufmerksam gemacht, dass die Schnellwiedereinschaltung in einem stark vermaschten Netz unter Umständen sogar schädlich wirken kann, weil auch auf einen permanenten Fehler nochmals eingeschaltet wird. Dadurch entsteht unmittelbar nach dem ersten Kurzschluss noch ein zweiter, der natürlich die Stabilität des Parallelbetriebes ungünstig beeinflusst. Das könnte aber vermieden werden, wenn man lediglich die gestörte Leitung selektiv abschalten und auf eine Schnellwiedereinschaltung verzichten würde. Immerhin ist zu berücksichtigen, dass die permanenten Fehler wesentlich weniger häufig sind als die vorübergehenden, bei denen die Schnellwiedereinschaltung niemals nachteilig wirkt.

Meine Bemerkungen dürfen nun nicht so ausgelegt werden, als ob ich den Wert dieser Methode in Zweifel ziehen wollte. Aber nachdem in allen Vorträgen — mit Recht — das Lob der Schnellwiedereinschaltung gesungen worden ist, war es vielleicht doch zweckmässig, am Schluss noch darauf hinzuweisen, dass der Nutzen dieser Methode zum mindesten geringer wird, wenn man es mit stark vermaschten Netzen zu tun hat. Am wertvollsten ist die Schnellwiedereinschaltung in schwach vermaschten Netzen, und ganz besonders gute Dienste leistet sie im Extremfall einer einzigen Verbindungsleitung.

G.-A. Gertsch, Micafil S. A., Zurich: L'utilisation d'un système de télécommunications par ondes porteuses sur lignes à haute tension, pour transmettre les ordres de déclenchement simultané des disjoncteurs situés aux deux extrémités d'une ligne, est, comme vient de nous le montrer M. *P. Baltensperger,* une solution élégante et moderne. Il est alors nécessaire d'installer à chaque extrémité de la ligne un ou deux condensateurs de couplage, ou mieux un jeu de transformateurs de tension capacitifs, dont les colonnes de condensateurs pourront être utilisées comme dispositif de couplage. Notons en passant que les capacités employées généralement en Suisse pour ces appareils n'ont pas d'influence néfaste sur l'arc résiduel du fait de leurs faibles valeurs, par exemple de l'ordre de 4000 pF pour les appareils à 245 kV de tension de service la plus élevée, ce qui correspond à la capacité contre terre d'environ 500 m d'une ligne de la tension de service sus-mentionnée.

Afin d'éviter aux exploitants des réseaux de fâcheuses expériences lors de l'utilisation de transformateurs de tension capacitifs sur des lignes équipées du réenclenchement rapide, je désire faire les quelques remarques suivantes:

Un transformateur de tension capacitif se compose en principe (fig. 1) d'un diviseur de tension capacitif C_1, C_2, d'un transformateur réducteur T et d'une bobine de selfinduction L_1, connectée en série avec ce transformateur et qui compense la chute de tension dans le diviseur. A l'aide de ce schéma, étudions ce qui se passe pour le transformateur d'une phase saine d'un réseau lors du déclenchement d'une ligne équipée du réenclenchement rapide tripolaire: Le courant sera coupé lors de son passage par zéro. A cet instant la tension de la ligne a une valeur variable suivant le déphasage existant entre la tension et le courant de la ligne juste avant le déclenchement. La ligne reste alors chargée de même que le diviseur capacitif. Sa capacité C_2, qui est en parallèle avec le transformateur T et la bobine de selfinduction L_1 se décharge en une oscillation non harmonique au travers de ces derniers, comme on peut le voir sur les deux oscillogrammes de la fig. 2 (en particulier courbes *3* et *4*). A l'instant du réenclenchement de la ligne, les deux capacités du diviseur ainsi que la ligne sont donc chargées à des tensions qui influencent bien entendu les valeurs des courants d'enclenchement de la ligne et du transformateur de tension capacitif, en par-