Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 55 (1964)

Heft: 11

Artikel: Leistungsschalter

Autor: Ruoss, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916721

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: 08.08.2025

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

4. Baukosten

Nachdem das Bild der Freileitung für sehr hohe Betriebsspannungen skizziert worden ist, soll noch kurz auf die Kostenfrage eingetreten werden, obschon in unserer Nähe vorläufig nicht mit der Verwirklichung eines solchen Projektes zu rechnen ist. Die in Fig. 5 dargestellte Kurve gibt deshalb auch nur die relativen Kosten wieder. Die Berechnung basiert auf einsträngigen Leitungen nach Fig. 3 und den schweizerischen Vorschriften und berücksichtigt keine besonderen Faktoren wie Waldüberspannungen, Entschädigungen für Bauverbote usw. Für doppelsträngige Leitungen verläuft die Kostenkurve ähnlich, variiert aber etwas mit der Aufteilung des Phasenleiters.

Die Baukosten steigen etwas mehr als proportional mit der Betriebsspannung. Es lässt sich aber leicht abschätzen, dass die auf die übertragbare Leistung bezogenen Kosten auch im Spannungsbereich von 750 kV mit steigender Spannung fallen.

Adresse des Autors:

W. Herzog, dipl. Ingenieur, Motor-Columbus AG für elektrische Unternehmungen, Baden (AG).

Leistungsschalter

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 21. Januar 1964,

von *E. Ruoss*, Baden

621.316.542.027.875

Die Beanspruchung der Höchstspannungsschalter für 750 kV bei Kurzschlussunterbrechung, Abstandskurzschluss und Phasenopposition wird betrachtet. Es wird gezeigt, dass bei Höchstspannungsübertragungen die Schaltüberspannungen beim Ein- und Ausschalten von langen Übertragungsleitungen in Anwesenheit eines schwachen speisenden Netzes von Bedeutung sind. Weiter werden die vielseitigen Verwendungszwecke von Schaltwiderständen behandelt. Einige allgemeine Probleme der Höchstspannungsschalter und 2 Beispiele von ausgeführten 750-kV-Schaltern schliessen den Vortrag ab.

Le conférencier traite des contraintes auxquelles sont exposés les disjoncteurs pour 750 kV, lors d'une coupure sur court-circuit, défaut kilométrique ou opposition de phases. Il montre l'importance que prennent les surtensions d'enclenchement et de déclenchement de longues lignes de transport d'énergie à très haute tension, lorsque le réseau qui les alimente est faible. Il décrit ensuite les multiples emplois des résistances de couplage et termine son exposé par quelques problèmes généraux que posent les disjoncteurs pour très haute tension, ainsi que par deux exemples de disjoncteurs construit pour 750 kV.

1. Einleitung

Man fragte sich bei den Höchstspannungsübertragungen für 750 kV, ob es sinnvoll sei, Leistungsschalter auf der Hochspannungsseite der Transformatoren zu verwenden oder ob es vorteilhaft wäre, die Schalthandlungen auf der Unterspannungsseite durchzuführen. Diese Überlegungen führten aber aus Gründen der Betriebssicherheit und der Betriebsfreiheit eindeutig dazu, dass auch auf der Hochspannungsseite des Übertragungssystems Leistungsschalter benötigt werden.

Dank dem heute bewährten Prinzip der Vielfach-Unterbrechung — d. h. der Serieschaltung von mehreren Unterbrechungsstellen pro Pol — stellte die Aufgabe, Schalter für 750 kV zu konstruieren, keine grundsätzlich neue Probleme. Jedoch traten einige Gesichtspunkte in den Vordergrund, denen bei niedrigeren Spannungen geringere Bedeutung zukamen.

2. Elektrische Anforderungen an die Schalter

Es werden heute schon Ausschaltleistungen von 35 000 MVA verlangt, und ohne allzuweit in die Zukunft zu blicken, kann man sich Transformatorenstationen vorstellen, welche Kurzschlussleistungen von 50 000...60 000 MVA aufweisen. Dies entspricht Ausschaltströmen von 40...50 kA.

In Fig. 1 ist ein Beispiel einer ausgebauten Transformatorenstation eines sehr starken zukünftigen Netzes dargestellt. Es ist angenommen, dass die Station von Kraftwerken gespeist wird, die 200 und 400 km entfernt sind. Die angegebenen Kurzschlussleistungen P_k sind jene dieser Kraftwerke. An der 750-kV-Sammelschiene der Transformatorenstation tritt eine Kurzschlussleistung von 50 000 MVA auf. Die Berechnung der transitorischen wiederkehrenden Spannung nach der Ausschaltung eines solchen Sammelschienenkurzschlusses mit der maximalen Kurzschlussleistung ergibt den in Fig. 1 gezeichneten Verlauf. Der Anfangsanstieg dieser Spannung beträgt 650 V/µs, was verhältnismässig gering ist.

Fig. 2 zeigt die gleiche Station mit den gleichen Speiseverhältnissen. Jedoch entspricht der gezeichnete Kurzschlussfall demjenigen, der die höchste Eigenfrequenz der wiederkehrenden Spannung nach dem Ausschalten ergibt. Die Kurzschlussleistung beträgt noch 8300 MVA, d. h. weniger als 20 % der maximalen Kurzschlussleistung. Die Eigenfrequenz der wiederkehrenden Spannung ist 4000 Hz.

32'864-874

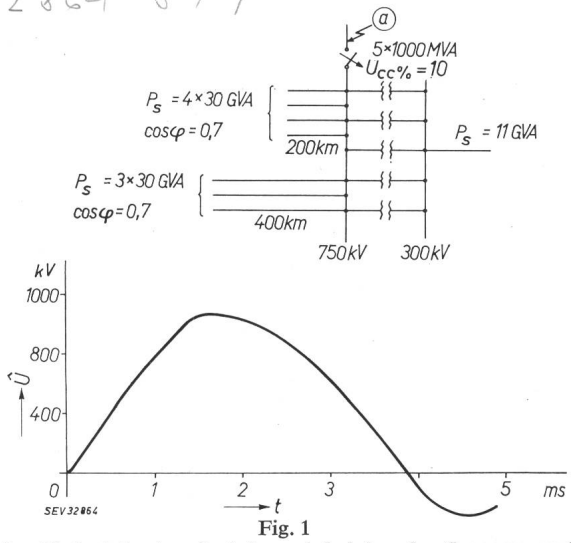

Fig. 1

Zeitlicher Verlauf der transitorischen wiederkehrenden Spannung nach dem Ausschalten eines Sammelschienenkurzschlusses in einer Transformatorenstation eines stark ausgebauten zukünftigen 750-kV-Netzes

(a) Fehlerstelle;

P_k Kurzschlussleistung an der Fehlerstelle 50 000 MVA; P_s Kurzschlussleistungen der speisenden Kraftwerke; $U_{cc\%}$ prozentuale Kurzschlußspannung der Transformatoren; $\hat{U}$ Spannung; t Zeit

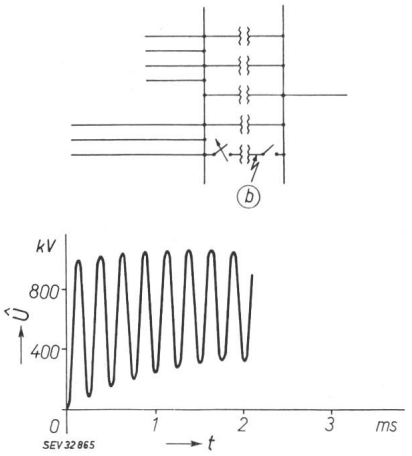

Fig. 2
Zeitlicher Verlauf der transitorischen wiederkehrenden Spannung über dem 750-kV-Schalter nach dem Ausschalten eines Kurzschlusses auf der 300-kV-Seite eines Transformators des gleichen Netzes wie in Fig. 1

(b) Fehlerstelle

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

Der Abstandskurzschluss stellt für die Höchstspannungsschalter keine besonders strenge Anforderung dar. Bei diesem Schaltfall ist bekanntlich die Anfangssteilheit der wiederkehrenden Spannung proportional dem Ausschaltstrom und dem Wellenwiderstand der Leitung, auf der der Kurzschluss auftritt [1; 2] [1]). Für einen gegebenen Strom, die gleiche Leitungslänge und den gleichen Wellenwiderstand ist somit die charakteristische sägezahnförmige Spannungsschwingung genau dieselbe, ob es sich um eine treibende Spannung von z. B. 80 oder 750 kV handelt. Bei 80 kV hat der Schalterpol jedoch nur 1...2 Unterbrechungsstellen, welche diesen scharfen Spannungsverlauf beherrschen müssen, während sich bei 750 kV z. B. 10...12 Löschkammern in die Aufgabe teilen. Daher tritt der Abstandskurzschluss bei den höchsten Spannungen eher in den Hintergrund.

Fallen zwei durch nur eine Leitung verbundene Netze ausser Tritt, und muss der Schalter diese Verbindung unterbrechen, so wird er mit einer erhöhten Spannung beansprucht, d. h. ein Schalterpol spürt die Summe der beiden Netzspannungen. Die Erfahrung hat gezeigt, dass ein Schalterpol im Netz mit starrer Nullpunkterdung bei Phasenopposition dann genügt, wenn er die doppelte Spannung Phase-Erde, bezogen auf die maximale Betriebsspannung, beherrscht [3].

3. Schaltüberspannungsprobleme

Da bei den hohen Übertragungsspannungen von 500... 750 kV trotz eines möglichst tiefen Isolationsniveaus eine möglichst hohe Betriebssicherheit angestrebt wird, spielen die Überspannungen, welche bei Schalthandlungen auftreten können, eine massgebende Rolle.

Es ist von grosser Wichtigkeit, diese zu kennen und mit wirtschaftlichen Mitteln zu begrenzen.

Es sind zwei hauptsächliche Ursachen von Schaltüberspannungen zu nennen:

a) Überspannungen beim Ausschalten kleiner induktiver Ströme;
b) Überspannungen, die mit Schalthandlungen im Zusammenhang mit langen Übertragungsleitungen auftreten.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

3.1 Ausschalten kleiner induktiver Ströme

Wird ein 700-kV-Transformator mit einer Nennleistung von mehreren hundert MVA im Leerlauf ausgeschaltet, so entstehen in der Regel nur sehr kleine Überspannungen, da der Leerlaufstrom sehr klein ist, d. h. höchstens einige Ampère beträgt. Ist hingegen der Transformator unterspannungsseitig oder an einer Tertiärwicklung mit Reaktoren belastet, so ist der induktive Strom auf der 700-kV-Seite grösser; dieser kann deshalb bei grösseren Momentanwerten abreissen, was höhere Überspannungen zur Folge haben kann. Auch wenn auf das Einschalten eines unbelasteten Transformators unmittelbar eine Ausschaltung folgt, können höhere Überspannungen entstehen, vorausgesetzt, dass der relativ grosse Einschaltstrom noch nicht auf den Stationärwert abgeklungen ist. In diesen Fällen muss der Schalter unter Umständen mit passenden überspannungsdämpfenden Widerständen ausgerüstet werden oder es sind andere überspannungsbegrenzende Mittel wie z. B. Ableiter vorzusehen [4].

3.2 Schalten langer Übertragungsleitungen

Im Zusammenhang mit den langen Übertragungsleitungen bei den Höchstspannungen traten Vorgänge bei Schalthandlungen in den Vordergrund, deren Einflüsse bei den kleineren Nennspannungen vernachlässigt werden durften oder nur eine untergeordnete Rolle spielten. Beim Ausschalten und Einschalten von langen Übertragungsleitungen treten hauptsächlich bei einem schwachen speisenden Netz Überspannungen auf, deren primäre Ursachen nicht durch den Schalter selbst, sondern durch die Netzverhältnisse gegeben sind. Fig. 3 gibt eine Übersicht über die Schaltfälle, die bei langen unverzweigten Leitungen in bezug auf die Schaltüberspannungen von Wichtigkeit sind. Für die Berechnung derselben sind sowohl die Eigenschaften der Leitung, der Zustand des speisenden Netzes und auch gewisse Schaltereigenschaften massgebende Faktoren [5; 6].

Als Beispiel zeigt die Fig. 4a die zeitlichen Spannungsverläufe beim Ausschalten einer 400 km langen Leitung nach einem Lastabwurf am Ende der Leitung [7]. Das speisende Netz besitzt eine relativ schwache Kurzschlussleistung von 2000 MVA. Die Darstellung zeigt, dass das Potential U_L der Leitung auf dem Scheitelwert der durch den vorangegangenen Lastabwurf erhöhten betriebsfrequenten Spannung hängen bleibt. Die speiseseitige Spannung U_S schwingt mit der Eigenfrequenz des Netzes auf die Leerlaufspannung

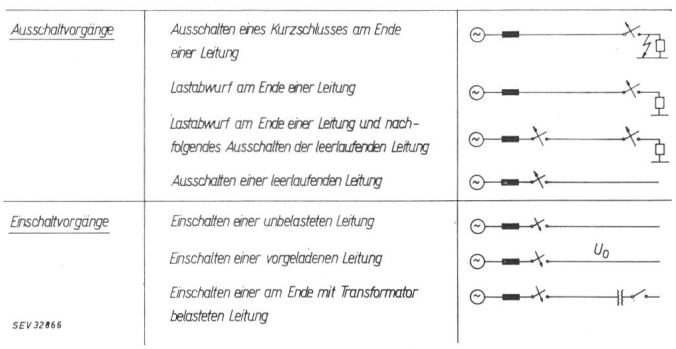

Fig. 3
Die wichtigsten Schaltvorgänge im Zusammenhang mit langen Übertragungsleitungen

U_0 Potential der vorgeladenen Leitung

ein. Rechts in der Figur ist die über dem Schalter erscheinende Spannung ΔU gezeichnet. Es ist nun wichtig, dass der Schalter rückzündungsfrei ausschaltet, damit nicht rückzündungsbedingte höhere Überspannungen auftreten können.

Die Höchstspannungsleitungen müssen bei grossen Längen, z. B. 400 km oder mehr, wegen des Ferrantieffektes mit Hochspannungsreaktoren ausgerüstet werden, welche je zwischen Phase und Erde, an einem oder an beiden Leitungsenden, zu schalten sind. In diesem Falle tritt gegenüber der unkompensierten Leitung eine andere Spannungsbeanspruchung auf. Einerseits ist wegen der Drosselspulen die betriebsfrequente Spannung niedriger und anderseits werden auch die transienten Überspannungen günstig beeinflusst. Fig. 4b illustriert das Verhalten der Spannungen beim Ausschalten der 400 km langen Leitung mit einer 50-%-igen Kompensation. Die Leitung bleibt nun nach der Ausschaltung nicht mehr auf Potential hängen, sondern schwingt mit der Eigenfrequenz des aus den Drosselspulen und der Leitungskapazität zusammengesetzten Kreises. Die Amplitude dieser Schwingung U_L ist aber durch die Kompensation niedriger als das Potential, auf dem die nichtkompensierte Leitung hängen bleiben würde. Die über dem Schalter erscheinende wiederkehrende Spannung ΔU zeigt einen wesentlich günstigeren Verlauf.

Bisher stellte das Einschalten von leerlaufenden Hochspannungsleitungen keine besonderen Probleme. Bei den Betriebsspannungen von 700 kV können jedoch besonders bei einem schwachen speisenden Netz und sehr langen Leitungen transiente Ausgleichsvorgänge auftreten, die zu Überspannungen führen. Eine durch Hochspannungsdrosselspulen kompensierte Leitung verhält sich dabei im wesentlichen wie eine kürzere, nichtkompensierte Leitung. Beispielsweise wird eine 400 km lange Leitung mit 50-%-iger Kompensation beim Einschalten ein ähnliches Verhalten zeigen wie eine unkompensierte Leitung von 200 km Länge. Dabei wirkt aber die Eisensättigung der Drosselspulen auf die Einschaltüberspannungen dämpfend, also im günstigen Sinne.

Die Darstellung in Fig. 5 stellt als Beispiel die 3 Phasenspannungen R, S und T beim Einschalten einer 200 km

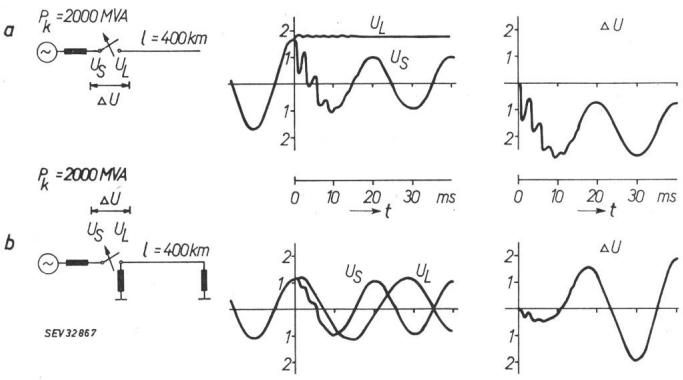

Fig. 4

Zeitliche Spannungsverläufe beim Ausschalten einer 400 km langen leerlaufenden Leitung nach einem Lastabwurf am Ende der Leitung

a ohne Hochspannungs-Kompensationsdrosselspulen; *b* mit 50%iger Kompensation der Leitungskapazität durch Hochspannungs-Kompensationsdrosselspulen am Anfang und Ende der Leitung

U_L leitungsseitige Spannung; U_S speiseseitige Spannung; ΔU Spannung über dem Schalter; P_k Kurzschlussleistung des speisenden Netzes; l Leitungslänge

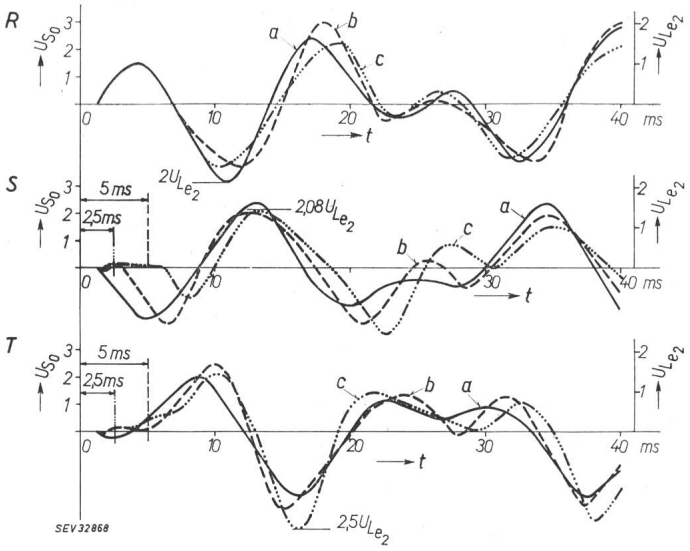

Fig. 5

Zeitlicher Verlauf der 3 Phasenspannungen R, S und T beim Einschalten einer 200 km langen unkompensierten Leitung

a gleichzeitiges Einschalten der Phasen R, S und T; *b* Phase S wird 2,5 ms nach Phase R und Phase T 5 ms nach Phase R eingeschaltet; *c* Phase S wird 5 ms nach Phase R und Phase T 2,5 ms nach Phase R eingeschaltet

U_{S0} speiseseitige Spannung vor dem Schaltvorgang; U_{Le2} Spannung am Ende der Leitung nach dem Einschaltvorgang

langen, unkompensierten Leitung dar. Schliessen die 3 Schalterpole nicht gleichzeitig, so sind die Spannungsverläufe verschieden. Die ausgezogene Linie zeigt den transienten Vorgang beim gleichzeitigen Einschalten der 3 Phasen, wobei die transiente Überspannung den doppelten Wert der nach dem Schaltvorgang erscheinenden quasistationären betriebsfrequenten Spannung erreicht. Die gestrichelte Linie gibt die Verhältnisse wieder, wenn die Phase S 2,5 ms nach Phase R, und die Phase T 5 ms nach der ersten Phase R eingeschaltet wird, und bei der strichpunktierten Linie schaltet der Pol der Phase S 5 ms und derjenige der Phase T 2,5 ms nach dem ersten Pol R ein. Ein ungleichzeitiges Einschalten der 3 Schalterpole ergibt also erhöhte Überspannung; im vorliegenden Beispiel ist die Erhöhung 25 % bei einem zeitlichen Unterschied von je 2,5 ms zwischen den 3 Polen. Das Verhältnis verschiebt sich allerdings zu günstigeren Werten, wenn die vorhandenen Dämpfungen berücksichtigt werden. Die grösseren Überspannungen beim ungleichzeitigen Einschalten lassen sich durch induktive und kapazitive Kopplung zwischen den schon eingeschalteten und den noch freien Leitungsphasen erklären.

Die Konsequenz dieses Ergebnisses ist, dass von den Höchstspannungsschaltern ein möglichst gleichzeitiges Arbeiten der 3 Pole verlangt werden muss.

Durch Verwendung von Schaltwiderständen können die Einschaltüberspannungen beträchtlich reduziert werden. Die Betriebserfahrungen werden allerdings erst zeigen, ob es sinnvoll ist, diesen Schaltfall auf diese Weise zu lösen oder ob andere mögliche Mittel eventuell auf billigere Art und Weise zu demselben Ziele führen. Fig. 6 zeigt an Hand des Beispieles einer dreiphasigen Schnellwiedereinschaltung den Effekt von Einschaltwiderständen bei einer Leitung ohne Kompensationsdrosselspulen. Es sei noch bemerkt, dass einpolige Schnellwiedereinschaltung bei den Höchstspannungsübertragungen kaum mehr in Frage kommt, da wegen der Phasenkopplung ein Restlichtbogen kaum mehr löscht.

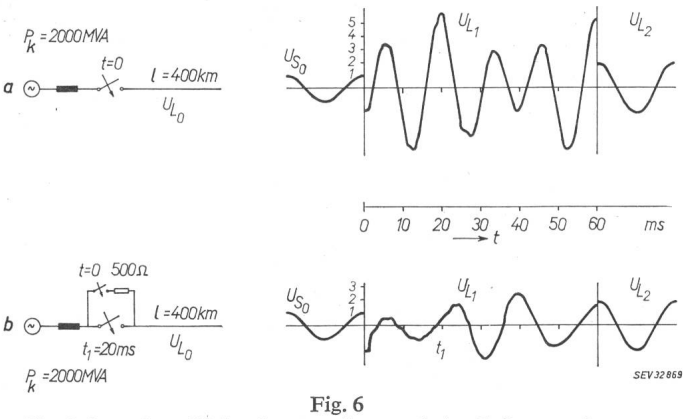

Fig. 6

Einschalten einer 400 km langen unkompensierten Leitung nach vorangegangener Ausschaltung (Schnellwiedereinschaltung)

a ohne Einschaltwiderstand; *b* mit Einschaltwiderstand

P_k Kurzschlussleistung des speisenden Netzes; U_{S0} speiseseitige Spannung vor der Schalthandlung; U_{L0} Potential der Leitung vor der Schalthandlung; U_{L1} Leitungsspannung während des Ausgleichsvorganges; U_{L2} Leitungsspannung unmittelbar nach dem Ausgleichsvorgang; t_1 Zeitpunkt des Kurzschliessens des Einschaltwiderstandes; *l* Leitungslänge

Im vorliegenden Beispiel sei vorausgesetzt, dass nach der dreipoligen Ausschaltung eines einpoligen Erdschlusses die gesunden Leitungsphasen noch einige Zeit geladen bleiben. Die nachfolgende Einschaltung erfolge in dem Moment, wo die Speisespannung den Maximalwert entgegengesetzter Polarität aufweist. Bei der kompensierten Leitung können ähnliche Verhältnisse auftreten, indem die nach dem Ausschalten frei schwingende Leitung beim Einschalten entgegengesetztes Potential haben kann wie die Speiseseite. Fig. 6a zeigt den zeitlichen Spannungsverlauf beim Einschalten unter den genannten Voraussetzungen und zwar ohne Einschaltwiderstände. In Fig. 6b ist der Schalter mit einem Widerstand von 500 Ω pro Pol ausgerüstet. Das Einschalten erfolgt zweistufig. Zuerst wird der Widerstand zwischen die beiden Netzteile geschaltet und nach 20 ms im Zeitpunkt t_1 kurzgeschlossen. Die transienten Überspannungen erreichen nur noch etwa den halben Wert wie ohne Widerstand.

Die optimale Wirkung des Dämpfungswiderstandes ist erreicht, wenn beim Einschalten des Widerstandes und beim Kurzschliessen desselben gleich hohe Überspannungen entstehen. Der optimale Widerstand ist bei einer bestimmten Leitungslänge von der Kurzschlussleistung P_k des speisenden Netzes abhängig (Fig. 7). Es ist also für eine gegebene Leitung nicht zum vornherein möglich, den Schalter mit einem

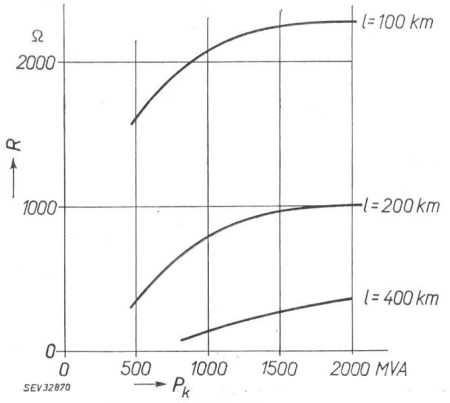

Fig. 7

Optimaler Einschaltdämpfungswiderstand *R* in Abhängigkeit der Kurzschlussleistung P_k des speisenden Netzes für verschiedene Leitungslängen *l*

eindeutig definierten optimalen Widerstand auszurüsten. Ein Widerstandswert von 500...600 Ω dürfte ein vernünftiger Kompromiss sein. Bei einer 400 km langen Leitung wären zwar optimale Widerstandswerte zwischen 150...350 Ω nötig; eine Leitung von dieser Länge dürfte aber kaum mehr ohne Kompensationsdrosselspulen ausgeführt werden, so dass ein höherer Ohmwert gerechtfertigt ist.

4. Einige Betrachtungen über Schaltwiderstände

Grundsätzlich dienen Schaltwiderstände verschiedenen Zwecken. Solche kommen in Betracht (Fig. 8):

a) Zur Spannungssteuerung über den Löschkammern eines Schalterpoles bei Vielfachunterbrechung;

b) Zur Dämpfung der Schaltüberspannungen beim Ausschalten von kleinen induktiven Strömen;

c) Als Entladewiderstände beim Ausschalten von leerlaufenden Leitungen, damit die im Leerlauf ausgeschaltete Leitung nicht auf Potential bleibt;

(Diese Anwendung ist allerdings selten.)

d) Zur Dämpfung der transitorisch wiederkehrenden Spannung bei hohen Eigenfrequenzen z. B. bei Abstandskurzschluss;

e) Zur Dämpfung der Einschaltüberspannungen, besonders beim Einschalten langer leerlaufender Übertragungsleitungen.

Zweck	Prinzipschema	Ohmwert pro Pol
Spannungsverteilung		100 000...200 000
Schalten kleiner induktiver Ströme (Überspannungsdämpfung)	1 2	10 000 ... 20 000
Entladen einer leerlaufenden Leitung	1 2	≈ 5000
Kurzschlussausschaltung (Dämpfung der wiederkehrenden Spannung)	1 2	≈ 1000
Einschalten einer leerlaufenden Leitung	2 1	500...1000

SEV 32871

Fig. 8

Prinzipielle Anwendungszwecke von Schaltwiderständen

Erklärungen siehe im Text

Für alle diese Fälle lässt sich jeweils ein optimaler Ohmwert finden. Für den einzelnen Fall selbst variiert dieser Optimalwert je nach den Netzbedingungen beim Einsatz des Schalters. In Fig. 8 ist in der letzten Kolonne die Grössenordnung des Widerstandes pro Pol angegeben. Die Vorgänge erfolgen zweistufig: in der ersten Stufe wird der Widerstand in den Stromkreis geschaltet und in der zweiten Stufe muss der Widerstandsstrom unterbrochen, bzw. beim Einschalten der Widerstand kurzgeschlossen werden. Beim Ausschalten kleiner induktiver Ströme und beim Einschalten von Leitungen entstehen bei allen Teilvorgängen, d. h. bei jeder Schaltstufe, Überspannungen. Der Widerstandswert muss deshalb so gewählt werden, dass bei beiden Stufen ungefähr gleich hohe Überspannungen entstehen. Da die angeführten fünf Fälle zu ganz verschiedenen Ohmwerten führen, ist es kaum möglich, mit dem gleichen Widerstand alle Bedingungen zu erfüllen. Man kann aber anderseits nicht mehrere Widerstandsarten an einen Schalter anbauen, ohne diesen wesentlich zu verteuern und zu komplizieren. Es ist dabei auch zu berücksichtigen, dass zu jedem Widerstand eine Schaltstrecke in Serie nötig ist, die für die volle Isolationsspannung ausgelegt werden muss.

Das Problem wird ganz wesentlich vereinfacht, wenn bezüglich der Schaltüberspannungen nicht zu strenge Forderungen gestellt werden. Je höhere Überspannungswerte zugelassen werden, umso leichter ist es, einen für die verschiedenen Schaltfälle gemeinsamen Widerstandswert zu finden, mit anderen Worten einen einfacheren und billigeren Schalter zu bauen. Für die Verhältnisse bei 750 kV scheint uns ein zulässiger Überspannungsfaktor vom 2,5fachen Scheitelwert der betriebsfrequenten Spannung gegen Erde, auf die obere Netzspannung bezogen, ein auch für das ganze Netz tragbarer Kompromiss.

5. Leistungsschalter

5.1 Allgemeine Probleme

Die Leistungsschalter für die Höchstspannungen sind durchwegs auf dem Prinzip der Vielfachunterbrechung aufgebaut, wobei eine mehr oder weniger grosse Zahl von Leistungsunterbrechungsstellen pro Pol in Serie geschaltet sind. Um die Schaltleistung aller dieser Unterbrechungsstellen voll auszunützen, sind besondere Vorkehren zu treffen, um beim Ausschalten über diese Schaltstellen eine gleichmässige Verteilung der wiederkehrenden Spannung zu erhalten. Diese Spannungssteuerung kann prinzipiell auf zwei Arten erreicht werden: entweder durch Parallelkapazitäten zu den Schaltstellen oder durch parallele Steuerwiderstände. Die Kondensatorsteuerung verlangt für eine annähernd lineare Verteilung grosse Kapazitätswerte; jedoch können die Kondensatoren fest über den Schaltstrecken angeschlossen werden. Hochohmige Steuerwiderstände sind billiger als Kondensatoren; sie verlangen jedoch eine Hilfsschaltstelle zur Unterbrechung des Widerstandsstromes. Beide Methoden werden heute angewandt.

Von den seriegeschalteten Unterbrechungsstellen muss ein weitgehend gleichzeitiges Arbeiten verlangt werden. Das rückzündungsfreie Ausschalten von leerlaufenden Leitungen lässt, besonders bei Schaltern mit schneller Wiederverfestigung der Schaltstrecken, keine grösseren Ungleichzeitigkeiten der Kontakttrennung als 1 bis 2 ms zu. Mehr und mehr wird aber auch ein gleichzeitiges Ein- und Ausschalten der drei Schalterpole verlangt. Dies stellt an die Präzision der Fertigung sehr hohe Anforderungen.

Immer mehr werden heute besonders in Übersee 2-Perioden-Schalter gefordert. D. h. vom Ausschaltbefehl an den Schalter bis zur Löschung des Lichtbogens dürfen nur 2 Perioden oder 33 ms bei einer Netzfrequenz von 60 Hz verstreichen. Die durch die hohe Betriebsspannung von z. B. 750 kV gegebene Isolation gegen Erde bedingt Höhen des Schalters von 10...12 m, wodurch eine Befehlsübertragung durch Druckluft zu langsam wäre. Die schnellen Schaltzeiten werden durch rascharbeitende Steuerorgane und durch mechanische Befehlsübertragung an die Schaltstellen erreicht.

Besondere Beachtung muss wegen der grossen Höhen der Schalter den Windkräften und für gewisse Länder der Erdbebensicherheit geschenkt werden. Die amerikanischen Normen schreiben die Dimensionierung der Schalter für Windgeschwindigkeiten von 150 km/h vor, d. h. für Windkräfte von 100 kg/m², und in Japan ist eine Erdbebensicherheit bei Stössen von 0,5 g, d. h. halber Erdbeschleunigung, vorgeschrieben. Durch sorgfältige Konstruktion und der Wahl von hochwertigem Porzellan lassen sich diese Forderungen mit guter Sicherheit verwirklichen.

Das Funktionieren der Schalter darf durch extreme klimatische Bedingungen nicht beeinträchtigt werden. Sowohl bei Temperaturen bis — 50 °C als auch unter tropischen Bedingungen muss die Betriebssicherheit gewährleistet sein.

In den letzten Jahren hat die Radiostörfreiheit durch die rapide Ausbreitung von Radio und besonders des Fernsehens sehr an Bedeutung gewonnen. Es ist nicht mehr unbedingt so, dass Höchstspannungs-Schaltstationen weitab von besiedelten Gebieten liegen, sondern es haben sich einerseits die Siedlungsgebiete ausgebreitet und anderseits trachtet man danach, mit den Übertragungsleitungen nahe an die Verbraucherzentren zu kommen. Es sind deshalb Mittel wie z. B. Abschirmungen und Koronaringe an den Schaltern vorzusehen, um Radiostörspannungen zu vermeiden.

5.2 Ausführungsbeispiele

Fig. 9 zeigt einen ölarmen Leistungsschalter für die Betriebspannung von 750 kV mit Mehrfachunterbrechung nach dem System von Sprecher & Schuh in Aarau. Er ist wie bei den tieferen Spannungen aus gleichartigen und im Betrieb bewährten Schaltelementen aufgebaut [8]. Die Dimensionen ergeben sich aus den Bedingungen für die erste Energieübertragung in Kanada [9; 10]. Die besonderen Schaltfälle werden damit voll beherrscht, wobei die Abschaltleistung für den ölarmen Schalter kein besonderes Problem darstellt, indem die Ausschaltströme die heutigen Werte von etwa 27 kA und 40 kA nicht übersteigen. Die Zahl von 20 Unterbrechungsstellen ist vor allem durch die hohe Spannung von 1100 kV der rückzündungsfrei zu schaltenden Leitung erforderlich. Zur Reduktion der Einschaltüberspannungen können grundsätzlich am Schalter Einschaltwiderstände angeordnet werden. Es scheint jedoch wenig sinnvoll, diesen Schaltfall mit dem Schalter lösen zu wollen

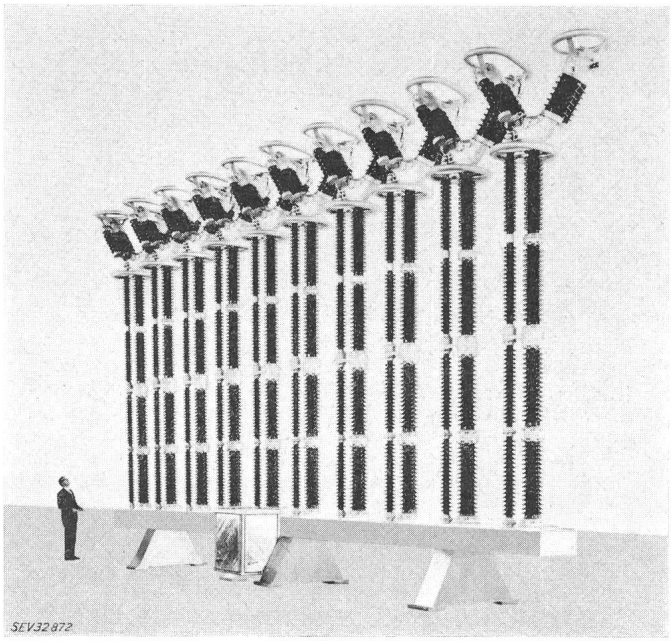

Fig. 9
Pol des ölarmen Schalters von Sprecher & Schuh für die höchste Betriebspannung von 735 kV
Typ HPF 519; Nennstrom 2000 A; Länge des Schalters 13,5 m, Höhe 7,2 m

und einen in seiner Funktion einfachen Schalter zu komplizieren. Das bestgeeignete Mittel bedarf sicher noch einiger Abklärung.

Die äussere Ionisation am Schalter liegt mit den angewandten Abschirmungen gemäss den ausgeführten Messungen über 500 kV und genügt zusammen mit den durchgeführten dielektrischen Prüfungen mit Stoss-Spannung, sowie Wechselspannung trocken und nass den gestellten Anforderungen.

Gegen klimatische Einflüsse wie tiefe Temperaturen, starke Temperaturwechsel usw. ist der ölarme Schalter von Sprecher & Schuh sehr robust. So hat das verwendete Schalteröl die gewünschte Viskosität bis — 54 °C. Ferner ist auch das Ausschaltvermögen praktisch temperaturunabhängig, was zusammen mit dem zentralen Antrieb die einwandfreie Funktion, die maximalen Schaltgeschwindigkeiten sowie kleine Eigenzeiten gewährleistet.

Die gleichmässige Spannungsverteilung über die Schaltstrecke wird mittels zu den Schaltstellen parallel angeordneten Ölpapier-Kondensatoren erzielt. Die Isolation gegen Erde mit der spezifisch höheren elektrischen Belastung ist mit den undurchschlagbaren Vollkernisolatoren und Drehsäulen sehr zuverlässig.

Der Antrieb der Schaltstifte erfolgt von einem zentral angeordneten Öldruckantrieb aus, mechanisch über ein Gestänge und die Drehsäulen. Diese einfache Kraftübertragung, wie sie auch bei tieferen Spannungen zur Anwendung gelangt, gewährleistet die für alle Schaltfälle erforderliche Synchronisation der Schaltstellen.

Fig. 10 stellt einen für die Nennspannung von 750 kV entwickelten Pol eines 2-Perioden-Druckluft-Schnellschalters vom Typ DMF von Brown Boveri dar. Die symmetrische dreiphasige Ausschaltleistung dieser Ausführung beträgt 60 000 MVA. Die vorliegende Konstruktion ist für diese

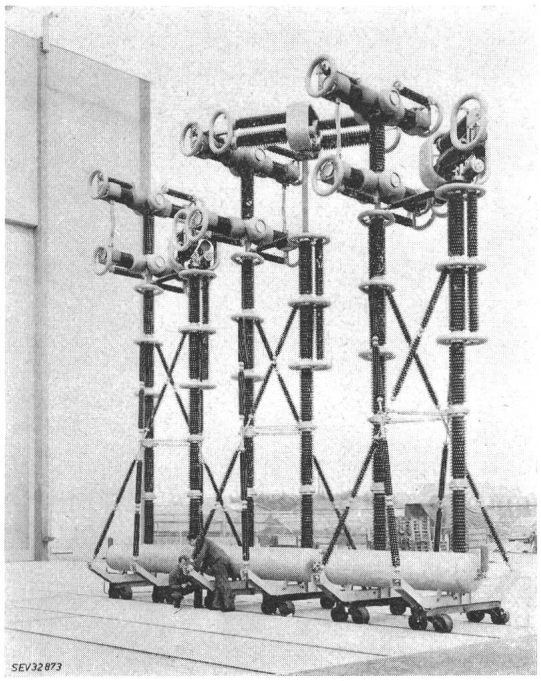

Fig. 10
Pol eines Druckluftschnellschalters Typ DMF von Brown Boveri für die Betriebspannung von 750 kV

Ausschaltleistung 60 000 MVA; Nennstrom 2000 A; Prüfspannung gegen Erde 1150 kV, 50 Hz; Stosshaltespannung 2650 kV

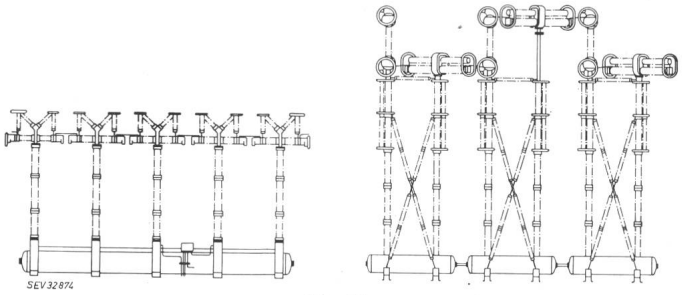

Fig. 11
Grössenvergleich eines Poles des Druckluftschnellschalters Typ DHVF für 420 kV Betriebsspannung und einer Ausschaltleistung von 20 000 MVA *(links)* **mit einem solchen vom Typ DMF für 750 kV Betriebsspannung und 60 000 MVA Ausschaltleistung** *(rechts)*

höchsten Spannungen aus der Schalterreihe Typ DKF abgeleitet worden [11; 12].

Ein Pol besteht aus 3 gleichen Einheiten. Für die Leistungsunterbrechung dienen sog. Impulskammern und für das Einschalten sowie für die elektrische Isolation in der Offenstellung des Schalters die Trennkammern. Auf dem Grundbehälter sind der Steuerblock, die unteren Auslöseorgane sowie die Impulskammersäulen und Trennkammersäulen aufgebaut. Jede Impulskammersäule trägt 4 in Serie geschaltete Impulskammern, wobei je deren zwei zu einer Doppelschalteinheit zusammengefasst sind; auf der Trennkammersäule befinden sich 2 Trennkammern. Pro Pol sind also 12 Impulskammern mit Widerstands-Potentialsteuerung und 6 Trennkammern mit Kondensator-Potentialsteuerung vorhanden. Die Kammerzahl ist so festgelegt, dass auch die extremsten Schaltfälle, besonders auch das rückzündungsfreie Ausschalten von leerlaufenden Leitungen, beherrscht werden; anderseits können die Schaltelemente in den heute zur Verfügung stehenden Prüfanlagen voll geprüft werden.

Beide Schaltkontakte einer Impuls-Unterbrechungsstelle sind als Düsen ausgebildet. Die Druckluft steht sowohl in den Impulskammern wie in den Trennkammern dauernd bis zu den Düsen an. Eine Impulskammer besitzt genügend Luft, um eine Ausschaltung durchzuführen; bei Schnellwiedereinschaltung oder für weitere Schaltmanöver wird die Kammer sofort aus dem Basisbehälter nachgefüllt.

Die Trennkammern dienen neben der Spannungshaltung im ausgeschalteten Zustand des Schalters und dem Einschalten auch zur Unterbrechung des Widerstandsstromes von Ausschaltwiderständen. Die Spannungsverteilung über die offenen Trennkammern wird durch Parallelkondensatoren verbessert.

Die konzentrierte Bauart dieses leistungsfähigen Schalters wird deutlich durch Fig. 11 illustriert. Das linke Bild stellt einen 420 kV Schalterpol vom Typ DHVF für 20 000 MVA, und zum Vergleich das Bild rechts den Typ DMF für 750 kV und 60 000 MVA Ausschaltleistung dar. Einschaltwiderstände zur Dämpfung von Einschaltüberspannungen können beim DMF-Schalter, ohne den Platzbedarf zu vergrössern, angebaut werden.

Es ist damit gelungen, in kürzester Zeit einen modernen und wirtschaftlichen Schalter für 750 kV zu bauen, dessen Leistungsfähigkeit durch eine grosse Anzahl Prüfungen an den Einzelelementen auch für die extremen Schaltfälle nachgewiesen wurde.

Literatur

[1] *Baltensperger P., Ruoss E.:* Der Abstandskurzschluss in Hochspannungsnetzen. Brown Boveri Mitt. Bd. 47(1960), Nr. 5/6, S. 329...339.

[2] *Baltensperger P.:* Neuere Erkenntnisse auf dem Gebiet der Schaltvorgänge und der Schalterprüfung. Brown Boveri Mitt. Bd. 49 (1962), Nr. 9/10, S. 381...397.

[3] *Baltensperger P.:* Schaltvorgänge in Hochspannungsnetzen. Bull. SEV 53(1962)8, S. 370...378.

[4] *Baltensberger P.:* Form und Grösse der Überspannungen beim Schalten kleiner induktiver sowie kapazitiver Ströme in Hochspannungsnetzen. Brown Boveri Mitt. Bd. 47 (1960), Nr. 4, S. 195...224.

[5] *Glavitsch I.:* Betriebsfrequente Überspannungen. Brown Boveri Mitt. Bd. 51(1964), Nr. 1/2, S. 21...32.

[6] *Althammer P., Petitpierre R.:* Schaltvorgänge und Schaltüberspannungen. Brown Boveri Mitt. Bd. 51 (1964), Nr. 1/2, S. 33...46.

[7] *Dandeno P. L., Mc Clymont K. R.:* Extra-High-Voltage System Overvoltages Following Load Rejection of Hydraulic Generation. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1963, Nr. 65.

[8] *Roth A. W.:* Entwicklungstendenzen im Bau von Flüssigkeitsschaltern. E und M Bd. 79(1962), Nr. 1, S. 1...8.

[9] *Lauener P.:* Ausbau eines Höchstspannungsnetzes von 735 kV in Kanada. Brown Boveri Mitt. 51(1964), Nr. 1/2, S. 111/112.

[10] *Cardella O., Fournier R. P., D'Anteuil L., Mc Gillis D. T., Monty G.:* Hydro-Quebec's 735 kV-System in Operation by 1965. IEEE Conference Paper CP 63—1132.

[11] *Petitpierre R.:* Druckluftschalter für Hoch- und Höchstspannungsnetze. Brown Boveri Mitt. Bd. 49 (1962), Nr. 9/10, S. 404...421.

[12] *Baltensperger P., Schneider J.:* Druckluft-Leistungsschalter für 750 kV. Brown Boveri Mitt. Bd. 51(1964), Nr. 1/2, S. 69...75.

Adresse des Autors:

E. Ruoss, Abteilungsvorstand, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

Trenner für 750 kV

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 21. Januar 1964 in Zürich,
von *W. Gaigg,* Aarau

621.316.545

Der Übergang von der bisher angewendeten höchsten Übertragungsspannung von 420 auf 750 kV bringt auch für die Entwicklung und Konstruktion von Trennern zusätzliche Probleme. Im folgenden soll versucht werden, die wichtigsten herauszugreifen und kurz zu behandeln.

1. Anforderungen

Die durch die höheren Betriebs- und Prüfspannungen bedingte Vergrösserung der mechanischen Abmessungen stellt in erster Linie grössere Anforderungen an einen ausgewogenen Bewegungsablauf der Schaltbrücke. Die Schaltbewegung des Trenners soll grundsätzlich schnell erfolgen, damit die Zeitdauer der vom Ladestrom der Leitung verursachten Überschläge unmittelbar vor dem Schliessen und nach dem Öffnen des Hauptkontaktes abgekürzt wird. Bei einer grösseren Trennstrecke bedingt dies zwangsläufig eine höhere Schaltgeschwindigkeit. Überdies wird die Schaltbrücke durch ihre grössere Länge schwerer. Das heisst, zu Beginn der Schaltbewegung muss eine, gegenüber dem 420-kV-Trenner grössere Masse, welche sich zudem noch mit erhöhter Geschwindigkeit bewegt, so wirkungsvoll abgebremst werden, dass das Schliessen der Trenner-Hauptkontakte ruhig und prellfrei erfolgt; und zwar auch dann, wenn die Masse der Schaltbrücke noch durch Schnee- und Eislasten vergrössert wird. Dazu kommen die Beanspruchungen durch Wind bis zu einer Geschwindigkeit von 40 m/s, und eventuelle Erdbeben, welche ebenfalls zu beherrschen sind. Der Trenner-Hauptkontakt muss kurzschlussfest sein, auch bei vereistem Trenner leicht einlaufen und eine gute Kontaktgabe gewährleisten. Vermehrte Aufmerksamkeit ist der äusseren Gestaltung des Trenners zu schenken, um ihn bis mindestens 110 % der höchsten Phasenspannung vollkommen glimmfrei zu halten.

Im Gegensatz zu den anderen Apparaten in einer Schaltanlage, wie Leistungsschalter, Strom- und Spannungswandler und Überspannungsableiter, haben wir es beim Trenner mit einem Apparat zu tun, welcher seine äussere Form im Laufe des Schaltvorganges vollkommen ändert. Bei den Schwenktrennertypen sind es vor allem die in offenem Zustand weit seitlich oder nach oben ausladenden Arme, welche besondere Glimmschutzmassnahmen erfordern; bei den Scherentrennern ist es die ganze im offenen Zustand gefaltete Schaltbrücke und der Gegenkontakt.

Aber nicht nur funktionelle Überlegungen entscheiden über die Brauchbarkeit einer Trennerkonstruktion. Bei den hier zu Diskussion stehenden Trennern mit sehr grossen Abmessungen, muss auch auf eine gute Transportmöglichkeit geachtet werden. Ausserdem beeinflusst die Gesamtkonzeption eines Trenners die Anlagegestaltung und damit die Kosten für die zu erstellenden Abspanngerüste mehr als jeder andere Apparat. Trenner mit grossem Grundflächenbedarf führen nicht nur zu vermehrten Kosten für den Landerwerb, sie bedingen auch längere Gerüstkonstruktionen. Die Sammelschienen müssen über grössere Distanz abgespannt werden. Daraus resultiert ein grösserer Abspannzug, welcher wiederum zu einer Verstärkung der Gerüstkonstruktionen zwingt. Trenner mit grosser Einbauhöhe erfordern ihrerseits entsprechend hohe Abspanngerüste, deren stabile Konstruktion mit zunehmender Höhe immer kostspieliger wird. Dieser Einfluss der Trennerbauweise auf die Kosten der Abspanngerüste einer Anlage ist bereits bei einer Betriebsspannung von 420 kV deutlich zu bemerken, wird aber bei einer Betriebsspannung von 750 kV so stark, dass ihm bei der Projektierung der Anlage unbedingt Beachtung geschenkt werden muss.

2. Ausführung

2.1 Schwenktrenner

Der in Europa wohl am häufigsten verwendete Trennertyp ist der in Fig. 1 dargestellte Schwenktrenner. Er besteht aus einem Grundrahmen, auf welchem die beiden Stützisolatoren drehbar gelagert sind. Die Drehlager sind über ein Kupplungsgestänge verbunden. Die Schaltbrücke besteht aus zwei Armen. Diese werden gegenläufig horizontal geschwenkt und geben so die Trennstrecke frei. Auf die Stützisolatoren wirken ausser dem Abspannzug und den elektrodynamischen Kräften der abgespannten Leiter, noch die Massenkräfte beim Abbremsen der Schaltbrücke in den Trennerendstellungen. Da der Einbau eines Steuergliedes zur Kontaktdruckerzeugung nicht möglich ist, muss der Kontaktdruck im Hauptkontakt während der Schliessbewegung erzeugt werden. Die dabei auftretenden Reaktions-