Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 53 (1962)

Heft: 8

Artikel: Anwachsen der Kurzschlussleistungen in den schweizerischen Netzen und Grenzleistungsprobleme

Autor: Trümpy, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916925

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

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

Anwachsen der Kurzschlussleistungen in den schweizerischen Netzen und Grenzleistungsprobleme

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

von *E. Trümpy*, Olten

621.3.064.1 : 621.311.161(494)

An Hand von Schemata des schweizerischen Hochspannungsnetzes wird gezeigt, wie sich die Kurzschlussleistungen in einigen wichtigen Netzpunkten vergrössert haben und mit welchen Werten unter bestimmten Annahmen in einem spätern Zeitpunkt gerechnet werden muss. Es wird auf die Ursachen dieser Entwicklung eingegangen und dargelegt, dass es aus Gründen der Betriebssicherheit wünschenswert sein kann, durch geeignete Massnahmen, die kurz erläutert werden, das Anwachsen der Kurzschlussleistungen zu beeinflussen.

A l'aide de schémas du réseau suisse à haute tension, le conférencier montre comment la puissance de court-circuit a augmenté à certains points importants de ce réseau et avec quelles valeurs il y a lieu de compter à une date ultérieure, en se basant sur certaines suppositions. Il indique les causes de ce développement et explique qu'il peut être désirable, pour des motifs de sécurité d'exploitation, d'influencer l'augmentation des puissances de court-circuit par des mesures appropriées, qu'il décrit brièvement.

1. Einleitung

Die Beherrschung von Kurzschlüssen in den Netzen aller Spannungsstufen ist ein Anliegen, dem sowohl die Industrie als auch die Elektrizitätsunternehmen seit Beginn der Verwertung elektrischer Energie ihre volle Beachtung schenken. Rückblickend ist die Feststellung berechtigt, dass der Kurzschluss in einem Netz im Verlaufe der Jahre immer besser bewältigt werden konnte, und dass in dieser Hinsicht sehr grosse Fortschritte erzielt wurden. Betrugen die Kurzschlusszeiten anfänglich 3 oder gar 5 s, so ist man heute im Prinzip bei 0,1 s oder weniger angelangt. Selektiv schützende und rasch reagierende Relais sowie Schalter mit kleinen Eigenzeiten und hohem Abschaltvermögen bewirkten diese bedeutenden Erfolge. Die dadurch bedingte Erhöhung der Betriebssicherheit war freilich ein Erfordernis, welches sich mit der starken Entwicklung des Bezuges von elektrischer Energie zwangsläufig stellte. Die im Falle eines Kurzschlusses örtlich anstehende Kurzschlussleistung stieg durch den Bau der vielen Kraftwerke und den steten Ausbau der Netze um ein Mehrfaches, was die Auslegung fast aller Anlageteile immer stärker beeinflusste. Damit hat dieser Anstieg der Kurzschlussleistungen nicht nur eine Verschärfung der Forderungen vom Standpunkt der Betriebssicherheit her zur Folge, sondern er wirkt sich auch wirtschaftlich in vermehrtem Masse aus.

2. Entwicklung der Kurzschlussleistungen in der Schweiz

In den ersten Jahrzehnten der Versorgung mit elektrischer Energie, als noch relativ viele begrenzte und untereinander nicht oder nur schwach verbundene Netze bestanden, traten Kurzschlussleistungen von meist einigen hundert MVA auf, deren Beherrschung aber mit den damaligen Mitteln oft recht unzureichend war. Die zunehmende Energieproduktion einerseits sowie die Verstärkung der Netze und ihrer gegenseitigen Verbindungen anderseits trugen dazu bei, dass an verschiedenen Netzpunkten allmählich Kurzschlussleistungen von über 1000 MVA auftraten. Fig. 1a zeigt den Stand des schweizerischen Hochspannungsnetzes um das Jahr 1945. Es sind darin die wichtigsten Transportleistungen mit Spannungen zwischen 50 und 150 kV sowie die grössern Kraftwerke eingetragen. Im weitern enthält es Angaben über die Kurzschlussleistungen in einigen Punkten, die — wie man erkennt — 500...2000 MVA betragen.

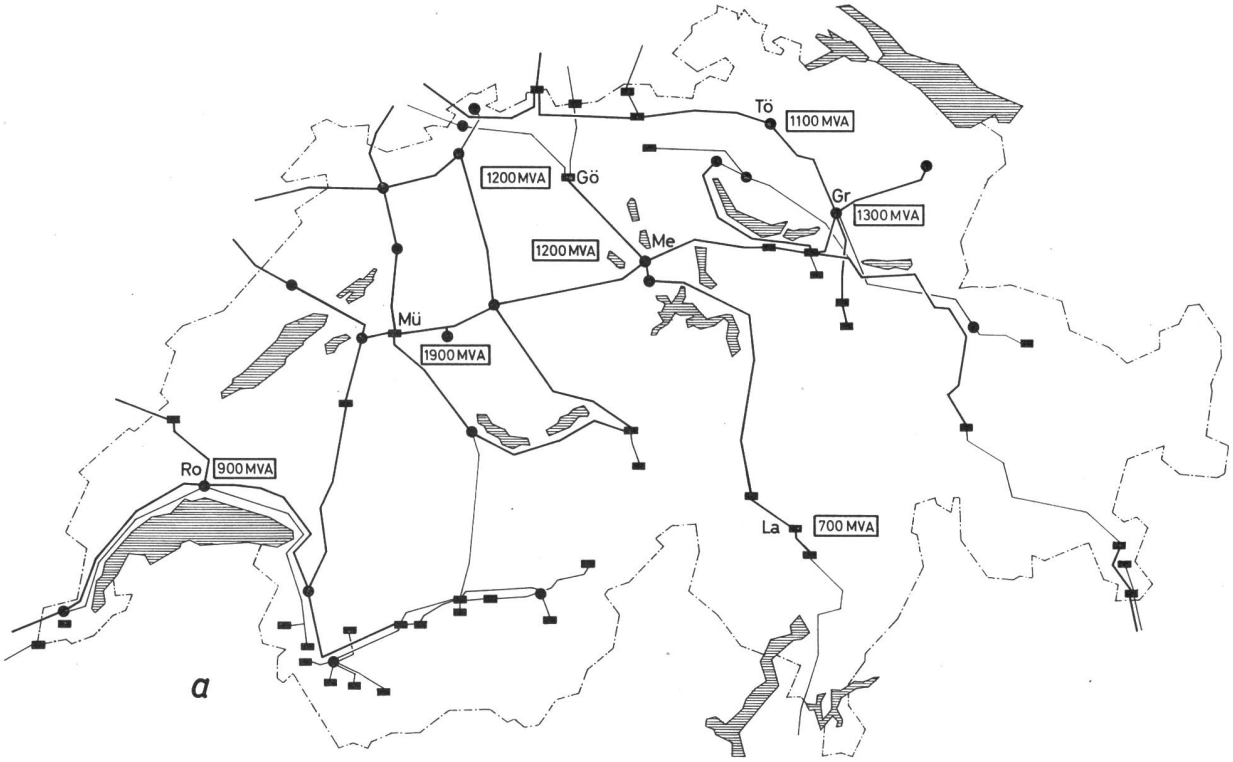
Betrachtet man den Stand der Entwicklung im heutigen Zeitpunkt (Fig. 1b), so ist gewiss erstaunlich, wie stark das schweizerische Netz inzwischen ausgebaut wurde und wie sehr die Kurzschlussleistungen vielerorts angewachsen sind. Dabei erreichen diese Werte naturgemäss in der Nähe der grossen Kraftwerkgruppen, z. B. im Wallis, besonders hohe Beträge. Gesamthaft gesehen kann man feststellen, dass sich während den letzten etwa 16 Jahren die Kurzschlussleistung in wichtigen Verteilzentren wie Romanel, Mühleberg, Mettlen, Grynau, ungefähr verdreifacht hat. Laufenburg weist ebenfalls einen besonders hohen Wert auf, weil dort auch vom Ausland her starke Einspeisungen vorhanden sind.

Der enge Zusammenschluss der verschiedenen Hochspannungsnetze unter sich und mit dem Ausland trägt somit wesentlich zur Erhöhung der örtlichen Kurzschlussleistung bei, weil die Impedanz des Netzes kleiner wird und die Zahl der Einspeisungen in einen Kurzschluss steigt.

Verfolgt man die Entwicklung der Energieproduktion seit der Jahrhundertwende (Fig. 2), so ergibt sich ein Kurvenverlauf in der bekannten Form. Bemerkenswert ist im besonderen, dass sich die Energieerzeugung seit dem hydrographischen Jahr 1947/48, also innert rund 13 Jahren, verdoppelt hat. Aus Fig. 1 geht hervor, wie sich der Zustand des Hochspannungsnetzes und die die Kurzschlussleistung in mindestens gleichem Mass spanne verändert haben. Wenn man annimmt, dass sich bei gleichbleibendem Netzaufbau die Produktion an Energie verdoppeln würde, so hätte dies im allgemeinen ebenfalls eine Verdoppelung der Kurzschlussleistungen zur Folge. Nun sind aber die Kurzschlussleistungen, wie schon erwähnt wurde, bei doppelter Erzeugung um etwa den Faktor 3 angestiegen. Daraus muss geschlossen werden, dass die wachsende Produktion die Kurzschlussleistung in mindestens gleichem Mass ansteigen lässt, und dass darüber hinaus der Ausbau des Netzes diesen Anstieg noch intensiviert. Wieviel die beiden Faktoren für einen bestimmten Netzpunkt dazu beitragen, hängt selbstverständlich von den gegebenen Umständen ab. Theoretische Überlegungen, wie sie in Deutschland gemacht wurden, führten zum Schluss, dass hier ein Wachstumsgesetz vorliege, nach welchem sich bei Produktionsverdoppelung die Kurzschlussleistungen vervierfachen, weil die verstärkte Vermaschung in gleichem Masse wie der Produktionsanstieg die Kurzschlussleistung erhöht [1] [1]).

An dieser Stelle sei auch kurz etwas über die künftige Entwicklung gesagt. Vorausgesetzt, dass sich in den nächsten 15...20 Jahren der Energiekonsum wieder verdoppeln wird, und dass die Vermaschung des Netzes im bisherigen Rahmen weiter fortschreitet, so werden sich die Kurzschlussleistungen im Mittel voraussicht-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.



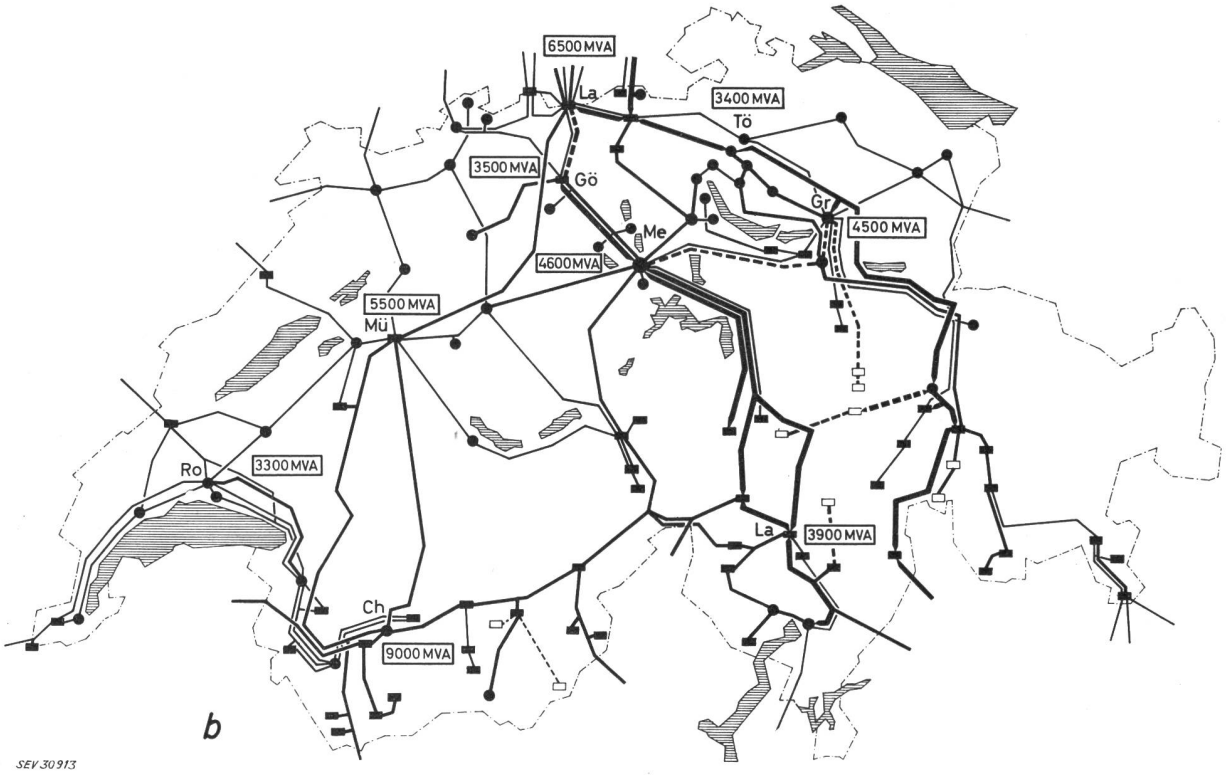


Fig. 1
Das Hochspannungsnetz der Schweiz
Kurzschlussleistungen in einigen Netzpunkten
a Stand um 1945; *b* heutiger Stand

- 380-kV-Leitungen bestehend, mit 220 kV in Betrieb
- 220-kV-Leitungen
- 110...150-kV-Leitungen
- 50...80-kV-Leitungen
- 380-kV-Leitungen im Bau
- 220-kV-Leitungen im Bau
- 150-kV-Leitungen im Bau

- Kraftwerk
- Unterwerk
- Kraftwerk im Bau
- 1000 MVA — Kurzschlussleistung für die höchste Spannungsebene in der betreffenden Anlage

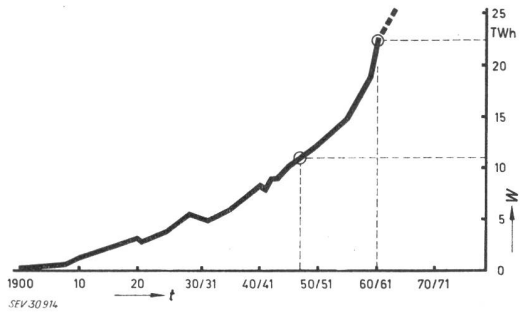


Fig. 2
Entwicklung der gesamten Erzeugung elektrischer Energie *W* in der Schweiz
1947/48: rund 11 TWh; 1960/61: rund 22 TWh; Verdoppelung nach ≈ 13 Jahren
t Zeit

lich erneut um das Dreifache gegenüber heute erhöhen. Fig. 3 zeigt wiederum das Hochspannungsnetz der Schweiz, diesmal unter Einbezug der wichtigeren heute projektierten oder sich im Studium befindlichen Leitungen. Wenn diese Vorhaben einmal verwirklicht sind, wird auch das 380-kV-Netz seinen Betrieb aufgenommen haben. Verschiedene Hauptadern werden die in den Kantonen Wallis, Tessin und Graubünden anfallenden Energien in die Verbrauchsschwerpunkte führen. Das 220-kV-Netz dürfte in jenem Zeitpunkt noch stärker vermascht sein als heute, so dass im Zusammenwirken mit dem 380-kV-Netz an vielen Orten sehr hohe Kurzschlussleistungen entstehen werden. Die in Fig. 3 angegebenen Grössen wurden einerseits auf Grund der erwähnten Entwicklung in der letzten Zeit extrapoliert und anderseits an die Ergebnisse von Netzmodellmessungen angepasst. Es ist hier zu berücksichtigen, dass bei Netzmodellmessungen meistens die ungünstigsten Voraussetzungen getroffen werden, so dass die Resultate zur Beurteilung der Praxis oft mit einem gewissen Faktor reduziert werden müssen. Selbstverständlich handelt es sich bei den wiedergegebenen Zahlen lediglich um Richtwerte, deren Grössenordnung aber immerhin als zutreffend bezeichnet werden darf.

Wie man erkennt, liegen bei den getroffenen Annahmen die zu erwartenden Kurzschlussleistungen in den Höchstspannungsnetzen in vielleicht 15...20 Jahren meist zwischen 10 000 und 20 000 MVA, deren Beherrschung besonders im 220-kV-Netz in jeder Hinsicht sichergestellt werden muss. Auf dem Gebiete des Schalterbaues wurden sehr grosse Fortschritte erzielt; was in bezug auf Abschaltleistungen und Schaltereigenzeit erreicht wurde, ist sicher erstaunlich. Vom Betrieb her darf nun aber nicht ausser acht gelassen werden, dass mit dem leistungsfähigen Schalter allein die Probleme, welche sich infolge hoher Kurzschlussleistungen stellen, nicht vollständig gelöst werden können; bei grossen Konzentrationen von Kurzschlussleistungen ist der Schalter nicht unbedingt hinreichend für die Betriebssicherheit, weil andere Anlageteile unter Umständen überbeansprucht werden.

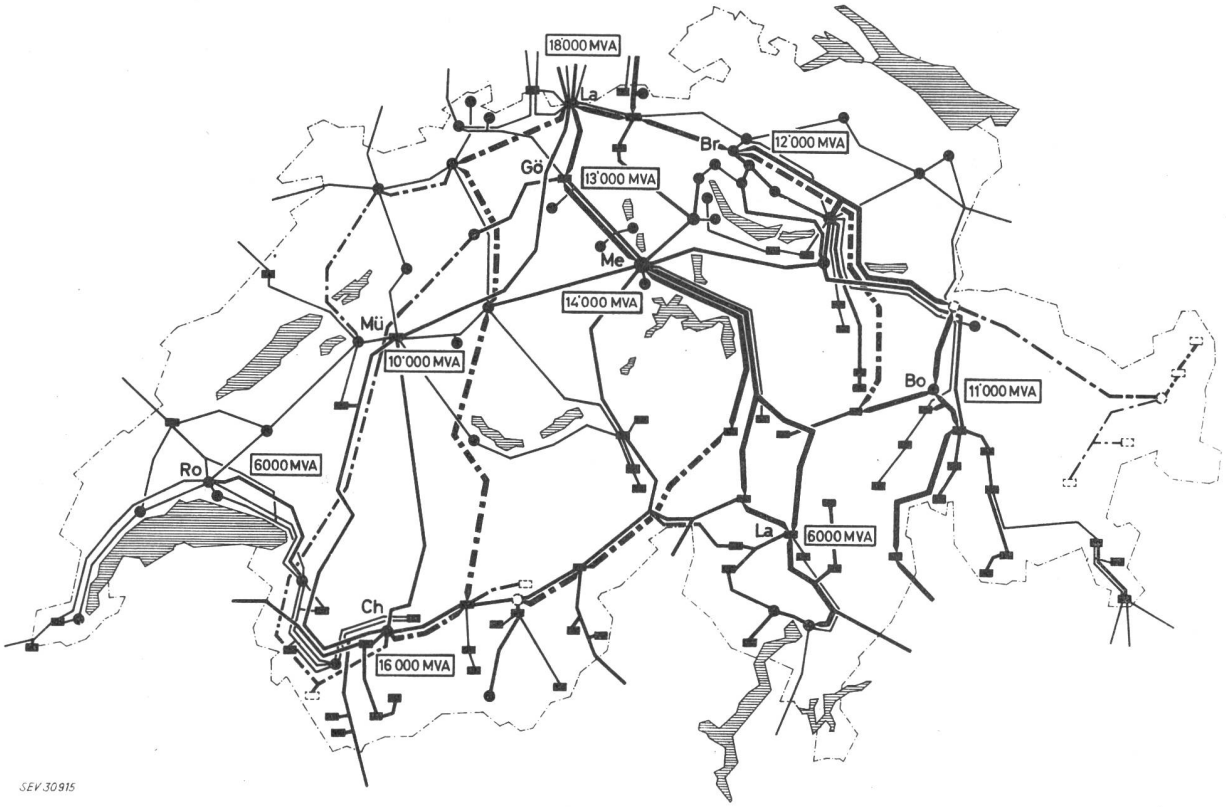


Fig. 3
Voraussichtlicher Weiterausbau und eventuelle spätere Kurzschlussleistungen im Hochspannungsnetz der Schweiz

380-kV-Leitungen
380-kV-Leitungen projektiert
220-kV-Leitungen projektiert
150-kV-Leitungen projektiert
Kraftwerk projektiert
Unterwerk projektiert
1000 MVA Kurzschlussleistung

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

3. Auswirkungen des Kurzschlußstromes

Bekanntlich sind ja für die thermischen Auswirkungen längs des Kurzschlußstromkreises und vor allem an der Fehlerstelle, wo sich meistens ein Lichtbogen bildet, sowie für die oft recht erheblichen Kräftewirkungen die Kurzschlußströme massgebend. Dabei sind diese Wirkungen dem Quadrat des Stromes proportional, so dass sich z. B. bei Verdoppelung des Kurzschlußstromes die Wärme- und Kräftewirkungen ungefähr vervierfachen und somit sehr schnell anwachsen.

Zu den elektrodynamischen Kräften, welche bei Kurzschluss vor allem an Sammelschienen, Stromwandlern, Trennern, Transformatoren und Generatoren wirksam werden, sei lediglich gesagt, dass hier die Zeitdauer keine wesentliche Rolle spielt, sondern dass die entscheidende Wirkung vom Stosskurzschlußstrom ausgeht.

Was die Wärmeentwicklung anbelangt, so ist diese auch direkt von der Kurzschlussdauer abhängig. Bei den heutigen, zum Teil schon sehr kleinen Kurzschlusszeiten treten im Gegensatz zu früher bei hohen Kurzschlußströmen immer wieder Störungen auf, die am betroffenen Anlageteil, z. B. an den Armaturen von Leitungsisolatoren, praktisch keine erkennbaren Spuren hinterlassen. Die kurze Dauer der Einwirkung des Lichtbogens und die Schutzwirkung der Armaturen haben die Isolatoren — selbstverständlich nur bei fehlerloser Fabrikation — sehr betriebssicher gemacht. Aber es stellt sich hier die Frage, ob diese Sicherheit auch künftig, bei noch viel höheren Anforderungen, gewährleistet werden kann. In diesem Zusammenhang sei auf Versuche mit Leistungslichtbögen über 220-kV-Isolatorenketten hingewiesen, welche durch das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich und die Porzellanfabrik Langenthal durchgeführt wurden [2]. Über ähnliche Versuche wurde kürzlich auch aus Deutschland berichtet [3]. Bei bestimmten Schutzarmaturen, Strömen von ein paar tausend Ampère und einigen Zehntelssekunden Lichtbogendauer treten demnach an den Isolatoren Zerstörungen auf. Man kann hier geeignete Gegenmassnahmen, wie Verbesserung der Armaturen, treffen, doch vermag erst die weitere Entwicklung zu zeigen, ob dies später bei 20 oder 30 kA Kurzschlußstrom, unter Berücksichtigung der erreichbaren Kurzschlusszeiten, genügen wird.

Mit diesem Beispiel soll lediglich erläutert werden, wie wichtig es ist, beim Bestreben die heutigen und vor allem auch die künftigen Kurzschlußströme zu beherrschen, das Netz als ganzes im Auge zu behalten. Deshalb sind Schalter höchster Abschaltleistung, aber auch das übrige, für grosse Kurzschlußströme ausgelegte Material nicht uneingeschränkt als Garantie für einen unterbruchslosen Betrieb der Anlagen anzusehen. Dies gilt speziell auch für Störungen in Kraftwerken und Unterwerken; ein Sammelschienenkurzschluss kann je nach der anstehenden Kurzschlussleistung verheerende Auswirkungen haben und nicht zuletzt das Personal erheblich gefährden.

4. Massnahmen gegen zu starkes Ansteigen von Kurzschlussleistungen

Es ist angebracht, an dieser Stelle auch Massnahmen zu erläutern, welche sich im Zusammenhang mit den Gefahren für Material und Mensch aufdrängen. Einleitend wurde die Entwicklung der Kurzschlussleistung geschildert und dabei auch auf die voraussichtlichen künftigen Werte aufmerksam gemacht. Diese werden zweifellos zum Teil sehr hoch liegen, was für die Gestaltung der Netze und die Auslegung der einzelnen Anlageteile von Bedeutung sein wird. Im Kurzschlussfall werden die thermischen und kräftemässigen Beanspruchungen entsprechend ansteigen. In diesem Zusammenhang kann von Grenzleistungen gesprochen werden, d. h. von Leistungen, die örtlich die höchstzulässigen Werte darstellen, denen die Anlagen aber auch im Störungsfall gewachsen sein müssen. Diese Grenzen liegen je nach Bedeutung einer bestimmten Anlage verschieden hoch, entsprechend der Forderung, dass im Kurzschlussfall kein oder nur geringer Schaden entstehen darf. Diese Formulierung ist freilich sehr allgemein gehalten. Sie bedeutet praktisch meist, dass für die höheren Spannungen bei sehr grossen Leistungen auch höhere Anforderungen in bezug auf Auswirkungen im Kurzschlussfall gestellt werden. Damit entsteht zwangsläufig der Wunsch, dass die Kurzschlussleistungen nicht beliebige Werte erreichen, und man wird sich nach geeigneten Gegenmassnahmen umsehen müssen [4].

Ein wirksames Mittel stellt offensichtlich eine zweckmässige Netzgestaltung dar. So wird man sich immer wieder überlegen müssen, ob die Vorteile eines sehr engen Verbundbetriebes und starker Leistungskonzentrationen den dadurch nachteiligen Anstieg der Kurzschlussleistung überwiegen. Für eine bestimmte Anlage wird man danach trachten, eine möglichst hohe Betriebssicherheit in Form einer gewissen Anzahl Kopplungen ohne eine allzugrosse Kurzschlussleistung zu erreichen. Diese Betriebssicherheit in einem Netzpunkt ist ja im allgemeinen nicht eine lineare Funktion der Zahl der in ihm zusammengeführten Leitungen, sondern sie erreicht irgendwann ein Optimum. Dies lässt sich z. B. so darstellen:

Unter der Annahme, dass ein an eine Stichleitung angeschlossenes Unterwerk durch Fehler auf dieser Leitung im Verlaufe eines Jahres insgesamt 10 h spannungslos sei, wobei für den Zeitpunkt des Auftretens der einzelnen Störungen keine Gesetzmässigkeit angenommen wird, beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einem beliebigen Zeitpunkt ausser Betrieb fällt, rund 10^{-3}. Bei zwei voneinander unabhängigen Zuspeisungen und je gleicher totaler Störungsdauer wie eben angenommen, sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass die Sammelschiene des Unterwerkes infolge Störungen auf den Leitungen spannungslos wird, auf 10^{-6}. Nimmt man noch an, dass im Unterwerk selber eine durchschnittlich 5 min pro Jahr dauernde Störung auftritt, so stellt dies allein eine Wahrscheinlichkeit von etwa 10^{-5} dar. Durch eine verbesserte Speisung über zwei Leitungen ist also eine kleinere Störungswahrscheinlichkeit erreicht worden; diese liegt bereits um den Faktor 10 tiefer wie jene im Unterwerk selber. Erhöht man nun die Zahl der Speisungen weiter, so verkleinert sich die Wahrscheinlichkeit von gleichzeitigen Störungen auf den Leitungen entsprechend um weitere Grössenordnungen. Dabei bleibt aber jene der Störungen im Unterwerk gleich oder steigt eher an. Die Betriebssicherheit der Sammelschiene kann deshalb — immer unter den getroffenen Annahmen — mit drei und mehr Speisungen im ganzen gesehen nur unwesentlich verbessert werden.

Selbstverständlich hat dieses Beispiel nur unter ganz bestimmten Voraussetzungen seine Gültigkeit und kann nicht ohne weiteres auf die Wirklichkeit über-

tragen werden. Immerhin bestätigt die Erfahrung diese Überlegungen, indem mehrfach gespeiste Stationen höchst selten als Folge von Leitungsstörungen ausser Betrieb kommen, sondern viel eher durch Sammelschienenfehler Unterbrüche erleiden. In der Praxis sind die Voraussetzungen über die Störanfälligkeit der Leitungen insofern noch extremer, als dass dort die Schnellwiedereinschaltung, vor allem bei höhern Spannungen, die Betriebssicherheit der Leitungen sehr stark erhöht und jene der Sammelschienen, besonders bei grossen Kurzschlussleistungen, damit relativ geringer wird. Beim fortschreitenden Ausbau der Netze sind deshalb nicht allein das Bestreben nach einer möglichst engen Vermaschung und die Rücksichtnahme auf andere Umstände massgebend, sondern es ist auch den dabei auftretenden Kurzschlussleistungen in Leitungen und Anlagen die grösste Beachtung zu schenken. Es soll hier beigefügt werden, dass grosse ausländische Unternehmen bestrebt sind, die Kurzschlussleistungen in ihren 220-kV-Netzen nicht über 8000...10 000 MVA ansteigen zu lassen.

Bei den mittleren Spannungen, zu denen bald auch 150 kV gezählt werden muss, und in den Verteilnetzen mit 50 kV und darunter lässt sich die Kurzschlussleistung einfacher begrenzen. Eine Möglichkeit liegt einmal darin, dass die Netze mit diesen Spannungen unter sich môglichst wenig vermascht und als Teilnetze getrennt betrieben werden. Es ist in diesem Zusammenhang auch denkbar, dass eine Sammelschiene in zwei oder mehr Systeme aufgeteilt wird, um die Vermaschung aufzulockern und die im Kurzschlussfall begrenzende Wirkung der Transformatorimpedanzen besser ausnützen zu können. Diese Lösung kommt in vielen Fällen als einfaches und wirksames Mittel in Betracht, doch können freilich auch wirtschaftliche (eventuell notwendige Erweiterung der Anlage) und betriebliche Gründe dagegen sprechen. Die Anwendung von Drosselspulen in Sammelschienen und in Leitungsabgängen wird in der Schweiz als weitere Massnahme zur Begrenzung der Kurzschlussleistung wenig angewendet. Die sog. Blockschaltung in den grössern Kraftwerken hingegen findet bekanntlich überall Verwendung. Sie macht sich die schon vorher erwähnte «natürliche» Begrenzung des Kurzschlussstromes zu Nutzen. Dank diesem Umstand werden die Kurzschlussleistungen in den Netzen der unteren Spannungen nie sehr hohe Werte aufweisen, vorausgesetzt allerdings, dass sekundärseitig keine oder nur eine schwache Vermaschung vorhanden ist. Zwei Figuren wollen diesen Umstand ein wenig verdeutlichen. Fig. 4 zeigt den sehr einfachen Fall einer Energieübertragung aus einem 220-kV-Netz in ein 50-kV-Netz. Für die

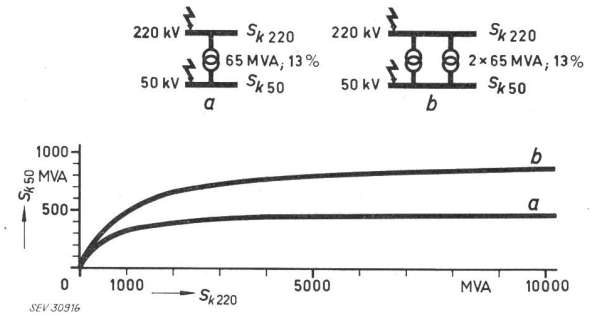


Fig. 4
Die begrenzende Wirkung von Transformatoren auf die Kurzschlussleistung
$S_{k\,50}$ Kurzschlussleistung im 50-kV-Netz

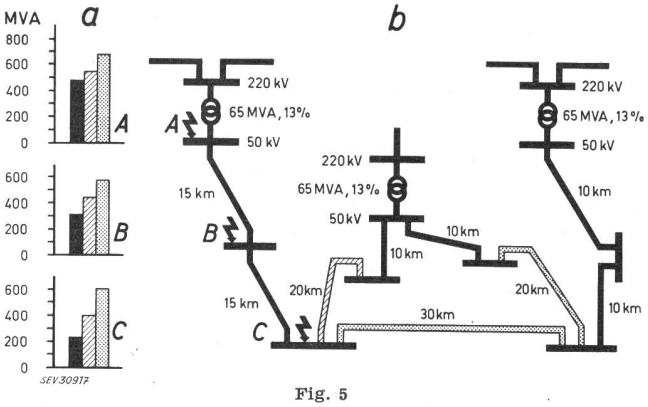


Fig. 5
Einfluss der Netzvermaschung auf die Grösse der Kurzschlussleistungen
a Kurzschlussleistung; *b* übergeordnetes 220-kV-Netz

1. Etappe 2. Etappe 3. Etappe

50-kV-Leitungen doppelsträngig

50-kV-Sammelschiene wurde die Kurzschlussleistung S_k in Abhängigkeit von der auf der 220-kV-Seite anstehenden Kurzschlussleistung berechnet. Es geht daraus deutlich hervor, wie diese Kurzschlussleistung infolge der begrenzenden Wirkung des Transformators rasch in eine Art Sättigung gelangt.

Nun soll dieses Beispiel im Sinne von Fig. 5 erweitert werden, und zwar derart, dass drei Kuppelstellen 220/50 kV angenommen werden, welche je ein 50-kV-Netz speisen. Unter der Annahme, dass diese drei Netze in 50 kV vorerst getrennt betrieben werden, ergeben sie für die drei Netzpunkte *A*, *B* und *C* die danebenstehenden Kurzschlussleistungen (die Spannung an der 220-kV-Schiene wurde dabei als starr vorausgesetzt). Werden nun in der angedeuteten Weise zwei und später alle drei 50-kV-Netze zusammengeschlossen, also vermascht, so bewirkt dies ein zum Teil beträchtliches Ansteigen der Kurzschlussleistungen. Das Beispiel zeigt somit prinzipiell den Einfluss der Netzvermaschung auf die Kurzschlussleistung.

Ganz allgemein stellt der Übergang auf eine höhere Spannung ebenfalls eine Massnahme gegen zu hohe Kurzschlussleistungen dar, vorausgesetzt, dass nicht zu viele Kuppelstellen im untergeordneten Netz vorhanden sind. Man kann dann die durch die Leitungen und Transformatoren gegebenen Impedanzen zur Begrenzung ausnützen. So wurde vor etwa 1½ Jahren anlässlich einer internationalen Tagung in Brüssel die Frage diskutiert, ob im Verlaufe des weiteren Ausbaues des belgischen Netzes die 220-kV-Ebene umgangen und direkt ein Netz mit 380 kV erstellt werden soll, mit dem Zweck, auf diese Weise die Kurzschlussleistungen im 150-kV-Netz zu begrenzen. Dies zeigt ebenfalls, welche Bedeutung dem Kurzschlussproblem zugemessen wird.

In den mittleren und untern Spannungsebenen sind die Mittel gegeben, um die Kurzschlussleistungen auch über längere Zeit zu begrenzen. Immerhin ist vor allem in grossen Kraftwerken mit zum Teil erheblichen Kurzschlußströmen zu rechnen, was entsprechende Vorkehren erfordert. In den Höchstspannungsnetzen wird man weiterhin neben den erwähnten vorbeugenden Massnahmen alle Mittel weiter entwickeln müssen, um die Betriebssicherheit zu erhalten und zu verbessern. Hiezu ist eine kurzschlußsichere Auslegung aller Anlageteile unerlässlich.

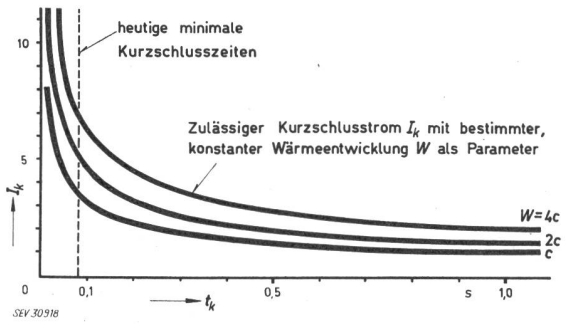


Fig. 6
Prinzipieller Zusammenhang zwischen Kurzschlußstrom I_k und Kurzschlusszeit t_k bei konstanter, während eines Kurzschlusses entstehender Wärme

$W = t_k I_k^2 c$ [kcal]; $c = R \cdot 0{,}239 \cdot 10^{-3}$; R, c = konstant

In bezug auf die Kraftwirkungen bedeutet dies vor allem Probleme für den Bau von Transformatoren, Stromwandlern und Sammelschienen, an denen im Kurzschlussfall gewaltige Kräfte auftreten können. Diese Kräfte müssen immer bewältigt werden, da sie im ersten Moment nach dem Kurzschluss in Form des Stosskurzschlußstromes auftreten und somit auch durch den schnellsten Schalter kaum je verhindert werden können.

Was die Erwärmung und die damit zusammenhängenden möglichen Schäden anbelangt, so ist theoretisch vor allem ein Mittel, nämlich die Verkleinerung der Kurzschlusszeit, gegeben, um sie gering zu halten. Dies macht aber einen sehr schnell reagierenden Schutz notwendig, nebst Schaltern mit kleinsten Eigenzeiten. Man ist heute im Besitze von Einrichtungen, welche diesen Forderungen weitgehend genügen. Durch Abschaltungen in Zeiten von etwa 0,1 s verhindert man in der Regel bedeutende Schäden. Doch wie wird sich dies künftig entwickeln? In Fig. 6 sind Kurven wiedergegeben, die den Zusammenhang zwischen Kurzschlußstrom und Kurzschlusszeit bei gegebener konstanter Wärmeentwicklung als Parameter zeigen, die für irgend einen Anlageteil, z. B. Isolatoren oder Kabel, im Maximum zulässig ist. Vereinfachend wurde angenommen, dass die erzeugte Energie proportional dem Quadrat des Stromes und der Kurzschlusszeit sei. Daraus resultieren die hyperbelförmigen Kurven, die Grenzkurven bilden, indem auf ihnen für gegebene Kurzschlusszeiten die zulässigen Kurzschlußströme abgelesen werden können. Die Figur bezieht sich nicht auf bestimmte Anlageteile, sondern sie hat vielmehr prinzipiellen und qualitativen Charakter. Unter der Annahme, dass man sich mit den heutigen schon sehr kurzen Zeiten und grossen Kurzschlussströmen der zulässigen thermischen Beanspruchung irgend eines Anlageteiles, z. B. eines Isolators, nähert, so mag dies im Moment noch ungefährlich sein, in einigen Jahren hingegen kann daraus ein Schaden entstehen, wenn mit steigender Kurzschlussleistung nicht auch die Kurzschlusszeit vermindert wird. Immerhin dürfte es mit den herkömmlichen Mitteln schwierig sein, Kurzschlusszeiten von ungefähr 4 Perioden auf zwei oder gar eine Periode zu verkleinern. Der Umstand, dass man sich mit den Kurzschlusszeiten in einer Art Grenzbereich befindet, wo diese nur noch wenig verkürzt werden können, drängt eine allmähliche Beschränkung der Kurzschlussleistungen auf. Auch hier bemisst sich die Stärke einer ganzen Anlage nach dem schwächsten ihrer Glieder und somit z. B. nicht allein nach der Leistungsfähigkeit der Schalter.

Es sei im Zusammenhang mit den Kurzschlusszeiten noch erwähnt, dass die Forderung nach sehr kurzen Auslösezeiten in den USA durch die dortigen starken Netze auch aktuell wurde. Es werden Schaltereigenzeiten von weniger als 2 Perioden gefordert, die bei hohen Strömen dem Vernehmen nach auch schon erreicht worden sind.

Es ist heute selbstverständlich, dass die wichtigsten Transportleitungen durch Relais und Schalter mit minimalen Eigenzeiten geschützt werden müssen. Wie schon die überschlägige Betrachtung über die Störungswahrscheinlichkeit gezeigt hat, fällt aber auch die Anzahl Störungen innerhalb von Schaltanlagen im ganzen gesehen ins Gewicht. Es scheint deshalb unerlässlich, dass in Zukunft diese Störungen ebenfalls nach kürzester Zeit beseitigt werden können, dies umso mehr, da sich Lichtbogen im Bereich von Sammelschienen besonders schädigend auswirken können. So sind nun auch in der Schweiz bereits die Sammelschienen einiger Anlagen mit einem eigenen selektiven Schutz ausgerüstet und weitere Projekte liegen vor.

5. Wirtschaftliche Auswirkungen

Der Vollständigkeit halber sei im Zusammenhang mit dem Anwachsen der Kurzschlussleistungen noch kurz erwähnt, dass diese Erscheinung immer mehr auch von der wirtschaftlichen Seite her betrachtet werden muss. Mit dem Ansteigen der Kurzschlussleistungen verteuern sich auch die Anlagen; so hängt z. B. der Preis von Leistungsschaltern für 220 kV und 50 kV gemäss den Kurven von Fig. 7 von der Höhe der garantierten Abschaltleistung ab. Aber auch andere Anlageteile, wie Trenner, Messwandler, Sperren usw., erfahren durch die erhöhten Anforderungen eine Verteuerung, welche gesamthaft gesehen ins Gewicht fällt. Es ist somit vom wirtschaftlichen Standpunkt aus wichtig, dass eine Anlage nicht kurzfristig infolge Ansteigens der Kurzschlussleistungen erneuert werden muss. Auch in diesem Sinne wirkt sich eine Beschränkung der Kurzschlussleistungen vorteilhaft aus.

6. Zusammenfassung

Zusammenfassend soll festgehalten werden, dass die Kurzschlussleistungen in den schweizerischen Netzen in starkem Anwachsen begriffen sind. Die numerischen Angaben zeigen, dass es unter Umständen erforderlich sein wird, einzelne Anlagen mit Apparaten und Schaltern für höchste Kurzschlussleistungen auszurüsten. Von der Betriebssicherheit her gesehen sind diese Apparate notwendig, aber nicht unbedingt hinreichend, da gewisse Anlageteile, vor allem durch zu starke Lichtbögen, bis an ihre Grenze beansprucht werden

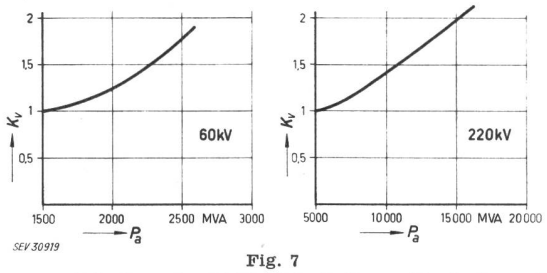


Fig. 7
Preise von Schaltern in Abhängigkeit ihres Abschaltvermögens
K_v Preisverhältnis; P_a Abschaltleistung

können. Damit wäre ein Fortschritt in der Verbesserung der Betriebssicherheit in Frage gestellt, der in letzter Zeit speziell durch die Einführung der Schnellwiedereinschaltung erzielt wurde. Eine Tiefhaltung der Kurzschlussleistungen in den schweizerischen Netzen dürfte deshalb in den nächsten Jahren an Bedeutung gewinnen.

Literatur

[1] *Biermanns, J.:* Netzvermaschung und Kurzschlussleistung. ETZ-A 74(1953)5, S. 147...149; 17, S. 501...504.

[2] *Wildi, P.* und *H. Kläy:* Lichtbogenversuche an 220-kV-Isolatorenketten. Bull. SEV 52(1961)7, S. 285...287.

[3] *Hilgarth, G.:* Lichtbogenversuche an 220-kV-Hängeketten mit Schutzarmaturen. ETZ-A 83(1962)1, S. 8...12.

[4] *Langer, H.:* Bedeutung des Kurzschlussproblems für Planung und Betrieb elektrischer Netze. Elektrizitätswirtschaft 54(1955)13, S. 414...418; 14, S. 444...448.

Adresse der Autoren:

Dr. sc. techn. *E. Trümpy*, Direktor, und *P. Hürzeler*, dipl. Ingenieur ETH, Aare-Tessin Aktiengesellschaft für Elektrizität, Olten (SO).

Dr. W. Wanger, Präsident der Tagung: Es ist tatsächlich eine sehr heikle Frage, ob man möglichst weitgehend vermaschen oder ob man im Gegenteil durch betriebliche Massnahmen die Kurzschlussleistung reduzieren soll, was immer auf irgend eine Art eine geringere Vermaschung bedeutet. Ich erinnere mich noch, wie die sehr starken Netze im Nordwesten der USA unmittelbar nach dem letzten Kriege in einzelne Separatbetriebe aufgespalten werden mussten, weil es noch keine genügend leistungsfähigen Schalter gab. Sobald aber Schalter mit grösserem Ausschaltvermögen erhältlich waren, war man froh, diese betrieblich sehr unangenehmen Einschränkungen aufheben zu können. Seither hat man in den USA wie auch in der Schweiz und wohl in den meisten anderen Ländern immer die Auffassung vertreten, der Betrieb müsse in voller Freiheit disponieren können, und man hat die daraus sich ergebenden hohen Kurzschlussleistungen in den Höchstspannungsnetzen in Kauf genommen. Es stellt sich nun also die Frage, ob man auf einem noch höheren Niveau wiederum Einschränkungen einführen sollte, diesmal dann nicht wegen der Schalter, sondern wegen anderer gefährdeter Netzteile.

Vielleicht kommt in der Diskussion jemand auf diese Frage zurück; ich möchte sie hier nicht beantworten.

Problèmes de montage et expériences avec des disjoncteurs dans les postes extérieurs

Conférence donnée à l'Assemblée de discussion de l'ASE, les 30 et 31 janvier 1962 à Zurich, par *J. Dietlin*, Lausanne

621.311.4—742 : 621.316.57.027.3

Cet exposé se rapporte aux problèmes du choix des disjoncteurs, à leur montage, et aux résultats d'exploitation dans les postes extérieurs à très haute tension. L'auteur indique les raisons qui conduisent le constructeur d'une installation à choisir des appareils dont les performances seront déterminantes pour la sécurité du service. Les différents systèmes de commande sont ensuite examinés.

La question de la place des disjoncteurs dans le schéma est ensuite évoquée, compte tenu de différentes conditions posées par le service que ces appareils devront assurer.

Puis les conditions de montage de l'appareillage en général et des disjoncteurs en particulier sont examinées et un mode de transport et de montage au moyen d'appareils de manutention modernes fait l'objet d'une description avec résultats pratiques.

Il est mentionné ensuite que, en fait, les travaux d'entretien et de réparation des disjoncteurs à très haute tension en service actuellement sont réduits heureusement à peu de chose et l'exposé se termine enfin par la constatation que les expériences d'exploitation réalisées au moyen des nouveaux disjoncteurs modernes à très haute tension, à vrai dire encore récentes, ont été jusqu'à ce jour excellentes, puisque ces appareils n'ont jamais été la cause directe ou indirecte d'incidents de service.

Dieser Vortrag bezieht sich auf die Probleme der Wahl der Schalter und ihrer Betriebserfahrungen in den Freiluftstationen sehr hoher Spannungen. Der Autor legt die Gründe dar, warum für den Konstrukteur einer Anlage in erster Linie die Betriebssicherheit für die Wahl der Schalter massgebend ist. Anschliessend werden die verschiedenen Steuersysteme untersucht.

Dann wird der Platzbedarf in der Anlage unter Berücksichtigung der verschiedenen Betriebsbedingungen behandelt.

Die Anlage der Hochspannungsapparate im allgemeinen und der Schalter im besonderen wird überprüft und eine Methode mittelst moderner Transport- und Montageeinrichtungen wird im Detail erläutert mit Angabe von erreichten praktischen Ergebnissen.

Anschliessend wird erklärt, dass die Unterhaltungsarbeiten und Reparaturen an den heute im Betriebe befindlichen Höchstspannungsschaltern glücklicherweise sehr klein sind, und der Autor beschliesst seinen Vortrag mit der Feststellung, dass die Betriebsergebnisse mit den neuen modernen Schaltern, wenn auch noch nicht sehr lange im Betrieb, ausgezeichnet sind, haben diese doch in der Tat bis zum heutigen Tage noch zu keinerlei Betriebsunterbrüchen Anlass gegeben.

I

Le constructeur d'un poste à très haute tension a le choix entre des disjoncteurs de différents types et de différentes fabrications suisses et étrangères. Il ne sera pas tenu compte de ces dernières dans ce qui suit, étant donné qu'elles ne sont retenues, pour une installation suisse, qu'exceptionnellement et pour des raisons de prix ou de délai de livraison seulement.

Le choix de l'exploitant sera dépendant des différents facteurs suivants, qui seront examinés par la suite:

1. La puissance de coupure,
2. Le courant nominal et le courant de service,
3. La vitesse de coupure et la tenue de l'appareil contre les réamorçages,
4. Le genre de commande,
5. L'encombrement,
6. Le prix et le délai de livraison.

La *puissance de coupure* est dans bien des cas le facteur déterminant qui passe avant toutes les autres raisons car c'est de ce facteur que dépend la sécurité de service.

Dans les réseaux maillés, avec de nombreux points d'alimentation et des lignes à HT couplées en parallèle les puissances de court-circuit dans les postes dépassent souvent 10 000 MVA pour les réseaux à 220 kV et pour ceux à 130 respectivement 150 kV ces puissances de court-circuit sont fréquemment de l'ordre de 5000 MVA et davantage; de plus ces valeurs, surtout en ce qui concerne les réseaux à 220 kV, sont susceptibles d'augmenter encore par suite du développement de ces derniers en liaison avec l'augmentation