Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 69 (1978)

Heft: 13

Artikel: Aufbau und Einsatzweise moderner Schalter und Kompaktanlagen im Zuge von Neuentwicklungen

Autor: Schneider, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-914912

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: 10.12.2025

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

Diskussionsversammlung

VSE UCS

Journées de discussions

Moderne Schaltertechniken und Kompaktanlagen im Bereiche von 24–380 kV

19. April 1978, Genf

Disjoncteurs et matériel de couplage compact de conception moderne entre 24 et 380 kV

Genève, 19 avril 1978

Aufbau und Einsatzweise moderner Schalter und Kompaktanlagen im Zuge von Neuentwicklungen

Von J. Schneider

Die Fortschritte, die in den letzten Jahrzehnten auf dem Gebiet der Hochspannungs-Leistungsschalter gemacht wurden, werden anhand des Leistungsgewichtes der Schalter (kg/MVA) – stellvertretend für die Kosten – diskutiert. Das besonders niedrige Leistungsgewicht der SF_6-Schalter bei Spannungen bis 420 kV macht das rasche Eindringen dieser Technik in den Markt verständlich. Ausser Freiluftschaltern werden gekapselte SF_6-Anlagen und die Hybridtechnik besprochen.

Cet article expose les progrès de ces dernières années dans le domaine des disjoncteurs de puissance à haute tension. Les progrès sont analysés sur la base de la puissance massique des disjoncteurs (kg/MVA), laquelle reflète les prix. La puissance massique particulièrement basse des disjoncteurs à SF_6 dans les tensions allant jusqu'à 420 kV explique l'expansion rapide de cette technique sur le marché. L'article traite des disjoncteurs extérieurs, des disjoncteurs blindés à SF_6 et de la technique de construction hybride.

1. Entwicklung der modernen Schaltertechnik

Die ständig zunehmende Vermaschung der Netze und das Anwachsen der Erzeugerleistung, der Nennströme und vor allem der Kurzschlußströme haben die Hersteller in den letzten Jahrzehnten zu einer ständigen Weiterentwicklung und Anpassung der Geräte an erhöhte Anforderungen gezwungen. Die Fortschritte in der Schaltertechnik, die in den vergangenen Jahren erreicht wurden, sollen anhand der Fig. 1 erläutert werden. Der technische Aufwand, den der Hersteller für die Unterbrechung von 1 MVA Kurzschlussleistung aufwenden muss, wird recht anschaulich durch das entsprechende Schaltergewicht repräsentiert. Während also 1960 je nach Nennspannung 1,2–1,6 kg Schalter pro MVA Ausschaltleistung notwendig waren, konnte dieser Wert bis 1976 schrittweise auf etwa 0,2–0,35 kg/MVA, das heisst auf etwa $^1/_5$ reduziert werden.

Die Schaltgerätehersteller waren zu jedem Zeitpunkt in der Lage, den erhöhten Anforderungen des Marktes nachzukommen, und es ist auch für die Zukunft keine Grenze des Ausschaltstromes erkennbar, die technisch nicht zu beherrschen wäre. Der Wunsch nach einer Begrenzung des Kurzschlußstromes ergibt sich vielmehr aus dem Netzbetrieb, aus der Forderung nach einer möglichst hohen Versorgungssicherheit der Verbraucher und aus ökonomischen Gründen.

Der Hochspannungsleistungsschalter ist einer der wichtigsten, wenn nicht der wichtigste Apparat in einem Hochspannungsnetz. Seine Zuverlässigkeit, seine Verfügbarkeit und sein exaktes Funktionieren unter allen möglichen Bedingungen des Netzes und der Umwelt (Verschmutzung, Temperatur usw.) muss stets gewährleistet sein. Ein Hochspannungsschalter ist häufig über Monate, wenn nicht über Jahre ununterbrochen eingeschaltet und hat dann, nach einem entsprechenden Befehl des Schutzsystems, einen Fehler innerhalb von 40–50 ms zuverlässig auszuschalten. Dies ist sicherlich eine recht anspruchsvolle Anforderung.

Auf dem Gebiete der Hochspannungsschalter stehen heute drei bewährte und zuverlässige Schaltprinzipien zur Verfügung, nämlich:

- ölarme Schalter
- Druckluftschalter
- SF_6-Schalter

Der Hersteller möchte naturgemäss für das gesamte Hochspannungsschalter-Programm, wenn irgend möglich, nur ein einziges und nur das beste Schaltprinzip einsetzen. Gibt es überhaupt ein bestes Schaltprinzip? BBC hatte bis vor kurzem alle drei Schaltprinzipien in seinem Programm und lässt zurzeit die Fabrikation des ölarmen Schalters für Hochspannung auslaufen. Das derzeit gültige Schalterpro-

gramm ist in Fig. 2 dargestellt. Das äussere Feld umfasst die höchsten Nennspannungen und grössten Ausschaltströme und ist weiterhin dem Druckluftschalter vorbehalten, während für den Bereich der mittleren Ausschaltleistungen bei Spannungen bis 420 kV der neue SF_6-Schalter eingesetzt wird. Dieser ersetzt somit die ölarmen Schalter und teilweise auch die Druckluftschalter, die im unteren Spannungsbereich bereits seit einiger Zeit nicht konkurrenzfähig waren. Der SF_6-Schalter füllt damit einen sehr wichtigen Bereich des gesamten Programms aus. Im folgenden Abschnitt sollen die Gründe für die Anwendung von 2 verschiedenen Techniken näher erläutert werden.

2. Gründe zur Sortimentsaufteilung

Der Weltmarkt ist zu klein, als dass es sich eine einzelne Firma leisten könnte, alle drei Schaltprinzipien weiterzuentwickeln. Jedes Nachlassen in den Entwicklungsanstrengungen führt aber sehr rasch zu einem nicht mehr konkurrenzfähigen Produkt. Es ist auch nicht möglich, eine Entwicklung nebenbei auf Vorrat – ohne entsprechende Fabrikationstiefe – durchzuführen, da das notwendige Know-how nur durch die ständige Wechselbeziehung zwischen Entwicklung, Fabrikation und Betrieb gewonnen und verankert werden kann.

Warum wurden aber die Gasschalter, das heisst Druckluft- und SF_6-Schalter, gegenüber dem ölarmen Schalter bevorzugt, wo doch der ölarme Schalter, besonders im unteren Spannungsbereich, eine breite Anwendung findet und sehr einfache und zuverlässige Geräte dieses Prinzips zur Verfügung stehen?

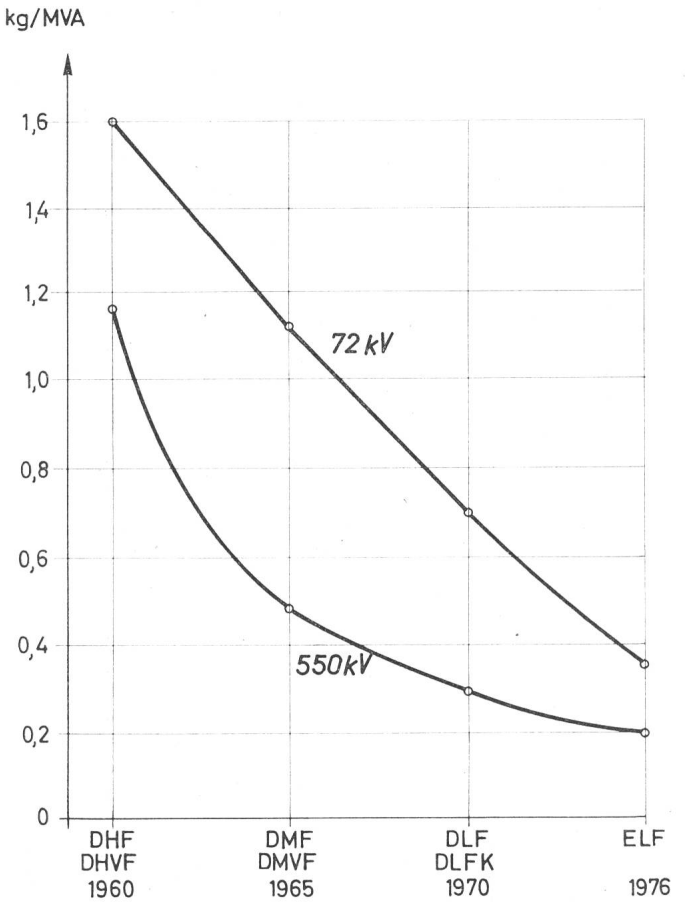

Fig. 1 Fortschritte in der Schaltertechnik seit 1960
Schaltergewicht pro MVA-Ausschaltleistung (1960–1970: Druckluftschalter Typ DHVF, DMVF bzw. DLF; 1976: SF_6-Schalter, Typ ELF)

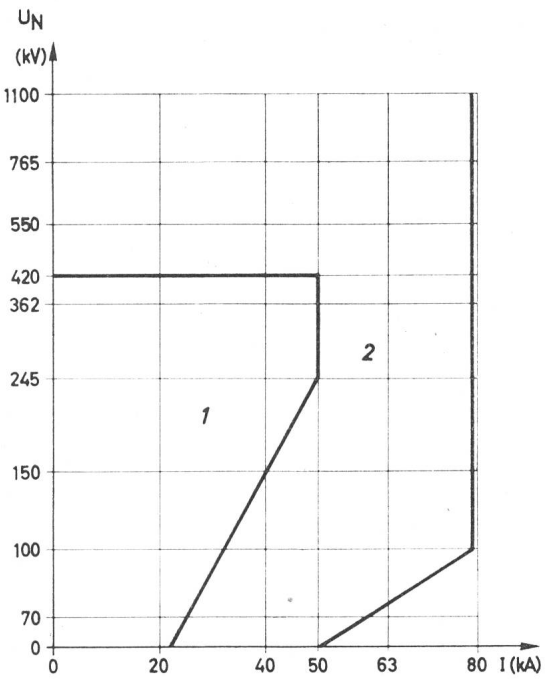

Fig. 2 BBC-Hochspannungsschalter
1 ELF SF_6-Schalter
2 DLF/DLFK Druckluftschalter

Für die Wahl eines Schaltprinzips für Hochspannungs-Freiluftschalter gibt es eine grosse Anzahl von möglichen Kriterien, die jedoch zum Teil sehr unterschiedlich zu gewichten sind. Setzt man als selbstverständlich voraus, dass alle bei serienmässig gefertigten Schaltern angewandten Schaltprinzipien auch sämtliche in den Normen festgelegten und in Hochspannungsnetzen vorkommenden Schaltfälle beherrschen, so bleiben noch Zuverlässigkeit, Wartungsaufwand und Kosten pro MVA Schaltleistung.

Das Kriterium Kosten pro MVA Schaltleistung wird gut repräsentiert durch die Höhe der Ausschaltleistung pro Schaltstelle. In Fig. 3 sind die über die letzten Jahre erreichten Ausschaltleistungen/Schaltstelle für verschiedene Schaltmedien aufgetragen. Für Druckluft und SF_6 wurden dabei die bei Brown Boveri erreichten Leistungen herangezogen. Für ölarme und Vakuumschalter wurde auf eigene und veröffentlichte Unterlagen zurückgegriffen.

Die höchsten Werte der Ausschaltleistung werden bei SF_6 und Druckluft erreicht, und bei diesen beiden Medien war auch der Leistungszuwachs in den letzten Jahren am grössten. Dagegen sind beim ölarmen Schalter die erreichbaren Kammerleistungen sowie der Leistungszuwachs in den letzten Jahren nur etwa halb so gross.

Das Löschprinzip Vakuum scheint nach wie vor im wesentlichen auf Mittel- und Niederspannung und selbst dort auf Spezialanwendungen begrenzt zu bleiben. Die in den vergangenen Jahren gemachten Anstrengungen, Vakuumschalteinheiten im Hochspannungsbereich einzuführen, haben zu keinem durchschlagenden Erfolg geführt.

Intensive Forschungsaktivitäten auf dem Gebiete der Lichtbogenunterbrechung in SF_6 und Druckluft haben die dargestellten wesentlichen Steigerungsraten ermöglicht. Die Lichtbogenunterbrechung in Gasen ist in den letzten Jahren

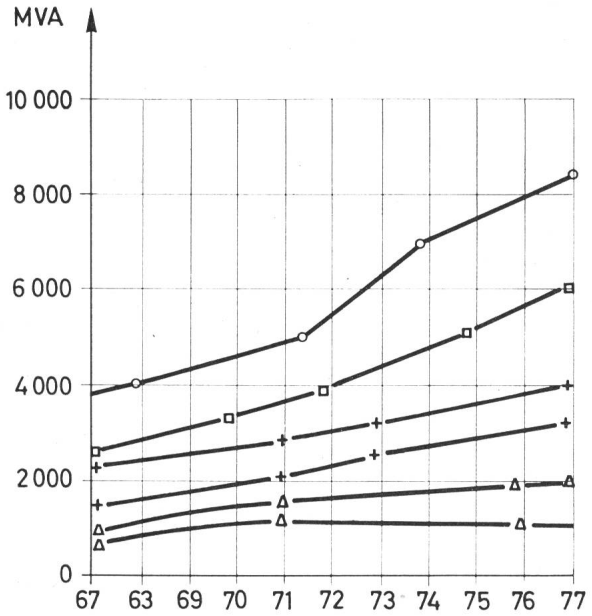

Fig. 3 Ausschaltvermögen pro Unterbrechungsstelle
○ SF_6
□ Druckluft
+ Ölarm
△ Vakuum

der wissenschaftlichen Diagnose und Analyse zugänglich geworden, während die Lichtbogenunterbrechung in Flüssigkeiten, das heisst in Öl, noch um einiges komplexer ist und damit Fortschritte im wesentlichen über «Trial and Error» erreicht werden müssen. Während bei der Lichtbogenunterbrechung im Gasschalter nur zwei Aggregatzustände (Plasma und Gas) beteiligt sind, kommt beim Flüssigkeitsschalter noch der flüssige Aggregatzustand hinzu. Weiter sind Gasschalter einer systematischen, zerstörungsfreien Prüfung gut zugänglich, weil ihr Schaltvermögen im ersten, zweiten und dritten Nulldurchgang des Wechselstromes etwa gleich gross ist, während beim ölarmen Schalter der Druck in der Schaltkammer erst während der Lichtbogendauer aufgebaut wird, so lange, bis entweder der Lichtbogen gelöscht oder der Berstdruck der Schaltkammer erreicht wird. Damit wird die Leistungsgrenze des ölarmen Schalters nur mit sehr hohem Versuchsaufwand und Materialeinsatz bestimmbar.

Zusätzliche Parameter wie etwa die erhöhte Zähigkeit des Öles bei tiefen Temperaturen sind kaum einer systematischen Prüfung zugänglich. Die vergleichsweise geringe Erhöhung der Ausschaltleistung von ölarmen Schaltern wird damit verständlich.

Nehmen wir wieder stellvertretend für die Kosten das Gewicht pro Ausschaltleistung, so zeigt die Fig. 4 eine Gegenüberstellung für die verschiedenen Schaltmedien als Funktion der Nennspannung. Der ölarme Schalter liegt im unteren Spannungsbereich zumindest gegenüber dem Druckluftschalter recht günstig, was seine bisherige Vorherrschaft in diesem Bereich erklärt. Für höhere Spannungen oberhalb etwa 245 kV liegt er dagegen ungünstig und konnte damit nur schwer in dieses, im wesentlichen dem Druckluftschalter vorbehaltene Gebiet eindringen. SF_6-Blaskolbenschalter sind im Spannungsbereich bis 420 kV günstiger als Druckluft- und ölarme Schalter. Für noch höhere Spannungen liegen Druckluft- und SF_6-Schalter etwa gleich. Aus der Fig. 4 wird das Schalterprogramm verständlich, wonach es notwendig war, für den unteren Nennspannungsbereich den Druckluftschalter zu ersetzen, während für die höchsten Nennspannungen kein kostenmässiger Anreiz besteht, von Druckluft auf ein anderes Schaltprinzip überzugehen.

Das Überschneiden der Kurven für Druckluft und SF_6 erklärt sich aus dem Energiebedarf für die zu erreichende Ausschaltleistung. Die Kosten für diesen Energiebedarf – das heisst die Kosten für den Schalterantrieb – sind abhängig von der Löschkammerzahl und damit indirekt von der Nennspannung. Mit steigender Löschkammerzahl wird es kostengünstiger, die für die Schaltung benötigte Löschenergie an möglichst *einer* Stelle zu erzeugen und an die Stellen des Bedarfs zu verteilen (System Druckluftschalter), als den Löschmitteldruck unabhängig in den einzelnen Löschkammern zu erzeugen (System SF_6-Blaskolbenschalter). Dazu kommt noch, dass für den Aufbau des Löschdruckes und die

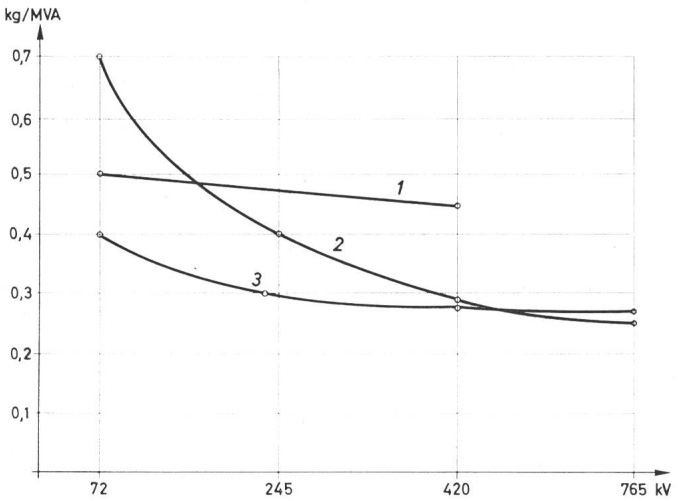

Fig. 4 Gewicht (kg)/Ausschaltleistung (MVA) für Säulenschalter
1 Ölarm
2 Druckluft
3 SF_6

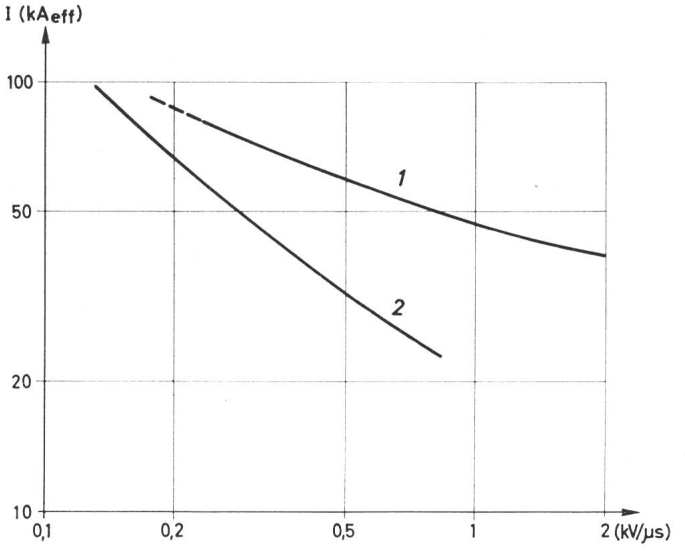

Fig. 5 Thermische Grenze einer Unterbrechungsstelle
1 SF_6 (7 bar)
2 Luft (23 bar)

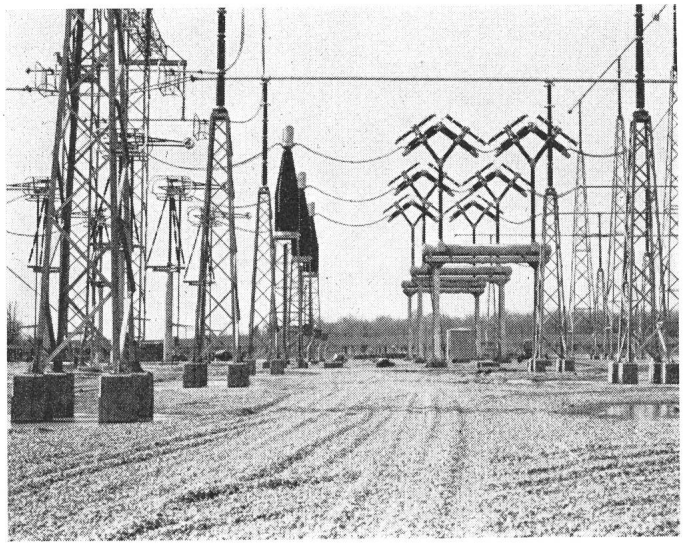

Fig. 6 Druckluftschalter 765 kV
Typ DLF mit Einschaltwiderständen in der Anlage Marysville der AEP (USA). Ausschaltzeit: 2 Perioden (bei 60 Hz)

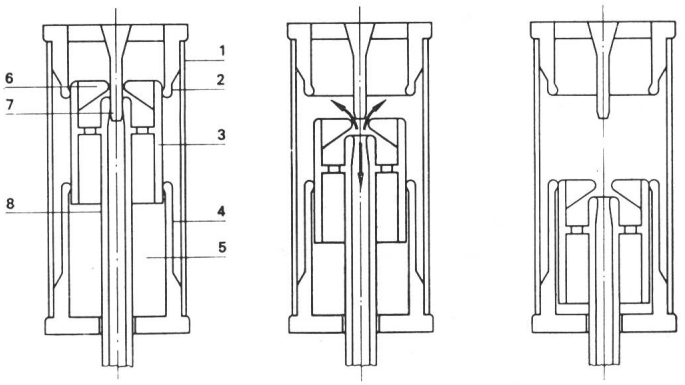

Fig. 8 Schematische Darstellung einer SF_6-Blaskolbenlöschkammer und des Ausschaltvorganges
(Zahlenhinweise siehe im Text)

Verteilung des Löschmittels beim Druckluftschalter ein längerer Zeitraum – Minuten – zur Verfügung steht, während dieser Vorgang beim SF_6-Blaskolbenschalter in sehr kurzer Zeit – etwa 10 ms – ablaufen muss und deshalb entsprechend grosse Kräfte erfordert.

Ein weiteres Kriterium, das vor allem in Höchstspannungsnetzen von Bedeutung ist, ist die erreichbare Ausschaltzeit, die aus verschiedenen Gründen so kurz wie möglich sein sollte. Hierbei sind diejenigen Schalterkonstruktionen im Vorteil, die eine dauernd vorhandene Druckdifferenz des Löschmittels gegenüber dem Auspuffraum benützen, wie Druckluftschalter (und SF_6-2-Druckschalter). Beim Ölschalter und beim SF_6-Blaskolbenschalter wird die für die Lichtbogenlöschung notwendige Druckdifferenz durch den Lichtbogen (Ölschalter) oder durch eine Kolbenbewegung erzeugt, ist also zwangsläufig erst später für die Lichtbogenlöschung bereit. Eine Gesamtausschaltzeit von zwei Perioden (der Netzfrequenz) ist bei Druckluftschaltern heute normaler Stand der Technik; beim Ölschalter hingegen liegt die Ausschaltzeit im Bereich von 3 Perioden und länger. Für SF_6-Blaskolbenschalter sind heute 2½ bis 3 Perioden normal; für die Zukunft scheinen 2 Perioden ein realisierbarer Wert zu sein.

Sollte sich die Tendenz zu noch schnelleren Schaltern in Zukunft verstärken (z. B. 1,5 Periodenschalter), so sind diese mit vernünftigem Aufwand wahrscheinlich nur mit dem Druckluftschalter realisierbar. Wegen der geringeren Strömungsgeschwindigkeit von SF_6 wären so kurze Schaltzeiten auch mit einem SF_6-2-Druckschalter kaum erreichbar.

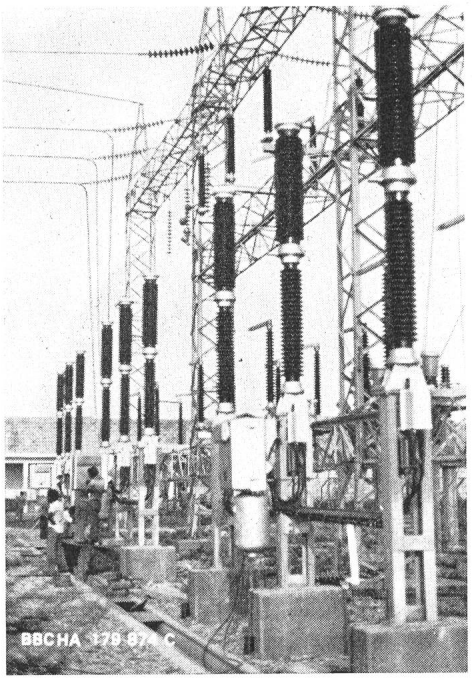

Fig. 7 SF_6-Blaskolbenschalter 145 kV
Typ ELF in der Schaltanlage Cukurova (Türkei)

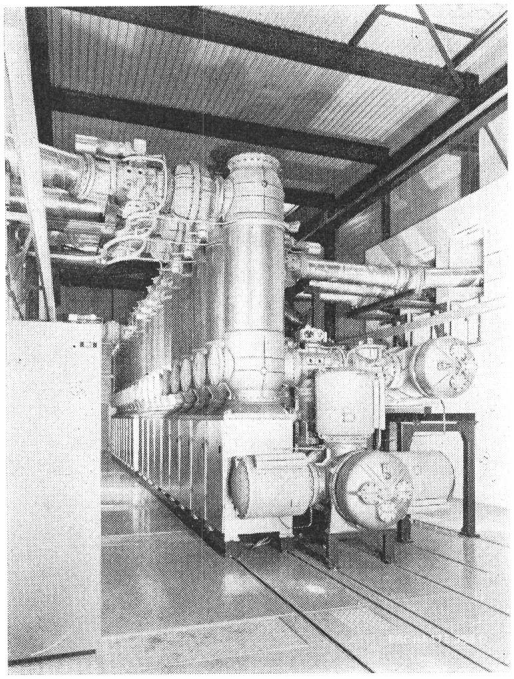

Fig. 9 245 kV SF_6-Schaltanlage La Foretaille, Genève

3. Vorteile der SF_6-Schalter

Das ausgezeichnete Verhalten von SF_6 im Vergleich zu Luft beruht im wesentlichen auf drei besonderen physikalischen Eigenschaften des SF_6-Gases:

– Die hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit wird durch die Bildung von negativen Ionen bewirkt. Für gleiche dielektrische Festigkeit wird bei SF_6 nur $^1/_3$ des Druckes im Vergleich zu Luft notwendig.

– Die gute Lichtbogenlöschfähigkeit beruht im wesentlichen auf der hohen spezifischen Wärme des SF_6-Gases im Bereich zwischen 2000 und 3000 K.

– Die niedrige Schallgeschwindigkeit (137 m/s bei SF_6; 349 m/s bei Druckluft) macht die Anwendung des Blaskolbenprinzips überhaupt erst möglich. Ein Druckluft-Blaskolbenschalter wäre wegen des hohen Kraftbedarfs praktisch nicht realisierbar.

Die Überlegenheit des SF_6-Schalters gegenüber Druckluft wird in Fig. 5 gezeigt. Selbst bei etwa dreimal kleinerem Druck ist SF_6 der Druckluft wesentlich überlegen. Es sei aber hier darauf hingewiesen, dass sich die beiden Kurven bei sehr hohen Strömen (60–100 kA) einander stark annähern, was wiederum erklärt, warum im Schalterprogramm die höchsten Ausschaltleistungen weiterhin dem Druckluftschalter vorbehalten bleiben.

Während also für Druckluft die kostengünstige Antriebsenergie bei sehr hohen Nennspannungen (Fig. 6), die sehr kurzen Schaltzeiten sowie das günstige Verhalten bei extrem hohen Kurzschlußströmen spricht, liegen die Vorteile des SF_6-Schalters hauptsächlich im Gebiet der mittleren Ausschaltströme bei gleichzeitig sehr hoher Ausschaltleistung pro Löschkammer und in der Möglichkeit, das extrem einfache Blaskolbenprinzip zu verwirklichen (Fig. 7).

Die Wirkungsweise einer SF_6-Blaskolbenkammer kann anhand von Fig. 8 erklärt werden:

In der Einschaltstellung (links) wird der Dauerstrom über einen äusseren Kontaktkorb (2) geführt. Während der Ausschaltbewegung kommutiert zuerst der Strom von der äusseren Strombahn (2–4) auf die Abbrennkontakte (7, 8), das SF_6-Gas wird im Gasraum (5) verdichtet, und der zwischen der Löschdüse (8) und dem Abbrennkontakt (7) brennende Lichtbogen wird durch das zwischen Isolier- und Löschdüse ausströmende Gas gelöscht. Rechts ist die Löschkammer in der Ausschaltstellung gezeichnet.

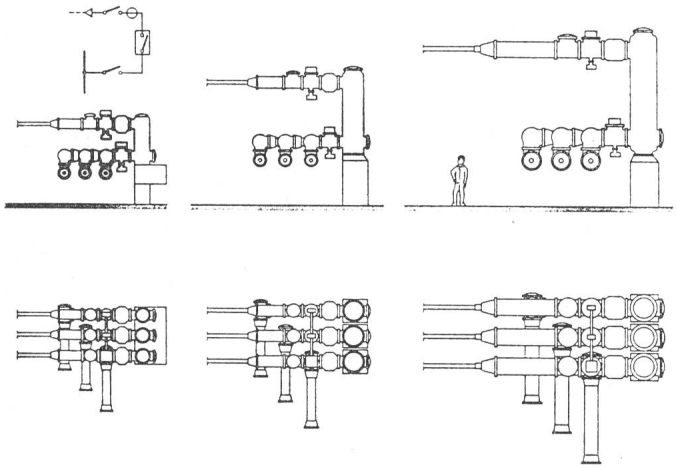

Fig. 10 Grössenvergleich für je ein Kabelabgangsfeld
Baugrösse 1, 2 und 3 (BIL 750, 1050 und 1550 kV) mit einphasig gekapselten Sammelschienen

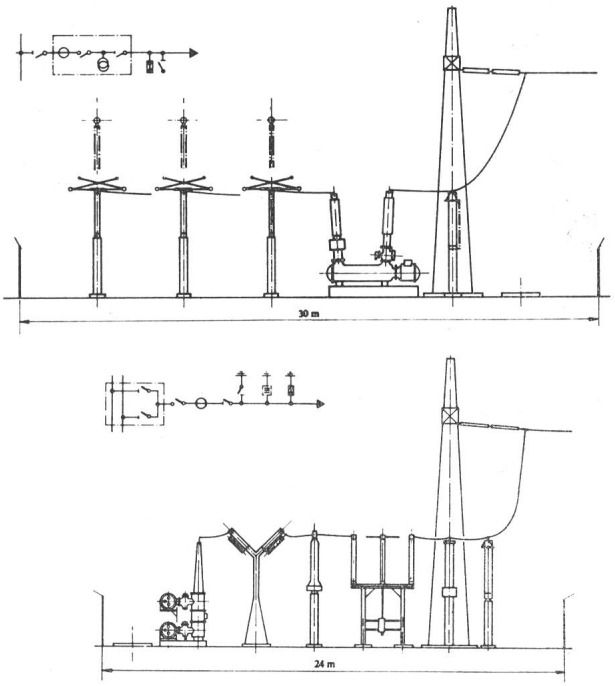

Fig. 11 Gegenüberstellung zweier 245-kV-Schaltfelder in Hybrid-Bauweise
Oben: Schalter und Wandler gekapselt
Unten: Sammelschiene gekapselt

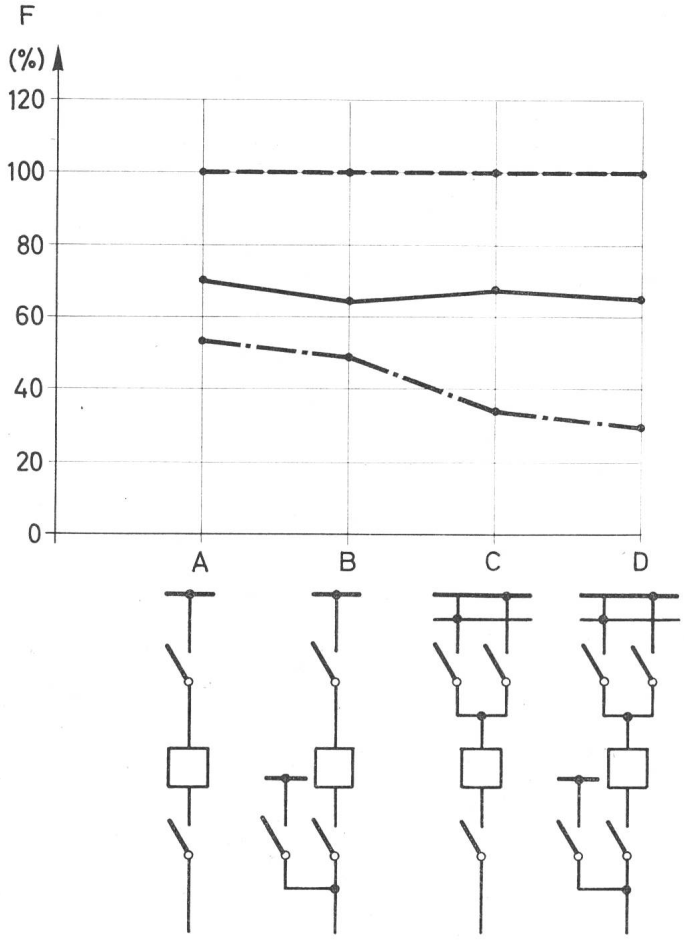

Fig. 12 Flächenvergleich Freiluftschaltfelder 245 kV
Klassisch mit Drehtrenner (100 %)
Hybrid Schalterblock SF_6 gek.
Hybrid Sammelschiene SF_6 gek.
F Flächenvergleich

4. Gekapselte SF_6-Schaltanlagen

Die Elektrizitätsversorgungsunternehmen sind heute häufig konfrontiert mit Platzproblemen oder Verschmutzung (Salz, Sand, Industriestaub) oder Vorschriften von seiten des Umweltschutzes. Mit der Entwicklung der metallgekapselten, SF_6-isolierten Schaltanlagen können diese Probleme weitgehend bewältigt werden (Fig. 9).

Brown Boveri arbeitet auf dem Gebiete der SF_6-Technologie seit 1958 und hat bereits 1969, also vor bald 10 Jahren, die erste Schaltanlage an das EWZ (Sempersteig) geliefert. Heute steht ein modernes, ausgereiftes modulares Baukastensystem in drei Grössen zur Verfügung. Einen Vergleich der drei Baugrössen für ein Kabelabgangsfeld mit einphasig gekapselten Sammelschienen zeigt Fig. 10.

Häufig ist man bei gekapselten Anlagen gezwungen, die Anschlüsse von den Abgangsfeldern zu den Freileitungen ebenfalls in SF_6-gekapselter Technik auszuführen. Es handelt sich dabei um verlängerte Sammelschienenstücke, die als Rohrgaskabel bezeichnet werden und die prinzipiell auch für die Übertragung elektrischer Energie über grosse Entfernungen geeignet sind. Die Anwendung von Rohrgaskabeln beschränkt sich heute auf relativ kurze Übertragungsstrecken, und zwar hauptsächlich auf Ausleitungen aus Kavernenkraftwerken, aus SF_6-Anlagen oder an Kreuzungsstellen von Hochspannungsleitungen. Ihr Einsatzbereich liegt im wesentlichen bei Nennströmen ab 2000 A und bei Nennspannungen über 245 kV. Für Nennströme unter 2000 A erfolgt der Einsatz nur dort, wo die Verwendung konventioneller Ölkabel nicht möglich oder nicht erwünscht ist, wie beispielsweise bei der Ausleitung aus Kavernenkraftwerken, für die Überwindung grosser Höhenunterschiede oder in Atomkraftwerken (Frankreich).

Aufgrund der günstigen Übertragungseigenschaften von Rohrgaskabeln wäre eine vollständige Verkabelung des Hochspannungsnetzes denkbar und technisch möglich, ist aber aus Kostengründen in absehbarer Zukunft nicht realisierbar. Verwirklichen lässt sich lediglich die Verkabelung kurzer Teilstücke bis zu einigen Kilometer Länge in dicht verbauten Gebieten oder aus Gründen des Landschaftsschutzes.

5. Hybridanlagen

Konventionelle Freiluft-Schaltanlagen und gekapselte SF_6-Anlagen werden in den nächsten Jahrzehnten am Markt gleichberechtigt nebeneinander bestehen, und ein eindeutiges Übergewicht der gekapselten Anlagen ist zwar für bestimmte Gebiete und Bedingungen (Großstädte, Meeresküsten), aber nicht allgemein abzusehen.

Zusätzlich zu diesen beiden Anlagetypen besteht aber noch die Möglichkeit, die vorhandenen Bausteine konventioneller und gekapselter Anlagen zu vermischen (Hybridanlage). Es sind dabei prinzipiell zwei verschiedene Wege möglich, nämlich:

1. Kapselung der Geräte (Schalter, Wandler, evtl. Trenner) / Sammelschiene konventionell
2. Kapselung der Sammelschiene / Geräte konventionell

Die Fig. 11 zeigt eine Gegenüberstellung der beiden Techniken für ein 245-kV-Schaltfeld. Die im unteren Teil der Fig. 11 gezeichnete Doppelsammelschiene benötigt in gekapselter Ausführung keine zusätzliche Fläche im Vergleich zur Einfachsammelschiene, während im oberen Bild die Länge des Abgangsfeldes durch eine zweite Sammelschiene um 11 m vergrössert würde (3 zusätzliche Scherentrenner).

Auch eine gekapselte Umgehungsschiene hat kaum einen zusätzlichen Platzbedarf.

Die Fig. 12 zeigt einen Flächenvergleich bei 245 kV für verschiedene Schaltungen mit Einfach- und Doppelsammelschiene sowie Umgehungsschiene. Der Platzbedarf mit SF_6-gekapseltem Schaltblock liegt bei etwa 70 % des Platzbedarfs der klassischen Anordnung mit Drehtrennern, während die Hybridanlage mit SF_6-gekapselter Sammelschiene je nach Schaltung bei etwa 30–50 % der klassischen Anordnung liegt.

Adresse des Autors

J. Schneider, Vizedirektor der AG Brown, Boveri & Cie., Werk Oerlikon, Affolternstrasse 52, 8050 Zürich.