Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 62 (1971)

Heft: 14

Artikel: Anwendung von Schwefelhexafluorid (SF6) im Schaltanlagenbau für Hoch- und Höchstspannungen

Autor: Vontobel, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915838

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: 09.07.2025

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

Anwendung von Schwefelhexafluorid (SF_6) im Schaltanlagenbau für Hoch- und Höchstspannungen

Von *J. Vontobel*, Oberentfelden

621.315.618.9:621.316.3.027.3/.7

1. Einleitung

Die Raumknappheit in den Städten, das Verschmutzungsproblem in Industriezentren oder küstennahen Gebieten und nicht zuletzt ästhetische Forderungen zwingen den Ingenieur zu neuen, leistungsfähigen, betriebssicheren und wirtschaftlichen Lösungen beim Bau von Schaltanlagen für elektrische Energieverteilnetze. Moderne Hoch- und Höchstspannungsanlagen in gekapselter Bauweise erfüllen die gestellten Forderungen. Einige grundsätzliche Fragen, die sich bei der Wahl der Konstruktionsprinzipien stellen, sollen im ersten Teil des Aufsatzes diskutiert werden. Im zweiten Teil wird dann eine Lösung mit einigen Anwendungsbeispielen vorgestellt.

2. Einige Bemerkungen zur Wahl des Isolationssystems

Gekapselte Anlagen unterscheiden sich technisch von konventionellen dadurch, dass sie in geerdete Gehäuse eingebaut sind und anderseits, dass dielektrisch bessere Isolierstoffe als Luft verwendet werden. Als Isolierstoffe bieten sich heute die folgenden an:

a) Feststoffe (z. B. Epoxydharze);
b) Kombinationen Feststoff-Flüssigkeit (z. B. Papier-Öl);
c) Flüssigkeiten (z. B. Öl);
d) Gase (z. B. Druckluft oder Schwefelhexafluorid).

Ein Vergleich der verschiedenen Isolationssysteme wurde von *Roth* und *Owens* [1] [1]) bereits einmal veröffentlicht und soll nur kurz zusammengefasst werden.

Tabelle I zeigt eine Bewertung der verschiedenen Isolationssysteme auf Grund der wichtigsten Beurteilungskriterien. Man sieht daraus eindeutig, dass gasförmige Isolationssysteme am meisten Vorteile bieten. Sie eignen sich dielektrisch am besten, da sie eine homogene Isolation gewährleisten und weder Kriechwege noch Brückenbildungen möglich sind. Sie haben das günstigste Verhalten bei Überschlägen, da infolge der Kompressibilität der Gase die freiwerdende Lichtbogenenergie zuerst gespeichert wird [2] und durch schnelles Abschalten oder kontrollierte Entladung des Gases eine Explosion des betroffenen Anlageteils verhindert werden kann. Wählt man ferner unbrennbare Isoliergase, so erhält man das günstigste Verhalten bezüglich Übertemperaturen und Brennbarkeit der Anlagen. Die Schwefelhexafluorid-Isolation ist dabei der Druckluftisolation stark überlegen, weil sie als Niederdruckisolation ausgeführt werden kann. Dies bedeutet, dass die Anlage nicht nur bedeutend leichter wird, sondern dass sie auch eine viel grössere Sicherheit bietet bei allfälligen Überschlägen.

Bewertung verschiedener Isolationssysteme

Tabelle I

Isoliermedium / Eigenschaften	fest	flüssig	gasförmig
Eignung konstruktiv	–	1	2
Dielektrische Eigenschaften	–	1	2
Verhalten bei Überschlägen	–	–	2
Mechanische Eigenschaften	2	–	–
Schalteigenschaften	–	2	2
Verhalten bei Übertemperaturen	1	1	2
Brennbarkeit	1	–	2
Betrieb, Unterhalt	2	1	–
Dimensionen, Gewicht	2	1	1
Total	8	7	13

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

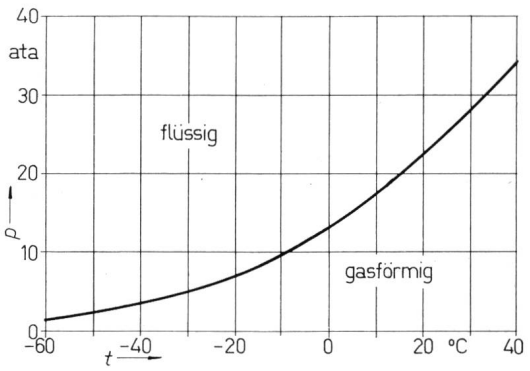


Fig. 1
Dampfdruckkurve von SF_6
p Dampfdruck; *t* Temperatur

3. Die Eigenschaften von Schwefelhexafluorid (SF_6)

Schwefelhexafluorid ist ein unsichtbares, farbloses, unbrennbares und ungiftiges elektronegatives Gas. Es ist ca. 5mal schwerer als Luft, inert bis ca. 500 °C und keiner Alterung unterworfen. Ferner weist es eine ca. 2,5mal höhere Wärmeübergangszahl auf als die Luft. Fig. 1 zeigt die Dampfdruckkurve von SF_6. Man sieht darin, dass vor allem bei hohen Gasdrücken schon bei Raumtemperatur Kondensation auftreten kann. Untersucht man die elektrischen Eigenschaften, so stellt man fest, dass SF_6 etwa 2,5 mal bessere Isoliereigenschaften als Luft aufweist. In Fig. 2 sind solche Vergleichsmessungen mit einer Kugel–Platte-Funkenstrecke zusammengestellt. Eine weitere besonders angenehme dielektrische Eigenschaft von SF_6 wird in Fig. 3 gezeigt. Darin sieht man, dass auch das Gemisch SF_6/Luft gute Isoliereigenschaften besitzt, sofern der Anteil an Luft klein ist. Neben den guten Isoliereigenschaften hat SF_6 zudem gute Löscheigenschaften in Schaltgeräten [3; 4]. Ferner ist es auch in seiner flüssigen Form ein gutes Dielektrikum bzw. Löschmittel.

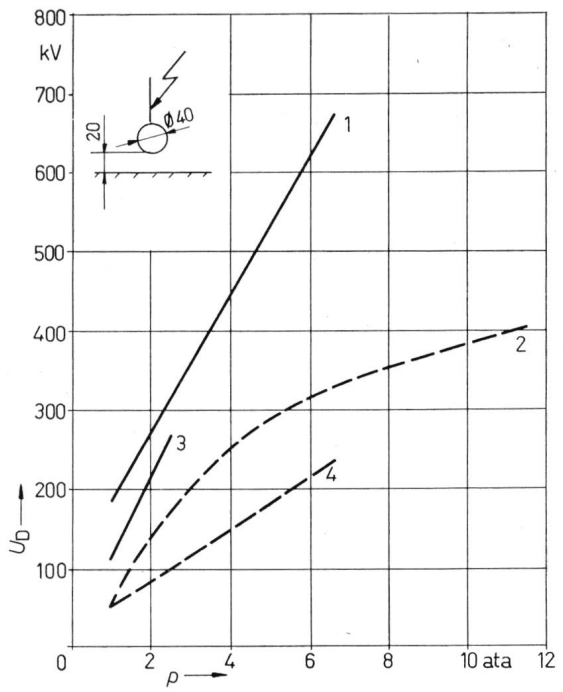


Fig. 2
Durchschlagspannungen einer Kugel-Platte-Funkenstrecke in SF_6 und Luft
1 1,2 | 50, 50-%-Durchschlagstoßspannung in SF_6
2 1,2 | 50, 50-%-Durchschlagstoßspannung in Luft
3 Durchschlagwechselspannung in SF_6
4 Durchschlagwechselspannung in Luft
U_D Durchschlagspannung; *p* Druck

Besonders interessant ist das Verhalten von SF_6 im Lichtbogen. Kommt dieses Gas mit einem Lichtbogen in Berührung, so wird wegen der hohen Lichtbogen-Temperatur das Gas zersetzt. Die Hauptreaktion erfolgt nach der folgenden chemischen Gleichung:

$$SF_6 \rightleftarrows SF_5^+ + F^-$$

d. h. es entstehen niedere Schwefelfluoride und Fluor. Sobald diese Zersetzungsprodukte die Lichtbogenzone verlassen haben, rekombinieren sie zu über 90 % wieder zu SF_6. Der Rest reagiert mit den umgebenden Metallen zu Metallfluoriden. Diese sind nun in trockener Form sehr gute Isolatoren und gefährden die dielektrischen Eigenschaften der Isolation nicht. Unangenehme Reaktionen können dagegen mit Wasser oder z. B. Siliciumdioxyd entstehen. Es bilden sich in diesen Fällen Elektrolyte, die sich auf den Isolierteilen ablagern können und so die dielektrischen Eigenschaften der Isolation reduzieren. Eine Verhinderung solcher unangenehmer chemischer Reaktionen ist aber ohne weiteres möglich durch eine sorgfältige Materialwahl sowie eine einwandfreie Trocknung und Dichtung gegen Feuchtigkeit. Ferner können mit Adsorbern dem Isoliergas Feuchtigkeit und Zersetzungsprodukte entzogen werden.

4. Einige Bemerkungen zum Gasdruck

Die Wahl des günstigsten Gasdruckes bildet eines der wichtigsten Konstruktionsprinzipien. Dazu sind die wichtigsten Beurteilungskriterien:

a) Dielektrische Eigenschaften;
b) Kühlung;
c) Verflüssigung und Heizung;
d) Folgen von Lecks;
e) Wirtschaftlichkeit.

Bezüglich der dielektrischen Eigenschaften zeigt es sich, dass bei geeigneter Gestalt mit Hochdrucksystemen sehr kleine Abmessungen erreicht werden können. Hochdruck-Systeme sind aber sehr empfindlich bezüglich Verunreinigung auf Isolierteilen und verlangen daher einen extrem hohen Reinheitsgrad. Ferner werden sehr hohe Qualitätsanforderungen an die Isolierteile gestellt. Über ihr Dauerverhalten unter diesen extrem hohen dielektrischen Beanspruchungen ist leider noch sehr wenig bekannt. Aus diesen Gründen wurden bis jetzt vorwiegend Niederdruck-Systeme gewählt.

Bezüglich den Kühleigenschaften ist kein allzu grosser Unterschied zwischen einem Hochdruck- und einem Niederdrucksystem festzustellen. Einerseits wird wegen der grösseren Gasdichte und der damit verbundenen grösseren Wärmekapazität mehr Wärme vom Gas aufgenommen, anderseits kommt aber wegen den kleineren Abmessungen der Gasräume eine kleinere Konvektionsströmung zustande. Zudem sind es vor allem die Wärme-Übergangszahlen an den Oberflächen, die die Kühlung bestimmen.

Ein beachtlicher Nachteil der Hochdrucksysteme ist der begrenzte Temperaturbereich, in dem sie ohne Heizung eingesetzt werden können. Fig. 1 gibt über die möglichen Grenztemperaturen in Funktion des Gasdruckes Auskunft. Auch bei Freiluftaufstellung der Anlagen muss es möglich sein, dass ausser dem Schalter-Hochdruckteil die Anlage nicht geheizt werden muss. Das Heizen der ganzen Anlage wäre nicht nur umständlich, sondern auch recht kostspielig. Aus diesen Überlegungen heraus zeigt es sich, dass Niederdrucksysteme vorzuziehen sind.

Treten in einer Anlage Lecks auf, so ist bei Niederdrucksystemen auch bei Ausgleich auf Atmosphärendruck eine noch genügende dielektrische Sicherheit vorhanden, um provisorisch die Anlage weiter betreiben zu können. Demgegenüber ist bei

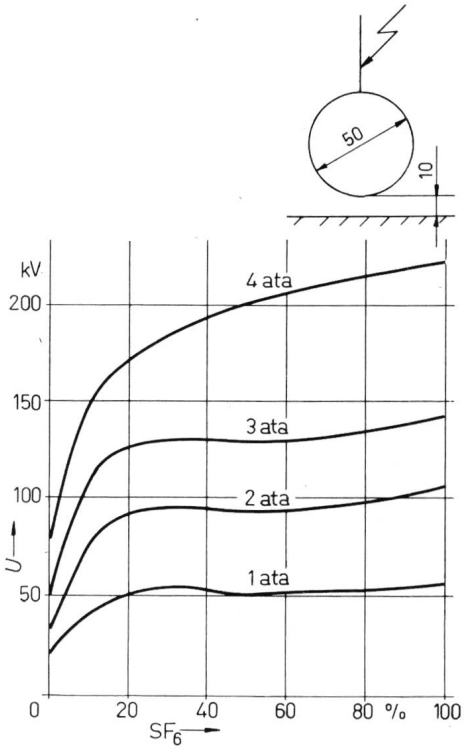


Fig. 3
50-Hz-Durchschlagfestigkeit von komprimiertem N_2-SF_6 Gasgemisch
U_D Durchschlagwechselspannung

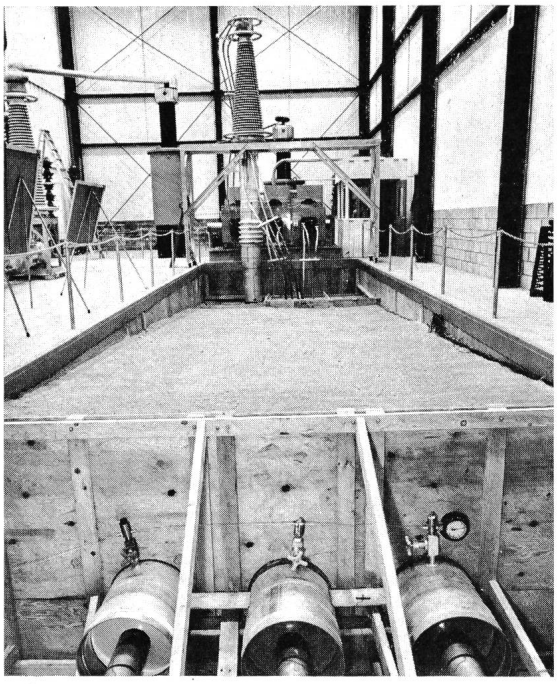


Fig. 4
Erwärmungsversuche mit einem Teil einer einphasig gekapselten, direkt in den Boden eingegrabenen 345-kV-Schiene für einen Nennstrom von 3350 A

Hochdrucksystemen nach Erreichen des Atmosphärendruckes das Isolierniveau des betroffenen Anlageteils derart tief, dass in gewissen Fällen sogar die Nennspannung nicht mehr gehalten werden kann.

Von der Wirtschaftlichkeit aus betrachtet, sind Niederdrucksysteme im allgemeinen etwas teurer als Hochdrucksysteme, sie bieten aber einen bedeutend höheren Sicherheitsgrad.

5. Art der Kapselung von Sammelschienen

Grundsätzlich werden für die Sammelschiene zwei verschiedene Kapselungsarten angewandt. Es sind dies die einphasige und die dreiphasige Kapselung. Zur Beurteilung der beiden Systeme müssen die folgenden Kriterien untersucht werden:

a) Dielektrische Sicherheit;
b) Verluste und Erwärmung;
c) Dynamische Beanspruchung;
d) Raumbedarf;
e) Kosten.

Die dielektrische Sicherheit der einphasigen Kapselung ist grundsätzlich höher als die der dreiphasigen. Einerseits hat man bei der einphasigen Kapselung die denkbar einfachsten Feldverhältnisse, da es sich bei den Sammelschienen um ein reines Zylinderfeld handelt, und anderseits enthält sie nur Isolationen zwischen Phase und Erde, d. h. es sind keine dreiphasigen Kurzschlüsse möglich. Ferner treten in einphasig gekapselten Systemen bedeutend tiefere Schaltüberspannungen in Erscheinung. So ist zum Beispiel einer amerikanischen Untersuchung [5] zu entnehmen, dass die Schaltüberspannungen zwischen Phase und Phase bis 1,92mal höhere Werte erreichen können als zwischen Phase und Erde. Konsequenterweise würde dies bedeuten, dass für die Isolation zwischen Phase und Phase höhere Prüfspannungen verlangt werden müssten, obwohl bis jetzt noch keine entsprechenden Prüfvorschriften aufgestellt worden sind.

Die Verluste und demzufolge die Erwärmung sind bei einphasig gekapselten Systemen naturgemäss grösser, da Ströme von der Grössenordnung der Leiterströme über die Kapselungen fliessen können. Bei Schaltstationen fallen wegen den kleinen Längen die Verluste in den Kapselungen praktisch nicht ins Gewicht, und auch die Erwärmung ist nur unbedeutend, da die Kapselungsquerschnitte recht gross sind. Die Verluste haben höchstens bei sehr langen Verbindungsleitungen eine Bedeutung, und die Erwärmung muss bei unterirdisch verlegten Schienenverbindungen überprüft werden. In Fig. 4 sieht man eine direkte in den Boden eingegrabene 345-kV-Schiene für einen Nennstrom von 3350 A während dem Erwärmungsversuch [6].

Bezüglich der dynamischen Beanspruchung ist ein einphasig gekapseltes Schienensystem wiederum bedeutend günstiger, da im koaxialen System nur sehr kleine Stromkräfte auftreten können, und anderseits die Distanzen zwischen den Leitern grösser sind. Dies hat zur Folge, dass sowohl die Abstützisolatoren als auch die Tragkonstruktionen leichter gebaut werden können.

Der Mehrbedarf an Raum von einphasig gekapselten Sammelschienen ist, bezogen auf die Gesamtanlagen, unbedeutend, und er kann durch eine geschickte Anlagedisposition weitgehend kompensiert werden. Auch der Unterscheid der Kosten ist erstaunlich klein, da die spezifischen Herstellungskosten der Gehäuse mit dem Durchmesser stark ansteigen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei niedrigen Spannungen, d. h. etwa bis 150 kV, die dreiphasig gekapselten Schienen etwas billiger sind als einphasig gekapselte. Dagegen bietet aber die einphasige Kapselung eine ganz wesentlich grössere Sicherheit. Bei 220 kV und höheren Spannungen wird daher von den meisten Fabrikanten die einphasige Kapselung angewandt. Diese hat auch den Vorteil, dass sehr einfache Abstützisolatoren verwendet werden können. In Fig. 5 sieht man den prinzipiellen Aufbau von Scheibenisolatoren, die so berechnet wurden, dass sich auf der Oberfläche der Isolatoren ein praktisch linearer Spannungsabbau ergibt.

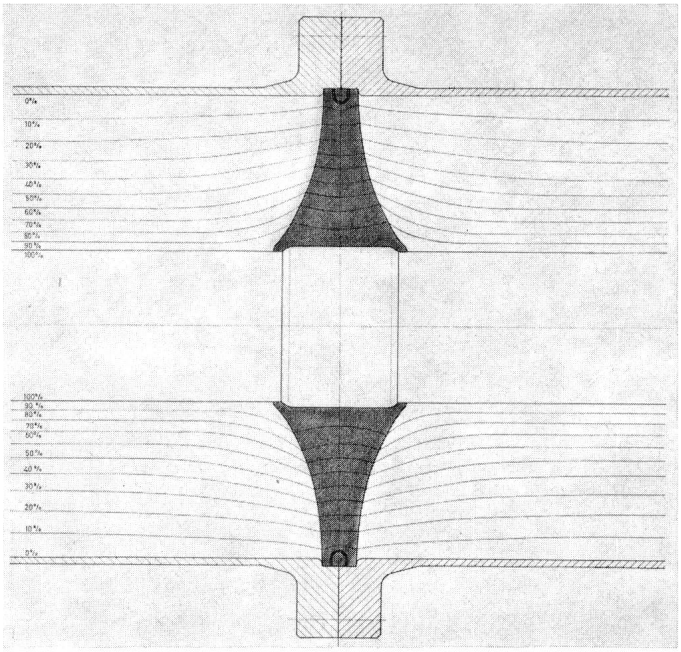
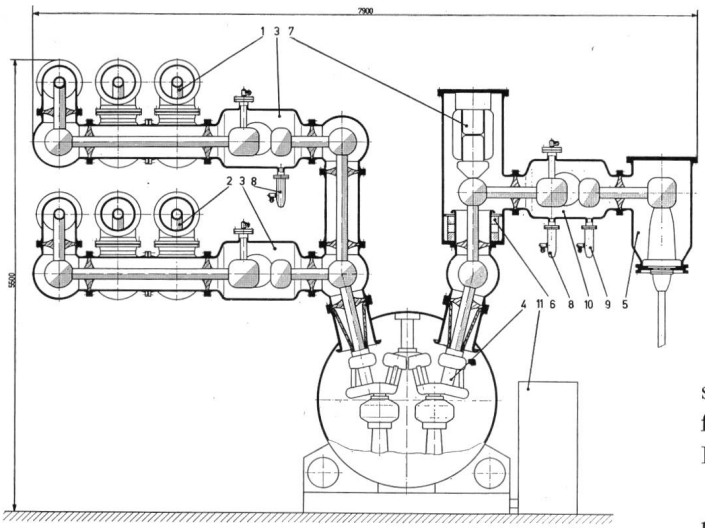


Fig. 5
Schnitt durch einen Scheibenisolator mit eingetragenen Aequipotentiallinien



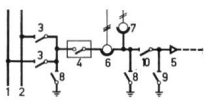


Fig. 6
Schnitt durch einen Pol einer metallgekapselten, SF_6-isolierten 245-kV-Anlage mit Doppelsammelschienen
1 Sammelschiene I; *2* Sammelschiene II; *3* Sammelschienentrenner; *4* Leistungsschalter; *5* Kabelendverschluss; *6* Stromwandler; *7* Spannungswandler; *8* Erdungstrenner; *9* Schnellerder; *10* Abgangstrenner; *11* Antrieb und Gasversorgung des Leistungsschalters

6. Bauprinzipien

Der Entwicklung und Konstruktion dieser SF_6-isolierten Hochspannungsanlagen wurden die folgenden Konstruktionsprinzipien zugrunde gelegt:

a) Hohe Leistungsfähigkeit;
b) Niederdruckanlagen;
c) Einphasige Kapselung der Sammelschienen;
d) Baukastensystem;
e) Innenraum- und Freiluftaufstellung muss möglich sein;
f) Erfüllung aller CEI und möglichst vieler nationaler Regeln und Vorschriften;
g) Alle Kapselungsgehäuse mit Ausnahme derjenigen der Schalter in geschweisster Aluminium-Konstruktion;
h) Kurze Montagezeiten beim Bau von Anlagen;
i) Minimale Unterhaltsarbeiten;
j) Einfache Erweiterungsmöglichkeiten;
k) Maximale Wirtschaftlichkeit.

Aus wirtschaftlichen und fabrikatorischen Gründen ist es zur Zeit nicht nötig, für jede Spannung eine spezielle Baureihe herzustellen. Dementsprechend hat man Baureihen entwickelt, von denen jede für verschiedene Nennspannungen eingesetzt werden kann. Die erste Baureihe eignet sich für Nennspannungen von 110...150 kV. Die zweite ist für Anlagen mit Nennspannungen von 220...300 kV bestimmt. Eine weitere Baureihe für Nennspannungen von 380...500 kV ist vorgesehen. Tabelle II zeigt eine Zusammenstellung der Kenndaten.

In Fig. 6 sieht man ein Schnittbild durch eine 245-kV-Anlage mit Doppelsammelschienen. Prinzipiell kann gesagt werden, dass allen Baureihen das gleiche Konzept zu Grunde liegt, und dass sie dementsprechend aufgebaut sind. Die Sammelschienen sind einphasig gekapselt und so ausgebildet, dass bei Erwärmung sowohl der Leiter als auch die Kapselung die Längenänderungen aufnehmen können.

Die beiden Sammelschienentrenner sind als Schubtrenner konzipiert. Ihr aktiver Teil besteht aus einem Hauptkontakt, einem Gleitkontakt und einer Drehsäule. Ein Motorantrieb treibt über ein Gestänge die 3 Drehsäulen und die damit verbundenen Gleitkontakte an. Da infolge der ziemlich hohen Anlagekapazität beim Schalten der Trenner immer Lichtbögen auftreten, entstehen Zersetzungsprodukte. Diese werden in den eingebauten hochaktiven Adsorbern chemisch gebunden. Jeder Trenner hat ferner im Gehäuse eine Revisionsöffnung, durch die sämtliche Revisionsarbeiten ausgeführt werden können. Eine gesamte Demontage des Apparates ist demzufolge nicht nötig. Im Deckel der Revisionsöffnung sind Fenster eingebaut, die eine Kontrolle der Trennstellung erlauben. Auf beiden Kontaktseiten der Trenner können Erder oder Schnellerder angebaut werden. Die Erder ersetzen die Erdungsgarnituren der konventionellen Anlagen und werden von Hand einpolig angetrieben. Die Schnellerder dagegen dienen zur betrieblichen

Zusammenstellung der Kenndaten von SF_6-Anlagen

Tabelle II

Nennspannung	kV	110	132/138	150	220	275	345
Max. Betriebsspannung	kV	125	145	170	250	315	362
Nennstrom in den Sammelschienen	A[1])			bis 3000			
Nennstrom in den Abzweigen	A[1])			bis 3000			
Nennfrequenz	Hz			50...60			
Prüfspannungen:							
Phase–Erde, Eingang–Ausgang-Schalter							
– Haltespannung 50 Hz, 1 min	kV	230	275	275	460	460	555
– Stosshaltespannung 1,2 | 50 µs	kV	550	650	650	1 050	1 050	1 300
Offene Trenner							
– Haltespannung 50 Hz, 1 min	kV	310	370	370	620	620	
– Stosshaltespannung 1,2 | 50 µs	kV	630	750	750	1 210	1 210	1 640
SF_6-Leistungsschalter							
– Nennausschaltleistung	MVA[1])	7 500	10 000	10 000	20 000	20 000	25 000
Gasbetriebsdrücke bei 20 °C							
– Schalter Hochdruckteil	atü			17,5			
– Schalter Niederdruckteil	atü			3,2			
– in der übrigen Anlage	atü			1,5			
Zulässige Umgebungstemperaturen	°C			–40...+50			

[1]) sind keine Grenzwerte

Erdung von Anlageteilen. Sie werden mit einem Federkraftantrieb dreipolig angetrieben und sind in der Lage, auf Kurzschluss einzuschalten.

Der Leistungsschalter verwendet SF_6 als Löschmittel und arbeitet nach dem Zweidruck-Prinzip. Er ist als Mehrfachunterbrechungsschalter aufgebaut und ist in der Lage, in zwei Perioden auszuschalten. Die Aktivteile jeder Phase sind in separate Stahl-Kapselungsgehäuse eingebaut, die auf einem gemeinsamen Chassis stehen. In einem angebauten Schrank ist der gemeinsame Antrieb und die autonome Gasversorgung untergebracht. In jedem Schalterkessel sind wiederum Revisionsöffnungen vorgesehen, durch die alle in den Polen notwendigen Revisions- und Unterhaltsarbeiten ausgeführt werden können.

Auf dem Schalter angebaut ist die Messwandler-Kombination. Sie enthält Ringkernstromwandler und einen kapazitiven oder induktiven Spannungswandler. In vielen Fällen wird

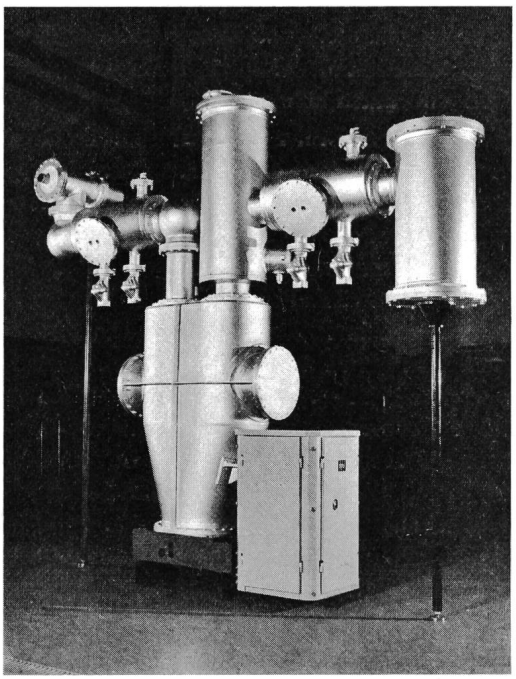


Fig. 7
Prototyppol eines 110...150 kV, 2000 A, Schaltfeldes mit Einfachsammelschiene

auf diese Messwandler-Konbination verzichtet. Die Ströme werden dann mit Kabelwandlern gemessen, und für die Spannungsmessung sind im Kabel Messbeläge vorgesehen. Anschliessend folgen der Abgangstrenner und der Kabelendverschluss. Der Aufbau des gekapselten Kabelendverschlusses wird von Fall zu Fall zusammen mit dem Kabellieferanten konzipiert, da er weitgehend von der Art des verwendeten Kabels und der Steuerung im Endverschluss abhängig ist.

Die Sammelschienen und die Felder sind in verschiedene Gasräume aufgeteilt. Ihre Gasversorgung und Gasüberwachung wird auf Wunsch zentral oder feldweise ausgeführt. Bei allfälligen Gasverlusten kann die Nachspeisung von Hand oder automatisch erfolgen.

Fig. 7 zeigt einen Pol eines 110...150-kV-Schaltfeldes mit Einfachsammelschienen. Analog wie im Schnittbild (Fig. 6) hat man links wiederum die Sammelschiene mit dem Sammelschienentrenner und zwei angebauten Erdungstrennern. In der Mitte befindet sich der Leistungsschalter mit dem angebauten

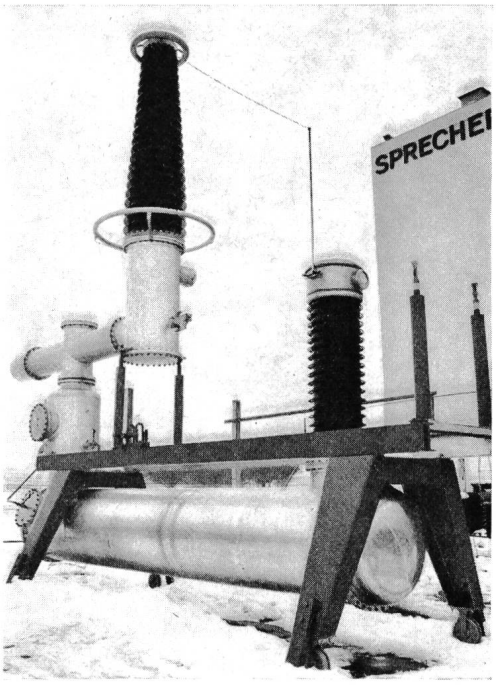


Fig. 8
245 kV Teilprototyp im Dauerversuch in der Freiluftprüfanlage

Federkraftantrieb. Der Schalter benötigt für diese Spannungen nur noch zwei Unterbrechungsstellen pro Pol. Rechts vom Schalter befinden sich die Wandlerkombination, der Abgangstrenner mit zwei Erdungstrennern und der gekapselte Kabelendverschluss. Dieser kann auch horizontal angebaut oder durch eine Durchführung ersetzt werden.

7. Versuche

Mit den verschiedenen Prototypen und Komponenten wurden eine grosse Anzahl Entwicklungsversuche und Typenprüfungen durchgeführt. Mit dem Leistungsschalter wurde in der KEMA und in weiteren neutralen Laboratorien der vollständige Nachweis des Schaltvermögens erbracht.

Eine interessante Versuchsreihe soll im folgenden noch kurz beschrieben werden:

Zur Überprüfung des Langzeitverhaltens der vollständigen Isolation wurde mit einigen 245-kV-Apparaten während ca. eines Jahres ein Dauerversuch im Freien mit stark erhöhter Prüfspannung durchgeführt. Fig. 8 zeigt die geprüfte Versuchsanordnung. Sie besteht aus einer gasisolierten Freiluft-

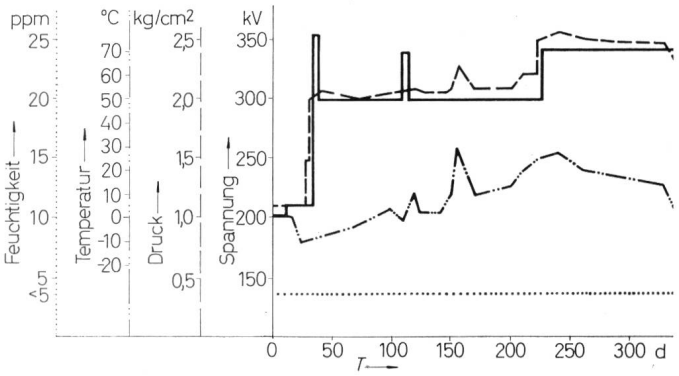


Fig. 9
Zusammenstellung der Versuchsresultate mit dem 245 kV Teilprototyp
t Zeit
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

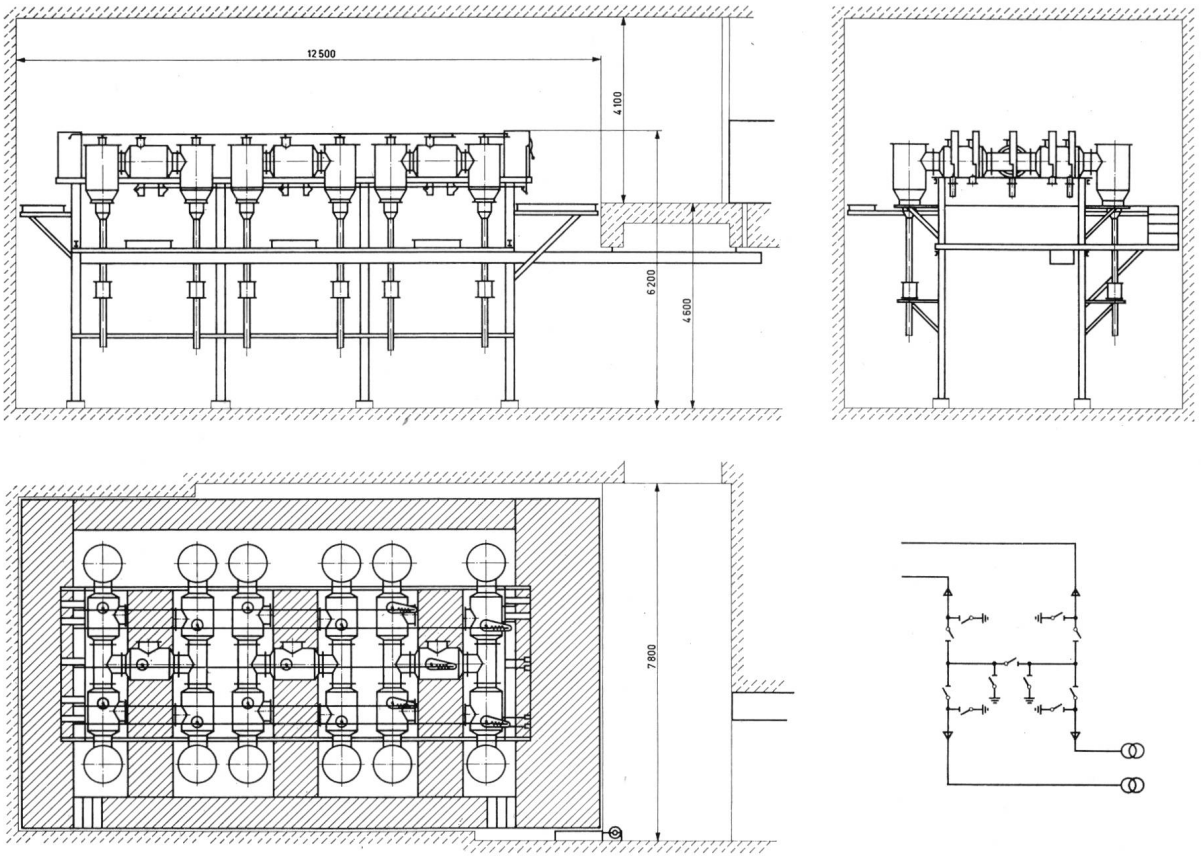


Fig. 10
Prinzipschema und Gesamtdisposition der 245-kV-Schnelltrenneranlage Rosshag der Tauernkraftwerke AG

durchführung mit eingebautem Stromwandler und angebautem Erdungstrenner, einem Schienenkreuz- und einem Schienenendstück sowie einem Trennschalter. Der Nenndruck des SF_6-Gases in der Anlage bei 20 °C betrug 2,5 ata. Die Versuchsresultate sind aus Fig. 9 ersichtlich. Nach ca. einem Monat Betrieb mit einer Spannung von 210 kV zwischen Phase und Erde bei einem Druck von 1,1 ata wurde der Gasdruck auf 2 ata und die Spannung auf 300 kV erhöht. In diesem Zustand wurde die Anlage während 6 Monaten betrieben. Anschliessend wurde der Gasdruck auf seinen Nenndruck von 2,5 ata erhöht, die Spannung zwischen Phase und Erde auf 343 kV, entsprechend eine Systemspannung von 595 kV, vergrössert und die Anlage noch weitere 4 Monate betrieben. Den Verlauf der Umgebungstemperatur zeigt die strichpunktierte Kurve. Die Extremwerte betrugen —10 °C und +32 °C. Während der ganzen Versuchsdauer wurde kein Gasverlust festgestellt. Der Feuchtigkeitsgehalt des SF_6-Gases wurde während der ganzen Versuchsdauer überwacht und war immer kleiner als 5 ppm. Dielektrische Prüfungen und die Kontrolle der Glimmeinsatzspannung wurden regelmässig vorgenommen.

Dieser Dauerversuch war sehr erfolgreich. Er gab folgende Aufschlüsse:

a) Relationen über die elektrische Sicherheit bei den gewählten Dimensionen;
b) Nachweis der Zuverlässigkeit aller Dichtungen und Gehäuse;
c) Nachweis der Qualität und der richtigen Verarbeitung der festen Isolierwerkstoffe;
d) Eine der Dimensionierungsgrundlagen für SF_6-Anlagen mit noch höherer Betriebsspannung.

Die erste 245-kV-SF_6-Anlage in Österreich wurde für die Tauernkraftwerke AG in Salzburg fertiggestellt. Es handelt sich um eine Schnelltrenneranlage mit voller Isolation, d. h. mit einer Stosshaltespannung von 1050 kV zwischen Phase und Erde. Fig. 10 zeigt das Prinzipschema und den Gesamtaufbau der Anlage. Fig. 11 gibt einen Überblick über diese Anlage. Obwohl sie phasenweise gekapselt ist, werden alle Apparate dreiphasig angetrieben.

8. Zusammenfassung

Die Beurteilung der verschiedenen Isolationssysteme für metallgekapselte Hochspannungsanlagen zeigt die Überlegenheit der Gasisolation. Ihre Vorzüge sind besonders gross, wenn sie durch Verwendung eines hochisolierfähigen Gases als Niederdruckisolation ausgeführt werden kann. Ein Überblick über die chemischen und physikalischen Eigenschaften von

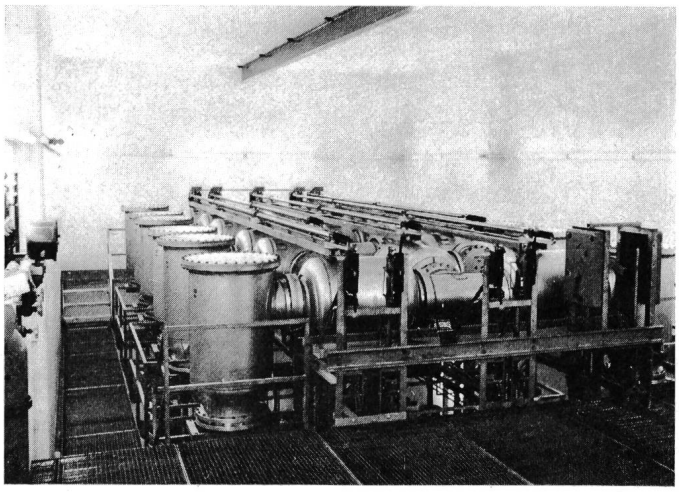


Fig. 11
Überblick über die Gesamtanlage Rosshag

Schwefelhexafluorid (SF_6) zeigt seine Eignung als Isolier- und Löschgas. Durch phasenweise Kapselung der gesamten Anlagen wird ein hoher Grad an dielektrischer Sicherheit erreicht.

Metallgekapselte, SF_6 isolierte Hochspannungsanlagen müssen nicht nur sehr leistungsfähig sein, sondern sie werden zweckmässigerweise aus genormten Bauelementen aufgebaut. Die Beschreibung der Bauelemente und ein Anwendungsbeispiel geben einen Eindruck vom Gesamtaufbau und den Abmessungen dieser Anlagen. Besonders interessante Dispositionen entstehen durch Verwendung von Lasttrennern.

Von der grossen Zahl von Versuchen bildet der Dauerversuch mit 245-kV-Anlageteilen eine gute Basis für die Erprobung der praktischen Betriebs- und Überlastfähigkeit.

Abschliessend kann gesagt werden, dass mit SF_6-Anlagen nicht nur viel Platz gespart werden kann, ca. 85 % bei 110-kV- und über 90 % bei 220-kV-Anlagen, sondern dass sie zudem die folgenden Vorteile aufweisen:

a) Ausserordentliche Betriebssicherheit und Leistungsfähigkeit;
b) Unempfindlichkeit gegen Verschmutzung;
c) Hohe Sicherheit für das Personal;
d) Herstellung und Prüfung als Baugruppen in der Fabrik und daher rasche Montage;
e) Leichte Erweiterungsmöglichkeit oder Verlegung an einen neuen Standort;
f) Oft bedeutend wirtschaftlicher als konventionelle Anlagen.

Es ist daher zu erwarten, dass die metallgekapselten, SF_6-isolierten Hochspannungsanlagen in den Verteilnetzen elektrischer Energie eine immer bedeutendere Stellung einnehmen werden.

Literatur

[1] *A. W. Roth* et *J. B. Owens:* Investigations diélectriques sur les éléments de postes et de systèmes de conducteurs isolés au gaz pour très hautes tensions. Rapport CIGRE No. 23–03, 1970.
[2] *S. Fukuda:* Current-carrying and short-circuit tests on EHV cables insulated with SF_6 gas. Trans. IEEE PAS 88(1969)2, p. 147...156.
[3] *W. Lerch* und *E. Rey:* Die praktische Verwendbarkeit von Schwefelhexafluorid im modernen Schalterbau. STZ 61(1964)1/2, S. 2...13.
[4] *G. P. Guaglione* and *H. G. Meier:* A new line of dead tank SF_6 high voltage circuit breakers. Trans. IEEE PAS 89(1970)8, p. 2024...2032.
[5] *D. D. Wilson:* Phase-phase and phase neutral switching surges on 500 kV open-ended lines. Trans. IEEE PAS 88(1969)5, p. 660...665.
[6] *H. W. Graybill* and *J. A. Williams:* Underground power transmission with isolated-phase gas insulated conductors. Trans. IEEE PAS 89(1970)1, p. 17...23.
[7] *T. D. Reimers* et *J. B. Owens:* Poste blindé à 345 kV, pressurisé au SF_6. Rapport CIGRE No. 23–04, 1970.

Adresse des Autors:
Dr. sc. techn. *Jürg Vontobel,* Sprecher & Schuh AG, Hochspannungsfabrik Oberentfelden.

SÖREN HJORTH

1801 – 1870

Dänisches Techn. Museum, Kopenhagen

Der Däne Sören Hjorth ist hierzulande wenig bekannt, obwohl man ihn zu den Pionieren der Elektrizität zählen muss. Er war ein wacher Geist, seiner Zeit weit voraus, was für zahlreiche seiner Misserfolge verantwortlich sein dürfte. Viel erstaunlicher ist aber, dass er trotz mangelhafter Schulbildung so viele Probleme richtig sah und anpackte.

Am 13. Oktober 1801 in Vesterbygaard geboren, wuchs er in einfachen Verhältnissen an der Westküste Seelands auf. Der Beruf eines Stewards befriedigte ihn so wenig wie der eines Buchhalters und Sekretärs im staatlichen Schatzamt, wo er von 1828 an arbeitete. Ihn zog es zur Technik. In seiner Freizeit konstruierte er unter anderem eine Dreschmaschine. 1832 entwarf er eine rotierende Dampfmaschine, die zwar nach seinen Angaben, zu wenig sorgfältig gebaut wurde und daher versagte. Eine von einer Stiftung finanzierte Reise führte ihn 1834 nach England, wo er die Anwendung der Dampfwagen studierte. Nach Dänemark zurückgekehrt, machte er sich selber an die Konstruktion eines solchen, hatte aber wiederum keinen Erfolg; sein Gefährt lief zwar auf ebenem Geleise, versagte aber seinen Dienst auf Steigungen.

Fünf Jahre nach der ersten Reise besuchte er abermals England sowie Frankreich und Belgien und kehrte als begeisterter Eisenbahnfreund zurück. Er wurde Direktor der ersten Eisenbahn Dänemarks.

Schon vor der zweiten Reise hatte Hjorth angefangen, sich für die Elektrizität zu interessieren; bei Oersted hörte er Vorlesungen. 1842 entstand der erste Entwurf für eine «elektromagnetische Maschine», deren Zeichnungen er der Königlichen Wissenschaftlichen Gesellschaft vorlegte und für die er 6 Jahre später ein englisches Patent erhielt. Der Motor, um einen solchen handelte es sich, wurde 1851 an der Weltausstellung in London gezeigt. Da aber zu jener Zeit ergiebige Stromquellen fehlten, stiess die Erfindung auf geringes Interesse. In richtiger Erkenntnis dieser Lücke machte er sich nach seiner Rückkehr nach Kopenhagen daran, eine Dynamomaschine zu entwerfen. 1854 erhielt er ein provisorisches englisches Patent auf eine «Dynamomaschine, die ihr Magnetfeld selbst erzeugt». Das war 12 Jahre vor der epochemachenden Erfindung von Werner Siemens! Eine verbesserte Maschine dieser Art stellte er 1867 an der Weltausstellung in Paris aus. Dort wurde er zwar von Napoléon III. empfangen, aber dieser gewährte ihm keine Unterstützung, weil angeblich eine vom Engländer Ladd gezeigte Maschine als besser angesehen wurde. (Auch die Maschine von Siemens war ausgestellt.) Hjorth wurde 1843 Präsident des Industrievereins, hatte von da an die Stellung eines Ingenieurs und spielte im Lande eine wichtige Rolle. Dass er noch fest an das Perpetum mobile glaubte, war zu jener Zeit entschuldbar. Sören Hjorth starb in Kopenhagen am 28. August 1870.

H. Wüger