Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 55 (1964)

Heft: 11

Artikel: Durchführungen für extrem hohe Spannungen

Autor: Kappeler, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916724

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: 06.01.2026

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

Durchführungen für extrem hohe Spannungen

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

von *H. Kappeler,* Zürich

621.315.626

1. Einleitung

Die grössten Durchführungen, über die heute längere Betriebserfahrungen vorliegen, sind jene der 420-kV-Systeme. Durchführungen dieser Spannungsstufe stehen bereits seit einem Jahrzehnt als Teile der Transformatoren in regelmässigem Betrieb und haben damit ihre Bewährungsprobe bestanden. Bemessung und Konstruktion können als gesichert betrachtet werden. Bei den erwähnten Durchführungen handelt es sich ausnahmslos um solche vom Typ des ölimprägnierten oder harzimprägnierten Papiers. Andere Isolierstoffe sind bis heute bei den Höchstspannungen nicht verwendet worden.

Welches sind nun die Schwierigkeiten, denen sich der Konstrukteur gegenübersieht, wenn die Betriebsspannung über die 420-kV-Stufe hinaus erhöht werden soll? Die Probleme grosser Durchführungen sind im wesentlichen elektrischer, thermischer und fabrikatorischer Natur und es muss, beispielsweise beim Übergang auf 765 kV, die Frage im einzelnen untersucht werden, ob die bisherigen Konzeptionen beibehalten werden können, oder ob prinzipiell neue Lösungen gefunden werden müssen.

2. Elektrische Probleme

Wenden wir uns zunächst den *elektrischen* Problemen zu, so ist einmal festzuhalten, dass bei den sehr hohen Betriebspannungen nur Durchführungen mit elektrischer Feldsteuerung in Frage kommen, weil die Dimensionen ungesteuerter Durchführungen kaum mehr tragbar sind. Aber auch bei sorgfältigster Aussteuerung muss man es hinnehmen, dass mit grösserem Durchmesser und grösserer Länge die radiale Feldverteilung im Innern des gesteuerten Körpers immer ungünstiger wird. Wenn man also aus Gründen der inneren Korona für die Dauerspannung einen maximal zulässigen Radialgradienten festgelegt hat und diese Bemessungsgrundlage auch für die höheren Betriebspannungen beibehalten will, so folgt daraus, dass die radialen Dimensionen der Isolierkörper mit der Betriebspannung mehr als nur proportional anwachsen müssen.

Durchführungen sollen aber nicht nur der dauernd wirkenden Betriebspannung, sondern auch den kurzzeitigen Prüfspannungen standhalten können. Hier kommt man in den Bereich einer zweiten Bemessungsgrösse, nämlich des *Kurzzeitdurchschlages.* Der Zweck einer ökonomischen Bemessung liegt nun ja in einer gerade ausreichenden, aber nicht unnötig hohen Prüfsicherheit, d. h. die Wahrscheinlichkeit eines Durchschlages soll ein erträgliches Mass nicht überschreiten. Da nun aber die Durchschlagfestigkeit allgemein mit zunehmender Probengrösse, in unserem besonderen Fall mit zunehmendem Isoliervolumen abnimmt, so ist man gezwungen, die radialen Prüfgradienten umsomehr herabzusetzen, je höher die Prüfspannungen werden.

Man sieht also, dass sowohl aus Gründen der Dauerbeständigkeit als auch zur Erreichung einer genügenden Prüfsicherheit die Durchführungen hoher Betriebspannung in den radialen Dimensionen relativ stärker zu dimensionieren sind als diejenigen kleiner Betriebspannung.

Wenden wir uns nun den *Längsdimensionen* der Durchführungen zu, die im wesentlichen durch die Überschlagspannungen bestimmt sind, so zeigt sich auch hier, dass die Verhältnisse mit grösserer Spannung ungünstiger werden. Bereits macht sich die Anomalie in der Überschlagscharakteristik grosser Schlagweiten bemerkbar, die darin besteht, dass die Überschlagspannung bei Industriefrequenz im Bereich der Überschlagdistanzen von 3 m an aufwärts immer schwächer ansteigt, um sich anscheinend bei ca. 10 m Schlagweite einem obern Grenzwert zu nähern, der auf ca. 1600 kV (Effektivwert) liegen dürfte. Normale Stoßspannungen weisen diese Anomalie nicht auf; d. h. die Überschlagspannungen sind bis zu den grössten Schlagweiten ungefähr proportional zu den Überschlagdistanzen.

3. Thermische Probleme

Bei den thermischen Problemen steht die Frage des *Wärmedurchschlages* im Vordergrund. Das Wärmegleichgewicht ist von der Art des Isolierstoffes, von den Umgebungstemperaturen und von den konstruktiven Gegebenheiten abhängig. Die wenigen Isolierstoffe, die für die Fabrikation von Höchstspannungsdurchführungen in Frage kommen, sind bezüglich ihrer dielektrischen Eigenschaften so vervollkommnet worden, dass man von der Materialseite her keine wesentlichen Stabilitätsverbesserungen mehr erwarten kann. Unter den klassischen Isolierstoffen nimmt das *ölimprägnierte Papier* bezüglich Sicherheit gegen Wärmekippen die erste Stelle ein. Die Wärmeleitfähigkeit dieses Materials ist zwar schlecht, aber die dielektrische Verlustziffer liegt tief und steigt auch mit der Temperatur wenig an. Es eignet sich damit vor allem zur Herstellung *einteiliger* Wickelkörper, und zwar bis zu Spannungen von 765 kV. Voraussetzung ist aber, dass solche imprägnierten Papierwickel während ihrer Lebenszeit weder durch Alterung des Öles noch durch Aufnahme von Gasen und Feuchtigkeit in ihren dielektrischen Eigenschaften beeinträchtigt werden.

Durchführungskörper mit *kunstharzgetränktem* Papier weisen gegenüber den ölimprägnierten Körpern etwas höhere Verlustfaktoren auf; aber diese Materialien haben den Vorteil, dass die Konstanz der Eigenschaften mit einfachen Mitteln dauernd erhalten werden kann. Bei einteiligen Wickelkörpern wird man jedoch kaum über Nennspannungen von 525 kV hinauskommen. Glücklicherweise hat man es durch konstruktive Mittel in der Hand, die Wärmeabfuhr so zu verbessern, dass die Wärmestabilität auch bei den allerhöchsten Spannungen sicher beherrscht werden kann.

Neben den klassischen Isolierstoffen haben heute nun auch neuere Isoliermaterialien Eingang in die Hochspannungstechnik gefunden, die für den Bau von Durchführungen sehr hoher Spannung ebenfalls Erfolg versprechen. Zu erwähnen sind vor allem die *Giessharze* und die *Isoliergase,* unter denen das SF6 wohl das bekannteste ist. Bei Giesslingen aus Epoxy-Harz mit gewissen Füllmitteln wirkt sich die relativ grosse Wärmeleitfähigkeit günstig auf das Stabilitätsverhalten aus; bei Isoliergasen kann man wegen der kleinen Verlustziffer von einem Wärmestabilitätsproblem überhaupt

32798 – 804

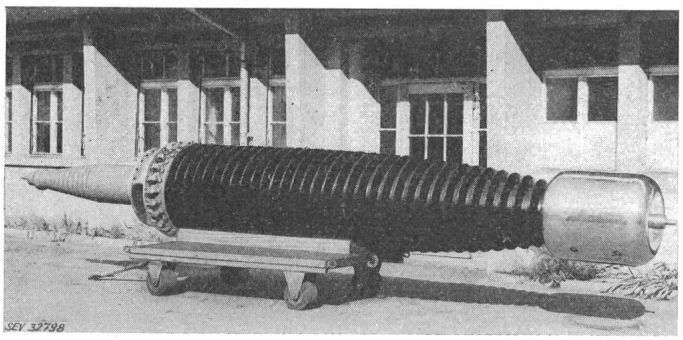

Fig. 1
ölimprägnierte Papierwickel-Durchführung für 525 kV
(Fabrikat Emil Haefely)

nicht mehr sprechen. Bei den neuen Materialien liegen die Schwierigkeiten auf der technologischen Seite, und zur Zeit sind diese Probleme für Durchführungen über 245 kV Nennspannung noch nicht gelöst.

4. Fabrikationsprobleme

Die weitaus grössten Aufgaben, die es beim Übergang auf extrem hohe Spannungen zu bewältigen gibt, sind bedingt durch die aussergewöhnlichen Abmessungen solcher Durchführungen. Bei der klassischen Bauweise liegen die Schwierigkeiten vor allem in der Herstellung eines genügend langen Isolierkörpers. Die Technik hat sich vorwiegend eines Wickelkörpers bedient, der durch Aufwickeln einer einzigen Papierbahn gebildet wird. Die Länge der Durchführung ist deshalb bestimmt durch die Breite der Papierbahn. Es ist nun so, dass die auf dem Markt erhältlichen dielektrisch hochwertigen Kraftpapiere für die Herstellung von Durchführungen bis ca. 525 kV Nennspannung in ihrer Breite noch knapp ausreichen. Für Durchführungen höherer Nennspannung genügen sie jedoch nicht mehr, so dass man gezwungen ist, andere Fabrikationsmethoden anzuwenden.

Die naheliegendste Lösung zur Überwindung der Schwierigkeiten liegt wohl in der Anwendung der *Kabeltechnik*. Hier wird der Durchführungskörper aus schmalen Papierbändern aufgebaut, die spiralig auf ein Leiterrohr gewickelt werden. Die Kabeltechnik ist für Durchführungen von 420 und 525 kV Nennspannung bereits mit Erfolg angewendet worden. Prinzipiell stehen ihr die höchsten Spannungen offen.

Eine weitere Methode, Körper beliebiger Grösse herzustellen, liegt in einer *Unterteilung* des gesamten aktiven Teiles in eine Anzahl Teilkörper von solcher Grösse, wie sie mit marktgängigen Papieren gerade noch bewältigt werden kann. Durch die Aufteilung in kleinere Teilkörper wird zudem das Fabrikationsrisiko herabgesetzt, und es können die Teilkörper mit den ihnen zukommenden Prüfspannungen schon vor dem Zusammenbau einzeln voll geprüft werden. Die erwähnte Fabrikationsmethode eignet sich vorerst nur für Körper aus Hartpapier, bei ölimprägnierten Durchführungen stösst das Zusammensetzen einzelner Körper zu einem Ganzen auf grosse Schwierigkeiten.

Die Methode der unterteilten Durchführung ist bereits praktisch erprobt worden. Eine Anzahl von Transformatordurchführungen der Klasse 420 kV, die nach diesem Prinzip hergestellt worden sind, stehen seit über 6 Jahren in Betrieb. Diese Lösung lässt sich auch auf die Herstellung von Durchführungen der Klasse 765 kV und solcher höherer Nennspannungen sinngemäss übertragen.

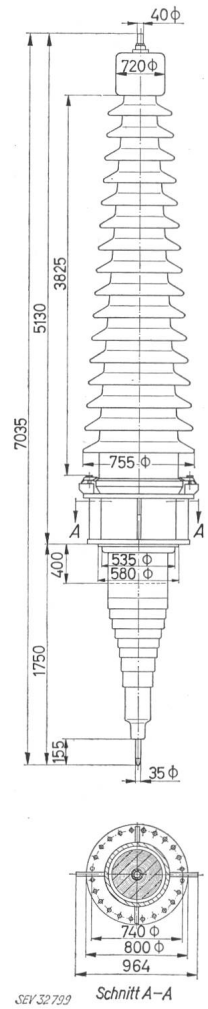

Fig. 2
Abmessungen einer 525-kV-Durchführung
(Fabrikat Emil Haefely)

5. Typenversuche

Die Entwicklung von Durchführungen über die 420-kV-Grenze hinaus ist in der Schweiz sowohl auf der Grundlage des ölimprägnierten Papiers als auch auf der Ebene des trockenen Hartpapiers weiterverfolgt worden.

Fig. 1 und 2 zeigen eine ölimprägnierte Papierdurchführung der Emil Haefely & Cie AG in Basel für eine Betriebspannung von 525 kV. Der Wickelkörper besteht hier aus einer einzigen, breiten Papierbahn. Er befindet sich in einem Gehäuse, das oben durch den Porzellanisolator, unten durch ein Hartpapiergefäss gebildet wird. Das Gehäuse ist hermetisch abgeschlossen und enthält kein Luftkissen; damit das Öl expandieren kann, ist ein metallischer Dehnkörper vorhanden.

Diese Durchführung ist in trockenem Zustand mit einer Wechselspannung von 800 kV während 1 min geprüft worden. Sie hielt ferner vollen Stosswellen von 1800 kV und im Rücken abgeschnittenen Stosswellen von 1900 kV stand.

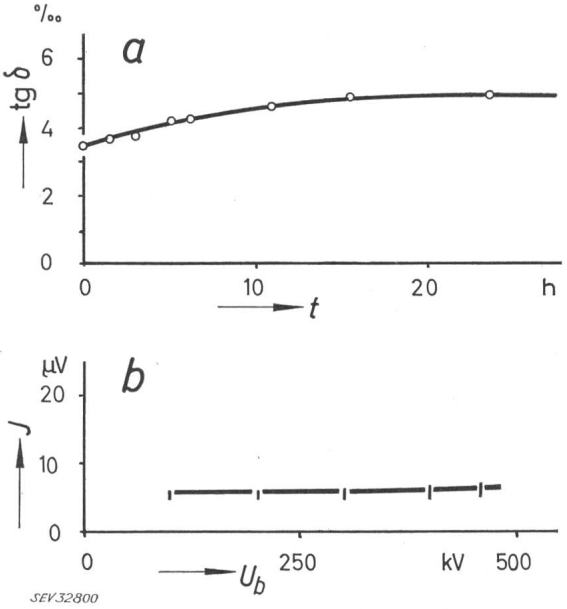

Fig. 3
Dielektrisches Verhalten einer ölimprägnierten Durchführung für 525 kV
(Fabrikat Emil Haefely)
a Prüfung der thermischen Stabilität nach CEI bei 420 kV, 50 Hz, langer Unterteil im Öl 90 °C
b Ionisationspegel nach NEMA, Publ. Nr. 102

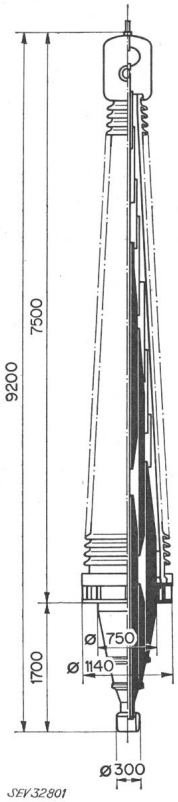

Fig. 4
Schnitt durch eine 850-kV-Hartpapierdurchführung

Neben den kurzzeitigen Spannungsproben wurden Dauerläufe ausgeführt, um das Stabilitätsverhalten abzuklären. Fig. 3 hält das Ergebnis eines 25-stündigen Dauerlaufes mit überhöhter Spannung fest. Die Durchführung ist bei diesem Versuch mit dem Unterteil in heisses Öl von 90 °C getaucht. Man erkennt, dass sich die dielektrischen Verluste bei 420 kV ohne Schwierigkeiten stabilisieren. Die untere Kurve zeigt den inneren Störpegel in Funktion der angelegten Spannung. Beide Charakteristiken dürfen als sehr gut bezeichnet werden.

Von der Micafil AG sind im Hinblick auf die Energieübertragung mit extrem hohen Spannungen zwei Grössen von Durchführungen in mehreren Exemplaren hergestellt worden, ein kleinerer Typ für eine Betriebspannung von 710 kV und ein grösserer für eine Betriebspannung von 850 kV. Die kleinere Durchführung ist aus 3 Teilkörpern, die grössere aus 5 Teilkörpern zusammengesetzt. Fig. 4 zeigt die grössere Durchführung im Schnitt. Die Teilkörper bestehen aus Hartpapier. Sie befinden sich in einem abgeschlossenen, mit Öl gefüllten Raum, wobei ein Luftpolster für die Ausdehnung des Öles vorgesehen ist.

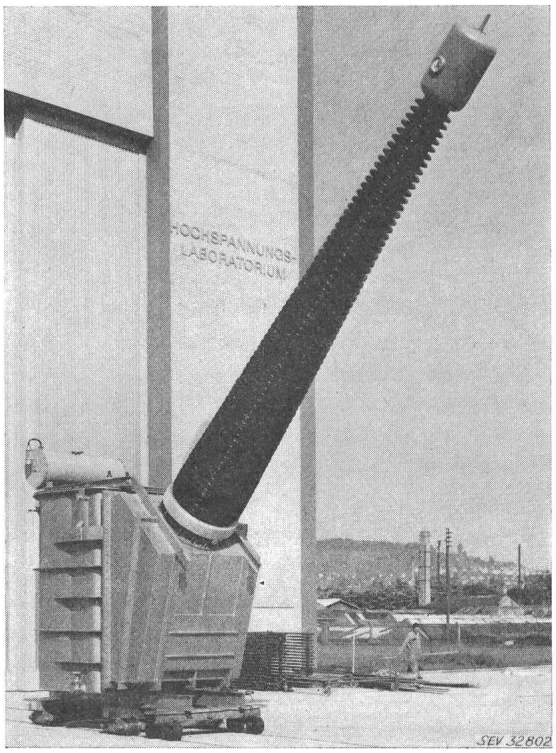

Fig. 5
850-kV-Durchführung, eingebaut in einem BBC-Transformator

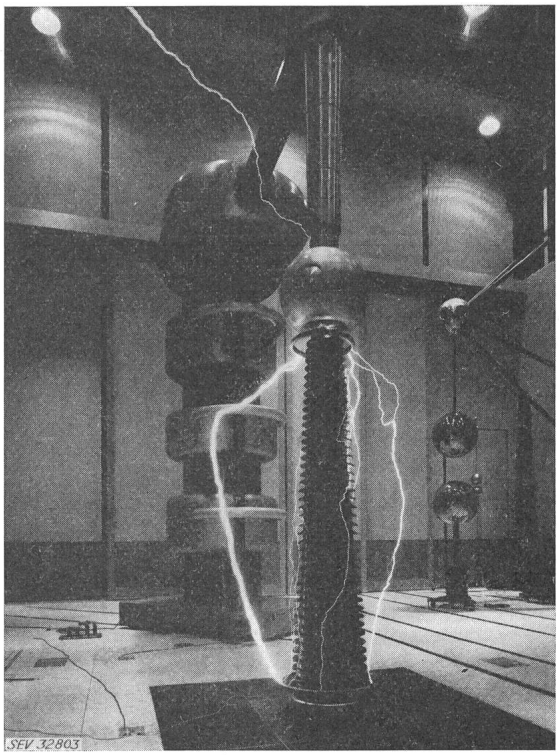

Fig. 6
Prüfung einer 710-kV-Hartpapierdurchführung im neuen Hochspannungslaboratorium der Micafil
Nass-Überschlag bei 1070 kV (Effektivwert)

Ein weiteres Merkmal bilden die flanschlosen Porzellanüberwürfe, die von der Steinzeugfabrik Embrach hergestellt worden sind (Fig. 5). Sie bestehen wegen ihrer ungewöhnlichen Länge aus drei Teilstücken, die nach einem Spezialverfahren zusammengefügt wurden. Das gleiche Verfahren hat sich bei Durchführungen der 420-kV-Klasse, wo es erstmals zur Anwendung kam, seit vielen Jahren bereits bewährt.

Die 710-kV-Durchführung ist in der Prüfanordnung nach Fig. 6 mit Wechselspannungen von 1100 kV im trockenen Zustand und mit 945 kV im nassen Zustande (Minutenwerte) erprobt worden. Das Bild zeigt den Nassüberschlag bei 1070 kV (Effektivwert). Die Durchführung hielt ferner vollen und abgeschnittenen Stössen von 2470 kV stand. Diese Spannungen liegen damit bereits über den Garantiewerten, die von dem 765-kV-Material gefordert werden.

Die grössere Durchführung hat volle Stosswellen von 3050 kV und abgeschnittene Stösse von 3400 kV anstandslos

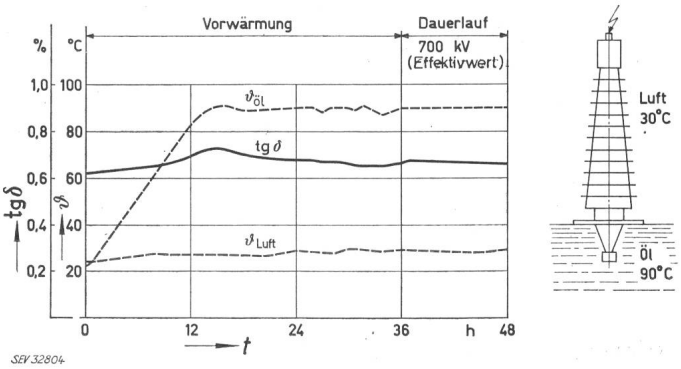

Fig. 7
Stabilitätsversuch an einer 850-kV-Durchführung
Unterteil in Öl von 90 °C, Dauerspannung effektiv gegen Erde 700 kV. Vor dem Dauerlauf wurde die Durchführung während 36 h vorgewärmt

ertragen und damit jenes Isolationsniveau erreicht, das selbst für eine Nennspannung von 1000 kV als ausreichend betrachtet werden darf.

Neben den Spannungsprüfungen interessierten auch hier wiederum besonders die Versuche über die Wärmestabilität. Es sollte gezeigt werden, dass das Prinzip der unterteilten Körper auch für die höchsten Spannungen ohne Gefahr angewendet werden kann. Der Versuch wurde mit der höchsten, nur durch die Messeinrichtungen begrenzten Spannung von 700 kV gegen Erde ausgeführt.

Fig. 7 zeigt das Ergebnis des Dauerlaufes. Die Durchführung wurde mit dem Unterteil in 90 °C heissem Öl während 36 h spannungslos aufgeheizt, damit vorerst eine gleichmässige Durchwärmung zustande kam. Anschliessend wurde während weiteren 12 h die Spannung von 700 kV effektiv angelegt. Der Verlauf der Verlustfaktorkurve erbrachte den Beweis, dass diese Art von Hartpapierdurchführungen als absolut stabil bezeichnet werden darf.

Auf Grund der Typenversuche darf gesagt werden, dass nicht nur die Konstruktion der zu liefernden 765-kV-Durchführungen, sondern darüber hinaus auch jene der vielleicht in Zukunft benötigten Durchführungen im 1000-kV-Bereich bereits als gesichert betrachtet werden darf.

Adresse des Autors:
Dr. sc. techn. *H. Kappeler,* Vizedirektor, Micafil AG, Zürich 9/48.

Diskussion

E. Thuries, Chef de Recherches des disjoncteurs pneumatiques aux Ateliers de Construction Electriques de Delle, Villeurbanne (France): Monsieur *Ruoss* [1]) ayant exposé les principaux problèmes posés aux disjoncteurs 735 kV, je présenterai rapidement les solutions adoptées par les Ateliers de Constructions Electriques de Delle qui ont été honorés, par la Commission Hydro-Electrique de Québec, d'une commande de 4 disjoncteurs 735 kV dont les caractéristiques principales sont les suivantes:

a) pouvoir de coupure . . . . . 40 000 MVA
b) niveau d'isolement au choc . . . . 2200 kV, crête
c) temps total de coupure . . . . . 2,5 cycles à 60 Hz
d) surtensions limitées en ouverture ou fermeture de transformateurs ou de lignes à vide

La fig. 1 représente un pôle de ce disjoncteur. Il comporte essentiellement deux réservoirs d'air comprimé formant châssis support pour 6 colonnes isolantes en céramique creuses portant chacune une tête de coupure dont elles assurent l'alimentation en air comprimé. Ces colonnes, comme l'ensemble du disjoncteur, sont en permanence sous pression, ce qui évite les condensations et les rentrées éventuelles d'humidité. Elles renferment en outre la commande des chambres de coupure, commande à transmission mécanique, qui permet un gain appréciable de temps par rapport aux commandes pneumatiques classiques et assure une parfaite synchronisation entre chambres. On distingue à la partie supérieure du disjoncteur d'importants anneaux de garde horizontaux destinés à assurer une répartition uniforme du champ sur les colonnes supports et des anneaux verticaux permettant de diminuer les gradients de potentiel afin de réduire effet Korona, effluves et interférences radio, qui pourraient prendre une certaine ampleur sous ces tensions élevées. On peut également apercevoir des condensateurs destinés à assurer une répartition de tension lorsque le disjoncteur est déclenché.

32'837 – 838

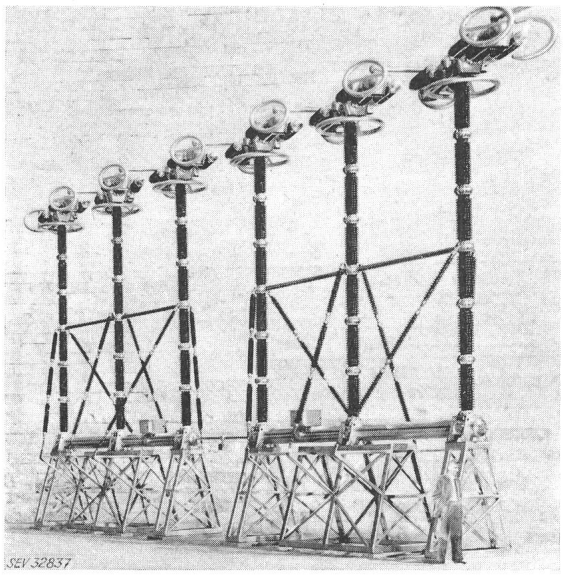

Fig. 1

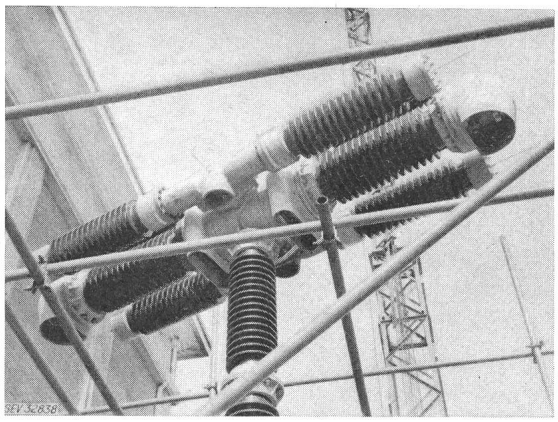

Fig. 2

La fig. 2 montre une tête de coupure comportant en deux exemplaires la chambre principale de coupure avec ses deux orifices de soufflage et les deux chambres secondaires disposées de part et d'autre. Ces chambres sont en permanence sous pression; l'air comprimé est ainsi au voisinage des contacts, ce qui autorise de faibles temps de coupure et une régénération diélectrique rapide à laquelle contribue également puissamment le double soufflage pour la chambre principale.

La première chambre secondaire fonctionnant au déclenchement renferme une résistance et un interrupteur chargé d'interrompre le courant traversant cette résistance qui est destinée à assurer une parfaite répartition de tension sur les chambres principales et à diminuer les surtensions de manœuvre en coupure de petits courants inductifs en particulier.

Notons qu'en coupure de longues lignes à vide, la présence de cette résistance permet de décharger sensiblement la ligne dans des proportions pouvant atteindre 10 à 20 % suivant la capacité de cette ligne, c'est-à-dire suivant sa longueur. Ceci est évidemment favorable puisque les surtensions qui prendront naissance lors d'une refermeture rapide de cette ligne à vide seront diminuées d'autant.

La deuxième chambre secondaire fonctionnant à l'enclenchement a pour but d'insérer, avant la fermeture de la chambre principale, une résistance de très faible valeur ohmique, afin de diminuer les surtensions d'enclenchement, problème qui a déjà été fréquemment abordé au cours de cette réunion.

La détermination de la valeur à donner à cette résistance

[1]) Voir p. 532...538 du numéro.