Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 47 (1956)
Heft: 8

Artikel: Courant et conductibilité post-arc dans les disjoncteurs à haute tension
Autor: Baltensperger, P. / Schmid, P.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058203

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

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

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

Download PDF: 08.01.2026

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

Courant et conductibilité post-arc dans les disjoncteurs à haute tension

Par *P. Baltensperger*, Unterengstringen (ZH), et *P. Schmid*, Wettingen (AG)

621.316.57.064.2

Des mesures ont été effectuées pour déterminer le courant et la conductibilité post-arc lors de coupures de courants inductifs par un disjoncteur à cuve d'huile, un disjoncteur à faible volume d'huile et un disjoncteur pneumatique, tous construits pour la tension nominale de 10 kV. Tandis que les valeurs du courant post-arc relatives aux disjoncteurs dans l'huile accusent une très grande dispersion, celles mesurées dans le disjoncteur pneumatique sont très faibles. Pour aucun des types de disjoncteurs et pour les fréquences propres inférieures à 5000 Hz, on ne pouvait déceler avec certitude une influence de la conductibilité post-arc sur la tension transitoire de rétablissement.

An einem Kesselölschalter, einem ölarmen Schalter und einem Druckluftschalter, alle für 10 kV Nennspannung, wurden Nachströme und Restleitfähigkeiten der Schaltstrecken nach der Ausschaltung induktiver Ströme gemessen. Der Nachstrom streute bei den Ölschaltern in weiten Grenzen, während er beim Druckluftschalter sehr klein war. Ein dämpfender Einfluss der Restleitfähigkeit auf die nach Kurzschlußausschaltungen wiederkehrende Spannung ist bei Eigenfrequenzen unterhalb 5000 Hz bei keinem der geprüften Schaltertypen mit Sicherheit vorhanden.

Introduction

Un disjoncteur à courant alternatif idéal serait un appareil dans lequel, lors de son ouverture, la résistance s'opposant au courant sauterait instantanément sur chaque pôle, au moment du passage de l'intensité par zéro, de la valeur nulle à une valeur infiniment grande. Mais il est évident qu'un tel disjoncteur n'existe pas. En effet, dans tous les disjoncteurs, il se produit au moment de la séparation des contacts un arc après l'extinction duquel le fluide se trouvant entre ces contacts est encore partiellement ionisé. Il en résulte une conductibilité qui provoque lors du rétablissement de la tension, l'apparition d'un courant que l'on a dénommé courant post-arc. Le présent article a pour objet de décrire les essais de coupure unipolaire qui ont été exécutés à ce sujet au laboratoire d'essai des disjoncteurs de la S. A. Brown, Boveri & Cie.

I. Dispositif de mesure

Précisons tout d'abord que l'intensité du courant post-arc à mesurer peut varier entre une valeur minime et quelques ampères. Or, l'appareillage utilisé doit être tel que la mesure ne soit nullement influencée par le courant circulant pendant la demi-période précédant l'extinction de l'arc qui peut être très élevé et atteindre par exemple 20 000 A. Cette condition est naturellement très difficile à remplir et il a fallu prendre toute une série de dispositions particulières.

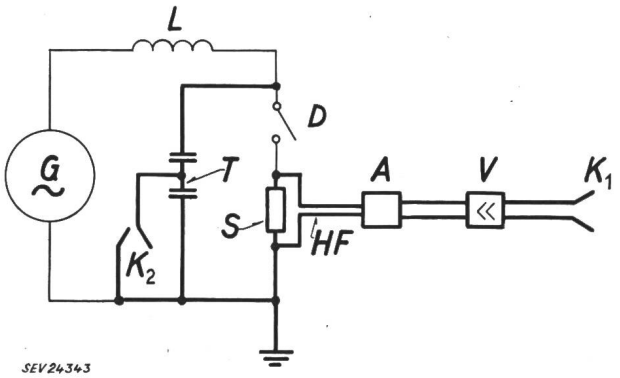


Fig. 1
Schéma de principe de l'installation de mesure
G génératrice de grande puissance; *L* bobine d'inductance limitant le courant; *D* disjoncteur en essai; *S* résistance de mesure; *HF* câble coaxial; *A* écrêteur; *V* amplificateur; K_1, K_2 oscillographes cathodiques; *T* diviseur de tension capacitif

La *constitution de principe* du dispositif de mesure est donnée par la fig. 1. Le courant étudié passe dans une résistance de mesure *S* présentant une inductance aussi faible que possible et créant une chute de tension qui est elle-même enregistrée par un oscillographe cathodique K_1 après avoir été amplifiée. Quant à la tension transitoire de rétablissement, elle est de son côté mesurée à l'aide d'un diviseur de tension capacitif *T* et d'un oscillographe cathodique K_2.

La *résistance S* doit pouvoir supporter pendant un dixième de seconde, sans modification sensible de ses propriétés, un courant de court-circuit pouvant atteindre 20 kA. Pour que la quantité de chaleur produite à ce moment ne soit pas inutilement grande, la valeur de la résistance a été choisie suf-

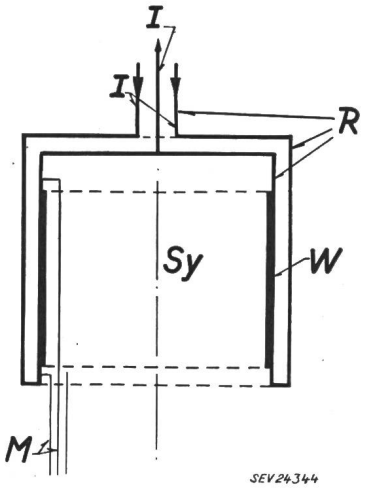


Fig. 2
Résistance tubulaire de mesure
I courant; *M* câble de mesure; *Sy* axe de symétrie; *W* tube en métal résistant; *R* tube en cuivre

fisamment petite. Mais d'autre part, l'inductance de cette résistance devait être très faible afin qu'il n'y ait entre le courant et la tension aucun déphasage qui risquerait de provoquer l'enregistrement d'un courant post-arc inexistant. Pour satisfaire à ces deux conditions, la résistance a été réalisée sous la forme d'un tube (fig. 2) en métal résistant et on lui a donné la valeur de 0,00124 Ω; son inductance est égale à $1{,}3 \cdot 10^{-9}$ H. Lorsque le courant à couper était inférieur à 500 A, on utilisait une résistance ayant une valeur plus élevée.

L'amplificateur devait permettre d'obtenir, à partir de la tension mesurée aux bornes de la résistance *S* (1,24 mV pour un courant de 1 A), une tension suffisante (par exemple 30 V) pour le bon fonctionnement de l'oscillographe cathodique. Nous avons choisi un amplificateur à courant continu

ayant un coefficient d'amplification de 5000 à 50 000 et une constante de temps de $0{,}5 \cdot 10^{-6}$ s. Cependant, la tension d'entrée ne devait jamais dépasser 0,2 V, même lorsque le courant avait son intensité maximum, afin d'éviter tout déplacement du zéro de l'oscillographe. C'est pourquoi, la tension aux bornes de la résistance pouvant atteindre des valeurs beaucoup plus grandes avant l'extinction de l'arc de court-circuit, il a fallu insérer un *écrêteur* approprié en amont de l'amplificateur. Cet écrêteur devait avoir un temps de réponse assez bref et il a fallu également éliminer toute possibilité d'oscillations propres pouvant fausser les mesures. Grâce à l'emploi de tensions d'anode bien stabilisées et à l'alimentation des circuits de chauffage par des batteries d'accumulateurs, il suffisait d'effectuer un ajustement chaque heure pour obtenir une stabilité du zéro très satisfaisante. La fig. 3 montre que la proportionnalité des tensions de sortie et d'entrée de l'amplificateur n'est pas assurée dans toute l'étendue du domaine des mesures. La caractéristique est cependant linéaire jusqu'au point correspondant à la valeur d'environ 20 A du courant mesuré, ce qui était amplement suffisant dans notre cas.

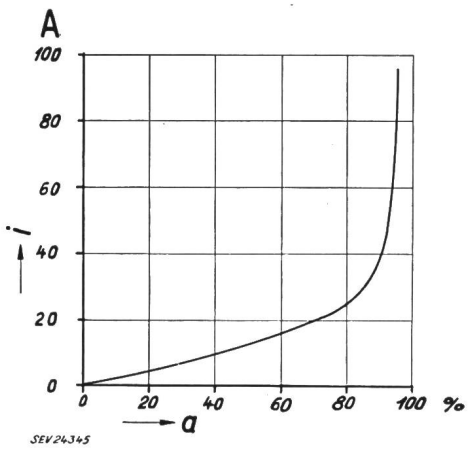


Fig. 3
Courbe d'étalonnage de l'amplificateur
i valeur instantanée en A du courant mesuré

Notre dispositif de mesure a été l'objet d'un grand nombre de contrôles. L'un de ces contrôles sera expliqué sous III. 3.

II. Résultats des mesures

Les mesures du courant post-arc ont été effectuées avec:

A) Un disjoncteur de construction classique avec cuve d'huile, pour la tension nominale de 10 kV et un pouvoir de coupure de 80 MVA.

B) Un disjoncteur à faible volume d'huile pour la tension nominale de 10 kV et un pouvoir de coupure de 250 MVA.

C) Un disjoncteur pneumatique (sans résistances) pour la tension nominale de 10 kV et un pouvoir de coupure de 200 MVA.

Les fig. 4, 5 et 6 reproduisent des oscillogrammes de courants post-arc et des tensions de rétablissement correspondantes, relatifs respectivement aux trois types de disjoncteurs, pour diverses valeurs du courant coupé.

Les fig. 7, 8 et 9 donnent pour les trois types de disjoncteurs également, les valeurs de l'intensité et de la durée du courant post-arc en fonction du courant coupé. Par durée du courant post-arc, nous entendons le temps qui s'écoule entre l'extinction de l'arc et l'instant où l'intensité tombe à 10 % de son maximum sans remonter ensuite au-dessus de cette valeur.

D'autre part, les fig. 10, 11 et 12 montrent comment varie la résistance de l'espace entre contacts, en fonction du temps.

III. Discussion des résultats

1. Allure des courbes du courant post-arc et de la tension de rétablissement en fonction du temps. Considérons par exemple les oscillogrammes de la figure 4B relatifs à la coupure, par le disjoncteur dans l'huile, d'un courant inductif ayant une intensité efficace de 800 A sous une tension efficace de 5,7 kV. *X*-1 et *X* désignent respectivement les portions des courbes de courant et de tension au voisinage de l'avant-dernier et du dernier passage du courant par zéro avant l'extinction définitive de l'arc. Cette extinction se produit à l'instant *a* et le courant tombe alors rapidement à environ 6 A. En raison de l'énergie électromagnétique en jeu dans le circuit, la capacité qui se trouve en parallèle avec le pôle du disjoncteur se charge. Il s'ensuit que la tension entre les contacts augmente pour atteindre un maximum à l'instant *b*, qu'elle s'annule à l'instant *c* et qu'elle tend ensuite vers la valeur de la tension étoilée en faisant quelques oscillations amorties. De l'instant *b* à l'instant *c*, le courant diminue lentement et tend vers zéro. Il reste ensuite pratiquement nul jusqu'au temps *d*, alors que la tension est égale à 3 kV, puis il augmente avec la tension et atteint son maximum de 18 A au temps *e*, un peu après que la tension de rétablissement qui oscille ait passé par sa valeur maximum. Après un minimum, au temps *f*, et un second maximum, au temps *g*, qui coïncident à peu près respectivement avec un minimum et un maximum de la tension de rétablissement, le courant post-arc retombe lentement vers la valeur 0 (après 1 ms, il est encore égal à 1 A).

L'oscillogramme examiné correspond à une coupure suivie d'un courant post-arc d'intensité et de durée relativement grandes, c'est-à-dire à l'une des courbes à faible pente de la figure 10. Cette figure comprend des courbes de deux types:

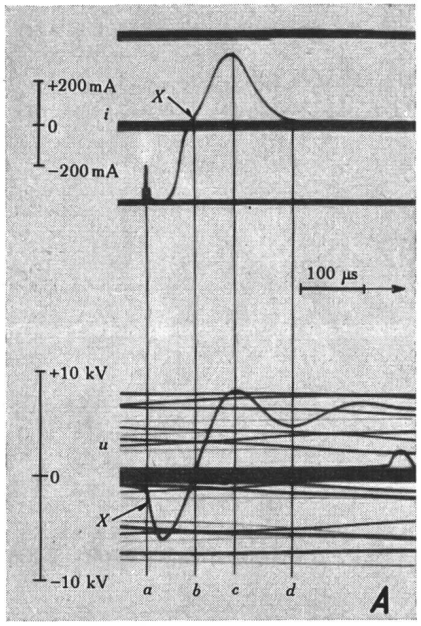
a) les unes accusent une valeur assez élevée de la résistance au moment du passage du courant par zéro (temps $t = 0$);

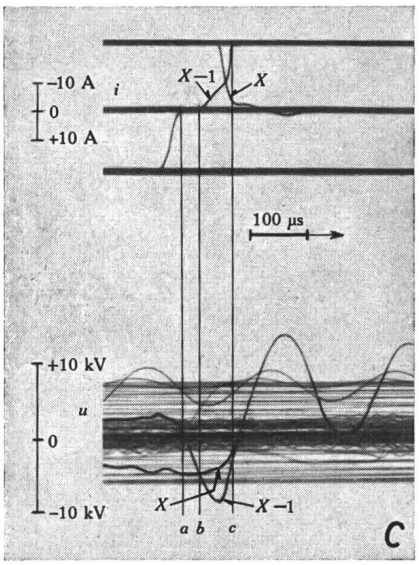
b) les autres ont une forme générale à pente beaucoup plus douce.

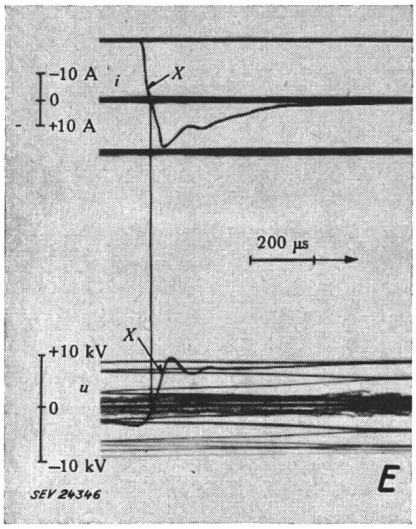
Les courbes du premier groupe passent par un maximum bien marqué au moment où le courant s'annule, puis par un minimum de quelques kΩ au bout de 0,1 à 0,2 ms pour remonter ensuite rapidement. Ce minimum se produit généralement un peu après le maximum de la tension de rétablissement. La dispersion des temps correspondant aux maximums est due au fait que les fréquences propres de la tension de rétablissement sont différentes dans les divers essais.

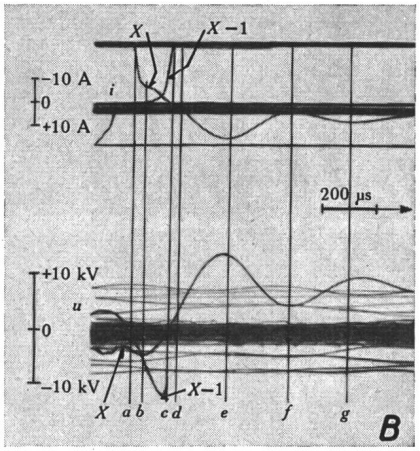
Dans les courbes du second type, le maximum qui se produit au temps zéro est peu marqué et il est suivi d'un minimum peu visible. L'allure de

ces courbes est assez irrégulière et l'augmentation de la résistance est très lente (2 à 4 kΩ après 1 ms).









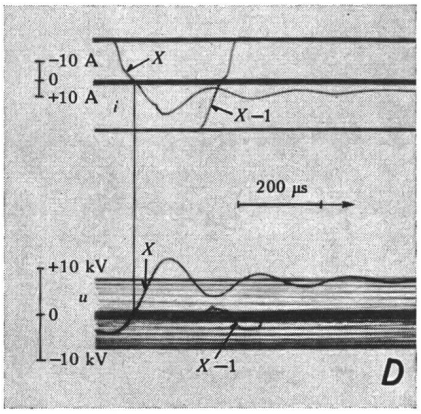


Fig. 4
Oscillogrammes du courant post-arc *i* et de la tension correspondante *u* relatifs à un disjoncteur à cuve d'huile ayant un pouvoir de coupure de 80 MV pour la tension nominale de 10 kV

Tension efficace de service: 5,7 kV
A courant coupé = env. 1100 A
B courant coupé = env. 800 A
C, *D* et *E* courant coupé = env. 4300 A
X-1 avant-dernier passage du courant par zéro; *X* dernier passage du courant par zéro

Les droites horizontales du haut et du bas des oscillogrammes de courant indiquent les limites d'enregistrement fixées par l'écrêteur qui empêche la partie des ondes de tension (qui correspondent aux ondes de courant passant dans la résistance de mesure) pour laquelle l'amplitude dépasse une certaine valeur de parvenir à l'amplificateur. Le domaine compris entre ces deux limites a été choisi de manière à avoir une image de grandeur raisonnable des parties de courbes qui nous intéressent, à savoir celles qui sont voisines de l'extinction de l'arc. L'appareillage permettait de déplacer la ligne de zéro du courant et de la fixer dans n'importe quelle position entre les deux limites.

Les courbes relatives au disjoncteur à faible volume d'huile dénotent des variations de résistance beaucoup plus rapides (fig. 11). Dans le disjoncteur pneumatique (fig. 12), il n'y a plus de maximum suivi de diminution de la résistance après le passage du courant par zéro, mais on observe au contraire une augmentation rapide et continue de cette résistance qui est due à la déionisation rapide et sûre de l'espace entre les contacts.

2. Grandeur du courant post-arc. La valeur maximum du courant post-arc, dans le disjoncteur à bac d'huile, a varié entre 0 et 24 A, et sa durée entre 0 et $0{,}9 \cdot 10^{-3}$ s (voir fig. 7). Cette dispersion s'étend pratiquement à tout le domaine des valeurs du courant coupé sans qu'il soit possible d'établir une relation quelconque entre ce dernier et les autres grandeurs. On a pourtant constaté, d'une manière générale, que les courants post-arc relevés après les coupures difficiles, c'est-à-dire celles pour lesquelles la durée de l'arc était longue, sont très faibles tandis que les plus forts courants post-arc se sont produits lors de coupures faciles avec faible durée de l'arc. Il est clair, en effet, que la pression engendrée par la vaporisation de l'huile dans la chambre de coupure est plus grande après une coupure difficile et que par conséquent, la déionisation est plus rapide. On peut en conclure que précisément dans les cas de coupures difficiles et de valeurs normales de la fréquence propre, de 3000 Hz par exemple, le courant post-arc ne peut amortir de manière sensible la tension de rétablissement. Comme en outre la résistance entre les contacts n'a pas été inférieure à 600 Ω, aussi bien lors de coupures difficiles que lors de presque tous les cas de coupures faciles, il est aisé de montrer par le calcul que ce n'est que pour les fréquences propres très élevées que la conductibilité post-arc peut avoir une influence notable sur l'amortissement de la tension de rétablissement (dans le cas, par exemple, où la tension de service est de 10 kV et la puissance mise en jeu lors de la coupure est égale à 200 MVA, ce n'est que pour les fréquences propres supérieures à 30 000 Hz qu'une résistance post-arc de 600 Ω peut avoir une influence efficace).

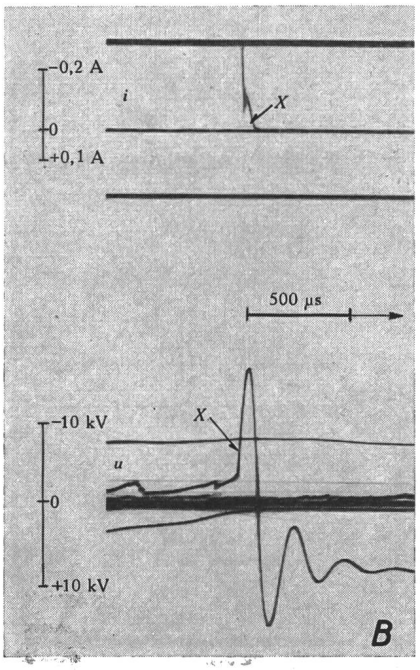
Les résultats obtenus avec le disjoncteur à faible volume d'huile montrent que la dispersion des va-

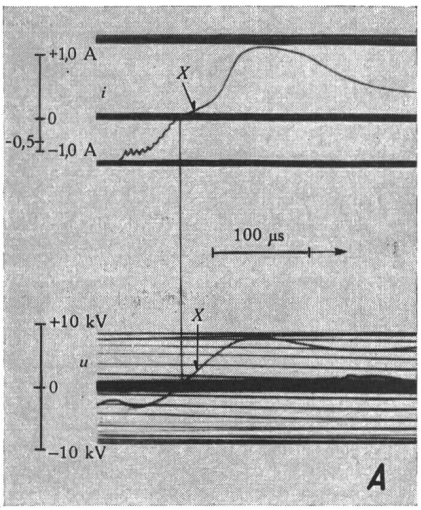
leurs du courant post-arc est plus faible que pour le disjoncteur à cuve d'huile (fig. 8). On constate cependant que les valeurs tant de l'intensité que de la durée du courant post-arc ont été relativement grandes lorsque le courant coupé était petit (par exemple 100 A). Ce fait s'explique par la faible valeur qu'avait alors la pression produite dans la chambre de coupure et par le peu d'effet déionisant qui en résultait. Mais, bien qu'elle ait été relativement grande, la conductibilité post-arc n'était pas suffisante pour provoquer un amortissement notable des surtensions lors de la coupure de faibles courants inductifs.

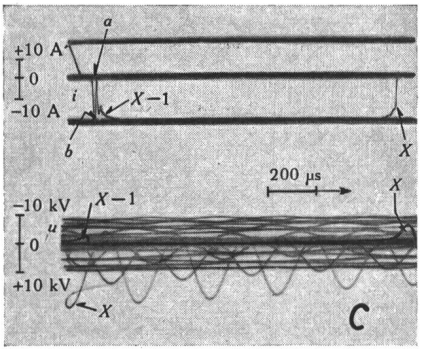
Avec le disjoncteur pneumatique, les courants post-arc mesurés ont tous été très faibles (max. 2 A) et leur durée était extrêmement brève. Les mesures semblent montrer qu'il existe une relation linéaire entre la valeur maximum que peut prendre le courant post-arc et le courant coupé. Comme le fluide extincteur a toujours la même pression et le même débit dans les disjoncteurs pneumatiques, cette dépendance s'explique aisément si l'on admet que l'ionisation dans l'espace entre contacts augmente avec l'intensité du courant coupé. Il peut paraître paradoxal que les durées du courant post-arc (fig. 9b) soient beaucoup plus longues pour les faibles valeurs du courant coupé que pour les valeurs plus grandes. Mais, d'une part, la conductibilité post-arc a dès l'extinction de l'arc, lorsque le courant coupé est faible, une valeur initiale relativement petite et son évolution jusqu'au moment où elle tombe à un dixième de sa valeur initiale peut durer plus longtemps qu'une évolution analogue consécutive à une valeur plus élevée correspondant à un courant coupé plus grand. De plus, la fréquence propre de la tension de rétablissement, qui a une influence sur la conductibilité post-arc, n'était pas toujours la même.

A l'exception du cas de l'oscillogramme 6 C dans lequel elle a atteint 20 kHz, la fréquence propre a varié au cours de tous les essais relatifs au disjoncteur pneumatique entre 2 et 5 kHz.

Il existe des disjoncteurs pneumatiques dans lesquels la coupure se fait avec l'aide d'une ou de plusieurs résistances et d'éclateurs auxiliaires. La conductibilité post-arc peut alors prendre des valeurs plus grandes. Des essais ont été exécutés avec un pôle de disjoncteur pneumatique à 10 kV muni d'un éclateur branché en série avec une résistance de faible valeur, l'ensemble de ces deux éléments étant branché en parallèle avec le contact principal; la valeur maximum des courants post-arc a atteint jusqu'à 15 A, la tension efficace de service ayant la valeur réduite de 2,3 kV. Cette valeur élevée s'explique par le fait que l'air soufflé entre les électrodes de l'éclateur auxiliaire a passé auparavant







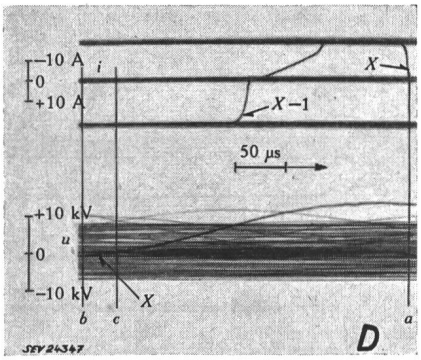


Fig. 5
Oscillogrammes du courant post-arc *i* et de la tension correspondante *u* relatifs à un disjoncteur à faible volume d'huile ayant un pouvoir de coupure de 250 MVA pour la tension nominale de 10 kV

Tension efficace de service: 5,7 kV

A et *B* courant coupé = env. 100 A
C courant coupé = env. 800 A
D courant coupé = env. 10 000 A
X-1 = avant-dernier passage du courant par zéro
X = dernier passage du courant par zéro

entre les contacts principaux où il a été ionisé et échauffé, qu'il arrive avec une pression relativement faible et que la rigidité entre les électrodes n'est donc pas très élevée. C'est d'ailleurs pour ces mêmes raisons que se produit, lors du fonctionnement à la tension de service normale, l'amorçage désiré de l'éclateur et par conséquent la mise en circuit de la résistance dès que la tension de rétablissement augmente.

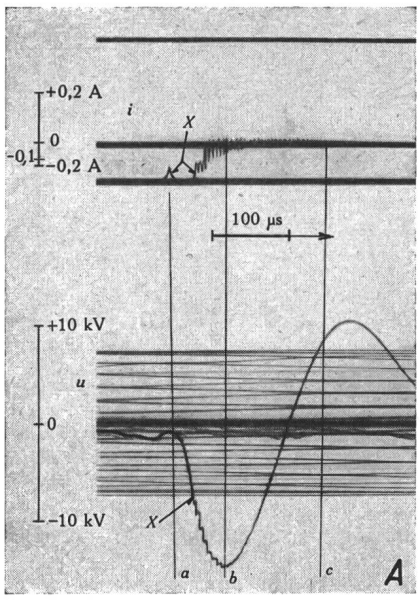
3. Influence de la conductibilité post-arc de l'espace entre les contacts sur la variation de la tension de rétablissement et contrôle de la mesure du courant post-arc. La fig. 13 représente le schéma équivalent du circuit lors de l'ouverture du disjonc-

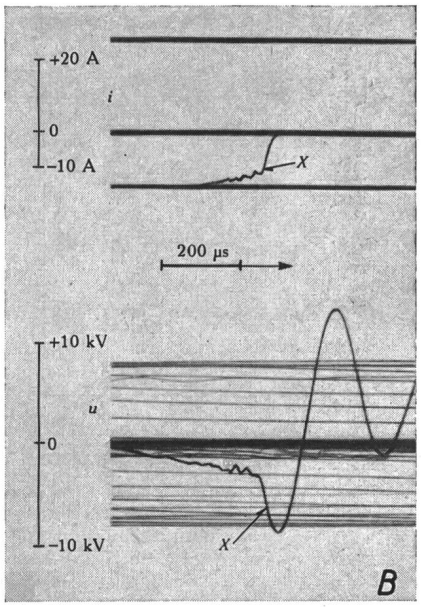
teur. Si l'on considère un intervalle de temps suffisamment bref, on peut admettre que la résistance variable de l'espace entre les contacts ouverts R_S a momentanément une valeur constante. La tension de rétablissement subit des oscillations amorties par les résistances R_N et R_S et le décrément logarithmique est égal à

$$\vartheta = \left[\frac{R_N}{2\,L} + \frac{1}{2\,R_S\,C}\right] T \qquad (1)$$

où T est la période. Or, on peut mesurer directement R_N ou en déterminer la valeur à partir d'un oscillogramme de la tension de rétablissement amortie relevé dans un cas où le courant post-arc est très faible. Il est en outre possible de déterminer la résistance R_S (qui est égale au quotient de la tension de rétablissement par le courant post-arc) à l'aide d'un essai dans lequel le courant post-arc atteint une grande valeur. On peut alors calculer le décrément logarithmique par la formule (1). Ce calcul nous permet d'exécuter un des contrôles de notre dispositif de mesure auxquels nous avons fait allusion plus haut. Ce décrément peut en effet se déduire aussi d'un oscillogramme de l'oscillation amortie de la tension de rétablissement et cette valeur peut être comparée à celle obtenue par le calcul à l'aide de la formule (1). C'est ainsi que nous servant par exemple de l'oscillogramme de la figure 4D, nous avons trouvé pour R_S la valeur approximative de 600 Ω en divisant la tension de rétablissement par le courant post-arc. La résistance R_N était égale à 3 Ω et l'on avait en outre $L = 4{,}2 \cdot 10^{-3}$ H, $C = 2{,}7 \cdot 10^{-7}$ F et $T = 2{,}1 \cdot 10^{-4}$ s. Le décrément logarithmique calculé à l'aide de la formule (1) était alors égal à 0,65 tandis que celui que permet de déterminer l'oscillogramme de tension de la figure 4D était égal à 0,70. On constate donc une concordance très satisfaisante.

4. Réamorçages d'origine thermique et réamorçages d'origine diélectrique. Le passage d'un courant post-arc entraîne la production d'une énergie thermique par effet Joule dans l'espace situé entre les contacts. La puissance en jeu est égale au produit du courant par la tension de rétablissement. Si l'énergie ainsi produite est supérieure à celle qui est dissipée par rayonnement, par convection, par conduction thermique, etc., la température de l'espace entre contacts s'élève et il en résulte une augmentation du degré d'ionisation. Cette augmentation peut entraîner un accroissement du courant post-arc qui provoque à son tour une augmentation de la puissance en jeu et un nouvel échauffement. Le courant croît de plus en plus jusqu'à ce qu'il y ait réamorçage d'origine thermique. Nous avons observé, dans tous ces cas, un temps de 50 à 200 µs entre le début de l'accroissement du courant et l'apparition de l'étincelle. De tels réamorçages se sont produits sur-





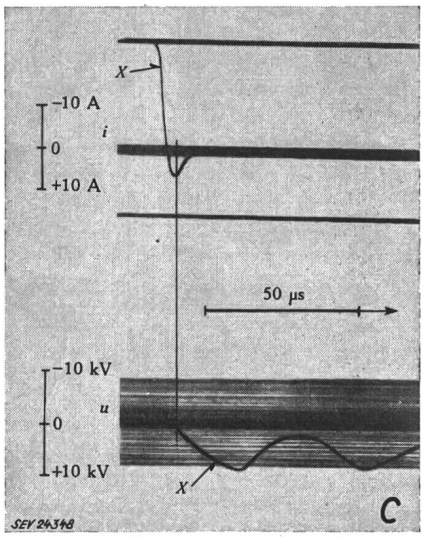


Fig. 6
Oscillogrammes du courant post-arc i et de la tension correspondante u relatifs à un disjoncteur pneumatique sans résistances ayant un pouvoir de coupure de 200 MVA pour la tension nominale de 10 kV

Tension efficace de service: 5,7 kV

A courant coupé = env. 100 A
B courant coupé = env. 800 A
C courant coupé = env. 12 000 A
X-1 = avant-dernier passage du courant par zéro
X = dernier passage du courant par zéro

tout dans le disjoncteur à cuve d'huile et parfois dans le disjoncteur à faible volume d'huile mais jamais dans le disjoncteur pneumatique. Il s'est produit par contre, dans ce dernier, des réamorçages non différés dus uniquement à l'insuffisance de la rigidité diélectrique du fluide pratiquement non ionisé entre contacts. Mais ce genre de réamorçage n'est pas typique du disjoncteur pneumatique seulement et il se produit aussi souvent, tant dans le disjoncteur à faible volume d'huile que dans le disjoncteur classique à cuve d'huile.

Un exemple de réamorçage d'origine thermique nous est donné par l'oscillogramme de la figure 4C. Cet oscillogramme montre qu'au moment de l'avant-dernier passage de l'intensité de courant par zéro (courbe X-1), le courant est resté nul pendant environ 40 µs. Cependant, dès que la tension a

atteint à peu près 6 kV (en *b*), le courant post-arc a commencé à croître, d'abord lentement, puis toujours plus rapidement jusqu'au moment du réamor-

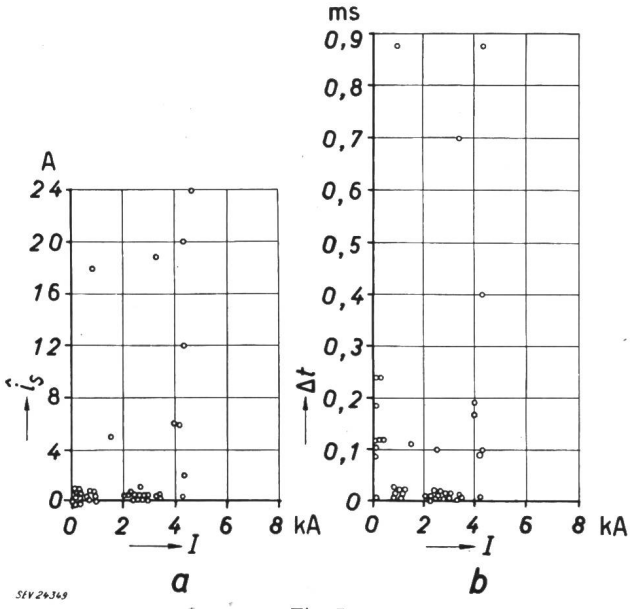


Fig. 7

Intensité instantanée maximum $\hat{i}_s$ (a) et durée Δt (b) du courant post-arc en fonction du courant coupé *I*, dans un disjoncteur à cuve d'huile pour 10 kV et 880 MVA

Le courant coupé a pris diverses valeurs comprises entre 100 A et 4,3 kA

çage (en *c*). Le temps qui s'est écoulé de *b* à *c* a été d'environ 60 µs. L'oscillogramme de la figure 5C illustre au contraire un exemple typique de réamorçage d'origine diélectrique. Il montre en effet (courbe *X*-1) après l'avant-dernier passage de l'intensité du courant par zéro, que celle-ci a augmenté très rapidement du point *a* au point *b* où le réamorçage est survenu.

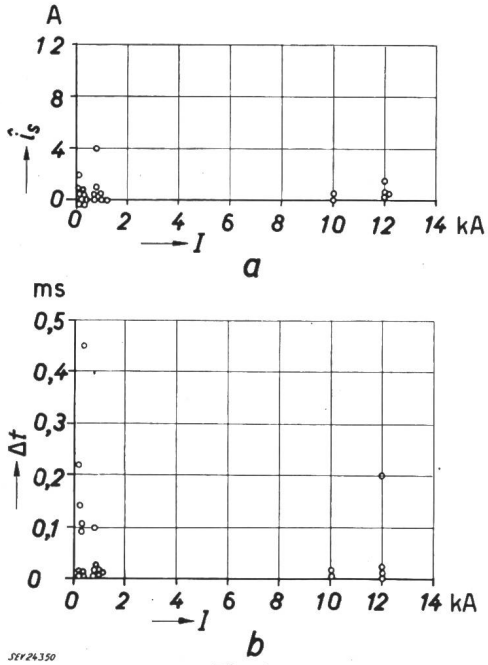


Fig. 8

Intensité instantanée maximum $\hat{i}_s$ (a) et durée Δt (b) du courant post-arc en fonction du courant coupé *I*, dans un disjoncteur à faible volume d'huile pour 10 kV et 250 MVA

Le courant coupé a pris diverses valeurs comprises entre 100 A et 12 kA

5. Annulation anticipée du courant coupé et du courant post-arc, avant le passage normal de l'intensité par zéro. Il peut arriver que la tension d'arc

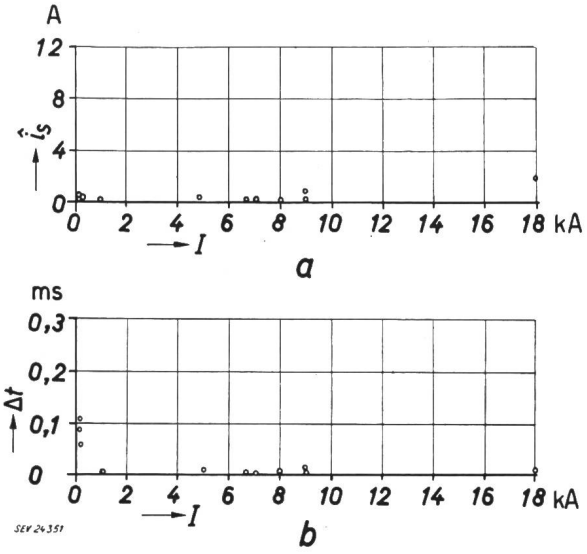


Fig. 9

Intensité instantanée maximum $\hat{i}_s$ (a) et durée Δt (b) du courant post-arc en fonction du courant coupé *I*, dans un disjoncteur pneumatique pour 10 kV et 200 MVA

Le courant coupé a pris diverses valeurs comprises entre 100 A et 18 kA

augmente tellement rapidement que la presque totalité du courant soit absorbée pour charger la capacité se trouvant en parallèle avec le disjoncteur. Le courant passant dans le disjoncteur tombe alors à une valeur très faible et l'arc s'éteint tandis que la tension entre les contacts continue à

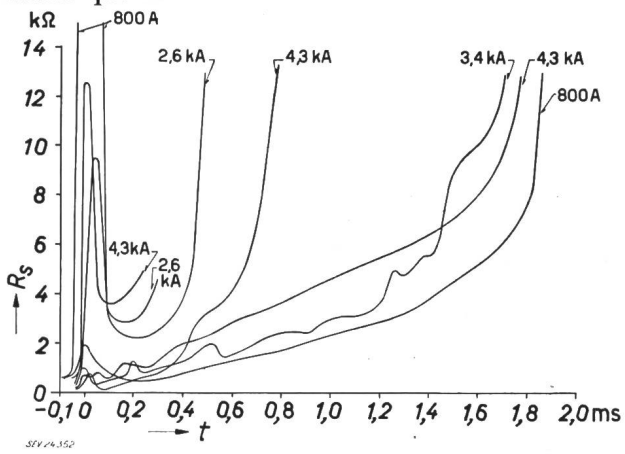


Fig. 10

Courbes en fonction du temps de la résistance R_S de l'espace entre les contacts d'un disjoncteur dans l'huile pour 10 kV et 80 MVA après coupure de courants d'intensités efficaces comprises entre 0,8 et 4,3 kA

L'origine des temps coïncide avec le passage du courant par zéro, à l'extinction de l'arc

croître en raison de l'énergie électromagnétique présente dans le circuit et ne s'annule qu'après un certain temps pour reprendre, après inversion de la polarité et quelques oscillations, la valeur de la tension étoilée. Dans ces circonstances, le courant peut devenir très faible «longtemps» avant que la tension ne passe par zéro. Ce phénomène peut se produire dans les trois types de disjoncteurs éprouvés, pour des intensités du courant coupé allant jusqu'à plusieurs milliers d'ampères. C'est ainsi, par exemple, que l'oscillogramme de la figure 5D relatif

à la coupure par un disjoncteur à faible volume d'huile d'un courant d'une valeur efficace de 10 kA sous 5,7 kV, permet de constater qu'au moment *a*,

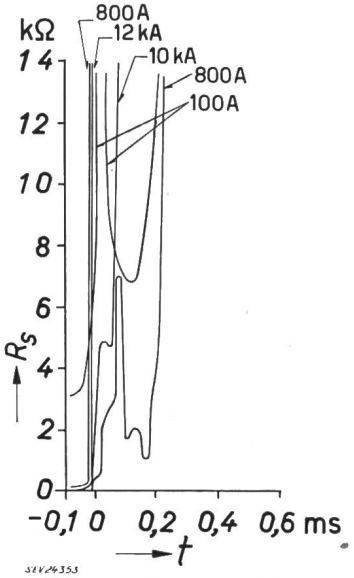


Fig. 11
Courbes en fonction du temps de la résistance R_S de l'espace entre les contacts d'un disjoncteur à faible volume d'huile pour 10 kV et 250 MVA après coupure de courants d'intensités efficaces comprises entre 0,1 et 12 kA
L'origine des temps coïncide avec le passage du courant par zéro, à l'extinction de l'arc

le courant s'est annulé, soit 50 µs avant le passage de la tension par zéro en *c*. Dans cet intervalle de temps, la tension a passé par un maximum bien marqué correspondant à environ 500 V, à l'instant *b*.

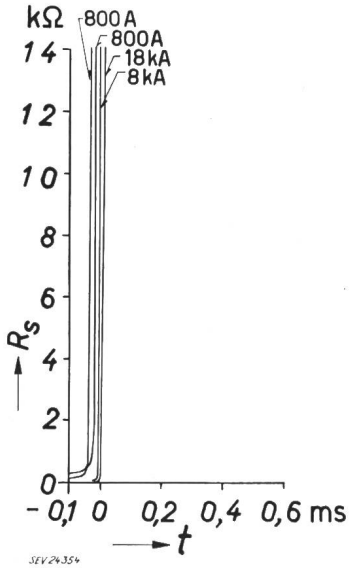


Fig. 12
Courbes en fonction du temps de la résistance R_S de l'espace entre les contacts d'un disjoncteur pneumatique pour 10 kV et 200 MVA après coupure de courants d'intensités efficaces comprises entre 0,8 et 18 kA
L'origine des temps coïncide avec le passage du courant par zéro, à l'extinction de l'arc

Examinons d'un peu plus près ce qui se passe lors de la coupure de faibles courants inductifs d'intensité efficace voisine de 100 A. Nous ne nous arrêterons pas ici aux oscillations très compliquées qui précèdent l'extinction de l'arc (voir à ce sujet la publication [12][1]), mais voulons discuter, sur la base de l'oscillogramme de la figure 4A, le comportement du courant au voisinage de son passage par zéro. A l'instant *a*, le courant s'annule prématurément et la tension entre contacts commence à croître selon une sinusoïdale. Cependant, le courant ne s'annule pas complètement mais prend une valeur instantanée d'environ 200 mA. A partir de cet instant, le courant a le caractère d'un courant post-arc c'est-à-dire qu'il croît avec la tension, mais sans qu'il se produise de réamorçage. A l'instant *b*, son intensité passe par zéro, en même temps que la tension, puis on est en présence d'un vrai courant post-arc qui atteint son maximum (350 mA) à peu près en même temps que la tension de rétablisse-

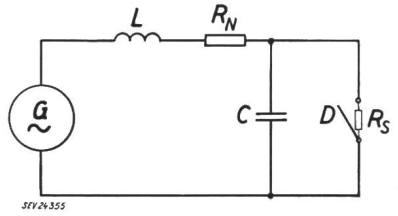


Fig. 13
Schéma équivalent du circuit parcouru par le courant lors des essais
G génératrice; *L* inductance limitant le courant; *C* capacité équivalente du circuit représentant le réseau d'alimentation; R_N résistance équivalente du circuit, le disjoncteur étant fermé; *D* disjoncteur; R_S résistance de l'espace entre contacts (valeur réciproque de la conductibilité)

ment. L'apparition d'un courant post-arc avant le passage normal de l'intensité par zéro est assez fréquente lors de coupures de faibles courants inductifs (voir p. ex. les oscillogrammes des fig. 5B et 6A). Mais dès que la valeur efficace du courant coupé atteint 800 A, le phénomène est beaucoup moins marqué.

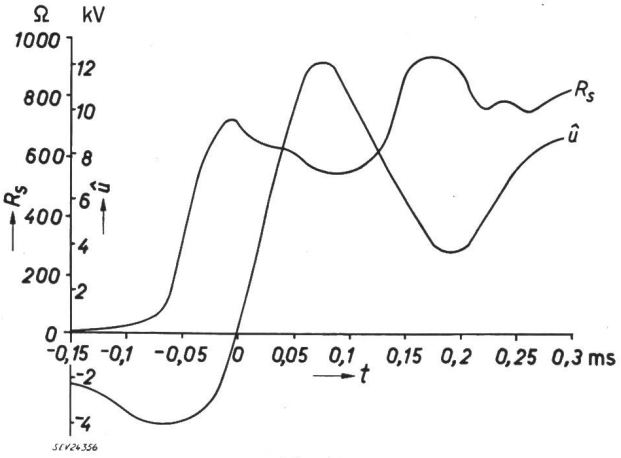


Fig. 14
Courbes, en fonction du temps *t*, de la tension de rétablissement $\hat{u}$ et de la résistance R_S de l'espace entre les contacts d'un disjoncteur à cuve d'huile pour 10 kV et 80 MVA après coupure d'un courant de 4,3 kA sous 5,7 kV
Ces courbes ont été établies sur la base des oscillogrammes de la figure 4 D

IV. Conclusions

a) Le courant et la conductibilité post-arc ne dépendent pas seulement des propriétés du disjoncteur et de l'intensité du courant coupé mais aussi de l'évolution de la tension de rétablissement et notamment de sa fréquence propre (ionisation d'origine thermique due à la tension de rétablissement). Suivant la valeur de la fréquence propre, le courant et la conductibilité post-arc peuvent prendre dans un disjoncteur déterminé des valeurs très différentes. Inversement, l'évolution de la tension de rétablissement peut être influencée par la conductibilité post-arc de l'espace entre les contacts; cette tension peut en effet être amortie lorsque la période de la fréquence propre est du même ordre de grandeur ou plus petite que la durée du courant post-arc.

On devrait considérer comme grandeur caractéristique des phénomènes qui se passent après le

[1]) voir la bibliographie à la fin de l'article.

passage du courant par zéro, la conductibilité post-arc propre au disjoncteur, c'est-à-dire la conductibilité qui ne dépend que des caractéristiques du disjoncteur et du courant coupé. Cette conductibilité pourrait être déterminée par exemple après l'interruption du courant en maintenant la tension transitoire de rétablissement suffisamment basse et en appliquant entre les contacts une tension à haute fréquence mais de faible amplitude fournie par une source séparée [2].

β) Les limites entre lesquelles sont comprises les diverses valeurs mesurées de l'intensité et de la durée du courant post-arc sont beaucoup plus larges pour le disjoncteur à cuve d'huile que pour le disjoncteur à faible volume d'huile et surtout pour le disjoncteur pneumatique. Les valeurs relativement faibles du courant post-arc mesurées dans le disjoncteur à cuve d'huile après des déclenchements difficiles permettent de conclure que lorsque la fréquence propre est inférieure à 5000 Hz, on ne peut déceler de manière sûre, même pour ce type de disjoncteur, une influence importante de la conductibilité post-arc tendant à amortir la tension de rétablissement.

γ) Les valeurs très faibles de l'intensité et de la durée du courant post-arc mesurées avec le disjoncteur pneumatique confirment ce que l'on sait déjà de ce type de disjoncteur, à savoir que la régénération de l'espace entre les contacts est très rapide ce qui permet un déclenchement net, même dans les cas les plus extrêmes, accompagnés de fortes sollicitations de tension.

δ) Les interdépendances complexes qui existent entre le courant formant l'arc, la tension d'arc, le courant post-arc, la tension de rétablissement, l'ionisation d'origine thermique, etc., sont telles qu'il faut faire preuve d'une extrême prudence dans l'interprétation des résultats d'essais indirects pour lesquels, par exemple, les épreuves se font avec des circuits de tension et de courant séparés. Il est nécessaire en effet pour qu'on puisse tirer des conclusions valables d'un essai indirect, que la variation du courant dans le temps aussi bien que celle de la tension de rétablissement, avant et pendant le passage du courant par zéro, correspondent exactement, tant en ce qui concerne les amplitudes que l'allure des courbes, aux conditions que l'on a en réalité avec la pleine puissance.

ε) Les essais, dits par éléments séparés, des disjoncteurs comprenant plusieurs points de coupure consistent à faire subir à un des points de coupure une épreuve sous la pleine puissance qui lui correspond et à en déduire le pouvoir de coupure de l'appareil complet en tenant compte de la répartition de la tension sur les divers points de coupure. Cette méthode ne donne cependant des résultats acceptables que si cette répartition, lors de l'accroissement de la tension de rétablissement, est nettement définie et connue. Dans les disjoncteurs pneumatiques, elle n'est pratiquement pas influencée par la conductibilité post-arc en raison de la rapidité de la déionisation. Il n'en est pas de même pour les disjoncteurs dans lesquels la valeur et la durée de la conductibilité post-arc sont assez grandes; cette conductibilité et son évolution peuvent alors différer sensiblement d'un point de coupure à un autre et il peut en résulter une répartition de tension tout à fait irrégulière, de sorte que la méthode d'essais par éléments séparés ne peut pas toujours être appliquée à de tels disjoncteurs.

Bibliographie

[1] *Cassie, M. A.:* Théorie nouvelle des arcs de rupture et de la rigidité des circuits. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1939, t. 1, rapp. 102, 16 p.

[2] *Cassie, A. M., F. O. Mason* et *L. H. Orton:* Measurement of Rapidly Varying Resistance in an Arc Gap near Current Zero. Electrician t. 122(1939), n° 3168, p. 206.

[3] *Mayr, O.:* Über die Theorie des Lichtbogens und seiner Löschung. ETZ t. 64(1943), n° 49/50, p. 645...652.

[4] *Boehne, E. W.:* The Geometry of Arc Interruption II. Current-Zero Phenomena. Trans. AIEE t. 63(1944), juin, p. 375...386, 447...450.

[5] *Hammarlund, P.:* Transient Recovery Voltage. Handl. Proc. t. -(1946), n° 189, p. 182 et suivantes.

[6] *Lewis, L. J.:* Circuit-Breaker Current Measurements During Reignitions and Recovery. Trans. AIEE t. 66(1947), p. 1253...1257.

[7] *Browne, T. E.:* A Study of A.C. Arc Behaviour near Current Zero by Means of Mathematical Models. Trans. AIEE t. 67(1948), Part. 1, p. 141...153.

[8] *Teszner, S., A. Guillaume, P. Fourmarier, J. Blase* et *P. Walch:* Contribution à l'étude des courants post-arc dans les interrupteurs à haute tension. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1952, t. 2, rapp. 130, 21 p.

[9] *Hochrainer, A.:* Der Nachstrom in Leistungsschaltern. ETZ t. 73(1952), n° 19, p. 627...629.

[10] *Mason, F. O.:* Gas Blast Circuit Breakers. Recording of Current in A. C. Power Arcs near Current Zero. Engr. Lond. t. 193(1952), 23 mai, p. 686...689.

[11] *Teszner, S.* et *J. Blase:* Nouvelle Contribution à l'étude des courants post-arc dans les interrupteurs à haute tension. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1954, t. 2, rapp. 145, 29 p.

[12] *Baltensperger, P.* et *P. Schmid:* Lichtbogenstrom und Überspannungen beim Abschalten kleiner induktiver Ströme in Hochspannungsnetzen. Bull. ASE t. 46(1955), n° 1, p. 1...13.

Adresses des auteurs:

P. Baltensperger, Dr ès sc. math., Hönggerstrasse 22, Unterengstringen (ZH); *P. Schmid*, physicien diplômé, Gottesgraben 3, Wettingen (AG).

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Nachträgliches aus den Mustermesse-Ständen

Hasler A.-G., Bern und Zürich

(Halle 3, Stand 706; Halle 11, Stand 4139.) Die Firma zeigt an der diesjährigen Mustermesse eine Vielzahl von Apparaturen aus dem Gebiet der *Fernmeldetechnik* nebst einer sorgfältigen Auslese interessanter mechanischer Erzeugnisse aus dem Bereich der *Präzisionsmechanik*.

Die moderne Übertragungstechnik hat einen gewaltigen Aufschwung zu immer neuen Anwendungen genommen. So wurde der drahtlose Telexverkehr mit Übersee erst möglich durch die *TOR-Apparaturen zur automatischen Fehlerkorrektur*, wovon 1 Schrank ausgestellt ist. — Zur Verbesserung des Empfanges der Rundspruch-Programme der Landessender wird gegenwärtig in der Schweiz ein UKW-Netz aufgebaut. Daran ist die Firma massgeblich beteiligt durch die Lieferung einer Serie von *FM-UKW-Sendern*, von denen einer ausgestellt ist (Fig. 1). Unter C-Trägersystemen sind den Fachleuten die neuentwickelten *trägerfrequenten Telephonsysteme zu 5 + 5 Kanäle* bekannt, die besonders für kleine Distanzen entwickelt worden sind. Zwei Buchten, die in Betrieb gezeigt werden, enthalten die nötigen Trägerfrequenz- und Linienausrüstungen (Fig. 2). Weiter entwickelt mit neuer Phasen-Modulation wurden die *drahtlosen Telephonanschlüsse*. Dadurch besitzen Klubhütten, Berggasthöfe usw. trotz allfälliger Lawinen und Steinschläge stets eine sichere Verbindung mit dem öffentlichen Telephonnetz. Bei dem von der Firma entwickelten *Autoruf* ist der Aufbau eines Empfängers mit Gehäuse aus transparentem Material sichtbar gemacht.

Direktionstelephone (welche die Auszeichnung «Die gute Form 1955» tragen) und der einplätzige *Hotel-Vermittler* fal-