

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 23 (1932)
Heft: 17

Artikel: De la protection des installations à basse tension contre les surintensités
Autor: Müller, P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057461>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.01.2025

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION :
Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens
et de l'Union de Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

EDITEUR ET ADMINISTRATION :
Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A., Zurich 4
Stauffacherquai 36/38

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXIII^e Année

N^o 17

Vendredi, 19 Août 1932

De la protection des installations à basse tension contre les surintensités.

Par la Station d'Essai des Matériaux de l'ASE (P. Müller, ingénieur).

621.316.92

Pour éclaircir certaines questions relatives à la protection contre les surintensités dans les réseaux à basse tension, la Station d'Essai des Matériaux de l'ASE a exécuté une série d'essais de déclenchement et de courts-circuits, au laboratoire et dans des installations, ainsi que des essais d'échauffement assez étendus portant sur différents types de conducteurs et modes de pose courants. Les résultats de ces essais sont résumés dans l'article ci-dessous, et les dispositifs usuels pour protéger les lignes contre les surintensités (coupe-circuit et interrupteurs automatiques) soumis à des considérations critiques.

Zur Abklärung einzelner Fragen des Ueberstromschutzes von Niederspannungsnetzen führte die Materialprüfanstalt des SEV eine Reihe von Abschalt- und Kurzschlussversuchen laboratoriumsmässig und in Anlagen, sowie ziemlich ausgedehnte Erwärmungsversuche an verschiedenen Leitertypen in gebräuchlichen Verlegungsarten durch. Die Ergebnisse dieser Versuche sind im nachstehenden Aufsätze zusammengestellt und die verschiedenen als Ueberstromschutz von Leitungen gebräuchlichen Mittel (Sicherungen und Selbstschalter) kritisch betrachtet.

La mise au point de Normes relatives aux coupe-circuit et les travaux préliminaires en vue de l'établissement de Normes concernant les petits interrupteurs automatiques pour installations intérieures ont permis à la Station d'Essai des Matériaux de l'Association Suisse des Electriciens d'entreprendre toute une série d'essais, dont les résultats font l'objet de la présente étude.

Si l'on compare les nombreux efforts tentés depuis plusieurs années dans le domaine de la protection des lignes à haute tension, avec les travaux correspondants effectués pour les réseaux à basse tension, on s'aperçoit aisément que, jusqu'à ces derniers temps, la différence est notable. Ceci ne tient certainement pas seulement à l'importance sensiblement plus grande des installations à haute tension, ni à la complication que présentent les problèmes y relatifs, en comparaison avec ceux des réseaux à basse tension. Nous croyons que cela est dû principalement à un certain manque d'initiative des services électriques, qui auraient dû pousser l'industrie à étudier de nouvelles possibilités. Les résultats obtenus au cours de ces dernières années sont d'autant plus réjouissants, puisque le domaine de la protection des installations à basse tension a été l'objet de nouvelles constructions et d'améliorations intéressantes.

Le problème de la protection des lignes à basse tension est, pour ainsi dire, uniquement une question de surintensités, de sorte qu'une étude approfondie de cette question mérite une attention toute spéciale.

1^o Ordre de grandeur des surintensités intervenant dans les réseaux à basse tension.

Le dimensionnement et la construction des organes de protection sont grandement influencés par la valeur des surintensités maxima (puissance de

court-circuit) surgissant dans les diverses parties des installations. La détermination précise des courants de court-circuit dans les réseaux à basse tension est encore plus difficile que dans le cas des installations à haute tension, car il se présente toujours un certain nombre de facteurs impossibles à déterminer par des chiffres (résistances de passage, etc.). Les courants de court-circuit réels se trouvent ainsi d'une quantité indéterminée au-dessous des valeurs trouvées par le calcul.

Un certain nombre d'essais sur les installations à basse tension ont été publiés dans les rapports de la Commission Internationale pour les questions relatives aux installations (JFK). La Station d'Essai des Matériaux a également effectué, dans ce domaine, des mesures de grande envergure. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau I.

Dans des conditions particulièrement défavorables, les intensités ont atteint 45 000 A_{eff}, lors de court-circuits sur des barres omnibus 400 V. Des essais de ce genre ont été publiés dans *Elektrizitätswirtschaft*¹⁾. Au cours d'essais sur un réseau de câbles dans une ville des Pays-Bas, on a constaté des intensités de quelques milliers d'ampères. Ces essais montrent tous clairement que les exigences posées à un système de protection ne peuvent pas être formulées d'une façon générale, mais qu'elles sont intimement liées à la constellation du réseau à protéger.

¹⁾ Heinz Freiburger: Auto-protection de réseaux bouclés à basse tension, sous câbles, par brûlage des parties avariées. *Elektrizitätswirtschaft* 1930, page 282.

Heinz Freiburger: Coupe-circuit pour réseaux bouclés. *Elektrizitätswirtschaft* 1931, page 651.

Voir également: Bulletin ASE 1932, No. 10, Communications de nature technique, page 232.

Mesures effectuées par la Station d'Essai des Matériaux
(courts-circuits monophasés sous 50 pér./s).

Tableau I.

	Impédance (calculée) du circuit de court-circuit (Impédance entre les bornes secondaires du transformateur d'alimentation) Ω	Courant de court-circuit mesuré à l'oscillographe A_{eff}	Valeur calculée du courant permanent de court-circuit, en tenant compte de la chute de tension dans le transformateur d'alimentation $A_{eff}^*)$	Rapport entre la valeur mesurée et la valeur calculée du courant de court-circuit
Poste de transformateur, transformateur 40 kVA, triphasé, 50 pér./s., 6000/540 V	0,17	745	1040	0,72
	0,27	644	915	0,70
Court-circuit entre deux phases				
Sous-station, transformateur pour services auxiliaires, 280 kVA, triphasé, 50 pér./s., 8800/555 V	0,015	4500	4920	0,91
Court-circuit entre deux phases				
Installation intérieure, habitation urbaine, alimentation par transformateur standard, 230 kVA, triphasé, 50 pér./s., 6000/380/220 V	0,6	265	375	0,71
Court-circuit entre une phase et le neutre				
Installation intérieure, habitation de banlieue, alimentation par transformateur standard 100 kVA, triphasé, 50 pér./s., 6000/380/220 V	2,1	88	104	0,84
Court-circuit entre une phase et le neutre				
Installation intérieure avec propre transformateur 100 kVA, triphasé, 50 pér./s., 3800/380/220 V	(résistance mesurée) 0,6	376	390	0,96
Court-circuit entre une phase et le neutre				
Poste urbain de transformation, installation d'essais 200 kVA, transformateur monophasé 6000/440 V	variable	jusqu'à 6000	—	—
Court-circuit entre deux phases				

Les impédances des circuits de court-circuit étaient pratiquement constituées par des résistances purement ohmiques, sauf dans le cas des deux installations 100 kVA, 6000/380/220 V, et 100 kVA, 3800/380/220 V. Exemple de calcul pour 40 kVA, 6000/540 V

Couplage du transformateur: γ / γ

Tension de court-circuit: 3,2 %

Impédance de court-circuit par phase, rapportée au côté 540 V : 0,232 Ω

Résistance de court-circuit par phase 0,163 Ω

Résistance extérieure par phase 0,085 Ω

Impédance totale par phase

$$\sqrt{0,232^2 - 0,163^2 + (0,163 + 0,085)^2} = 2,298 \Omega$$

$$\text{Intensité de court-circuit} = \frac{540}{\frac{\sqrt{3}}{2,298}} = 1040 \text{ A}$$

*) L'intensité de court-circuit a été déterminée en partant de la tension de court-circuit du transformateur d'alimentation, en admettant que, lors du court-circuit, le côté primaire de ce transformateur ne présente pas de chute de tension.

Dans la plupart des cas, le danger provoqué par les surintensités semble être de nature thermique. Les effets d'ordre dynamique se font à peine sentir pour les intensités inférieures à 5000 jusqu'à 10 000 A, c'est-à-dire donc seulement dans les cas encore relativement rares de réseaux à basse tension fortement bouclés.

Dès que les effets de nature thermique des surintensités sont prédominants, il n'y a pas lieu d'attacher d'importance à la composante continue asymptotique se présentant pour chaque processus de couplage dans les circuits inductifs, car l'amortissement a lieu au bout de quelques périodes déjà.

Les différences de principe entre les installations à courants de court-circuit relativement faibles et celles à courants importants, de l'ordre de quelques 10 000 A, obligent à scinder en deux parties l'étude de la question. Dans ce qui suit, nous traiterons principalement des conditions dans les installations présentant des puissances de court-circuit relativement faibles (installations intérieures).

2° Caractéristique d'échauffement des conducteurs.

Les charges admissibles en permanence pour les conducteurs isolés ont été établies, en 1907, par Teichmüller et Humann²⁾, à la suite d'essais. Les charges sont basées sur un échauffement de 20° C pour les conducteurs isolés au caoutchouc, et sur un échauffement de 25° C pour les câbles sous plomb, isolés au papier. La Station d'Essai des Matériaux a entrepris des essais sur l'allure de l'échauffement des conducteurs au cours de surcharges de brève durée (environ 30 minutes), ceci en vue de l'établissement de Prescriptions relatives aux coupe-circuit à fonctionnement retardé et aux petits interrupteurs automatiques. Si les diagrammes ainsi obtenus doivent fournir des indications sur la charge-limite des conducteurs, il est nécessaire de fixer les températures que peut supporter le matériel isolant considéré, en régime momentané et en régime permanent. Les importants essais effectués en 1927³⁾ par Apt ont montré que, dans le cas d'un bon isolement au caoutchouc, une température de 70° C peut être supportée sans danger pour l'isolement pendant une courte durée, et, en régime permanent, une température de 60° C. L'essai de vieillissement des conducteurs isolés au caoutchouc, selon les normes de l'ASE, prévoit d'ailleurs un essai d'échauffement sous 70° C pendant 8 x 24 heures, durant lequel il ne doit pas se produire de dépréciation sensible de la qualité⁴⁾. L'adoption d'une température de 60° C conduirait à des échauffements respectifs de 25 et 20° C, en admettant les températures de référence de 35° C (VDE) et de 40° C (CEI). Des températures ambiantes de 35 et 40° C étant certainement une ex-

²⁾ Dr. R. Apt: Conducteurs isolés et câbles. Commentaires aux Prescriptions et Normes allemandes (VDE) pour les conducteurs isolés et les câbles.

³⁾ Dr. R. Apt: La charge des conducteurs isolés. ETZ 1927, page 65.

⁴⁾ Recueil des prescriptions de l'ASE.

ception dans notre contrée, il semble admissible de fixer l'échauffement permanent à 30° C (température de référence 30° C). Dans le cas des câbles sous plomb isolés au papier, pour basses tensions, on devrait même pouvoir admettre des températures plus élevées encore; toutefois, dans l'intérêt de l'unification et par suite du manque de données absolument sûres, l'établissement des diagrammes «Intensité-Temps», fig 1 à 7 (diagrammes qui indiquent l'intensité et la durée de charge nécessaires pour atteindre un échauffement de 30° C) ont tous été établis pour un échauffement de 30° C. Ces faibles surélévations de température excluent tout danger d'incendie.

Les fig. 1 à 7 représentent graphiquement les résultats obtenus lors d'essais effectués sur des conducteurs à gaine de caoutchouc (GS), des câbles sous plomb isolés au papier (PK), des cordons ronds (RS) et des cordons renforcés pour appareils mobiles (VAS avec isolement SGS). (En ce qui concerne la construction des divers genres de conducteurs, voir les Normes de l'ASE, deuxième édition, 1928.) Dans le cas de charges de faible durée (quelques secondes), le montage noyé n'est pas

moins favorable que le montage apparent et, dans le cas de charges de longue durée, il n'est que légèrement moins favorable. Les RS et les VAS (fig. 6 et 7), dont deux cas extrêmes ont été étudiés,

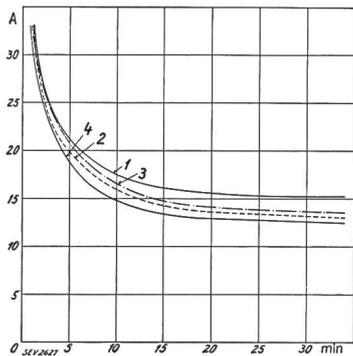


Fig. 1.
Diagrammes «Intensité-Temps» pour GS 1 mm².
Surélévation de température 30° C.
Tubes Bergmann, montage apparent:
1 2 fils dans 11 mm
2 3 fils dans 11 mm
Tubes Bergmann, montage noyé:
3 2 fils dans 11 mm
4 3 fils dans 11 mm

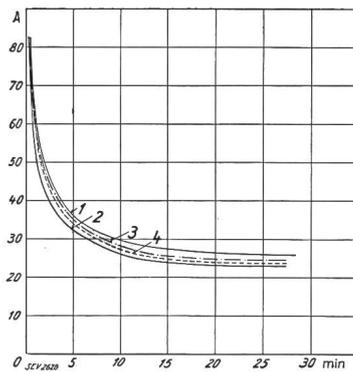


Fig. 2.
Diagrammes «Intensité-Temps» pour GS 2,5 mm².
Surélévation de température 30° C.
Tubes Bergmann, montage apparent:
1 2 fils dans 13,5 mm
2 3 fils dans 13,5 mm
Tubes Bergmann, montage noyé:
3 2 fils dans 13,5 mm
4 3 fils dans 13,5 mm

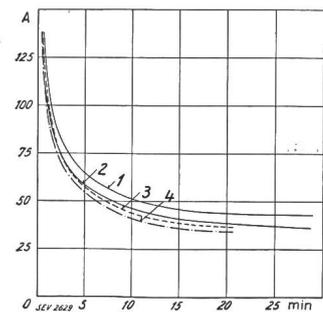


Fig. 3.
Diagrammes «Intensité-Temps» pour GS 6 mm².
Surélévation de température 30° C.
Tubes Bergmann, montage apparent:
1 2 fils dans 16 mm
2 3 fils dans 23 mm
Tubes Bergmann, montage noyé:
3 2 fils dans 16 mm
4 3 fils dans 23 mm

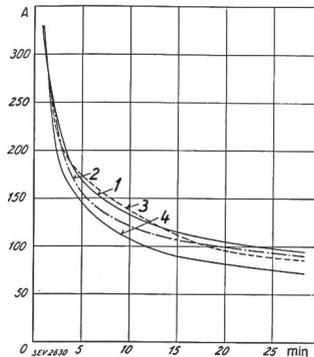


Fig. 4.
Diagrammes «Intensité-Temps» pour GS 20 mm².
Surélévation de température 30° C.
Tubes Bergmann, montage apparent:
1 2 fils dans 23 mm
2 3 fils dans 29 mm
Tubes Bergmann, montage noyé:
3 2 fils dans 23 mm
4 3 fils dans 29 mm

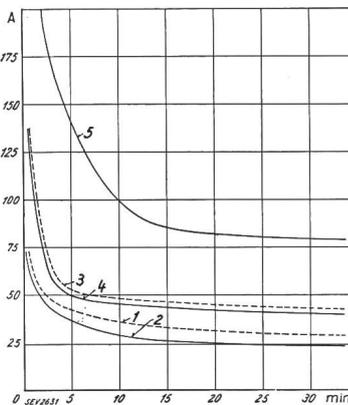


Fig. 5.
Diagrammes «Intensité-Temps» pour PK, montage noyé.
Surélévation de température 30° C.
1 2,5 mm², 2 conduct.
2 2,5 mm², 3 »
3 6 mm², 2 »
4 6 mm², 3 »
5 20 mm², 3 »

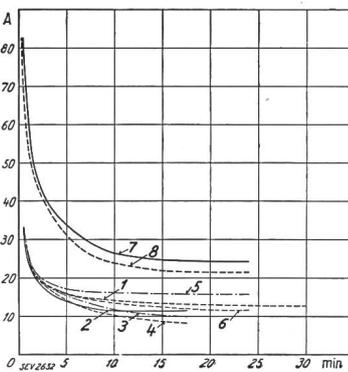


Fig. 6.
Diagrammes «Intensité-Temps» pour RS.
Surélévation de température 30° C.
1 0,75 mm², 2 conduct., tendus sur plancher
2 0,75 mm², 3 conduct., tendus sur plancher
3 0,75 mm², 2 conduct., roulés sous tapis.
4 0,75 mm², 3 conduct., roulés sous tapis.
5 1 mm², 2 conducteurs, tendus librement sur plancher en bois
6 1 mm², 2 conducteurs, roulés sous tapis
7 2,5 mm², 2 conduct., tendus librement sur plancher en bois
8 2,5 mm², 2 conduct., roulés sous tapis.

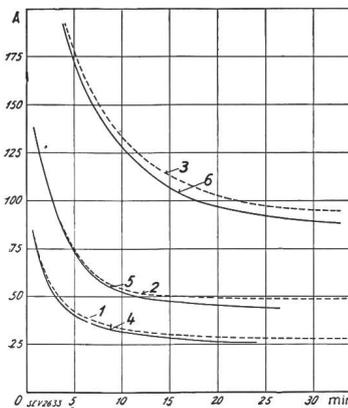


Fig. 7.
Diagrammes «Intensité-Temps» pour VAS.
Surélévation de température 30° C.
1 4 · 2,5 mm², 3 conduct. chargés, tendus sur plancher en bois
2 4 · 6 mm², 3 conduct. chargés, tendus sur plancher en bois
3 4 · 20 mm², 3 conduct. chargés, tendus sur plancher en bois
4 4 · 2,5 mm², 3 conduct. chargés, roulés sous tapis
5 4 · 6 mm², 3 conduct. chargés, roulés sous tapis
6 4 · 20 mm², 3 conduct. chargés, roulés sous tapis

présentent un intérêt tout particulier. La mesure des températures durant les essais a eu lieu par mesure de l'accroissement de la résistance des conducteurs. La charge par courant et la mesure de la résistance ont eu lieu sous courant continu; dans les cas où l'on a constaté des différences dans l'échauffement (section 20 mm²), les résultats de l'essai sous courant alternatif 50 pér./s ont été indiqués⁵⁾. Sous courant continu, la durée de charge était dans ce dernier cas de 10 à 15 % plus élevée.

Un système de protection basé sur le principe de l'échauffement est considéré comme idéal, lorsqu'il correspond d'une part à la caractéristique de la ligne à protéger et qu'il assure d'autre part le sectionnement correct du tronçon menacé.

3° Propriétés de déclenchement des appareils de protection pour puissances de court-circuit relativement faibles.

Les conditions qui régissent le déclenchement ont déjà été étudiées, en principe, au cours de nombreux essais effectués sur des disjoncteurs à haute

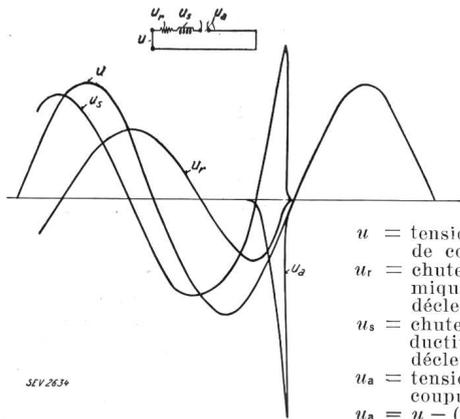


Fig. 8. Diagrammes de lignes du déclenchement d'un circuit inductif.

u = tension de la source de courant.
 u_r = chute de tension ohmique du circuit à déclencher.
 u_s = chute de tension inductive du circuit à déclencher.
 u_a = tension au point de coupure.
 $u_a = u - (u_r + u_s)$

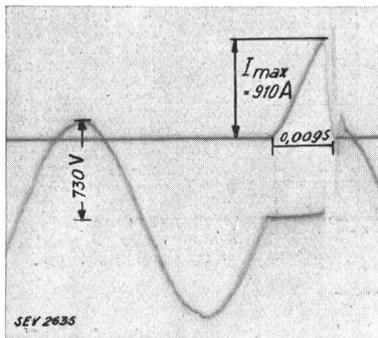


Fig. 9. Transformateur 6000/540 V, 40 kVA, 50 per./s. Déclenchement d'un court-circuit par coupe-circuit fusible 35 A.

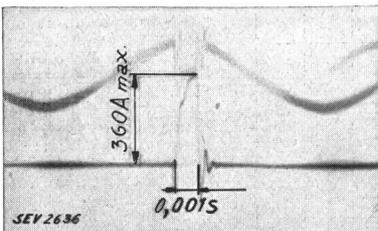


Fig. 10. Installation intérieure 220 V, 50 pér./s. Déclenchement d'un court-circuit par coupe-circuit fusible 6 A.

⁵⁾ H. Vollhardt: Détermination numérique du diagramme «Intensité-Temps» et de l'intensité-limite. ETZ 1931, page 37.

tension. Nous aimerions toutefois les résumer à nouveau.

On peut se représenter la suppression du courant dans une partie d'un réseau en admettant qu'à l'endroit de la coupure une résistance est insérée, qui tend vers une valeur infiniment grande. Le genre de modification de cette résistance diffère selon les appareils de protection; il est d'une grande importance pour le pouvoir de rupture. On peut représenter mathématiquement l'ensemble du

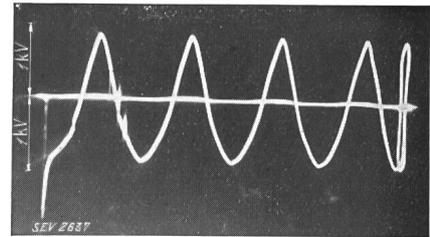


Fig. 11. Transformateur 280 kVA, 8800/555 V, 50 pér./s. Déclenchement d'un court-circuit par coupe-circuit fusible 20 A. Oscillogramme cathodique. Intensité de coupure env. 3000 A_{eff}. Tension de rétablissement 560 V.

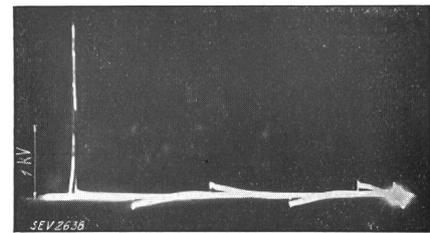


Fig. 12. Transformateur 280 kVA, 8800/550 V, 50 pér./s. Déclenchement d'un court-circuit par coupe-circuit fusible 60 A. Oscillogramme cathodique. Tension du réseau 560 V. Intensité de coupure 4500 A_{eff}. Le coupe-circuit ne déclenche pas (arc permanent).

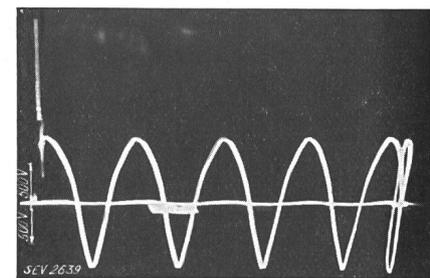


Fig. 13. Transformateur 280 kVA, 8800/555 V, 50 pér./s. Déclenchement par court-circuit d'un coupe-circuit fusible 35 A. Oscillogramme cathodique. Intensité de coupure env. 4000 A_{eff}.

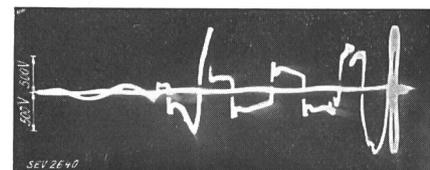


Fig. 14. Transformateur 280 kVA, 8800/555 V, 50 pér./s. Déclenchement par court-circuit sous 560 V_{eff} d'un coupe-circuit tubulaire. Oscillogramme cathodique. Intensité de coupure 4500 A_{eff}.

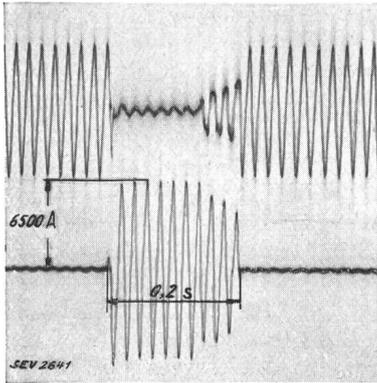


Fig. 15.
Transformateur
280 kVA, 8800/555 V,
50 pér./s.
Déclenchement par
court-circuit sous
560 V_{eff} d'un coupe-
circuit à poignée.

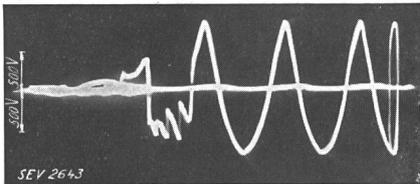


Fig. 16.
Transformateur 280 kVA, 8800/555 V, 50 pér./s.
Déclenchement par court-circuit sous 560 V_{eff} d'un coupe-
circuit tubulaire 125 A. Oscillogramme cathodique.
Intensité de coupure 4500 A_{eff}.

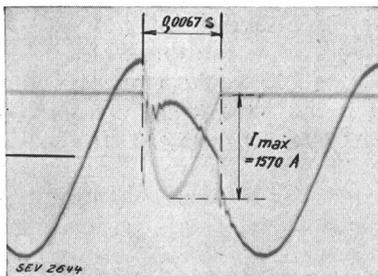


Fig. 17.
Alternateur triphasé
130 kVA, 390 V,
50 pér./s.
excité à 275 V, à vide.
Déclenchement par
court-circuit d'un
petit interrupteur
automatique 250 V,
6 A.

processus de couplage, lorsque la variation de la résistance du coupe-circuit ou de l'interrupteur durant ce déclenchement est connue. Dans le diagramme fig. 8, on a admis une certaine allure du courant (déterminé lors d'un relevé oscillographique sur un réseau) et l'on a déterminé ensuite graphiquement l'allure de la tension à l'endroit de la rupture. Le cas représenté est toutefois exceptionnel; en réalité, les surtensions sont presque toujours réduites par des charges en parallèle. Quelques oscillogrammes cathodiques relevés sur des coupe-circuit renseignent sur la valeur des surtensions surgissant dans chaque cas (fig. 9 à 17). Les oscillogrammes indiquent chaque fois la chute de tension dans les coupe-circuit durant le déclenchement. Au début du court-circuit, le relais basculant à action instantanée de l'oscillographe a fonctionné, de sorte que la partie gauche du processus d'extinction permet de déterminer le temps nécessaire à l'échauffement du coupe-circuit. Les deux trains d'ondes à 50 pér./s sont légèrement déformés par l'effet d'un champ de perturbation magnétique. Les intensités ont été relevées simultanément à l'aide de l'oscillographe Blondel. Ces surcharges peuvent devenir déterminantes pour la

manière dont se comportent les types de coupe-circuit. Les déclenchements relevés par oscillogrammes par la Station d'Essai des Matériaux dans des installations intérieures n'ont porté que sur des coupe-circuit ordinaires (à fonctionnement non retardé) avec fusible enfermé, sur des fusibles cuivres, ainsi que sur des petits interrupteurs automatiques. Par contre, il n'a pas encore été fait, pour l'instant, d'essais systématiques avec les coupe-circuit pour grandes puissances.

La discussion des divers coupe-circuit fusibles et des petits interrupteurs automatiques nous amène, en vertu des explications précédentes, à considérer les deux questions principales suivantes:

- 1° Quelles sont les puissances de coupure qui peuvent être supportées par ces appareils;
- 2° A quelles exigences satisfait leur caractéristique de coupure.

Pouvoir de coupure des appareils de protection.

Le fait qu'il est pratiquement difficile, à différentes stations d'essais, d'effectuer des essais sous courant alternatif dans des conditions identiques, a conduit à établir des normes relatives aux coupe-

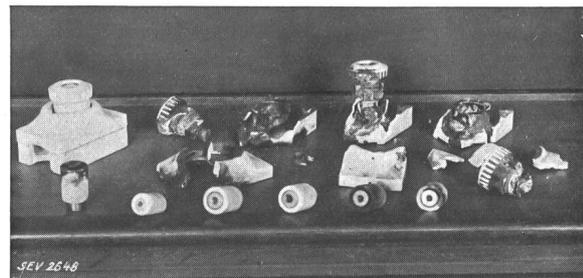


Fig. 18.
Coupe-circuit utilisé lors des essais selon fig. 11 à 13.

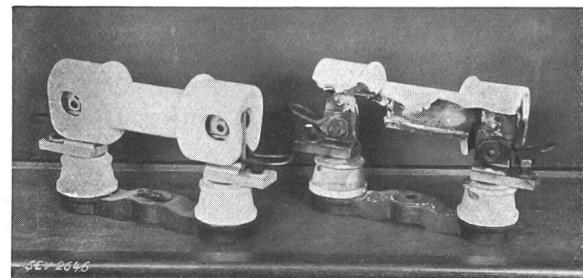


Fig. 19.
Coupe-circuit utilisé lors des essais selon fig. 14, 16 et 17.

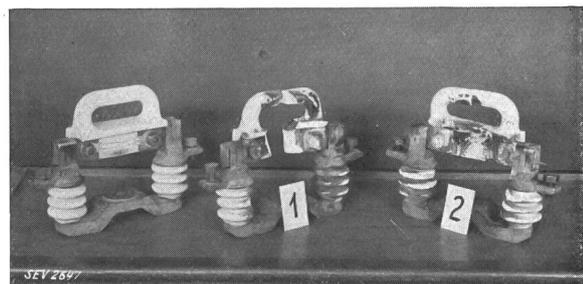


Fig. 20.
Coupe-circuit utilisé lors des essais selon fig. 15.

circuit comportant un essai sous courant continu, comme cela se fait non seulement en Suisse, mais également en Allemagne (VDE) et par la Commission Internationale pour les questions relatives aux installations (IFK).

On admet généralement que le déclenchement sous courant continu est beaucoup plus sévère que sous courant alternatif. Les recherches entreprises par la Station d'Essai des Matériaux nous ont toutefois amenés à modifier quelque peu cette opinion. On a constaté en effet que, dans le cas du courant alternatif et sous certaines conditions, la valeur du train d'ondes de la tension de rétablissement peut conduire à de nouveaux déclenchements, tandis que le même appareil déclenche sans difficulté des courants continus du même ordre de grandeur (fig. 12). D'autre part, les appareils à fusible massif, les coupe-circuit pour grandes puissances et les interrupteurs à déplacement de contact relativement lent, ne supportent souvent pas l'essai sous courant continu, mais peuvent être par contre utilisés sans désavantage dans les installations à courant alternatif. L'exigence posée à un même appareil de présenter un grand pouvoir de coupure aussi bien sous courant continu que sous courant alternatif conduit nécessairement à un compromis, ce qui se conçoit d'ailleurs aisément, si l'on considère la nature complètement différente des constructions des interrupteurs de grande puissance pour courant continu et pour courant alternatif. Les phénomènes qui se produisent à la puissance de déclenchement critique dans les interrupteurs à haute tension se rencontrent parfois également dans le cas des interrupteurs à basse tension et des coupe-circuit. Lorsqu'il s'agit de courants de coupure qui n'atteignent qu'un faible multiple (3 à 5 fois) de l'intensité nominale de l'appareil considéré, les coupe-circuit à fusibles et les petits interrupteurs automatiques ont parfois une tendance accentuée à la production d'un arc, tandis qu'aux intensités plus élevées la rupture du courant s'effectue correctement, sous l'effet du soufflage magnétique (pour les petits interrupteurs automatiques) ou sous l'effet des pressions régnant dans la chambre de fusion (pour les fusibles enfermés).

Coupe-circuit à fusible enfermé. Ces appareils sont généralement construits pour des intensités nominales jusqu'à 200 A et des tensions nominales jusqu'à 500 V. De plus petits modèles, pour tension de 250 V se trouvent également sur le marché.

Les recherches entreprises par la Station d'Essai des Matériaux ont été étendues à l'essai sous courant continu d'un grand nombre d'appareils de genres et de types différents, soumis à des intensités jusqu'à 6000 A et à des tensions de 550 V.

Les essais effectués dans des installations à 500 V, sous des intensités de coupure de quelques milliers d'ampères ont montré, sans rapport avec les intensités absolues, des surtensions de haute fréquence (fig. 12); ces surtensions peuvent conduire à de nouveaux déclenchements et à des arcs permanents, dans le cas d'éléments à 60 A, bien que ce même type d'éléments ait déclenché correctement

des courants continus de même intensité, voire même d'intensité sensiblement supérieure (fig. 18).

Coupe-circuit à poignée. Ces coupe-circuit, d'utilisation fréquente dans les postes de transformateurs et les installations de distribution, et dont divers modèles (écartement 11 et 15 cm) pour intensités nominales de 100 à 400 A ont été essayés, se comportent différemment. Tous les déclenchements sous courant alternatif ont conduit à des formations d'arc durant plusieurs demi-périodes; lors de déclenchements par court-circuit, 4000 A, 550 V, les parties en porcelaine des types semi-ouverts et fermés ont été régulièrement détériorées (fig. 19 et 20). Dans l'un des cas, où la poignée était constituée par un tube de bakélite renforcé, avec revêtement intérieur en amiante (écartement 150 mm), la coupure s'est effectuée normalement. A l'occasion d'essais dans un réseau de distribution urbain (Service Electrique de la Ville de Berne), on a examiné un modèle pour 400 A sous diverses tensions et intensités. Ce modèle est utilisé d'une façon courante comme coupe-circuit principal dans les postes de distribution de ce réseau. On a constaté qu'une durée de l'arc d'environ 15 périodes est encore admissible sous des intensités de 1500 à 2000 A. Par contre, lorsque l'arc durait plus longtemps, il pouvait arriver que celui-ci sautât sur les phases voisines ou à la terre. L'intensité-limite était de 1800 A, sous une tension de réseau de 380 V, et de 1300 A sous 500 V. Sous 250 V, on a pu procéder sans inconvénient à des coupures jusqu'à 5800 A_{eff}. Lors des déclenchements favorables, le fil fusible n'a fondu que sur une courte distance d'environ 1 à 2 cm. Dans aucun cas les déclenchements n'ont été le siège de surtensions, car ces coupe-circuit éteignaient l'arc à l'instant où le courant passait naturellement par la valeur zéro (fig. 15). En revanche, ces coupe-circuit n'ont jamais supporté les essais sous courant continu.

Petits interrupteurs automatiques. Ces appareils ne sont exécutés que depuis peu de temps d'une manière présentant toute sécurité de fonctionnement pour des intensités de coupure d'environ 1000 à 1500 A_{eff} et des tensions jusqu'à 380 V. Par des moyens d'ordre constructif, le processus de déclenchement peut, dans ce cas, être influencé si favorablement (soufflage magnétique de l'arc), que les puissances-limites mentionnées ci-dessus peuvent également être atteintes sous courant continu. Lorsqu'il s'agissait d'interrupteurs bien construits, on n'a pas constaté d'intensités critiques, c'est-à-dire de déclenchements défectueux sous faibles surintensités.

Coupe-circuit à fonctionnement retardé. Le fonctionnement de ces coupe-circuit, au point de vue de la sécurité contre les surintensités, est semblable à celui des fusibles enfermés normaux; la Station d'Essai des Matériaux n'a toutefois pas encore eu l'occasion de procéder avec ces appareils à des essais sur réseaux.

Coupe-circuit à grand pouvoir de rupture. Ces appareils, qui ont été construits récemment, sous forme de fusibles enfermés, pour intensités nomi-

nales de quelques centaines d'ampères, et qui ont été l'objet d'essais étendus, principalement par la «Bewag» (Berliner Elektrizitätswerke A.-G.) peuvent supporter des courants de court-circuit jusqu'à 40 000 A, sous 380 V. Pour autant que nous le savons, les réseaux suisses n'ont pas encore utilisé ces appareils de protection sur une grande échelle.

Caractéristique «Intensité-Temps» des divers appareils de protection.

Dans ce qui précède, nous avons examiné la limite de la puissance de coupure pour les divers moyens de protection. Nous allons maintenant traiter de leur caractéristique «Intensité-Temps», c'est-à-dire de leur durée de déclenchement en fonction de l'intensité. Au point de vue économique, la solution idéale est celle qui permet une utilisation maximum de la section de la ligne à protéger, sur toute l'étendue de la courbe de charge. Les fig. 21 à 23 montrent les caractéristiques de déclenchement (courbe «Intensité-Temps») de coupe-circuit à fusible enfermé, de coupe-circuit à fonctionnement retardé et de petits interrupteurs automatiques. Comme il est impossible, pour des raisons de fabrication, d'exécuter chaque appareil d'un même type d'une façon absolument identique, et que l'on doit ainsi compter avec une certaine dispersion, la caractéristique n'est vraiment déterminée que lorsque les bandes de dispersion sont indiquées. La dispersion elle-même ne doit pas dépasser une certaine valeur, car elle affaiblit la sélectivité de la protection de la ligne.

L'allure des courbes diffère sensiblement pour les divers moyens de protection.

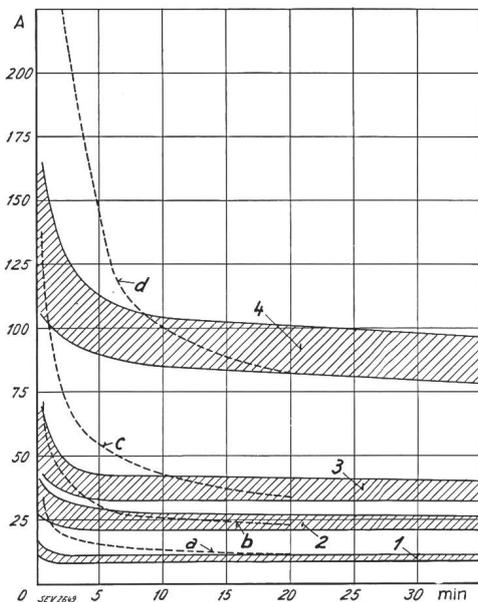


Fig. 21.

Bandes de dispersion de coupe-circuit à fusible enfermé et diagrammes «Intensité-Temps» de conducteurs d'intensité corresp.

- 1 Intensité nominale 6 A
- 2 Intensité nominale 15 A
- 3 Intensité nominale 25 A
- 4 Intensité nominale 60 A

- a) 2 · 1 mm² RS roulé sous tapis
 - b) 2 · 2,5 mm² RS roulé sous tapis
 - c) 3 · 6 mm² GS dans tube Bergmann 23 mm (montage noyé)
 - d) 3 · 20 mm² GS dans tube Bergmann 29 mm (montage noyé)
- Surélévation de température 30° C.

Les bandes de dispersion des coupe-circuit fusibles ordinaires sont déterminées par les intensités d'essais minima et maxima indiquées dans les pres-

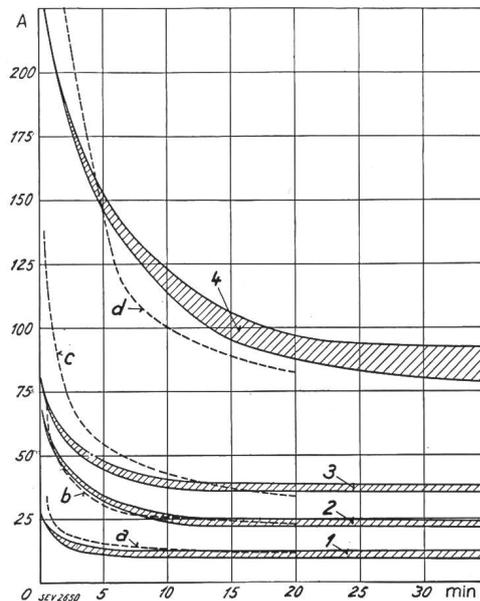


Fig. 22.

Bandes de dispersion de coupe-circuit à fonctionnement retardé (1 à 4) et diagrammes «Intensité-Temps» de conducteurs d'intensité correspondante (a—d).

- 1 Intensité nominale 6 A
- 2 Intensité nominale 15 A
- 3 Intensité nominale 25 A
- 4 Intensité nominale 60 A

- a) 2 · 1 mm² roulé sous tapis
 - b) 2 · 2,5 mm² RS roulé sous tapis
 - c) 3 · 6 mm² GS dans tube Bergmann 23 mm (montage noyé)
 - d) 3 · 20 mm² GS dans tube Bergmann 29 mm (montage noyé)
- Surélévation de température 30° C.

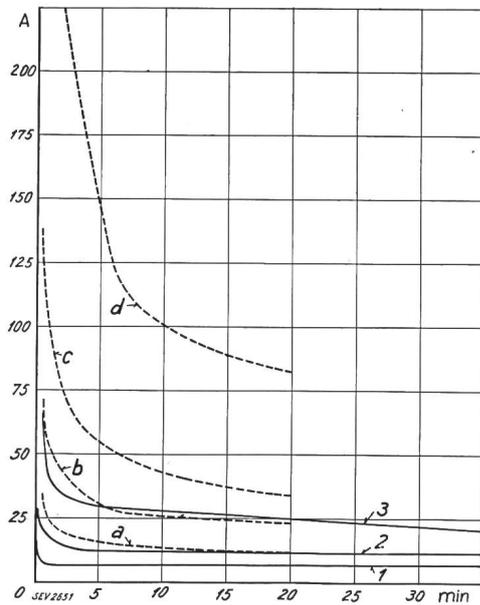


Fig. 23.

Diagrammes «Intensité-Temps» de petits interrupteurs automatiques (1 à 3) et diagrammes «Intensité-Temps» de conducteurs d'intensité correspondante (a—d).

- 1 IS 250 V, 5 A (limiteur d'intensité)
- 2 Interrupteur à bouchon fileté 250 V, 6 A
- 3 Interrupteur à bouchon fileté 250 V, 15 A

- a) 2 · 1 mm² RS roulé sous tapis
 - b) 2 · 2,5 mm² RS roulé sous tapis
 - c) 3 · 6 mm² GS dans tube Bergmann 23 mm (montage noyé)
 - d) 3 · 20 mm² GS dans tube Bergmann 29 mm (montage noyé)
- Surélévation de température 30° C.

criptions des divers pays. Par suite des températures de fusion élevées du fil d'argent (environ 800° C), la durée de déclenchement est indépendante des températures ambiantes; par contre, l'inertie est faible, car le développement de la chaleur dans le fusible de petites dimensions ne doit pas dépasser une certaine valeur, pour des raisons de sécurité. Il va de soi que la bande de dispersion n'est généralement pas complètement utilisée pour un appareil donné, mais les écarts des divers fusibles, entre eux, sont tout de même si considérables qu'on a dû renoncer à indiquer une caractéristique «Intensité-Temps» moyenne pour les domaines de surintensités faisant l'objet des essais.

La comparaison des bandes de dispersion avec les caractéristiques de lignes correspondantes, pour une disposition défavorable au point de vue thermique, conduit à un résultat intéressant. Ainsi, par exemple la section de 20 mm², qui doit être normalement assurée pour 60 A, subit un échauffement inadmissible sous les charges supérieures à 80 A; elle permet par contre une élévation multiple de l'intensité de fusion pour une utilisation thermique plus favorable, lorsque les contraintes durent moins de 5 minutes. Ce défaut est également inhérent aux coupe-circuit fusibles pour des intensités inférieures, ainsi que le montrent les bandes de dispersion 1 à 3, de la fig. 21.

Le fait que l'intensité d'essai minimum supportée pendant une heure par un type de coupe-circuit donné constitue, dans certains cas, une surcharge de la ligne, pourrait aisément faire croire que cette dernière n'est qu'imparfaitement protégée par les coupe-circuit. Or, il n'en est rien, car, par suite de l'oxydation graduelle du fil fusible soumis à une contrainte thermique élevée, la charge admissible en permanence pour les fusibles est ramenée à environ 1,1 à 1,15 fois l'intensité nominale, de telle sorte que la limite d'intensité n'est pas atteinte, si l'on ne veut pas avoir à subir une forte consommation de coupe-circuit, et que la ligne n'est donc presque jamais soumise à une contrainte thermique inadmissible.

En revanche, la divergence entre la caractéristique de la ligne et celle des coupe-circuit, dans le cas de surcharges de faible durée, est extrêmement défavorable. Les à-coups de courant à l'enclenchement, tels qu'ils se produisent pour presque tous les appareils consommateurs d'énergie électrique, mais plus particulièrement pour les moteurs, conduisent toujours à un dimensionnement très large des lignes, et, par suite, à un renchérissement notable des installations, uniquement dans le but d'éviter le fonctionnement des coupe-circuit lors d'à-coups de courant au démarrage ou lors de surcharges de courte durée. Les coupe-circuit à poignée, très répandus dans les installations pour intensités nominales de quelques centaines d'ampères, ne présentent ce désavantage que dans une plus faible mesure, car leur corps de fusion est sensiblement plus volumineux par rapport au fusible enfermé et les à-coups de courant momentanés

sont moins fréquents, puisqu'un grand nombre de consommateurs sont généralement branchés sur ces lignes à protéger et que les possibilités d'une simultanéité des à-coups de courant sont ainsi réduites. On devra toutefois tenir compte du fait que ces fusibles ouverts n'ont qu'un pouvoir de coupure limité.

Les coupe-circuit à fonctionnement retardé, dont l'organe de déclenchement a subi une modification de principe, satisfait à l'exigence bien naturelle d'une meilleure adaptation à la caractéristique de la ligne, lors de surcharges momentanées. Au lieu de faire passer tout le courant par des fils fusibles dimensionnés en conséquence, l'une des constructions prévoit un point de soudure, qui s'ouvre sous environ 80 à 120° C, ainsi que des fils fusibles faiblement dimensionnés, qui assurent la coupure proprement dite après l'ouverture du point de soudure. La constante de temps du point de soudure est choisie de telle sorte que l'adaptation à la caractéristique de la ligne en est améliorée. Dans d'autres constructions, les fils fusibles sont remplacés au centre par un point de soudure fondant à une température plus basse, tandis que les fils fusibles sont dimensionnés plus largement que les fils fusibles normaux. La température de fusion relativement faible du point de soudure permet une adaptation meilleure, sinon parfaite, à la température ambiante, et le faible échauffement sous le courant nominal permet de reporter la charge permanente plus près de l'intensité-limite, car ni le point de soudure, ni les fils fusibles ne subissent de modification.

Le degré d'inertie des diverses constructions n'est pas le même, aussi distingue-t-on des fusibles à faible inertie et des fusibles à grande inertie. Les courbes 1 à 4 de la fig. 22 semblent prouver que, dans certains cas, les coupe-circuit inertes aux surintensités ne permettent pas de protéger la section considérée contre un échauffement trop élevé (courbe 60 A pour une durée de charge supérieure à 5 min., courbe 15 A pour une durée de charge supérieure à 15 min.). En réalité, ce danger n'est pas grand, pour les deux raisons suivantes: D'une part, les caractéristiques de ligne *a* et *b* indiquées sont très défavorables au point de vue du refroidissement; d'autre part, la bande de dispersion du coupe-circuit à fonctionnement retardé est influencée par la température ambiante, à cause du faible point de fusion de la soudure, et elle sera sensiblement plus basse que dans la fig. 22, dans les cas où une destruction de l'isolement pourrait se produire, par suite de l'échauffement du conducteur aux températures ambiantes élevées.

Les petits interrupteurs automatiques, construits sous forme d'appareils à socle ou de bouchons à vis, sont, en principe, des disjoncteurs de petites dimensions. Le déclenchement peut être purement électromécanique ou purement thermique, ou encore une combinaison de ces deux effets. Il s'ensuit que la caractéristique de déclenchement varie selon les cas.

Les dimensions de ces interrupteurs limitent forcément la sécurité contre les courts-circuits et, par suite, leur domaine d'utilisation. Les interrupteurs

à déclenchement purement magnétique déclenchant instantanément à partir d'une certaine intensité critique, et étant par suite non-sélectifs, tandis que les interrupteurs à déclenchement purement thermique ne présentent qu'une sécurité insuffisante contre les courts-circuits, toutes les constructions les plus connues évitent le principe du déclenchement purement thermique ou purement magnétique. Comme nous l'avons déjà dit, le pouvoir de coupure de ces interrupteurs est de 1500 A sous 380 V. Les hésitations quant à leur emploi dans les installations intérieures normales pour intensités nominales jusqu'à 15 A sont donc sans fondement, puisque cette intensité de court-circuit n'est pratiquement jamais atteinte. La bande de dispersion de ces interrupteurs dépend dans une large mesure de la température ambiante, ainsi que de l'importance et de la durée de la charge de service qui précède. Comme nous ne disposons pas de données exactes à ce sujet, les courbes indiquées ne comportent que les valeurs mesurées à la température ambiante du laboratoire d'essais. Tous les appareils essayés comportaient un déclenchement magnétique et thermique. Jusqu'à une certaine valeur (environ 5 fois le courant nominal) le déclenchement de ces appareils est produit par un relais thermique (bandes bimétalliques), par contre, aux surintensités plus élevées, le déclenchement a lieu électromagnétiquement d'une façon instantanée.

Dans le domaine du déclenchement thermique, ces appareils réalisent l'adaptation à la caractéristique de la ligne.

Le fait (mentionné plus haut) que les coupe-circuit normaux à fusible enfermé ne peuvent pas être soumis en permanence à des charges sensiblement supérieures à l'intensité nominale, a provoqué certaines difficultés, dans le cas de sections de 1 et 1,5 mm², protégées par des coupe-circuit 6 A. L'usage de plus en plus répandu des appareils électriques domestiques exigeait des coupe-circuit permettant une utilisation «thermique» permanente totale de la section⁶⁾ ⁷⁾. Grâce à de nouvelles et remarquables constructions de petits interrupteurs automatiques, on a pu amener la limite de charge des conducteurs de 1 et 1,5 mm² à 10 A en permanence (fig. 23, courbe 2).

En France, la construction de ces petits interrupteurs était poursuivie dans un autre but. On les utilisait, pour des raisons de tarifs, comme limiteurs d'intensité. Dans ce cas, une surcharge de quelques secondes (lors d'enclenchement de moteurs ou de lampes) était admissible sans déclenchement. La caractéristique d'un tel appareil ressort de la courbe 1, de la fig. 23.

Par rapport aux coupe-circuit fusibles, ces interrupteurs automatiques présentent l'avantage d'être

⁶⁾ Dr. W. Zimmermann: Utilisation et protection des circuits de distribution du courant. ETZ 1931, page 1379.

⁷⁾ Dr. W. Zimmermann: Adaptation des organes de protection de lignes aux conditions de charge de service. ETZ 1932, pages 241 et 289.

⁸⁾ Voir la note 1.

immédiatement réutilisables après un déclenchement automatique.

4° Protection contre les surintensités pour grandes puissances de court-circuit.

Pour la protection contre les surintensités dans le cas de puissances de court-circuit importantes sur les réseaux bouclés, on a utilisé en principe les trois moyens suivants, que nous n'indiquerons que brièvement:

1° On a installé des coupe-circuit à poignée avec fusibles correspondants jusqu'à 600 A. Bien que le pouvoir de coupure de ces coupe-circuit soit très limité, les résultats obtenus n'ont pas été mauvais, car les contraintes sous forme de courts-circuits sont assez rares et les coupe-circuit n'étaient pas sensibles aux surcharges momentanées, à cause de leur inertie (fig. 24).

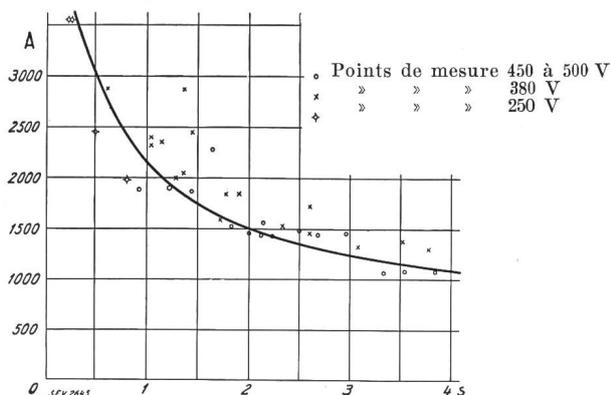


Fig. 24.
Caractéristique «Intensité-Temps» de coupe-circuit à poignée 400 A (modèle Service Electric, Berne).

2° On a renoncé à toute protection contre les surintensités. C'est la méthode américaine, qui n'est pas si inadmissible qu'on pourrait le croire, ainsi que l'ont prouvé les essais entrepris par la «Bewag»⁸⁾. En effet, si l'on considère que la majorité des perturbations surgissant dans de telles installations sont provoquées par des courts-circuits dans les câbles, qui grillent lorsque l'intensité de court-circuit est suffisamment élevée et agissent ainsi d'eux-mêmes comme protection, ce point de vue à sa raison d'être.

3° Enfin, on a proposé, comme troisième solution, l'emploi de coupe-circuit spéciaux avec fusible enfermé pour intensités et pouvoir de coupure élevés, tels qu'ils apparaissent comme valeurs-limites dans les installations à basse tension.

5° Conclusions.

L'efficacité des différents moyens considérés dépend beaucoup de la manière de les appliquer. Ainsi, il est faux et impossible de vouloir assurer la protection des lignes et des moteurs avec les mêmes appareils, bien qu'on essaie souvent de le faire. La caractéristique d'une ligne est toujours très différente de la caractéristique de charge d'un moteur.

Dans la plupart des cas il est dans la nature des choses de ne pas pouvoir observer strictement un système de protection de lignes; bien souvent on

utilise avantageusement des interrupteurs automatiques et des coupe-circuit à retardement en connexion avec des coupe-circuit normaux. C'est possible lorsqu'on a soin de choisir les coupe-circuit assurant le tronçon de ligne de plus forte section pour une intensité sensiblement supérieure; p. ex. s'il s'agit de remplacer un coupe-circuit ordinaire de 6 A dans une installation intérieure par un coupe-circuit à retardement ou par un interrupteur automatique, le coupe-circuit normal du raccordement devra posséder un fusible de 25 A. Mais il est nécessaire que le tronçon de ligne précédant soit prévu pour une intensité de 25 A.

Dans les réseaux où le point neutre mis à la terre est connecté à la carcasse de différents appareils, il

peut arriver que celle-ci prenne en cas de court-circuit une tension de contact dangereuse. C'est alors aux coupe-circuit à protéger contre les contacts fortuits. Pour juger de cet effet protecteur, il faut examiner plus attentivement, d'une part les prescriptions qui s'y rapportent, et d'autre part les caractéristiques «Intensité-Temps» des appareils protecteurs pendant les 10 premières secondes de leur fonctionnement. N'ayant pas exécuté nous-mêmes jusqu'ici assez d'essais sur cette partie de la caractéristique des interrupteurs automatiques et des coupe-circuit à retardement, nous reviendrons ultérieurement sur la question de la protection contre les contacts fortuits.

Fortschritte der Hochspannungstechnik in den letzten Jahren.

Von Prof. A. Imhof, Chefingenieur der Micafil A.-G., Zürich-Altstetten.

Anhand umfassend zitierter Literatur gibt der Autor einen Ueberblick über die neueste Entwicklung und die Tendenzen der Hochspannungstechnik. Zunächst wird über die Physik des Durchschlages und des Ueberschlages berichtet, dann über den Stand der organischen und anorganischen Isolierstoffe, speziell des Porzellans, der Kabeltechnik, der Durchführungen, der Kondensatoren und der Trockenhochspannungsapparate. Zum Schluss werden die Fortschritte in Laboratoriumseinrichtungen und Prüfmethode beschrieben, das «Barrierenprinzip» erörtert und die heute angewandten Methoden zur Erzeugung hoher Spannungen angedeutet.

537.5+621.3.048+621.315.2+621.315.6+621.316.313+621.319.4
Cet article, contenant de nombreuses indications de sources, donne un aperçu sur les récents progrès et les tendances de la technique des hautes tensions. L'auteur traite tout d'abord le côté physique du perçement et du contournement, puis les matières isolantes organiques et inorganiques, la technique des câbles, les traversées, les condensateurs et les appareils à haute tension sans isolant liquide. Pour terminer, l'auteur décrit les progrès réalisés dans les installations de laboratoires et dans les méthodes d'essai, explique le principe des «barrières» et esquisse les méthodes appliquées aujourd'hui pour produire de très hautes tensions.

I. Wissenschaftliche Arbeiten.

Das Gebiet der Dielektrika ist in den letzten Jahren mit Bienenfleiss wissenschaftlich bearbeitet worden und hat viele auch für die technische Praxis wertvolle Ergebnisse gebracht.

Die bekannten Theorien über den elektrischen Durchschlag haben einen weiteren Ausbau erfahren. Für diejenigen Leser, welche den Publikationen auf diesem Gebiet nicht genügend folgen können, um sich den Ueberblick über die Entwicklung der Durchschlagstheorien selbst zu bilden, sei zunächst auf eine zusammenfassende Arbeit von J. K. Gillett¹⁾ hingewiesen durch Wiedergabe einer kurzen, in der ETZ²⁾ erschienenen Zusammenfassung. Ausgehend von Wagnerschen «Wärmedurchschlag», den man heute als unvollständig erklärt ansieht, da er den Einfluss der Isolatorstärke und der Wärmeableitung durch die Elektroden unberücksichtigt lässt, leitet Gillett auf die allgemeinere Theorie von Rogowski und die spezielleren von Dreyfus und Fock über, die Beziehungen zwischen Durchschlagspannung, Isolatorstärke und Temperatur festlegen und Formeln für die direkte Berechnung der Durchschlagspannung aus Wärmekonstanten, Dicke und Verlustfaktor aufstellen. Nachprüfungen hielten diese Theorien nur oberhalb bestimmter Temperaturen stand, während im darunter liegenden Temperaturbereich der Einfluss von Temperatur, Zeit und Leitfähigkeit fast verschwindet. Dem hier vorhandenen «rein elektrischen» Durchschlag scheinen die «Spalttheorien» von Rogowski, Griffith und Horowitz näher zu kommen, die das Vorhandensein winziger Spalten im Di-

elektrikum annehmen, die unter dem Einfluss des elektrischen Feldes gegen die Kräfte der Oberflächenspannung und der Elastizität aufbrechen. Aus der molekularen und technischen Festigkeit sich ergebende Widersprüche schienen in der Homogenität der Stoffe begründet zu sein. Aus einer Betrachtung der Feldverteilung in isotropen und anisotropen Medien wird die höhere Festigkeit von Stoffen möglichst feiner Mikrostruktur abgeleitet.

Unter den experimentellen Arbeiten, welche der weiteren Erforschung des Durchschlagsgebietes dienen, seien u. a. die Untersuchungen von R. Jost über die Durchschlagfestigkeit einiger fester Isolierstoffe bei Beanspruchungen von langer bis zu ganz kurzer Dauer³⁾ erwähnt: Zunahme der Festigkeit mit abnehmender Beanspruchungsdauer, bei einem Zeitintervall von 10^{-9} bis 10^4 s; Durchschlagsverzug erst bei kürzesten Zeiten. W. Rogowski, Flegler und Tanner haben nachgewiesen, dass der Durchschlag bei Stoßspannungen und Atmosphärendruck in einem rapiden Zusammenbruch der Spannung besteht; das ganze Durchschlagsphänomen ist innert rund 10^{-8} s beendet. W. Rogowski und H. Klemperer haben darnach gezeigt, dass auch bei statischem Durchschlag der Zusammenbruch ähnlich rasch erfolgt⁴⁾. Konrad Meyer⁵⁾ unternahm den Versuch, die verschiedenen vorhandenen Anschauungen über den Durchbruch fester Isolatoren zu einer einheitlichen Theorie, die sich nur auf experimentell nachweisbare Voraussetzungen stützt, zusammenzufassen. Die Möglichkeit dazu bot die Anschauung, dass auch der rein elektrische Durchschlag von der Temperatur beeinflusst wird, aber erst von einer kritischen Temperatur an. Diese Anschauung bedingt

¹⁾ Siehe Literaturverzeichnis am Schluss.