

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 38 (1947)
Heft: 26

Artikel: Introduction aux règles et recommandations pour la coordination des isolements dans les installations à courant alternatif à haute tension
Autor: Wanger, W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1056779>

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: 25.12.2024

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:
Secrétariat de l'Association Suisse des Electriciens
Zurich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:
Zurich, Stauffacherquai 36 ♦ Téléphone 23 77 44
Chèques postaux VIII 8481

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

38^e Année

N^o 26

Samedi, 27 décembre 1947

Introduction aux Règles et recommandations pour la coordination des isolements dans les installations à courant alternatif à haute tension

Par W. Wanger, Baden

621.316.93:621.313.048

*L'auteur, président du Comité Technique n^o 28 du Comité Electrotechnique Suisse (CES), coordination des isolements, explique les principes de la coordination sur lesquels est basé le projet de Règles pour la coordination des isolements dans les installations à courant alternatif à haute tension, ainsi que des répercussions techniques et économiques de ces règles *).*

*Der Autor, Präsident des Fachkollegiums 28 des Schweizerischen Elektrotechnischen Komitees (CES), Koordination der Isolationen, erläutert die Grundsätze, auf denen der Entwurf der Regeln für die Koordination der Isolationsfestigkeit in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen basiert und zeigt die technischen und wirtschaftlichen Auswirkungen dieser Regeln *).*

Traduction

Remarques générales

La coordination des isolements dans les installations électriques est un problème qui a été sérieusement étudié, depuis plusieurs années, dans différents pays. Peu de temps avant la dernière guerre, la Commission Electrotechnique Internationale l'avait inscrit dans son programme d'activité, à la demande de la Suisse. La guerre a naturellement interrompu ce travail sur le plan international, mais l'étude de cette question fut poursuivie dans certains pays.

En Suisse, un comité a été institué le 1^{er} mai 1941 pour l'étude de la coordination des isolements. Il s'agit du Comité Technique 28 du CES, qui, durant trois ans, a étudié d'une manière approfondie toutes les questions se rapportant à cette coordination, en faisant procéder, entre autre, à d'importants essais dans 8 laboratoires à haute tension de notre pays. Ce sujet intéresse également un certain nombre d'autres Comités Techniques, car les Règles pour la coordination des isolements ont précisément pour but d'assurer une gradation appropriée des isolements de tout le matériel à haute tension. Tous les Comités Techniques qui s'occupent de ce matériel furent, en conséquence, invités le 17 mai 1944 à une séance commune pour discuter d'un projet de Règles, dont le contenu n'était d'ailleurs pas très différent de celui du projet actuel.

Par la suite, ces Comités Techniques étudièrent les questions qui les concernaient et suggérèrent de nombreuses modifications. Dans certains domaines, les vœux exprimés de différents côtés présentaient de grandes divergences. La tâche du CT 28 a consisté à mettre au point toutes ces questions, de manière à arriver à une entente réciproque. Le projet actuel des «Règles et recommandations pour la coordination des isolements dans les

installations à courant alternatif à haute tension» est l'aboutissement de ces efforts. Pour l'instant, il ne comporte que les chapitres consacrés au matériel de postes et aux câbles. Les chapitres relatifs aux lignes aériennes sont encore en préparation.

Nous nous proposons, dans cette introduction, de montrer quelles sont les bases essentielles de ces règles et de quelle manière les différentes prescriptions ont été établies¹⁾.

Par «coordination des isolements», on entend l'ensemble des mesures propres: à empêcher, dans les installations électriques, des perforations dues à des surtensions; à éviter autant que possible des contournements; ou, du moins, à limiter ceux-ci aux endroits où ils n'occasionnent guère d'avaries et ne troublent pas l'exploitation. Les parafoudres constituent le meilleur moyen d'éliminer les surtensions élevées, qui doivent se décharger quelque part. Quand on parle de coordination, on songe donc principalement aux parafoudres. En réalité, ce domaine est beaucoup plus vaste.

La «coordination» comprend notamment la question de la résistance d'isolement, aussi bien pour le matériel des postes, que pour les lignes aériennes et les câbles. D'une part, la résistance d'isolement doit être suffisamment élevée, afin qu'il se produise aussi peu de perturbations de service que possible, sans toutefois que les installations ne soient trop coûteuses. D'autre part, les isolements des différentes parties des installations doivent être échelonnés, de telle façon que les décharges inévitables se produisent aux endroits voulus.

On pourrait objecter que l'on s'efforce depuis au moins 50 ans de maintenir les perturbations de service dans des limites raisonnables, sans pour cela

¹⁾ Cette introduction se base sur la conférence que l'auteur a donnée, le 17 mai 1944, à la séance commune qui réunissait plusieurs Comités Techniques du CES.

*) voir page 869.

exagérer les dépenses pour les isolements, en appliquant des méthodes plus ou moins empiriques, qui ont permis d'ailleurs d'obtenir des résultats généralement assez satisfaisants. La raison pour laquelle ces questions sont, depuis quelques années, étudiées d'une manière beaucoup plus approfondie est due au fait que l'étude des surtensions permet maintenant d'aborder ces problèmes en meilleure connaissance de cause. Les divers types d'isollements se comportent en effet très différemment selon le genre des surtensions. Avant de pouvoir déterminer la résistance d'isollement qui convient, il est donc nécessaire de savoir quel est le genre de surtension qui entre en ligne de compte. En outre, d'importantes améliorations peuvent être réalisées grâce à une gradation appropriée des isollements, à laquelle on ne procède systématiquement que depuis quelques années. Il s'agit maintenant de tirer le maximum de profit, pour l'exploitation des réseaux électriques, des résultats des études de la coordination des isollements, entreprises depuis une dizaine d'années.

Surtensions

Le but de la coordination des isollements étant de s'opposer aux répercussions dangereuses des surtensions, il faut tout d'abord se rendre compte de la nature des surtensions qui peuvent se présenter dans les réseaux. Selon les Règles de l'ASE relatives aux valeurs normales des tensions, fréquences et courants pour installations électriques (Publ. N° 159f), la tension maximum de service des installations à haute tension ne doit pas dépasser de plus de 15 % la tension nominale. Toutes les augmentations de tension de brève durée qui dépassent cette limite sont à considérer comme des surtensions.

Des

surtensions à la fréquence de service,

c'est-à-dire des élévations de la tension de service dépassant la valeur admissible, se produisent surtout lors du déclenchement d'une charge active ou réactive. Elles peuvent atteindre des valeurs d'autant plus élevées que les lignes considérées sont plus longues. Grâce à la mise en jeu de régulateurs de tension modernes à action rapide, ces surtensions peuvent être en partie supprimées dès leur origine, en partie amorties très rapidement. Dans le calcul des isollements, il n'est donc généralement pas du tout nécessaire de tenir compte de surtensions à la fréquence de service, celles-ci pouvant être limitées sans difficultés à des valeurs sensiblement plus faibles que celles des autres genres de surtensions.

Les

surtensions de déclenchement

se présentent sous forme d'oscillations de tension amorties, de fréquence moyenne à élevée, qui se produisent lors des déclenchements. Elles sont

moins dangereuses quand il s'agit de déclenchements de courts-circuits, que de déclenchements de transformateurs ou de lignes travaillant à vide. Néanmoins, dans ces deux derniers cas, les surtensions peuvent être limitées par des moyens économiques à 2 ou 2,5 fois la valeur de la tension de service.

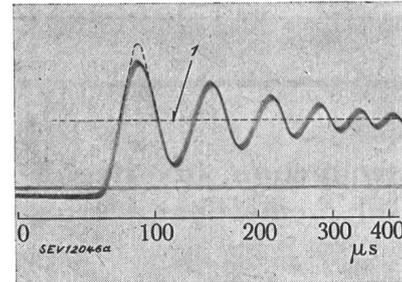


Fig. 1

Oscillogramme cathodique de la tension de rétablissement lors de la coupure d'un court-circuit
1 Valeur de crête à la fréquence de service

Les figures 1 à 5 donnent quelques exemples de surtensions de déclenchement. La figure 1 représente un oscillogramme cathodique de la tension de rétablissement à la suite du déclenchement d'un court-circuit. Partant d'une tension d'arc relativement faible, la tension qui s'établit après la coupure du courant doit atteindre la valeur de crête à la fréquence de service, qui est représentée par

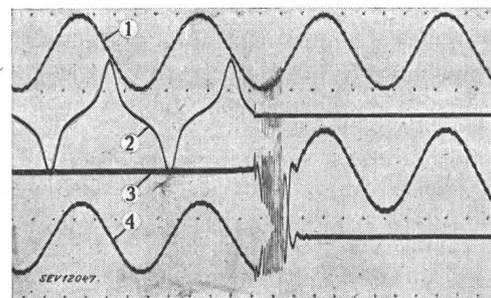


Fig. 2

Oscillogramme ordinaire, relevé lors du déclenchement d'un transformateur à vide

- 1 Tension aux bornes de l'alternateur
- 2 Courant à vide du transformateur
- 3 Tension à travers le disjoncteur
- 4 Tension aux bornes du transformateur

une ligne horizontale en pointillé. La transition s'opère par une oscillation à haute fréquence, qui s'amortit assez rapidement. Si cette oscillation n'était pas du tout amortie, la tension suivrait pour la première élongation la sinusoïde indiquée en pointillé, avec une amplitude maximum d'environ deux

fois la valeur de crête à la fréquence de service. Par suite de l'amortissement, l'amplitude de cette elongation est sensiblement réduite.

La figure 2 représente un oscillogramme ordinaire du déclenchement d'un transformateur à vide. Après coupure du courant, la tension se rétablit à travers le disjoncteur ouvert. Cette tension n'augmente toutefois que jusqu'à une certaine va-

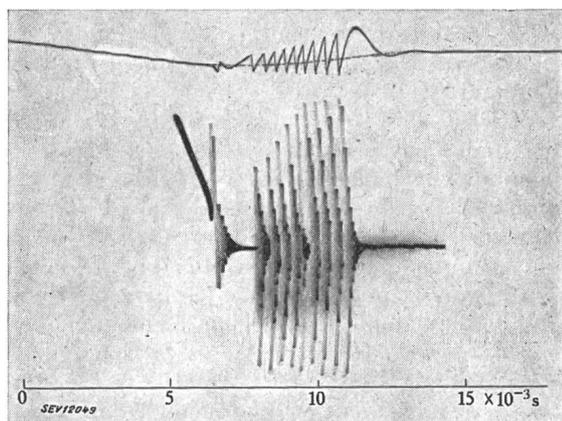


Fig. 3
Oscillogramme cathodique, relevé lors du déclenchement d'un transformateur à vide
En haut: Tension aux bornes du transformateur
En bas: Courant coupé
Remarque: Ces courbes ont été relevées lors du même essai que les courbes de la figure 2

leur, puis baisse brusquement par suite d'un réamorçage entre les contacts du disjoncteur, provoquant une nouvelle circulation du courant. Peu après, le courant est derechef coupé et ainsi de suite, à plusieurs reprises, jusqu'à la coupure définitive du courant.

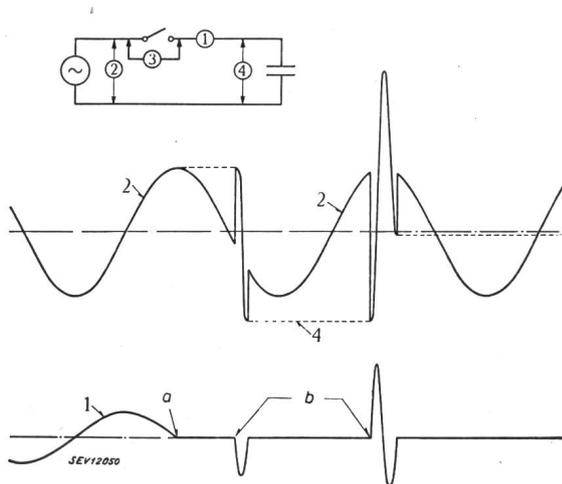


Fig. 4
Déclenchement d'une capacité
1 Courant coupé
2 Tension aux bornes de l'alternateur
3 Tension à travers le disjoncteur = différence entre 2 et 4
4 Tension aux bornes de la capacité
a Extinction b Réamorçage

Ce processus est beaucoup mieux visible sur un oscillogramme cathodique, comme celui que représente la figure 3, qui est en quelque sorte un agran-

dissement des courbes de la figure 2. On constate nettement qu'il se produit, à chaque réamorçage du courant, une oscillation rapidement amortie. La tension du transformateur décrit une courbe en dents de scie. Les amplitudes de la tension dépendent grandement des caractéristiques du disjoncteur utilisé. En effet, la tension à travers le disjoncteur n'augmente que juste ce qu'il faut pour provoquer un amorçage dans la distance disruptive. Dès que celui-ci s'est produit, la tension baisse brusquement. Le disjoncteur limite donc de lui-même les surtensions.

Les processus sont très différents lorsqu'il s'agit du déclenchement d'une ligne travaillant à vide ou d'une capacité (fig. 4). Le courant capacitif est interrompu pour la première fois lors d'un passage naturel par zéro, c'est-à-dire à un moment où la tension atteint son maximum. La tension du côté de l'alternateur (courbe 2) continue alors l'allure d'une sinusoïde, tandis que la tension aux bornes de la capacité (courbe 4) conserve dès ce moment une valeur invariable (représentée par une ligne horizontale en pointillé). Il en résulte une différence de potentiel à travers le disjoncteur ouvert et, dès qu'elle a atteint une certaine valeur, un réamorçage se produit, avec brève oscillation de courant. Ce processus se répète, mais une plus grande différence de potentiel est nécessaire pour provoquer le se-

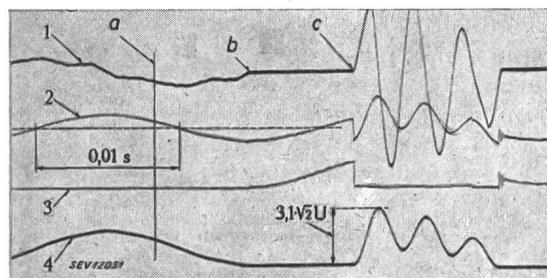


Fig. 5
Oscillogramme ordinaire, relevé lors du déclenchement d'une capacité par un disjoncteur à bain d'huile
1 Courant coupé
2 Tension aux bornes de l'alternateur
3 Tension à travers le disjoncteur
4 Tension aux bornes de la capacité
a Séparation des contacts. b Extinction. c Réamorçage

cond réamorçage, car la résistance diélectrique entre les contacts du disjoncteur a augmenté entre temps.

La figure 5, qui représente un oscillogramme du déclenchement d'une capacité par un disjoncteur à bain d'huile, prouve que de tels processus, prévus par la théorie, peuvent pratiquement avoir lieu. Après la première extinction de l'arc, la tension de l'alternateur (courbe 2) présente l'allure d'une sinusoïde, la tension aux bornes de la capacité demeure constante (courbe 4) et la tension à travers le disjoncteur augmente (courbe 3). Lorsque cette dernière a atteint une certaine valeur, il se produit un réamorçage, suivi d'une oscillation de courant et

d'un saut assez brusque de la tension aux bornes de la capacité. On peut éviter complètement ces réamorçages et ces surtensions en utilisant un disjoncteur dont la résistance diélectrique entre contacts ouverts augmente suffisamment vite. Cette augmentation doit être plus rapide que celle de la différence de potentiel qui s'établit à travers le disjoncteur, après la première coupure du courant.

Les

surtensions de mises à la terre accidentelles

constituent la troisième catégorie de surtensions. Elles sont les plus dangereuses quand il s'agit de mises à la terre intermittentes, théoriquement capables d'engendrer des surtensions très élevées. De telles mises à la terre sont heureusement fort rares dans les réseaux. C'est ainsi que, durant les essais très étendus que la FKH a entrepris dans le réseau des FMB, des mises à la terre intermittentes ne se sont jamais produites. L'emploi de bobines d'extinction ou la mise permanente du point neutre à la terre permettent d'ailleurs dans tous les cas d'éviter avec certitude des mises à la terre intermittentes. Dans ces conditions, ces surtensions ne dépassent pas le double de la tension composée de service, comme le montrent les études théoriques, confirmées par des essais pratiques.

Le principe qui régit le choix des isolements est que les divers genres de surtensions dont nous venons de parler ne doivent provoquer ni perforations, ni contournements. Normalement, ces surtensions ne doivent pas non plus faire fonctionner les parafoudres. Comme les valeurs de toutes ces surtensions dépendent de la tension de service, les isolements des postes et des lignes doivent être d'autant plus forts que la tension de service est plus élevée, ce qui paraît tout à fait logique et correct aussi du point de vue économique.

Par contre, les

surtensions d'origine atmosphérique

sont indépendantes de la tension de service. Nous considérerons tout d'abord le cas des lignes aériennes, étant donné que ces surtensions prennent naissance principalement sur les lignes, soit sous forme de coups de foudre directs, soit sous forme de tensions induites par des coups de foudre se produisant à proximité des lignes. Pour des raisons d'ordre économique, il va de soi que les lignes ne peuvent pas être toutes isolées pour la même valeur, sans tenir compte de la tension de service. Les lignes à tension moyenne subiront en conséquence des perturbations plus nombreuses que les lignes à tensions plus élevées. Ces dernières sont évidemment plus importantes que les premières, ce qui justifie cette différence.

Les perturbations occasionnées par les surtensions d'origine atmosphérique peuvent, en outre, être réduites par l'emploi, très usité pour les lignes à tension moyenne, de poteaux en bois, supports qui améliorent sensiblement l'isolement contre les tensions de chocs. Quand il s'agit de très hautes tensions, l'emploi étendu de câbles de terre concourt au même but. Ces câbles captent la plupart des coups de foudre directs, de sorte que les conduc-

teurs de la ligne ne sont généralement pas directement atteints. Il suffit alors de veiller à ce que la chute de potentiel dans les pylônes, à l'endroit d'écoulement du courant de foudre, ne provoque pas de réamorçage entre pylône et conducteurs de la ligne. La résistance de terre des pylônes doit donc être suffisamment faible et il y a lieu d'adopter une isolation convenable des conducteurs. A partir d'environ 220 kV, il est économiquement possible de prévoir des isolations suffisamment élevées, pour qu'aucun réamorçage ne puisse se présenter et que les lignes soient ainsi pratiquement assurées contre les coups de foudre.

Dans les postes, des coups de foudre n'atteignent normalement pas directement les parties sous tension, lorsque le bâtiment est bien protégé par des paratonnerres et lorsque les installations extérieures sont surmontées d'écrans appropriés. Dans ce cas, les surtensions d'origine atmosphérique ne peuvent pénétrer dans le poste que par les lignes aériennes. Leur valeur est donc limitée par l'isolement de ces lignes contre les tensions de choc. Si la ligne reçoit une surtension d'une valeur supérieure, il se produit un contournement et il ne pénètre dans le poste qu'une onde de choc coupée, dont la valeur de crête est précisément déterminée par la tension de contournement au choc de la ligne aérienne.

Principes de la coordination des isolements

A première vue, il semblerait possible d'éviter tout contournement dans un poste en isolant plus fortement l'ensemble de ce poste que les lignes aériennes auxquelles il est relié. En pratique, cela n'est guère réalisable. En effet, par réflexion dans les postes, les ondes de surtension incidentes peuvent atteindre jusqu'au double de leur valeur initiale, de sorte qu'il faudrait isoler les postes bien plus fortement que c'est actuellement le cas, ce qui serait beaucoup trop coûteux. D'autre part, il ne serait pas non plus possible de conserver l'isolement habituel des postes et de réduire l'isolement des lignes aériennes à tel point que les ondes de surtension pénétrant dans les postes n'y provoquent pas de contournements, car il se produirait alors un beaucoup trop grand nombre de perturbations dans les lignes aériennes.

Ce dilemme peut être résolu en créant, dans les postes, des endroits faibles, où les décharges inévitables peuvent se produire sans provoquer de dommages et sans troubler l'exploitation. Dans ces conditions, on peut adopter pour les lignes aériennes un isolement aussi élevé que possible, en tenant compte des considérations d'ordre économique, afin qu'il s'y produise très peu de perturbations, tandis que l'isolement des postes peut être déterminé sans avoir à tenir compte de l'isolement des lignes aériennes. On renonce ainsi volontairement à un échelonnement des isolements entre lignes et postes, qui est remplacé par une

gradation des isolements à l'intérieur des postes.

Ce système n'empêche pas des contournements (ou plus exactement des décharges) de se produire, mais il les rend non dangereux.

Les endroits faibles des installations sont constitués de préférence par des parafoudres. Les parafoudres modernes à résistances variables présentent une caractéristique de choc très favorable. Pendant la durée d'une surtension, ils établissent une liaison conductrice avec la terre, en limitant la surtension à une valeur non dangereuse, sans formation d'un court-circuit. Dès que la surtension a été écoulée à la terre, les parafoudres coupent automatiquement la liaison avec la terre. Au lieu de parafoudres, on peut également utiliser des éclateurs de protection pour constituer les points faibles, mais la caractéristique de choc de ces éclateurs est moins favorable et ces appareils ne se désamorcent généralement pas d'eux-mêmes, du moins en cas de fonctionnement multipolaire.

Tant que les endroits faibles réagissent correctement, ils protègent tout le reste de l'isolement de l'installation. En revanche, s'ils ont une défaillance, une importante partie de l'installation risque d'être endommagée; il peut, par exemple, se produire une perforation à l'intérieur d'un transformateur. Or, il est évident qu'un contournement extérieur serait moins dangereux. C'est pourquoi il est recommandable de procéder en outre à une gradation entre isolement extérieur et isolement intérieur de l'installation, afin de ne pas dépendre uniquement du bon fonctionnement des parafoudres ou des éclateurs de protection. Ainsi, les isolements d'une installation seront répartis en 3 groupes de résistance diélectrique différente, qui constituent

3 niveaux d'isolement différents.

Le niveau supérieur, c'est-à-dire le groupe d'isolements présentant la meilleure résistance diélectrique, comprend tous les isolements intérieurs, tandis que le niveau moyen comprend les isolements extérieurs, et le niveau inférieur les parafoudres ou éclateurs de protection. Ces trois niveaux avec leurs différentes résistances diélectriques sont re-

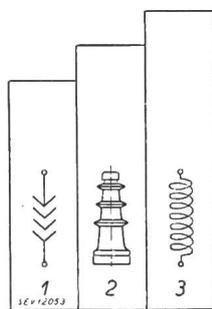


Fig. 6

Représentation schématique
des 3 niveaux d'isolement
d'une installation électrique

- 1 Niveau de protection
- 2 Isolement extérieur
- 3 Isolement intérieur

présentés schématiquement sur la figure 6. A gauche se trouve le niveau inférieur avec les parafoudres ou les éclateurs de protection, au centre, le niveau moyen avec les isolements extérieurs, représentés simplement par un isolateur, bien que d'autres distances dans l'air du matériel à haute tension fassent également partie des isolements extérieurs; à droite enfin le niveau supérieur avec les

isolements intérieurs, représentés par un enroulement.

Il paraît préférable de grouper, dans le
niveau supérieur,

non seulement tous les isolants solides et liquides, qui constituent les isolements intérieurs proprement dits, mais aussi les distances d'ouverture de sectionneurs ordinaires, sectionneurs sous charge, interrupteurs et supports de coupe-circuit, les distances dans l'air difficilement accessibles à l'intérieur d'appareils, d'isolateurs, etc.; ainsi que toutes les distances dans l'air libre entre conducteurs de phases différentes. Au niveau moyen n'appartiennent donc plus que les distances dans l'air libre entre conducteur de phase et terre (excepté les distances dans l'air difficilement accessibles).

Aucune gradation des tensions de contournement et de perforation ne doit être prévue pour les différents isolements du niveau supérieur, car il ne doit s'y produire ni contournements, ni perforations. C'est précisément dans ce but que le niveau supérieur est échelonné, dans son ensemble, par rapport au niveau moyen, puis au niveau inférieur. On pourrait évidemment prévoir un plus grand nombre de niveaux, en utilisant par exemple des isolateurs de traversée plus forts que des isolateurs-supports, ou des barres omnibus mieux isolées que des dérivations, etc., mais il faut bien se rendre compte qu'une augmentation du nombre des niveaux grèverait lourdement les installations, car, en partant d'une rigidité diélectrique donnée du niveau inférieur, l'isolement du niveau supérieur devrait être d'autant plus élevé que les niveaux intermédiaires seraient plus nombreux. Or, c'est l'isolement du niveau supérieur (notamment l'isolement intérieur des transformateurs, machines, appareils) qui exerce la plus grande influence sur le coût des installations.

Les Règles pour la coordination prévoient en conséquence 3 niveaux d'isolement (y compris les parafoudres), comme solution normale. Des raisons d'ordre économique interdisent l'adoption de plus de trois niveaux. Par contre, l'emploi de 2 niveaux n'est en général pas satisfaisant, car on dépendrait alors uniquement d'un fonctionnement impeccable des parafoudres ou des éclateurs de protection. Cet emploi de 2 niveaux peut néanmoins être avantageux dans certains cas; par exemple lorsque l'on ne désire pas prévoir de parafoudres dans une installation à très haute tension, à cause des frais, on peut également renoncer à des éclateurs de protection. Cela diminue naturellement la sécurité de la gradation des isolements, mais les chances d'éviter complètement des contournements sont plus grandes quand on supprime les éclateurs de protection dont la tension de contournement est la plus basse.

Outre la question essentielle du nombre des niveaux d'isolement, certains autres détails ont également une grande importance pour la gradation des isolements. Nous parlerons tout d'abord des

éclateurs dans le niveau moyen,

c'est-à-dire des éclateurs dits de sécurité. La rigidité diélectrique du niveau moyen ne doit être en aucun endroit inférieure à la valeur prescrite, sinon ce niveau ne serait plus protégé par les parafoudres. Par contre, il suffit qu'il n'y ait que quelques endroits qui empêchent un dépassement de la valeur prescrite. En pratique, la limitation vers le haut est toujours réalisée par des éclateurs à cornes (ou autres électrodes de ce genre) fixées à des isolateurs. Il n'est donc pas nécessaire que tous les isolateurs d'une installation soient munis de cornes, mais seulement quelques-uns d'entre eux.

Ces cornes peuvent être appliquées aux isolateurs de matériel à haute tension (transformateurs, disjoncteurs, etc.), ce qui offre l'avantage de pouvoir les régler dans les ateliers du constructeur et de monter tout le matériel à haute tension sur place sans modifications. On peut être ainsi assuré que les cornes protègent réellement l'isolement intérieur du matériel en question.

Au lieu d'être prévues sur le matériel, les cornes peuvent l'être sur d'autres isolateurs de l'installation, à proximité immédiate du matériel à protéger. La gradation entre les cornes et l'isolement intérieur n'est évidemment pas aussi sûre, car les isolateurs (avec ou sans cornes) peuvent avoir une tension de contournement au choc passablement différente selon le genre de montage, comme l'indique la figure 7.

Au début, le CT 28 avait l'intention de normaliser les éclateurs qui devaient constituer le niveau d'isolement moyen et de dresser des tables d'étalonnage, qui auraient permis de déterminer dans chaque cas la distance disruptive nécessaire pour obtenir une certaine tension de contournement. Malheureusement, on a dû constater que la tension de contournement au choc des éclateurs de modèle courant dépend beaucoup trop de leur emplacement, par exemple de leur hauteur au-dessus du sol (comme le montre la figure 7), ou de leur dis-

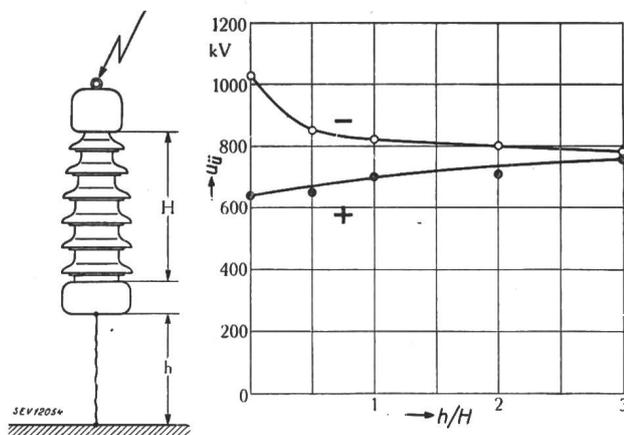


Fig. 7

Tension 50 % de contournement au choc d'un isolateur-support en cas de choc normal $1/50 \mu s$, en fonction de la distance par rapport à la terre

tance aux pôles voisins, aux parois d'une cellule, etc. Pour être indépendants de ces influences, les éclateurs devraient être très écartés des parois des cellules, des autres pôles, etc., de sorte qu'ils ne pourraient pas être prévus dans des installations de dimensions usuelles. En outre, la dispersion de la tension de contournement au choc varie encore énormément pour un même genre de montage. Nous reviendrons sur ce dernier point.

La normalisation d'un éclateur d'installation avec table d'étalonnage correspondante n'étant donc pas possible, le montage d'éclateurs du niveau moyen à côté du matériel offre uniquement l'avantage que les contournements inévitables ne sont, autant que possible, pas amorcés au matériel lui-même. Toutefois, dans le cas du matériel pour installations intérieures, où la gradation des isolements n'est assurée que par de très petites cornes, des contournements peuvent néanmoins se produire aux isolateurs. Pour l'éviter, il faudrait prévoir des isolateurs beaucoup plus grands, analogues à ceux qui sont destinés aux installations extérieures, ce qui serait trop coûteux.

Dans le niveau moyen, des contournements ne se produisent d'ailleurs que lors d'une défaillance d'un parafoudre ou d'un éclateur de protection. Dans ces cas fort rares, il importe surtout d'éviter une perforation interne, de sorte qu'il est préférable qu'il se produise un contournement extérieur, par exemple à une borne de transformateur, au lieu de mettre en danger l'isolement intérieur par le montage de cornes incorrectement réglées. Il est donc recommandable d'installer normalement des éclateurs à cornes au matériel à haute tension lui-même, c'est-à-dire d'avoir affaire à du matériel « coordonné en soi », et de ne prévoir qu'exceptionnellement des cornes à des isolateurs séparés.

En ce qui concerne le

montage des parafoudres,

le principe est que ces appareils doivent être prévus avant tout là où les surtensions d'origine atmosphérique peuvent pénétrer dans l'installation, c'est-à-dire à chaque arrivée ou départ de lignes aériennes, du côté ligne des disjoncteurs. Ces parafoudres protègent tout le matériel en aval, contre les ondes de surtension qui arrivent *directement*. Une onde de surtension peut toutefois prendre une valeur plus élevée par suite de réflexions dans l'installation et provoquer un contournement, si le parafoudre le plus proche est trop éloigné de l'endroit de réflexion. Dans les postes très étendus, les parafoudres aux entrées et départs de lignes aériennes doivent donc être complétés par des parafoudres installés aux barres omnibus.

Si le niveau d'isolement inférieur est constitué par des éclateurs de protection, leur montage doit s'opérer selon le même principe que pour les parafoudres.

Par l'ouverture de disjoncteurs ou de sectionneurs, certaines parties d'un poste peuvent être séparées du reste de l'installation. On peut se demander si toutes ces parties séparées doivent présenter les 3 niveaux d'isolement. Lorsqu'elles sont en liaison métallique avec une ligne aérienne, les trois niveaux sont indispensables. Sinon, il ne sera pas nécessaire de prévoir des parafoudres ou des éclateurs de protection dans chaque partie susceptible d'être séparée.

Dans toutes les parties qui peuvent être sectionnées (qu'elles soient reliées ou non avec des lignes aériennes), il est par contre préférable de prévoir une gradation entre le niveau moyen et le niveau supérieur, afin de protéger également l'isolement intérieur au cas où, par suite d'un défaut quelconque, une surtension d'origine atmosphérique pénétrerait dans la partie sectionnée. Cette gradation existe automatiquement dans chaque partie séparable, lorsque tout le matériel à haute tension est « coordonné en soi ».

Dans l'établissement de la gradation des isolements des installations, la

dispersion de la tension de contournement au choc

joue un rôle considérable. Aussi le CT 28 avait-il chargé 8 entreprises et institutions d'exécuter de nombreuses mesures de la tension de choc sur des éclateurs à tiges. Bien que les éclateurs à cornes d'isolateurs et autres distances disruptives dans l'air ne présentent pas tout à fait les mêmes conditions de dispersion, on dispose néanmoins maintenant de renseignements extrêmement variés sur les principes de ce problème. Les résultats de ces mesures ont été publiés dans le Bulletin de l'ASE [1] ²⁾, de sorte que nous n'entrerons pas dans les détails et nous nous bornerons à indiquer le résultat final.

Le résultat le plus important est que l'on a constaté une dispersion extrêmement grande. Pour éviter le recouvrement des bandes de dispersion de la tension de contournement de deux niveaux d'isolement voisins, les tensions de contournement moyennes devraient être très écartées. La tension (moyenne) de contournement au choc du niveau d'isolement moyen devrait être, par exemple, environ deux fois plus grande que la tension (moyenne) de fonctionnement des parafoudres, et la tension d'essai du niveau supérieur devrait, à son tour, être au moins le 150 % de la tension de contournement du niveau moyen.

Il est évident que cela occasionnerait des frais exagérés et que l'on doit par conséquent se borner à un échelonnement plus rapproché et admettre un certain

recouvrement des bandes de dispersion.

En d'autres termes, il n'est pas possible d'obtenir une sécurité absolue. La question qui se pose est de

²⁾ Voir la bibliographie à la fin de cette introduction.

savoir si la probabilité d'un contournement dans le niveau incorrect est suffisamment faible.

Cette question a été étudiée d'une manière très approfondie et a fait l'objet d'une publication [2]. Les gradations prévues dans les Règles pour la coordination réduisent les probabilités de défaillance à quelques pour cent, voire à une fraction de pour cent. Un contournement est évidemment toujours désagréable, même s'il ne doit se produire que très rarement. Il ne faut cependant pas oublier que l'on dispose de deux gradations, l'une entre le niveau inférieur et le niveau moyen, l'autre entre celui-ci et le niveau supérieur. Au cas exceptionnel, où l'une des gradations serait insuffisante, on disposerait encore de l'autre, de sorte que le malheur n'est pas trop grand. Néanmoins, il est nécessaire d'insister sur le fait que la gradation des isolements ne garantit pas une sécurité absolue. Au début des travaux, on espérait fermement arriver à une telle sécurité, bien que ce fût matériellement impossible.

Les différences de la résistance diélectrique des niveaux

qui donnent les probabilités de défaillance indiquées plus haut et qui sont encore économiquement supportables, de l'avis du CT 28, sont les suivantes: La tension d'amorçage et la tension résiduelle des parafoudres (ou des éclateurs de protection) doivent être d'au moins 25 % inférieures à la tension de contournement au choc du niveau d'isolement moyen et la tension d'essai ³⁾ du niveau supérieur doit être de 15 % plus élevée que cette tension de contournement. L'échelon supérieur a pu être choisi à une valeur sensiblement plus faible que l'échelon inférieur, pour les deux raisons suivantes: Premièrement, les isolements des niveaux moyen et supérieur sont toujours à proximité immédiate les uns des autres, tandis que les parafoudres (qui constituent le niveau inférieur) doivent parfois protéger des parties du niveau moyen à une certaine distance, ce qui exige une plus grande différence de niveau pour tenir compte des ondes à front raide. Deuxièmement, on peut exiger que les niveaux moyen et supérieur soient toujours essayés ensemble, ce qui élimine en partie la grande dispersion de la tension de contournement.

Cet essai en commun offre encore d'autres avantages. Pour procéder à des mesures tout à fait indépendantes des 3 niveaux d'isolement, on devrait limiter le niveau moyen vers le haut et le bas, afin d'assurer un échelonnement correct par rapport aux deux autres niveaux. Une telle exigence présenterait de graves inconvénients, car il faudrait fixer une largeur de bande pour la tension de contournement du niveau moyen, dont le choix serait nécessairement arbitraire. On peut parfaitement l'éviter en essayant ensemble le niveau moyen et le niveau supérieur. Il suffit alors de prescrire une valeur minimum pour la tension de contournement

³⁾ Essai sous onde coupée, voir plus loin.

du niveau moyen, pour assurer un échelonnement correct par rapport aux parafoudres, et d'exiger en outre que, lors de l'essai simultané de choc des niveaux moyen et supérieur, aucune perforation ne se produise dans le niveau supérieur lorsque la tension est si élevée qu'il se produit chaque fois un contournement dans le niveau moyen. De ce fait, le second échelonnement est assuré.

Lors de l'essai de réception, on ne procédera donc pas à une mesure individuelle des tensions 50 % de contournement du niveau moyen et du niveau supérieur, mais bien à un essai en commun des deux niveaux, afin de vérifier directement si l'échelonnement prescrit est observé. Il suffit généralement d'utiliser des chocs de tension de 15 % plus élevés que la tension 50 % de contournement du niveau moyen, pour obtenir que chaque choc provoque un contournement dans ce niveau. Lorsqu'il ne se produit ni contournements, ni perforations dans le niveau supérieur, cela prouve que la gradation est correcte.

Une autre difficulté rencontrée dans la gradation des isolements réside dans le fait que les tensions de contournement ne sont généralement pas égales en cas de

choc positif et de choc négatif.

Or, il va de soi que la gradation doit être correcte pour les deux polarités. Les isolateurs-supports, qui constituent un élément important des postes, ont généralement une tension de contournement beaucoup plus élevée en cas de choc négatif qu'en cas de choc positif. Si l'on utilise, dans le niveau inférieur, des éclateurs de protection, on pourrait songer (comme l'a proposé M. Rump) à leur conférer les mêmes propriétés, ce qui serait possible en donnant à ces éclateurs la forme d'une pointe sous tension devant une plaque mise à la terre. Par contre, cette différenciation des polarités ne peut pas être obtenue dans le niveau supérieur, dont les isolements intérieurs ne permettent guère d'influencer arbitrairement la dépendance de la polarité. Tout irait bien si la tension de contournement ou de perforation négative était, par hasard, supérieure à la tension positive. Mais le contraire peut tout aussi bien se présenter et, en général, l'influence de la polarité est relativement faible. En outre, cette influence ne peut pas s'exercer sur les parafoudres, dont la tension résiduelle et la tension d'amorçage sont sensiblement les mêmes pour des chocs positifs que pour des chocs négatifs.

Or, du moment que le niveau inférieur (parafoudres) et le niveau supérieur (isolements intérieurs) ne dépendent pas beaucoup de la polarité, les grandes différences de polarité du niveau moyen deviennent très gênantes. Les tensions de contournement du niveau moyen devant se trouver, pour les deux polarités, entre celles des deux autres niveaux, ces derniers devraient être plus écartés (voir fig. 8). Fort heureusement, il est possible de rapprocher beaucoup, par des moyens relativement simples, les tensions de contournement positives et négatives du

niveau moyen (isolateurs-supports, isolateurs de traversée, etc.), ce qui permet de réaliser les installations les plus économiques.

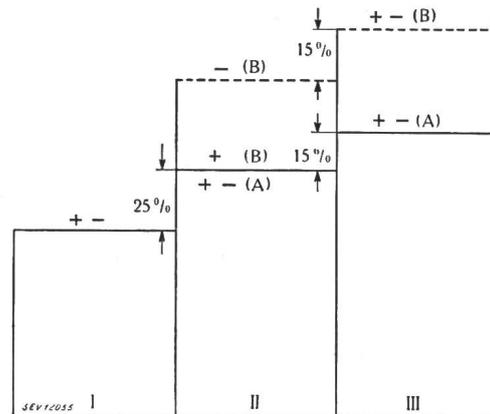


Fig. 8

Gradation entre parafoudres (I), isolement extérieur (II) et isolement intérieur (III) du matériel à haute tension

Il est admis que le niveau inférieur (I) et le niveau supérieur (III) ont une résistance d'isolement indépendante de la polarité. Dans le cas A, le niveau moyen (II) est également indépendant de la polarité, tandis que dans le cas B la tension de contournement négative est sensiblement plus élevée que la tension positive. Bien que la gradation soit de 25 % entre les niveaux I et II et de 15 % entre les niveaux II et III, dans les deux cas, la résistance d'isolement du niveau III doit être beaucoup plus grande dans le cas B que dans le cas A.

Les Règles pour la coordination tiennent compte de cette possibilité en prescrivant les mêmes valeurs minima pour les tensions de contournement positives et négatives du niveau moyen. Le constructeur est naturellement libre de prévoir, par exemple, une tension de contournement négative plus élevée, mais il doit alors renforcer en conséquence l'isolement intérieur, afin de maintenir la gradation exigée. La prescription selon laquelle les niveaux moyen et supérieur doivent être essayés ensemble a d'heureuses répercussions à cet égard, car elle laisse une grande latitude au constructeur, tout en obtenant que la gradation soit correcte.

Avant de quitter le chapitre de la gradation des isolements, nous dirons quelques mots au sujet des

capacités de protection.

On s'étonnera peut-être de ne pas rencontrer celles-ci dans un niveau déterminé, comme les parafoudres. En réalité, les capacités (c'est-à-dire les condensateurs ou les câbles) ne constituent pas un niveau de protection, car elles ne limitent pas les surtensions à une valeur déterminée. Elles servent plutôt à compléter et à améliorer la protection contre les surtensions, par le fait qu'elles aplatissent les ondes de surtension incidentes et facilitent ainsi la réalisation d'une gradation efficace des isolements.

Comme nous l'avons déjà dit,

la gradation des isolements n'est prévue que pour les tensions de choc,

puisque'elle ne doit agir que contre les surtensions d'origine atmosphérique. Nous rappellerons briève-

ment qu'une tension de choc est une surtension de brève durée de polarité uniforme, qui atteint rapidement sa valeur de crête, puis décroît jusqu'à zéro. Le choc de tension normal $1|50 \mu\text{s}$ (fig. 9),

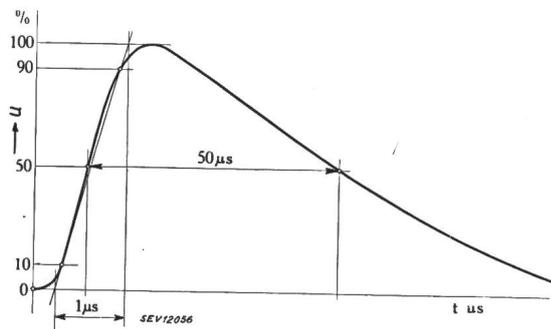


Fig. 9
Choc de tension normal ($1|50 \mu\text{s}$)

avec lequel sont exécutés la plupart des essais, présente une durée de front de $1 \mu\text{s}$ et une durée de mi-amplitude de $50 \mu\text{s}$ (temps durant lequel la valeur momentanée est égale ou supérieure à la moitié de la valeur de crête). Les tensions de choc, comme précisément les surtensions d'origine atmosphérique en général, sont donc des phénomènes de très brève durée, de l'ordre de quelques microsecondes, c'est-à-dire de quelques millièmes de seconde.

Valeur absolue de la résistance aux tensions de choc

Ayant ainsi mis au point la gradation des isolements, il nous reste à déterminer la valeur absolue de la résistance d'isolement. Il s'agit avant tout d'un problème économique. L'isolement doit être suffisant pour éviter que les perturbations ne soient trop fréquentes, mais pas plus élevé pour ne pas augmenter inutilement le coût des installations. Il s'agit donc de savoir ce qui est nécessaire pour que les perturbations demeurent suffisamment rares.

Nous avons considéré, au début de cet exposé, l'aspect théorique de cette question. Les résultats d'exploitation importent plus encore que les considérations théoriques; c'est pourquoi le CT 28 s'est occupé avant tout du côté pratique et a examiné quelles sont les résistances d'isolement usuelles dans les installations électriques et quelles sont les expériences d'exploitation qui ont été faites. En Suisse, les exigences minima des REH⁴⁾ sont observées depuis très longtemps. Au début, ces Règles ne renfermaient pas de prescriptions au sujet de la résistance aux tensions de choc, mais se bornaient à exiger, pour les isolateurs de postes par exemple, outre une distance disruptive minimum, une tension d'essai U_p à fréquence industrielle selon la formule bien connue:

$$U_p = 2,2 U_n + 20 \text{ kV} \quad (\text{où } U_n \text{ est la tension nominale}),$$

la tension de contournement devant être supérieure d'au moins 10 % à la tension d'essai. Ces exigences

⁴⁾ REH: Regeln für Wechselstrom-Hochspannungsgeräte des VDE (Verband Deutscher Elektrotechniker), VDE 0670.

devaient être maintenues pour le matériel des postes extérieurs, lors de l'essai sous pluie. Par la suite, ces prescriptions furent complétées par celles concernant la résistance aux tensions de choc, mais les dispositions relatives à la tension d'essai et à la tension de contournement à fréquence industrielle avaient déjà plus ou moins fixé les dimensions des isolateurs, de sorte que la résistance aux tensions de choc du matériel utilisé dans nos installations avait été effectivement prescrite dès le début.

Une partie des entreprises électriques suisses n'ont utilisé, par principe, que du matériel répondant à ces exigences minima, avec des résultats tout à fait satisfaisants. Il en a été de même dans certains autres pays. Par contre, quelques entreprises électriques suisses posent des exigences plus élevées et prévoient, jusqu'aux tensions de service d'environ 50 kV, des isolements renforcés. Elles utilisent, par exemple pour 10 kV un isolement qui n'est normalement exigé que pour 20 kV, ou lorsqu'il s'agit d'installations à 45 ou 50 kV, du matériel capable de supporter d'ordinaire 60 kV, etc.

En Suisse, nous disposons par conséquent depuis de nombreuses années d'expériences pratiques avec deux degrés d'isolement différents. Les partisans d'un isolement plus faible estiment qu'il donne de bons résultats dans les exploitations, tandis que les partisans d'un isolement renforcé sont d'avis que celui-ci se justifie économiquement, car les perturbations sont alors encore plus rares qu'avec un isolement plus faible. Cette question dépend dans une large mesure de la qualité des parafoudres, comme nous le verrons dans un instant. Le CT 28, ainsi que la FKH et plusieurs autres CT, ont été finalement d'avis qu'il est préférable de tenir compte de ces deux opinions, en prévoyant dans les Règles et les recommandations pour la coordination des isolements deux degrés d'isolement, entre lesquels les exploitants pourront faire leur choix.

Avant de revenir plus en détail sur cette question, nous nous occuperons tout d'abord uniquement des installations avec degré d'isolement I. D'une manière générale, les Règles pour la coordination prévoient pour ce degré d'isolement I la résistance d'isolement utilisée jusqu'ici dans celles des installations suisses qui ont, pour ainsi dire, un isolement minimum mais qui, selon l'avis des exploitants responsables, ont donné satisfaction. Le principe de la gradation des isolements et quelques autres motifs ont toutefois conduit à modifier quelque peu la pratique en usage jusqu'ici. Voici les modifications les plus importantes:

Les mêmes valeurs minima sont prescrites pour les tensions de contournement au choc du niveau moyen du matériel des installations intérieures et extérieures, ce qui est logique, puisque les installations extérieures correctement protégées par des écrans contre les coups de foudre directs ne sont pas soumises à des surtensions d'origine atmosphérique plus élevées que les installations intérieures.

En outre, pour les tensions de service très élevées (110 kV et plus), la valeur minimum de la tension de contournement au choc dans le niveau moyen a été relevée. Cette amélioration est possible sans augmentation du prix du matériel. Jusqu'ici, on avait l'habitude de rapprocher sensiblement les cornes qui doivent limiter la tension de contournement, lorsqu'il s'agissait de tensions de service très élevées. Mais, depuis que la hauteur des isolateurs est fixée par l'essai diélectrique à fréquence industrielle sous pluie, il paraît préférable de tirer un meilleur profit de ces grands isolateurs en augmentant l'écartement des cornes. On obtient ainsi une meilleure résistance contre les contournements, sans accroître le prix du matériel. Il n'est pas nécessaire de renforcer dans ce cas l'isolement intérieur. On utilisait, en effet, jusqu'ici des éclateurs qui dépendaient beaucoup de la polarité et l'on devait en conséquence adapter la résistance intérieure à la tension de contournement négative élevée, tandis que la tension de contournement sous onde de choc positive était sensiblement plus faible. En utilisant dorénavant des éclateurs qui présentent, pour les deux polarités, une tension de contournement aussi élevée que c'était le cas auparavant pour la polarité négative, il suffit dès lors de prévoir le même isolement intérieur qu'autrefois, avec le grand avantage que la valeur minimum de la tension de contournement dans le niveau moyen est nettement relevée.

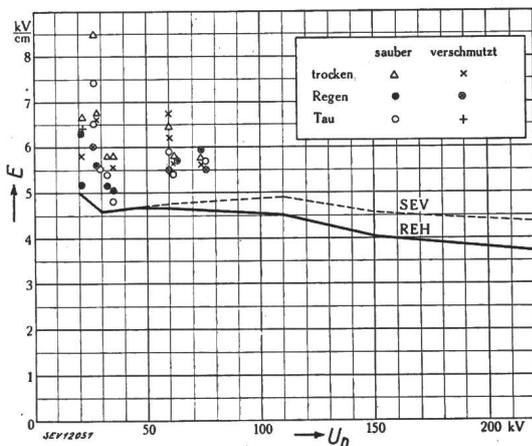


Fig. 10

Gradients de potentiel (E) en fonction de la tension nominale (U_n), le long d'isolateurs pour postes extérieurs (d'une armature à l'autre), au moment où est atteinte entre les cornes des éclateurs de sécurité la tension 50 % de contournement au choc normal positif (1/50 μ s)

REH = Isolateurs et éclateurs de sécurité avec distances disruptives minima selon les REH

SEV = Isolateurs avec distances disruptives minima selon les REH, les éclateurs à cornes étant par contre réglés de manière que la valeur minimum de la tension de contournement au choc soit tout juste atteinte, conformément aux Règles pour la coordination

Points individuels = Gradients de la tension de contournement mesurés le long des isolateurs (sans cornes), à l'état sec, sous pluie et humides de rosée, propres et encrassés

La figure 10 montre la répercussion du relèvement de la tension de contournement entre les éclateurs à cornes (niveau moyen) sur les gradients de potentiel possibles le long de la surface des isolateurs. La tension nominale est reportée en abscisses, tandis que les ordonnées indiquent les gradients de

potentiel qui existent, le long d'un isolateur pour postes extérieurs, au moment où la tension 50 % de contournement est atteinte entre les cornes. La courbe REH en trait plein montre que ces gradients de potentiel limités par les cornes, pour le matériel en usage jusqu'ici, sont beaucoup plus faibles pour les très hautes tensions que pour les tensions moyennes et basses. Par contre, en appliquant les Règles pour la coordination, les cornes d'isolateurs de la même hauteur sont un peu plus écartées, ce qui augmente légèrement le gradient de potentiel possible le long de l'isolateur, comme l'indique la courbe SEV en pointillé.

Comme on le sait, les éclateurs à cornes servent à régler la tension de contournement au choc à une valeur univoque, qui ne dépend pas de l'état de la surface des isolateurs. Ceux-ci ne doivent donc pas présenter de contournements le long de leur surface avant qu'une décharge disruptive ne se soit produite entre les cornes. Afin de constater si cette exigence est satisfaisante, on a représenté sur la figure 10 un certain nombre de valeurs de mesure de gradients de contournement au choc le long d'isolateurs pour postes extérieurs, dans diverses conditions d'humidité et d'encrassement. Tous ces points sont situés au-dessus des courbes. Ainsi, malgré un léger accroissement de la distance disruptive des cornes (courbe SEV), il n'y a pas lieu de craindre un contournement le long de la surface des isolateurs présentant un degré d'encrassement normal dans les installations en Suisse. En mettant à profit les récentes connaissances dans ce domaine, un tel contournement peut même être évité plus sûrement qu'autrefois. Avec les éclateurs dépendants de la polarité, utilisés jusqu'ici, la courbe REH pour choc négatif passe en général nettement au-dessus de la courbe SEV de la figure 10, tandis que les éclateurs indépendants de la polarité permettent de maintenir la courbe SEV aussi bien pour un choc positif que pour un choc négatif.

Tout ce qui précède concerne uniquement le niveau d'isolement moyen. Or, les Règles pour la coordination exigent, comme nous l'avons dit, que les distances d'ouverture des disjoncteurs et toutes les distances dans l'air entre pôles différents fassent partie du niveau supérieur. Elles ne doivent donc pas s'amorcer et il faut qu'un contournement à la terre ait lieu avant. Pour le matériel des postes extérieurs, cette exigence est satisfaite, sans autre, avec les distances disruptives entre pôles et les distances d'ouverture en usage jusqu'ici. Par contre, pour le matériel des postes intérieurs, ces distances doivent être un peu plus grandes que précédemment, mais la différence n'est pas grande.

Les prescriptions de certains pays prévoient pour les isolateurs du matériel pour postes extérieurs une tension de contournement au choc plus élevée lorsque les cornes ont été enlevées. Ceci afin que, même lorsqu'ils sont encrassés, les isolateurs présentent encore une tension de contournement au choc qui dépasse suffisamment celle des cornes. Le CT 28 n'a pas prévu une telle prescription, car il ne désirait pas introduire un essai pour lequel le matériel

devrait se trouver dans un autre état que dans l'installation et, en outre, parce qu'un tel essai n'est pas exécutable pour du matériel bobiné. Les enroulements qui n'ont pas besoin de présenter cette résistance d'isolement accrue et ne sont donc pas prévus de la sorte, risqueraient d'être endommagés lors de cet essai. Les Règles pour la coordination se bornent à prescrire un essai sous pluie à la fréquence industrielle, qui offre également une certaine garantie pour une tension de contournement suffisamment élevée des isolateurs encrassés. Cet essai est d'ailleurs plus sévère, car la tension de contournement à la fréquence industrielle se réduit plus fortement que la tension de contournement au choc, pour la même pluie ou le même degré d'encrassement.

Après être partis du matériel qui a fait ses preuves en pratique, pour fixer la résistance aux tensions de choc, puis avoir procédé à diverses modifications, il est intéressant de voir comment ce matériel satisfait aux exigences théoriques exposées au chapitre «Surtensions». Sur la figure 11, la courbe 1 représente la valeur minimum de la tension 50 % de contournement au choc du matériel, en multiples de la valeur de l'amplitude de la tension nominale composée. Pour les faibles tensions nominales, cette valeur (que l'on pourrait désigner par facteur de sécurité) est très élevée (elle dépasse même 8), tandis qu'elle diminue jusqu'à près de 3 pour les tensions plus élevées. La courbe 2 représente les valeurs maxima des tensions d'amorçage et résiduelle des parafoudres ou éclateurs de protection.

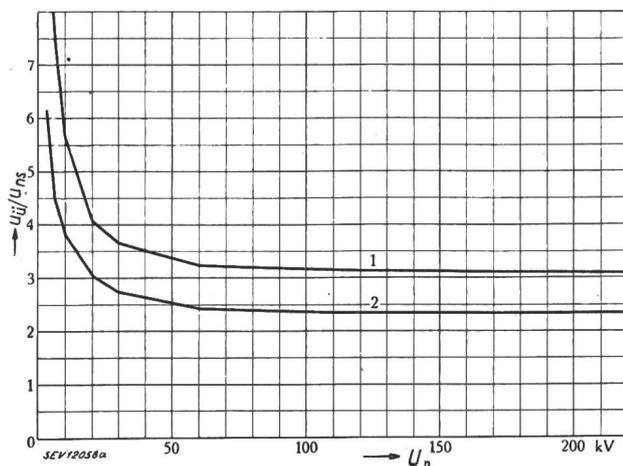


Fig. 11

Valeurs minima de la tension 50 % de contournement au choc du matériel à haute tension (1) et valeurs maxima de la tension résiduelle et de la tension 50 % d'amorçage des parafoudres et éclateurs de protection (2) conformément au projet des Règles pour la coordination, par rapport à la valeur de crête de la tension nominale composée ($U_n / \sqrt{u_{ns}}$)

Abscisses = Tension nominale (U_n)

Pour les faibles tensions de service (en dessous d'environ 30 kV), le facteur de sécurité est tellement grand, parce qu'on ne peut simplement réduire la résistance d'isolement proportionnellement à la tension de service; car alors il se produirait trop souvent des perturbations provoquées par des surtensions d'origine atmosphérique. Ce motif n'est toute-

fois réellement valable que lorsqu'il n'est pas fait usage de parafoudres, mais uniquement d'éclateurs, qui ne se désamorcent généralement pas d'eux-mêmes. Avec des parafoudres, la résistance d'isolement des installations à haute tension modérée pourrait être sensiblement réduite, sans difficulté. On y a provisoirement renoncé pour ne pas introduire deux types de matériel pour installations avec et sans parafoudres, et pour ne pas prescrire du matériel normalisé si faiblement isolé, qu'on soit *forcé* d'utiliser des parafoudres. Il ne faut cependant pas oublier qu'il y a là une possibilité d'abaisser le coût des installations électriques, sur laquelle on reviendra peut-être ultérieurement, lorsque les expériences faites avec les parafoudres auront été plus nombreuses. Pour la coordination de l'isolement des machines rotatives branchées directement à des réseaux de lignes aériennes, il sera certainement nécessaire de faire usage de cette possibilité.

Si nous considérons l'autre extrémité des courbes de la figure 11, nous constatons qu'aux très hautes tensions de service les valeurs maxima de la tension d'amorçage des parafoudres et éclateurs de protection s'abaissent jusqu'à près de 2,3 fois la valeur de la tension nominale, c'est-à-dire jusqu'à près de 2 fois la valeur de la tension de service maximum admissible. Si l'on compare cela avec ce que nous avons dit plus haut au sujet de la valeur des surtensions de déclenchement et de mise à la terre accidentelle, on se rend compte que la tension d'amorçage prévue suffit tout juste pour que les parafoudres ne s'amorcent généralement pas. Il est certainement nécessaire de prendre parfois des mesures spéciales pour réduire ces surtensions, à moins que l'on n'utilise des parafoudres qui soient vraiment capables de supporter des surtensions de déclenchement sans s'endommager.

Ces considérations s'appliquent au degré d'isolement I. Pour le degré d'isolement II, les valeurs maxima des tensions d'amorçage et résiduelle des parafoudres dépassent par contre sensiblement les valeurs possibles des surtensions de déclenchement et de mise à la terre accidentelle. Elles sont, par exemple pour des tensions nominales de 45 et 110 kV, 2,8 à 2,7 fois plus élevées que la plus haute tension de service admissible. Avec le degré d'isolement II, on peut donc généralement régler la tension d'amorçage des parafoudres encore un peu plus bas que ces valeurs limites, sans risquer un amorçage aux surtensions de déclenchement et de mise à la terre accidentelle. Ceci présente l'avantage que l'écart entre la tension d'amorçage des parafoudres et la tension de contournement du matériel dépasse la valeur de 25 % indiquée plus haut. Les parafoudres installés à une certaine distance du matériel protègent donc mieux celui-ci contre les contournements, lors de chocs à front raide.

Le fait que, pour le degré d'isolement I, les tensions d'amorçage des parafoudres et des éclateurs de protection sont passablement rapprochées des valeurs des surtensions de déclenchement et de mise à la terre accidentelle est précisément l'une des principales raisons pour lesquelles on a prévu deux

différents degrés d'isolement dans les Règles pour la coordination. Certaines difficultés qui peuvent se présenter avec le degré d'isolement I sont exclues a priori avec le degré d'isolement II. Il y a néanmoins lieu d'insister sur le fait que les installations présentant le degré d'isolement I, qui sont par conséquent moins coûteuses, ont donné elles aussi de bons résultats en exploitation.

Tension d'essai à la fréquence industrielle

Nous n'avons parlé jusqu'ici que de la résistance du matériel aux tensions de choc et précisé que les valeurs prescrites pour les différents niveaux doivent être identiques pour l'ensemble du matériel, car c'est la seule façon d'obtenir une gradation correcte des isolements. Ainsi, pour un transformateur, il serait inadmissible d'admettre une tension de contournement au choc dans le niveau moyen plus faible que pour un interrupteur par exemple, puisque chacun d'eux doit être protégé par un parafoudre ayant la même tension d'amorçage.

Dans le cas de la tension d'essai à la fréquence industrielle, il n'est par contre pas toujours possible de prescrire les mêmes valeurs pour tout le matériel, car la résistance aux tensions de choc détermine dans une large mesure la résistance d'isolement à la fréquence industrielle; celle-ci peut être très différente pour deux appareils différents présentant la même résistance à la tension de choc. Cela est particulièrement apparent lorsque l'on compare l'isolement par air et l'isolement par huile. Dans l'air, la plupart des distances disruptives ont, pour l'une des polarités, un rapport d'impulsion qui n'est guère supérieur à l'unité. Par contre, le rapport d'impulsion de l'huile est très élevé, souvent bien supérieur à 2. Il est vrai que ce chiffre est d'autant plus faible que l'huile a été mieux séchée et nettoyée, car la tension de perforation à la fréquence industrielle est de ce fait très élevée, tandis que la tension de perforation au choc ne se modifie presque pas. Néanmoins, le rapport d'impulsion d'une huile très bien préparée atteint encore au moins 1,8. Pour une même résistance aux tensions de choc, la résistance d'isolement à la fréquence industrielle diffère donc sensiblement, selon qu'il s'agit d'air ou d'huile; elle est plus faible pour l'huile.

A première vue, cela peut paraître fort gênant, mais en réalité ce n'est pas désavantageux. En effet, à la fréquence industrielle, il ne s'agit pas de procéder à une gradation des isolements, mais uniquement d'éviter qu'il ne se produise des perforations ou des contournements. Les augmentations de tension à la fréquence de service sont si modestes, que cette exigence peut être observée sans autre, bien que la résistance diélectrique de l'isolement par huile à la fréquence industrielle soit sensiblement plus faible que celle de l'isolement par air. On vise d'autre part à empêcher des perforations de l'huile en cas de surtensions de déclenchement et de mise à la terre accidentelle. Ces surtensions ne sont pas, à proprement parler, des tensions de choc, mais bien des augmentations de tension de très brève durée, pour lesquelles la résistance d'isolement est égale-

ment bien plus élevée que lors de l'essai d'une minute à la fréquence industrielle. La résistance d'isolement habituelle des transformateurs à bain d'huile et autres appareils analogues est donc également amplement suffisante pour ces genres de surtensions, comme le prouvent d'ailleurs les multiples expériences d'exploitation qui ont été faites au cours de nombreuses années.

Outre cette différence essentielle entre les isolements par air et par huile, il existe maintes petites différences entre les diverses catégories de matériel à haute tension, que nous allons considérer brièvement. Nous attirerons également l'attention sur certaines particularités de l'essai sous tension de choc, bien qu'en principe tout le matériel du même niveau doit toujours présenter la même résistance aux tensions de choc.

Essai diélectrique du différent matériel à haute tension

Nous considérerons tout d'abord les *appareils à haute tension et isolateurs de postes*. Comme cela s'est fait jusqu'à présent, ce matériel doit être soumis à un essai d'une minute sous une tension qui résulte de la formule

$$U_p = 2,2 U_i + 20 \text{ kV}^5).$$

Du fait que l'on s'en tient, pour la résistance à la tension de choc et à la fréquence industrielle, à ce qui était prévu jusqu'ici en pratique, les prescriptions pour ces deux genres de tensions ont une relation logique.

À la fréquence industrielle, aucun essai de contournement n'est exigé, puisqu'il s'agit simplement de prouver que le matériel *n'est pas* perforé ou contourné sous une tension déterminée. Cette preuve est apportée par l'essai d'une minute, tandis que l'essai de contournement à la fréquence industrielle n'a rien à voir avec cette preuve.

Il est raisonnable que les distances d'ouverture des sectionneurs doivent répondre à des exigences accrues. Ces distances doivent en effet offrir une sécurité absolue au personnel qui procède à des réparations dans une partie sectionnée de l'installation. En outre, la gradation entre distance d'ouverture et distance pôle-terre doit être telle que durant le service et même lorsque l'installation est sous tension des deux côtés du sectionneur, aucun contournement ne puisse avoir lieu à travers la distance d'ouverture. Contrairement aux prescriptions en vigueur dans certains pays, les Règles suisses pour la coordination n'exigent pas, pour la distance d'ouverture des sectionneurs, une résistance accrue à la fréquence industrielle, mais bien une résistance accrue à la tension de choc, car il s'agit en fait d'obtenir une gradation correcte pour les tensions de choc.

Pour les essais diélectriques à la fréquence industrielle des

⁵⁾ La signification précise de la tension d'isolement nominale normalisée U_i sera exposée plus loin. Si nous nous bornons dans ce chapitre, pour plus de simplicité, aux installations à degré d'isolement I, U_i est alors sensiblement égale à la tension nominale.

transformateurs,

il existe des prescriptions suisses (RSME), basées sur les recommandations de la Commission Electrotechnique Internationale et analogues à celles en vigueur dans beaucoup d'autres pays. Il a paru opportun de conserver en principe ces prescriptions, qui ont toujours donné d'excellents résultats en pratique. Seules quelques modifications de forme y ont été apportées, ceci uniquement pour tenir compte de la normalisation. Les valeurs de la tension pour l'essai d'une minute ont été fixées de manière qu'aucun transformateur ne soit essayé sous des tensions plus basses que jusqu'ici, mais que la tension d'essai ne soit pas non plus, en principe, plus élevée que jusqu'à présent.

L'essai d'une minute consiste normalement en un essai de tension par rapport à la terre, c'est-à-dire en un essai d'enroulement. Dans les réseaux à neutre mis en permanence à la terre, les transformateurs dont le point neutre est mis directement à la masse peuvent toutefois être prévus avec isolement gradué, auquel cas on ne peut exécuter qu'un essai sous tension induite. Si la tension entre bornes et terre atteint alors les mêmes valeurs que pour un transformateur à point neutre non mis à la masse essayé sous tension séparée, les autres parties de l'installation doivent être isolées comme s'il s'agissait de transformateurs à isolement complet.

Toutefois, conformément aux RSME, les Règles pour la coordination ne prescrivent qu'une tension d'essai de 20 % plus faible pour les transformateurs à point neutre mis directement à la terre, prévus pour des tensions supérieures à 80 kV. Afin que la gradation des isollements demeure correcte, il faut dans ce cas que l'isolement du niveau moyen et du niveau inférieur soit également prévu pour une valeur plus faible.

Les transformateurs à air présentent naturellement une résistance plus grande à la fréquence industrielle, lorsque la résistance exigée à la tension de choc est maintenue, car le rapport d'impulsion de l'air n'est pas aussi élevé que celui de l'huile. A cet effet, les Règles pour la coordination prévoient pour les transformateurs autres qu'à bain d'huile un essai d'une minute avec des tensions égales à celles prescrites pour l'essai d'une minute des appareils à haute tension. Toutefois, lorsqu'il s'agit de transformateurs à air destinés à des réseaux purement souterrains, l'essai diélectrique peut être exécuté avec les mêmes tensions que pour les transformateurs à bain d'huile.

Pour l'instant, les Règles pour la coordination ne prescrivent pas d'essai sous tension de choc pour la réception des transformateurs, étant donné que l'on ne connaît pas encore de méthode qui permette de constater d'une manière tout à fait sûre si l'isolement a été endommagé ou non à la suite d'un essai de choc. Les études se poursuivent dans ce domaine. Bien qu'aucun essai ne soit prescrit pour le moment, les transformateurs doivent néanmoins être dimensionnés de manière à être capables de résister aux chocs, afin de correspondre à l'isolement des autres parties de l'installation. Ils doivent être cons-

truits de telle sorte qu'ils puissent supporter un choc complet de la valeur de la tension 50 % de contournement au choc du niveau moyen et un choc sous tension coupée de 15 % plus élevée. Les présentes Règles pour la coordination ne préjudicient en rien la façon dont un essai des transformateurs sous tension de choc pourra être, au besoin, prescrit ultérieurement. Il est probable, notamment, que le grand nombre de chocs prescrits pour l'appareillage et autre ne pourra pas être simplement adopté pour l'essai des transformateurs.

Jusqu'à présent, les

transformateurs de mesure

étaient souvent construits, selon les prescriptions d'un pays étranger, pour une tension d'essai plus élevée à la fréquence industrielle (comme pour les appareils), même lorsqu'ils étaient à bain d'huile. Or, on ne voit pas très bien pourquoi des transformateurs de mesure à bain d'huile devraient être mieux isolés que les autres transformateurs à bain d'huile. Pour les transformateurs de mesure, les Règles pour la coordination prescrivent donc, en principe, les mêmes tensions d'essai que pour les transformateurs de puissance isolés de la même façon.

Les

machines rotatives et les régulateurs d'induction

ne peuvent pas être incorporés, sans frais exagérés, à la coordination générale. Afin de ne pas retarder la publication des Règles pour la coordination pour les postes à haute tension sans machines rotatives, qui sont de beaucoup les plus nombreux, le CT 28 a donc laissé pour l'instant de côté ces machines. Il y reviendra après que les règles générales auront été mises en vigueur.

Parmi les

récepteurs à haute tension,

seules les chaudières électriques entrent en ligne de compte. Pour ces appareils, les prescriptions sont les mêmes que pour les appareils à haute tension.

Les

condensateurs

doient être traités différemment selon leur grandeur et leur destination. Pour des raisons d'ordre économique, les condensateurs de déphasage ne peuvent pas être isolés contre les tensions de choc comme le prescrivent les règles générales, ce qui le plus souvent n'est d'ailleurs pas du tout nécessaire, car leur capacité est si grande que les surtensions de choc qui se présentent dans les installations sont fortement amorties.

Il suffit donc de prévoir un essai sous une tension modeste, juste suffisante pour prouver que les condensateurs fonctionneront convenablement à la tension de service. Cette tension d'essai s'entend lorsque la capacité est si grande, que la valeur de la tension d'essai n'est pas dépassée par une onde de choc d'une valeur de crête de 1500 A et d'une durée de mi-amplitude de 30 μ s. Si la capacité est plus faible, l'essai doit avoir lieu sous une tension d'autant plus grande. Cette prescription paraît suffisamment sévère, car il est fort peu probable qu'un

coup de foudre éloigné dans une ligne engendre une onde de choc supérieure à 1500 A et 30 μ s dans un poste. En revanche, si la foudre tombe à proximité immédiate, le condensateur risque d'être perforé.

Du fait que des essais sous tension de choc et tension alternative sont difficilement exécutables à cause de la grande capacité, il n'est prévu qu'un essai sous tension continue appliquée entre les armatures. Par contre, entre les armatures réunies et la terre, il y a lieu d'exécuter un essai complet, c'est-à-dire un essai sous tension de choc selon les prescriptions normales et un essai d'une minute à la fréquence industrielle sous les mêmes tensions que pour les transformateurs à bain d'huile.

Les condensateurs de couplage et de protection contre les surtensions ont généralement une capacité plus faible. Mais, précisément pour cette raison, une isolation plus grande est économiquement supportable. Il y a donc lieu d'exécuter un essai complet sous tension de choc. Un essai d'une minute est également prescrit, qui doit avoir lieu si possible sous tension alternative (ou sous tension continue si l'on ne peut pas faire autrement). La tension d'essai est généralement la même que pour les appareils à haute tension, sauf en dessous d'une tension nominale de 20 kV, où une réduction est autorisée pour des raisons d'ordre économique, les valeurs de la tension d'essai devant néanmoins ne pas être inférieures à celles prescrites pour les transformateurs.

Pour les *voltmètres statiques*,

qui sont les seuls instruments qui entrent en ligne de compte dans les installations à courant alternatif à haute tension, les prescriptions pour les essais sont exactement les mêmes que pour les condensateurs de couplage.

Pour les *câbles*,

il existe déjà des prescriptions suisses (Recommandations de l'ASE pour câbles à haute tension (Publ. N° 164f). Le CT 28 a adopté les essais de 20 et 15 minutes figurant dans ces prescriptions, sous une tension égale à 2,5 fois la tension nominale des conducteurs.

La preuve devant également être apportée que les boîtes d'extrémité de câbles ont une résistance d'isolement qui correspond au reste du matériel, un essai d'une minute est prescrit pour les câbles équipés de leurs boîtes d'extrémité, où la tension d'essai doit atteindre les mêmes valeurs que pour l'essai des appareils à haute tension. En général, cette tension est sensiblement plus élevée que celle appliquée à l'essai de 20 minutes. Toutefois, en raison de la durée plus brève, cela est admissible de l'avis des experts, sans que l'isolement actuellement en usage n'ait besoin d'être renforcé.

Toutes ces prescriptions relatives à l'essai d'isolement sont encore passablement incomplètes, mais ce n'est pas la tâche des Règles pour la coordination d'établir des prescriptions complètes pour le différent matériel. Ce sont les divers Comités Techniques qui devront compléter les prescriptions relatives à l'isolement du matériel dont ils ont à s'occuper. Les Règles pour la coordination ne doivent

en effet renfermer que les prescriptions qui, en raison du montage d'ensemble de matériel différent, ne peuvent pas être établies sans tenir compte du reste du matériel.

Il va de soi que toutes les prescriptions relatives aux tensions de choc sont dans ce cas, puisque la résistance aux tensions de choc doit, dans chaque niveau, être la même pour tout le matériel. On pourrait en revanche se demander si les Règles pour la coordination ont à s'occuper de la résistance d'isolement à la fréquence industrielle. C'est bien le cas, car la résistance d'isolement au choc et à la fréquence industrielle ont une certaine relation, puisque la détermination de la résistance au choc détermine également plus ou moins la résistance à la fréquence industrielle. Plusieurs CT ont d'ailleurs directement attendu que le CT 28 leur fournisse ces données.

Normalisation du matériel et choix de celui-ci suivant la tension de service

En établissant les Règles et recommandations pour la coordination des isollements, on a attaché une grande importance à une normalisation du matériel, au point de vue de sa résistance d'isolement. A cet effet, on a fixé une nouvelle notion, celle de la tension d'isolement nominale (U_i), c'est-à-dire la tension pour laquelle l'isolement est dimensionné et selon laquelle il est désigné, et l'on a introduit dix valeurs normales de cette tension, à savoir 3, 10, 20, 30, 45, 60, 80, 110, 150 et 220 kV⁶). A quelques rares exceptions près, l'isolement du matériel ne doit être choisi que parmi les valeurs normales ci-dessus. Les Règles pour la coordination prescrivent, pour chacune de ces valeurs de la tension d'isolement nominale, la résistance d'isolement (c'est-à-dire la tension 50 % de contournement au choc, la tension d'essai d'une minute, etc.) pour le différent matériel. C'est avec ce matériel que les installations doivent être construites, quel que soit le degré d'isolement (I ou II).

Le choix du matériel suivant la tension de service s'opère en déterminant tout d'abord la tension d'isolement nominale *minimum admissible*. Dans ce but, on choisit une des dix valeurs normales indiquées ci-dessus, de telle sorte que la tension de service de l'installation ne dépasse cette valeur que de 15 % au maximum. Pour le degré d'isolement I, il ne doit être fait usage que de matériel dont la tension d'isolement nominale est égale à la plus petite tension d'isolement nominale admissible de l'installation. Pour le degré d'isolement II, on utilise du matériel dont la tension d'isolement nominale présente la valeur normale immédiatement supérieure. Toutefois, pour les tensions nominales d'installations qui dépassent 110 kV, du matériel à tension d'isolement nominale ainsi augmentée n'entre pas en ligne de compte, car dans ce domaine de tension la résistance d'isolement du degré I doit être dans tous les cas suffisante.

Supposons, par exemple, que l'on ait affaire à une tension maximum de service de 50 kV.

⁶) Les valeurs intermédiaires de 6 et 15 kV sont également prévues, mais uniquement pour des cas exceptionnels.

La plus petite tension d'isolement nominale admissible sera de 45 kV (la tension de service ne doit alors pas dépasser la valeur de $1,15 \times 45 = 52$ kV). Pour le degré d'isolement I, on utilisera dans ce cas du matériel prévu pour une tension d'isolement nominale de 45 kV et, pour le degré d'isolement II, du matériel construit pour 60 kV. Par contre, si la tension maximum de service est de 55 kV, il faut utiliser du matériel prévu pour une tension d'isolement nominale *d'au moins* 60 kV. Une installation dont la tension de service est de 55 kV et qui est équipée de matériel construit pour une tension d'isolement nominale de 60 kV présente donc uniquement le degré d'isolement I.

Gradation des isolements en cas de chocs de tension élevés et à front raide

Pour terminer cet exposé, nous mentionnerons brièvement une question primordiale. La gradation des isolements est une tâche extrêmement compliquée, qui ne peut pas être résolue sans avoir recours à certaines simplifications. Le CT 28 a, en conséquence, prévu tout d'abord la gradation pour des chocs de tension de la forme normale $1|50 \mu s$ et avec des valeurs de crête rapprochées de la tension minimum de contournement (dite tension 50% de contournement). Afin que ces suppositions soient pratiquement réalisées, il y a lieu de prendre des mesures pour empêcher que des ondes de surtension élevées, à front raide, ne pénètrent dans les postes. Pour cela, il est nécessaire de prévoir une bonne protection des bâtiments contre la foudre ou, lorsqu'il s'agit de postes extérieurs, d'aménager des écrans appropriés, et parfois de munir les lignes aériennes de câbles de terre jusqu'à une certaine distance d'un poste.

Il est néanmoins utile de savoir comment la gradation est capable d'agir en présence d'ondes de surtension élevées à front raide. Dans un pareil cas, l'écart entre la tension d'amorçage d'un parafoudre et la tension de contournement du matériel n'est jamais plus petit, mais au contraire plus grand, car les parafoudres modernes ont une caractéristique de choc beaucoup plus plate que celle des distances disruptives du matériel à haute tension. Seulement, cela ne signifie nullement que la gradation sera dans tous les cas plus sûre, car, en effet, lorsqu'un parafoudre est installé à une certaine distance du matériel à protéger, l'écart entre les deux tensions *doit* être d'autant plus grand que le front des ondes de surtension est plus raide. Une protection contre les ondes à front très raide n'est donc assurée que si les parafoudres ne sont pas trop éloignés du matériel qu'ils doivent protéger.

En ce qui concerne la gradation entre différentes distances disruptives (par exemple, dans le cas d'un disjoncteur, la distance d'ouverture dans l'air et la distance disruptive par rapport à la terre), la sécurité ne peut qu'être meilleure quand il s'agit d'ondes élevées à front raide. De nombreux essais ont démontré que dans le domaine de la tension minimum de contournement, il se produit parfois un amorçage par une fausse distance de contournement, tandis que le contournement a toujours lieu à l'endroit voulu lorsqu'il s'agit d'ondes plus éle-

vées à front raide. Pour cela, il faut évidemment que le contournement défectueux dans le domaine de la tension minimum ne se produise que rarement, c'est-à-dire seulement pour un petit pourcentage du nombre de chocs appliqués.

La figure 12 montre, à titre d'exemple, le cas d'un disjoncteur pneumatique dont la distance disruptive entre deux pôles était échelonnée par rapport à la distance disruptive entre pôle et terre.

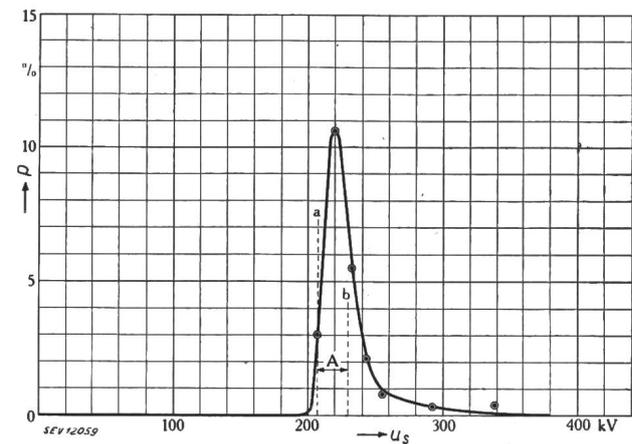


Fig. 12

Pourcentage des amorçages intempestifs p entre les pôles d'un disjoncteur pneumatique ultra-rapide sollicité par des chocs de tension positifs $1|50 \mu s$ de différentes valeurs de crête, en fonction de la tension appliquée U_s .

a Tension 50 % de contournement au choc entre pôle et terre
b Tension 50 % de contournement au choc entre les pôles
La gradation des isolements (A) est de 9 %.

La tension 50 % de contournement de la première de ces distances est représentée en *b*, celle de la seconde en *a*. Pour différentes tensions, un grand nombre de chocs ont été appliqués à ce disjoncteur et l'on a relevé, en ordonnées, le nombre des contournements entre pôles, par rapport au nombre total des chocs appliqués. Dans le domaine des tensions 50 % de contournement, la probabilité d'un contournement à faux est d'environ 10 %. En dessous de 200 kV, cette probabilité est nulle. Pour des valeurs supérieures à la tension de crête, elle diminue également rapidement et est très faible aux tensions élevées.

La valeur de crête de la courbe des contournements à faux est très rapidement abaissée lorsque la gradation est plus marquée. Dans l'exemple reproduit sur la figure 12, nous avons intentionnellement choisi le cas d'une gradation insuffisante, car cela permet de montrer plus distinctement que la probabilité d'un fonctionnement à faux diminue quand la tension augmente, dès que la valeur de crête est dépassée.

Il en est tout autrement pour la gradation d'isolements solides ou liquides, par rapport aux distances dans l'air. Lorsque, par exemple, l'isolement intérieur d'un transformateur est parfaitement protégé dans le domaine de la tension 50 % de contournement au choc, par le montage d'éclateurs de sécurité à ses bornes, il peut néanmoins arriver que l'isolement intérieur soit perforé par des ondes très élevées à front raide, avant que l'éclateur de sécurité n'ait fonctionné. Pour protéger efficacement cet isolement intérieur contre ces types d'ondes,

par des éclateurs à cornes, il faudrait — pour le même réglage de la distance entre les cornes — renforcer extrêmement l'isolement intérieur, ce qui serait beaucoup trop coûteux. Dans les présentes Règles pour la coordination, on a donc renoncé volontairement à une telle exigence, qui n'est d'ailleurs prescrite par aucun autre pays, ni par des recommandations internationales. En utilisant des parafoudres, l'isolement intérieur des transforma-

teurs peut, par contre, être efficacement protégé contre des chocs de tension élevés, à front raide.

Bibliographie

- [1] *Wanger, W.*: Stossüberschlagsmessungen an Stabfunkenstrecken. Bull. ASE t. 34(1943), N° 8, p. 193...201.
 [2] *Wanger, W.* et *W. Frey*: De la coordination de l'isolement et du degré de sécurité des installations, pour différentes valeurs de la graduation, Rev. Brown Boveri t. 30(1943), N° 9/10, p. 259...266.

Adresse de l'auteur:

W. Wanger, Geissbergstrasse 47, Ennetbaden.

Wirtschaftliche Mitteilungen — Communications de nature économique

Données économiques suisses

(Extraits de «La Vie économique» et du «Bulletin mensuel Banque Nationale Suisse»)

No.		Octobre	
		1946	1947
1.	Importations . . . } (janvier-octobre) . . . } Exportations . . . } (janvier-octobre) . . . }	303,7 (2724,4)	441,0 (3824,1)
2.	Marché du travail: demandes de places	2034	1628
3.	Index du coût de la vie Index du commerce de gros } Juillet 1914 } = 100 }	212	223
	Prix-courant de détail (moyenne de 33 villes)		
	Eclairage électrique } cts/kWh } Gaz cts/m ³ } Coke d'usine à gaz } frs/100 kg }	34 (68) 31 (148) 18,82 (376)	33 (66) 31 (148) 19,72 (394)
4.	Permis délivrés pour logements à construire dans 33 villes (janvier-octobre)	881 (10 324)	1191 (12 015)
5.	Taux d'escompte officiel . %	1,50	1,50
6.	Banque Nationale (p. ultimo)		
	Billets en circulation 10 ⁶ frs	3858	4192
	Autres engagements à vue 10 ⁶ frs	1095	1098
	Encaisse or et devises or 10 ⁶ frs	5064	5407
	Couverture en or des billets en circulation et des autres engagements à vue %	98,82	101,60
7.	Indices des bourses suisses (le 25 du mois)		
	Obligations	103	100
	Actions	226	254
	Actions industrielles	345	388
8.	Faillites	25	24
	(janvier-octobre)	(233)	(302)
	Concordats	4	8
	(janvier-octobre)	(37)	(35)
9.	Statistique du tourisme		
	Occupation moyenne des lits existants, en %	Septembre 1946 35,3	1947 38,9
10.	Recettes d'exploitation des CFF seuls		
		Septembre 1946	1947
	Marchandises . . . } (janvier-septembre) } Voyageurs . . . } (janvier-septembre) }	26 858 (250 901)	33 527 (276 746)
	23 330 (218 385)		

Miscellanea

In memoriam

Otto Knöpfli †. In der Nacht vom 4. auf den 5. Oktober 1947 entschlief im Krankenhaus Hirslanden in Zürich, wo er durch eine Operation von seiner Krankheit geheilt zu werden

hoffte, Otto Knöpfli, Ingenieur, Chef der Firma Otto Knöpfli, Zürich, Kollektivmitglied des SEV.

Otto Knöpfli wurde als Sohn eines Baumeisters am 12. Februar 1882 in Andelfingen geboren und erhielt in der Folge seine Erziehung und Ausbildung in Basel, wohin sein Vater das Baugeschäft verlegt hatte. Früh schon zeigte Otto Knöpfli Interesse und Verständnis an technischen Einrichtungen und an technisch-wissenschaftlicher Literatur. Durch eifriges Studium neben seiner praktischen Betätigung erwarb sich Otto Knöpfli jene weiteren Kenntnisse, die er sich eigentlich in einer höheren technischen Lehranstalt holen wollte. Die durch den allzufrühen Tod seines Vaters veränderten Verhältnisse wiesen ihm einen anderen Weg. Zu einer Erwerbstätigkeit gezwungen, entledigte er sich mit Energie, Beharrlichkeit und Gründlichkeit der an ihn gestellten und selbst übernom-



Otto Knöpfli
1882—1947

menen Aufgaben. Im Jahre 1903 von der Maschinenfabrik Oerlikon engagiert, diente er vorerst für technische Arbeiten am Prüfstand für Motoren, Generatoren und Apparate und später als Chef-Elektriker bis ins Jahr 1918, als er einem Ruf der Firma Schindler & Cie. A.-G. in Luzern Folge gab. Sein Wirken in Luzern als Abteilungschef und bald als Direktor dauerte bis 1925. In diesem Jahr holte die Maschinenfabrik Oerlikon Otto Knöpfli wieder zurück für den Vertrauensposten eines Vertreters in Argentinien. Im Jahre 1934 trat Otto Knöpfli, von Buenos Aires und seinen dortigen Freunden Abschied nehmend, die Heimreise an, verliess nach relativ kurzer Zeit die Dienste bei der Maschinenfabrik Oerlikon und übernahm käuflich das Geschäft Nicolet & Cie., Fabrik elektrischer Apparate, an der Badenerstrasse 60 in Zürich.

Ingeniös und mit grosser Energie entwickelte er unter anderem die Fabrikation von Spezial-Schalt- und Betätigungs-Apparaturen, und es war eine Freude zu sehen, wie das Geschäft unter seiner Leitung zu raschem Aufschwung kam. Ausserhalb seines geschäftlichen Wirkens, im Kreise seiner Freunde und Bekannten, liess er oft seine Geselligkeit, seine Konzilianz und seinen Humor zur Geltung kommen. Seine Wertschätzung als Gesellschafter verband sich mit der Hochachtung vor seinem technischen Wissen und Schaffen zu gebührender Verehrung. W.