Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 14 (1923)

Heft: 6

Rubrik: Guide pour la protection des installations électriques à courant alternatif contre les surtensions

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 13.08.2025

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich,
im Januar dazu die Beilage „Jahresheft".

Alle den **Inhalt** des „Bulletin" betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat
des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins
Seefeldstrasse 301, Zürich 8 — Telephon: Hottingen 7320,
welches die Redaktion besorgt.

Alle Zuschriften betreffend **Abonnement, Expedition** und **Inserate** sind zu richten an den Verlag:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.
Stauffacherquai 36/38 Zürich 4 Telephon Selnau 7016

Ce bulletin paraît mensuellement. — „**L'Annuaire**" est distribué comme supplément dans le courant de janvier.

Prière d'adresser toutes les communications concernant la **matière** du „Bulletin" au

Secrétariat général
de l'Association Suisse des Electriciens
Seefeldstrasse 301, Zurich 8 — Telephon: Hottingen 7320
qui s'occupe de la rédaction.

Toutes les correspondances concernant les **abonnements, l'expédition** et les **annonces**, doivent être adressées à l'éditeur

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Stauffacherquai 36/38 Zurich 4 Telephon Selnau 7016

Abonnementspreis (für Mitglieder des S. E. V. gratis)
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft:
Schweiz Fr. 20.—, Ausland Fr. 25.—
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 2.— plus Porto.

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A. S. E.), y compris l'Annuaire Fr. 20.—
pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 2.—, port en plus.

XIV. Jahrgang
XIVe Année

Bulletin No. 6

Juni
Juin 1923

Guide pour la protection des installations électriques à courant alternatif contre les surtensions,[1])

établi par le groupe *b* (protection contre les surtensions) de la commission pour les appareils à haute tension et la protection contre l'incendie et les surtensions[2]) de l'Association suisse des électriciens et de l'Union des Centrales suisses d'électricité (approuvées par l'assemblée générale de l'A. S. E. du ..... 1923).

A. Introduction.

Rédigé en allemand par M. Schait, ing. à Zurich, sur la demande du groupe b (protection contre les surtensions).

Lorsque le régime d'une installation électrique est modifié, soit par suite d'une action voulue (manœuvre d'un interrupteur), soit involontairement (court-circuit, contact à la terre), l'état stationnaire primitif tend vers un nouvel état stationnaire. Ce passage à un nouvel état d'équilibre est un phénomène électromagnétique qui se traduit par des oscillations de tension et de courant dont les conditions sont fixées par l'inductance et la capacité des circuits de l'installation. Ce phénomène peut être comparé à celui qui se produit dans un ampèremètre lorsque l'équipage mobile se met à osciller quand le courant passe d'une valeur à une autre; les oscillations sont réglées ici par le ressort et la masse du système mobile. La résistance ohmique des circuits électriques joue le même rôle que les frottements dans l'ampèremètre: elle amortit les oscillations et permet d'atteindre un état per-

[1]) Ce guide remplace le „rapport sur la protection des installations électriques contre les surtensions"; voir Bulletin 1916, No. 6, page 137 et suivantes. La commission compte faire paraître un complément de ce guide qui traitera de la protection des installations à courant continu.

Les observations que les membres de l'A. S. E. auraient à présenter devront être adressées au Secrétariat (Seefeldstrasse 301, Zurich) jusqu'au 5 août 1923 au plûtard.

[2]) Le groupe *b* se compose de M. Kummer, professeur à Zurich, président, et de MM. Dr. Bauer-Berne, Gysel-Zurich, Dr. Roth-Baden, Schmidt-Lausanne et du secrétaire général. Collaborateurs: M. H. Schait-Zurich et l'ingenieur en chef de l'inspectorat des installations à fort courant.

manent. L'expérience a démontré que ces oscillations pouvaient être dangereuses parce qu'elles donnent lieu à des différences de potentiel momentanées sensiblement supérieures à celles du régime stationnaire. Ces surtensions qui sollicitent les diélectriques à des contraintes plus élevées que la tension de régime peuvent devenir dangereuses selon leur amplitude, leur répartition sur les conducteurs et dans le diélectrique, leur fréquence (répétition) et leur durée.

Les données ci-après, basées sur l'expérience, permettent de juger du caractère dangereux ou non d'une surtension. Les installations dont la tension d'exploitation est d'au moins 1000 volts (tension composée) sont à considérer comme étant en danger dès que la surtension dépasse le 75 % environ de la tension d'essai de la partie de l'installation qui a subi l'essai le moins sévère. Les enroulements sont en outre considérés comme étant en danger si les tensions entre spires dépassent en un lieu quelconque les tensions produites lors de l'essai sous tension surélevée et de l'essai par ondes à front raide artificielles[3]). Quand il s'agit de surtensions de faible durée les isolants solides et surtout liquides ne sont en danger que sous des surtensions sensiblement plus élevées. On ne sait pas encore dans quelle proportion le danger augmente avec la fréquence (répétition) et la durée des surtensions, car jusqu'à présent on ne possède pas de dispositifs enrégistreurs convenables par l'études de cette question. Seules l'expérience et les observations faites dans la pratique ont permis de reconnaître les surtensions qui mettent particulièrement en danger la sécurité des installations. Comme les surtensions apparaissent fréquemment sous forme d'ondes à front raide, un exposé sur la nature de celles-ci facilitera la compréhension des phénomènes qui s'y rapportent.

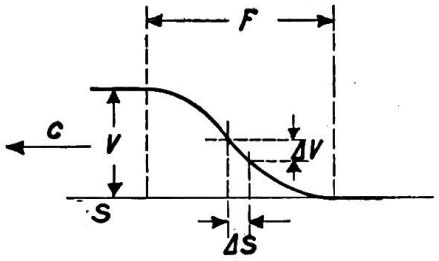

fig. 1

Onde de décharge.

F = front d'onde,
V = amplitude,
s = ligne,

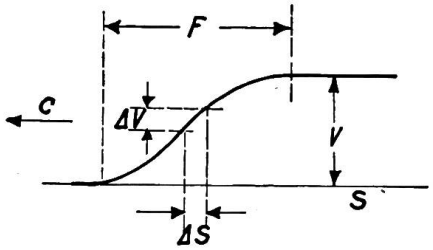

fig. 2

Onde de charge.

c = vitesse de propogation de l'onde,
$\frac{dV}{ds}$ = inclinaison du front d'onde.

Ondes à front raide.

Comme on vient de le voir, l'inductance et la capacité sont les constantes de ligne qui sont déterminantes pour la formation d'oscillations. L'oscillation consiste dans la transformation continue d'une forme d'énergie dans une autre. Du fait de la self et de la capacité du circuit, l'énergie électrique se transforme en énergie magnétique et inversement. Lorsque self et capacité sont uniformément réparties, on parle d'ondes mobiles (Wanderwellen); celles-ci sont soit des ondes de charge, soit des ondes de décharge, soit encore alternativement l'une et l'autre.

Les ondes de décharge (fig. 1) prennent naissance lorsqu'il se forme un arc entre un point d'un circuit électrique et la terre ou entre ce point et un point de polarité différente. Le point d'où l'arc jaillit prend alors instantanément un potentiel différent. Comme ce changement ne peut se propager qu'avec une vitesse finie, les points voisins gardent encore momentanément le potentiel primitif et il se produit une forte chute de potentiel dans le sens du circuit et sur une très faible longueur de celui-ci. Cette chute qui se propage avec une grande vitesse le long de la ligne sera accentuée encore si le potentiel de la ligne a été porté précédemment à une valeur anormale. Les mises à terre (arcs de décharge ensuite de surtensions d'origine atmosphérique ou contacts directs), les court-circuits et chaque manœuvre modifiant

[3]) Voir Bulletin A. S. E., 1923, No. 3, pages 188 et 189.

le régime peuvent donner lieu à des ondes de décharge. Lorsqu'une borne de transformateur est subitement mise à terre, il se forme une onde de décharge qui, lorsqu'elle atteint l'enroulement, met la première spire de celui-ci au potentiel 0 par rapport à la terre alors que les spires suivantes gardent encore la tension primitive; il se peut alors qu'entre deux parties voisines de l'enroulement la tension atteigne momentanément le centuple de la tension en service normal.

Les ondes de charge (fig. 2) ont leur origine dans une augmentation brusque du potentiel en un point d'un circuit (lors de manœuvres de couplage, dans le cas d'un coup de foudre direct) ou sur toute la longueur d'un circuit (en cas de coup de foudre indirect). Il se produit de nouveau une forte chute de potentiel dans le sens du circuit dont les conséquences sont en principe les mêmes que celles des ondes de décharge. La pratique a montré cependant qu'en ce qui concerne la chute de potentiel elle-même, le danger est moindre dans le cas des coups de foudre indirects (chutes de potentiel très peu abruptes) ainsi que dans le cas de manœuvres de couplage (différences de potentiel peu élevées). Des ondes de décharge qui sont réfléchies aux extrémités d'une ligne deviennent des ondes de charge et inversement; les ondes qui vont et viennent peuvent donner naissance à des phénomènes de résonance dans les enroulements et autres parties des installations (voir page 310 et suivantes).

Les ondes mobiles qui présentent un front raide sont appelées ondes à front raide (Sprungwellen).

Dès qu'on eût reconnu le danger des ondes à front raide, on chercha les moyens d'adoucir la raideur de leur front, de les réfléchir et de les écouler à terre. Les bobines de self et les condensateurs furent employés pour renvoyer les ondes dans le réseau et pour adoucir la raideur des fronts d'onde. Dans les parafoudres à cornes et à rouleaux avec résistances, les parafoudres à péroxyde de plomb, les déchargeurs électrolytiques et autres, on crut avoir trouvé des moyens pour écouler les ondes à front raide à la terre. Les bobines de résistance devaient protéger les transformateurs et alternateurs en renvoyant les ondes à front raide dans le réseau où, par l'effet de la résistance ohmique, leur énergie devait se transformer en chaleur. Ces appareils divers ne furent pas sans effet mais ne donnèrent cependant pas tous les résultats désirés. Jusqu'à présent on a introduit dans le calcul des bobines de réactance des simplifications qui se sont montrées inadmissibles; on ne connait encore que très imparfaitement le rôle que jouent les selfs et leur calcul manque par conséquent de précision. Des expériences récentes ont prouvé que pour protéger un transformateur efficacement il faudrait des selfs de 3 à 5 mH, alors que les bobines employées jusqu'à ce jour atteignent au plus 1 mH et le plus souvent beaucoup moins.

De même les condensateurs ne peuvent être efficaces qu'à condition d'avoir une capacité suffisante. Ils doivent naturellement avant tout résister eux-mêmes aux surtensions et être soumis à des épreuves préalables pour le moins équivalentes à celles qu'on fait subir aux autres parties de l'installation.

Il est en général superflu de protéger par des bobines de réactance et des condensateurs les transformateurs et machines construits pour supporter les surtensions des ondes à front raide. Par contre, ces appareils sont recommandables pour protéger les génératrices et moteurs à haute tension couplés directement à des réseaux aériens. Les déchargeurs à étincelles ne remplissent que rarement leur but parce que la résistance placée en série, indispensable pour éteindre sûrement l'arc et l'empêcher de devenir permanent, est en général beaucoup trop grande pour permettre l'écoulement de l'énergie contenue dans l'onde à front raide. Cette résistance ne devrait pas dépasser la valeur caractéristique[4]) (Wellenwiderstand) de la ligne aérienne à laquelle le parafoudre est connecté, c'est-à-dire ne pas être supérieure à 500 ÷ 600 ohms.

[4]) On entend par là la racine carrée du rapport de l'inductance à la capacité contre terre de 1 km de conducteur simple.

Or, pour empêcher la formation d'un arc permanent au parafoudre on ne peut pas, même dans les exploitations à tension modérée, réduire la résistance à la valeur indiquée, et, lorsque la tension est plus élevée (11 kV par exemple on emploi de résistances hydrauliques), il faut avoir recours à des résistances si élevées que l'écoulement de l'énergie de l'onde mobile n'est plus suffisant. Dès qu'on fait usage de tensions supérieures, la dépense à faire pour les appareils de protection, spécialement en ce qui concerne la place nécessaire, est en réalité hors de proportion avec l'effet protecteur. La construction de résistances, qui devraient toujours être en état de fonctionner sûrement, rencontre du reste de sérieuses difficultés. Ces résistances (le plus souvent des résistances liquides) offrent un volume trop petit; elles s'échauffent rapidement et leur résitivité diminue. Elles laissent alors passer trop de courant; l'arc amorcé persiste et saute à la terre, ou bien il y a projection de liquide au dehors (explosion). Les résultats satisfaisants qu'on prétend avoir obtenus en bien des endroits en employant des parafoudres pour combattre l'effet des ondes à front raide (pour autant qu'il s'agit d'ondes de charge) proviennent d'observations trop superficielles et d'une fausse interprétation des phénomènes remarqués. Qu'on se rappelle les cas nombreux où le chef d'exploitation s'est estimé heureux de pouvoir enfin éviter les accidents provoqués par les parafoudres à étincelles eux-mêmes et dûs à leur installation irrationnelle et à l'insuffisance des résistances, et les cas où les nombreuses avaries aux transformateurs et appareils n'ont disparu que parce que les perfectionnements apportés aux appareils de protection marchaient de pair avec un renforcement de l'isolation des parties de l'installation particulièrement exposées. L'avenir nous apprendra ce qu'il faut penser des nouveaux déchargeurs à extinction automatique de l'arc. On manque d'observations précises et sûres pour pouvoir recommander les autres déchargeurs nommés. (L'effet de protection des déchargeurs contre les surtensions provenant de mises à la terre intermittentes est analysé à la page 305).

En principe les déchargeurs à étincelles constituent un bon moyen de protection contre les surtensions. Ils pourront rendre de bon services à condition:

1° de fonctionner pour un réglage donné à une tension bien déterminée et pratiquement constante,

2° que la valeur ohmique de la résistance soit aussi faible que possible et en tous les cas inférieure à la valeur caractéristique de la ligne protégée,

3° qu'à l'amorçage de l'arc la résistance limite et coupe immédiatement le courant d'exploitation qui tend à s'écouler sans provoquer de perturbations.

On doit toujours se rappeler que les phénomènes de surtensions sont en réalité beaucoup plus compliqués qu'on ne l'a cru d'abord et que pourraient le faire supposer les images simplifiées par lesquelles on a cherché à faire comprendre aux praticiens des phénomènes encore très imparfaitement connus.

Il y a peu d'années on admettait encore que les ondes à front raide ne pouvaient créer de surtensions que dans les spires d'entrée des enroulements et que s'étaient précisement ces spires d'entrée qui adoucissaient elles-mêmes la raideur des fronts d'onde. Cette supposition est juste pour les transformateurs de petite et moyenne puissance ainsi que les avaries constatées le prouvent. Lorsqu'on examine par contre des transformateurs de grande puissance, qui n'ont pas été construits spécialement pour supporter des ondes à front raide, on constate que des percements se produisent aussi dans les spires intérieures. Cela indique que les phénomènes sont plus compliqués qu'on ne le supposait et que les ondes à front raide venant du dehors amorcent des oscillations internes capables de produire à leur tour des surtensions entre deux spires situées à l'intérieur du transformateur. Le renforcement de l'isolation des spires d'entrée s'est montré insuffisant pour les grands transformateurs et il n'est aujourd'hui pas encore possible de préciser suffisamment l'influence des bobines de réactance et des condensateurs sur les ondes perturbatrices.

Dans les installations de plus de 100 kV les pertes par corona constituent une autoprotection. Elles diminuent l'énergie contenue dans les ondes mobiles, adoucissent leur front et atténuent leur amplitude.

De ce que nous venons de dire il résulte qu'il n'existe aujourd'hui pas de moyen de protection sûr contre les effets des ondes à front raide et que le mieux qu'on puisse faire pour de nouvelles installations c'est de construire des transformateurs et machines capables de supporter les surtensions des ondes à front raide.

Les transformateurs et si possible aussi les génératrices et moteurs doivent par conséquent être soumis non seulement aux essais de surtensions ordinaires, mais aussi à des épreuves au moyen d'ondes perturbatrices artificielles suivant des normes bien établies[5]).

Surtensions dues aux manœuvres de couplage.

On a constaté que dans certaines circonstances encore mal définies des surtensions dangereuses peuvent se produire par les manœuvres des interrupteurs de lignes, de transformateurs et de moteurs à haute tension. Un manque de simultanéité dans la fermeture des phases semble avoir une influence sur les surtensions. On a aussi constaté que la puissance et la saturation des transformateurs et des moteurs jouent un rôle dans les surtensions. Pour empêcher la formation de ces surtensions, on munit les interrupteurs de résistance de choc.

L'expérience a cependant prouvé que ces résistances de choc sont en général superflues pour les interrupteurs de lignes, mais que leur emploi est recommandable pour des transformateurs de plus de 40 kV qui sont mis en circuit à vide. Pour les moteurs on n'est pas encore fixé sur l'utilité de ces résistances. Les résistances de choc doivent être dimensionnées de telle sorte que le courant à vide des transformateurs produise dans celles-ci une chute de tension égale à 0,5 à 0,7 fois la tension d'exploitation.

Mises à terre intermittentes.

La plupart des perturbations dans les installations non protégées a pour cause une mise à la terre intermittente qui peut être causée par une surtension, par des oiseaux, par un objet jeté sur la ligne, par la chute d'un arbre ou par une isolation défectueuse. La cause du défaut se trouve le plus souvent dans le réseau. Une mise à la terre est appelée intermittente lorsque l'arc s'éteint et se réamorce pendant chaque demi-période. La dissymétrie créée dans le réseau par le contact à la terre donne lieu lors de l'extinction de l'arc à des tensions de sens constant qui se superposent à la tension de phase. La surtension produite par rapport à la terre fait que l'arc se réamorce et produit ainsi des ondes à front raide. Dans un réseau triphasé il se produit par allumage répété de l'arc des surtensions entre fils et terre qui atteignent, suivant l'amortissement dû à la résistance, dans les phases saines (non mises à la terre), de 1,7 à 2,3 fois la tension composée et dans la phase malade, lors de l'extinction de l'arc, de 1,7 à 2,2 fois la tension composée. Les tensions de sens constant atteignent alors de 1,1 à 1,5 fois la tension composée. Ces valeurs ne sont cependant atteintes que lorsque le courant de capacité à la terre atteint environ 1,5 ampères à la fréquence de 50 périodes.

Les surtensions provenant de mises à terre intermittentes et les effets nuisibles de l'arc peuvent être évités par la liaison à la terre du point neutre de l'installation ou par l'emploi de bobines d'extinction ou de parafoudres. (Pour être complets mentionnons encore les commutateurs de mise à terre et les extincteurs d'arc Nicholson, qui mettent la phase défectueuse automatiquement à la terre, mais avec lesquels il n'a encore pas été fait d'expériences suffisantes.)

Lorsque le point neutre a été relié à la terre, directement ou par l'intermédiaire d'une faible résistance (voir fig. 3 et 4) et qu'il se produit un contact à la

[5]) Normes pour l'essai des transformateurs au moyen d'ondes artificielles. Bulletin A. S. E. 1923, No. 3, pages 188 et 189. Pour les alternateurs et les moteurs ces normes sont encore à établir.

terre, la ligne défectueuse est immédiatement mise hors circuit par son disjoncteur automatique. Quand on emploie des bobines d'extinction le courant inductif absorbé par la bobine (voir fig. 5) compense le courant capacitif de décharge vers la terre et l'arc s'éteint sans qu'il y ait interruption de service. Les phases saines prennent alors par rapport à la terre la tension composée, ce qui n'est pas le cas lorsque le neutre est relié directement à la terre. Pendant que s'effectue le passage de la tension simple à la tension composée et jusqu'à l'instant où le nouvel état d'équilibre est atteint, la tension des phases saines par rapport à la terre peut, selon la résistance du réseau, dépasser la tension composée d'une valeur pouvant aller jusqu'à 50 %. Les tensions de sens constant qui rétablissent l'équilibre s'écoulent à terre par le point neutre ou par la bobine d'extinction.

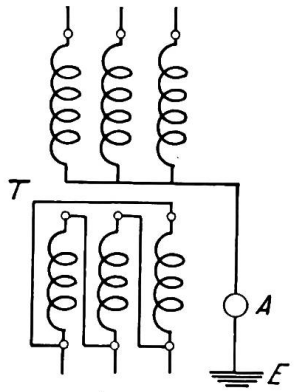

fig. 3

Mise à terre directe.

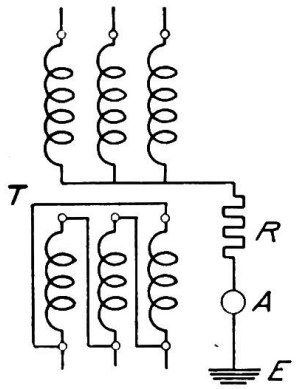

fig. 4

Mise à terre par intermédiaire d'une résistance ohmique.

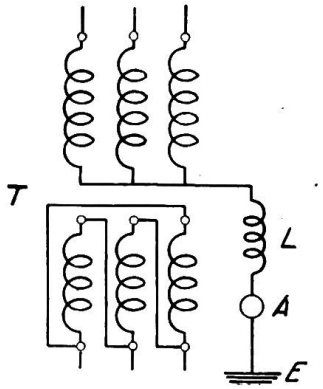

fig. 5

Mise à terre par intermédiaire d'une bobine extinctrice.

T = transformateur, R = résistance ohmique, E = terre.
L = bobine extinctrice, A = Ampèremètre,

La bobine d'extinction ne supprime l'arc vers la terre sans interruption de service que si, à l'endroit du contact à la terre, le diélectrique se régénère automatiquement, ce qui est le cas dans les réseaux aériens, où l'air joue le rôle de diélectrique. Il en est autrement pour un réseau souterrain, où l'arc amorcé détruit aussitôt l'isolant. La bobine d'extinction ne convient donc pas pour les réseaux à câbles, dans lesquels il convient de relier le point neutre directement à terre.

L'expérience a démontré qu'il est bon de protéger un réseau contre les suites d'une mise à terre intermittente dès que la tension d'exploitation dépasse 1000 V et que le courant capacitif entre ligne et terre dépasse $1{,}5 \cdot \frac{\text{fréquence}}{50}$ ampères. Le courant capacitif atteint cette valeur dans un réseau aérien lorsque son étendue, mesurée en km, dépasse environ $\frac{600}{\text{tension composé en kV}}$.

(Dans un réseau souterrain le courant capacitif entre ligne et terre atteint la même valeur déjà pour une étendue soixante fois moindre.)

La mise directe à la terre du point neutre constitue une protection efficace quelle que soit la tension d'exploitation; l'emploi des bobines d'extinction au contraire se recommande moins pour des tensions d'exploitation au-dessus de 80 kV. A partir de cette tension, les contacts à la terre deviennent rares et la bobine d'extinction perd de son importance. La mise à la terre directe du neutre a du reste le grand avantage qu'elle permet de réduire la tension d'essai de l'installation, pour la bonne raison que la tension composée ne peut plus en aucun cas exister entre fil et terre. Cet avantage a son importance au point de vue du coût de l'installation surtout s'il s'agit de très hautes tensions.

L'emploi d'une résistance intermédiaire entre point neutre et terre s'impose dans le cas où une mise à la terre pourrait donner lieu à un courant de court-circuit mettant des personnes en danger ou échauffant outre mesure l'enveloppe des câbles. Dès qu'on emploie une résistance entre neutre et terre on ne peut plus éviter, lors de mises à terre, l'élévation de la tension entre les phases intactes et la terre.

Dans des réseaux mixtes aériens et souterrains (câbles), la bobine d'extinction est recommandable pour éviter les arrêts d'exploitation au moment des mises à terre de caractère passager sur la partie aérienne. Les câbles doivent alors être isolés pour la tension composée entre phase et terre. Si le réseau est en majeure partie souterrain, il vaut mieux s'en tenir à la mise à la terre directe du point neutre qui provoque la mise hors circuit immédiate d'un câble défectueux.

Si l'on adopte pour un réseau la protection par bobine d'extinction, chaque partie indépendante du réseau doit être munie d'une bobine. Si c'est la liaison directe du point neutre à la terre qui est adoptée, il faut la réaliser auprès d'un nombre de transformateurs aussi grand que possible pour être certain de ne jamais avoir la tension composée entre une phase et la terre[6]). Il faut aussi dans ce cas faire usage d'un fil de terre sur les lignes à pylônes métalliques afin de supprimer tout danger pour les personnes se trouvant dans le voisinage des pylônes. Si des poteaux en bois sont intercalés dans ces lignes, il est nécessaire de relier les supports des isolateurs au fil de terre.

Lorsque le point neutre d'un réseau est mis à la terre les transformateurs sont à monter en étoile-triangle.

Les résistances entre point neutre et terre doivent supporter le courant de court-circuit à la terre pendant une demie minute, au moins, sans subir d'altération; elles ne doivent en aucun cas être trop résistantes et empêcher le fonctionnement des relais à maximum des disjoncteurs. Sur les lignes de plus de 80 kV, avec point neutre directement relié à la terre, on fera bien, en certains points de leur parcours, d'intervertir les phases de manière à obtenir au moins une rotation complète dans chaque tronçon de ligne indépendant; on arrive ainsi à éviter qu'elles n'influent les lignes téléphoniques et télégraphiques.

Les surtensions produites par les mises à terre intermittentes peuvent aussi être combattues au moyen de déchargeurs à étincelles. La somme des courants s'écoulant par les divers déchargeurs en fonctionnement doit pouvoir dépasser la moitié du courant capacitif de l'installation. L'emploi de bobines d'extinction ou la mise à la terre sont cependant préférables, puisqu'avec une dépense moindre, spécialement en ce qui concerne la place nécessaire, on supprime non seulement les surtensions mais aussi d'autres inconvénients des déchargeurs à étincelles (arcs et élévations de tension sur les phases saines).

Il est très à recommander d'intercaler dans les circuits, reliant les points neutres à la terre, des appareils permettant d'enrégistrer toutes les mises à la terre qui surviennent. Des renseignements très précieux peuvent être tirés du contrôle de ces perturbations, les plus importantes peut être qui se produisent dans les installations électriques.

Le champ électrostatique de l'atmosphère.

Les lignes aériennes sont sous l'influence du champ électrostatique de l'atmosphère; elles sont donc le siège de charges statiques dont le potentiel se superpose à la tension d'exploitation.

Ces charges peuvent se former lorsque le champ statique se modifie lentement (déplacement des nuages, etc.). Le phénomène étant lent, la charge se répartit uniformément sur le réseau. Lorsque l'isolation est parfaite et qu'aucun point du réseau n'est mis à la terre (par déchargeur hydraulique ou par l'intermédiaire de

[6]) L'influence de terres nombreuses sur les lignes téléphoniques n'est pas encore bien connue.

bobines de self par exemple) il se peut qu'il s'établisse entre réseau et terre des différences de potentiel élevées qui peuvent donner lieu à des arcs.

Des charges de ce genre peuvent aussi être libérées lorsque le champ statique se modifie brusquement (décharge vers la terre d'un nuage placé au dessus du réseau). On parle alors de *coups de foudre indirects.* La charge libérée sur un tronçon de ligne s'écoule dans les deux sens en donnant lieu à deux ondes de charge (voir page 303). Quoique ces ondes n'aient pas des fronts très raides, elles sont cependant dangereuses parce que la tension entre fil et terre peut momentanément être très élevée et donner lieu à un arc. Cet arc provoque à son tour, au point où il éclate contre terre, la formation d'une onde de décharge ou d'une succession d'ondes de décharge et de charge combinées (voir page 303) qui constituent la forme la plus dangereuse de surtensions d'origine atmosphérique; elles sont à front raide et produisent facilement des court-circuits à l'intérieur des enroulements entre spires et couches voisines. Le front d'onde s'aplatit au fur et à mesure que l'onde s'éloigne du lieu de la mise à terre. Les ondes provenant du voisinage de la station sont donc les plus dangereuses; lorsqu'elles ont leur origine à plus d'un km elles sont en général devenues inoffensives à l'arrivée à la station.

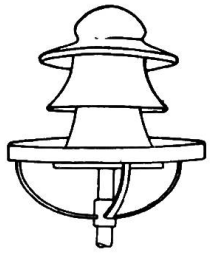

fig. 6

Isolateur à support avec anneau de protection.

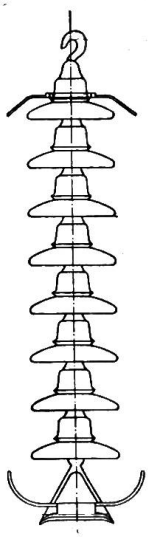

fig. 7

Isolateur à suspension avec cornes de protection.

Les coups de foudre directs constituent une autre forme de surtensions d'origine atmosphérique; la décharge d'un nuage sur les conduites électriques est presque toujours suivie immédiatement, et à peu de distance dupoint frappé par la foudre, d'une décharge de la conduite vers la terre.

Les installations de plus de 80 kV environ ne sont guère mises en danger par les surtensions d'origine atmosphérique. Leur isolation devant résister largement à la tension d'exploitation résiste par ce fait même aussi aux surtensions d'origine atmosphérique qui sont indépendantes de la tension d'exploitation. On a remarqué que le gradient du champ électrostatique atmosphérique est plus grand dans les points culminants qu'en plaine et que c'est en terrain accidenté que les coups de foudre directs et indirects et les surtensions produites sont les plus fortes et les plus fréquentes. Dans ces régions predéstinées aux coups de foudre on fera bien de munir les isolateurs fixes d'un anneau métallique protecteur enveloppant l'isolateur à la hauteur de sa base (voir fig. 6) et les isolateurs à suspension de cornes (voir fig. 7) afin de les protéger contre les effets destructifs de l'arc.

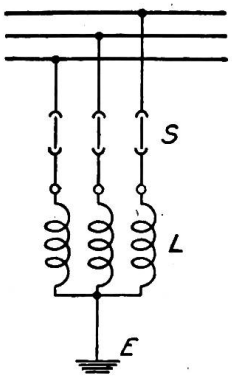

fig. 8

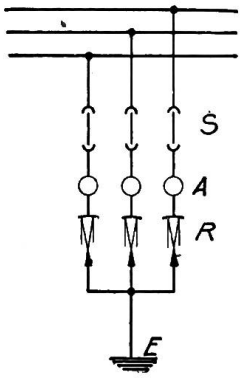

fig. 9

Bobine de self de mise à terre pour l'ecoulement des charges statiques.

résistance liquide de mise à terre

S = sectionneur, A = Ampèremètre,
L = bobine de self de mise à terre, E = terre.
R = résistance liquide,

Nous ne possédons aucun moyen pour empêcher les surtensions d'origine atmosphérique; nous ne pouvons que prendre des précautions pour en atténuer le danger. A l'égard des coups de foudre directs nous sommes impuissants; il n'existe aucun moyen sûr d'empêcher leur effet destructif, qui ne se fait du reste sentir que dans une rayon restreint autour du point frappé. Il est par contre possible d'atténuer par des mesures préventives le danger des autres surtensions d'origine atmosphérique. L'accumulation lente de charges statiques peut être empêchée par des dispositifs de mise à la terre (bobines de self, fig. 8), déchargeurs à jets d'eau (fig. 9).

Lorsqu'on relie le point neutre directement à la terre, ou qu'on fait usage de bobines d'extinction, tous les déchargeurs deviennent naturellement superflus. Un fil de terre placé au dessus de toute la ligne réduit les surtensions mais son effet protecteur n'est pas grand. Il n'est pas indiqué de munir une ligne de plus d'un fil protecteur; celui-ci ne se justifie du reste que s'il sert aussi à améliorer la mise à terre des pylônes métalliques. Pour une ligne sur poteaux en bois le fil de terre ne se recommande pas parce que, s'il réduit les surtensions de 30 % environ, il diminue aussi, et dans une bien plus forte mesure, l'isolation de la ligne par rapport à la terre.

Surtensions dûes aux effets de capacité.

Des surtensions dûes à des effets de capacité sont constatées dans les transformateurs de puissance et de mesure ainsi que sur les lignes de parcours parallèle au moment où une phase de la haute tension est mise à la terre, soit d'une façon passagère par un contact accidentel, soit d'une façon permanente comme dans les chemins de fer électriques. La tension entre enroulement haute tension et terre se répartit sur deux capacités montées en série dont les électrodes sont:

a) enroulement haute et enroulement basse tension,

b) enroulement basse tension et terre.

La partie de la tension totale qui est appliquée à cette dernière paire d'électrodes peut alors prendre des valeurs auxquelles l'isolation de l'enroulement basse tension peut ne pas résister. (Ce phénomène est analogue à celui qui se produit dans le cas de lignes aériennes soumises à l'influence du champ électrostatique de l'atmosphère; il n'y a qu'à remplacer le système de capacités ci-dessus par les capacités en série nuage-ligne et ligne-terre.) La valeur de la tension qui s'établira entre la partie basse tension et la terre dépendra de la capacité contre la terre des enroulements basse tension et de tous les conducteurs et machines qu'y sont connectés. Si cette capacité est petite, la tension pourra prendre des valeurs considérables; le cas peut se produire lorsque cette capacité est compensée par des bobines de self de mise à terre placées sur le côté basse tension. Les effets de la capacité entre conducteurs haute et basse tension, ainsi qu'entre fils de transmission d'énergie et fils de lignes télégraphiques et téléphoniques suivant un même tracé, peuvent également produire des surtensions.

On voit de suite qu'on peut rendre ces surtensions sans danger en augmentant la capacité des enroulements basse tension par rapport à la terre. Dans le cas de transformateurs on augmentera cette capacité en faisant usage de câbles ou même de condensateurs sur le côté basse tension. D'autre part les enroulements basse tension des transformateurs de mesure seront reliés à la terre.

Pour éviter les surtensions entre des lignes de tensions différentes qui suivent des tracés parallèles on peut augmenter l'écartement entre les deux lignes sur une partie de leur parcours au moins (tirer un tronçon de la ligne en câble), ou bien relier à la terre le neutre de la ligne qui est à la tension la plus basse. On peut aussi remédier à la situation en intervertissant les phases de la ligne haute tension le long de son parcours[7]; il faut alors, sur une section de ligne, deux mâts à interversion de phases. La rotation des phases sur les lignes présentant des inconvénients au point de vue exploitation et, les surtensions dues à la capacité n'étant pas très sensibles dans les installations de moins de 80 kV, il n'y a pas lieu d'avoir recours à l'interversion de phases tant qu'on ne dépasse pas cette tension.

Pour éviter des accidents il est bon de *toujours* mettre à la terre, par contact intime, tous les pôles de la ligne sur laquelle on veut travailler même s'il ne s'agit que de lignes à basse tension ou de lignes télégraphiques ou téléphoniques.

Passage direct de la tension des circuits la haute tension à ceux de basse tension.

La haute tension peut se communiquer aux circuits basse tension par contact direct, *principalement dans les transformateurs.* Un arc entre enroulement haute

[7]) Voir page 307.

tension et la terre peut lécher l'enroulement basse tension, ou bien l'arc peut sauter de l'enroulement haute tension directement à l'enroulement basse tension, ou bien encore de l'enroulement haute tension au fer des transformateurs ou aux bâtis et de là, si ces derniers ne sont pas convenablement reliés à la terre, à la basse tension. Un passage direct peut aussi être provoqué par une chute de fils dans un croisement de lignes aériennes. Un cas qui arrive fréquemment est celui d'un bâti mal relié à la terre mis accidentellement en contact avec l'enroulement haute tension. Un arc peut alors sauter de ce bâti vers la basse tension et créer un danger pour le personnel et aussi pour les appareils basse tension. Le passage de la tension peut aussi se faire par l'intermédiaire d'un éclateur à feuille de mica ou par le point neutre du circuit basse tension si ceux-ci sont connectés au bâti en question. Pour éviter ce danger la mise à la terre des bâtis de transformateurs doit être faite avec le plus grand soin, et la mise à la terre du neutre des enroulements basse tension, ainsi que, cas échéant, de l'éclateur à feuille de mica, ne doit pas se faire par l'intermédiaire des bâtis de transformateurs mais directement et en dehors du transformateur. Les lignes à basse tension doivent toujours être écartées suffisamment non seulement des lignes à haute tension mais aussi des bâtis portant ces dernières. Lorsqu'une installation de moins de 1000 V n'a pas un point directement relié à la terre, il est bon de monter entre phase ou point neutre et la terre un éclateur constitué par deux plaques métalliques séparées par une mince feuille de mica perforée. Aussitôt que le circuit basse tension est accidentellement mis en contact avec la haute tension, celle-ci s'écoule à la terre par l'éclateur.

Les phénomènes de résonance.

A chaque circuit électrique contenant self et capacité correspond une fréquence de résonance ou fréquence propre caractérisée par les valeurs de la self et de la capacité. Lorsqu'une source extérieure fournit à ce circuit un courant de fréquence égale à cette fréquence propre, il se produit un phénomène de résonance, les oscillations sont amplifiés et il y a surtension ou surintensité. Dans une installation des phénomènes de résonance pourront être amorcés à la fréquence du courant d'exploitation ou de ses harmoniques, ou encore à la fréquence des ondes à front raide. La fréquence des ondes à front raide est généralement beaucoup plus élévée que celle du courant d'exploitation ou de ses harmoniques; elle concorde plus souvent que ces dernières avec la fréquence propre de circuit locaux, par exemple de circuits formés par la capacité des rails et la self de bobines protectrices. Il arrive cependant aussi qu'il se forme des circuits résonnant avec la fréquence du courant d'exploitation ou de ses harmoniques, par exemple dans le cas d'une rupture de conducteur avec mise à la terre de l'un des brins rompus, ou en cas de manœuvre d'interrupteurs unipolaires. Lorsqu'une phase est interrompue, la partie de celle-ci qui n'est pas à la terre peut prendre dans un réseau triphasé une tension par rapport à la terre égale à 2,2 à 2,3 fois la tension composée. Pendant le temps qui s'écoule depuis le moment de la rupture jusqu'à l'établissement d'un nouvel état d'équilibre cette tension est même dépassée de 30 % environ. Lorsqu'on ne ferme qu'une phase d'un circuit, lorsque des fusibles d'un circuit ne fondent pas simultanément ou que des déchargeurs à cornes ne fonctionnent pas simultanément sur les trois phases, on peut constater sur les phases restées ouvertes et non reliées une surtension momentanée de 1,9 à 2 fois la tension composée. Si le contact à la terre n'existe que sur le brin situé à l'opposé de la source de tension (fig. 10) les phases saines prendront par rapport à la terre une tension égale à 1,3 ÷ 1,4 fois, la phase coupée une tension de 2,2 à 2,3 fois, la tension composée.

Dans des réseaux de grande capacité (réseaux de câbles très importants) il peut y avoir résonance à la fréquence du courant d'exploitation en cas de contact à la terre sans qu'il y ait rupture de la ligne. Le circuit résonnant est alors formé par la capacité des phases saines contre terre et par la self de la ligne parcourue par le courant à la terre. Le phénomène peut devenir dangereux dès que ce

dernier courant atteint 50 ÷ 100 amp. par 10 kV, et il sera d'autant plus à craindre que la section de cuivre du câble en contact avec la terre sera plus grande. Des surtensions de 2,5 à 3,5 fois la tension d'exploitation deviennent possibles sur des câbles de 50 mm² si le contact se trouve à la distance critique de la centrale.

En service normal déjà, sans qu'il y ait contact à la terre, on peut constater des phénomènes de résonance qui sont amorcés à la fréquence du courant d'exploitation ou de ses harmoniques. Ces cas sont cependant rares et sont généralement sans danger. On ne provoquera pas de résonance par les harmoniques si la courbe de tension des génératrices est de forme rigoureusement sinusoïdale et si le fer des transformateurs n'est pas trop saturé. On évitera l'amorçage de résonance à la fréquence du courant d'exploitation en faisant toutes les manœuvres de couplage simultanément sur les trois phases, en évitant d'intercaler des fusibles devant les bobines de mise à la terre et en accouplant les sectionneurs des trois phases si ceux-ci doivent être manœuvrés sous tension. Cette précaution n'est du reste nécessaire que dans les installations de plus de 40 kV. Dans les installations à tension inférieure le coefficient de sécurité est généralement plus que suffisant. L'expérience montre en outre que ce n'est qu'à partir de la limite de tension indiquée que ces surtensions deviennent dangereuses.

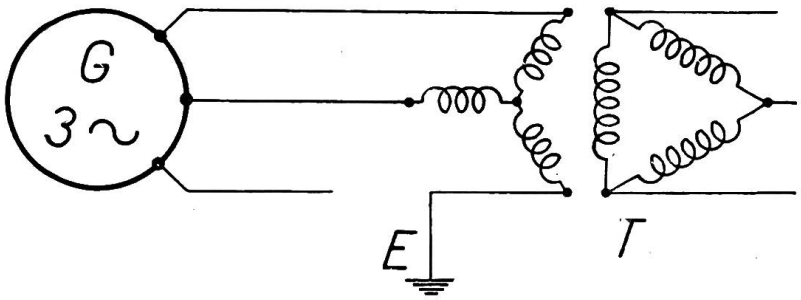

fig. 10
Mise à terre indirecte.

Moins rares et plus dangereux sont les cas de résonance avec la fréquence des ondes à front raide, le circuit résonnant étant formé par la self de bobines protectrices et la capacité des barres collectrices ou des isolateurs d'entrée des transformateurs.

On combattra ces résonances en shuntant par des résistances les transformateurs d'intensité, les selfs de protection et les bobines de déclanchement des relais. Ces shunts exercent un effet amortissant dans le circuit oscillant.

B. Directives.

I. Genre de surtensions dans les installations électriques à fort courant.

Danger des surtensions.

1⁰ Il y a surtension chaque fois que la différence de potentiel entre deux points quelconques d'une installation dépasse la différence de potentiel existant en service normal. Le danger des surtensions dépend de leur valeur absolue, de leur répartition sur les conducteurs et dans le diélectrique, de leur durée, et de leur fréquence (répétition). L'expérience montre que dans les installations prévues pour une tension de service d'au moins 1000 V il est indiqué de considérer comme dangereuse toute surtension qui dépasse les 75 % de la tension d'essai de la partie de l'installation qui a subi l'essai le moins sévère. Lorsque le diélectrique est une matière solide, ou liquide surtout, et que la surtension n'est que momentanée, le danger n'existe que pour des tensions supérieures à celle indiquée (grande rigidité diélectrique momentanée). En ce qui concerne les surtensions entre les spires voisines d'un enroulement on peut dire qu'il y a danger dès que la contrainte produite pas ces surtensions dépasse celle qu'on produit dans l'essai par ondes perturbatricer artificielles. Il n'est aujourd'hui pas encore possible de dire dans quelle proportion le danger croit avec la durée et la fréquence (répétition) des surtensions.

Dans les installations de moins de 1000 V dont le matériel est soumis à une tension d'essai d'au moins 1500 V [1]), mais dans lesquelles l'isolation diminue avec le temps dans une mesure indéterminée, les personnes peuvent être mises en danger par des surtensions inférieures à la limité définie ci-dessus.

Classification des surtensions.

2⁰ Les surtensions dangereuses peuvent être classées comme suit:

a) Surtensions dues aux mises à terre intermittentes,
b) surtensions d'origine atmosphérique,
c) surtensions dues aux manœuvres de couplage,
d) surtensions dues aux résonances amorcées à la fréquence du courant d'exploitation ou de ses harmoniques,
e) surtensions dues aux résonances amorcées par les ondes de décharge en cas de mises à la terre ou de court-circuits,
f) surtensions transmises par effets de capacité,
g) passage direct de tension d'un circuit à un autre,
h) surtensions combinées.

Les surtensions dues aux mises à terre intermittentes.

3⁰ On a le cas d'une mise à la terre „intermittente" lorsque l'arc de mise à terre s'éteint et se réamorce pendant chaque demie période. Au moment de l'extinction de l'arc, par suite de la dissymétrie créée dans le réseau par le contact à la terre, il se superpose à la tension de phase une tension de sens constant tendant à créér un nouvel état d'équilibre. Sous l'influence de cette surtension l'arc se réamorce et il se forme une onde à front raide comme lors de l'extinction.

Surtensions d'origine atmosphérique.

4⁰ Soit une ligne aérienne et considérons les deux capacités montées en série dont les électrodes sont „nuage-fil" d'une part et „fil-terre" d'autre part. Le champ électrique atmosphérique induit dans ce système des tensions dont la répartition entre les deux capacités peut devenir telle que la tension „fil-terre" prend des valeurs dangereuses. Par suite des modifications momentanées qui se produisent dans le champ électrostatique pendant les orages, des charges d'électricité fixées sur le fil peuvent être libérées (coups de foudre indirects) et donner lieu à des arcs vers la terre et à des ondes à front raide dangereuses.

Le conducteur aérien peut aussi, bien que cela arrive plus rarement, être touché par la foudre (coups de foudre direct).

Surtensions dues aux manœuvres de couplage.

5⁰ Il peut se former des surtensions de rupture lors du déclanchement de transformateurs fonctionnant à vide. En général tout enclenchement ou déclenchement donne naissance à des ondes à front raide dont l'amplitude dans la plupart des cas n'atteint cependant pas une valeur dangereuse.

Surtensions dues aux résonances amorcées à la fréquence du courant d'exploitation ou de ses harmoniques.

6⁰ Il se produit des phénomènes de résonance à la fréquence du courant d'exploitation principalement dans le cas d'une mise à terre indirecte [2]) et aussi lorsque les bobines de self de mise à la terre et les transformateurs de tension ne sont pas connectés ou ne sont pas détachés simultanément sur toutes les phases (par des coupe-circuits par exemple).

La résonance à la fréquence des harmoniques supérieures se produit lorsque le fer des transformateurs est trop saturé ou lorsque la courbe de tension des alternateurs s'écarte trop d'une sinusoïde.

Surtensions dues aux résonances amorcées par des ondes de décharge.

7⁰ Des surtensions dues à la résonance amorcée par des ondes de décharge se produisent lorsque, en cas de mises à terre ou de courts-circuits dans un réseau, les ondes de décharge ont une fréquence s'approchant de la fréquence propre d'un circuit local contenant de la self (relais, transformateurs de mesure) et de la capacité (rails collecteurs, etc.).

Surtensions transmises par effet de capacité.

8⁰ Une mise à la terre d'un réseau à haute tension modifie la répartition des tensions entre les deux condensateurs suivants:

---

[1]) Les prescriptions pour l'essai du matériel basse tension vont être normalisées et fixeront la tension d'essai.

[2]) Voir fig. 10, page 310.

enroulement haute tension — enroulement basse tension du transformateur et circuits qui s'y raccordent,
enroulement basse tension — terre.

La tension entre les électrodes du second condensateur peut dans certaines conditions prendre une valeur dangereuse.

Des surtensions peuvent en outre être transmises par capacité entre des lignes parallèles isolées l'une de l'autre.

Passage direct de la haute tension au circuit basse tension.

9⁰ Il se produit un passage direct de tension lorsque dans une installation des parties haute tension sont reliées à des parties basse tension, par exemple lors du claquage entre primaire et secondaire de transformateurs, lorsqu'un arc s'établit entre des circuits de tensions différente, lors d'un contact direct, ou lorsque, dans une partie quelconque de l'installation, un point d'un circuit à haute tension est en contact avec un point d'un circuit à basse tension soit directement soit par l'intermédiaire du bâti. (Voir page 310.)

Surtensions combinées.

10⁰ Des surtensions combinées se produisent à la suite de la combinaison et addition des surtensions citées ci-dessus de 3—9.

II. Méthodes à suivre pour la protection des installations.

a) Isolation de l'installation.

Rigidité diélectrique des isolants des machines, transformateurs et appareils.

11⁰ L'isolation des machines, transformateurs et autre appareils doit être soumise à une épreuve de tension. Lorsque la tension d'exploitation dépasse 3000 V les enroulements des transformateurs sont à soumettre en outre à une épreuve sous tension surélevée et à une épreuve faite au moyen d'ondes à front raide artificielles (suivant normes spéciales)[3]. L'isolation devra résister à ces deux épreuves.

Résistance au percement des isolateurs de traversée.

12⁰ Les isolateurs de traversée des cabines, des transformateurs et appareils (interrupteurs à huile, boîtes d'extrémité des câbles, etc.) doivent être conçus, en tenant compte des surtensions possibles, suivant les principes de l'électrostatique et les connaissances actuelles de la résistance des diélectriques. Il n'est pas admissible que par suite d'une construction défectueuse au point de vue électrique les isolateurs créent une source nouvelle de perturbations dans le service. Il est très important que la tension de rupture (perçage) de l'isolateur soit toujours sensiblement supérieure à la tension d'éclatement (de décharge) de l'arc. Sous la plus haute tension d'exploitation il ne doit se produire aucune trace d'effluves dans les isolateurs d'entrée.

Résistance au percement des isolateurs fixes et à suspension.

13⁰ Les isolateurs fixes et à suspension sont à dimensionner de telle manière qu'à l'état sec et propre la tension de rupture soit supérieure à la tension d'éclatement. Les isolateurs utilisés sur les quelques pylônes métalliques, interrupteurs de lignes, etc. intercalés dans une ligne sur poteaux en bois, devront avoir une plus grande résistance au percement que ceux utilisés sur les poteaux.

Résistance au percement des câbles souterrains.

14⁰ La résistance au percement des isolants des câbles souterrains doit être particulièrement grande dans les installations dont le point neutre n'est pas mis à la terre.

Rigidité diélectrique de l'isolation de l'installation.

15⁰ Dans les installations avec réseaux aériens de plus de 1000 V la réstistance électrique des isolants contre des surtensions de courte durée doit être si possible du même ordre de grandeur dans toutes les parties de l'installation. On peut alors prévoir qu'en cas de coups de foudre indirects les arcs de décharge se produiront sur les lignes et non dans les stations qui ne seront atteintes que plus tard par la surtension. Il y a lieu de remarquer que les isolants solides et surtout liquides de même rigidité diélectrique à l'essai de durée, présentent, pour une courte durée de la surtension, une rigidité momentanée sensiblement supérieure à celle de l'air.

b) Mesures de prévention.

Considérations générales.

16⁰ Avant de penser à installer des appareils de protection le praticien doit prendre toutes les mesures possibles pour éviter la formation de surtensions et pour empêcher que d'autres surtensions ne se forment à la suite de la première

[3]) Voir Bulletin de l'A. S. E. 1923, No. 3, pages 187 et suivantes.

surtension survenue. On n'aura recours à des appareils de protection que si toutes les mesures préventives appliquées ne donnent pas une sécurité suffisante.

Moyens de prévention contre les surtensions d'origine atmosphérique.

17⁰ Les surtensions dues aux phénomènes atmosphériques sont inévitables sur les lignes aériennes. Elles peuvent cependant être réduites en amplitude par l'emploi d'un fil de terre tiré au dessus de la ligne.

Lorsque la ligne est montée sur poteaux en bois, le fil de terre a l'inconvénient de diminuer la résistance d'isolement de la ligne et il est préférable dans ce cas de s'en passer. Les anneaux métalliques placés à la base des isolateurs fixes et les cornes dont on munit les isolateurs de suspension protégent les isolateurs contre la destruction et les conducteurs contre la fusion par l'arc. Leur emploi est recommandable dans les parties d'une ligne particulièrement exposée à la foudre et sur les pylônes métalliques intercalés en petit nombre dans une ligne sur poteaux.

Moyens de prévenir les surtensions dues aux manœuvres de couplage.

18⁰ Les surtensions et les accoups de courant qui pourraient être produits par les manœuvres de couplage sont évités par l'emploi de résistances de choc dans les interrupteurs. On peut en général s'en passer dans les interrupteurs de lignes.

Par contre, dans le cas de transformateurs qui sont enclanchés normalement à vide, on fera usage de résistances de choc à partir d'une tension de service de 40 kV et en tenant compte de la puissance des transformateurs et de la saturation de leur fer. Elles seront placées sur le côté du transformateur où se fait le couplage. Il y a également lieu d'employer des résistances de choc pour les transformateurs lorsque, à la fermeture du circuit, le courant risque d'atteindre un multiple du courant normal.

Moyens de prévenir les surtensions dues à la résonance.

19⁰ On évitera les surtensions provenant d'effets de résonance dûs aux harmoniques supérieures en n'employant que des alternateurs fournissant un courant rigoureusement sinusoïdal et des transformateurs dont le fer n'est pas trop saturé.

L'amorçage de résonances à la fréquence d'exploitation peut être évité en prenant les précautions suivantes:

a) En manœuvrant simultanément les interrupteurs de toutes les phases.

b) En couplant aussi les différentes phases les sectionneurs dès qu'ils doivent être manœuvrés sous tension et qu'il s'agit d'installations de plus de 40 kV. Ceci concerne tout particulièrement les sectionneurs des bobines de self de mise à terre; celles-ci d'autre part ne devront jamais être munies de fusibles.

c) En installant les sectionneurs et coupe-circuits des transformateurs de tension aussi près de ces appareils que le permettent les considérations de sécurité. (Dans ce cas le couplage des sectionneurs n'est plus indispensable.)

d) En intercalant une résistance ohmique dans les circuits pouvant être le siège de résonance. Le shuntage des transformateurs d'intensité et des bobines de relais est à recommander dès qu'il s'agit d'installations de plus de 1000 V.

Moyens de prévenir les surtensions transmises par effet de capacité.

20⁰ Pour éviter une transmission dangereuse par effet de capacité de haute tension dans des circuits basse tension on reliera à la terre le côté basse tension de tous les transformateurs de courant et de tension; on installera d'autre part des parafoudres à feuille de mica sur tous les circuits de moins de 1000 V qui n'ont pas un point relié à la terre.

Par ailleurs les surtensions dues à la capacité ne sont dangereuses que dans quelques cas particuliers et rares et peuvent être attenuées par l'augmentation de la capacité entre le circuit basse tension et la terre (emploi de câbles souterrains ou de condensateurs).

Pour supprimer le danger des surtensions dues à la capacité entre deux lignes parallèles de tensions différentes le moyen le plus recommandable consiste dans l'éloignement partiel d'une des lignes ou la liaison à la terre du point neutre de la ligne à plus faible tension.[4]) Tous les fils d'une ligne sur laquelle on exécute des travaux doivent toujours être soigneusement mis à la terre de part et d'autre du chantier de travail.

Moyens de prévenir le passage direct de la haute tension au circuit basse tension.

21⁰ Pour empêcher le passage direct du courant haute tension dans le circuit basse tension il est nécessaire de bien relier à la terre les bâtis et le fer des transformateurs, etc. et d'écarter partout suffisamment les circuits haute tension des circuits

[4]) D'autres mesures voir introduction pages 309.

basse tension. Les croisements de lignes seront faits avec soin, d'autre part les bâtis, les parafoudres à feuille de mica ou le point neutre basse tension seront reliés séparément à une terre convenable.

c) Choix des moyens de protection contre les surtensions.

22⁰ Il est nécessaire d'employer des dispositifs de protection spéciaux pour empêcher la formation des surtensions dangereuses dues à des mises à terre intermittentes et pour supprimer les conséquences fâcheuses d'un arc de décharge dans un réseau aérien dès que la tension d'exploitation atteint au moins 1000 V et que le courant de terre en cas de contact dépasse $1{,}5 \frac{\text{fréquence}}{50}$ ampère ce qui correspond à un réseau aérien d'une étendue d'environ $\frac{600}{\text{tension composée (en kV)}}$ km. Mise à terre dans un réseau aérien.

La bobine d'extinction constitue un moyen de protection particulièrement recommandable; elle supprime les surtensions, éteint l'arc et empêche un arrêt dans l'exploitation. A partir d'une tension de 80 kV il est en général préférable de réaliser la protection du réseau en reliant directement le point neutre à la terre. On sait par expérience que dans les réseaux de cette tension les contacts à la terre sont rares; la bobine d'extinction perd de son importance. Par le fait de relier à la terre le point neutre on peut réduire la tension d'essai de parties importantes de l'installation et employer des isolateurs et appareils moins couteux.[5])

23⁰ Il est nécessaire d'employer des dispositifs de protection spéciaux pour empêcher la formation des surtensions dangereuses dues à des mises à terre intermittentes et pour supprimer les conséquences fâcheuses d'un arc de décharge dans un réseau souterrain à câbles dès que la tension d'exploitation atteint au moins 1000 V et que le courant de terre en cas de contact dépasse $1{,}5 \frac{\text{fréquence}}{50}$ ampère ce qui correspond à un réseau d'environ $\frac{10}{\text{tension composée (en kV)}}$ km. Mise à terre dans un réseau de câbles.

Le moyen de protection le plus recommandable consiste à relier le point neutre directement à la terre. Pour empêcher le courant de court-circuit d'atteindre des valeurs trop élevées par suite de la tension et de la puissance de court-circuit du réseau on pourra intercaler une faible résistance entre le point neutre et la terre.

L'emploi de bobines d'extinction dans un réseau souterrain n'est pas indiqué. L'arc vers la terre traversant le diélectrique combustible des câbles et de leurs garnitures laisse subsister un défaut grave et il est désirable que le tronçon défectueux soit de suite mis hors circuit.

24⁰ Il est nécessaire d'employer des dispositifs de protection spéciaux pour empêcher la formation de surtensions dangereuses dues à des mises à terre intermittentes et pour supprimer les conséquences fâcheuses d'un arc de décharge dans un réseau mixte (lignes aériennes et câbles) dès que la tension d'exploitation atteint au moins 1000 V et que le courant de terre en cas de contact dépasse $1{,}5 \frac{\text{fréquence}}{50}$ ampère, ceci correspond à un réseau mixte d'une étendue qui peut être calculée suivant les indications contenues sous chiffres 22 et 23. Mise à terre dans un réseau mixte.

Les moyens de protection à utiliser sont en général les mêmes que pour les réseaux aériens à moins que la longueur des câbles l'emporte sérieusement sur celle des lignes aériennes.

25⁰ La liaison à la terre, par l'intermédiaire de résistances inductives ou non inductives ou par connexion directe telle qu'elle est prévue aux chiffres 22 à 24 doit satisfaire aux conditions suivantes: Disposition et connection des dispositifs de protection cités sous chiffres 22 à 24.

Les bobines d'extinction devront être en nombre suffisant et disposées de manière que, dans les conditions normales d'exploitation, chaque fraction du réseau soit protégée.

[5]) Quand les conditions prévues dans l'introduction page 304 sont remplies, la protection pourra aussi être réalisée par des déchargeurs à étincelles bien construits et placés en nombre suffisant.

Lorsque le point neutre est directement relié à la terre, cette mise à terre devra être effectuée si possible auprès de tous les transformateurs,[6]) et les lignes aériennes des installations où le courant de court-circuit est particulièrement élevé devront être munies d'un fil de terre pour diminuer le danger pour les personnes circulant au pied des pylônes. Les transformateurs dont le point neutre est relié à la terre devront avoir un enroulement en étoile-triangle ou un enroulement équivalent.

Les conducteurs d'un réseau aérien de plus de 80 kV avec point neutre relié à la terre devront subir une rotation entr'eux de façon à obtenir une interversion des phases suivant les principes exposés dans l'introduction.[7])

Lorsque la mise à la terre se fait par l'intermédiaire d'une résistance ohmique, cette résistance devra pouvoir supporter le courant de court-circuit de l'installation pendant une demie minute au moins et ne devra pas empêcher le fonctionnement régulier des relais à maximum. Il faut aussi éviter avec soin de créer un danger pour les personnes circulant aux pieds des pylônes et, à moins qu'on ne puisse relier ces derniers individuellement à une très bonne terre, il sera nécessaire de faire usage d'un fil de terre reliant tous les pylones métalliques.

Les conducteurs de mise à la terre seront pourvus d'appareils de signalisation et d'enrégistrement.

Charges atmosphériques de formation lente.

26⁰ Dans les réseaux d'au moins 1000 V, dans lesquels le neutre n'est pas relié à la terre et où on n'a pas eu recours à des bobines d'extinction, les charges statiques dues au champ électrique de l'atmospère seront écoulées à terre à travers des bobines de selfs ou des déchargeurs à eau courante qui seront connectés aux barres collectrices. Pour enrégistrer ou signaliser les mises à terre il est recommandé de munir les bobines de self d'un enroulement secondaire auquel on connectera un voltmètre et les appareils d'enregistrement et de signalisation.

Dans les réseaux de moins de 1000 V qui ne sont pas reliés à la terre, l'écoulement des charges statiques a lieu à travers les parafoudres à feuille de mica mentionnés sous chiffres 20. Mieux vaut cependant relier le point neutre franchement à la terre.

Coups de foudre indirects.

27⁰ Le danger créé par les coups de foudre indirects menaçant particulièrement les parties d'installation hors de l'huile, pour autant qu'elles ne répondent pas à l'exigence d'une résistance uniforme au percement, indiqué sous chiffre 15, peut être attenué dans certains cas à l'aide de parafoudres à étincelles.

On protège par ce moyen surtout les transformateurs à air, les alternateurs et les moteurs à haute tension et aussi d'une manière générale toutes les installations dont la tension de service est inférieure à 1000 V. Ces parafoudres n'ont du reste une utilité qu'à condition que leur résistance d'amortissement soit inférieure à la valeur de la caractéristique (Wellenwiderstand) de la ligne, soit environ 600 Ω, et qu'ils puissent fonctionner plusieurs fois de suite pendant un temps suffisant sans être détériorés.

Ondes à front raide.

28⁰ La raideur du front d'onde qui crée les tensions anormales entre spires voisines d'un enroulement peut être adoucie par l'insertion à l'entrée des enroulements de capacités ou de selfs concentrées.

Comme il est difficile de réaliser des enroulements de moteurs et d'alternateurs qui peuvent résister à ces surtensions il sera utile de connecter les lignes aux bornes de ces machines par l'intermédiaire de sections de câbles ou de selfs ou d'y raccorder des condensateurs. Il n'est malheureusement pas possible de donner la valeur exacte de la capacité ou de la self nécessaire.

Comme les selfs peuvent façilement constituer des circuits locaux de résonance, il est bon de leur adjoindre des résistances d'amortissement.

III. Tableau récapitulatif.

29⁰ Le tableau suivant donne un résumé des surtensions de sources diverses et des moyens pour les combattre. Pour combattre les surtensions combinées il faudra combiner aussi les moyens de protection préconisés.

---

[6]) L'influence de mises à la terre nombreuses sur les lignes téléphoniques aériennes n'est cependant pas encore complètement éclaircie.

[7]) Voir page 309.

Aperçu des moyens de protection recommandables pour les installations à courant alternatif.

Genre des surtensions		*Tension d'exploitation de moins de 1000 V (tension composée)*		*Tension d'exploitation de plus de 1000 V (tension composée)*		
		Réseaux aériens	*Réseaux à câbles*	*Réseaux aériens*	*Réseaux à câbles*	*Réseaux mixtes*
Surtensions provenant de mises à la terre intermittentes.		N'offrent pas de danger, une protection est inutile.	N'offrent pas de danger, une protection est inutile.	Bobines d'extinction lorsque le courant de contact à la terre dépasse $1{,}5 \frac{\text{fréquence}}{50}$ amp. Dans les installations de plus de 80 kV relier à la terre le point neutre, voir chiffres 22 et 25.	Relier à la terre le point neutre dans tous les réseaux où le courant de contact à la terre peut atteindre $1{,}5 \frac{\text{fréquence}}{50}$ amp. en insérant éventuellement une faible résistance pour diminuer l'intensité courant de court-circuit, voir chiffre 23.	Bobines d'extinction ou mise à la terre du point neutre suivant l'importance du réseau à câbles, voir chiffres 14, 24 et 25.
Surtensions d'origine atmosphérique.	Charges statiques lentes.	Relier à la terre le point neutre ou parafoudres à lame de mica.	Point de surtensions atmosphériques.	Relier à la terre le point neutre de chaque section indépendante, bobines d'extinction, bobines de self de mise à la terre, déchargeurs à jets d'eaux, voir chiffre 22.	Ne se produisent pas.	A protéger comme les réseaux aériens.
	Coups de foudre indirects.	Dans les centrales et les sous-stations employer des parafoudres déchargeurs.		La résistance au percement doit être si possible de même ordre de grandeur pour les appareils des stations et sous-stations que pour les isolateurs des lignes. La résistance des isolants entre spires doit être aussi grande que possible. Les enroulements des transformateurs d'intensité et des bobines des relais doivent être shuntés. Employer sur les pylônes métalliques un conducteur de terre et des anneaux ou cornes pour la protection des isolateurs dans les régions exposées. Entre des lignes aériennes et les alternateurs, transformateurs à air et moteurs à haute tension on intercalera des tronçons de câbles, des condensateurs ou des selfs. On prévoira dans ces cas éventuellement des parafoudres déchargeurs à étincelles, voir chiffres 11 à 13, 15, 17, 19, 26 à 28.		A protéger les réseaux aériens.
Surtensions dues aux manœuvres de couplage.		N'offrent pas de danger.	N'offrent pas de danger.	Les interrupteurs de transformateurs de plus de 40 kV fonctionnant momentanément à vide ou à faible charge seront à deux temps de même lorsque le courant à la fermeture risque d'atteindre un multiple du courant normal, voir chiffre 18.		
Surtensions dues à des résonances amorcées à la fréquence du courant d'exploitation ou à la fréquence de ses harmoniques.		N'offrent pas de danger.	N'offrent pas de danger.	Ne sont pas à craindre dans les installations de moins de 40 kV. Lorsque la tension d'exploitation dépasse cette limite il importe que le courant d'exploitation soit sinusoïdal et que les manœuvres de couplage aient lieu sur toutes les phases simultanément. Les sectionneurs des bobines de self de mise à la terre sont à accoupler s'ils doivent être manœuvrés sous tension. Ne pas employer des fusibles sur les circuits des bobines de self de mise à la terre. Placer les sectionneurs des transformateurs de tension le plus près possible de ces derniers, leur accouplement n'est alors plus indispensable, voir chiffres 19 et 28.		
Surtensions dues à des résonances amorcées par les ondes de décharge (mises à la terre et court-circuits).		N'offrent pas de danger.	N'offrent pas de danger.	Shunter les transformateurs d'intensité et les bobines de relais, voir chiffre 19 et 28.		
Surtensions transmises par effet de capacité.		Relier à la terre le point neutre ou emploi de parafoudres à lame de mica. Exécution soignée des croisements de lignes et de la mise à la terre dans les stations transformatrices, voir chiffres 20 et 21.		Quoique ces surtensions soient rares il est recommandable de relier à la terre les circuits basse tension des transformateurs de mesure. Il est bon également de relier à la terre le point neutre ou une phase du circuit basse tension ou d'augmenter la capacité statique des circuits basse tension par rapport à la terre en utilisant des câbles sous plomb dans la station et les sous-stations, voir chiffre 21.		
Passage direct de tension d'un circuit à un autre.				Relier soigneusement à la terre les cuves et bâtis des transformateurs et des interrupteurs. Les croisements de fils sont à faire avec soin, voir chiffre 21.		

Litérature.

Pour faciliter aux lecteurs une étude plus détaillée de la question, nous donnons ci-dessous la liste des publications que nous connaissons en cette matière. Il est bien entendu que la commission ne partage pas toutes les opinions que l'on y trouve représentées.

Ondes mobiles.

Electromagnetic theory, by O. Heaviside, 1894; 2. Auflage 1922.
Elektromagnetische Ausgleichsvorgänge in Freileitungen und Kabeln, von K. W. Wagner, 1908.
Elektromagnetische Ausgleichsvorgänge in Freileitungen und Kabeln (eine experimentelle Untersuchung), von K. W. Wagner, Elektrotechnische Zeitschrift, 1911, Seite 899, 928, 947.
Hochspannungstechnik, von W. Petersen, 1911.
Wanderwellen als Ueberspannungserreger, von W. Petersen, Archiv für Elektrotechnik, 1912, Seite 233.
Stationäre Zustände und Zustandsänderungen in elektrischen Stromkreisen, von Landry, Bulletin des S. E. V., 1914, Seite 33, 77, 125, 225.
Ueber Wasserstoss und Ueberspannung, von W. Kummer, Bulletin des S. E. V., 1914, Seite 103.
Grundzüge des Ueberspannungsschutzes in Theorie und Praxis, von K. Kuhlmann, Bulletin des S. E. V., 1914, Seite 142.
Das Eindringen einer elektromagnetischen Welle in eine Spule mit Windungskapazität, von K. W. Wagner, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1915, Seite 89, 105.
Messungen über die Form der Stirn von Wanderwellen, von L. Binder, Elektrotechnische Zeitschrift, 1915, Seite 241, 259, 273.
Elektrische Schwingungen in Maschinenwicklungen, von J. Biermanns, Archiv für Elektrotechnik, 1916, Seite 211.
Eine Erweiterung des Reflexionsgesetzes für Wanderwellen, von W. Rogowski, Archiv für Elektrotechnik, 1916, Seite 204.
Elektromagnetische Wellen in Spulen mit Windungskapazität, von M. Sieghahn, Archiv für Elektrotechnik, 1916, Seite 305.
Das Eindringen von Spannungswellen in Maschinenwicklungen, von M. Vidmar, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1916, Seite 573, 590, 601.
Beanspruchung und Schutzwirkung von Spulen bei schnellen Ausgleichsvorgängen, von K. W. Wagner, Elektrotechnische Zeitschrift, 1916, Seite 425, 440, 456.
Rechnerische und experimentelle Untersuchungen der Einwirkung von Wanderwellen-Schwingungen auf Transformatorwicklungen, von O. Böhm, Archiv für Elektrotechnik, 1917, Seite 383.
Ueber Wanderwellen-Schutzeinrichtungen, von J. Biermanns, Archiv für Elektrotechnik, 1917, Seite 215.
Wanderwellen-Schwingungen in Transformatorwicklungen, von K. W. Wagner, Archiv für Elektrotechnik, 1918, Seite 301.
Beiträge zur Frage der Schutzwirkung von Drosselspulen, von O. Böhm, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1918, Seite 377, 392.
Die Spule als Spannungsschutz, von W. Rogowski, Archiv für Elektrotechnik, 1919, Seite 159.
Ueberspannungen und Eigenfrequenzen einer Spule, von W. Rogowski, Archiv für Elektrotechnik, 1919, Seite 240.
Spulen und Wanderwellen, von W. Rogowski, Archiv für Elektrotechnik, 1919, Seite 320.
Abnormal voltages within transformers, by L. Blume and A. Boyajian, Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, 1919, pag. 211.
Die stationären Schwingungen der Wechselstrom gespeisten Spule, von O. Böhm, Archiv für Elektrotechnik, 1920, Seite 341.
Ueber Sprungwellenbeanspruchung von Transformatoren, von G. Courvoisier, Bulletin S. E. V., 1922, Seite 437.
Ableitung und Wanderwellen, von C. Breitfeld, Bulletin S. E. V. 1923, Seite 83.

Surtensions dues aux manœuvres des interrupteurs.

Die Ausschaltvorgänge in Gleich- und Wechselstromkreisen, von A. G. Collis, Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen, 1911, Heft 14.
Electric line oscillations, by G. Faccioli, Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, 1911, pag. 1803.
Ueber Einschaltvorgänge bei elektrischen Maschinen und Apparaten, von W. Linke, Archiv für Elektrotechnik, 1912, Seite 16, 69.
Ueberspannungserscheinungen bei Schaltvorgängen, von W. Linke, Archiv für Elektrotechnik, 1912 Seite 163.
Phénomènes à haute tension consécutifs à la rupture d'un circuit, par G. Faccioli, Revue Electrique, 1912, Bd. I, pag. 554.
Rückzündüberspannungen, von W. Petersen, Elektrotechnische Zeitschrift, 1914, Seite 697.
Schaltvorgänge bei elektrischen Maschinen und Transformatoren, von W. Linke, Elektrotechnische Zeitschrift, 1914, Seite 757, 793, 953, 965.
Ueberspannungen beim Abschalten von Asynchronmotoren, von R. Rüdenberg, Elektrotechnische Zeitschrift, 1915, Seite 169.

Surtensions dues aux contacts à terre.

La mise à la terre du point neutre des réseaux à courant triphase dans les mines, par Wellesley-Wood, Revue Electrique, 1910, Bd. II, pag. 97.
Protection of electrical transmission lines, by E. Creighton, Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, 1911, pag. 257.
Surtensions dûs aux ondes mobiles créées par les manœuvres d'interrupteurs et les arcs à la terre, par R. Swyngedauw, Revue Electrique, 1914, Bd. II, pag. 217, 222.
Die Erdung des neutralen Punktes in Drehstromanlagen, von M. Voigt, Bulletin des S.E.V., 1915, Seite 49.
Résultats d'expériences sur la mise à la terre du point neutre dans les lignes de transmission à haute tension, par Thomas (Percy H.), Revue Générale d'Electricité, 1916, Bd. 26, pag. 235.
Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss, von W. Petersen, Elektrotechnische Zeitschrift, 1917, Seite 553, 564.
Courants de capacité et mises à la terre de protection sur les lignes à haute tension et à longue portée, par H. Behrend, Revue Générale d'Electricité, 1917, Bd. II, pag. 625.
Unterdrückung des aussetzenden Erdschlusses durch Nullwiderstände und Funkenableiter, von W. Petersen, Elektrotechnische Zeitschrift, 1918, Seite 341.
Beseitigung von Freileitungsstörungen durch Unterdrückung des Erdschlussstromes und -lichtbogens, von W. Petersen, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1918, Seite 297.
Die Begrenzung des Erdschlussstromes und die Unterdrückung des Erdschlusslichtbogens durch die Erdschlusspule, von W. Petersen, Elektrotechnische Zeitschrift, 1919, Seite 5, 17.
Prevenzioni dei disturbi di linea mediante la sopressione degli archi verso terra, di W. Petersen, Elettrotecnica, 1919, Bd. VI, pag. 324.
Ueber den Schutz von Hochspannungsnetzen mit unsymmetrisch auf die Netzleitungen verteilter Teilkapazität gegen Erde, von J. Jonas, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1920, Seite 453.
Sovratensione elettriche e sistemi di protezione norme per l'applicazione del dispositivo Petersen, di L. Lombardi, Elettrotecnica, 1920, Bd. XII, pag. 439—486.
Note sur la mise à la terre des machines et installations électriques, par Jacques Damien, Revue Générale d'Electricité, 1920, Band VII, pag. 130.
Problemi relativi all' impianto della reattanze di protezione (sistema Petersen), di Vallauri, Elettrotecnica, 1920, pag. 342.
La protezioni degli impianti elettrici colla bobina induzione di Petersen, di Palestrino, Elettrotecnica, 1920, pag. 342.
Voltages and current harmonics caused by corona, by F. Peek, Journal of the American Institute of Electrical Engineers, 1921, Seite 455.
Inductive interference between electric power and communication circuits: Arbeit der Eisenbahnverwaltung des Staates Kalifornien, auszugsweise in der Elektrotechnischen Zeitschrift, 1921, Seite 1261.
Protezione contro i contatti a terra, di A. Roth, Elettrotecnica, 1921, Bd. VIII, pag. 647.
Mise à la terre des phases par bobines de réactance pour la protection contre les décharges à la terre et surtensions qui en résultent, par R. Bauch, Revue Générale d'Electricité, 1921, Bd. X, pag. 439.
Sur les accidents de la mise à la masse dans les réseaux à courants alternatifs et les moyens de protection, par J. Perret, Revue Générale d'Electricité, 1921, Bd. IX, pag. 107.
Dispositif pour la protection des réseaux contre les terres intermittantes, par W. Petersen, Revue Générale d'Electricité, 1921, Bd. IX, pag. 100.
La bobine de mise à la terre de Petersen, par Rn. Conwell and Evans, Revue Générale d'Electricité, 1922, Bd. XII, pag. 187.
Sur la mise à terre du neutre d'un réseau triphasé, par Ch. Ledoux et M., Kœchlin Revue Générale d'Electricité, 1922, Bd. XII, pag. 685.
Essai d'une bobine d'extinction des cours-circuits à la terre, par A. Roth et G. Courvoisier, Revue Générale d'Electricité, 1922, Bd. XII, pag. 402.
La bobina di Petersen, di Rn. Conwell and Rd. Evans, Elettrotecnica, 1922, Bd. IX, pag. 321.
La bobina di Petersen e la terra diretta dei neutri, di A. Incontre, Elettrotecnica, 1922, Bd. IX, pag. 748.

Surtensions dues aux influences atmosphériques.

Protezione delle condutture aeree dalle sovra elevazioni di tensione indotte da scariche atmosferiche, di M. Pizzuti, Atti della Associazione Elettrotecnica Italiana, 1910, Bd. XIV, pag. 501.
Protezione delle condutture aeree, di M. Pizzuti e E. C. Ferrari, Atti della Associazione Elettrotecnica Italiana, 1910, Bd. XIV, pag. 495.
Protezione delle condutture aeree dalle sovra elevazioni di tensione, di M. Pizzuti, Atti della Associazione Elettrotecnica Italiana, Bd. XIV, pag. 713, 1910.
La protection contre les surtensions des isolateurs aériens et en particulier des isolateurs à suspensions, par W. Weicker, Revue Electrique, 1911, Bd. II, pag. 568.
Investigation of the electrical state of the upper atmosphere, The Electrician, 1911, pag. 742, by A. Makower, W. Gregory and H. Robinson.
Effets sur les lignes aériennes des phénomènes électriques atmosphériques, par Addendorf, Revue Electrique, 1912, Bd. I, pag. 264.

Sur les effets des phénomènes électriques atmosphériques dans les lignes aériennes, par G. P. Capart, Revue Electrique, 1912, Bd. I, pag. 426, 440.
Sur la protection des lignes aériennes, par Creightan, Revue Electrique, 1912, Bd. I, pag. 386, 398, 555.
Die atmosphärischen Erscheinungen und die Störungen, welche durch dieselben in den elektrischen Verteilungsnetzen hervorgerufen werden, von G. Capart, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1913, Seite 782.
Quelques cas de surtensions d'origine atmosphériques dans un grand réseau aérien, von A. Wæber, Bulletin des S. E. V., 1914, Seite 149.
Der Schutzwert von Blitzseilen, von W. Petersen, Elektrotechnische Zeitschrift, 1914, Seite 1.
Die Schirmwirkung des geerdeten Schutzseiles, von E. Pfiffner, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1914, Heft 13.
Zum Ueberspannungsschutz in Sekundärnetzen, von F. Ringwald, Bulletin des S. E. V., 1915, Seite 113.
Quelques considérations sur les appareils de sécurité contres les surtensions dans les distributions des hautes tensions, par Gierlich, Revue Electrique, 1913, Bd. XX, pag. 95.
Les paratonnerres, par Ach. Delamarre, Revue Générale d'Electricité, 1918, Bd. III, pag. 133.
Les éclateurs des parafoudres; leur rôle dans la protection contre les tensions à front d'onde raide, ou tension de choc, par Ch. Alcutt, Revue Générale d'Electricité, 1918, Bd. IV, pag. 1012.
Protection des installations électriques contre les décharges atmosphériques et les surtensions, par A. Hayet, Revue Général d'Electricité, 1920, Bd. VII, pag. 657.
Notes sur la protections contre la foudre, par Poirson, Revue Générale d'Electricité, 1921, Bd. X, pag. 943.
Schutz gegen Ueberspannungen in Höchstspannungsanlagen, von A. Roth, Bulletin des S. E. V., 1921, Seite 321.
Undersökninger överdet Luftelektriska fältet vid Askväder, von H. Norinder, Tekniska Meddelanden fran Kungl. Vattenfallsstyrelsen, Serie E, Nr. 1, Stockholm 1921.

Surtensions dues à l'induction.

Studies of protection and protective apparatus for electric railways, by E. Creighton, S. Shavor and R. Clark, Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, 1912, pag. 851.
Induktionswirkungen von Wanderwellen in Nachbarleitungen, von K. W. Wagner, Elektrotechnische Zeitschrift, 1914, Seite 639, 677, 705.
Di alcune possibilità di sottrarre telegrafi e telefoni all' influenza delle correnti vicine, di G. Revessi, Elettrotecnica, 1915, Bd. II, pag. 146.
Neutralisation des actions perturbatrices apportées par des circuits extérieurs dans les transmissions électriques à faibles courant, par J. Perret, Revue Générale d'Electricité, 1918, Bd. IV, pag. 281.
Effets d'induction produit par le courant alternatif de traction sur les lignes téléphoniques et télégraphiques, par N. S. Warren, Revue Générale d'Electricité, 1919, Bd. V, pag. 175.

Surtensions dues à la résonance.

Seibt, Elektrotechnische Zeitschrift, 1905, Seite 25.
Spannungserhöhung in elektrischen Netzen infolge Resonanz und freier elektrischer Schwingungen, von Markowitsch, in Sammlung elektrotechnischer Vorträge, Heft 11/12, Stuttgart 1905.
La resonanza in circuiti contenenti ferro, di A. Diana, Atti della Associazione Elettrotecnica Italiana, 1911, Bd. V, pag. 15.
La résonance de l'harmonique 3 dans les réseaux à courants triphasés, par Swyngedauw, Revue Electrique, 1914, Bd. I, pag. 178.
Ueberspannungsschutz bei Stromwandlern, von H. Gewecke, Elektrotechnische Zeitschrift, 1914, Seite 386.
Ueberspannungsschutz bei Stromwandlern, von E. Wirz, Elektrotechnische Zeitschrift, 1915, Seite 450, 467.
Ueberspannungen mit der Betriebsfrequenz bei Leitungsbrüchen und einpoligen Schaltvorgängen, von W. Petersen, Elektrotechnische Zeitschrift, 1915, Seite 353, 366, 383.
Ueberströme und Ueberspannungen in Netzen mit hohem Erdschlusstrom, von W. Petersen, Elektrotechnische Zeitschrift, 1916, Seite 129, 148, 493, 512.
Notes sur les surtensions produites par l'harmonie 3 et ses multiples dans les transformateurs triphasés, par Jacques Damien, Revue Générale d'Electricité, 1917, Bd. II, pag. 363.
Note sulle sovratensioni prodotte dalla terza armonica e suoi multipli nei trasformatori trifasi, di J. Damien, Elettrotecnica, 1918, Bd. V, pag. 6.
Resonance électrique dans un circuit dont la self-induction contient du fer, par P. Boucherot, Revue Générale d'Electricité, 1920, Bd. VII, pag. 615.