Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 15 (1924)

Heft: 5

Artikel: Directives pour le choix des interrupteurs des installations à courant alternatif à haute tension

Autor: Brühlmann, M.G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057071

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: 22.08.2025

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

Dabei ist jedoch zu bemerken, dass die Bodenbeschaffenheit für die Widerstandsfähigkeit des Plattenfundamentes sehr günstig war, weil der im groben, festen Schotter einbetonierte untere Teil des Fundamentes eine sehr feste Verbindung mit diesem ergab. Wäre das Fundament in weniger druckfestem Erdreich erstellt worden, so wäre seine Widerstandsfähigkeit wahrscheinlich nicht viel grösser gewesen als die sich aus dem Gewichtsstabilitätsmoment ergebende.

Zum Schlusse sei ausdrücklich betont, dass mit den vorstehenden Ausführungen nicht beabsichtigt ist, eine vollständige Theorie des Verhaltens und der Berechnung von Blockfundamenten aufzustellen. Es handelte sich vielmehr darum, in Anlehnung an die von Andrée angegebene Berechnungsweise die bei den Versuchen in Gösgen erhaltenen Ergebnisse einer kritischen Betrachtung zu unterziehen und diese Berechnungsweise auf bestimmtere Grundlagen zu stellen und möglichst zu vereinfachen. Neu hinzugekommen ist dabei die Rücksichtnahme auf das Mass der Fundamentverdrehung bei einer bestimmten Belastung.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse und Ausrechnungen ist folgendes zu berücksichtigen:

Alle Fundamente mit Ausnahme von No. V wurden unter satter Anbetonierung an den gewachsenen Boden erstellt.

Die Reibung der zur Zugrichtung parallelen Fundamentflächen an den Grubenwänden und die Sohlenreibung wurden nicht besonders berücksichtigt.

Es wurde eine für die massgebende Belastung gültige, feste Drehachsenlage angenommen.

Ueber den Druckverlauf im Boden wurden vereinfachende Annahmen gemacht.

Es ist daraus ersichtlich, dass die berechneten Ziffern nicht absolute Gültigkeit haben. Sie sind vielmehr nur unter den gemachten Voraussetzungen zutreffend. Mit einiger Uebung wird es in den gewöhnlichen Fällen möglich sein, die Bodenziffern annähernd richtig zu schätzen. Jedenfalls ist es angezeigt, dieselben eher zu niedrig als zu hoch anzunehmen. Handelt es sich in wichtigeren Fällen darum, Blockfundamente so zu bemessen, dass ihr Widerstand gegen Verdrehung genau vorausbestimmt werden kann, so ist dies durch die versuchsweise Bestimmung der Baugrundziffern der Fundamentgrube mittels eines passenden Instrumentes möglich. Unter dieser Voraussetzung würde der beschriebene Rechnungsgang in allen Fällen genügend genaue Ergebnisse liefern.

Directives pour le choix des interrupteurs des installations à courant alternatif à haute tension[1].

Etablies par le groupe *a* (protection contre les surintensités)[2]
de la commission de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union de Centrales Suisses d'électricité
pour l'appareillage à haute tension et pour la protection contre les surtensions
et l'incendie, en collaboration avec M. *G. Brühlmann,* Baden.

Préface.

Par M. le Dr. *B. Bauer,* président de la commission.

Depuis quelque temps déjà, l'A. S. E. et l'U. C. S. se sont demandées comment il serait possible d'augmenter la sécurité de fonctionnement de l'appareillage électrique, en particulier des interrupteurs à huile. Les premiers essais et études furent entrepris avec l'aide des maisons de construction dès 1914. Il fallait d'abord étudier

[1]) Présentées à l'assemblée générale de l'A.S.E. du 22 juin 1924.

[2]) Le groupe *a* se compose de M. Dr. Roth-Baden, président; et de MM. Dr. Bauer-Berne, Egg-Berne, Glaser-Oerlikon, Gysel-Zurich, Heusser-Aarau, Schmidt-Lausanne et d'office du secrétaire général; Collaborateur: M. G. Brühlmann-Baden.

le phénomène de la rupture du courant dans l'huile, les effets physiques et chimiques et les influences des conditions sous lesquelles a lieu la rupture. La commission a fourni de 1915 à 1919 trois rapports dans lesquels sont consignés les résultats de ces travaux. Les investigations peuvent être classées en trois séries.

1⁰ Détermination des facteurs qui influent sur la sûreté de fonctionnement (longueur de l'arc, énergie développée dans l'arc, production de chaleur, production de gaz).

2⁰ Influence sur l'arc de l'intensité du courant, de la tension et du facteur de puissance.

3⁰ Influence des dispositions de construction (vitesse de rupture, rupture multiple, pression de l'huile, forme des contacts, etc).

Malgré les moyens que les deux associations et les maisons de construction avaient mis à notre disposition, nos investigations, bien que très approfondies, n'ont pu avoir qu'un caractère préparatif. Les puissances des circuits rompus étaient relativement faibles et on devait se demander si les résultats obtenus se vérifieraient encore pour des puissances plus grandes et en cas de court-circuit.

Les recherches ont été poursuivies en Suisse et à l'Etranger et nous disposons aujourd'hui d'un grand nombre de résultats d'expériences. On peut constater cependant aujourd'hui que par nos travaux préliminaires nous avons rendu un service utile.

Le caractère et l'effet de l'interruption du courant sont aujourd'hui assez bien connus quoi qu'il ne soit pas encore possible d'établir une règle ou formule simple pour déterminer les dimensions des interrupteurs. Les maison de construction sont aujourd'hui, grâce à l'expérience acquise, en état d'indiquer pour quelle puissance maximum et sous quelle intensité et tension maximum un interrupteur peut fonctionner sans dommage. Par ce fait la sécurité de fonctionnement des installations se trouve considérablement accrue, il nous est possible aujourd'hui de choisir des types d'interrupteurs dont nous sommes certains qu'ils supporteront toutes les influences auxquelles ils seront exposés en service courant. La commission s'est proposée d'exposer les raisonnements qu'on devra faire en choisissant un type d'interrupteur. Elle s'adresse donc surtout aux exploitants et leur montre comment ils peuvent déterminer, pour tous les points de leur réseau, les dates qu'il importe de connaître avant de faire le choix d'un interrupteur.

Autrefois on se contentait d'indiquer, au moment de la commande, la tension et l'intensité maximum en service courant. Ces indications sont insuffisantes. Les directives établies par la commission demandent comme indications supplémentaires *l'intensité de rupture, la tension de rupture immédiatement après la rupture de l'arc* et *le courant de court-circuit maximum* au lieu d'installation de l'interrupteur. Etant donné les liaisons multiples qui existent entre les réseaux suisses, la détermination exacte de ces dates est extrêmement compliquée. C'est le mérite de la sous-commission d'avoir rappelé pour cette détermination une méthode simplifiée, pratique et suffisamment exacte. Nous devons des remerciements spécialement au président de la commission, M. le Dr. Roth, et à son collaborateur M. Brühlmann, ingénieur.

1⁰ Introduction.

Les interrupteurs constituent un élément d'importance capitale dans une installation à haute tension; la sécurité du service de l'installation dépend en grande partie de leur bon fonctionnement. C'est surtout dans le cas des courts-circuits qu'il importe d'avoir des interrupteurs de toute sécurité autant pour pouvoir protéger les parties saines de l'installation des suites d'une perturbation, que pour pouvoir rétablir rapidement le service sur le tronçon endommagé. Pour l'équipement des réseaux de grande puissance et haute tension, ou bien des réseaux à très haute tension, on n'emploie actuellement que des interrupteurs à huile. Mais ces derniers, s'ils ne sont pas suffisamment dimensionnés, constituent un danger non seulement pour le bon fonctionnement du réseau, mais aussi pour l'installation elle-même, à cause

des explosions et des incendies d'huile qu'ils peuvent provoquer. On doit donc procéder avec le plus grand soin au choix des interrupteurs pour les installations nouvelles, ou au contrôle de ceux d'un réseau dont on veut augmenter la puissance. Pour la détermination des dimensions d'un interrupteur, il est nécessaire de connaître l'intensité du courant et la tension de rupture aux quelles ils doivent correspondre. L'évaluation de cette intensité exige très souvent de longs calculs, lesquels, vu l'importance de cette donnée, ne peuvent être évités. Il est indiqué de faire entreprendre ces calculs par les personnes qui sont le plus en mesure de se rendre compte des conditions du service et de prévoir les possibilités développement du réseau.

Dans les canalisations à courant alternatif, on intercale des interrupteurs à des endroits où l'on doit pouvoir interrompre le circuit pendant le passage du courant. On peut avoir à couper soit le courant normal, soit le courant de surcharge, ou encore le courant de court-circuit. La disjonction d'un court-circuit qui se produit sur une ligne immédiatement après un interrupteur, représente toujours pour cet interrupteur le service le plus sévère auquel il peut être soumis à l'endroit considéré. Les interrupteurs prévus pour déclencher au moment d'un court-circuit doivent être dimensionnés en conséquence.

2⁰ Définition des termes employés.

Par *interrupteur*[3]) est désigné un appareil qui sert à l'ouverture d'un circuit pendant le passage du courant.

Par *interrupteur à huile* on entend un interrupteur dans lequel la disjonction des contacts s'effectue dans l'huile.

La *tension de service* signifie ici la tension maximum mesurée entre les conducteurs extérieurs d'une ligne mono- ou triphasé[4]) qui peut apparaître à l'emplacement de l'interrupteur, à n'importe quel moment.

Le *courant de service* est la valeur efficace du courant maximum traversant l'interrupteur en régime permanent à n'importe quel moment du service[5]).

Le *courant de rupture* désigne la valeur efficace de la composante alternative du courant qui traverse l'interrupteur lors d'un déclenchement, au moment de la séparation des contacts.

La *tension de rupture* est la valeur efficace de la tension qui, lors d'un déclenchement, apparaît sur la ligne d'arrivée, immédiatement après l'extinction des arcs sur toutes les phases.

Par le *courant initial de court-circuit,* on entend la valeur efficace de la composante alternative du courant qui se produit tout au début du court-circuit et en l'absence des effets de saturation (voir chapitre 4a).

Par le *courant permanent de court-circuit* on désigne ici la valeur efficace du courant permanent qui s'établit en court-circuit prolongé.

Un *pôle d'interrupteur* est un interrupteur ou une partie d'interrupteur qui sépare ou joint deux points d'une conduite simple.

Le *contact principal* est un contact ou une partie de contact dans l'interrupteur, qui conduit le courant de service.

Les *contacts d'extinction* sont des contacts de l'interrupteur sur lesquels se produit l'extinction des arcs de rupture.

Le contact principal et le contact d'extinction peuvent être réunis en un seul organe.

La *résistance de protection* est une résistance ohmique montée avec l'interrupteur dans le but de réduire les surtensions et les à-coups de courant se produisant à la suite des déclenchements et des enclenchements[6]).

La *résistance d'extinction* est une résistance adjointe à l'interrupteur, dans le but de faciliter l'extinction des arcs de rupture[6]).

---

[3]) Les interrupteurs à ouverture automatique sont également designés par le mot „disjoncteur".
[4]) Abstraction faite des surtensions.
[5]) Abstraction faite du courant de court-circuit et des surintensités passagères.
[6]) Voir chapitre 5.

3⁰ Données nécessaires au choix d'un interrupteur.

Les principales conditions de service dont dépend le choix de l'interrupteur, et auxquelles il doit correspondre sont: la tension de service, le courant initial de court-circuit, le courant de rupture et, enfin, la tension de rupture.

a) Tension de service.

La tension de service fixe les distances d'isolement entre les différentes parties de l'interrupteur. Très souvent, la tension de service détermine tout l'encombrement de l'interrupteur. Cela arrive dans le cas où les distances à maintenir donnent des dimensions plus grandes que cela n'aurait été nécessaire, par exemple pour le courant de rupture ou le courant de service.

La tension d'essai des interrupteurs doit être conforme aux normes de l'A. S. E.[7]). Il n'existe d'ailleurs aucune relation entre la valeur de la tension d'essai et le courant de court-circuit pour lequel l'interrupteur est prévu.

b) Intensité du courant de service.

L'intensité du courant de service définit la grandeur des contacts principaux, la section des tiges de traversée et celle des autres organes conduisant le courant. Dans le cas de courants très forts, l'intensité du courant de service peut aussi, pour des raisons d'échauffement, définir l'encombrement de l'interrupteur. Pour l'évaluation de l'intensité de service, il est bon de tenir compte des augmentations futures de la charge du réseau. Afin d'avoir des pièces interchangeables et en nombre aussi petit que possible en réserve, il est souvent avantageux de choisir pour une même installation tous les interrupteurs d'un même type, en les dimensionnant pour la partie du réseau ayant le plus fort courant de service.

c) Intensité du courant initial de court-circuit.

Tout interrupteur doit être choisi de sorte qu'il puisse, étant fermé, supporter sans dommage le plus fort courant initial de court-circuit qui puisse se produire dans le réseau à l'endroit où l'interrupteur est placé. En suite d'effets électrodynamiques, ce courant peut soumettre les tiges de traversée, les contacts et les autres organes de l'interrupteur à de grands efforts mécaniques; d'autre part il peut produire des échauffements considérables. Dans la construction de ces organes, il faut donc attacher une grande importance au courant initial de court-circuit.

Afin d'atteindre une plus grande sécurité de service, on devrait dimensionner chaque interrupteur de telle manière qu'il puisse être enclenché sans dommage sur un court-circuit éxistant à l'endroit de son emplacement.

La méthode de calcul du courant initial de court-circuit pour un point donné du réseau est indiquée au chapitre 4. Pour la détermination des efforts mécaniques auxquels un interrupteur est exposé, on prendra aussi en considération l'à-coup de courant produit par le phénomène de saturation (chapitre 4a).

d) Intensité du courant de rupture.

Les efforts exercés sur un interrupteur par une disjonction sont, à une tension de rupture donnée, déterminés par l'intensité du courant de rupture. Ces deux données définissent en général la grandeur de l'interrupteur.

Si au moment de la disjonction l'allure du courant est asymétrique, on ne tiendra compte, dans les calculs que de sa composante alternative, étant donné que la composante de courant continu qui lui est superposée non seulement ne complique pas la marche de la disjonction, mais, dans certaines conditions, peut même la faciliter.

[7]) Normes de l'A. S. E. pour les tensions et les essais d'isolation (voir Bulletin 1923, No. 12).

L'intensité admissible du courant de rupture d'un interrupteur dépend du déphasage du courant par rapport à la tension au moment du déclenchement, et ceci dans ce sens qu'un courant en retard rend la rupture plus difficile. Toutes les indications relatives aux intensités admissibles des interrupteurs doivent se rapporter à un facteur de puissance d'une valeur inférieure à 0,4, car la variation de cos φ entre 0 et 0,4 n'a pour ainsi dire pas d'influence sur la grandeur des efforts auxquels l'interrupteur est exposé au moment d'une disjonction. D'ailleurs, au moment des courts-circuits, la valeur du facteur de puissance du réseau est géneralement inférieure à 0,4.

Tout interrupteur doit être dimensionné pour la plus grande intensité du courant de rupture qu'il pourrait avoir à couper durant son service, même si ce courant ne se produit que dans des conditions anormales. Ce courant sera le plus grand courant de court-circuit du réseau qui puisse s'établir à l'emplacement de l'interrupteur (courant de court-circuit initial ou permanent; ce dernier dépend du réglage du relais de déclenchement[8]), sauf si l'on est certain qu'au moment du court-circuit, l'interrupteur ne sera en aucun cas déclenché ni à main, ni automatiquement.

Il n'existe aucune relation entre l'intensité du courant de rupture, à laquelle peut être exposé un interrupteur à un endroit donné du réseau en cas de court-circuit, et l'intensité du courant de service, qui traverse l'interrupteur normalement à ce même endroit du réseau: l'intensité du courant de rupture ne dépend que des caractéristiques de la partie du réseau alimentant le court-circuit. (Ainsi, par exemple, les dérivations alimentant les services auxiliaires d'une grande centrale et les lignes principales partant de la centrale ont la même intensité de courant de court-circuit si elles sont branchées sur les mêmes barres collectrices.)

Les méthodes de calcul de l'intensité du courant de rupture sont indiquées au chapitre 4. En calculant l'intensité du courant de rupture à laquelle doit correspondre l'interrupteur à un endroit donné du réseau, il est bon d'envisager toutes les possibilités d'augmentation ultérieure de la capacité du réseau alimentant cet endroit, comme par exemple l'adjonction éventuelle de centrales nouvelles ou de transformateurs, le renforcement des sections des conducteurs ou encore la jonction avec d'autres réseaux.

L'interrupteur doit pouvoir supporter à intervalles d'une minute trois déclenchements et deux enclenchements successifs, le courant de rupture et le courant initial de court-circuit ne dépassent les limites fixées.

Dans certains cas, il est utile de limiter par des mesures appropriées l'intensité du courant de court-circuit. Par cette limitation on protégera contre les effets néfastes de courants trop intenses non seulement les interrupteurs, mais aussi toutes les parties de l'installation parcourues par ces courants. Ces mesures de protection consistent à subdiviser les barres collectrices des centrales en plusieurs tronçons indépendants ou à intercaler des bobines de self soit sur les conducteurs des alternateurs, soit sur les lignes de départ, soit encore entre les différents tronçons des barres collectrices. Une telle protection contre les courts-circuits peut surtout être nécessaire dans les centrales de très grande puissance et dans le cas de lignes de puissance normale relativement petite, alimentées par de grandes centrales (les dérivations desservant les services auxiliaires d'une grande centrale en sont un exemple particulier).

[8]) Voir chapitre 4 a.

Influence de la fréquence sur la marche de la disjonction. Cette influence dépend essentiellement de la construction de l'interrupteur, c'est pourquoi il est impossible de déterminer son rôle d'une manière générale. On ne possède pas encore de données expérimentales suffisantes qui permettraient d'établir avec certitude la puissance de rupture admissible d'un interrupteur donné pour des courants d'une autre fréquence. Cependant, si l'on se base sur les phénomènes se rattachant à l'extinction des arcs de rupture, on peut admettre que la variation de la fréquence entre 25 et 50 périodes par sesonde n'a pas d'influence essentielle sur la marche de la disjonction.

e) Tension de rupture.

Les efforts auxquels est exposé un interrupteur lors d'un déclenchement sont déterminés à la fois par la tension de rupture et le courant de rupture. La tension de rupture peut être égale ou sensiblement inférieure à la tension de service; elle peut être calculée en suivant la marche indiquée au chapitre 4.

Influence du système de courant sur la tension active au moment de la rupture. Si un court-circuit d'un réseau polyphasé est coupé simultanément par plusieurs pôles d'un interrupteur, c'est-à-dire soit par plusieurs interrupteurs unipolaires, soit par un seul interrupteur multipolaire, l'effort auquel les différents pôles sont exposés est déterminé en général non pas par le quotient de la puissance totale interrompue sur le nombre de pôles, mais par une puissance plus grande. La cause de ce phénomène réside dans le fait que l'extinction des arcs de rupture aux pôles d'interrupteur des différentes phases ne se produit pas simultanément; de ce fait, l'interrupteur de la phase dont les arcs de rupture se sont éteints les premiers, reste sous une tension au-dessus de la tension de rupture jusqu'à l'extinction des arcs des autres phases.

Tension active par pôle d'interrupteur lors de la rupture de courts-circuits polyphasés. Tableau I.

Système	Nombre de pôles de l'interrupteur	Connexion	Tension active par pôle: V_p = tension de phase au moment de la disjonction
triphasé[9])	3	$V_p\sqrt{3}$	1,5 V_p
monophasé	2	V_p	$^1/_2$ V_p
monophasé	1	V_p	V_p
triphasé[9])	2 (service de traction)	$V_p\sqrt{3}$	1 pôle – 1,5 V_p 1 pôle – 1,73 V_p à choix

[9]) Dans le cas des courts-circuits francs sur les alternateurs triphasés la tension active peut atteindre, à cause de la déformation de l'onde de la tension, des valeurs encore plus grandes. Les valeurs exactes de la tension active dépendent du degré de l'amortissement du champ transversal de l'alternateur; celles indiquées au tableau I se rapportent à un amortissement idéal. Pour les détails sur la question de l'élévation de la tension à la suite de rupture des courts-circuits triphasés, voir Biermanns, Magnetische Ausgleichsvorgänge in elektrischen Maschinen, J. Springer, Berlin, pages 134 et suivantes.

Le tableau I donne tes tensions actives par pôle d'interrupteur pour les différents systèmes et différentes connexions.

Le tableau I permet de calculer la tension active pour une connexion ou un système donnés, en partant d'une autre connexion d'un autre système. Les intensités admissibles des courants de rupture ou des tensions de rupture des interrupteurs ne sont généralement indiquées que pour une connexion ou un système; normalement ces indications se rapportent au système triphasé. Si l'on désire employer un interrupteur dont les données se rapportent à un système ou à une connexion donnés dans d'autres conditions, on doit tout d'abord évaluer la tension active correspondante, comme le montre l'exemple ci-dessous:

Un réseau monophasé, d'une tension de service de 24000 volts d'un courant de court-circuit de 10000 ampères et d'une tension de rupture de $V_{p1} = 10000$ volts doit pouvoir être déconnecté sur les deux phases par deux interrupteurs unipolaires. Quel est le type d'interrupteur à choisir sur une liste des interrupteurs dont les données signalétiques relatives à l'intensité admissible du courant de rupture et de la tension de rupture sont indiquées pour le système triphasé?

On détermine en premier lieu la tension active par chaque pôle d'interrupteur pour le réseau monophasé; elle est égale, d'après le tableau I à $\frac{1}{2} V_{p1}$ c'est-à-dire, dans notre cas, à 5000 volts. Connaissant la tension active par pôle d'interrupteur, on obtient la tension de phase du système triphasé correspondant en divisant $\frac{1}{2} V_{p1}$ par le coefficient 1,5 pris dans ce même tableau:

$$V_{p3} = \frac{1}{1,5} \cdot \frac{1}{2} V_{p1} = \frac{1}{3} V_{p1} = 3300 \text{ volts.}$$

Ainsi, on doit prendre un interrupteur qui, d'après la liste, peut être employé dans un réseau triphasé pour un courant de court-circuit de 10000 ampères et pour une tension de phase de $\frac{1}{3} V_{p1} = 3300$ volts ou une tension composée de 5800 volts à peu près. Il est entendu que l'interrupteur doit être isolé pour une tension de service de 24000 volts.

Grandeur de la tension de phase d'un réseau triphasé, à laquelle les interrupteurs sont soumis aux mêmes efforts qu'à la tension de phase V_p d'une autre connexion. Tableau II.

Système	Nombre de pôles de l'interrupteur	Tension de phase équivalente d'un système triphasé, muni d'interrupteurs à 3 pôles
monophasé	2	$\frac{1}{3} V_p$
monophasé	1	$\frac{1}{1,5} V_p$
triphasé	2 (service de traction)	pour 1 pôle V_p pour 1 pôle $\frac{1,73}{1,5} V_p$

On détermine de la même façon les coefficients à employer pour passer d'une connexion quelconque à la connexion triphasée; ces coefficients sont réunis dans le tableau II.

Les tableaux I et II se rapportent à la disjonction d'un court-circuit sur toutes les phases (ou bien d'une charge presque exclusivement inductive), qui représente l'effort maximum auquel l'interrupteur peut être exposé. La rupture de courts-circuits qui se produisent sur une seule phase d'un système polyphasé correspond à la disjonction d'un réseau monophasé.

4⁰ Calcul de l'intensité du courant de rupture et de la tension de rupture pour un point donné du réseau.

a) Généralités.

Les valeurs de l'intensité du courant et de la tension au moment de la disjonction d'un court-circuit dépendent de l'instant où la séparation des contacts de

l'interrupteur a lieu et ceci par le fait que le courant, ainsi que la tension de rupture s'amortissent rapidement en passant des valeurs qu'ils ont au moment initial aux valeurs finales, comme c'est indiqué sur la fig. 1.

On ne pourra dimensionner les interrupteurs pour une intensité du courant de rupture plus petite que l'intensité initiale du courant de court-circuit et pour une tension de rupture plus petite que la tension de service que si l'on est sûr que par le fonctionnement précis des rélais ou par d'autres mesures, un déclenchement prématuré de l'interrupteur est exclu (commande à main et surtout par relais à tension nulle sans déclenchement retardé).

La tension de rupture est identique à la tension induite dans les alternateurs au moment du déclenchement; or, comme c'est cette dernière qui fait passer le courant par les impédances de l'ensemble du circuit court-circuité, il s'ensuit que le rapport de la tension au courant est constant tant que ces impédances restent invariables.

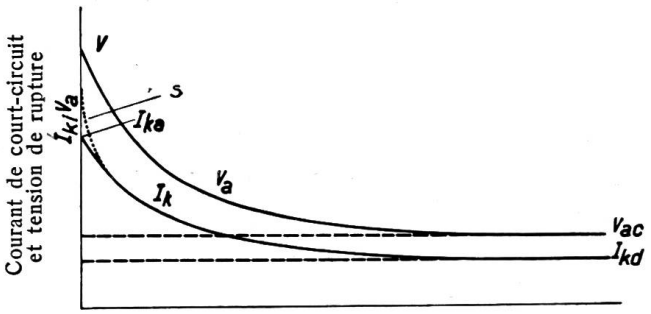

Fig. 1.
Dans les courbes de I_k et de l'à-coup provoqué par la saturation S il n'a pas été tenu compte de la composante du courant continu.

Une variation de l'impédance ne peut être provoquée que par la saturation magnétique du fer des alternateurs (champs de dispersion). C'est pour cette raison que dans le cas de courts-circuits francs sur les alternateurs le premier à-coup de courant est plus fort (jusqu'à 30 %) et a une allure indiquée par la courbe en pointillé de la fig. 1.

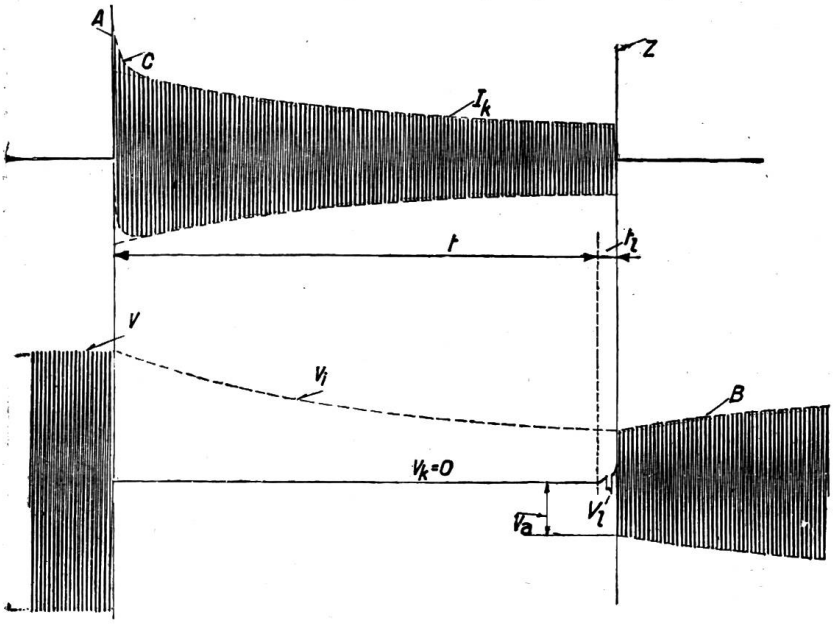

Fig. 2.

Court-circuit dans le voisinage des alternateurs.

A = Commencement du court-circuit.
B = Après la disjonction la tension monte lentement jusqu'à la tension de service.
C = Asymétrie (il n'a pas été tenu compte de l'à-coup produit par le courant de saturation qui est amorti en 0,05 sec. approximativement).
I_k = Courant de court-circuit.
t = Temps de déclenchement des relais + temps nécessaire au fonctionnement [de l'interrupteur.
t_l = Durée de l'arc de rupture.
V = Tension de service.
V_a = Tension de rupture (maximum momentané).
V_l = Tension induite.
V_k = Tension pendant le court-circuit.
V_l = Tension de l'arc de rupture dans l'interrupteur.
Z = Moment de la rupture.

Pour la détermination des efforts mécaniques auxquels un interrupteur est exposé à la suite des effets électrodynamiques, il faut tenir compte de l'à-coup de courant provoqué par la saturation. Le temps (environ 0,05 sec.) qui est nécessaire à l'interrupteur pour se déclencher, même dans le cas de relais à déclenchement instantané, suffit en général pour une extinction presque complète (jusqu'à 5 % à peu près) de cette surintensité. C'est pourquoi les phénomènes de saturation sont pratiquement sans influence sur la marche de la disjonction. Pour cette raison, *on a supposé dans tous les calculs qui suivent une machine sans effet de saturation* et l'on a toujours pris comme intensité ini-

tiale du courant de court-circuit celle qu'on obtient en négligeant l'effet de la saturation (courbe I_{ka} de la fig. 1). Dans ces hypothèses, il suffit de connaître l'allure de la courbe des intensités pour avoir celle de la courbe de tension d'un alternateur. La valeur constante du rapport entre tension et courant est obtenue en divisant la tension avant le court-circuit par l'intensité initiale du courant de court-circuit défini plus haut.

Dans certaines conditions, la tension V au moment initial (fig. 1) peut être supérieure à la tension de service. Si avant le court-circuit, l'interrupteur est traversé par la plus grande partie du courant de charge des alternateurs, on devra, pour être exact, ajouter à la tension de rupture au début du court-circuit la chute du potentiel produite dans les alternateurs par cette partie du courant de charge. Dans le cas limite où le courant total de la charge normale des alternateurs traversait l'interrupteur avant le court-circuit, cette augmentation de la tension induite peut atteindre 3 à 15 % suivant la valeur du facteur de puissance de la charge.

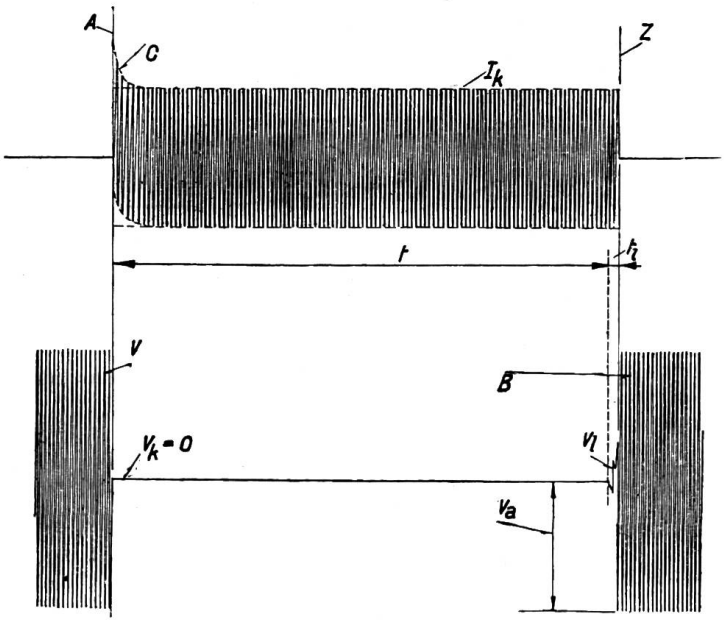

Fig. 3.

Court-circuit alimenté par l'intermédiaire de longues canalisations ou de transformateurs.

A = Commencement de court-circuit.
B = Après l'interruption la tension reste approximativement constante.
C = Asymétrie (peu prononcée, point d'à-coup de saturation).
I_k = Courant de court-circuit (à peu près constant).
t = Temps de déclenchement des relais + temps nécessaire au fonctionnement de l'interrupteur.
t_1 = Durée de l'arc de rupture.
V = Tension de service.
V_a = Tension de rupture (maximum momentané).
V_k = Tension pendant la durée du court-circuit.
V_1 = Tension de l'arc de rupture dans l'interrupteur.
Z = Rupture de court-circuit.

Selon le système des relais de commande choisi, les interrupteurs seront déclenchés en cas de court-circuit immédiatement ou avec un certain retard. Les durées fixées pour le déclenchement (plus le temps nécessaire au fonctionnement du mécanisme de déclenchement, qui peut, d'ailleurs, être généralement négligé à cause de sa petitesse) sont à la base de l'emploi des courbes de la fig. 1. Pour les grands alternateurs d'une puissance supérieure à environ 1000 kVA, la durée de l'amortissement du courant et de la tension, des valeurs initiales jusqu'aux valeurs finales (permanentes), est comprise entre 3 et 6 secondes. Les interrupteurs dont les relais déclenchent instantanément, doivent être calculés pour la totalité du courant initial de court-circuit (I_{ka} de la fig. 1) tandis que ceux commandés par des relais à action différée et dont le déclenchement est fixé à plusieurs secondes, peuvent être dimensionnés pour le courant permanent de court-circuit (en tenant compte, bien entendu, des remarques faites plus haut sur la précision du fonctionnement des relais et des possibilités du déclenchement prématuré, surtout par commande à tension nulle).

Pour faire mieux comprendre la marche du court-circuit et celui de la disjonction, on a représenté sur les fig. 2 et 3, l'allure du courant traversant l'interrupteur et celle de la tension sur la ligne d'arrivée au moment de la production d'un court-circuit et de sa rupture. Ces figures sont celles qu'on obtient en faisant des prises oscillographiques du phénomène. La fig. 2 représente l'effet du court-circuit à une petite distance des bornes de l'alternateur (court-circuit franc) tandis que la fig. 3 donne un tableau du même effet dans le cas d'un court-circuit sur le réseau, séparé

de l'alternateur par des canalisations assez longues ou par des transformateurs intermédiaires. Dans ce dernier cas, l'amortissement du courant et de la tension disparaît pour ainsi dire totalement. Dans les deux figures on a supposé que la rupture ne se produit que quelques secondes après le court-circuit.

La question, quand et dans quelles conditions la marche de la disjonction a en pratique l'allure indiquée sur la fig. 3, est étudiée dans le chapitre 4d, où l'on a également reproduit les calculs numériques pour un réseau hypothétique.

Les développements ci-dessus ont pour but d'une part le calcul du *courant initial de court-circuit,* et d'autre part, la détermination du *courant permanent* et de la tension de rupture pour un court-circuit prolongé.

Une fois ces valeurs limites connues, on peut, à l'aide des courbes donnant l'allure de l'amortissement du courant de court-circuit et de la tension correspondante des alternateurs employés, déterminer avec précision suffisante les valeurs cherchées pour un instant intermédiaire quelconque. Ces calculs ne seront d'ailleurs nécessaires que dans des cas d'importance particulière.

Pour le calcul exact des courants initial et permanent de court-circuit, il est nécessaire de connaître non seulement les données caractéristiques du réseau, mais aussi les caractéristiques de court-circuit des alternateurs qui entrent en considération. S'il s'agit des calculs de première approximation, ou bien si les impédances des lignes et des transformateurs sont des multiples de celles des alternateurs, on pourra se borner à une estimation des données concernant les alternateurs. Le tableau III donne quelques indications à ce sujet.

Rapport du courant de court-circuit au courant normal pour les alternateurs d'une puissance supérieure à environ 1000 kVA, ces derniers étant excités pour la pleine charge.

En déterminant le courant initial de court-circuit, on a fait abstraction de l'effet de saturation.

Tableau III.

	Rapport entre courant initial de court-circuit et courant normal	Rapport entre courant permanent de court-circuit et courant normal
Court-circuit sur toutes les phases	$\frac{5}{1}$ à $\frac{10}{1}$	$\frac{3}{1}$ à $\frac{1,8}{1}$
Court-circuit sur 2 phases . . .	$\frac{5}{1}$ à $\frac{10}{1}$	$\frac{3,5}{1}$ à $\frac{2,8}{1}$
Court-circuit sur 1 phase, c'est-à-dire entre point neutre et une phase (fuite à la terre dans le réseau avec point neutre à la terre)	$\frac{6}{1}$ à $\frac{12}{1}$	$\frac{4,5}{1}$ à $\frac{4}{1}$

Les premiers chiffres se rapportent aux groupes électrogènes à faible et à moyenne vitesse, les seconds sont ceux des turbo-groupes.

b) Méthode du calcul.

Dans ce qui suit, on désigne par:

z = l'impédance par phase des alternateurs, des transformateurs ou des canalisations, en ohms.

z_a = l'impédance relative au courant initial de court-circuit.

z_d = l'impédance relative au courant permanent de court-circuit.

I_k = le courant de court-circuit en ampères.

I_{ka} = le courant initial de court-circuit (abstraction faite de l'effet de saturation).

I_{kd} = le courant permanent de court-circuit.

V = la tension de service en kV.

V_r = la tension induite (tension de rupture) en kV mesurée entre les conducteurs extérieurs.

V_{rd} = la tension induite (tension de rupture en court-circuit permanent) en kV mesurée entre les conducteurs extérieurs.

P = la puissance normale en kVA[10]).
P_k = la puissance de rupture en kVA pour toutes les phases ensemble[10]).
P_{ka} = la puissance de rupture au début de court-circuit en kVA pour toutes les phases ensemble[10]).
P_{kd} = la puissance de rupture en court-circuit permanent en kVA pour toutes les phases ensemble[10]).
m = le rapport du courant de court-circuit au courant normal des transformateurs, des lignes ou autres impédances constantes.
m_a = le rapport du courant initial de court-circuit (composante alternative) au courant normal des alternateurs.
m_d = le rapport du courant permanent de court-circuit au courant normal des alternateurs.
ε = la tension de court-circuit des transformateurs ou des lignes sous courant normal en % de la tension de service.

Une mode de calcul simplifié est donné sous *d*.

La méthode décrite ci-après pour la détermination des courants de court-circuit consiste en ceci: on détermine les impédances de court-circuit par phase pour tous les alternateurs, transformateurs et canalisations, et on procède avec ces impédances comme si elles étaient des résistances ou bien des réactances pures. On arrive ainsi aux calculs semblables à ceux qu'on doit faire pour déterminer la chute de potentiel le long d'une ligne ou d'un réseau. On calcule ensuite l'impédance résultante des parties du réseau connectées en série, par la formule:

$$z_{\text{résult.}} = z_1 + z_2 + z_3 + \ldots.$$

tandis que les parties couplées en parallèle donnent une impédance résultante:

$$z_{\text{résult.}} = \frac{1}{\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_3} + \ldots.}$$

cette dernière formule étant valable non seulement pour les lignes où les transformateurs couplés parallèlement, mais aussi pour les alternateurs travaillant en parallèle. Ces formules étant algébriques, on néglige dans la composition l'influence des composantes réactives et ohmiques des impédances partielles, car c'est seulement de cette façon qu'on arrive à une simplification suffisante des calculs. L'erreur qui en résulte peut atteindre, dans les cas qui se présentent en pratique environ 5 % dans le cas des réseaux aériens et environ 15 % pour des réseaux de câbles. Les valeurs ainsi obtenues pour les impédances résultantes d'une connexion en série seront généralement trop grandes, celles obtenues pour les connexions en parallèle — trop petites.

Pour la détermination de l'intensité du courant de court-circuit on ne doit introduire dans les calculs que les parties du réseau qui peuvent alimenter le court-circuit. En composant les impédances de ces parties du réseau comme de simples résistances, couplées en parallèle ou en série, on obtient l'impédance résultante de court-circuit pour l'endroit donné. Pour ces calculs, il est généralement nécessaire de subdiviser le réseau en secteurs séparés qui sont alors connectés en série ou parallèlement.

A l'aide de l'impédance résultante du réseau, on calcule le courant de court-circuit comme suit:

$$I_k = \frac{V}{\sqrt{3}\, z} 1000, \text{ dans le cas d'un réseau triphasé, et}$$

$$I_k = \frac{V}{z} 1000, \text{ pour un réseau monophasé.}$$

[10]) Pour le calcul de la puissance de rupture voyez plus bas (dernier alinéa avant les exemples numériques sous *c*).

Le calcul du courant permanent de court-circuit diffère du précédent en ce que, pour les alternateurs, on introduit une autre impédance. Cette *impédance de court-circuit permanent* (z_d) est une grandeur auxiliaire qui tient compte de la diminution de la tension induite due à l'affaiblissement des champs inducteurs des alternateurs. On est conduit de cette façon à distinguer pour les alternateurs deux impédances, dont une, la vraie, sera désignée par *l'impédance initiale de court-circuit* (z_a). Cette méthode donne pour le courant permanent de court-circuit des valeurs parfaitement exactes si le circuit est purement inductif et tant que l'influence de la saturation magnétique n'existe pas. Les écarts qu'on observe dans les conditions réelles, sont généralement de grandeur négligeable. Dans les cas défavorables, l'erreur commise peut atteindre environ 10 à 20 %.

Les impédances pour le courant initial et le courant permanent de court-circuit des alternateurs se calculent par les formules:

$$z_a = \frac{V^2}{m_i P} 1000 \text{ ohms et} \qquad z_d = \frac{V^2}{m_d P} 1000 \text{ ohms}$$

indépendamment du système de courant (monophasé ou triphasé).

Si les calculs ont pour but la détermination des dimensions de l'interrupteur, les valeurs de m_a et de m_d qui seront introduites dans les formules, devrait correspondre à l'excitation de pleine charge des alternateurs.

Pour les transformateurs, les canalisations ou en général pour toutes les autres impédances, on a de la même façon:

$$z = \frac{V^2}{m P} 1000 \text{ ohms.}$$

Dans ce dernier cas on peut aussi tirer facilement le rapport m de la valeur de la tension de court-circuit, correspondant au courant normal exprimée en % de la tension de service:

$$m = \frac{100}{\varepsilon}.$$

Les impédances *des canalisations aériennes* dépendent de la disposition des conducteurs, de leurs distances mutuelles et de leur section. Le tableau IV donne quelques impédances des lignes triphasées dont les conducteurs sont des fils de cuivre disposés selon un triangle équilatéral.

Très souvent, les calculs doivent être faits pour des réseaux qui ont des parties à des tensions différentes, couplées entre elles par l'intermédiaire de transformateurs. Afin de pouvoir appliquer la méthode indiquée, on réduira toutes les impédances à une même tension, qui sera de préférence la tension de service pour laquelle doit être construit l'interrupteur en question. Dans ce but on se sert de la formule:

$$z_2 = z_1 \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2,$$

car en passant d'une tension à une autre (par l'intermédiaire des transformateurs) les impédances croissent comme le carré de la tension.

D'après ce qui précède (chapitre 4a) on peut admettre que la tension de rupture V_r est pro-

Impédances par phase de lignes triphasées pour courant de 50 périodes par seconde et constituées par des fils de cuivre disposés en triangle équilatéral.

Tableau IV.

Distance entre les fils	Section des fils mm²	Impédance ohms/km par phase
0,8 m	12,5	1,45
	25	0,79
	50	0,495
	63	0,44
1,2 m	25	0,80
	50	0,515
	63	0,46
	120	0,36
2,4 m	50	0,55
	63	0,495
	120	0,40

portionnelle au courant de court-circuit I_k pendant toute la durée de l'amortissement de courant de court-circuit. Et comme, d'autre part, la tension induite tout au début du court-circuit est approximativement égale à la tension de service, la valeur de la tension de rupture pour un court-circuit permanent sera donnée par la formule:

$$V_{rd} = V \frac{I_{kd}}{I_{ka}} \text{ [11]}.$$

Ces calculs sont d'ailleurs valables non seulement pour le cas de court-circuit franc sur les alternateurs, mais aussi pour tout autre circuit.

La puissance de rupture correspondant à un courant de court-circuit et à une tension de rupture donnés s'obtient comme suit:

Pour les réseaux monophasés:

$$P_{ka} = I_{ka}\, V, \qquad P_{kd} = I_{kd}\, V_{rd}\,.$$

Pour les réseaux triphasés:

$$P_{ka} = I_{ka}\, V \sqrt{3}, \qquad P_{kd} = I_{kd}\, V_{rd} \sqrt{3}.$$

c) Exemples numériques:

1er Exemple. Soit un réseau triphasé d'après la fig. 4. Déterminer les courants de court-circuit et les tensions de rupture pour des courts-circuits supposés aux aux endroits K_1 et K_2.

Calcul pour l'endroit K_1:

Hypothèses relatives aux courants de court-circuit des alternateurs:
Intensité du courant initial de court-circuit = 6 fois le courant normal ($m_a = 6$),
Intensité du courant permanent de court-circuit = 2 fois le courant normal ($m_d = 2$).

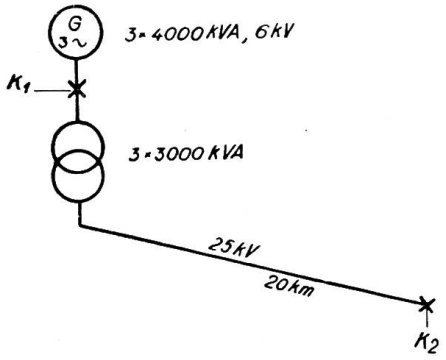

Fig. 4.

La valeur du courant normal est

$$I_{normal} = \frac{3 \cdot 4000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 6 \text{ kV}} = 1150 \text{ A},$$

d'où par multiplication par m_i respectivement par m_d, on déduit les courants initial et permanent de court-circuit:

$$I_{ka} = 6 \cdot 1150 = 6900 \text{ A},$$
$$I_{kd} = 2 \cdot 1150 = 2300 \text{ A}.$$

La tension de rupture pour un court-circuit permanent est donnée par la formule:

$$V_{rd} = 6 \text{ kV} \frac{2300 \text{ A}}{6900 \text{ A}} = 2 \text{ kV}.$$

Avec ces valeurs, on calcule les puissances de rupture pour un déclenchement instantané ou un déclenchement différé (ce dernier se produisant sous courant permanent de court-circuit:

$$P_{ka} = 6900 \text{ A} \cdot 6 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} = 72000 \text{ kVA},$$
$$P_{kd} = 2300 \text{ A} \cdot 6 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} = 8000 \text{ kVA}.$$

[11]) Comme il a été montré au chapitre 4a, en interrompant un courant de charge, on supprime dans les alternateurs la chute de tension qui en résulte et la tension de rupture augmente, par suite, de la même quantité. Mais comme le résultat des calculs est, en général, suffisamment exact sans qu'on ait besoin de tenir compte de cette élévation de tension, cette dernière n'a pas été introduite dans les calculs qui suivent.

Calcul pour l'endroit K_2:

Hypothèses: Dans ce qui suit, on a admis que la tension de court-circuit des transformateurs 6/25 kV atteint 4 % de la tension de service et que l'impédance de la canalisation de 25 kV est de 0,5 Ω/km par phase.

L'impédance du réseau pour le court-circuit à l'endroit K_2 s'obtient par la connexion en série de l'impédance des alternateurs avec celle des transformateurs et de la canalisation.

On rapporte toutes les impédances à la tension de 25 kV et on obtient:
Pour l'impédance des alternateurs:

$$z_a = \frac{(25\text{ kV})^2}{6 \cdot 12000\text{ kVA}} 1000 = 8{,}7 \text{ ohms},$$

$$z_d = \frac{(25\text{ kV})^2}{2 \cdot 12000\text{ kVA}} 1000 = 26{,}0 \text{ ohms}.$$

Pour celle des transformateurs:

$$m = \frac{100}{4\,\%} = 25,$$

$$z = \frac{(25\text{ kV})^2}{25 \cdot 9000\text{ kVA}} 1000 = 2{,}8 \text{ ohms}.$$

et enfin pour l'impédance de la canalisation:

$$z = 20 \text{ km } 0{,}5\ \Omega/\text{km} = 10 \text{ ohms}.$$

Les impédances du réseau au point K_2 seront donc:

$$z_a = 8{,}7 + 2{,}8 + 10 = 21{,}5 \text{ ohms},$$
$$z_d = 26{,}0 + 2{,}8 + 10 = 38{,}8 \text{ ohms}.$$

Pour les valeurs de courant de court-circuit, on obtient:

$$I_{ka} = \frac{25000 \text{ volts}}{\sqrt{3} \cdot 21{,}5 \text{ ohms}} = 670 \text{ A},$$

$$I_{kd} = \frac{25000 \text{ volts}}{\sqrt{3} \cdot 38{,}8 \text{ ohms}} = 370 \text{ A}$$

tandis que la tension de rupture pour le court-circuit permanent est donnée par la formule:

$$V_{rd} = 25 \text{ kV} \frac{370 \text{ A}}{670 \text{ A}} = 13{,}8 \text{ kV}.$$

Les puissances de rupture pour le déclenchement instantané et le déclenchement différé sont alors:

$$P_{ka} = 670 \text{ A} \cdot 25 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} = 29000 \text{ kVA},$$
$$P_{kd} = 370 \text{ A} \cdot 13{,}8 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} = 8800 \text{ kVA}.$$

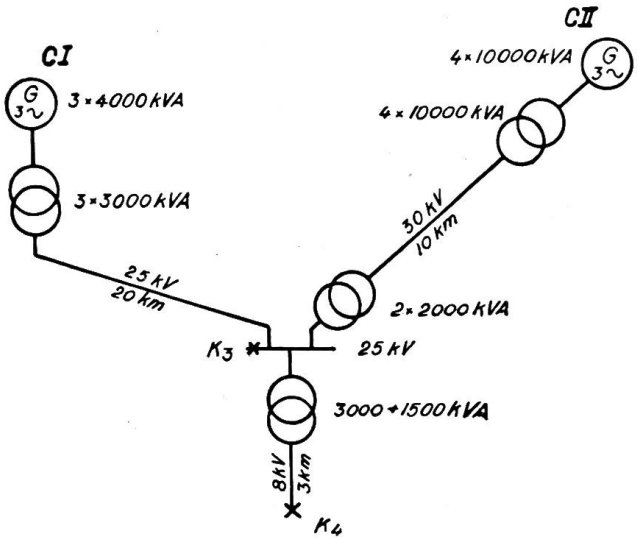

Fig. 5.

CI = Centrale *I*, *CII* = Centrale *II*.

2me Exemple: Soit un réseau triphasé suivant la fig. 5 qui est obtenu de celui de la fig. 4 par l'adjonction d'un autre réseau. Calculer les courants de court-circuit et les tensions de rupture aux endroits K_3 et K_4.

Calcul pour l'endroit K_3 :

Dans l'exemple précédent, on a calculé l'impédance de court-circuit du réseau compris entre la centrale I et l'endroit K_3 :

$$z_1 = 21{,}5 \text{ ohms}; \qquad z_d = 38{,}8 \text{ ohms}.$$

De la même manière on détermine l'impédance de court-circuit du réseau compris entre la centrale II et l'endroit K_3. En changeant un peu les hypothèses relatives aux coefficients m_a, m_d et m, on obtient:

$$z_2 = 16{,}0 \text{ ohms}; \qquad z_d = 22{,}7 \text{ ohms}.$$

Les deux parties considérées du réseau travaillent en parallèle sur le court-circuit de l'endroit K_3. En composant les impédances de ces deux parties du réseau comme des résistances branchées en parallèle, on obtient les impédances de court-circuit pour l'endroit K_3 :

$$z_a = \frac{1}{\frac{1}{21{,}5} + \frac{1}{16{,}0}} = 9{,}2 \text{ ohms}, \qquad z_d = \frac{1}{\frac{1}{38{,}8} + \frac{1}{22{,}7}} = 14{,}3 \text{ ohms},$$

et, par suite, les courants de court-circuit:

$$I_{ka} = \frac{25000 \text{ volts}}{\sqrt{3} \cdot 9{,}2 \text{ ohms}} = 1570 \text{ A}, \qquad I_{kd} = \frac{25000 \text{ volts}}{\sqrt{3} \cdot 14{,}3 \text{ ohms}} = 1010 \text{ A}.$$

La tension de rupture pour le court-circuit permanent a pour valeur:

$$V_{rd} = 25 \text{ kV} \frac{1010 \text{ A}}{1570 \text{ A}} = 16 \text{ kV}$$

et les puissances de rupture pour le déclenchement instantané et pour une disjonction sous courant permanent de court-circuit seront:

$$P_{ka} = 1570 \text{ A} \cdot 25 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} = 68000 \text{ kVA},$$
$$P_{kd} = 1010 \text{ A} \cdot 16 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} = 28000 \text{ kVA}.$$

Calcul pour l'endroit K_4 :

On admet que la tension de court-circuit des 2 transformateurs de 3000 et 1500 kVA est de $\varepsilon = 5\,\%$ et que l'impédance de la canalisation de 8 kV est de 0,25 ohms/km par phase (deux lignes en parallèle).

On rapporte tout à la tension des 8 kV et on obtient pour l'impédance de court-circuit à l'endroit K_3 :

$$z_a = \left(\frac{8 \text{ kV}}{25 \text{ kV}}\right)^2 9{,}2 \text{ ohms} = 0{,}94 \text{ ohms},$$
$$z_d = \left(\frac{8 \text{ kV}}{25 \text{ kV}}\right)^2 14{,}3 \text{ ohms} = 1{,}47 \text{ ohms}.$$

Pour les transformateurs d'une puissance totale de 3000+1500 = 4500 kVA on a:

$$m = \frac{100}{5\,\%} = 20,$$
$$z = \frac{(8 \text{ kV})^2}{20 \cdot 4500 \text{ kVA}} 1000 = 0{,}71 \text{ ohms},$$

et enfin pour l'impédance de la canalisation de 8 kV

$$z = 3 \text{ km} \cdot 0{,}25 \text{ ohms/km} = 0{,}75 \text{ ohms}.$$

Pour avoir l'impédance totale à l'endroit K_4, on ajoute à l'impédance de l'endroit K_3 celles des transformateurs et de la canalisation (connexion en série), ce qui donne:

$$z_a = 0{,}94 + 0{,}71 + 0{,}75 = 2{,}4 \text{ ohms},$$
$$z_d = 1{,}47 + 0{,}71 + 0{,}75 = 2{,}93 \text{ ohms}.$$

Avec ces valeurs, on calcule les courants de court-circuit:

$$I_{ka} = \frac{8000 \text{ volts}}{\sqrt{3} \cdot 2{,}4 \text{ ohms}} = 1920 \text{ A}, \qquad I_{kd} = \frac{8000 \text{ volts}}{\sqrt{3} \cdot 2{,}93 \text{ ohms}} = 1580 \text{ A}$$

et la tension de rupture pour un court-circuit permanent:

$$V_{rd} = 8 \text{ kV} \frac{1580 \text{ A}}{1920 \text{ A}} = 6{,}6 \text{ kV}.$$

On obtient enfin, pour les puissances de rupture, dans le cas de déclenchement instantané et de déclenchement différé:

$$P_{ka} = 1920 \text{ A} \cdot 8 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} = 26500 \text{ kVA},$$
$$P_{kd} = 1580 \text{ A} \cdot 6{,}5 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} = 18000 \text{ kVA}.$$

3me Exemple: Calcul de la *distribution du courant de court-circuit* entre plusieurs parties d'un réseau travaillant en parallèle.

Ces calculs ne sont pas nécessaires pour la détermination de la grandeur de l'interrupteur qui doit être intercalé à un point quelconque du réseau. Ils doivent plutôt servir à évaluer après coup les efforts supportés par les différents secteurs du réseau et les appareils de ces secteurs au moment d'un court-circuit. On pourra en tirer un jugement sur le fonctionnement de ces appareils.

En rapportant de 8 kV à la tension de 25 kV les courants de court-circuit obtenus dans le deuxième exemple pour l'endroit K_4, on obtient:

$$I_{ka} = 1920 \text{ A} \frac{8 \text{ kV}}{25 \text{ kV}} = 615 \text{ A}, \qquad I_{kd} = 1580 \text{ A} \frac{8 \text{ kV}}{25 \text{ kV}} = 505 \text{ A}.$$

On se propose de déterminer les intensités des courants dans les lignes arrivant des centrales I et II.

L'intensité du courant fournie par chacune de ces 2 lignes est inversément proportionnelle à l'impédance de la ligne en question (connexion en parallèle), c'est-à-dire que si $z_{rés}$ désigne l'impédance résultante au point de la jonction de plusieurs lignes couplées en parallèle, et que z_1, z_2, z_3, etc. désignent les impédances de chaque ligne, on a:

$$I_1 = I_{tot.} \frac{z_{résult.}}{z_1}, \qquad I_2 = I_{tot.} \frac{z_{résult.}}{z_2} \text{ etc.}$$

Dans le deuxième exemple, les impédances au point K_3 avaient les valeurs ci-dessous (calculées pour la tension de 25 kV):

pour le réseau de la centrale I: $z_{a_I} = 21{,}5$ ohms; $z_{d_I} = 38{,}8$ ohms;

pour le réseau de la centrale II: $z_{a_{II}} = 16{,}0$ ohms; $z_{d_{II}} = 22{,}7$ ohms;

pour les deux réseaux ensemble: $z_{a_{résult.}} = 9{,}2$ ohms; $z_{d_{résult.}} = 14{,}3$ ohms.

On obtient donc les courants suivants:

pour la centrale I:

$$I_{ka_I} = 615 \text{ A} \frac{9{,}2 \text{ ohms}}{21{,}5 \text{ ohms}} = 265 \text{ A}; \qquad I_{kd_I} = 505 \text{ A} \frac{14{,}3 \text{ ohms}}{38{,}8 \text{ ohms}} = 185 \text{ A};$$

pour la centrale II:

$$I_{ka_{II}} = 615 \text{ A} \frac{9{,}2 \text{ ohms}}{16{,}0 \text{ ohms}} = 350 \text{ A}; \qquad I_{kd_{II}} = 505 \text{ A} \frac{14{,}3 \text{ ohms}}{22{,}7 \text{ ohms}} = 320 \text{ A}.$$

Remarque concernant les exemples numériques :

Tous ces exemples se rapportent à des réseaux à ramifications simples. Pour le calcul des réseaux circulaires on les ramène à des réseaux à ramifications simples, ce qui est toujours possible en passant par le calcul de l'impédance de 3 conducteurs connectés en triangle à la connexion en étoile correspondante. La méthode est la même que celle employée dans le calcul de la chute de tension d'un réseau.

d) Cas où les calculs peuvent être simplifiés :

Dans tous les cas où le courant de court-circuit est limité surtout par les impédances des transformateurs et des lignes et pas par celles des alternateurs, la tension de rupture V_{rd} d'un court-circuit prolongé ne s'écarte que très peu de la tension de service V. On pourra, par suite, laisser de côté le calcul de la tension de rupture, si le courant de court-circuit des alternateurs séparés ne dépasse pas la valeur de 1,5 fois le courant normal.

Dans les cas ci-dessous, on peut prendre le courant permanent de court-circuit égal au courant initial et la tension de rupture égale à la tension de service: courts-circuits aux points terminus de lignes non-circulaires (tension de service au-dessous de 50 kV) alimentées par des réseaux d'une très grande capacité de distribution; c'est aussi le cas des réseaux entiers ou des lignes non circulaires qui sont alimentées par des réseaux de très grande capacité de distribution par l'intermédiaire de transformateurs.

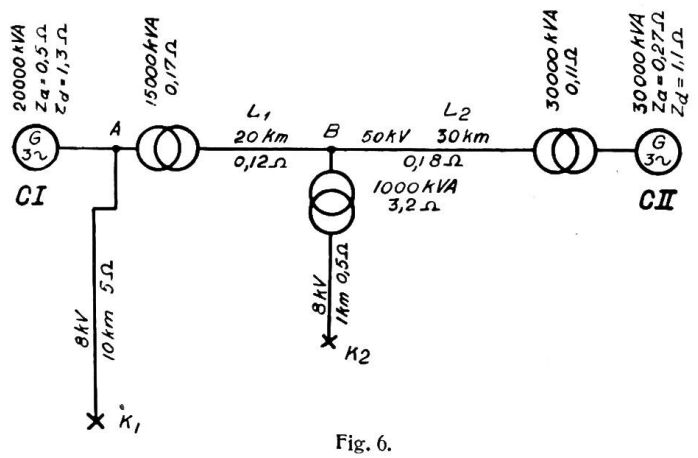

Fig. 6.

CI = Centrale *I*, *CII* = Centrale *II*.

La fig. 6 indique un exemple d'un réseau avec endroits de court-circuit K_1 et K_2 correspondant aux conditions mentionnées.

Toutes les impédances indiquées sur la figure sont calculées pour la tension de 8 kV.

Calcul pour l'endroit K_1:

Les impédances de la centrale II jusqu'au point A sont:

$$z_a = 0{,}27 + 0{,}11 + 0{,}18 + 0{,}12 + 0{,}17 = 0{,}85 \text{ ohms},$$
$$z_d = 1{,}1 + 0{,}11 + 0{,}18 + 0{,}12 + 0{,}17 = 1{,}68 \text{ ohms}.$$

Les impédances résultantes à l'endroit A seront donc:

$$z_a = \frac{1}{\frac{1}{0{,}85} + \frac{1}{0{,}5}} = 0{,}315 \text{ ohms}, \qquad z_d = \frac{1}{\frac{1}{1{,}68} + \frac{1}{1{,}3}} = 0{,}71 \text{ ohms}.$$

Pour le court-circuit à l'endroit K, on obtient ainsi:

$$z_a = 0{,}315 + 5 = 5{,}315 \text{ ohms}, \qquad z_d = 0{,}71 + 5 = 5{,}71 \text{ ohms}.$$

$$I_{ka} = \frac{8000 \text{ volts}}{5{,}315 \text{ ohms}} = 1500 \text{ A},$$

$$I_{kd} = \frac{8000 \text{ volts}}{5{,}71 \text{ ohms}} = 1400 \text{ A},$$

$$V_{rd} = 8 \text{ kV} \frac{1400 \text{ A}}{1500 \text{ A}} = 7{,}5 \text{ kV}.$$

Le courant permanent de court-circuit n'est que de 7 % plus petit que le courant initial; il en est de même avec la tension de rupture laquelle pour un court-circuit prolongé, ne tombe que de 7 % au-dessous de la tension de service.

Calcul pour l'endroit K_2:

Les impédances de la centrale I jusqu'au point B sont:

$$z_a = 0{,}5 + 0{,}17 + 0{,}12 = 0{,}79 \text{ ohms}, \qquad z_d = 1{,}3 + 0{,}17 + 0{,}12 = 1{,}59 \text{ ohms}.$$

De même, de la centrale II jusqu'au point B:

$$z_a = 0{,}27 + 0{,}11 + 0{,}18 = 0{,}56 \text{ ohms}, \qquad z_d = 1{,}1 + 0{,}11 + 0{,}18 = 1{,}39 \text{ ohms}.$$

On en déduit les impédances résultantes pour le point B:

$$z_a = \frac{1}{\frac{1}{0{,}79} + \frac{1}{0{,}56}} = 0{,}327 \text{ ohms}, \qquad z_d = \frac{1}{\frac{1}{1{,}59} + \frac{1}{1{,}39}} = 0{,}74 \text{ ohms}.$$

Pour l'endroit K_2 on obtient donc:

$$z_a = 0{,}327 + 3{,}2 + 0{,}5 = 4{,}027 \text{ ohms}, \qquad z_d = 0{,}74 + 3{,}2 + 0{,}5 = 4{,}44 \text{ ohms}.$$

$$I_{ka} = \frac{8000 \text{ volts}}{4{,}027 \text{ ohms}} = 1990 \text{ A},$$

$$I_{kd} = \frac{8000 \text{ volts}}{4{,}44 \text{ ohms}} = 1800 \text{ A},$$

$$V_{rd} = 8 \text{ kV} \frac{1800 \text{ A}}{1990 \text{ A}} = 72 \text{ kV}.$$

Pour un court-circuit prolongé le courant et la tension ne diffèrent que de 10 % environ de leurs valeurs respectives au début du court-circuit.

L'allure des courts-circuits aux points K_1 et K_2 est donc sensiblement celle indiquée sur la fig. 3.

On peut encore simplifier les calculs en admettant que le *réseau possède,* à certains endroits, une tension à peu près *invariable malgré les courts-circuits.* C'est, par exemple, le cas d'un court-circuit alimenté par un réseau d'une très grande capacité de distribution par l'intermédiaire de lignes et de transformateurs de petites puissances: un tel court-circuit ne fera presque pas baisser la tension du réseau, car l'intensité relativement faible du courant de court-circuit ne constitue pour ce réseau qu'une surcharge. Un pareil point de branchement à tension invariable peut être introduit dans les calculs en faisant l'hypothèse, d'une capacité de distribution infinie concentrée en un point du réseau. Grâce à cette hypothèse, le calcul des impédances de tout le réseau, parfois très compliqué, n'est plus nécessaire. Ainsi,

par exemple, dans le cas du réseau d'après la fig. 6 la chute de tension au point A au moment d'un court-circuit en K_1 atteint seulement 12,5 $^0/_0$. Ce point peut être considéré comme ayant une tension à peu près invariable. De la même façon, mais avec une erreur de 16 $^0/_0$, on peut faire la même hypothèse pour le point B.

On peut employer avantageusement cette méthode dans des cas où, en certains points du réseau, la puissance de celui-ci est indéterminé, ou bien si l'on ne peut pas prévoir tout son développement, ou bien encore quand il peut être question d'une jonction future avec d'autres réseaux, etc.; la capacité de distribution du réseau en de tels endroits sera admise infiniment grande.

Dans les calculs relatifs aux courts-circuits de lignes à ramifications simples des grands réseaux les points principaux de ramification de ces derniers seront toujours considérés comme ayant une capacité infinie de distribution.

e) Calcul du courant de court-circuit, en tenant compte des machines réceptrices.

Les moteurs synchrones ou les commutatrices, branchés sur le réseau sur lequel se produit un court-circuit, débitent aussi bien que les alternateurs une partie du courant initial de court-circuit; si elles sont encore actionnées après la production du court-circuit, ces machines débiteront aussi une partie du courant permanent de court-circuit. Pour cette raison les moteurs synchrones et les commutatrices doivent être pris en considération de la même façon que les alternateurs.

Les machines asynchrones débitent au moment du court-circuit un courant de même ordre de grandeur que celui de machines synchrones avec cette différence que ce courant s'amortit beaucoup plus vite : au bout de 0,05 secondes, sa valeur n'est plus que de $^1/_5$ à peu près de la valeur initiale. En tenant compte du temps nécessaire à un interrupteur pour se déclencher et qui dépasse 0,05 secondes, même dans le cas de commande instantanée, on voit que l'augmentation du courant de rupture par les machines asynchrones est sans importance. Toutefois pour l'évalutation des effets électrodynamiques des courants on doit tenir compte de l'à-coup produit par des machines asynchrones. Sur un court-circuit prolongé les machines asynchrones ne débitent pas de courant.

5⁰ Equipement des interrupteurs avec des résistances.

Les résistances de protection (appelées aussi résistances de choc), ont pour but d'une part, la réduction à des valeurs non dangereuses, des surtensions qui se produisent par la disjonction des transformateurs fonctionnant à vide, et, d'autre part, la limitation des à-coups de courant au moment d'enclenchement des transformateurs. Leur emploi doit être conforme aux directives de l'Association Suisse des Electriciens concernant la protection contre les surtensions.

Les résistances d'extinction (à faible valeur ohmique) influencent la marche de la disjonction dans ce sens que l'interrupteur, peut être employé pour une tension de rupture plus grande le courant de rupture restant le même. Inversément, comme l'intensité admissible du courant de rupture est fonction de la tension de rupture, on pourra aussi, à tension de rupture égale, employer l'interrupteur pour des courants de rupture plus forts.

Les résistances d'extinction, à cause de leur petite valeur ohmique, n'influencent que peu les surtensions et, d'après leur effet, doivent être considérées comme partie intégrante de l'interrupteur.

Les résistances d'extinction peuvent être évitées par l'emploi d'un type d'interrupteur plus grand. Le choix de l'une ou de l'autre solution est déterminé en général par l'espace à disposition et par le prix des appareils en question. S'il n'y a pas d'autres raisons contre l'emploi d'un interrupteur plus grand, on donnera la préférence à cette dernière solution, laquelle, en évitant les résistances, a l'avantage d'être plus simple.