Règles fondamentales pour la protection des alternateurs et des transformateurs

par H. PUPPIKOFER

1. LA NÉCESSITÉ D'UNE PROTECTION ET LES CONDITIONS QU'ELLE DOIT REMPLIR

En se développant, les besoins d'énergie des réseaux de distribution ont aussi fait croître la puissance unitaire des génératrices de courant. Les grandes unités entraînent des frais d'installation relativement moins élevés; elles ont un meilleur rendement et sont, par suite, plus économiques en service. Pour une puissance déterminée, il faut aussi moins de machines, d'où économie et simplification sensible dans la surveillance, etc.

Ces grandes unités immobilisent des capitaux tellement importants qu'on accorde généralement une attention toute spéciale à leur protection. La meilleure protection d'une machine électrique réside sans doute dans son dimensionnement exact et sa solide construction. Mais, par suite d'une série de circonstances fâcheuses, il peut pourtant survenir des accidents contre lesquels il est recommandable d'organiser une protection. Une comparaison entre le prix d'une grande unité et celui d'une protection sélective complète montre toujours que celle-ci se paie déjà largement si elle préserve la machine considérée de graves dégâts, ne serait-ce qu'une seule fois. Il intervient encore un autre facteur important : c'est qu'aujourd'hui les industries raccordées à un réseau de distribution et les abonnés des villes imposent de sévères conditions relativement à la continuité de la fourniture de courant. Une interruption de service peut causer à l'usine génératrice de graves dommages, immédiatement et par la suite. La durée de l'arrêt d'une machine génératrice est naturellement d'autant plus courte que les dégâts sont moins importants. En cas de grave accident, on peut avoir à remplacer les tôles d'un alternateur, ce qui entraîne des travaux de réparation longs et coûteux. Mais on ne réussira à limiter les dommages, c'est-à-dire à réduire les conséquences directes et indirectes d'un arrêt de l'usine que si les relais de protection utilisés agissent déjà sous l'action de faibles courants de perturbation et n'atteignant qu'une fraction de courant normal.

Une interruption de service, provoquée par le dérangement d'une machine de plus ou moins longue durée, peut être encore aggravée par le fait que ce dérangement entraîne la mise hors circuit de parties saines de l'installation. Les relais doivent donc non seulement protéger certaines machines ou parties de l'installation, mais veiller encore à ce que la partie défectueuse de cette installation soit isolée le plus rapidement possible, de manière que le reste du réseau puisse, de toute façon, être maintenu en service. Cette recherche du foyer de perturbation et sa mise hors circuit constituent l'effet sélectif du relais de protection. Outre leur précision et leur sensibilité, il faut donc que les dispositifs de protection employés dans les réseaux électriques aient aussi un effet sélectif absolument sûr. Ils doivent également pouvoir être réglés de manière à ne pas agir sous l'action de phénomènes de compensation résultant de manœuvres de couplage normales. La nécessité de l'effet sélectif d'une protection est reconnue depuis longtemps déjà; mais les suites d'une interruption dans la fourniture d'énergie prennent aujourd'hui de telles proportions, en raison des quantités

d'énergie qui entrent en ligne de compte et des contrats passés, que les chefs d'exploitation doivent, avant tout, exiger cette propriété sélective de chaque appareil de protection.

En résumé, on constate que, pour être utilisable, un dispositif de protection doit satisfaire aux conditions suivantes :

- 1) Protéger le réseau contre les défauts qui peuvent survenir en l'une quelconque de ces parties (effet sélectif des relais de protection);
- 2) Protéger les objets qui entrent en ligne de compte et les parties du réseau elles-mêmes (sensibilité des relais étendue aux plus petits défauts);
- 3) Pour remplir complètement les deux conditions précédentes, le dispositif de protection, c'est-à-dire l'ensemble des relais de protection choisis doit pouvoir déceler tous les défauts susceptibles de se produire.

Ces derniers temps, on a pris l'habitude de donner le nom de protection sélective à toute protection agissant sélectivement. Cette désignation ne se rapporte toutefois qu'à une propriété qui est et doit être commune à tous les systèmes de protection, mais elle ne caractérise nullement le système envisagé. Il est donc nécessaire de désigner avec une plus grande précision la protection choisie.

Les tensions en courant continu employées pour les enroulements d'excitation des alternateurs sont si faibles que, dans les rotors de construction moderne, elles ne peuvent occasionner aucun accident dangereux pour le service. On n'a donc pas jugé nécessaire d'établir un système de protection spécial pour ces circuits.

II. — DES DIFFÉRENTES CAUSES D'ACCIDENTS DANS LES ALTERNATEURS

Les dangers qui menacent les enroulements à courant alternatif des alternateurs, peuvent provenir des causes internes ou externes énumérées ci-après dans l'ordre de leur fréquence et de leur importance :

- Causes internes :
- 1) courts-circuits entre phases,
 - 2) courts-circuits à la terre,
 - 3) courts-circuits entre spires,
 - 4) ruptures de conducteurs.

- Causes externes :
- 5) élévation de tension par suite d'augmentation de vitesse.
 - 6) surcharges.

A l'exception des ruptures de conducteurs, toutes les causes d'accidents dans les machines électriques sont dues à des défauts d'isolement. Dans un court-circuit entre phases, c'est l'isolation contre terre et dans un court-circuit entre spires, c'est l'isolation entre les conducteurs voisins qui est défectueuse.

Une rupture de conducteur peut survenir dans les connexions aux bornes ou dans les raccords entre bobines mal exécutées qui se défont à la suite de courts-circuits répétés. Mais, avec

les procédés de fabrication modernes dans les ateliers bien outillés et les modes de fixation employés pour les bobines, les accidents de ce genre ont à peu près disparu.

Il n'existe pas de relais universel capable de fonctionner dans tous les cas précédemment mentionnés. Partout où la grandeur et le prix des machines le justifient, il sera nécessaire de prévoir une protection complète, obtenue au moyen de différentes combinaisons de relais. De toutes façons, les relais choisis ne doivent pas seulement provoquer le déclenchement de l'interrupteur à huile de la machine en cause, mais aussi démagnétiser celle-ci pour l'empêcher de fournir du courant.

III. — LES DIFFÉRENTS MODES DE PROTECTION POUR ALTERNATEURS

a) *Protection à retour de puissance.* — Pour la protection sélective des alternateurs travaillant en parallèle, on s'est longtemps contenté de relais à retour de puissance.

Cette protection est basée sur l'idée qu'elle doit fonctionner dès que l'énergie change de sens, c'est-à-dire passe du réseau à l'alternateur au lieu de s'écouler en sens contraire. Mais pas plus en cas de court-circuit à la terre qu'en cas de court-circuit entre spires ou de rupture de conducteur, il ne se produit de changement de sens de l'énergie. Les relais à retour de puissance ne protègent contre les courts-circuits que si ceux-ci sont assez forts pour entraîner un changement de direction de la puissance active.

Bien que les méthodes de mesure de puissance en courant triphasé soient très connues, on préconise et emploie encore souvent des couplages complètement faux, pour des relais à retour de puissance. Par là s'expliquent les mauvais résultats que ceux-ci ont donné presque partout. On emploie souvent, par alternateur triphasé, deux relais unipolaires, indépendants l'un de l'autre, connectés d'après la méthode des deux wattmètres, en oubliant complètement que si le facteur de puissance d'une charge inductive tombe au-dessous de 0,5, le couple de l'un des relais change de direction et provoque un déclenchement sans que l'alternateur accuse de défaut. Une autre solution consiste à n'utiliser qu'un seul relais en combinant le courant d'une phase avec la tension composée entre cette phase et celle qui précède dans le champ tournant. Ce relais fonctionne correctement tant que la charge est inductive; mais, sous charge capacitive, avec un angle de déphasage supérieur à 60°, il déclenche de nouveau à faux. Cette propriété devient gênante dans les installations où les alternateurs doivent servir à mettre sous tension de longues lignes aériennes. Tous les relais monophasés à retour de puissance présentent un autre inconvénient qui leur est commun : celui de ne plus développer le couple nécessaire au déclenchement quand, par suite d'un défaut, les tensions des phases touchées s'annulent. Pour qu'au moins dans tous les cas où le défaut interne n'atteint pas les trois phases, on obtienne un couple suffisant, on préconise d'utiliser deux équipages dans lesquels on combine avec un courant déterminé la tension composée qui lui est perpendiculaire. Ces relais se comportent bien avec une charge inductive, mais ils déclenchent à faux lorsque la charge devient capacitive; ils déclenchent déjà sous un faible déphasage capacitif si leur angle de compensation interne accuse une valeur réduite.

L'emploi de trois relais unipolaires, raccordés aux tensions en étoile du système triphasé, ne donne pas non plus la solution désirée, car, en cas de court-circuit sur une phase du réseau, le couple change de direction dans l'un des deux équipages touchés, ce qui peut causer un déclenchement faux.

Pour le courant triphasé, une protection à retour de puissance fonctionnant exactement dans tous les cas, ne s'obtient qu'au moyen de relais du genre des compteurs comportant plusieurs équipages (deux quand le point neutre n'est pas à la terre; trois quand il y est) qu'on accouple mécaniquement, de sorte que la somme de leurs couples est toujours proportionnelle à la puissance traversante.

Les ateliers de Construction Oerlikon ont réalisé dans la construction des relais de ce genre, à retour de puissance, une amélioration importante qu'ils ont fait breveter.

Les relais ordinaires à retour de puissance comportent, par phase, un disque qui traverse deux électro-aimants, dont l'un est excité par le courant, et l'autre par la tension. Dans le relais Oerlikon, le système tournant consiste en autant de boucles fermées qu'on fait intervenir de phases dans la mesure (voir fig. 1). L'un des deux électro-aimants précités forme un circuit

Fig. 1. — Représentation en perspective d'un relais de direction d'énergie.

magnétique complètement fermé qui s'enchaîne avec la boucle correspondante. Cette boucle constitue l'enroulement secondaire court-circuité de l'aimant et devient le siège d'un courant induit proportionnel au courant qui circule dans l'enroulement d'excitation de l'aimant. Ce courant agit contre le champ du second électro-aimant, qui est proportionnel à son courant d'excitation et il engendre un couple dirigé suivant le flux d'énergie. Ce relais accuse une très grande sensibilité pour une puissance absorbée de 23 VA. dans le circuit de tension et de 18 VA. dans la circuit d'intensité.

Il est exécuté pour montage encastré ou en saillie sur les tableaux de couplage (voir fig. 2 et 3). Ce même relais s'emploie aussi avec des relais de surintensité ou d'autres genres pour la protection des lignes et porte la désignation plus générale de relais de direction d'énergie.

La protection à retour de puissance ne s'exerce que contre les causes d'accident du genre mentionné sous 1), mais seulement si le court-circuit est assez intense. En raison de son action très limitée, elle ne convient donc que pour de petits alternateurs qui travaillent en parallèle avec d'autres et pour les cas dans lesquels on ne veut engager les dépenses d'une protection plus étendue (fig. 4). Pour les alternateurs marchant séparément, il n'y a aucune raison d'installer une protection à retour de courant, puisqu'il n'y pas d'autre source d'énergie qui intervienne.

b) *La protection différentielle.* — Avec les alternateurs de grande puissance unitaire, on emploie aujourd'hui, de plus en plus, le système de protection différentielle Merz-Price, basé sur une comparaison des courants. Dans une protection différentielle, on compare toujours entre elles deux grandeurs de même nature dont on forme la différence. Cette opération peut s'effectuer par un moyen mécanique, magnétique ou électrique. C'est ce dernier moyen qu'on préfère aujourd'hui parce

Fig. 2. — Relais tripolaire de direction d'énergie.

qu'il conduit à un dimensionnement du relais indépendant du courant nominal de l'objet protégé. Le couplage est prévu de manière qu'en service normal le courant ne passe pas par le relais; mais, en cas de perturbation, il est refoulé sur le circuit du relais qu'il fait agir. Les relais couplés de la sorte ne sont, en réalité, rien autre que des relais à courant maximum de très grande précision.

Avec le système de protection différentielle ordinaire ou longitudinal, on compare entre eux les courants à l'entrée et la sortie de l'objet à protéger. Il existe deux modes de cou-

Fig. 3. — Schéma d'un relais bipolaire de direction d'énergie.

a Transformateur d'intensité — b Transformateur de tension — c Relais — d Interrupteur auxiliaire — e Bobine de déclenchement — f Source de courant auxiliaire — g Source de courant — E Terre

plage : le couplage série (fig. 5) et le couplage en parallèle (fig. 6) des transformateurs d'intensité. Dans le couplage série, les fils auxiliaires sont constamment parcourus par le courant et le relais différentiel DR est en dérivation. Dans le couplage en parallèle, les forces électro-motrices des transformateurs sont en opposition; les lignes secondaires ne sont parcourues par le courant qu'en cas de perturbation et les relais DR sont en série avec elles. Nous avons donc ici les transformateurs d'in-

tensité qui se comportent comme s'ils avaient leur circuit secondaire ouvert, ce qu'on s'efforce ordinairement d'éviter. Ils doivent donc être exécutés spécialement comme transformateurs série proprement dits. Le couplage série des transformateurs s'emploie pour la protection d'objets pris individuellement, tels

Fig. 4. — Schéma de la protection d'un alternateur triphasé avec relais de direction d'énergie.

1 Alternateur triphasé — 2 Excitatrice — 3 Interrupteur à huile — 4 Régulateur shunt — 5 Interrupteur d'excitation — 6 Transformateur de tension triphasé — 7 Transformateur de tension monophasé — 9 Relais à courant maximum — 10 Relais à retour d'énergie — 11 Relais à tension maximum — 12 Transformateur d'intensité — 13 Aux instruments de mesure.

qu'alternateurs et transformateurs; le couplage en parallèle, pour la protection des lignes.

La protection différentielle a, d'après son principe, un effet absolument sélectif. Elle ne surveille que la partie du réseau comprise entre les deux transformateurs qui travaillent ensemble. Comme ce n'est pas une protection à surintensité, mais une pro-

Fig. 5.
Protection différentielle;
couplage série.

Fig. 6.
Protection différentielle;
couplage en parallèle.

tection d'équilibre, le courant sous lequel elle agit peut être réduit à une fraction du courant nominal.

Tandis que la protection à retour de puissance d'un alternateur nécessite deux transformateurs d'intensité, deux transformateurs de tension et un relais à retour de puissance bipolaire, on doit prévoir pour une protection différentielle :

six transformateurs d'intensité et un relais différentiel tripolaire. La protection différentielle est donc incontestablement plus chère, mais elle s'applique aussi aux machines marchant seules. Elle conserve, en outre, tout son effet sélectif, même sous les tensions les plus réduites, et peut, finalement, protéger contre les courts-circuits à la terre si l'on met le point neutre à la terre. En couplage normal, elle n'agit pas en cas de court-circuit entre spires ou de rupture de conducteur. La mise à la terre du point neutre par une faible résistance ohmique, protège l'alternateur qui travaille avec un transformateur, contre le passage de la haute tension de celui-ci, par suite d'effet de capacité. Si l'alternateur travaille sans transformateur sur un réseau à moyenne tension, la mise à la terre du point neutre supprime les surtensions provoquées par les terres intermittentes et laisse s'écouler continuellement les charges statiques du réseau. Dans de tels cas, on a aussi cherché à réaliser une sélection automatique des lignes partant des barres collectrices de l'alternateur, qui sont atteintes par le court-circuit à la terre. Il suffit de dimensionner la résistance de mise à la terre de manière que le courant de fuite soit suffisant pour faire aussi agir les relais à maxima des départs conduisant le courant de service le plus intense. Il faut, naturellement, que tous les interrupteurs de ligne soient munis d'une protection à maxima sur chaque phase. En dimensionnant la résistance de terre dans le but précité, il faut veiller à ce que le courant qui, lors de défaut dans l'alternateur même, s'écoule à la terre par l'arc, n'atteigne pas des valeurs telles qu'il puisse en résulter de graves dégâts.

Le mode d'exploitation qui se pratique aujourd'hui dans toutes les centrales, consiste à recourir à des unités de service indépendantes les unes des autres. Lorsque, pour les besoins de la transmission, on doit porter le courant à une tension élevée, on choisit de préférence des transformateurs et des alternateurs de même puissance unitaire qu'on relie directement et individuellement les uns aux autres sans interrupteur ni barres collectrices à basse tension. L'alternateur forme alors, avec son transformateur, une unité de service dont le seul interrupteur à huile se trouve du côté haute tension, devant les transformateurs. De cette façon, on réduit considérablement les frais d'installation et on simplifie le service. Chaque alternateur travaillant alors avec son transformateur, on peut dimensionner la résistance de mise à la terre à deux points de vue. Un chef d'exploitation désire une protection différentielle très sensible contre les courts-circuits à la terre, de manière que le relais à action instantanée les coupe dès qu'ils s'amorcent; un autre désire limiter à une faible intensité le courant à la terre dans l'alternateur pour réduire le plus possible les dégâts en cas de court-circuit. Les résistances de mise à la terre doivent alors être prévues avec une valeur ohmique faible dans le premier cas et élevée dans le second cas. Le schéma fig. 7 représente un alternateur qui doit être protégé par des relais différentiels. Admettons que le point neutre soit mis à la terre par une résistance ohmique dimensionnée de manière que le courant de fuite, même sous pleine tension, ne dépasse pas le courant normal. Nous supposons, en outre, que les transformateurs d'intensité soient prévus pour un courant secondaire normal de 5 amp. et les relais différentiels, réglés pour agir sous une différence d'intensité de 0,5 amp. égale à 10 % du courant normal des transformateurs d'intensité. En cas de court-circuit à la terre, le déclenchement par les relais différentiels aura lieu lorsque le courant de fuite aura atteint 10 % du courant normal de l'alternateur. Si l'on néglige la résistance de l'arc de court-circuit et de la ligne de terre, la tension qui agit sur la résistance devra atteindre 10 % de la tension normale pour engendrer le courant de fuite nécessaire au déclenchement. Si la distance OA repré-

sente 10 % de la longueur de l'enroulement d'une phase de l'alternateur, on comprend facilement qu'un court-circuit à la terre entre le point neutre O et le point A ne fera pas fonctionner la protection différentielle, ce qui revient à dire que les 10 % des enroulements à partir du point neutre ne sont pas protégés. Il convient, il est vrai, de bien faire remarquer que ces parties d'enroulements accusent le plus faible potentiel contre terre en service normal et que, l'isolation des enroulements étant partout la même, il ne peut guère s'y produire de court-circuit à la terre. Une augmentation de la valeur ohmique de la résistance de mise à la terre entraîne une augmentation proportionnelle des parties d'enroulement non protégées et correspond à une plus grande insensibilité des relais différentiels. Inversement, on peut, en conservant la même résistance de mise à la terre, réduire la longueur d'enroulement non protégée en augmentant la sensibilité des relais. On obtient ce résultat en employant avec les mêmes relais des transformateurs d'intensité pour un courant secondaire plus élevé, par exemple pour 10 amp., ou, ce qui est encore mieux, en prévoyant pour les mêmes transformateurs d'intensité des relais différentiels plus sensibles qui entrent en action, par exemple sous une différence de courant de 0,1 amp. au lieu de 0,5 amp. L'effet de l'augmentation de la résistance peut donc être compensé dans une certaine mesure par le choix du relais, de sorte qu'on trouve

Fig. 7. — Protection contre les courts-circuits à la terre avec relais différentiel, en cas de mise à la terre du point neutre.

toujours un compromis permettant de tenir largement compte des désirs du chef d'exploitation. De toute façon, en cas de couplage direct des alternateurs avec les transformateurs correspondants, la capacité contre terre de l'installation raccordée galvaniquement à l'alternateur est si faible que le courant à la terre ne peut pas causer de dommages appréciables. On ne doit donc pas pousser trop loin la sensibilité d'une protection contre les courts-circuits à la terre. Au lieu d'une mise hors circuit de l'unité touchée, on peut se contenter de l'émission d'un signal; on peut renoncer complètement à la protection différentielle et prévoir sur la ligne de terre, après une forte résistance ohmique, un relais de protection contre les terres accidentelles (relais à courant maximum) qui, en cas de court-circuit à la terre, fait fonctionner une sonnerie d'alarme. On obtient encore le même résultat, sans résistance de mise à la terre, en mesurant le potentiel du point neutre de l'alternateur par rapport à la terre et en faisant déclencher le signal par un relais de tension. Là où les alternateurs ne sont pas raccordés directement à leurs transformateurs, on peut employer avantageusement avec la mise à la terre du point neutre une combinaison du relais différentiel et du relais de protection contre les terres accidentelles. Le relais différentiel agit seulement en cas de court-circuit à la terre dans l'alternateur; son action est complètement sélective. Le relais de protection contre les

terres accidentelles agit par contre en cas de court-circuit dans l'installation raccordée à l'alternateur.

Cette propriété du simple relais de protection contre les courts-circuits à la terre peut aussi être utilisée, outre la protection de l'alternateur, à celle des barres collectrices et de l'installation de couplage à la tension de l'alternateur. On intercale dans la ligne de terre un relais à maximum temporisé qui ne déclenche qu'après le relais différentiel à action instantanée. On peut aussi le régler pour un courant beaucoup plus fort que celui qui fait fonctionner la protection différentielle contre les courts-circuits à la terre, car les parties de l'installation qu'il doit protéger en dehors de l'alternateur, consistent principalement en matériel de ligne qui n'est pas aussi sensible que les enroulements mêmes de l'alternateur et ne contient pas d'organes aussi coûteux. Cette solution est préférable à celle dans laquelle le même relais différentiel doit aussi protéger toutes les parties de l'installation ayant la tension de l'alternateur. Les transformateurs d'intensité pour la protection différentielle peuvent alors être placés tout près de l'alternateur et même sur ses bornes. Ces transformateurs de bornes peuvent aussi être pourvus d'un deuxième noyau dont l'enroulement secondaire sert à alimenter le circuit de compensation du régulateur de tension et du régulateur de protection à maximum. On obtient de la sorte la garantie que le régulateur de protection fonctionne sous l'action de tous les courts-circuits en dehors de l'alternateur.

Si plusieurs alternateurs dont le point neutre est à la terre, travaillent en parallèle sur le même système de barres omnibus, sans transformateur intermédiaire, la résistance dans le circuit du courant à la terre varie suivant le nombre de machines en service. Il devient alors bien plus difficile de dimensionner ces résistances en vue d'augmenter le plus possible la sensibilité de la protection et de réduire au minimum les effets nuisibles de l'arc à la terre. Dans ce cas, il convient de laisser le point neutre des machines isolé et d'établir un autre chemin pour le retour du courant de court-circuit à la terre. Le plus simple est d'utiliser à cet effet le point neutre d'un transformateur, par exemple celui d'un transformateur pour les propres besoins de l'usine, dont l'enroulement secondaire est couplé en triangle. On dimensionne alors la résistance entre le point neutre du transformateur et la terre comme pour la mise à la terre d'un seul alternateur. Il faut, évidemment, que les enroulements du transformateur puissent supporter sans dommage le courant maximum à la terre. La mise hors circuit sélective d'un alternateur touché par un défaut à la terre s'effectue par la protection différentielle.

Pour que les relais différentiels exercent sûrement leur action sélective, il faut, comme condition fondamentale, que les transformateurs d'intensité employés accusent exactement le même rapport de transformation et cela à toutes les intensités primaires. Si l'on emploie pour une protection différentielle deux transformateurs avec des courbes d'erreur différentes, il circule dans le relais à intensités primaires égales, un courant qui croît avec cette intensité primaire. S'il dépasse la sensibilité du relais, celui-ci fonctionne, bien que la partie protégée de l'installation n'accuse aucun défaut, mais seulement une intensité de courant anormalement forte, par suite d'un court-circuit extérieur. Dès qu'une protection différentielle fonctionne, par suite de courts-circuits de ce genre, elle a perdu son effet sélectif.

Dans une protection différentielle pour alternateurs, on a la possibilité de réduire à un tel point les différences entre les rapports de transformation des transformateurs d'intensité qu'il n'y a plus rien à craindre lorsque ces appareils marchent ensemble. Il suffit pour cela d'employer des transformateurs d'intensité

de même construction, qu'on soumet à la même charge secondaire constituée de préférence par le relais différentiel seul. Dans les nouvelles usines génératrices comportant des alter-

nateurs à forte impédance de court-circuit, raccordés à des transformateurs à tension de court-circuit élevée, le courant qui traverse les unités de service en cas de court-circuit extérieur ne dépasse pas 10—15 fois le courant normal, de sorte que les seules différences de fabrication des transformateurs d'intensité qui entrent encore en ligne de compte peuvent être encore bien compensées.

Les Ateliers de Construction Oerlikon construisent un relais différentiel très sensible, du type d'un robuste relais magnétique, pour montage encastré ou en saillie sur les tableaux de couplage (fig. 8). Sa consommation propre est de 3 VA.

Fig. 8.— Relais différentiel (type encastré), vu de derrière.

c) *La protection contre les courts-circuits entre spires.* — Pour se faire une idée approximative de l'effet d'un court-circuit entre spire, on peut se représenter la spire court-circuitée comme l'enroulement secondaire d'une colonne de transformateur en court-circuit. En raison du nombre de spires intactes, toujours élevé par rapport au nombre de spires court-circuitées, le courant de court-circuit qui, sous pleine tension, traverse les spires défectueuses, est d'une intensité très forte, bien supérieure à celle du courant fourni par la machine en cas de court-circuit extérieur. Cela explique aussi les dégâts considérables qui s'observent toujours lors de courts-circuits entre spires. Il est évident que les détériorations autour du court-circuit atteignent bientôt une telle importance que l'isolation contre le fer disparaît. En général, chaque court-circuit entre spires est donc accompagné d'un court-circuit à la terre. C'est pourquoi, dans une certaine mesure, la protection différentielle des alternateurs avec point neutre à la terre peut être considérée comme une protection contre les courts-circuits entre spires.

Dans les machines munies d'enroulements en barres logées dans des canaux en mica, l'isolement d'une barre à l'autre, c'est-à-dire l'isolement entre spires est le double de l'isolement contre terre, même lorsqu'il y a deux barres dans la même encoche, de sorte que les courts-circuits entre spires sont encore plus impossibles que ceux à la terre. Pour décider si la protection d'une machine donnée contre les courts-circuits entre spires est nécessaire ou non, il faut aussi tenir compte de ces circonstances.

Mais si l'on veut protéger sûrement l'alternateur contre les courts-circuits entre spires et le mettre rapidement hors circuit pour éviter de trop grands dommages, il est nécessaire de prévoir un couplage de protection spécial.

Nombreux sont les essais tentés de tous côtés pour trouver une solution appropriée. On peut aussi déterminer dans l'alternateur défectueux le déplacement du point neutre par suite de court-circuit entre spires, par comparaison avec la tension du point neutre d'un transformateur couplé en étoile, raccordé au même réseau. Ce mode de protection est réalisable tant que le point neutre de l'alternateur en question n'est pas à la terre et qu'on rend le dispositif de mesure insensible aux harmoniques d'ordre supérieur qui peuvent aussi circuler en service normal. Mais dès que le point neutre est à la terre, ce qui est le cas dans la plupart des alternateurs de grande puissance, il faut chercher une autre solution.

Une méthode souvent utilisée en Amérique, mais qui n'est possible qu'avec des machines possédant au moins deux circuits en parallèle, consiste à comparer les courants dans ces parties d'enroulement d'une seule et même phase (fig. 9). En

Fig. 9. — Protection contre les courts-circuits entre spires avec comparaison des courants.

1 Relais différentiel — 2 Pour le déclenchement de l'interrupteur de l'alternateur et de l'interrupteur d'excitation — 3 Alternateur.

combinant le couplage différentiel interne avec celui qui s'étend à tout l'alternateur, on obtient une protection qui fonctionne à la suite d'un défaut quelconque dans la machine.

Ces couplages fonctionnent en cas d'asymétrie dans les circuits en parallèle. Comme dans la plupart des cas, les défauts susceptibles de se produire dans un alternateur n'affectent pas ces circuits dans la même mesure, ces solutions réalisent une protection sûre qui convient aussi contre les courts-circuits, les contacts à la masse et à la terre. C'est au moment de projeter l'alternateur qu'il faut prendre la décision de prévoir une protection contre les courts-circuits entre spires ou de s'en passer, car le choix du système dépend du couplage interne de l'alternateur.

Le schéma complet pour la protection d'un alternateur triphasé avec relais différentiels de courant pour la protection contre les courts-circuits entre phases et à la terre et avec relais différentiels de tension pour la protection contre les courts-circuits entre spires est représenté par la figure 10.

d) *Protection contre l'élévation de tension par suite d'augmentation du nombre de tours.* — Si, au moment où la charge d'un alternateur s'annule, c'est-à-dire au moment où on le coupe du réseau, le régulateur de sa machine d'entraînement ne fonctionne pas, le groupe s'emballe et prend un nombre de tours auquel la somme des pertes à vide est égale à la puissance fournie. Avec les turbines hydrauliques employées jusqu'ici, ce nombre de tours à l'emballement est environ de 1,8 à 2 fois le nombre de tours normal. Il est d'usage courant de dimensionner les alternateurs au point de vue mécanique, de manière qu'ils puissent résister sans dommages aux forces centrifuges à la vitesse d'emballement. Les constructeurs sérieux soumettent donc tous leurs alternateurs destinés à être entraînés par des turbines hydrauliques à un essai d'emballement à la vitesse indiquée par le fabricant de turbines.

Lorsqu'il s'agit d'autres machines d'entraînement, de turbines à vapeur par exemple, il n'est plus possible de construire un alternateur capable de résister aux forces centrifuges à la vitesse d'emballement. On a recours à un régulateur de sécurité qui coupe l'arrivée de la vapeur ou du combustible lorsque la turbine dépasse un nombre de tours déterminé (par exemple 10 % au-dessus du nombre de tours normal). Avec les turbines hydrauliques modernes à grande vitesse, turbines à hélice ou du type Kaplan, le nombre de tours à l'emballement est souvent le triple du nombre de tours normal. Les difficultés de construire une machine qui puisse résister à l'emballement, augmentent donc dans de telles proportions qu'il devrait être plus avantageux de prévoir un régulateur de sécurité. Mais, comme le temps de fermeture d'une tribune ne doit pas dépasser un certain minimum, en raison des pressions dangereuses résultant des masses d'eau qui suivent et que les turbines à grande vitesse consomment précisément des quantités d'eau considérables, ce qui fait que la construction d'un by-pass pour l'eau n'est pas économique, on devra construire les alternateurs entraînés par des turbines hydrauliques, de manière qu'ils résistent à l'emballement. Les alternateurs ne subiront donc à l'emballement aucun dommage mécanique, mais il n'en sera pas de même au point de vue électrique. Dans les installations modernes, on a toujours recours à l'excitation individuelle; l'excitatrice est accouplée directement à l'alternateur ou elle est tout au moins entraînée par son arbre et comme c'est une machine à courant continu, à auto-excitation, sa tension, abstraction faite de la saturation magnétique, augmente suivant le carré du nombre de tours. A l'emballement, l'alternateur excité à cette tension continue plus élevée, devrait donc, abstraction faite également de la saturation, atteindre une tension alternative, proportionnelle au cube du nombre de tours. Suivant son genre de construction, sa tension à l'emballement augmentera à peine proportionnellement au carré du nombre de tours; par contre, elle atteindra sûrement une valeur qui non seulement menacera, mais endommagera l'isolation.

Pour les alternateurs à haute tension entraînés par des turbines hydrauliques, il convient donc de prévoir une protection à tension maximum. A cet effet, on a déjà employé des déclencheurs centrifuges. Outre que ces appareils accusent souvent une certaine inertie, ils n'agissent aussi qu'en fonction de l'augmentation linéaire du nombre de tours. Comme la tension, ainsi qu'il vient d'être dit, croît suivant une certaine puissance du nombre de tours, un relais à tension maximum raccordé par un transformateur de tension aux bornes de l'alternateur, constituera une protection bien plus sensible. En atteignant la limite de tension pour laquelle il est réglé, ce relais entraîne la démagnétisation de l'alternateur. Au moyen de résistances en série, on le règle pour la fréquence qui croît avec le nombre de tours.

Une élévation de tension aux bornes des alternateurs peut aussi se produire en cas de court-circuit bipolaire sur le réseau ou à la suite de la coupure d'un court-circuit tripolaire. On la combat efficacement au moyen d'un régulateur de surintensité. En raison de sa faible valeur et de sa plus courte durée, elle est moins dangereuse que l'élévation de tension par suite d'emballement.

Comme relais à tension maximum, les Ateliers de Construction Oerlikon emploient le même système que pour la protection différentielle.

e) *La protection contre les surcharges.* — Lorsqu'ils travaillent sur un court-circuit extérieur, les alternateurs peuvent avoir à fournir momentanément un courant de très forte inten-

sité, de dix à vingt fois le courant normal. Ce courant retombe toutefois rapidement à la valeur du courant de court-circuit permanent, lequel atteint encore le double ou le triple du courant nominal. Les alternateurs doivent donc être construits pour résister aux efforts mécaniques et thermiques du courant de court-circuit momentané. Mais un travail prolongé avec le courant de court-circuit permanent peut détériorer les enroulements en raison du dégagement de chaleur qui en résulte. Il est donc devenu d'usage de réduire, au moyen d'un régulateur de surintensité, l'excitation des alternateurs qui alimentent un court-circuit extérieur, de sorte que le courant de court-circuit permanent ne dépasse plus environ 1,5 fois le courant nominal. Le danger d'un surchauffement des enroulements par les courants de court-circuit se trouve alors réduit dans

la chute de tension s'accompagne aussi d'une surintensité de courant, la bobine de courant empêche la bobine de tension du système vibratoire de fonctionner et la résistance dans le circuit d'excitation n'est plus court-circuitée tant que la surintensité subsiste. De cette façon, l'alternateur court-circuité a son excitation réduite dans une telle mesure que le courant qu'il fournit ne dépasse plus la limite admise. Lorsque le court-circuit a disparu, la traction exercée par la bobine de protection contre les surintensités baisse et le régulateur rétablit normalement la tension de l'alternateur.

Le mode de protection choisi doit exercer son action sélective et couper le court-circuit extérieur sur le réseau. Si, par suite d'une série de circonstances fâcheuses, plusieurs interrupteurs avant l'alternateur devaient ne pas déclencher, le

Fig. 10. — Schéma de la protection complète d'un alternateur triphasé.

Protection contre : courts-circuits entre phases, courts-circuits entre spires, courts-circuits à la terre, élévation de température inadmissible. — 1 Alternateur triphasé — 2 Excitatrice principale — 3 Excitatrice auxiliaire — 4 Résistance d'excitation — 5 Résistance shunt — 6 Régulateur de tension — 7 Résistance d'ajustage — 8 Résistance compound — 9 Transformateur de tension triphasé — 10 Transformateur de tension monophasé — 11 Interrupteur à huile — 12 Transformateur d'intensité — 13 Résistance de mise à la terre du point neutre — 14 Transformateur d'intensité du point neutre — 15 Interrupteur de désamorçage — 16 Résistance de désamorçage — 17 Coupe-circuits pour transformateur de tension — 18 Relais à courant maximum — 19 Relais à tension maximum avec résistance série — 20 Protection contre les courts-circuits entre spires — 21 Relais différentiel — 22 Relais de courant à la terre — 23 Mesure à distance de la température du fer du stator — 24 Mesure de la température du cuivre du stator — 25 Courant auxiliaire

une telle mesure qu'on peut régler les interrupteurs des alternateurs pour des durées de déclenchement bien plus longues, ce qui facilite beaucoup l'application de la sélection par graduation du temps. Comme le courant de toutes les machines est affaibli par la réduction de l'excitation, il n'y a que les interrupteurs à huile des tronçons de lignes court-circuitées qui déclencheront.

Dans le régulateur de tension à vibration construit par les Ateliers de Construction Oerlikon, il est prévu, suivant une solution brevetée, une bobine supplémentaire pour la protection contre les surintensités. Si, comme pour un court-circuit,

premier d'entre eux, pourrait, à la longue, être endommagé du fait de la surcharge. Pour éviter cette éventualité, il faut aussi prévoir comme dernière réserve pour l'interrupteur de l'alternateur une protection à courant maximum réglée pour une longue durée de déclenchement (une dizaine de secondes). Il est très important que ces relais à courant maximum laissent s'écouler, avant de déclencher, le temps pour lequel ils sont réglés, indépendamment de l'intensité du courant de court-circuit momentané, sinon le principal avantage du réglage de la surintensité serait perdu. Pour la protection à courant maximum des alternateurs, les Ateliers de Construction Oerlikon ont

réalisé de nouveaux relais indépendants, à maxima, avec bobines séparées, d'intensité et à temps. Ces relais sont exécutés pour montage encastré ou en saillie (fig. 11).

Lorsqu'il s'agit de toutes petites unités, on peut aussi se contenter d'une protection à courant maximum. Mais alors, pour que la protection s'étende aussi aux courts-circuits à l'intérieur de l'alternateur, il est recommandable d'ouvrir le point neutre et de monter les relais ou leurs transformateurs entre les bornes de l'alternateur et le point neutre extérieur. Pour que le régu-

Fig. 11. — Relais tripolaire indépendant à courant maximum.

lateur d'intensité n'agisse qu'en cas de court-circuit extérieur, il faut absolument monter ses transformateurs de courant sur le côté du réseau de l'alternateur. Si un accident interne se produit c'est l'autre protection qui doit agir en démagnétisant complètement et en coupant l'alternateur.

f) *Le désamorçage rapide.* — Lorsqu'un alternateur accuse un défaut interne, que ce soit un court-circuit entre phases, entre spires ou à la terre, il ne suffit pas, pour limiter les dégâts, d'ouvrir l'interrupteur à huile, et, par là, de couper la machine du réseau. Il faut, en outre, l'empêcher de travailler sur le court-circuit avec sa propre tension et de se détruire elle-même. On ne peut obtenir ce résultat que par démagnétisation ou désamorçage rapide. Une réduction de l'excitation par le régulateur de surintensité serait insuffisante, car cet appareil n'agit que tant que la machine débite un courant d'intensité supérieur à sa valeur nominale. Il faut procéder à une démagnétisation complète qui annule même la rémanence, car la tension de rémanence peut suffire à entretenir un arc. On a évidemment un grand intérêt à ce que le désamorçage s'effectue le plus rapidement possible, afin que l'arc n'ait pas le temps de causer trop de dégâts dans la machine. Le procédé qu'on emploie encore fréquemment et qui consiste à commuter le courant d'excitation de l'excitatrice en l'envoyant non plus à travers les inducteurs mais à travers une résistance (fig. 12, couplage a), fait disparaître

Fig. 12. — Couplage pour le désamorçage des alternateurs.
a Désamorçage par résistance de décharge. b Désamorçage par démagnétisation rapide, Système Oerlikon.

lentement le courant d'excitation et, finalement, l'alternateur conserve encore sa tension de rémanence.

Ce mode de couplage ne convient donc que pour de petites unités dont on veut simplifier l'équipement le plus possible. Pour les alternateurs de grande puissance, la nécessité de recourir à un désamorçage rapide se fait impérieusement sentir.

Les Ateliers de Construction Oerlikon ont étudié et fait breveter pour le désamorçage des alternateurs, un couplage dont l'effet est très rapide (fig. 12 b).

En cas d'accident, un commutateur ES transforme l'excitatrice shunt en une machine série dont l'excitation est shuntée par une résistance. L'énergie magnétique du rotor de l'alternateur se décharge alors sur la résistance de shuntage et l'enroulement inducteur de l'excitatrice avec lequel elle est en parallèle. Cet enroulement est raccordé à la résistance de manière à être parcouru par un courant de sens inverse à celui qui circulait avant l'accident. La tension engendrée dans l'induit de l'excitatrice change donc de sens, de sorte que le courant rotorique et, par conséquent, le courant de court-circuit fourni par l'alternateur s'annulent très rapidement. Cette méthode de désamorçage a été essayée sur différentes machines dans le local d'essais et comparée avec d'autres méthodes connues. Les oscillogrammes relevés montrent comment la tension de l'excitatrice passe subitement à une valeur négative et comment, de ce fait, les courants rotoriques et statoriques de l'alternateur disparaissent rapidement.

Le désamorçage rapide s'impose toujours lors d'un défaut interne, mais il n'est pas du tout nécessaire quand surgit un défaut externe; il peut même entraver la reprise rapide de la marche en parallèle. En cas de déclenchement il y a donc toujours lieu de distinguer s'il s'agit d'un défaut interne ou externe.

Le couplage en parallèle des deux bobines de déclenchement de l'interrupteur à huile et de l'interrupteur d'excitation suivant fig. 13, couplage a), n'est donc pas recommandable. Avec le

Fig. 13. — Couplages en parallèle des bobines de déclenchement
a fixe — b par contacts de relais bipolaires — c par relais à volet
d par l'interrupteur de champ même.

OS Bobine de déclenchement de l'interrupteur à huile — FS Bobine de déclenchement de l'interrupteur de champ (interrupteur de désamorçage) — DR Relais différentiel (c'est-à-dire relais pour défauts internes) — MSSt Relais à courant maximum (c'est-à-dire relais pour défauts externes) — StS Interrupteur de manœuvre — KR Relais à volet

couplage b), lorsque le relais à courant maximum MSStR entre en action, seul l'interrupteur à huile déclenche; par contre, il déclenche avec l'interrupteur d'excitation lorsque c'est le relais différentiel qui fonctionne. Mais tous les relais signalant des défauts internes doivent être munis de contacts de déclenchements bipolaires. Il résulte de là que le relais devient non seulement plus compliqué, mais aussi moins sensible par suite du couple plus fort à développer. Pour cette raison, on n'emploie pas le couplage b). A la place des contacts bipolaires des relais

de protection, on peut, naturellement, prévoir aussi un relais auxiliaire bipolaire, de préférence un relais à volet, comme indiqué sous c). Nous avons appliqué cette solution à des installations automatiques. Elle présente l'avantage remarquable de localiser le défaut. L'interrupteur d'excitation peut aussi remplacer un relais auxiliaire à condition qu'on le munisse d'un contact auxiliaire qui déclenche l'interrupteur à huile lorsque l'interrupteur d'excitation est ouvert. Pour toutes les machines marchant séparément, il résulte encore de là une certaine réduction du travail de rupture que doit fournir l'interrupteur à huile. Par contre, avec des machines marchant en parallèle, l'influence du retard dans le déclenchement de l'interrupteur d'excitation ne se distingue pas très bien; de prochains essais serviront à éclaircir ce point.

IV. — LES DIFFÉRENTES SORTES DE DÉFAUTS DANS LES TRANSFORMATEURS

Aux défauts mentionnés sous 1—4, concernant les alternateurs, s'ajoutent ceux qui peuvent surgir dans les transformateurs. Ce sont :

- 7) le passage de la haute tension à l'enroulement à basse tension.
- 8) les courts-circuits dans le fer.

Ces deux genres de défauts ne sont guère possibles dans les transformateurs modernes bien construits. Le premier surgira tout au plus dans un transformateur à l'état humide; il correspond du reste à un commencement de court-circuit à la terre dans l'enroulement à haute tension, qui se transforme rapidement en une terre franche. Le second provient d'un isolement insuffisant des boulons de serrage par lesquels il se forme un circuit fermé. Il exerce donc sur le transformateur le même effet qu'un court-circuit entre spires dans l'enroulement. Mais alors que celui-ci devient immédiatement bon conducteur en raison de la grande quantité de cuivre, un court-circuit dans le fer peut subsister longtemps avant qu'on s'en aperçoive, par suite d'augmentation de l'intensité du courant absorbé ou d'élévation de la température.

V. — LES DIFFÉRENTS MODES DE PROTECTION POUR TRANSFORMATEURS

a) *La protection différentielle.* — On considère encore souvent, à tort, la protection à courant maximum comme suffisante pour les transformateurs. Les relais à maximum doivent être réglés pour une intensité supérieure à celle du courant nominal, de sorte qu'ils ne peuvent couper un défaut que si le courant qui en résulte dépasse le courant de service normal.

C'est donc des relais spéciaux qu'il faut utiliser. Pour englober un transformateur dans la protection graduelle qui s'étend de l'alternateur au point de consommation, il convient souvent de compléter sa protection par un relais à maximum dont la graduation au point de vue intensité et temps dépend des conditions de service du réseau. En raison de l'à-coup de courant à la mise en circuit, il est bon d'employer les mêmes relais à maximum que pour la protection des alternateurs contre les surcharges, relais dont la temporisation est complètement indépendante de l'intensité du courant.

Pour la protection des transformateurs, les relais différentiels sont les seuls qui puissent convenir. Dans chaque phase, on compare le courant primaire avec le secondaire. Certaines difficultés proviennent de la diversité des transformateurs

d'intensité de tensions différentes. Les plus grandes difficultés se présentent lorsqu'on emploie des transformateurs d'intensité à barre, sur un côté, et à bobines sur l'autre côté du transformateur à protéger. Les Ateliers de Construction Oerlikon ont étudié ce cas théoriquement et pratiquement, si bien que, connaissant les courbes caractéristiques des transformateurs d'intensité disponibles, ils sont à même de régler la protection différentielle au moyen de transformateurs d'intensité intermédiaires, de manière qu'elle ne provoque pas de faux déclenchements, même sous l'action des courts-circuits les plus violents.

Dans la protection des transformateurs, la sensibilité des relais différentiels n'est pas limitée par la construction, mais parce que le réglage doit être effectué en tenant compte du courant à vide. Lorsque le transformateur est un peu trop saturé, le courant magnétisant, et, par suite, le courant à vide, croît très rapidement avec des tensions supérieures à la normale. On réglera donc les relais différentiels tout au plus pour qu'ils n'agissent que lorsque le courant dépasse le double de son intensité à vide, mesurée sous une tension supérieure de 10 % à la normale, ou bien le triple ou le quadruple de son intensité à vide, à tension normale. Ce courant à vide et à tension normale pour les transformateurs de la puissance envisagée est de l'ordre de 5 % environ du courant à pleine charge. Pour avoir la certitude que la protection différentielle n'interviendra pas en cas de violents courts-circuits extérieurs, certaines usines ont été amenées à régler, en principe, leurs relais, de manière qu'ils ne fonctionnent que sous le courant normal. Par ce réglage, la protection perd de sa sensibilité, mais son effet sélectif est absolument assuré.

Une protection différentielle doit être établie en tenant compte du couplage interne des transformateurs. Le couplage étoile-étoile donne, dans les transformateurs d'intensité, des courants haute et basse tension qui sont pratiquement déphasés de 180° les uns par rapport aux autres. On peut donc comparer directement les phases entre elles comme le montre le schéma fig. 14. Dans ce cas, les transformateurs d'intensité transforment exactement à la même intensité secondaire, par exemple 5 ou 1 amp. Lorsque les transformateurs principaux sont connectés en triangle-étoile, la comparaison directe entre phases n'est plus possible, car les deux secteurs de courant à comparer ne sont plus en ligne droite; ils forment entre eux un angle de 30° ou 180° + 30°. Pour corriger ce déphasage, il faut connecter en triangle les trois transformateurs d'intensité sur le côté en étoile des transformateurs principaux, tandis que ceux prévus sur le côté en triangle sont à connecter en étoile. On relie entre elles les trois phases des deux systèmes triphasés, ainsi formés, et on n'y raccorde les trois pôles du relais différentiel, également couplés en étoile, suivant fig. 15. Dans ce cas, les transformateurs de courant ne doivent pas tous transformer à la même intensité secondaire. Si ceux connectés en triangle sont prévus, par exemple, pour une intensité secondaire de 1 ampère, ceux connectés en étoile devront fournir un courant $\sqrt{3}$ fois plus fort, c'est-à-dire de 1,73 ampère, pour qu'ils puissent être comparés avec le courant composé du côté en triangle.

En raison de l'à-coup de courant qui se produit à la mise en circuit de transformateurs à vide et qui atteint l'intensité du courant normal ou la dépasse même de beaucoup, il est très recommandé d'exécuter les relais différentiels avec un petit retardement. Lorsque les transformateurs protégés sont munis de prises supplémentaires pour des rapports de transformation dont la différence est relativement grande, on peut prévoir les transformateurs d'intensité avec des prises correspondantes ou intercaler des auto-transformateurs réglables entre les transformateurs d'intensité et les relais différentiels. En tout cas, dans

la protection différentielle de transformateurs, il convient de ne pas pousser trop loin la sensibilité pour empêcher que des inexactitudes inévitables, dont les effets peuvent s'additionner par suite de circonstances fortuites, n'entraînent de faux déclenchements.

La protection différentielle agit non seulement en cas de court circuit entre phases, mais aussi en cas de court-circuit entre spires, par suite de la forte intensité du courant absorbé par l'enroulement intact. Pour les transformateurs, elle n'est efficace contre les courts circuits à la terre que si le point neutre est à la terre (même raisonnement que pour les alternateurs), ou

Fig. 14 et 15. — Protection différentielle pour transformateurs ; couplage étoile-étoile ou triangle-étoile.

a Relais différentiel — b Transformateur d'intensité — c Electroaimant de déclenchement — d Interrupteur auxiliaire sur l'interrupteur à huile — e Source de courant continu — E Terre

si des lignes à grande capacité contre terre sont raccordées à l'enroulement considéré, de manière que le courant à la terre suffisse pour faire fonctionner le relais différentiel. Elle protège aussi contre les ruptures de conducteurs lorsque l'équilibre des courants est détruit. Un court-circuit dans le fer ne peut être décelé que s'il est équivalent à un court-circuit entre spires. Pour un alternateur et un transformateur travaillant ensemble comme unité de service, on est amené, naturellement, à prévoir une protection différentielle commune aux deux parties, ce qui permet d'économiser, en cas de courant triphasé, six transformateurs d'intensité isolés pour la tension de l'alternateur. Mais cette combinaison de la protection de l'alternateur avec celle du transformateur présente divers inconvénients. La protection différentielle, qui est, de par nature, une protection très sensible, peut aussi être employée, quand il s'agit d'alternateurs, par exemple, avec une sensibilité de 5 % environ du courant nominal ; mais si la protection englobe l'alternateur avec son transformateur, il faut, comme déjà dit, reporter à une valeur bien plus élevée sa limite de fonctionnement. Lorsqu'il existe un système de barres auxiliaires et qu'on veut, en cas d'accident à un transformateur, faire travailler l'alternateur correspon-

dant avec un autre transformateur, on est obligé de recourir à des changements de couplage compliqués des circuits secondaires, de sorte que la sécurité de service et la bonne ordonnance de l'installation en souffrent beaucoup. Pour obtenir un couplage simple et donner à l'alternateur une protection sensible, il est donc très recommandable de protéger séparément le transformateur et l'alternateur.

Pour la protection différentielle des transformateurs, on emploie les mêmes relais que pour les alternateurs (fig. 8).

b) *La protection Buchholz.* — Cette protection repose sur une action chimique : la décomposition de l'isolant par le courant résultant du défaut. Au cours de cette décomposition, il se dégage toujours de l'huile des bulles de gaz que l'appareil Buchholz capte sur leur chemin au conservateur, pour actionner un signal d'alarme et le dispositif de déclenchement d'un disjoncteur. L'appareil Buchholz contient deux flotteurs (b_1 et b_2 , voir fig. 16 à la page suivante). Les bulles de gaz qui montent lentement, pénètrent dans le cylindre (a) d'où elles refoulent l'huile, réduisant graduellement la poussée verticale sur le flotteur b_1 qui descend et ferme le contact d'alarme c_1 . On arrive ainsi à signaler en peu de temps de très petits défauts comme, par exemple, un commencement de court-circuit dans le fer, la circulation de courants superficiels, etc. En cas de grave défectuosité dans le transformateur, le dégagement de gaz devient très violent, si bien qu'il engendre dans l'huile une poussée ascendante qui rencontre, dans la partie inférieure de l'appareil Buchholz, sur son chemin au conservateur, le deuxième flotteur b_2 qu'elle fait basculer, fermant ainsi le contact de déclenchement c_2 par lequel elle provoque l'ouverture de l'interrupteur à huile.

Il est prouvé par de nombreux essais comme par l'expérience de la pratique, que la protection Buchholz est très sensible et très utile. N'importe quel défaut dans le transformateur la fait fonctionner et il en est de même en cas de surcharge, dès que celle-ci menace l'isolant.

VI. — LA SURVEILLANCE DES GRANDEURS DE SERVICE

Pour éviter que des défauts ne surgissent, il est devenu d'usage courant, dans toutes les usines génératrices, de surveiller l'allure de certaines grandeurs caractéristiques, comme la température dans le fer, le cuivre, des canaux de ventilation, l'huile, l'eau de refroidissement, etc., de même que la circulation, l'écoulement ou la pression de l'air, de l'eau ou de l'huile de refroidissement.

Les Ateliers de Construction Oerlikon construisent les appareils nécessaires à tous ces contrôles. Ils ont établi et fait breveter, il y a quelque temps, un relais spécial à volet, actionnant deux signaux dont l'un est acoustique, l'autre optique. Le premier de ces signaux peut être arrêté à volonté, mais le second continue à fonctionner jusqu'à ce que l'ordre soit rétabli.

Il existe aussi des dispositifs de mesure de température à distance, pour courant continu ou alternatif, ces derniers pour mesure en des points sous tension. Dans la mesure du possible, on prévoit aussi dans les alternateurs et les transformateurs les couples thermo-électriques nécessaires.

Ces dispositifs et le relais sus-mentionnés ne mettent pas hors circuit l'unité en cause, mais signalent simplement les conditions inadmissibles dans lesquelles elle peut se trouver. Ils n'exercent donc pas, à vrai dire, une action sélective ; leur but est de permettre au personnel de service de remettre les choses en ordre avant qu'il surgisse un défaut et qu'une mise hors circuit devienne inévitable.

VII. — LA SOURCE DE COURANT AUXILIAIRE

Pour assurer la protection sélective complète d'une usine génératrice, il faut encore prévoir de toute façon une source de courant indépendante, toujours prête à fonctionner, de préférence une batterie d'accumulateurs, qui fournit le courant

puisque le courant résultant du défaut doit atteindre une intensité bien déterminée pour provoquer le déclenchement. On ne doit donc les employer que dans de petites centrales.

Comme les accidents d'alternateurs et de transformateurs sont rares par rapport aux perturbations sur les lignes aériennes,

Fig. 16. — Représentation schématique de la protection Buhholz.

a Cylindre de retenue — bl, bl Flotteurs — cl Contact d'alarme — cl Contact de déclenchement

continu pour tous les déclenchements nécessaires. On peut, il est vrai, recourir à des couplages permettant de réaliser ces déclenchements à l'aide du courant ou de la tension du circuit protégé; mais ce sont là des solutions insuffisantes, car elles manquent leur but si la tension disparaît dans le voisinage du défaut, ou elles n'assurent qu'une protection très grossière,

on peut, pour des raisons de simplicité, renoncer à une protection sélective complète quand il s'agit de petites unités. Si, au contraire, ces unités sont grandes par rapport à la puissance globale de l'usine considérée, le chef d'exploitation assume une responsabilité telle qu'il fera tout pour assurer la protection efficace de ses machines. *Bulletin Oerlikon*, mars-avril 1930.

DOCUMENTATION

Cinq années d'électrification de l'U. R. S. S.

Le plan de l'électrification de l'U. R. S. S., réparti sur cinq années, envisage non seulement le développement de l'énergie électrique basée sur l'accroissement de l'industrie, mais encore une large réserve pour l'électrification future.

La puissance des centrales a augmenté (il y a des centrales de 300.000 kW.) de même que celle des unités génératrices (qui atteint 75.000 kW). Les transports à haute tension ont pris une grande extension, l'interconnexion des centrales a permis de diminuer les réserves d'énergie et d'obtenir un meilleur rendement.

De vastes réseaux sont envisagés dans les grands centres industriels, dans le bassin du Don, l'Oural et le Caucase. L'électrification des chemins de fer et l'électrification rurale se poursuivent activement.

La puissance totale des usines électriques en 1933 atteindra 5.600.000 kW. Le capital investi en cinq ans sera de 3.200.000 roubles (sans compter le coût des usines génératrices). La puissance

fournie par les usines hydrauliques sera de 18,3 %, celle des centrales à vapeur de 81,7 %.

On envisage l'augmentation de la puissance des centrales de la façon suivante :

1. Région du Nord-Ouest : 588.000 kW.
2. Région du Centre industriel : 1.217.000 kW.
3. Région de la moyenne et basse Volga : 149.000 kW.
4. Région de l'Oural : 288.000 kW.
5. Région de l'Asie Centrale : 200.000 kW.
6. Région de la Sibérie (150.000 kW.).
7. Région du Nord du Caucase : 222.500 kW.
8. Région de l'Ukraine S. S. R. (Dnieper) : 568.000 kW.
9. Région Ouest et Russie blanche : 110.000 kW.
10. Transcaucasie (Bakou) : 120.000 kW.

D. A. SHALABANOV.

Numéro du Jubilé de l'Electritchestvo.

Calcul de la protection d'une ligne de transport par des fils de garde reliés à la terre

Dans son rapport, M. Herbert Bristol Dwight discute les calculs bien connus de l'effet protectif des fils de garde reliés à la terre, sur les lignes de transmission, lorsque paraissent des gradients de potentiel élevé, produits par des nuages chargés d'électricité.

Il donne les formules pour la protection avec un ou deux conducteurs, et il montre qu'un nombre quelconque de conducteurs n'est pas nécessaire pour écouler la charge statique des conducteurs de courant. *Journal de l'A. I. E. E.* — Mai 1930.