

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 29 (1938)  
**Heft:** 18

**Artikel:** Protection différentielle, relais compensé et relais électronique  
**Autor:** Maret, A.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1058998>

### **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:** 09.02.2026

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

g) der Widerstand des Erdleiters unter e) soll zwischen seiner Anschlußstelle an den Nulleiter und irgendeinem Stromverbraucher 0,5 Ohm nicht überschreiten. In jeder Installation ist eine entsprechende Widerstandsmessung vorzunehmen, bevor zur Nullung als Schutzmassnahme übergangen werden darf. Die Widerstandsmessung soll bei einer Stromstärke von min. 10 A ausgeführt werden, wobei der Strom während 5 Minuten auf der Leitung zu belassen ist.

h) Der Nullpunkt der Hochspannungsseite mit dem zugehörigen Eisenwerk einerseits, und der Nullpunkt des Niederspannungssystems mit dem zugehörigen Eisenwerk andererseits sind bei der Transformatorstation mit je einer besondern Elektrode zu erden. Das hoch- und niederspannungsseitige Eisenwerk müssen voneinander elektrisch ge-

trennt sein. Die Elektrode des sekundären Transformatorennullpunktes darf sich nicht im Spannungstrichter der Hochspannungserde befinden.

i) Im Netz sind Massnahmen zu treffen zur Herbeiführung einer sofortigen, selbsttätigen Abschaltung, falls irgendwo im Netz (einschliesslich Hausanschlüsse) ein Kurzschluss zwischen einem Polleiter und dem Nulleiter eintritt. *De.*

*Anmerkung.* Wir möchten nicht verfehlen, Interessenten auf die sehr ergiebige Diskussion aufmerksam zu machen, welche der vorstehende, im Auszug wiedergegebene Bericht im Schosse der «Transmission Section of the Institution of Electrical Engineers» erfahren hat (vgl. «Journal Vol. 81, Dez. 1937, S. 779 bis 790»). *De.*

## Protection différentielle, relais compensé et relais électronique.

Par A. Maret, Baden.

621.316.925.2

*Après une brève comparaison avec divers autres systèmes de protection, l'auteur énumère les qualités particulières à la protection différentielle, délimite son domaine, indique ses lacunes, et propose les compléments convenables. Il passe ensuite en revue les difficultés que l'on rencontre avec la protection différentielle ordinaire, dont les principales sont dues au déséquilibre des transformateurs d'intensité lors de forts courants et montre que ces difficultés ne peuvent pas être résolues par simple équilibrage de ces appareils. La raison en réside entre autres dans le courant magnétisant des T.I. L'auteur calcule à l'aide d'un exemple la valeur du déséquilibre dû à ce dernier, en fonction du courant traversant les T.I. La solution consiste dans l'adoption d'un relais spécial compensé. On montre comment ce relais résout les difficultés et on en décrit un modèle. Puis on examine divers autres types de relais différentiels ou systèmes de protection différentielle et on en fait la critique. On parle enfin de la protection différentielle des lignes et câbles soit par relais compensé, soit surtout par relais électronique sans fil pilote.*

*Nach einem kurzen Vergleich mit anderen Schutzsystemen behandelt der Autor die besonderen Eigenschaften des Differentialschutzes, grenzt den Anwendungsbereich ab, erwähnt die Mängel dieses Systems und schlägt zur Behebung dieser Mängel Ergänzungen zum Differentialschutz vor. Hierauf werden die Schwierigkeiten erwähnt, die der gewöhnliche Differentialschutz mit sich bringt; deren wichtigste sind auf die ungleiche Charakteristik der verschiedenen Stromwandler bei starken Strömen zurückzuführen; es wird gezeigt, dass diese Schwierigkeiten durch einfache Abgleichung der Stromwandler nicht behoben werden können. Der Grund hiefür liegt u. a. in der Differenz der Magnetisierungsströme der Stromwandler. Ein Beispiel wird durchgerechnet. Die Lösung des Problems besteht in der Anwendung eines kompensierten Spezialrelais; dessen Bau und Wirkungsweise wird beschrieben. Verschiedene andere Typen von Differentialrelais und Differentialschutzsystemen werden kritisch untersucht. Schliesslich wird der Differentialschutz der Freileitungen und Kabel durch kompensiertes Relais oder besonders durch Elektronenrelais ohne Steuerdraht kurz beschrieben.*

### I. Généralités.

Complétée convenablement, la protection différentielle présente maints avantages par rapport aux autres systèmes.

La protection par *relais d'impédance* (pour les transformateurs) est plus compliquée, généralement moins rapide et laisse une zone morte (où la sélection est incertaine), malaisée à éliminer. Elle revient aussi plus cher. L'inconvénient de la zone morte est propre aux relais dits *directionnels*. En outre, certains d'entre eux sont lents parce que leur fonctionnement est subordonné au fonctionnement préalable d'organes accessoires. Quant aux *relais à maximum* simples, on sait assez qu'ils ne permettent aucune sélection, fonctionnant indifféremment pour tout défaut interne ou externe, et qu'ils ne sont sensibles qu'à des courants de défaut grossiers, supérieurs au courant de service. Les *relais thermiques* sont en principe réservés à la protection contre les surcharges. Le *relais Buchholz* ne s'applique qu'aux transformateurs. Il représente pour ceux-ci une bonne protection complémentaire, car il les protège contre une série d'accidents mécaniques ou non décelables électriquement, mais à lui seul il ne suffit pas, car il n'embrasse pas assez rapidement ni toujours correctement les défauts graves: 1° le temps qui s'écoule depuis l'apparition du défaut jusqu'à son éli-

mination par le relais Buchholz est de l'ordre d'une seconde (au moins 5 à  $\frac{8}{10}$  s); 2° il risque de fonctionner lors d'un fort court-circuit externe par ébranlement du bobinage (comme cela a été constaté); 3° il ne protège pas les connexions, les isolateurs, etc., en un mot, tout défaut extérieur à la cuve.

### II. Qualités de la protection différentielle.

Ce système possède les diverses qualités requises pour un décellement prompt et sûr des défauts internes, à l'exclusion des défauts externes: *sélectivité* absolue — *rapidité* — *sensibilité* (le déblocage étant indépendant du courant de régime, des surcharges, des courts-circuits externes, etc., le relais peut être réglé sensible) — *insensibilité aux surcharges* — *absence de zone morte* — *champ d'action étendu* (la protection embrasse tous les éléments compris entre les transformateurs d'intensité, désignés dans la suite par TI) — *grande souplesse* (le système peut travailler avec d'autres systèmes de protection dans le même réseau, sans qu'il soit besoin de les coordonner) — *absence de circuit de tension* — *simplicité dans l'établissement des projets* (on n'a pas à effectuer le calcul souvent laborieux des courants de courts-circuits minimum) — enfin *simplicité du relais*.

### III. Lacunes de la protection différentielle. Compléments à y apporter.

1° Le principe même de cette protection ne lui permet toutefois pas d'embrasser les *courts-circuits entre spires dans les alternateurs*, si chaque phase est composée d'une seule bobine; on y remédie, pour les grosses unités, en prévoyant 2 demi-bobinages en parallèle; on fait alors la protection différentielle transversale, laquelle décèle les courts-circuits entre spires (fig. 1).

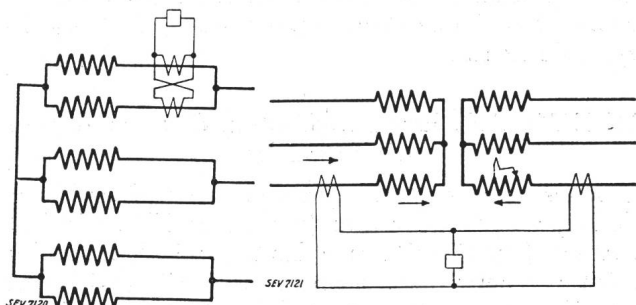


Fig. 1.

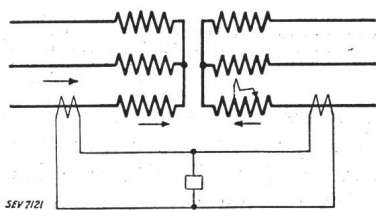


Fig. 2.

Par contre, les courts-circuits entre spires dans les transformateurs sont décelés (fig. 2).

Ceci n'est vrai toutefois que si certaines conditions sont réalisées pour le circuit magnétique et le couplage des transformateurs, à savoir: les courts-circuits entre spires sont décelés correctement dans les transformateurs triphasés à flux forcé (à 3 noyaux), quel que soit leur couplage; par contre ils ne le sont pas toujours, si le primaire et le secondaire sont en étoile, dans les transformateurs triphasés à 4 noyaux, ni dans les transformateurs cuirassés, ni dans une unité composée de 3 transformateurs monophasés. En effet, dans les transformateurs à flux forcé, le flux des phases saines contribue à soutenir la tension de la phase atteinte; le courant de défaut est élevé; ceci malgré que, de par le couplage en étoile et la forte réactance du circuit secondaire, les contre-ampères-tours au secondaire puissent difficilement se former; dans les transformateurs à 4 noyaux, par contre, ainsi que dans les transformateurs cuirassés ou dans un groupe de 3 transformateurs monophasés, le flux des phases saines n'est pas contraint à emprunter le noyau de la phase atteinte, dont la tension tombe; le courant de défaut est faible; mais, si ces transformateurs ont un enroulement triangle, le courant de défaut est de nouveau plus fort, car: ou bien l'enroulement triangle est au primaire (côté alimenté) et chaque phase est rattachée directement à la pleine tension du réseau; ou bien il est au secondaire, et les contre-ampères-tours peuvent se former facilement.

Le couplage étoile zig-zag est équivalent à ce point de vue au couplage triangle-étoile, le couplage triangle-zig-zag au couplage étoile-étoile.

En résumé, on peut néanmoins dire: *pour les types et les couplages les plus courants de transformateurs, les courts-circuits entre spires sont décelés correctement par la protection différentielle.*

2° Le décellement des mises à la masse dans les alternateurs et les transformateurs dépend du couplage du neutre.

a) Si le neutre est isolé, le courant de défaut est donné par le courant capacitif du réseau; dans le cas de l'alternateur, il est le plus souvent négligeable; dans le cas du transformateur, il n'est généralement qu'une faible fraction du courant nominal. Pour une ligne à 50 kV, de 70 km de longueur, il est de l'ordre de grandeur de 10 A, ou, si l'on

table sur des ramifications, de 20 ou 30 A. Or, le courant nominal d'une telle ligne sera de l'ordre de 230 A. (La puissance que l'on peut transmettre à cette distance sous cette tension est en effet de 20 000 kVA environ.) On voit donc que le déséquilibre sur le relais différentiel est de l'ordre de 10 %, soit de l'ordre de grandeur du courant magnétisant. On ne peut guère régler le relais pour qu'il parte à ce courant. A cela s'ajoute que la mise à la masse peut se produire non seulement aux bornes, mais en un point quelconque de l'enroulement; plus on s'approche du neutre, plus le courant évidemment devient faible. A neutre isolé, les mises à la masse nécessitent donc en général une protection spéciale.

On a proposé diverses solutions pour les alternateurs.

α) On adjoint au relais différentiel un relais de terre RT très sensible et de faible consommation (fig. 3). Pour augmenter le courant de terre lors d'une mise à la masse dans le voisinage du neutre, on peut relier le neutre à la terre par une forte résistance. — Mais cette solution n'est pas satisfaisante, car ce relais risque de fonctionner pour le courant d'erreur des TI lors d'un défaut externe.

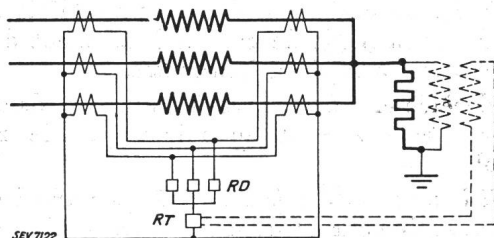


Fig. 3.

On peut y remédier en adjoignant au relais un enroulement de tension, qui en fait un relais directionnel; il bloque alors à court-circuit externe.

β) On peut aussi utiliser un TI différentiel selon fig. 4. On élimine ainsi le courant d'erreur.

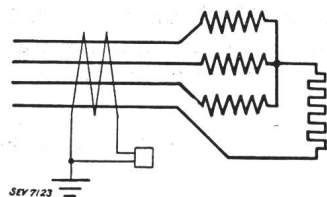


Fig. 4.

γ) Si l'on veut utiliser les TI de modèle courant, on insère dans le neutre un relais à maximum RM, dont les contacts sont en série avec un relais directionnel RD, lequel bloque le relais RM, lors d'une terre dans le réseau (fig. 5).

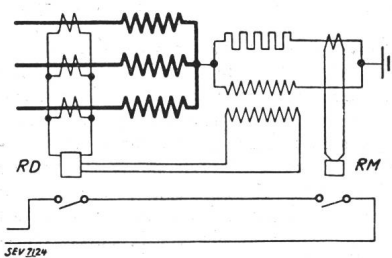
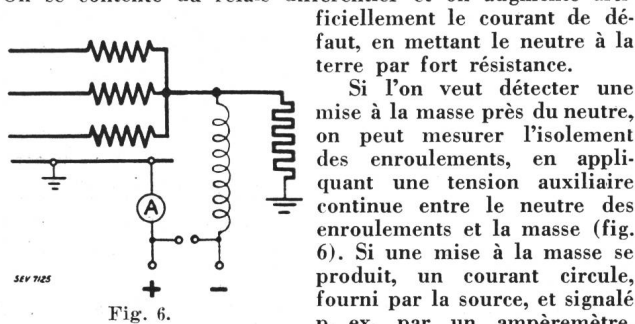


Fig. 5.

δ) Si la mise à la terre du neutre (par résistance) se fait non pas aux alternateurs, mais à un transformateur, chaque alternateur peut être considéré comme un départ; il suffit d'un relais de terre directionnel, de couplage analogue à celui du relais RD de la fig. 5 (alimenté par la somme des courants et la tension du neutre).

ε) Toutes ces solutions ne détectent pas une mise à la masse dans le voisinage du neutre.

La solution la plus simple est, à notre avis, la suivante: On se contente du relais différentiel et on augmente artificiellement le courant de défaut, en mettant le neutre à la terre par fort résistance.



Si l'on veut détecter une mise à la masse près du neutre, on peut mesurer l'isolement des enroulements, en appliquant une tension auxiliaire continue entre le neutre des enroulements et la masse (fig. 6). Si une mise à la masse se produit, un courant circule, fourni par la source, et signalé p. ex. par un ampèremètre. Une self intercalée laisse passer le courant continu, mais, en cas de mise à la masse aux bornes ou dans le réseau, elle absorbe la pleine tension de phase alternative, qui lui est alors appliquée. On protège en outre la source par un éclateur.

On peut appliquer aux transformateurs, s'ils sont couplés en étoile-étoile, les mêmes solutions de principe qu'aux alternateurs. Mais, si l'un des enroulements est en triangle, seule la solution δ) est applicable à cet enroulement. On peut toutefois aussi mesurer par la méthode ci-haut l'isolement de cet enroulement par rapport à la masse.

Le détection des mises à la masse dans les transformateurs se fait au mieux par le relais Buchholz.

b) Si le neutre est mis à la terre par une bobine d'extinction, le courant de défaut mesurable est encore plus faible que pour neutre isolé. La phase atteinte n'a plus de courant (au très faible courant résiduel près), que le défaut soit interne ou externe. Le relais différentiel ne fonctionne pas, même pour une mise à la masse. Il faut un relais spécial.

c) Si le neutre est mis à la terre directement, une terre ou mise à la masse dans le transformateur (ou alternateur) peut être assimilée à un fort court-circuit entre spires. Ce qui a été dit plus haut au sujet du couplage des transformateurs de puissance vaut également ici.

Quant au couplage des TI, il faut remarquer ce qui suit:

Il est évident qu'il faut tenir compte de la rotation des courants que produit le transformateur de puissance lorsqu'il est couplé par exemple en étoile-triangle et rétablir la direction des courants secondaires par un couplage approprié des TI (triangle du côté étoile, rapport fois  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  et étoile du côté triangle). On pourrait faire aussi l'inverse en ne se plaçant qu'au point de vue de la rotation des courants; mais un autre facteur intervient: une mise à la terre dans le réseau du côté étoile sera caractérisée, le neutre étant à la terre, par l'apparition d'une composante homopolaire dans l'enroulement étoile, composante qui ne se retrouve pas du côté triangle. Si les TI étaient couplés en étoile du côté étoile, cette composante homopolaire se retrouverait dans les connexions au relais, lequel risquerait de fonctionner. Si, par contre, les TI sont en triangle, la composante homopolaire ne se retrouve au secondaire que dans les TI eux-mêmes, mais non dans les liaisons au relais. On doit donc appliquer la règle suivante:

*lorsque les transformateurs de puissance ont un enroulement en étoile avec neutre à la terre, il faut*

*coupler les TI de ce côté en triangle, ou interposer des TI auxiliaires étoile-triangle, afin d'éliminer dans les liaisons des TI au relais la composante homopolaire du courant de terre. Pour les transformateurs en  $\Delta$  (ou leurs équivalents en  $\Delta/\Delta$ ), on couple les TI en  $\Delta$ ; pour les transformateurs en  $\Delta/\Delta$  (ou leurs équivalents en  $\Delta/\Delta$ ), on couple les TI en  $\Delta/\Delta$ .*

d) Si le neutre est mis à la terre par une résistance, celle-ci est généralement calculée de façon que le courant de terre soit suffisant. Le relais différentiel fonctionne comme pour mise à la terre directe du neutre.

#### IV. Difficultés dans l'application de la protection différentielle.

Elles se rencontrent principalement dans le cas de la protection des transformateurs. Elles résident surtout dans l'équilibrage des TI, qui n'ont pas les mêmes caractéristiques. Un courant différentiel peut en effet apparaître au secondaire des TI, causé non plus par un défaut interne, mais par diverses causes inhérentes soit au transformateur de puissance en régime normal, soit aux TI, soit au réseau. On peut avoir des déclenchements intempestifs. (C'est la tendance de la protection différentielle de pêcher par excès de fonctionnement et non par défaut).

Ces causes sont les suivantes:

A. Le rapport des courants primaire et secondaire varie avec la charge tant à cause du courant magnétisant primaire qu'à cause de la chute de tension dans le transformateur. Il en résulte un courant différentiel pour le relais, allant jusqu'à 10 %. Mais, ce déséquilibre est faible; on y obvie facilement en réglant le relais de façon qu'il y soit insensible, par exemple à l'aide d'un ressort.

B. La surintensité primaire à l'enclenchement peut atteindre plusieurs fois  $I_n$ , si l'enclenchement se fait au passage par zéro de la tension, car le flux doit monter brusquement de 0 à 2  $\Phi$ . Le relais part; il faut donc le temporiser ou le bloquer à l'enclenchement.

Mais la temporisation élimine la protection pendant 1 à 2 secondes. Or, il peut se faire qu'on enclenche sur un défaut, qui s'aggraverait pendant ce temps à des proportions inadmissibles. Certains constructeurs ont proposé les solutions suivantes:

a) Seulement désensibiliser le relais différentiel, à l'enclenchement, par un relais de tension (ou l'éliminer par un deuxième, de sensibilité moindre, ce qui revient au même) au lieu de le temporiser. Mais cette solution ne convient que si les surintensités dues au défaut sont de beaucoup supérieures à l'à-coup de courant magnétisant dû à l'enclenchement et suffisantes pour actionner immédiatement le relais différentiel, même désensibilisé. La protection resterait éliminée pour tout enclenchement sur un défaut moyen, lequel ne serait coupé qu'après que la désensibilisation n'agit plus. Cette solution n'en est donc pas une.

b) Utiliser un relais sensible à l'une des caractéristiques du courant d'enclenchement. On a en effet certains critères qui, à première vue, semblent permettre de différencier le courant d'enclenchement du courant de court-circuit:

1° Le courant d'enclenchement a une composante continue, qui est considérée généralement comme ne disparaissant



sant qu'après un certain temps. On pourrait filtrer cette composante à l'aide d'un relais spécial (cadre mobile et aimant permanent), qui bloquât ou temporisât le relais différentiel. Mais il faut objecter que le courant de court-circuit aussi contient une composante continue, d'une durée de  $\frac{1}{10}$  à  $\frac{2}{10}$  de seconde. La composante continue du courant d'enclenchement peut elle-même être de brève durée ( $\frac{2}{10}$  à  $\frac{3}{10}$  de seconde pour des transformateurs de faible puissance, fortement saturés). D'ailleurs, le courant résultant contient aussi la composante continue du courant d'enclenchement en cas de fermeture sur court-circuit. Ce mode de discrimination des deux genres de courant n'est donc pas sûr.

2° Un 2<sup>me</sup> critère consiste en ce que le courant d'enclenchement est de fréquence  $2f$ . On a proposé: *a)* de faire un relais de blocage qui filtrât ce courant (self et capacité ajustées en résonance pour une certaine fréquence); *b)* ou bien d'alimenter le relais différentiel lui-même par un filtre couplé de telle sorte que le relais fonctionne dans le sens déclenchement lorsque le courant de court-circuit (à fréquence  $f$ ) est élevé par rapport au courant d'enclenchement ( $2f$ ), et dans le sens blocage lorsque le courant  $2f$  l'emporte.

Mais il faut objecter également qu'en cas d'enclenchement sur défaut (interne), l'à-coup de courant d'enclenchement se superpose au courant de court-circuit; le courant résultant contient donc l'harmonique  $2f$ , qui peut faire fonctionner le relais de blocage (*a*) ou bloquer le relais différentiel (*b*).

Il est vrai qu'on pourrait répondre que (passée la 1<sup>re</sup> demi-période pendant laquelle l'à-coup de courant  $2f$  est de toute façon élevé, que le transformateur ait un court-circuit ou non), la composante  $2f$  devient rapidement faible par rapport au courant de défaut  $f$ , puisque le flux du transformateur est immédiatement réduit dès que le courant de défaut est établi.

Mais *a)* cela n'est vrai que pour un transformateur alimenté par un réseau de faible puissance et ayant un court-circuit triphasé franc (p. ex. aux bornes secondaires). *β)* Les cas les plus fréquents de défauts internes consistent en court-circuits entre spires; or, un tel défaut, n'embrassant généralement qu'un petit nombre de spires, d'une part laisse subsister la tension, c'est-à-dire que l'à-coup de courant  $2f$  reste élevé, d'autre part n'a qu'un courant  $f$  assez faible (en effet un court-circuit de 0,3 % des spires totales d'une phase peut donner un courant  $f = \text{environ } 0,5 \cdot I_n$ ); *γ)* lors d'un c. c. biphasé par exemple, l'appel de courant à l'enclenchement dans la phase saine peut même être passablement plus élevé qu'à transformateur sain; or, ce courant fait retour par les phases malades et peut affecter le relais (*a*) ou (*b*); *δ)* s'il s'agit d'un réseau puissant capable de tenir la tension aux bornes primaires du transformateur, le flux ne sera diminué que de la valeur correspondant à la chute de tension dans l'enroulement primaire; l'appel de courant  $2f$  restera considérable; *ε)* enfin si le courant de défaut contient des harmoniques d'ordre supérieur à  $2f$  (ce qui peut être le cas), un relais alimenté par un filtre risque de fonctionner dans le sens blocage: le relais (*a*), par suite de la perméabilité du filtre à l'un de ces harmoniques, le relais différentiel (*b*) par suite d'un danger de résonance-série pour l'un de ces harmoniques entre l'inductance de la bobine mobile et la capacitance résultante des éléments en série avec elle.

Ces solutions n'assurent donc pas, malgré leur complication, l'avantage cherché, à savoir: blocage passager du relais différentiel à enclenchement sur transformateur sain et fonctionnement immédiat à enclenchement sur défaut interne. — Elles peuvent même produire un blocage permanent lors d'un défaut interne survenant en service.

Le plus simple est de se contenter de temporiser légèrement le relais différentiel à l'enclenchement, à l'aide d'un relais auxiliaire et d'accepter le risque d'une aggravation du défaut pendant ce laps de temps, si l'on venait à enclencher sur court-circuit.

C. a) — Le rapport de transformation des TI ne correspond pas toujours exactement à celui des transformateurs de puissance (TI normalisés, prises

de réglage, etc.). Les courants secondaires des TI ne sont pas égaux en grandeur; un courant différentiel existe. On pourrait égaliser ces courants secondaires à l'aide, soit de prises, soit d'un TI auxiliaire, mais cela est compliqué, surtout lorsqu'on a un transformateur à prises réglable sous charge. Comme ce déséquilibre en régime normal n'est généralement que de l'ordre de 10 %, on se contente de faire une protection moins sensible.

C. b) — Le transformateur de puissance peut être un transformateur de réglage déphaseur (par exemple, régulateur d'induction) qui décale les tensions et par suite, les courants, ou bien un déphaseur peut être en série avec le transformateur de puissance. Les courants des TI, même égaux en grandeur, différent en phase; un courant différentiel existe.

Le courant différentiel n'est généralement pas élevé en régime sain et le relais ne part pas, étant donné la sensibilité à laquelle il est réglé. *Mais, ce courant différentiel est proportionnel au courant traversant primaire, croît linéairement avec lui et peut donner lieu à un déclenchement en cas de court-circuit externe.*

D. Les TI n'ont pas toujours des caractéristiques identiques, surtout les TI des transformateurs de puissance: leur rapport varie différemment en fonction du courant traversant. Ceci vaut pour la plupart des TI, mais principalement pour ceux du type traversée; leur nombre d'ampèretours est nécessairement plus faible du côté haute tension du transformateur de puissance que du côté basse tension; donc aussi le nombre de spires secondaires; la longueur du circuit magnétique, elle, est plus grande du côté haute tension; le nombre d'ampèretours par cm de longueur du fer est donc à peu près inversement proportionnel au carré de la tension. Le courant magnétisant  $I_0$  d'un TI est fonction du nombre de spires et de la longueur du trajet du flux. A fort nombre de spires et plus court trajet,  $I_0$  est faible. Il est donc beaucoup plus faible dans le TI du côté BT. Or, le courant secondaire d'un TI est donné par la différence géométrique entre le courant primaire et le courant magnétisant. Les courants secondaires des 2 TI sont donc différents, et ceci en grandeur et en direction.

On a tenté d'exprimer le courant différentiel par une formule assez simple donnant une approximation jugée suffisante (voir Rev. gén. Electr. Vol. XXXVII, No. 24 (1935), p. 775—6).

On part des propriétés suivantes d'un TI:

A courant primaire constant, le courant secondaire est constant dans le domaine des faibles charges; la puissance débitée est proportionnelle à l'impédance de charge  $Z$ :  $P' = I^2 \cdot Z = k \cdot Z$ ; par contre, c'est la tension secondaire qui est constante dans le domaine des fortes charges, la puissance débitée est inversement proportionnelle à l'impédance  $Z$ :  $P'' = \frac{U^2}{Z} = \frac{k'}{Z}$ . D'où l'on peut exprimer la puissance  $P$  débitée par le TI en fonction de sa charge  $Z$  en posant:  $\frac{1}{P} = \frac{1}{P'} + \frac{1}{P''}$ .

De cette expression pour  $P$ , on tire le courant secondaire  $I = \sqrt{\frac{P}{Z}}$  (quoique, strictement parlant, cette dernière expres-

sion ne puisse s'écrire que pour  $P'$ ). Le courant différentiel  $I_d$  est donné par la différence  $I_1 - I_2$ . On obtient la formule suivante:

$$I_d = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{n_1}{N_1} \cdot I_{p1}\right)^2 + \left(\frac{Z_1}{E_1}\right)^2}} - \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{n_2}{N_2} \cdot I_{p2}\right)^2 + \left(\frac{Z_2}{E_2}\right)^2}}$$

Dans cette formule,  $n_1$   $n_2$  désignent le nombre de spires secondaires des TI,  $N_1$   $N_2$  les nombres de spires primaires,  $I_{p1}$  et  $I_{p2}$  les courants primaires,  $E_1$  et  $E_2$  les forces électromotrices correspondant aux courants  $I_{p1}$ ,  $I_{p2}$ ;  $Z_1$ ,  $Z_2$ , les impédances chargeant le secondaire des TI. De cette formule, on a voulu déduire les conclusions suivantes:

Comme  $\frac{n_1}{N_1} \cdot I_{p1} = \frac{n_2}{N_2} \cdot I_{p2}$ , le courant différentiel ne dépend que des forces électromotrices et des impédances secondaires; si l'on fait  $Z_1 = Z_2$ , c'est-à-dire si les charges sont égales, le courant différentiel ne dépend plus que des forces électromotrices  $E_1$  et  $E_2$ , ou, si l'on veut (en négligeant les faibles chutes de tension dans les TI eux-mêmes), des tensions aux bornes secondaires des TI,  $U_1$  et  $U_2$ . Or,  $U_1$  et  $U_2$  sont égales si les 2 TI travaillent à la même induction et si les rapports des sections du fer sont inversement proportionnels aux rapports de transformation du transformateur de puissance. En effet,  $U_1 = n_1 \cdot f \cdot B_1 \cdot A_1$ ;  $U_2 = n_2 \cdot f \cdot B_2 \cdot A_2$  où  $f$  désigne la fréquence;  $B_1$  et  $B_2$  l'induction;  $A_1$  et  $A_2$  les sections du fer. Pour que  $U_1 = U_2$ , il faut que  $n_1 \cdot B_1 \cdot A_1 = n_2 \cdot B_2 \cdot A_2$ ; si  $B_1 = B_2$  on a  $n_1 \cdot A_1 = n_2 \cdot A_2$ ;  $\frac{A_1}{A_2} = \frac{n_2}{n_1}$ . D'où:

*A charges égales, inductions égales et rapport des sections du fer inverse du rapport du transformateur de puissance, le courant différentiel serait théoriquement nul.* On établirait donc les TI en s'inspirant autant que possible de ces conditions.

Mais il y a lieu de faire les objections suivantes:

a) Pour établir cette formule, on a posé  $I^2 = \frac{P}{Z}$  où  $I$  est le courant secondaire du TI,  $P$  la puissance débitée et  $Z$  l'impédance de charge; or cette expression n'est vraie que dans le domaine des faibles charges.

b) On est forcé d'en rester à une induction assez basse pour le TI du côté HT à cause de son faible nombre d'ampèretours. Or, le TI BT a, lui, un grand nombre d'ampèretours. L'égalité des inductions conduirait à une très mauvaise utilisation de ces ampèretours et à une section du fer inutilement forte.

c) Cette formule ne tient pas compte du courant magnétisant des TI. Comme ce courant est différent pour les deux TI, les courants secondaires ne sont pas égaux et l'on a un courant différentiel. Ceci ressort des diagrammes ci-contre, construits en partant des tensions aux bornes des deux TI et en admettant deux courants secondaires égaux à 5 A (fig 7).  $U$  est la tension aux bornes;  $I$  le courant secondaire nominal égal à 5 A;  $I \cdot R$  la chute de tension ohmique interne;  $I \cdot X$  la chute de tension inductive;  $E$ , la f. e. m. induite;  $I_0$  le courant magnétisant perpendiculaire à  $E$ ;  $I_p$ , le courant primaire égal à la somme géométrique  $I + I_0$ . On voit que  $I_{p1}$  diffère de  $I_{p2}$  en grandeur et en direction. Mais, comme en réalité  $I_1 = I_2$  en grandeur et en direction (au courant magnétisant du transformateur de puissance près, que l'on peut négliger), ce sont les courants secondaires  $I_1$  et  $I_2$  qui différeront. La différence géométrique  $I_1 - I_2 = I_{01} - I_{02}$  constitue le courant différentiel.

Pour fixer les idées, nous allons calculer ci-après ce courant pour un cas donné. On admettra d'abord une induction très faible à courant normal et égale pour les deux TI (c'est-à-dire que  $A_1/A_2 = N_2/N_1$ ); et l'on montrera que même alors, le courant différentiel peut suffire à faire fonctionner les relais. Puis l'on répètera le calcul en admettant des inductions différentes et correspondant aux valeurs pratiquement admises; on montrera que là aussi, le courant différentiel est considérable.

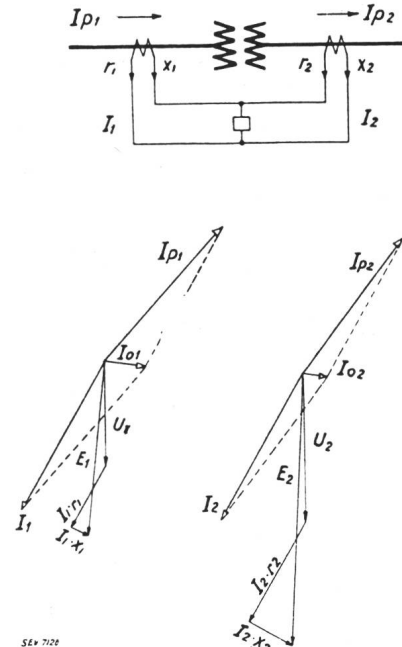


Fig. 7.

Pour simplifier, on calculera seulement la différence algébrique  $I_{01} - I_{02}$ . (En réalité, le courant différentiel sera un peu plus fort.) — Soit à protéger un transformateur de puissance de 10 000 kVA, 100/10 kV; les deux TI, du type traversée, ont un rapport de 60/5 A et 600/5 A (fig. 8). Leur nombre d'ampèretours est de 60 et 600; leur nombre de spires  $n_1$  et  $n_2$ , de 12 et 120; les diamètres intérieur et extérieur des noyaux, de 20/10 cm et 15/7 cm; les longueurs des circuits magnétiques, de 47 et 34,6 cm; les résistances des enroulements secondaires, de 0,04 ohm et 0,08 ohm; la résistance des liaisons du TI BT au relais, de 0,2 ohm; celle des

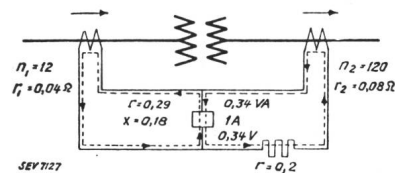


Fig. 8.

liaisons du TI HT au relais, négligeable; enfin, la consommation du relais, de 0,34 VA ou 0,29 W au courant de déblocage = 20 % du courant nominal de 5 A, ce qui donne une impédance de 0,34 ohm, une résistance de 0,29 ohm et une réactance de 0,18 ohm. Les tensions aux bornes  $U_1$  et  $U_2$  sont:

$$U_1 = 5 \cdot 0,34 = 1,7 \text{ V}$$

$$U_2 = 5 \cdot \sqrt{(0,29 + 0,2)^2 + 0,18^2} = 2,61 \text{ V}$$

Les f. e. m. sont:

$$E_1 = 5 \cdot \sqrt{(0,04 + 0,29)^2 + 0,18^2} = 1,88 \text{ V}$$

$$E_2 = 5 \cdot \sqrt{(0,08 + 0,2 + 0,29)^2 + 0,18^2} = 3 \text{ V}$$

On sait d'autre part qu'à 50 pér./s,  $E = 2,22 \cdot 10^{-6} \cdot B \cdot A \cdot n$ ; où  $B$  est l'induction,  $A$  la section du noyau et  $n$  le nombre de spires; d'où l'on tire la section du noyau  $A = \frac{E \cdot 10^6}{2,22 \cdot B \cdot n}$ .

Nous admettrons d'abord une induction  $B_1 = B_2 = 200$  gauss et nous calculerons le courant différentiel pour diverses valeurs des courants secondaires  $I_1$  et  $I_2$ , c'est-à-dire

pour différentes surcharges externes, en restant dans le domaine linéaire de la courbe de magnétisation des TI.

Les sections nécessaires seraient les suivantes:

$$A_1 = \frac{1,88 \cdot 10^6}{2,22 \cdot 200 \cdot 12} = 354 \text{ cm}^2. \quad A_2 = \frac{3 \cdot 10^6}{2,22 \cdot 200 \cdot 120} = 56 \text{ cm}^2$$

ce qui exigerait des hauteurs de noyaux de 71 et 14 cm. La courbe de magnétisation des tôles (de qualité 1,6 W/kg et de 0,4 mm d'épaisseur) donne le nombre d'ampères-tours magnétisants par cm de longueur du circuit magnétique pour les différentes inductions, lesquelles sont proportionnelles aux f.e.m. à induire, c'est-à-dire aux courants nominaux secondaires; d'où l'on calcule le nombre d'ampères-tours magnétisants total nécessaire et par suite, le courant magnétisant.

soit que les qualités des tôles diffèrent; cette composante active décale les deux courants à vide.

Tant qu'il s'agit de TI à grand nombre de spires pour lesquels le courant à vide reste au-dessous d'une certaine valeur, p. ex. 3 à 4/10 d'ampère, cette influence des harmoniques et de la composante active est faible. Par contre, pour les TI à courant à vide élevé (à faible nombre de spires), le courant différentiel dû aux harmoniques et à la composante active peut devenir suffisant pour actionner le relais, *même lorsque la valeur effective des courants à vide des deux TI est identique.*

La conclusion des objections a), b) et c) est qu'il est très difficile, si l'on a un relais différentiel sen-

Tableau I.

$I_1 = I_2$ Amp.	$E_1$ Volt	$B_1 = B_2$ gauss	$AT_1/\text{cm} = AT_2/\text{cm}$ Amp.-t.	$AT_1$ Amp.-t.	$I_{01} = AT_1/120$ Amp.	$E_2$ V	$AT_2$ Amp.-t.	$I_{02} = AT_2/120$ Amp.	$I_d = I_{01} - I_{02}$ Amp.
5	1,88	200	0,125	5,9	0,492	3	4,32	0,036	0,45
10	3,76	400	0,17	8	0,67	6	5,9	0,049	0,62
15	5,64	600	0,204	9,6	0,8	9	7,1	0,059	0,74
20	7,32	800	0,228	10,7	0,895	12	7,9	0,066	0,83
30	11,28	1200	0,27	12,7	1,06	18	9,35	0,078	0,98
50	18,8	2000	0,338	15,9	1,33	30	11,7	0,098	1,23
70	26,4	2800	0,397	18,7	1,56	42	13,7	0,114	1,44
90	33,8	3600	0,445	20,9	1,74	54	15,4	0,128	1,61

On voit qu'à environ 6 fois le courant normal,  $I_d$  suffit déjà à faire fonctionner un relais réglé pour une sensibilité de 20 %.

On remarquera qu'on ne peut pas corriger cette différence  $I_{01} - I_{02} = I_1 - I_2$  simplement en modifiant les rapports  $I_{p1}/I_1$  ou  $I_{p2}/I_2$ , car elle provient de ce que  $I_1$  et  $I_2$  sont *décalés* et non pas de ce qu'ils diffèrent en grandeur.

En répétant les calculs, mais avec un  $B_1 = 400$  gauss et un  $B_2 = 1500$  gauss, on obtient le tableau II. Bien entendu, le TI BT atendra assez rapidement la saturation. A partir de ce moment,  $I_{02}$  croît plus vite que  $I_{01}$ . Mais dans ce domaine, on ne peut plus écrire  $I_1 = I_2$ , car le courant secondaire  $I_2$  croît beaucoup moins vite que  $I_1$ ; de sorte que, quoique la différence  $I_{01} - I_{02}$  puisse s'annuler à nouveau pour un certain courant *traversant*, le courant différentiel devient néanmoins fort, étant donné maintenant par la différence  $I_1 - I_2$ , laquelle croît très rapidement. Il nous suffira donc, pour montrer l'effet du courant magnétisant sur le courant différentiel, d'effectuer les calculs pour le domaine au-dessous de la saturation, c'est-à-dire au-dessous de 11 000 gauss environ.

sible du type usuel, d'établir des TI de traversée ne donnant pas, à courant traversant un peu élevé, c'est-à-dire à court-circuit externe, un courant différentiel dangereux, provenant soit des courants à vide différents, soit de la saturation.

Plus le courant traversant est fort, plus le courant différentiel s'accuse. En outre, dès que la saturation est atteinte dans l'un des TI, *il n'est plus proportionnel au courant traversant, il croît plus vite que celui-ci.*

E. Les TI ont souvent des charges différentes. L'on a alors un courant différentiel. On peut le déduire du simple fait que les 2 TI n'ont pas la même tension aux bornes.

Plus la charge d'un TI est élevée, plus aussi le domaine de la saturation est rapidement atteint. Soit en effet un TI non saturé dont le courant primaire est constant et égal au

Tableau II.

$I_1 = I_2$ Amp.	$E_1$ V	$B_1$ gauss	$AT_1/\text{cm}$ Amp.-t.	$AT_2$ Amp.-t.	$I_{01}$ Amp.	$E_2$ V	$B_2$ gauss	$AT_2/\text{cm}$ Amp.-t.	$AT_2$ Amp.-t.	$I_{02}$ Amp.	$I_d = I_{01} - I_{02}$ Amp.
5	1,88	400	0,125	5,9	0,49	3	1500	0,29	10	0,083	0,4
10	3,76	800	0,228	10,7	0,89	6	3000	0,412	14,3	0,119	0,77
15	5,64	1200	0,27	12,7	1,06	9	4500	0,525	18,2	0,152	0,91
20	7,32	1600	0,305	14,3	1,19	12	6000	0,71	24,6	0,206	0,99
30	11,28	2400	0,367	17,3	1,44	18	9000	1,5	52	0,435	1
40	15,04	3200	0,425	20	1,67	24	12000	5	173	1,44	0,23

On voit qu'à 3 fois le courant normal, le courant différentiel dû à la *différence des courants magnétisants* est déjà dangereux. A partir de 7 ou 8 fois le courant normal, c'est la *différence algébrique des courants secondaires, due à la saturation*, qui est suffisante pour faire partir le relais.

Ce sont là des résultats de calcul. En réalité, les mesures donnent pour  $I_d$  des valeurs encore plus élevées. Cela tient à deux causes: 1° la composante magnétisante du courant à vide des TI contient en outre des harmoniques qui sont sensibles déjà à quelques mille gauss. 2° La composante active du courant à vide servant à couvrir les pertes fer est différente dans les deux TI, soit que les inductions soient inégales,

courant nominal. La tension aux bornes secondaires est  $U = 0$  (fig. 9), ce transformateur est court-circuité (n'a pas de charge). Le courant secondaire  $I_2$  est décalé de  $\varphi$  en arrière, par rapport à la force électromotrice induite dans le secondaire  $E = I \cdot Z_2$ , où  $Z_2$  désigne l'impédance de l'enroulement secondaire du TI lui-même.

Supposons maintenant que l'on charge ce TI avec une impédance  $Z = r + j \cdot x$  (on sait que la charge d'un TI est proportionnelle à l'impédance à ses bornes, contrairement à celle d'un transformateur de tension); tant que cette impédance est assez faible pour que  $I$  reste constant (TI non saturé), la tension aux bornes  $U$  sera  $= I_2 \cdot Z$ , et la force électro-

motrice sera  $E' = I_2 (Z_2 + Z) > E$ . La force électro-motrice étant plus élevée, l'induction devra l'être aussi, et de même le courant magnétisant  $I_0'$ . D'où l'on déduit que

a) le courant magnétisant est fonction de la charge; b) le TI le plus chargé atteindra la saturation le premier. A partir de ce moment, le courant différentiel croît vite jusqu'à saturation du deuxième TI, puis devient constant. Des mesures effec-

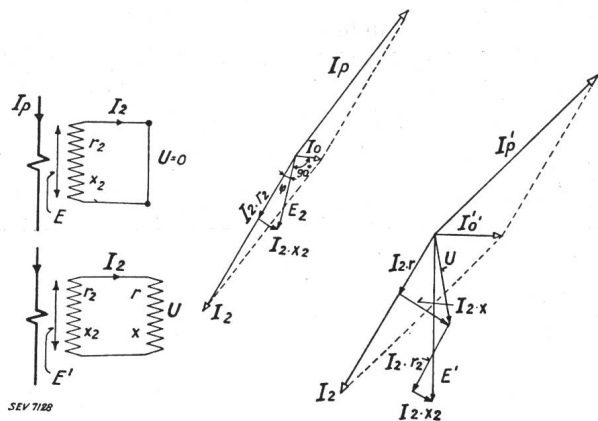


Fig. 9.

tuées sur deux TI identiques ayant le même courant primaire et dont on a fait varier les charges, ont donné les courbes de la fig. 10 qui représentent, pour une certaine charge sur l'un des TI, la variation du courant différentiel en fonction de la charge du deuxième TI.

F. En cas de court-circuit biphasé externe, au côté secondaire d'un transformateur, il peut se faire que la tension de la phase saine s'élève; cela signifie, pour les transformateurs modernes travaillant à induction élevée, un appel de courant magnétisant considérable dans la phase saine (par exemple pour un transformateur travaillant à 14 000 gauss, une élévation de tension de 10 % fait monter le courant magnétisant de 4 à 20 %), ce qui peut suffire à actionner le relais différentiel.

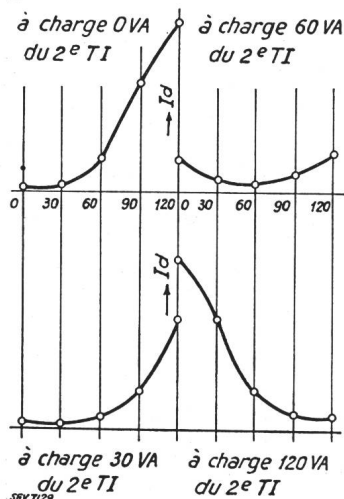


Fig. 10.

Ces diverses difficultés, exposées sous A à F, peuvent être résumées comme suit: A moins d'imposer aux TI des conditions d'exactitude trop dures, un courant différentiel peut apparaître, dû à des causes autres qu'un défaut interne; ce courant, non dangereux en régime normal, croît soit linéairement avec le courant traversant, soit plus vite que celui-ci et peut être très élevé en cas de court-circuit externe. Un relais différentiel à courant de déblocage fixe risque donc de fonctionner intempestivement. Pour éviter cela, il faudrait le régler pour un courant de déblocage trop élevé; les défauts internes de

moyenne importance ne seraient détectés que lorsqu'ils auraient atteint des proportions graves. Le relais différentiel ordinaire n'a donc pas une sensibilité suffisante.

Il faut un relais où l'action du courant différentiel  $(I_1 - I_2)$  soit compensée par le courant traversant  $\left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right)$ , soit en régime sain, soit pour un défaut externe. Dans les deux cas en effet les deux termes de la somme  $(I_1 + I_2)$  restent de même sens, le courant traversant a un fort effet antagoniste.

Par contre, lors d'un défaut interne, sa valeur  $(I_1 + I_2)$  devient  $(I_1 - I_2)$ , l'effet antagoniste devient faible ou disparaît, le relais n'est guère affecté que par le courant différentiel qui, lui, devient  $(I_1 + I_2)$ . Un relais de ce genre, compensé, a donc une sensibilité variable, élevée à défaut interne, nulle à défaut externe.

## V. Solution des difficultés.

### Le relais différentiel compensé.

Le principe de ce relais est connu depuis quelque temps déjà; mais l'application n'en est propagée que depuis peu. L'appareil consiste en un relais différentiel ordinaire, mais dont l'action du ressort antagoniste ou de rappel est renforcée par le courant traversant des TI,  $(I_1 + I_2)$ , ou une fraction de ce courant. La fig. 11a représente le couplage de

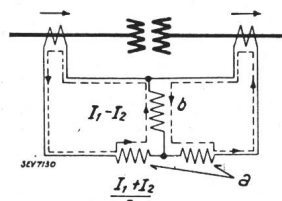


Fig. 11a.

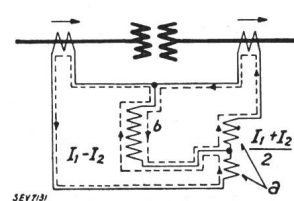


Fig. 11b.

principe, la fig. 11b le couplage schémétique du relais; a est la bobine antagoniste (consistant en deux demi-bobines), b la bobine de déblocage. La première est parcourue, en service normal, par  $\left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right)$  la deuxième par  $(I_1 - I_2)$ . Lorsqu'on a une surcharge ou un court-circuit externe et que le courant

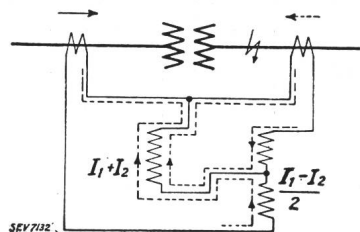


Fig. 12.

de déblocage tend à croître, le courant antagoniste croît plus vite, la sensibilité du relais décroît, ce qu'on cherche précisément.

Si par contre, le court-circuit est interne (fig. 12), le courant différentiel devient  $(I_1 + I_2)$  et croît beaucoup plus vite qu'il ne croissait pour un court-circuit externe où il n'était que le résultat d'une



différence  $(I_1 - I_2)$ ; tandis que le courant traversant devient  $\left(\frac{I_1 - I_2}{2}\right)$ , son action antagoniste est faible ou nulle. La sensibilité du relais croît de nouveau en fonction de l'intensité du court-circuit.

*En résumé*, on peut dire: Le relais différentiel compensé compare le courant différentiel  $(I_1 - I_2)$

au courant traversant  $\left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right)$ . C'est ce dernier qui l'emporte en régime sain ou lors d'un défaut externe; le relais ne peut partir. Par contre, lors d'un défaut interne, le courant différentiel monte à  $(I_1 + I_2)$  et le courant traversant tombe à  $\left(\frac{I_1 - I_2}{2}\right)$ .

le premier l'emporte, le relais part.

La bobine de déblocage est rattachée au point milieu de la bobine antagoniste, afin que, quel que soit le côté alimenté du transformateur de puis-

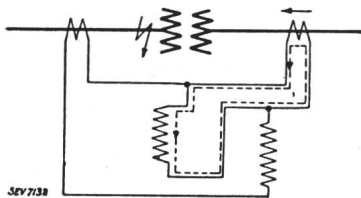


Fig. 13.

sance, cette dernière ait constamment du courant. Si le rattachement n'était pas symétrique (fig. 13), la bobine antagoniste risquerait de n'avoir pas de courant. Suivant le côté alimenté, le relais fonctionnerait dans des conditions de déblocage différentes. De même à alimentation inégale des deux côtés.

Ce relais résout les diverses difficultés mentionnées plus haut (A à F):

**A.** Le courant magnétisant ne présente pas de difficulté spéciale, il ne croît pas avec la charge, un ressort antagoniste suffit à le compenser.

**B.** Contre l'à-coup de courant à l'enclenchement, il suffit de temporiser le relais.

**C a et b.** L'action du courant différentiel provenant, soit de prises au transformateur de puissance, soit d'un écart entre les rapports des TI et celui du transformateur de puissance, est équilibrée précisément par l'action antagoniste du courant traversant. Si l'action du courant différentiel croît proportionnellement aux surintensités externes, l'action antagoniste du courant traversant croît précisément dans les mêmes proportions.

**D.** L'action du courant différentiel provenant des caractéristiques différentes des TI est également compensée. Le choix des types de TI reste libre. Un examen spécial de la difficulté IV s'impose toutefois: Si le courant, lors d'un court-circuit externe, est assez élevé pour que l'un des TI soit fortement saturé l'autre ne l'étant pas encore, le courant du TI saturé, par exemple  $I_2$ , ne croît plus, et par suite le

courant antagoniste  $\left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right)$  ne croît plus que lentement (l'accroissement de  $I_1$  lui-même n'étant plus linéaire), tandis que le courant de déblocage  $(I_1 - I_2)$  croît rapidement. On pourrait craindre qu'à un moment donné, l'action du courant de dé-

blocage l'emporte sur celle du courant antagoniste et que l'on ait un déclenchement à faux. Mais pratiquement, cela ne se produira pas, car il faudrait et que les caractéristiques des TI soient très différentes, et que l'intensité du courant de court-circuit traversant soit extrêmement élevée. Un TI convenablement dimensionné n'est saturé qu'à partir de 15 à 20 fois le courant nominal. (C'est le cas d'un grand nombre de TI actuellement sur le marché, par exemple des TI de traversée, qui travaillent normalement à quelques centaines de gauss seulement.) Or, ces intensités ne sont dépassées, ni dans les alternateurs, ni dans les transformateurs de puissance; dans les premiers, la valeur de crête même du courant asymétrique de court-circuit ne dépasse guère  $15 \cdot I_n$ ; dans les transformateurs, le courant de court-circuit permanent atteint au maximum 12 à 15 fois  $I_n$ , même si l'on admet une alimentation infinie et une faible tension de court-circuit, de l'ordre de 7 ou 8 %. Avec les gros transformateurs, on peut tabler sur 10 à 12 fois  $I_n$ .

Une autre objection que peut se présenter est la suivante: Lorsque le transformateur fonctionne à vide ou à faible charge, l'action antagoniste est faible ou nulle, le relais risque de partir. Mais d'une part il subsiste l'action constante du ressort, d'autre part, l'action de la bobine de déblocage est alors faible.

La difficulté E est résolue comme D.

**F.** L'action du courant magnétisant de la phase saine, lors d'un court-circuit biphasé, est compensée par l'action antagoniste du courant de charge traversant.

## VI. Description d'un modèle de relais différentiel compensé.

Le relais présenté ici à titre d'exemple comprend deux éléments électromagnétiques, dont les noyaux sont montés sur un même axe vertical et soumis aux actions opposées, l'un de la bobine de déblocage, l'autre de la bobine antagoniste. La fig. 14 représente un élément électro-magnétique.

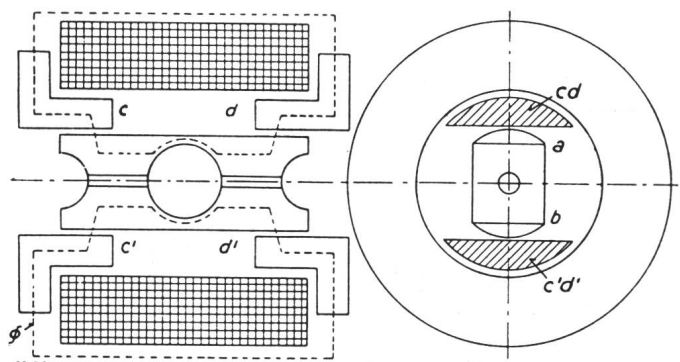


Fig. 14.

Les deux bobines sont disposées concentriquement à l'axe, lequel repose sur pierres fines. Le corps de chaque bobine a deux paires de pôles,  $c, d$  et  $c', d'$ . Chaque paire de pôles est parcourue par la moitié du flux total de la bobine. Chaque noyau se compose lui-même de deux têtes  $a$  et  $b$ , soumises

à l'action des pôles  $c$ ,  $d$  et  $c'$ ,  $d'$ . Chacun des deux noyaux tend à s'orienter de façon à offrir le chemin de plus faible réluctance magnétique aux deux demi-flux de la bobine. Les axes des pôles des deux bobines sont naturellement décalés l'un par rapport à l'autre d'un certain angle. Ces bobines n'ont toutefois pas de cuirasse magnétique extérieure, afin que soit évitée une saturation rapide de leurs pôles et par là une variation non linéaire du flux aux fortes intensités. De même, la section des noyaux, au lieu d'être constante dans le sens axial sur tout le parcours du flux, est très faible vers le milieu, par suite d'une forte ouverture en lunette pratiquée dans le noyau; de cette manière, aux courants élevés, la plus grande partie du flux passe dans l'air; il croît linéairement, l'action des bobines sur les noyaux reste proportionnelle aux courants jusqu'à environ 5000 ampèretours. Avec un noyau de section constante, le couple resterait déjà constant à partir d'environ 2400 ampèretours, c'est-à-dire que l'action de la bobine antagoniste ne croîtrait plus aux forts courants; on risquerait d'avoir un fonctionnement à faux.

Au bas de l'axe, est fixé un ressort-spiral, dont la tension est réglable et permet de choisir la sensibilité-limite; au haut, un levier en matière isolante portant le contact. La bobine de retenue se compose de deux demi-bobines, ce qui permet un raccord symétrique de la bobine de déblocage et par là un fonctionnement du relais à caractéristique de déblocage identique, quel que soit le côté alimenté. Chacune des deux demi-bobines est munie de prises d'amenée ainsi que d'une plaque de bornes où l'on choisit le nombre de spires à mettre en circuit et par là la caractéristique de déblocage. L'intensité nominale du relais est celle de la bobine de retenue.

Chaque phase est, dans la règle, protégée individuellement par relais séparé. On a évité à dessein de faire un relais comportant les éléments électromagnétiques des trois phases sur le même axe, afin d'éliminer l'action très gênante des phases saines.

Pour la protection d'un transformateur triphasé à deux enroulements, il faut au maximum 3 relais unipolaires. Dans le cas du neutre isolé on peut, en couplant les TI à 60°, s'en tirer avec un seul relais. Un jeu complet comprend, outre les relais différentiels, un relais auxiliaire avec contacts robustes

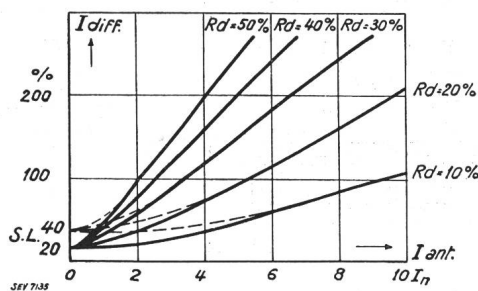


Fig. 15.

et volet indicateur, agissant (avec un retard de  $2/10$  à  $3/10$  de seconde) sur le déclenchement des interrupteurs, et un deuxième relais à action différée (retard de l'ordre d'une seconde), dont il a été

question au chapitre IV. B pour le blocage à l'enclenchement.

**Caractéristique.** La sensibilité-limite  $SL$  (fig. 15) est réglable d'une façon continue entre 20 et 40 %. Le rapport de déblocage  $R_d$  peut être réglé par échelons à 10, 20, 30, 40 et 50 %, c'est-à-dire que le relais peut être réglé pour fonctionner lorsque la bobine de déblocage reçoit un courant égal à 10, 20, etc. % du courant de la bobine antagoniste. Les caractéristiques de déblocage sont représentées par la figure 15.  $I_{diff}$  désigne le courant de la bobine de déblocage  $I_1 - I_2$  et  $I_{ant}$  le courant de la bobine antagoniste  $(\frac{I_1 + I_2}{2})$ . On voit que l'allure des caractéristiques reste linéaire aux fortes intensités (jusqu'à environ 20 fois le courant nominal) assurant ainsi au relais un fonctionnement correct pour les plus forts courants traversant pratiquement les transformateurs.

**Exemple de réglage.** Soit à protéger un transformateur triphasé de 10 MVA, 6/45-55 kV, 965/129-105 A. Les rapports des TI sont 1000/5 A et 125/5 A. Le courant différentiel en régime sain, à 6/55 kV, est donc de 14 % du courant traversant. Le courant magnétisant, à 1,2 fois la tension nominale, est d'environ 15 %. On règle: la sensibilité minimum à 20 %, le rapport de déblocage à 20 %; le relais fonctionnera lorsqu'il circule p. ex.  $I_n$  dans la bobine antagoniste, et 0,25 à  $0,3 \cdot I_n$  dans la bobine de déblocage; sensibilité suffisante, tout court-circuit entre spires étant caractérisé par un fort courant différentiel (un court-circuit de 0,2 à 0,3 % du nombre total des spires d'une colonne, dans un transformateur de 10 MVA, donne déjà environ  $0,5 \cdot I_n$ ).

La consommation d'énergie est, sous courant nominal, de 4 VA pour la bobine de déblocage et de 1 VA pour la bobine de retenue.

Le couplage interne est représenté par la fig. 16. Le couplage externe dépend de celui du transformateur à protéger.

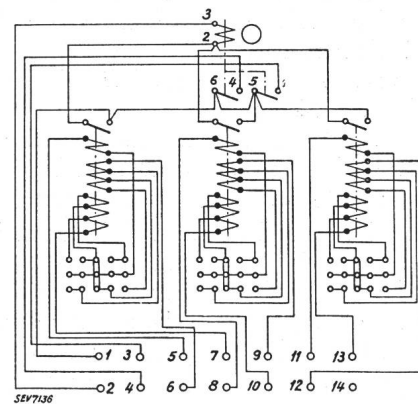


Fig. 16.

**Cas des transformateurs à 3 enroulements.** Il y faut 1 ou 2 relais différentiels, suivant que le côté alimenté reste le même ou change. Pour le premier cas, le couplage de principe est représenté à la figure 17. On compare le courant du côté alimenté (1) à la somme des courants des côtés con-

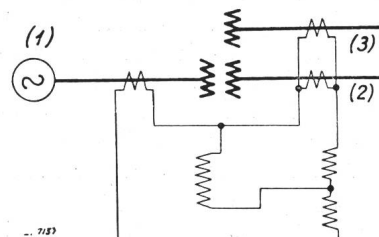


Fig. 17.

sommateurs (2) et (3); le courant secondaire du TI (1) étant égal à la somme des courants secondaires des TI (2) et (3), il suffit d'un relais par phase. Ce couplage ne convient toutefois pas si le côté alimenté peut changer en régime et passer, par exemple, de (1) à (2) car, alors, en cas de court-

circuit sur (3), les 2 bobines antagonistes et de déblocage seraient parcourues par le même courant, lequel est le courant de déséquilibre des TI (2) et (3) (fig. 18); or, on sait que le relais déblocage déjà pour un courant dans la bobine

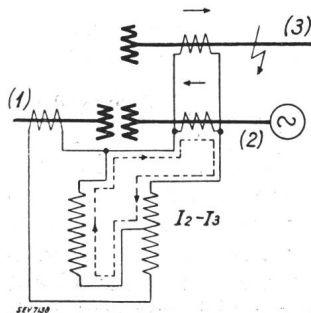


Fig. 18.

de déblocage égal à une fraction seulement de celui de la bobine antagoniste. Il faut adopter le couplage de la fig. 19 comportant deux relais par phase, A et B. Le principe du couplage est le suivant: La somme des courants secondaires des TI doit être nulle en service normal, ou pour un court-circuit externe. Les bobines de déblocage des deux relais mesurent cette somme. Etant couplées en série (fig. 20), elles ne reçoivent que le courant d'erreur. Les bobines de retenue, elles, sont parcourues, l'une par les courants de (1) et de (2), l'autre par le courant de (3) (fig. 21); il y a donc toujours l'une des deux bobines de retenue qui a le courant total de défaut, même si l'autre n'a que le courant d'erreur.

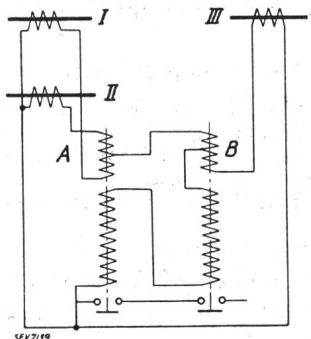


Fig. 19.

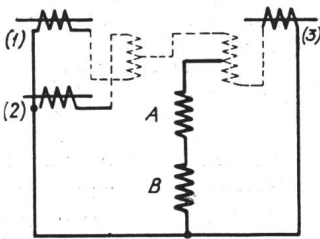


Fig. 20.

Par exemple, dans le cas mentionné plus haut, d'un court-circuit sur (2), avec alimentation par (1), les bobines de déblocage reçoivent bien le courant d'erreur, mais la bobine de retenue du relais A reçoit le courant total de défaut. Donc, pour un défaut externe, même si l'un des deux relais vient à déblocquer sous l'effet des courants d'erreur des TI, l'autre ne déblocage pas. Comme leurs contacts sont en série, il ne peut se produire de déclenchement intempestif. Pour un défaut dans le transformateur par contre, les deux relais fonctionnent.

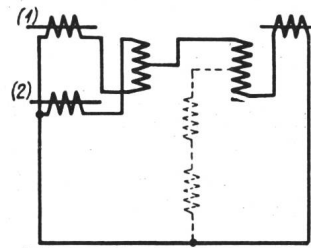


Fig. 21.

## VII. Autres systèmes de protection différentielle, ou autres exécutions du relais compensé. Critique.

A. Certains constructeurs, admettant comme fondée l'objection erronée réfutée plus haut (voir difficulté D), à savoir que le fonctionnement du relais différentiel compensé ne serait pas sûr si les TI venaient à travailler dans le domaine de la saturation, préfèrent en rester au relais différentiel ordinaire, qu'ils complètent à l'aide d'un relais de déblocage sensible à la direction réciproque des courants des deux TI. Ils utilisent pour cela deux sortes de relais de déblocage.

1) L'un comprend deux bobines e et f, couplées selon fig. 22. Pour un court-circuit externe, les deux bobines sont parcourues par le même courant; le

relais fonctionne sous l'effet de  $I_e \cdot I_f$  et bloque le relais différentiel. Pour un court-circuit interne (fig. 23), les bobines sont parcourues par des cou-

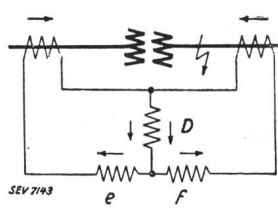


Fig. 22.

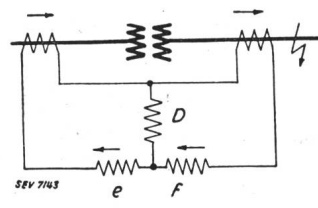


Fig. 23.

rants de sens opposé, le relais est maintenu en repos. Si un seul des TI a du courant, c'est-à-dire une seule des bobines, e ou f, le relais est maintenu également en repos par un ressort.

Mais il faut objecter que:

a) En cas d'un double défaut simultané (par exemple coup de foudre sur la ligne accompagné de claquage interne, se traduisant par un court-circuit externe sur deux phases et un court-circuit interne entre spires), le relais bloque nécessairement, car il est réglé pour fonctionner déjà à  $1,5 \cdot I_n^2$ ; le court-circuit entre spires n'est donc pas du tout détecté et a le temps de se transformer en une avarie grave. Le relais différentiel compensé, lui, ne reste bloqué que pour des courants de court-circuit très élevés dès qu'il y a un courant différentiel de défaut.

b) Même en cas de court-circuit simple entre spires, et débit normal sur le consommateur le relais de blocage peut

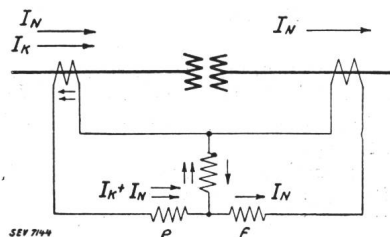


Fig. 24.

fonctionner. On voit en effet, d'après la fig. 24, que le relais (ef) est parcouru par  $(I_K + I_N)$  et  $(I_N)$ . Or on a vu que, pour un court-circuit entre spires,  $I_K$  devient assez élevé et par suite le produit  $I_e \cdot I_f$  atteint vite la valeur critique  $1,5 \cdot I_n^2$ .

c) Le relais différentiel ordinaire doit être réglé moins sensible que le relais compensé; on perd donc un avantage important du relais.

d) En employant deux relais au lieu d'un seul, on rend la protection plus compliquée, son fonctionnement plus délicat et on se crée de nouvelles chances de ratés.

2) L'autre relais de déblocage employé est un simple relais à maximum de courant.

Il faut faire les mêmes objections que ci-dessus. En outre, si le transformateur est alimenté des deux côtés, le relais à maximum de courant peut fonctionner aussi bien pour un court-circuit interne qu'externe. Il faut alors un relais directionnel. Or, on a vu au début les inconvénients de ce genre de relais: la tension peut être insuffisante; il y a une zone morte ou non protégée. Enfin, ce système comporte tout un panneau de relais complémentaires; ce n'est plus une protection différentielle, mais une combinaison de relais différentiels, à maximum de courant et directionnels, avec en sus deux ou trois relais auxiliaires par pôle. On arrive à un assez joli total de plus de 20 relais pour la protection des 3 phases d'un transformateur.

B. On a aussi proposé, pour les transformateurs triangle-étoile, de faire agir sur un relais sensible la somme des courants des trois phases du côté

triangle; c'est la protection dite *Wegner*. La fig. 25 représente le couplage de principe; la fig. 26, le couplage que l'on réalise pour éviter de devoir

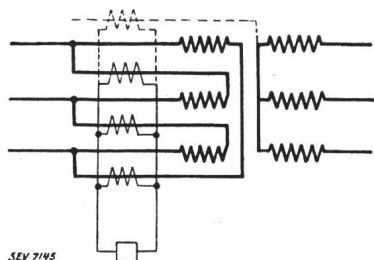


Fig. 25.

sortir deux des trois liaisons entre phases. Le TI 3 a un rapport  $\sqrt{3}$  fois plus petit que les TI 1 et 2. On vérifie aisément qu'en service normal la somme des trois courants secondaires sur le relais est nulle, pour le couplage 25 comme pour le couplage 26.

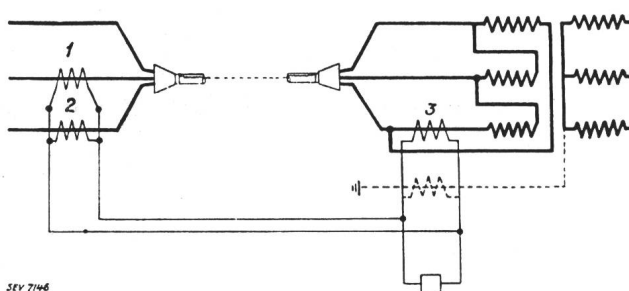


Fig. 26.

Les défauts de cette protection sont, outre ceux qui sont inhérents à la protection différentielle ordinaire, les suivants:

- Elle ne s'applique qu'aux seuls transformateurs ayant un enroulement en triangle.
- Ou bien elle ne protège pas contre les courts-circuits biphasés au côté étoile, par exemple aux bornes, ou bien elle fonctionne aussi pour courts-circuits biphasés externes côté étoile.
- Si le réseau est compensé par bobine d'extinction du côté étoile, il faut, à chaque mise hors service d'une partie du secteur, ou bien réajuster soigneusement la bobine, ou bien changer le rapport de transformation du TI dans le neutre; sinon la protection risque de fonctionner pour un défaut à la terre dans le secteur.
- Elle ne détecte pas les courts-circuits triphasés aux bornes du côté étoile.

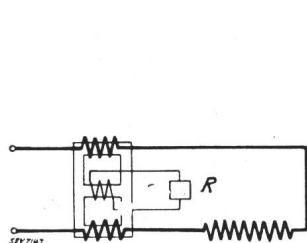


Fig. 27.

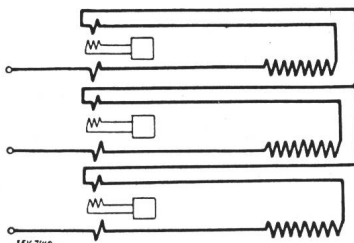


Fig. 27a.

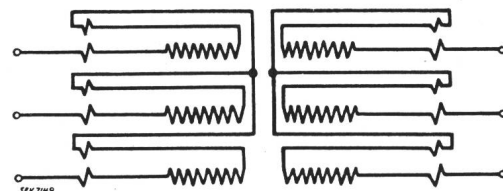


Fig. 27b.

e) Si l'on veut englober dans la protection les câbles d'amenée au transformateur, les longueurs des liaisons secondaires entre le relais et les divers TI peuvent être très différentes; de même aussi par conséquent la charge des TI, d'où courant d'erreur. Si l'on rétablit l'équilibre par l'adjonction de selfs ou de résistances auxiliaires, on risque de surcharger les TI.

f) Si l'on règle le relais trop sensible, il peut partir pour des courants de circulation dans l'enroulement triangle lui-même (court-circuit monophasé extérieur, charge dissymétrique dans le réseau, 3<sup>e</sup> harmonique).

g) Cette protection exige que les deux extrémités d'au moins une phase soient sorties sur le couvercle, condition souvent prohibitive pour les transformateurs existants.

Ces divers désavantages relèguent cette protection à un rang secondaire.

Même si l'on emploie pour l'améliorer, non pas un relais différentiel ordinaire, mais un relais compensé, la plupart des défauts ci-dessus subsistent néanmoins.

C. D'autres constructeurs, pour éluder la difficulté du déséquilibre provenant de TI de caractéristiques différentes, font assumer le rôle différentiel à des TI dits à «lunettes» (fig. 27), qui comparent directement les courants à l'entrée et à la sortie de chaque phase (fig. 27a pour les alternateurs et 27b pour les transformateurs). Ces TI ont trois colonnes, dont les deux extérieures sont excitées directement par l'entrée et la sortie d'une phase. La troisième, soit celle du milieu, porte l'enroulement secondaire d'alimentation du relais. Elle n'a pas de flux en régime sain ou pour un court-circuit externe. Si, par contre, les courants sont inégaux par suite d'un défaut interne, un flux apparaît, le relais fonctionne.

Ce système appelle les objections suivantes:

- Les courts-circuits entre spires des transformateurs ne sont pas détectés. C'est là une lacune grave.
- Les deux extrémités de chaque phase doivent être sorties et isolées pour la pleine tension de phase.
- Il faut des TI spéciaux, dont l'isolement est très malaisé aux hautes tensions.
- Il faut, pour un transformateur, 6 relais.

D'autres constructeurs ont cherché à parer en partie à ces inconvénients, en comparant non pas les courants d'entrée et de sortie d'une phase du même enroulement, mais les courants des deux enroulements côtés haute et basse tension.

Mais, on a alors les conducteurs haute et basse tension sur un même appareil de dimensions réduites, qu'il faut isoler soigneusement en conséquence, ce qui est un gros inconvénient au point de vue constructif. (Le cas d'un TI ordinaire ne comportant qu'un enroulement de mesure est très différent, car cet enroulement est toujours mis à la terre.) — D'autre part, pour avoir le même nombre d'ampères-tours sur les deux colonnes extérieures, il faut un nombre de spires très inégal, d'où des fuites différentes. Le déséquilibre provenant du TI n'est donc pas entièrement éliminé.

Il existe aussi d'autres types de relais différentiels comprenant deux bobines reliées chacune

à l'un des TI; les deux bobines agissent en sens inverse, soit sur un noyau commun, soit sur deux noyaux balance, soit sur un disque Ferraris.

Ces divers relais ont les mêmes inconvénients que les relais différentiels ordinaires. En outre:

- Ils ont une consommation plus élevée.
- Ils ont une consommation permanente, même en régime sain.
- Il est nécessaire d'équilibrer les TI et les relais pour les courants maxima de court-circuit.



**D.** Certains constructeurs ont, par contre, reconnu de bonne heure la supériorité du relais différentiel compensé. Seulement, ils en propagent une réalisation un peu différente, qui en change la caractéristique et le rendent moins sensible:

a) Le choix de la caractéristique de déblocage se fait en modifiant non plus le nombre de spires de la bobine antagoniste, mais la position radiale de son noyau (monté sur un axe tournant) par rapport à la bobine elle-même. Cela revient à modifier le nombre d'ampères-tours actifs de la bobine antagoniste tout en laissant subsister sur celle-ci le même nombre d'ampères-tours total. Le résultat est que, à fort courant traversant (antagoniste), le flux traversant le noyau ne croît presque plus, ni, par conséquent, l'effet antagoniste de celui-ci. Le courant de déblocage n'est plus du tout proportionnel au courant traversant. Les caractéristiques de fonctionnement obtenues par ce réglage défectueux sont représentées à la figure 28. Les diverses courbes  $p=0$ ,  $p=5$ , etc., sont les diverses caractéristiques obtenues par modification de la position du noyau. On voit la forte retombée des courbes pratiquement utilisées à partir de 3 ou 4 fois le courant nominal. On risque ou bien un déclenchement à faux, en cas de court-circuit externe, ou bien un raté

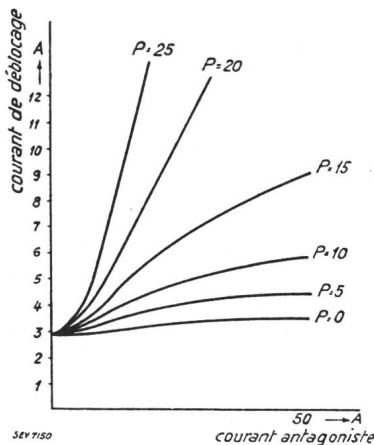


Fig. 28.

en cas de court-circuit aux bornes du transformateur de puissance ou de l'alternateur.

b) La section des noyaux est constante. Ils sont saturés à forte surintensité et limitent le flux actif. Leur action n'est donc pas constante pour toutes les intensités. Ce fait contribue à créer la caractéristique retombante du relais.

c) Il faut dimensionner la bobine de déblocage pour un plus grand nombre d'ampères-tours. La consommation est passablement plus forte (12 VA à 5 A, contre 3,6 à 4 VA pour le relais décrit au chap. V). Elle risque d'augmenter la charge des TI et par là le courant différentiel.

d) Le relais est tripolaire, c'est-à-dire que les noyaux des trois phases agissent sur le même axe. Les noyaux des phases saines gênent l'action de ceux des phases malades et diminuent la sensibilité du relais. — Il ne part que lorsque le courant de déblocage atteint au minimum 30 % du courant traversant.

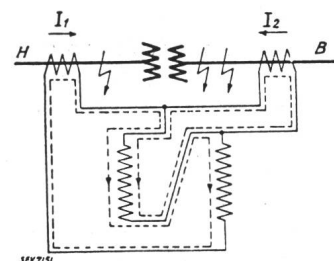


Fig. 29.

Si par exemple le courant de défaut vient du côté H (⚡), il parcourt à la fois la bobine antagoniste et la bobine de déblocage. Si par contre, le courant de défaut vient de B (⚡), il ne parcourt que la bobine de déblocage. On voit immédiatement que les conditions de déblocage sont très différentes. Des essais effectués avec ce couplage sur le relais décrit au chap. V ont donné les résultats suivants:

Caractéristique choisie: 50 %.

Courant venant de H:

$$I_1 = 25 \text{ A}; I_2 = 15 \text{ A}; \frac{I_1 + I_2}{2} = 20 \text{ A}; I_d = 10 \text{ A} = 50 \%$$

Courant venant de B:

$$I_1 = 15 \text{ A}; I_2 = 21 \text{ A}; \frac{I_1 + I_2}{2} = 18 \text{ A}; I_d = 6 \text{ A} = 33 \%$$

## VIII. Relais électronique.

### Protection différentielle des lignes et câbles.

Il faut distinguer entre les protections différentielles longitudinale et transversale. Nous ne citerons brièvement ci-après que la longitudinale, la transversale constituant un domaine à part.

La protection différentielle longitudinale est analogue à celle des machines et transformateurs. On compare entre eux les courants de la ligne au départ et à l'arrivée (fig. 30). On fait toutefois le

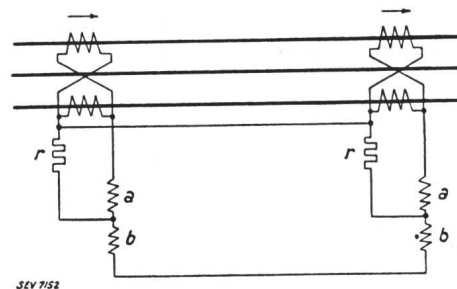


Fig. 30.

montage différentiel dit à équilibre de tension, au lieu du montage précédent à équilibre de courant, ceci afin d'économiser un fil pilote. On compare les chutes de tension dans deux résistances  $r$  au départ et à l'arrivée.  $a$  et  $b$  désignent les deux bobines du relais. Il ne circule pas de courant en régime normal dans les fils pilotes.

Le relais différentiel compensé convient très bien; il présente les mêmes avantages que pour les machines et les transformateurs. Certains inconvénients de la protection différentielle ordinaire, qui sont sensibles dans les lignes, à savoir l'obligation d'avoir des caractéristiques uniformes pour les TI, le déséquilibre causé par les fils pilotes, ne jouent plus de rôle pour le relais compensé.

Mais, s'il s'agit de longues lignes, l'emploi de fils pilotes présente de gros inconvénients:

- a) Le câble auxiliaire est d'un coût élevé.
- b) Les accidents dans le câble auxiliaire rendent la protection illusoire ou simulent même un défaut.
- c) Les lignes ont un effet d'induction sur le câble auxiliaire.
- d) Le câble auxiliaire a une capacité propre; si on la compense, des harmoniques du courant de court-circuit peuvent créer une résonance.
- e) Les TI peuvent être surchargés par les fils pilotes.

Toutes ces raisons ont empêché jusqu'ici l'emploi de la protection différentielle longitudinale de se généraliser pour les longues lignes.

Pour toutes ces raisons, tant techniques qu'économiques, le fil pilote est prohibitif pour les longues lignes. — Or, c'est précisément pour les longues lignes d'interconnexion à haute tension, reliant des centrales ou groupes de centrales importantes, que le principe de la protection différen-

tielle est intéressant. Il permet en effet de déclencher sélectivement le tronçon avarié avec une rapidité suffisante pour éviter sûrement le décrochage des centrales ou des gros moteurs, les balancements d'énergie et les déclenchements à faux d'autres relais, qui en sont la conséquence. On a donc cherché à suppléer au fil pilote.

Deux moyens se présentent:

a) On utilise comme fil pilote les fils téléphoniques; mais les conditions imposées à ceux-ci pour un fonctionnement satisfaisant sont très dures.

b) On substitue au fil pilote, pour la liaison des TI, des circuits d'émission et de réception par ondes HF guidées le long du tronçon. On utilise pour la comparaison des courants aux deux extrémités une lampe triode ou *relais électrique*. Le système est simple, d'un fonctionnement impeccable et extrêmement rapide. Il est représenté schématiquement par la fig. 31. (On y a fait figurer, pour la

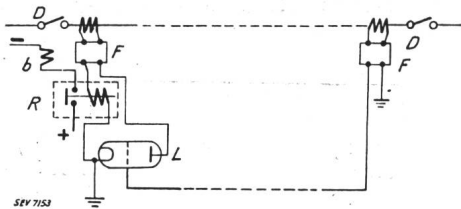


Fig. 31.

commodité de l'explication, un fil pilote qui, bien entendu, n'existe pas et est remplacé par les circuits d'émission et de réception d'ondes.)

$R$  représente un relais à maximum instantané actionnant la bobine de déclenchement  $b$  du disjoncteur  $D$ ,  $L$ , la lampe triode,  $F$ , des filtres.

On sait que dans une lampe triode, lorsque la grille est négative, le courant ne passe pas, même à plaque positive. La lampe est dite verrouillée par la grille. On couple donc les TI sur la lampe de façon que les alternances des f. e. m. des TI aux deux extrémités soient en opposition, autrement dit que la grille soit négative lorsque la plaque est positive.

En service normal, si les courants sont égaux aux deux extrémités, la lampe est verrouillée; de même,

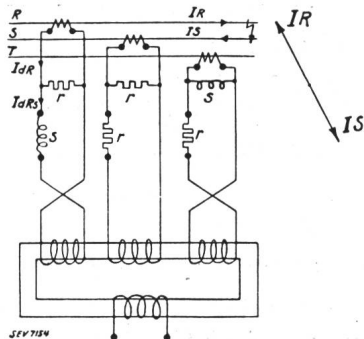


Fig. 32.

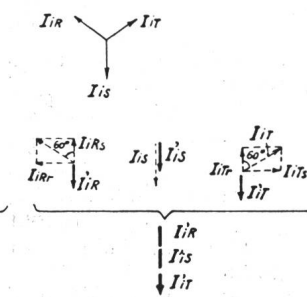
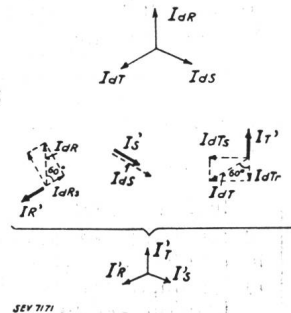


Fig. 33.

en cas de défaut extérieur au tronçon; pour un défaut interne par contre, la grille devient positive à plaque positive, un courant discontinu traverse la lampe, le relais  $R$  est actionné et déclenche instantanément.

Il semble au premier abord que les filtres soient superflus. Ils sont toutefois nécessaires pour plusieurs raisons: 1° Les filtres servent à transformer le courant des TI en une tension de valeur convenable. 2° On ne dispose que d'un système de transmission unique pour les 3 phases. Si l'on travaillait directement avec le courant de la ou des phases malades, il faudrait au préalable commuter ce courant sur le système de transmission, ce qui est impraticable pour une protection ultra-rapide. 3° En service normal, les courants peuvent être inégaux et même de sens opposé aux deux extrémités, si le tronçon a, par exemple, une dérivation en cours de route; le système pourrait fonctionner, surtout à surcharge.

Il faut donc opérer avec une composante de courant qui apparaisse dans les 3 phases quelle que soit la phase atteinte et qui n'y apparaisse qu'en cas de défaut.

Or, soit un court-circuit entre phases, soit un court-circuit à la terre sont caractérisés par l'apparition d'un système triphasé de composantes inverses. Un court-circuit à la terre est caractérisé en outre par l'apparition d'un système triphasé de composantes homopolaires.

Le rôle des filtres est précisément de sélectionner l'une de ces composantes.

On pourrait prendre comme critère de la composante inverse sa fréquence qui est double de la fréquence normale; on réaliserait des circuits imperméables à la fréquence  $f$  et amplifiant la fréquence  $2f$ . Mais, on peut filtrer le système inverse d'une façon plus simple: on fait la somme des courants des TI des trois phases à l'aide d'un TI totalisateur, en inversant par croisement des connexions et en décalant convenablement par selfs et résistances deux des trois courants. Le couplage est représenté par la fig. 32. Par exemple, les courants  $I_R$  et  $I_S$  d'un court-circuit bipolaire  $RS$  se décomposent en un système direct  $I_{dR}$ ,  $I_{dS}$ ,  $I_{dT}$  et un système inverse  $I_{iR}$ ,  $I_{iS}$ ,  $I_{iT}$ . Le système direct est transformé par le filtre en un système symétrique  $I'_R$ ,  $I'_S$ ,  $I'_T$ , dont la somme est nulle (voir fig. 33); il ne produit pas de flux dans le TI totalisateur et, partant,

pas de tension aux bornes. Le filtre est imperméable au courant direct. Il ne fournit donc pas de tension en service normal.

Par contre, le système inverse, lui, est transformé en un système homopolaire  $I'_{iR}$ ,  $I'_{iS}$ ,  $I'_{iT}$ , dont la somme est égale à trois fois le courant de phase. Un flux se forme dans le TI totalisateur; une tension apparaît à son second.

Le système recueille donc ou filtre les courants inverses.

Sous cette forme, il ne filtre cependant pas le système homopolaire. Mais, comme un défaut à la terre est caractérisé également par l'apparition

d'un système inverse, ce filtre permet de saisir tout genre de défaut.

Si l'on ne désire, par contre, protéger le réseau que contre les mises à la terre à l'exclusion de tout autre défaut, on peut réaliser un filtre plus simple. Il suffit en effet de filtrer la composante homopolaire, c'est-à-dire de faire la somme des courants des trois TI, sans décalage, ni inversion; cette somme est nulle soit en service normal, soit en cas de court-circuit biphasé.

On peut d'ailleurs expliquer très simplement le fonctionnement d'un filtre sans faire appel à ces notions de composantes directes et inverses. Il suffit de dire: On fait la somme des courants des trois TI sur un TI totalisateur. Pour que cette somme ne soit pas nulle en cas de court-circuit biphasé, on inverse deux des trois courants. Pour que cette somme reste nulle en service normal malgré l'inversion, on décale convenablement les courants des deux phases inversées à l'aide de selfs et de résistances, de façon à rétablir au secondaire un système étoilé symétrique. — Si l'on ne veut protéger que contre les mises à la terre, on se contente de faire la somme des courants des trois phases sans inversion ni décalage.

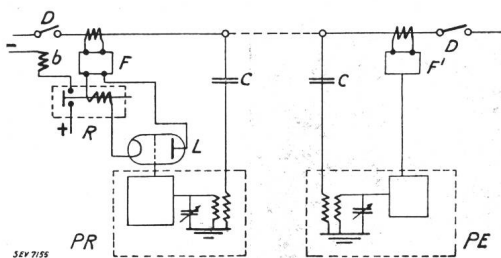


Fig. 34.

En service normal, le courant ne contient que la composante directe de fréquence  $f$ , que les filtres refoulent; la lampe n'est pas alimentée, même si les courants sont différents aux deux extrémités. En cas de défaut, les alternances des composantes inverses et homopolaires aux deux extrémités sont évidemment en phase pour défaut extérieur au tronçon (verrouillent la lampe) et en opposition de phase pour défaut interne (le courant s'établit).

Le fil pilote est en réalité remplacé, comme déjà dit, par les circuits d'émission et de réception de

la fig. 34 où  $PR$  désigne le récepteur à lampes,  $PE$  l'émetteur à lampes servant à moduler en  $HF$  les alternances  $BF$  des composantes inverse et homopolaire fournies par le Filtre  $F'$ .

Bien entendu, le matériel représenté dans la fig. 34 s'entend par disjoncteur. Le même appareillage est à prévoir pour le deuxième disjoncteur du tronçon. Appareils d'émission et de réception sont agencés sur un même panneau.

La protection par relais électronique semble appelée à une certaine extension dans la protection des lignes à haute tension, où son coût ne joue qu'un rôle secondaire comparé au coût de la ligne, et où il s'agit avant tout d'obtenir une protection rapide et sûre. Il a été déjà réalisé en France, entr'autres sur une ligne 220 kV.

Trois avantages sont à mentionner particulièrement: Le système n'exige pas de transformateurs de potentiel. En outre, il est *autonome*, c'est-à-dire qu'il fait bon ménage avec les autres systèmes de protection du réseau et ne demande pas à être coordonné avec eux. Enfin, son temps de fonctionnement est inférieur à  $1/10$  de seconde.

Il existe aussi, mise au point récemment, une protection par relais d'impédance rapide, à caractéristique étagée, dont le temps est très court, mais toutefois pour une partie du tronçon seulement. — Bien entendu, elle nécessite des transformateurs de potentiel.

Composée d'un assez grand nombre d'organes mobiles devant fonctionner quasi instantanément, elle exige en tous cas une facture impeccable — ce qui, il est vrai, n'est pas un obstacle pour la technique actuelle.

Quant aux courts tronçons de lignes ou de câbles, le fil pilote ne présente plus les inconvénients signalés. On appliquera donc avantageusement à ces tronçons la protection différentielle compensée. Spécialement pour les tronçons de câble très courts, insérés dans un réseau et pour lesquels la protection par relais d'impédance ne convient plus à cause de leur impédance trop faible, le relais compensé est un auxiliaire précieux, dont l'autonomie n'est pas la moindre qualité.

## Hochfrequenztechnik und Radiowesen — Haute fréquence et radiocommunications

### Neue Radio-Röhren der Saison 1938/39.

621.385.1

Die stete und konsequente Entwicklung der Radioröhren hat zu einer gewissen Stabilität geführt.

Der bisher eingeschlagene Weg der röhrentechnischen Entwicklung scheint der richtige zu sein, was sich durch gleichmässige und gute elektrische Eigenschaften und das Fehlen besonders markanter Mängel an Empfängeröhren durchaus bestätigt.

Somit tendiert die Neuentwicklung der kommenden Saison nach einer Erweiterung der bestehenden Serien, indem eine Steigerung der Betriebssicherheit und eine Verbesserung der elektrischen Eigenschaften angestrebt wird.

In konsequenter Weise wird

- a) die Weiterentwicklung der stromsparenden Kathode,
- b) eine Spezialisierung der Röhrentypen,
- c) die Anpassung an den rasch fortschreitenden Kurz- und Ultrakurzwellenempfang, an welchem nun auch seitens der Radiohörer in bezug auf Wiedergabe, Empfindlichkeit und Einfachheit in der Bedienung immer höhere Forderungen gestellt werden,

weiter verfolgt.

Die Röhrenbau-Programme der verschiedenen Röhrenfabriken weisen denn auch dieselben typischen Wege der Entwicklung zur Lösung der folgenden drei aktuellsten Probleme auf.