

Etude de la sécurité dans les réseaux électriques 500 V utilisés dans les travaux souterrains

G. DELAUW,

Ingénieur Electromécanicien A.I.Ms,
Ingénieur Divisionnaire à la S. A. des Charbonnages de Monceau-Fontaine.

SAMENVATTING

Het gebruik van de elektrische energie in de ondergrondse werken brengt drie gevaren mee : elektrocutie, ontvlaming van mijngas en brand. Een rationele studie van deze gevaren kan enkel gebaseerd zijn op de kennis van kwantitatieve gegevens, die dan ook in de eerste twee paragrafen worden verstrekt.

In de eerste paragraaf wordt melding gemaakt van de waarden die proefondervindelijk als gevaarlijk ervaren zijn.

In de tweede worden de karakteristieke grootheden berekend van de fouten die in een elektrisch net kunnen optreden, namelijk :

- een fase aan de aarde met oneindige isoleeringsweerstand op de andere twee fasen;
- een fase aan de aarde met een eindige isoleeringsweerstand op de andere fasen;
- de kortsluitingen.

Eenmaal deze rationele basis gelegd gaat men in de derde en vierde paragraaf over tot de bespreking van de beschermingssystemen, te weten :

- bescherming tegen aardstromen door isolatiecontrole door middel van wisselstroom met selectief terug inschakelen;
- bescherming door middel van tegengestelde stromen;
- homopolaire bescherming;
- bescherming door het injecteren van stroom op hoge frequentie;
- bescherming door ultra-snelle uitschakeling.

In de derde paragraaf wordt een beschrijving gegeven van het eerste type van bescherming aangenomen door de Charbonnages de Monceau-Fontaine sinds 1960, dat in de praktijk voldoening heeft gegeven.

In de vierde paragraaf worden de andere typen van beschermingen vergeleken met de bescher-

RESUME

L'utilisation de l'énergie électrique dans les travaux souterrains entraîne l'existence des trois dangers : électrocution, inflammation du grisou et incendie. L'étude rationnelle de ces dangers ne peut être basée que sur la considération de données quantitatives : elles font l'objet des deux premiers paragraphes.

Dans le premier de ces paragraphes sont rassemblées les valeurs dangereuses déterminées expérimentalement.

Dans le second sont calculées les grandeurs caractéristiques des défauts susceptibles de survenir dans un réseau électrique, à savoir :

- le défaut phase-terre avec isolement infini des deux autres phases,
- le défaut phase-terre avec isolement fini des autres phases,
- les courts-circuits.

Disposant alors d'une base rationnelle, on examine dans les 3ème et 4ème paragraphes les différents systèmes de protection qui sont :

- la protection de terre par contrôle d'isolement à courant continu à réenclenchement sélectif,
- la protection par courants inverses,
- la protection homopolaire,
- la protection par injection de courant à haute fréquence,
- la protection par déclencheurs ultra-rapides.

Dans le troisième paragraphe est décrit le premier type de protection, adopté dès 1960 aux Charbonnages de Monceau-Fontaine : l'expérience acquise est satisfaisante.

Dans le quatrième paragraphe, les autres types de protection sont comparés à la protection de

ming tegen aardstromen door isolatiecontrole op grond van

- de uitschakelingstijd;
- de aard van de ontdekte gebreken;
- de waarde van de weerstand der ontdekte gebreken.

Uit deze vergelijking blijkt duidelijk het voordeel van het aangenomen stelsel zowel uit oogpunt veiligheid als uit oogpunt bedrijfszekerheid. De andere systemen hebben echter ook een zekere waarde als aanvulling en dat is vooral het geval met de bescherming op hoge frekwentie. Door in elk onderstation een stelsel van bescherming door injectie van een hoogfrequentie stroom te installeren bekomt men :

- een vermindering van de kabelsectie;
- het neutraliseren van de werking der isolatiecontrole in geval van aardfout op een fase, hetgeen toelaat de dienst te voleinden.

Deze mogelijkheid, namelijk het neutraliseren van een isolatiecontroletoestel, biedt twee voordelen :

- een economisch voordeel omdat produktieverlies wordt uitgeschakeld (ongeveer vier miljoen per jaar voor de Charbonnages de Monceau-Fontaine);
- een voordeel op het gebied van de veiligheid omdat het afslaan van de spanning op een net in de mijn specifieke gevaren kan meebrengen (onderbreking van de secundaire luchtverversing).

In de vijfde paragraaf worden de volgende bijzondere punten behandeld :

1. de mogelijkheid om bij het optreden van een storting de onderbrekingstijd te verkorten door contactoren te gebruiken in de plaats van lastschakelaars.
2. Weerslag van het gebruik van de spanning van 1.000 V voor de voeding der machines in de werkplaatsen op de veiligheid.
3. Mogelijkheid om de conductantie van de aardgeleiders te verminderen.
4. Onderzoek van het gevaar dat eventueel zou ontstaan door het gebruik van een spanning van 100 V voor isolatiecontrole.

In de besluiten wordt onderstreept dat de veiligheid niet alleen afhangt van het gebruik van een uitgebreid beschermingssysteem, maar vooral van de aanwending van modern materiaal en het te werk stellen van personeel dat terzelfdertijd de nodige beroepskennis bezit en zijn taak gewetensvol vervult.

Als men rekening houdt met de thans bereikte graad van veiligheid en werkelijk nutteloze inspanningen wil vermijden, mag men overwegen het huidige reglement op het gebruik van de elektriciteit in de ondergrondse werken te verzachten vooral in de volgende punten :

terre par contrôle d'isolement sur la base :

- des temps de déclenchement,
- de la nature des défauts détectés,
- de la valeur des résistances des défauts détectés.

Cette comparaison montre les avantages de la protection adoptée, tant du point de vue sécurité que du point de vue continuité de l'exploitation. Les autres dispositifs présentent cependant un intérêt en tant que systèmes complémentaires, et c'est particulièrement le cas de la protection à haute fréquence. L'adoption dans chaque sous-station d'un dispositif de protection par injection à haute fréquence pourrait permettre :

- une diminution de la section des câbles,
- une élimination de l'action du contrôleur d'isolement en cas de défaut d'une phase à la terre, afin de terminer un poste.

Cette possibilité d'élimination du contrôleur d'isolement présente un double intérêt :

- un intérêt économique du fait du manque à gagner (environ quatre millions par an pour les Charbonnages de Monceau-Fontaine),
- un intérêt du point de vue sécurité car la mise hors tension d'un réseau peut entraîner l'apparition de dangers spécifiquement miniers (arrêt de la ventilation secondaire...).

Le cinquième paragraphe est consacré à l'analyse des quelques points particuliers suivants :

1. La possibilité de réduire le temps de coupure total d'un défaut par l'utilisation de contacteurs, en lieu et place de disjoncteurs.
2. La répercussion sur la sécurité de l'utilisation de la tension de 1.000 V pour l'alimentation des engins de chantiers.
3. La possibilité de réduire la conductance du conducteur des masses.
4. L'examen du danger éventuellement introduit par l'utilisation d'une tension de mesure de 100 V pour le contrôle de l'isolement.

Dans les conclusions, on insiste sur le fait que la sécurité ne résultera pas seulement de l'adoption d'un ensemble complexe de protections, mais dépendra surtout de l'utilisation d'un matériel moderne et de l'emploi d'une main-d'œuvre alliant à une grande compétence une haute conscience professionnelle.

Compte tenu du niveau de sécurité actuellement atteint, et si on ne veut pas tendre vers l'inutile, il est proposé d'alléger le règlement actuel de l'emploi de l'électricité dans les travaux souterrains et en particulier :

- men zou het gebruik van materiaal met versterkte veiligheid moeten toelaten;
- men zou de voorschriften betreffende de mijn-gasveilige dichtingen zodanig moeten versoepelen dat ook materiaal van buitenlandse oorsprong kan gebruikt worden;
- men zou een hoger mijngasgehalte moeten toelaten op de plaatsen waar elektrische toestellen gebruikt worden.

INHALTSANGABE

Die Elektrifizierung des Untertagebetriebs bringt drei Gefahren mit sich : Unfälle durch elektrische Schläge und Auslösung von Schlagwetterexplosionen oder Bränden. Eine gründliche Betrachtung dieser Gefahren muss sich auf Zahlenwerte stützen, deren Ermittlung Gegenstand der beiden ersten Abschnitte des Aufsatzes ist.

Im ersten werden experimentell bestimmte Gefahrenwerte zusammengestellt, im zweiten die Kennwerte der Fehler berechnet, die untermite im elektrischen Netz auftreten können, nämlich :

- Erdschlussfehler zwischen einer Phase und der Erde bei vollständiger Isolation der beiden anderen Phasen,
- Erdschlussfehler zwischen einer Phase und der Erde bei unvollständiger Isolation der beiden anderen Phasen,
- Kurzschlüsse.

Von dieser Grundlage ausgehend, werden dann in den Abschnitten 3 und 4 die verschiedenen Schutzsysteme behandelt :

- Erdschlussschutz durch Ueberwachung der Isolation mit Hilfe von Gleichstrom und selektiver Wiedereinschaltung,
- Schutz durch gegeneinander versetzte Ströme,
- homopolarer Schutz,
- Schutz durch überlagerten Hochfrequenzstrom,
- Schutz durch überschnelle Abschalter.

Im dritten Abschnitt wird das erste dieser Schutzverfahren beschrieben, das 1960 bei der Bergwerksgesellschaft Monceau-Fontaine eingeführt worden ist und sich bewährt hat.

Im vierten Abschnitt werden die anderen Schutzarten mit dem Erdschlussschutz durch Isolationsüberwachung verglichen, und zwar im Hinblick auf die Abschaltzeit, die Art der entdeckten Fehler und ihren Widerstandswert.

Dieser Vergleich weist die Vorteile des in Monceau-Fontaine eingeführten Systems unter dem doppelten Gesichtspunkt der Sicherheit und der Weiterführung des Betriebes nach. Die anderen Systeme können allerdings als Ergänzung von Wert sein; dies gilt vor allem für den Schutz durch überlagerte Hochfrequenz. Der Einbau einer Vorrichtung zum Schutz durch Hochfre-

- admettre l'utilisation du matériel de sécurité renforcée,
- alléger les prescriptions relatives aux joints antidéflagrants, afin de permettre l'utilisation du matériel construit suivant les normes étrangères,
- tolérer une augmentation de la teneur limite admissibles de grisou dans les endroits où sont installés des engins électriques.

SUMMARY

The use of electric power in underground works leads to three dangers : electrocution, ignition of firedamp and fires. The rational study of these dangers can only be based on the consideration of quantitative data : these are the subject of the first two paragraphs.

The first of these paragraphs gives a list of the danger limits determined experimentally.

The second calculates the characteristic importance of faults likely to occur in an electric system, namely :

- phase-earth fault with infinite insulation of the other two phases,
- phase-earth fault with finite insulation of the other phases,
- short circuits.

Thenceforth, on this rational basis, the 3rd and 4th paragraphs examine the various systems of protection, which are as follows :

- protection of the earth by insulation control with direct current and selective re-switching,
- protection by inverse currents,
- homopolar protection,
- protection by injection of high frequency current,
- protection by ultra-swift switching-off.

The third paragraph describes the first type of protection, adopted as early as 1960 in the Monceau-Fontaine Collieries; the experience gained is satisfactory.

The fourth paragraph compares the other types of protection with the system of earth protection by insulation control at the base :

- times of switching off,
- nature of faults detected,
- value of the resistances of the faults detected.

This comparison shows the advantages of the protection adopted, both from the point of view of safety and from the point of view of working

quenzstrom in jeden Netzabschnitt könnte die Möglichkeit bieten, den Querschnitt der Kabel zu verringern und die Isolationsüberwachung bei Erdschluss einer Phase nicht in Tätigkeit treten zu lassen, so dass die Arbeitsschicht zu Ende geführt werden kann. Diese Möglichkeit einer Ausschaltung der Isolationsüberwachung erscheint in zweifacher Hinsicht von Vorteil :

- wirtschaftlich gesehen, wegen der Einschränkung von Verlusten durch Betriebsausfälle, die sich in Monceau-Fontaine auf etwa 4 Millionen sfrs. jährlich belaufen,
- im Hinblick auf die Grubensicherheit, da die Abschaltung des ganzen Netzes im Bergbaubetrieb Gefahren eigener Art nach sich ziehen kann, beispielsweise die Unterbrechung der Sonderbewetterung.

Im fünften Abschnitt werden einige besondere Punkte behandelt :

1. die Möglichkeit einer beschleunigten Abschaltung eines Fehlers durch Verwendung von Schützen anstelle von Schaltern,
2. die Auswirkungen eines Uebergangs zur Spannung von 1.000 V für Maschinen vor Ort auf die Grubensicherheit,
3. die Möglichkeit einer Herabsetzung des Leitwertes der Masse,
4. die Prüfung der Gefahren, die eine Messspannung von 100 V für die Kontrolle der Isolation unter Umständen nach sich ziehen könnte.

In den Schlussfolgerungen wird besonders betont, dass die Sicherheit nicht nur von der Einführung eines verwickelten Schutzsystems abhängt, sondern vor allem von der Verwendung eines modernen Materials und von der Sachkunde und Gewissenhaftigkeit der Belegschaft.

Unter richtiger Würdigung des gegenwärtigen Standes der Sicherheit und in der Einsicht, dass man nicht nutzlosen Dingen nachjagen sollte, wird vorgeschlagen, die gegenwärtigen Bestimmungen über die Verwendung elektrischen Stroms im Untertagebetrieb zu erleichtern, und zwar vor allem in drei Punkten :

1. Zulassung von Geräten in Schutzart « erhöhte Sicherheit »,
2. Lockerung der Bestimmungen über die für Schlagwetterschutz vorgeschriebenen Auflageflächen, so dass auch nach ausländischen Normen gebautes Material Verwendung finden kann,
3. Heraufsetzung des zulässigen Gasgehaltes an Betriebspunkten, wo elektrische Maschinen arbeiten.

continuity. The other devices however are interesting as complementary systems, and this is particularly so in the case of high frequency protection. The adoption of a high frequency protection device in each sub-station would make it possible to :

- reduce the thickness of the cables,
- eliminate the action of the insulation control in the case of a defect of a phase in the earth, in order to complete a shift.

This possible elimination of the insulation control has a twofold advantage :

- an economic advantage, due to the suppression of loss of working hours (about four million francs per year at the Monceau-Fontaine Collieries),
- an advantage from the point of view of safety, for a breakdown in the electricity system may involve specific mining dangers (breakdown of auxiliary ventilation).

The fifth paragraph is devoted to the analysis of the following points :

- 1) The possibility of reducing the time of total switching off for a defect by using contactors in the place of break switches.
- 2) The repercussion on safety of a tension of 1,000 V to feed the machinery in the working places.
- 3) The possibility of reducing the conductance of the conductor of the masses.
- 4) The examination of any danger that may be introduced by the use of a tension of 100 V for the insulation control.

In the conclusions, emphasis is laid on the fact that safety will not result solely from the adoption of a complex system of protections, but will depend above all upon the use of modern materials and the employment of highly skilled men of high professional integrity.

Taking into account the level of security reached at present, and in order not to indulge in useless precautions, it is proposed to relax the present regulations for the use of electricity in underground workings and notably :

- to allow the use of reinforced safety material,
- to relax the rules concerning anti-deflagrating joints, so as to allow the use of material constructed according to foreign standards,
- to tolerate the increase of the quantity of methane allowed in places where electric machinery is installed.

Le choix rationnel d'un système de protection pour les réseaux électriques des travaux souterrains ne peut résulter que de l'analyse des trois points suivants :

1) La définition des objectifs à atteindre, qui peut s'identifier à la détermination *quantitative* des grandeurs physiques présentant un certain danger.

2) La détermination des valeurs caractéristiques des défauts survenant sur les installations électriques, ce qui, par comparaison avec le premier point, doit permettre de définir les conditions à respecter pour qu'un réseau électrique ne présente aucun danger.

3) L'examen de l'aptitude des différents types de protection disponibles à satisfaire les conditions trouvées au point précédent.

L'ensemble de ces trois points doit permettre l'adoption du ou des systèmes de protection les plus aptes à assurer un niveau maximum de sécurité sans aller au-delà de l'utile.

Les trois points précédents feront respectivement l'objet des paragraphes 1, 2, 3 et 4.

Pour rendre l'exposé plus clair, nous nous sommes écartés légèrement du plan esquissé ci-avant en ce sens que l'on a d'abord décrit le système de protection choisi, avant de le comparer aux autres systèmes de protection.

1. LA DETERMINATION DES VALEURS LIMITES INFERIEURES PRESENTANT UN DANGER

Si d'une part, l'utilisation de l'énergie électrique dans les travaux souterrains entraîne l'existence des trois dangers : électrocution, inflammation du grisou et incendie, il est d'autre part évident qu'un défaut survenant sur une installation électrique n'est susceptible d'entraîner un accident humain ou matériel que s'il provoque le dépassement de certaines valeurs limites inférieures. L'objet de ce premier paragraphe est de rassembler les données éparses qui ont été définies expérimentalement et qui nous sont connues.

11. Le danger d'électrocution.

Les effets physiologiques du courant alternatif à la fréquence industrielle de 50 Hz, dépendent :

- du chemin suivi par le courant traversant le corps humain,
- de l'intensité de ce courant,
- de la durée de passage de ce courant.

Le cas le plus défavorable est celui où le passage du courant s'effectue entre les deux mains. Les valeurs indiquées ci-après se rapportent à ce cas.

Les courants d'une intensité inférieure ou égale à 1 mA sont inoffensifs et le plus souvent imperceptibles. A partir d'intensités dépassant 8 mA, on constate parfois l'existence de contractions musculaires qui ne permettent plus à l'individu de se dégager. A partir d'une intensité de l'ordre de 25 mA, la mort peut survenir par arrêt du cœur ou par asphyxie sous la condition que le passage du courant dure un certain temps. Il est, en effet, reconnu que la durée de passage joue un rôle fondamental dans le phénomène d'électrocution. Un nombre élevé d'expériences [1, 2, 3, 4] (*) a permis d'établir la loi, représentée par la figure 1, qui lie l'intensité minimum, entraînant dans 0,5 % des cas un début de troubles cardiaques, à la durée de passage du courant.

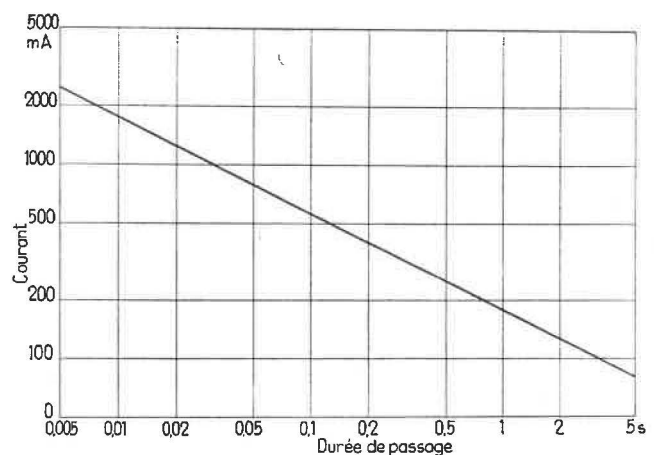


Fig. 1. — Loi de l'intensité maximum en fonction de la durée de passage du courant entraînant dans 0,5 % des cas un début de troubles cardiaques.

Dans la majorité des cas, les caractéristiques de l'installation électrique et de l'incident technique imposent à l'électrocuté une tension déterminée. Il est donc nécessaire de connaître la résistance du corps humain pour définir le danger d'électrocution. Cette résistance est une fonction décroissante de la tension. On peut admettre qu'à 500 V, cette résistance est comprise entre 800 et 2.000 ohms. Pour une tension de 100 V, ces limites deviennent 1.500 et 5.000 ohms. On doit également insister sur le fait que le danger d'électrocution par contact direct n'est pas négligeable (1). Bien que les conséquences de l'accident soient généralement moins spectaculaires que celles résultant d'un accident collectif par contact indirect, la probabilité d'électrocution par contact direct est beaucoup plus élevée.

(*) Les indications entre [] renvoient à la bibliographie reprise à la fin de l'article.

(1) Électrocution par contact direct signifie que l'électrocuté a touché une pièce soumise normalement à la tension du réseau; l'électrocution par contact indirect ne survient que lorsque l'électrocuté touche une pièce accidentellement sous tension et normalement connectée au réseau des masses.

12. Le danger d'inflammation du grisou.

Il est nécessaire, pour enflammer un mélange d'air et de grisou, de lui communiquer un minimum d'énergie pendant un certain temps. Tout dépassement de cette valeur minimum de l'énergie, provoqué par un défaut dans une installation électrique, doit être considéré comme dangereux, là où un afflux de grisou est à craindre.

La détermination des valeurs minima a fait l'objet de nombreuses recherches rendues nécessaires pour la réalisation des circuits de sécurité intrinsèque [5, 6, 7, 8]. Pour les circuits 500 V utilisés dans les travaux souterrains, le danger résulte de l'une ou l'autre des causes schématisées aux figures 2 et 3. Sur ces figures, on a également représenté les valeurs des grandeurs physiques provoquant l'inflammation du grisou.

De ces courbes, on peut tirer les valeurs intéressantes suivantes. Dans un réseau à 500 V, dont la

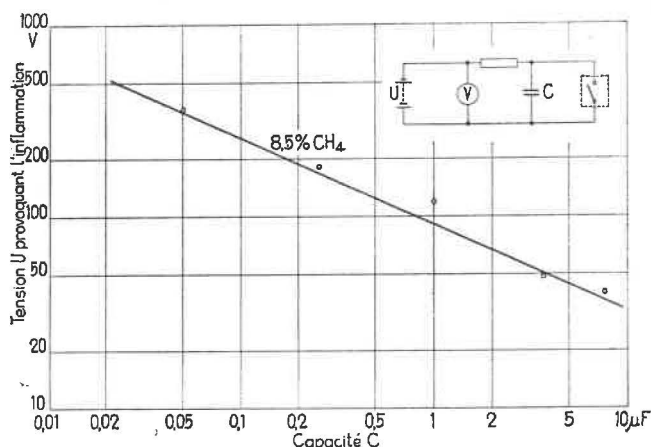


Fig. 2. — Tension provoquant l'inflammation en fonction de la capacité en cas de court-circuit franc de la capacité.

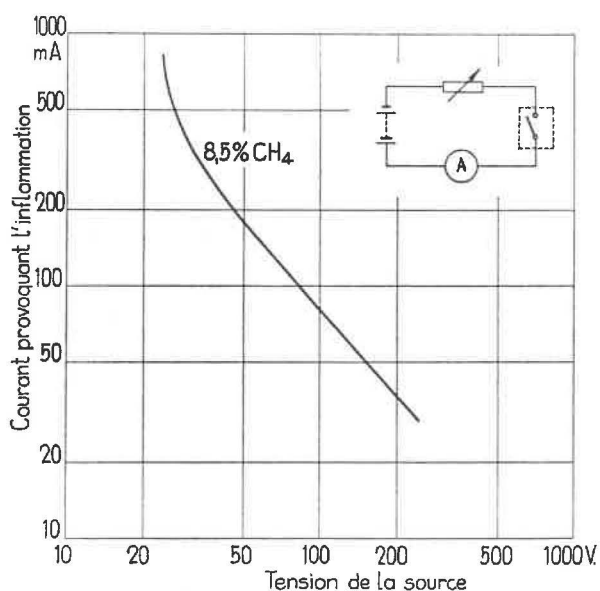


Fig. 3. — Courant provoquant l'inflammation en fonction de la tension de la source pour circuits dont la self est négligeable.

capacité par rapport à la terre est toujours supérieure à 0,02 μF (fig. 2), un défaut de terre est toujours susceptible de provoquer une inflammation du grisou. Pour des tensions de l'ordre de 100 V, utilisées dans les modèles les plus récents de contrôleurs d'isolement, la capacité phase terre ne doit pas dépasser 0,7 μF . Après le temps extrêmement court de décharge du condensateur C — quelques ms — ce danger est écarté, mais il est remplacé par celui schématisé à la figure 3. On notera que, pour une tension d'alimentation U de 500 V, le courant doit être limité à 15 mA.

Pratiquement, l'existence de diverses résistances, telles que les résistances d'isolement, les résistances des conducteurs, la résistance du défaut, conduit à considérer pour la capacité C , des valeurs plus élevées que celles indiquées à la figure 2. Le schéma corrigé et les courbes correspondantes sont indiquées à la figure 4.

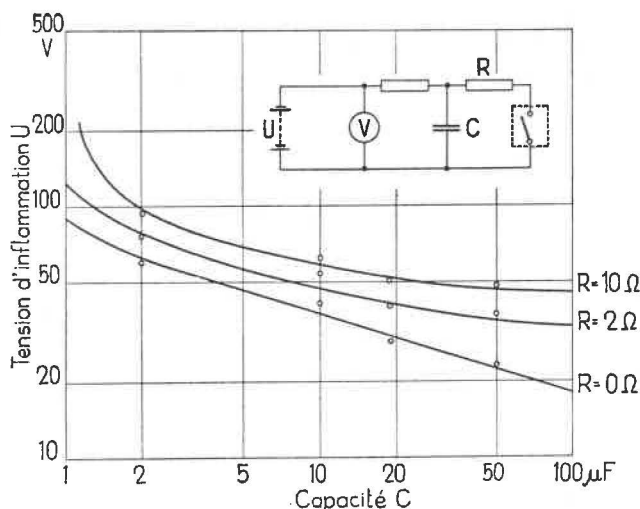


Fig. 4. — Tension U provoquant l'inflammation en fonction de la capacité en cas de court-circuit résistif de la capacité.

En ce qui concerne l'influence de la durée du dégagement calorifique, on sait que la combustion d'un mélange grisouteux n'a lieu qu'avec un certain délai, après la mise en contact avec une source chaude ayant la température d'inflammation. Ce délai peut atteindre plusieurs secondes, mais diminue rapidement lorsque la température d'allumage s'élève, pour devenir de l'ordre de 1 milliseconde à la température de 1000° C. On peut donc admettre qu'en cas d'arcs importants, le délai à l'inflammation est de l'ordre de la milliseconde.

13. Le danger d'incendie.

Si l'obtention des sécurités antigrisouteuses et d'électrocution a été, pendant de nombreuses années, le souci dominant, il est apparu que l'incendie d'origine électrique présente au fond un danger beaucoup plus grave. Le danger d'incen-

die est évidemment lié à la puissance calorifique dissipée dans le défaut, mais également à la nature des corps combustibles soumis à l'action calorifique.

Du point de vue de la nature des corps combustibles, il suffit de se limiter aux quatre types suivants :

- les matières combustibles analogues au bois,
- les poussières de charbon mélangées ou non à un fluide combustible,
- les fluides inflammables (huiles minérales, émulsion eau et huile, ...),
- les fluides difficilement inflammables (esters phosphatés...).

On a établi, en Allemagne, qu'un arc de court-circuit était incapable d'allumer des matières combustibles analogues au bois de soutènement, s'il dure moins d'une seconde.

Tous ceux qui ont assisté à des essais de combustion de mélanges d'huile et de poussières de charbon ont constaté que ces mélanges sont difficiles à enflammer. Avec de tels mélanges il paraît invraisemblable d'obtenir une combustion lors de la production d'un arc électrique, à condition que cet arc ne subsiste pas plus de 0,2 seconde.

L'inflammation des huiles minérales par des arcs électriques a été étudiée d'une manière approfondie [9]. M. Leclercq a montré que des jets d'huile pulvérisée, projetés sur des arcs électriques provoqués à l'air libre, s'enflammaient au bout de quelques millisecondes. Quand le déclenchement du disjoncteur n'est pas retardé, la projection d'huile, après déclenchement, n'entraîne pas d'inflammation. Nous ne pensons pas que l'emploi d'un contrôleur d'isolement monté en déclencheur change les conclusions de l'étude de M. Leclercq. Aucun essai de ce genre n'ayant été réalisé, on ne peut tirer de conclusions formelles mais, vu le délai de déclenchement propre au contrôleur d'isolement et le faible temps séparant le début de l'impact mécanique sur le câble et la formation du court-circuit, on peut avancer que l'emploi d'un contrôleur d'isolement ne modifierait pas la nature des conclusions précédentes.

L'utilisation de fluides difficilement inflammables diminue très sensiblement le risque. Les quelques essais effectués, malheureusement trop peu nombreux, ont montré les difficultés d'inflammation [voir photo dans 10]. Alors que dans les essais de M. Leclercq, les temps totaux de coupure du disjoncteur étaient de l'ordre de 100 millisecondes, il y aurait tout intérêt à poursuivre ces essais en réduisant le temps total de coupure à quelques dizaines de millisecondes. Pour certains essais, on devrait cependant majorer les intensités du courant.

Dans ce qui précède, on a examiné le danger d'incendie sous un aspect que l'on pourrait quali-

fier « d'instantané ». Il reste à définir quelle est la valeur minimum de l'énergie que l'on peut laisser subsister en permanence dans un défaut sans qu'il existe un danger d'incendie. Aucune publication n'a actuellement signalé l'existence d'études expérimentales à ce sujet. Une telle étude pourrait d'ailleurs s'inspirer des principes utilisés dans l'étude des circuits de sécurité intrinsèque. Ce danger peut sembler faible, mais comme le fait remarquer M. Bihl, « un allume-cigare n'absorbe qu'une puissance de 20 Watts » [11].

2. ETUDE DES DEFAUTS SURVENANT DANS LES INSTALLATIONS ELECTRIQUES

Un réseau triphasé théorique, à neutre isolé, peut être représenté par le schéma de la figure 5a. Chaque conducteur du réseau présente, par rapport à la terre, une capacité répartie que l'on peut schématiser par une capacité ponctuelle vu les faibles longueurs de câbles rencontrées dans les réseaux du fond à 500 V (fig. 5b). Du point de vue calcul, on démontre qu'en cas de défaut de terre survenant sur une phase, il est équivalent de remplacer les trois capacités C par une capacité $C_T = 3C$ connectée entre le point neutre du transformateur et la terre (fig. 5c) (2).

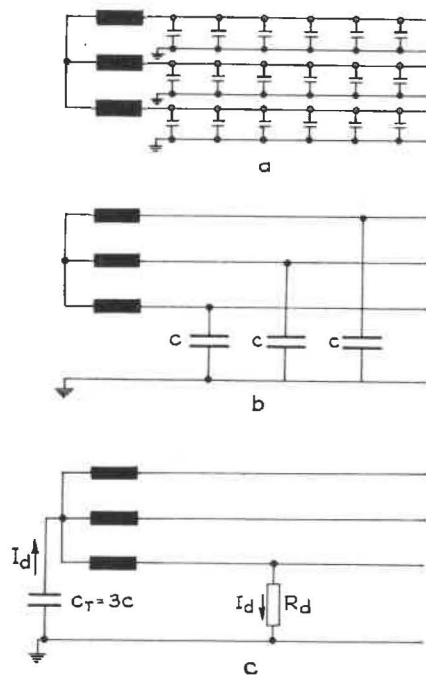


Fig. 5. — Représentation schématique d'un réseau électrique.

Pour les câbles en usage au fond, les valeurs de la capacité C sont les suivantes :

- $0,3 \mu\text{F}/\text{km}$ pour un câble armé de 3×95^2 , isolé au papier imprégné,

(2) Cette représentation n'est valable que dans le cas où une seule phase présente un défaut à la terre.

- 0,6 $\mu\text{F}/\text{km}$ pour un câble de 3×95^2 , isolé au caoutchouc,
- 1,2 $\mu\text{F}/\text{km}$ pour un câble souple de 3×50^2 , avec tresses métalliques individuelles.

Pratiquement, la capacité totale C_T des réseaux 500 V utilisés dans les travaux souterrains est comprise entre 1 et 10 μF .

21. Etude d'un défaut d'isolement sur une phase.

Dans un tel défaut, les éléments caractéristiques à déterminer sont :

- la valeur du courant dans le défaut,
- la valeur de l'énergie dissipée dans le défaut.

211. Valeur du courant dans un défaut phase-terre, l'isolement des deux autres phases étant infini.

Les valeurs du courant traversant un défaut phase-terre sont indiquées à la figure 6.

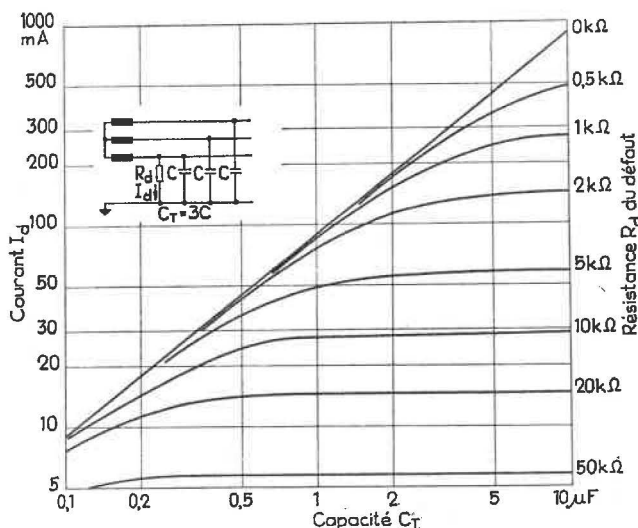


Fig. 6. — Courant de défaut I_d en fonction de la résistance du défaut R_d et de la capacité C_T .

Si l'on tient compte du fait que les réseaux du fond présentent toujours une capacité totale C_T supérieure à 1 μF , on notera qu'aucune sécurité électrocution n'est possible lors d'un contact d'un homme avec une phase nue. Pour assurer la sécurité contre l'inflammation du grisou, la limite maximum de 15 mA impose de maintenir l'isolement au-dessus de 20.000 ohms.

212. Valeur du courant dans un défaut phase-terre, l'isolement des deux autres phases n'étant plus infini.

Il est intéressant de connaître quelle est l'influence du niveau d'isolement des deux autres

phases sur le courant parcourant la phase initialement à la terre. Le schéma est alors celui donné à la figure 7. Pour les réseaux rencontrés en pratique dans les travaux souterrains, on constate que le courant de défaut I_d est pratiquement indépendant de la valeur de la résistance R d'isolement des deux autres phases lorsque la résistance R est supérieure à la résistance R_d . Pour $R = R_d$, il est évident que le courant est indépendant de la capacité du réseau. Lorsque la résistance d'isolement R est inférieure à la résistance R_d , le courant I_d est plus grand que dans le cas où l'isolement des deux autres phases est infini. Ce dernier cas ne doit évidemment pas être considéré, car il ne présente aucun intérêt lors de l'utilisation d'un contrôleur d'isolement et ce, même dans le cas de l'électrocution par contact direct.

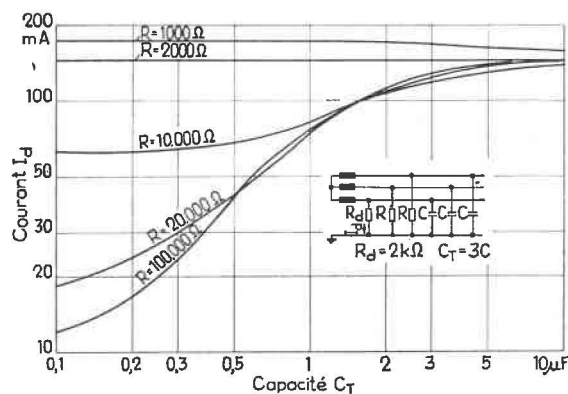


Fig. 7. — Influence de l'isolement de deux phases sur le courant traversant le défaut d'isolement de la troisième phase.

213. Valeur de la puissance dissipée dans un défaut de terre.

La puissance P_d dissipée dans un défaut phase-terre de résistance R_d est évidemment donnée par la formule :

$$P_d = R_d \times I_d^2$$

Cette puissance, nulle dans les cas de défaut franc ($R_d = 0$) et d'isolement infini ($R_d = \infty$), passe par un maximum pour une valeur déterminée de R_d , fonction de la capacité totale C_T du réseau. La puissance maximum dissipée est d'ailleurs obtenue lorsque (fig. 5) :

$$R_d = \frac{1}{\omega C_T}$$

Nous avons déterminé, à la figure 8, la puissance P_d dissipée en fonction de la résistance de défaut R_d et pour différentes valeurs de la capacité C_T . On constate que, pour un réseau de grande étendue ($C_T = 10 \mu\text{F}$), la puissance dissipée peut excéder 100 W, ce qui pourrait présenter un certain danger. Lorsque la résistance du défaut

est supérieure à 10.000 ohms, la puissance est limitée à 10 W. Pour une résistance de 50.000 ohms, la puissance est inférieure à 2 W.

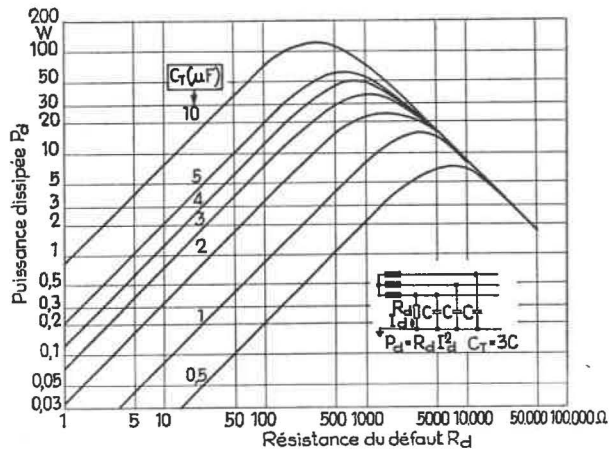


Fig. 8. — Puissance dissipée dans un défaut phase-terre.

22. Etude des courts-circuits violents.

Si, dans les paragraphes précédents, on a déterminé les valeurs caractéristiques des défauts admissibles sans que le réseau présente un danger déterminé, il est évident que les circonstances de l'accident technique provoquent parfois des défauts libérant des énergies dépassant de beaucoup les valeurs considérées comme dangereuses, et ce, pendant un temps très court dû à l'inertie des appareils de protection. Il est en effet possible d'obtenir, dans les réseaux du fond, des courts-circuits avec des intensités de l'ordre de 10 kA pendant quelques dizaines de millisecondes. De telles intensités sont d'ailleurs éliminées par les dispositifs classiques en moins de 0,05 seconde. Les arcs résultant d'un court-circuit plus ou moins impédant, sont parfois extrêmement violents, mais on ne doit pas surestimer leur danger et ce, pour les raisons suivantes :

- 1°/ Les arcs violents ne mettent en danger que la sécurité antigrisouteuse sous la condition de n'utiliser que des fluides difficilement combustibles.
- 2°/ Les courts-circuits entre phases n'entraînent pas toujours de manifestations extérieures. On admet, en effet, qu'un court-circuit entre phases [14] :

- s'il dure moins de 100 millisecondes, ne perce pas à l'extérieur des câbles (à condition que l'accident n'ait pas ouvert le câble);
- s'il dure moins de 0,5 seconde, ne perce pas un carter antidéflagrant en silumine;

— s'il dure moins de 6 secondes, ne perce pas un carter antidéflagrant en acier.

- 3°/ La fréquence des incidents survenant sur des câbles électriques et entraînant des blessures pouvant avoir pour conséquence des manifestations extérieures, est relativement faible. L'analyse statistique des accidents techniques dus au matériel électrique installé dans les travaux souterrains de la Société Anonyme des Charbonnages de Monceau-Fontaine montre que la fréquence des défauts de câbles à 500 V atteint environ 20 % du nombre total des défauts et que, de ces 20 %, moins de 25 % entraînent des blessures pouvant amener un arc à l'extérieur. Ce type d'incident présente une fréquence moyenne de 0,288 accident par an et par km de câble 500 V, ce qui est relativement faible.

- 4°/ L'utilisation généralisée dans les chantiers de câbles souples à écrans individuels (fig. 9) augmente le niveau de sécurité. L'existence d'écrans individuels permet à l'appareil de protection de saisir le court-circuit dès sa formation. Le type de câble adopté est à écrans métalliques. Cette construction semble présenter des avantages par rapport aux écrans en caoutchouc semi-conducteur. De plus, la symétrie du câble évite tout risque d'induction des conducteurs de masse.

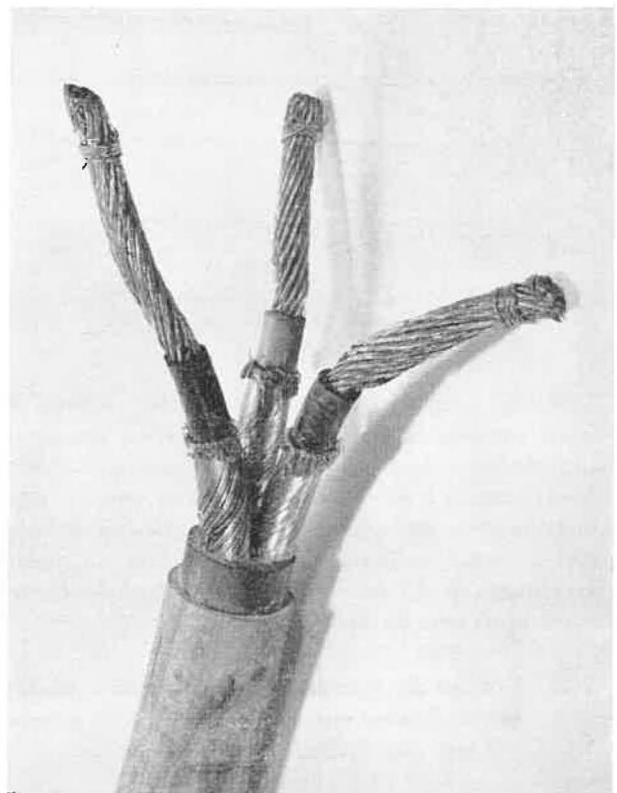


Fig. 9. — Câble souple à écrans individuels.

En conclusion, on peut actuellement penser que les courts-circuits entre phases ne mettent en danger que la sécurité antigrisouteuse, à condition de n'utiliser que des fluides difficilement inflammables et d'assurer la coupure du défaut en moins de 0,2 seconde. Encore faut-il que les deux événements court-circuit électrique et atmosphère à teneur explosive se produisent simultanément. Vu le temps de coupure des dispositifs de protection et les progrès réalisés dans la ventilation des travaux, on peut dire que la probabilité d'accidents est faible, sous les conditions que les protections fonctionnent correctement et que des teneurs anormales ne soient pas tolérées.

On doit en effet se persuader qu'il n'est malheureusement pas possible de réduire à zéro la probabilité d'accident. La suppression du risque n'est pas possible, comme l'a démontré avec beaucoup de force E. Borel [13]. « N'est-il pas possible de limiter notre activité de manière que la probabilité n'y joue aucun rôle ? Il est aisé de voir qu'une telle prétention mènerait tout droit à la folie ». Et si, du point de vue des protections électriques on réalisait un système extrêmement sensible, il est à craindre que l'on ne puisse localiser le défaut qu'en réenclenchant sur ce dernier, afin de « l'affranchir ».

3. LA PROTECTION DE TERRE PAR CONTRÔLE D'ISOLEMENT A COURANT CONTINU A REENCLANCHEMENT SELECTIF

Les premiers essais de ce système de protection ont débuté aux Charbonnages de Monceau-Fontaine, en 1960.

31. Principe de la protection de terre par contrôle d'isolement à courant continu.

Le principe du contrôle d'isolement à courant continu est illustré à la figure 10. Rappelons qu'il consiste à injecter, par une source auxiliaire S dans un neutre artificiel formé de trois impédances, un

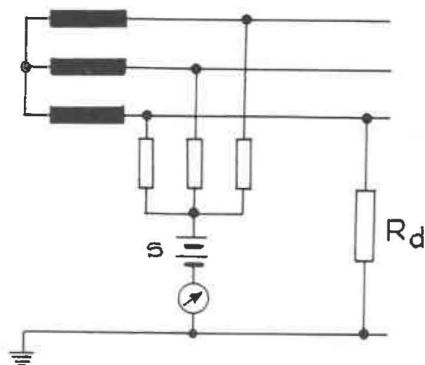


Fig. 10. — Principe de la protection par contrôle d'isolement à courant continu.

courant continu qui se referme par la terre à travers tout défaut éventuel R_d . La mesure de ce courant continu donne la valeur de l'isolement. A l'aide d'un dispositif détecteur sensible, on peut assurer une signalisation ou un déclenchement lorsque l'isolement du réseau descend en dessous d'une valeur prise comme valeur limite dangereuse.

32. Principe de la protection de terre par contrôle d'isolement à courant continu à réenclenchement sélectif.

Malgré le niveau élevé de sécurité, entraîné par l'utilisation d'un contrôleur d'isolement monté en déclencheur, de nombreux exploitants belges et étrangers lui reprochaient, avec pertinence, de mettre tout le réseau 500 V hors tension lorsqu'un défaut d'isolement survenait sur une antenne.

Ce déclenchement général entraînait les deux inconvénients suivants :

- 1°) Les utilisateurs non intéressés par le défaut ne pouvaient pas continuer à être alimentés.
- 2°) La localisation du tronçon défectueux exigeait un temps relativement élevé pouvant varier de quelques minutes à quelques heures.

C'est dans le but de pallier ces inconvénients que plusieurs constructeurs ont réalisé, tout en conservant les avantages du système de protection à courant continu, une protection sélective. Le principe adopté est illustré à la figure 11. Le transformateur T est suivi immédiatement d'un disjoncteur D à commande par servo-moteur

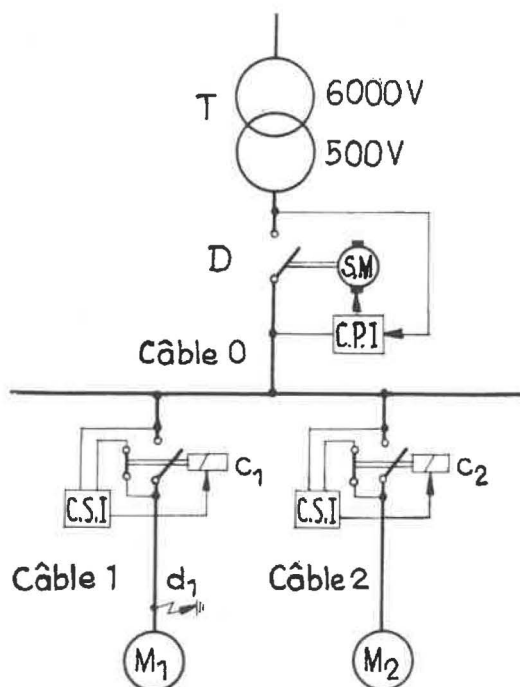


Fig. 11. — Principe de la protection par contrôle d'isolement à courant continu à réenclenchement sélectif.

(S.M.) commandé par un contrôleur principal d'isolement (C.P.I.) connecté en permanence en aval du réseau. Le disjoncteur D protège le câble O alimentant les différents coffrets de chantier équipés de contacteurs C_1 et C_2 . Ces contacteurs assurent respectivement la commande et la protection des moteurs M_1 et M_2 . Chaque contacteur est alimenté par un contrôleur d'isolement secondaire (C.S.I.) qui, lorsque le contacteur est ouvert, contrôle les phases du réseau situé en aval.

Supposons qu'un défaut d_1 survienne lorsque tous les moteurs sont en service. Les contacteurs étant fermés à cet instant, tous les C.S.I. sont déconnectés. Le contrôleur principal C.P.I. détecte le défaut d_1 et provoque l'ouverture du disjoncteur D et la mise hors tension de toute la partie aval du réseau. De ce fait, tous les contacteurs déclenchent et connectent par l'intermédiaire de leur contact auxiliaire, les différents C.S.I. Le défaut n'est donc plus détecté par le C.P.I. qui réenclenche automatiquement le disjoncteur D. Le contacteur C_2 pourra être réenclenché, tandis que le contacteur C_1 restera déclenché. Le défaut est donc automatiquement éliminé et localisé.

33. Description sommaire et caractéristiques du matériel utilisé.

331. Le contrôleur principal d'isolement C.P.I. (type dUR 1476 - T 2 - Siemens).

Le schéma du contrôleur principal est représenté à la figure 12.

Ce contrôleur comporte trois blocs repérés VEM, VEA et ZR.

Si, lors d'un défaut R_d , la tension apparaissant aux bornes de r_5 est supérieure à une valeur déterminée correspondant à un défaut d'isolement de 50 kOhms, le bloc VEM provoque l'alimentation d'une lampe de signalisation L_1 . Lorsque la résistance d'isolement descend en dessous d'une valeur réglable par la résistance r_2 entre 10 et 20 kOhms, le bloc VEA provoque, par l'intermédiaire du relais d, le déclenchement du disjoncteur de protection. Le bloc ZR est un relais électronique à temporisation qui permet de retarder de 0,9 à 5,3 secondes le réenclenchement du disjoncteur afin d'éviter une surcharge du servomoteur. La tension continue de mesure est de 100 V. Il était intéressant de choisir une tension assez élevée pour rendre inefficaces les résistances de contact et ainsi détecter avec certitude les défauts d'isolement. Suivant des essais effectués en Allemagne, cette condition ne serait pas toujours remplie lors de l'utilisation de tensions de mesure plus faibles.

Pour un défaut franc ($R_d = 0$), le courant de mesure est de 1 mA. Ce courant ne présente aucun danger d'incendie, d'électrocution ou d'inflammation de grisou.

Le seuil d'alarme choisi est de 50 kOhms, ce qui permet de ne pas considérer comme normal un courant de défaut de 8 mA, qui, comme on l'a vu au début de cette note, est la limite supérieure

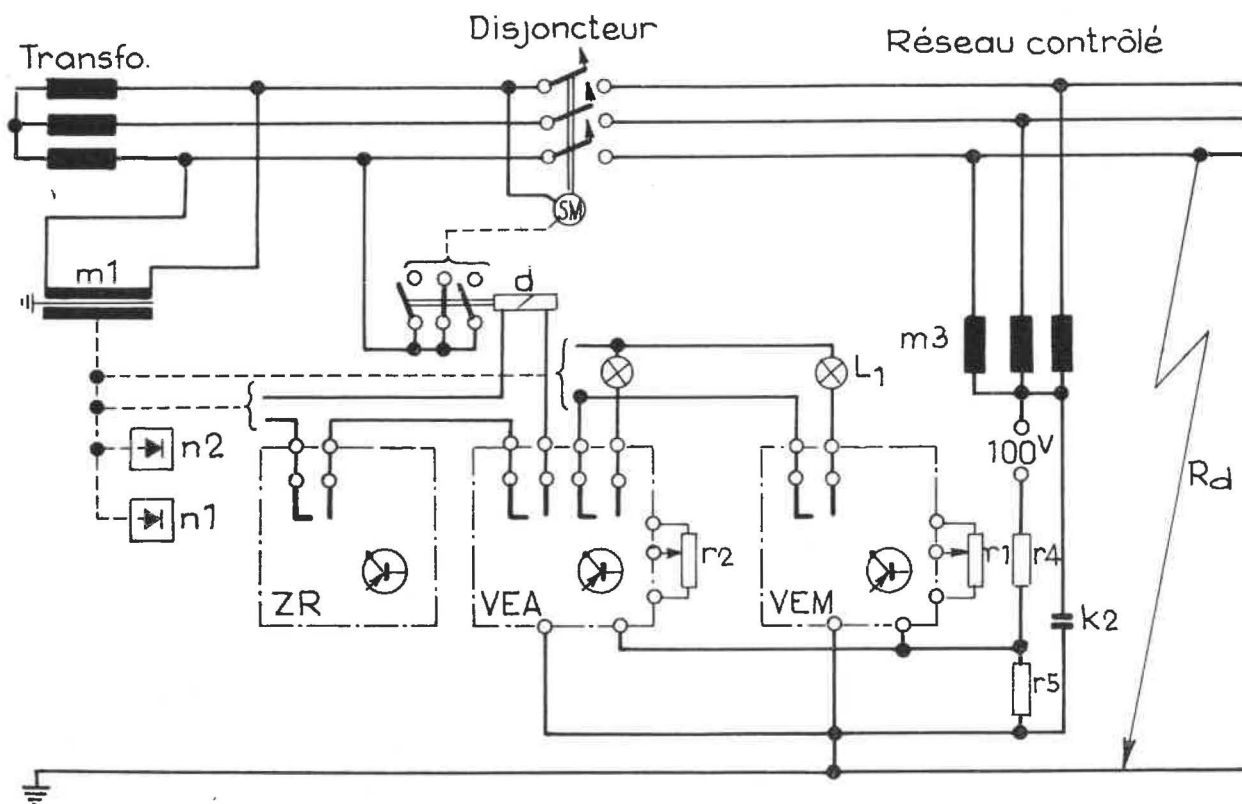


Fig. 12. — Schéma de principe du contrôleur principal.

n'entraînant pas d'action physiologique sur l'être humain.

Le seuil de déclenchement de 10 kOhms assure les sécurités électrocution et incendie. Il pourrait être porté à 20 kOhms pour assurer la sécurité grisou.

Le temps de déclenchement du contrôleur est de l'ordre de 150 millisecondes, ce qui permet d'obtenir la sécurité d'électrocution par contact direct (fig. 1 et 6).

Les blocs VEM, VEA et ZR sont du type débrochables et leur réalisation transistorisée est conçue de manière à ce que le dispositif de protection soit indépendant des fluctuations de tension et de température et assure une protection à *sécurité positive*.

Sur la figure 13 qui représente l'intérieur d'un contrôleur d'isolement, on aperçoit, à droite, les trois blocs VEM, VEA et ZR.

Les figures 14 a et b représentent le contrôleur monté sur le châssis d'une tranche de disjoncteur 400 A à commande par servo-moteur.

332. Les contrôleurs secondaires d'isolement C.S.I.

1^{er} type : Le bloc de sécurité totale RCD 2 (A.C.E.C.).

Le schéma de principe du bloc RCD 2 est représenté à la figure 15. Outre le contrôle de l'isolement, ce bloc permet de réaliser un certain nom-

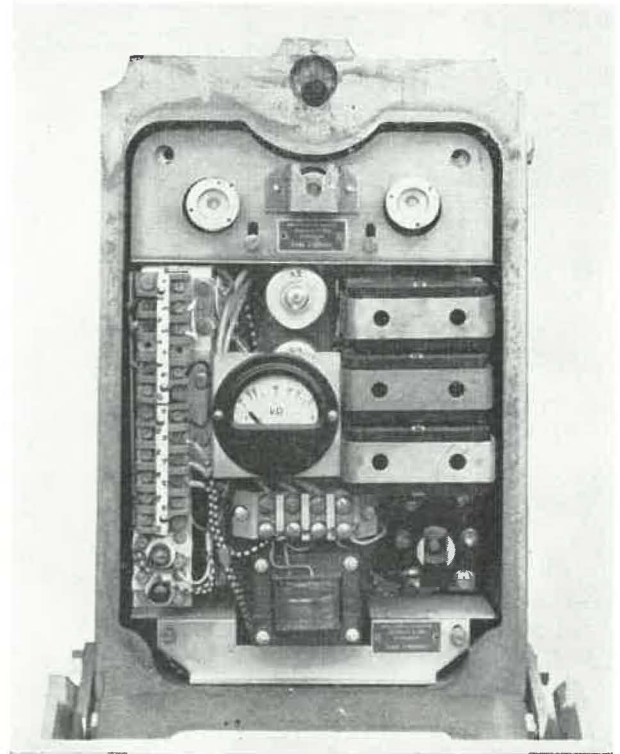


Fig. 13. — Intérieur d'un contrôleur d'isolement dUR 1476 T₂.

bre de schémas de commande relativement complexes tels que : commande d'une haveuse, commande séquentielle d'une série de transporteurs, commande automatique d'une pompe immergée... Ce résultat a pu être atteint en insérant, par application du principe de construction des circuits logiques, une série de relais, à savoir : un relais

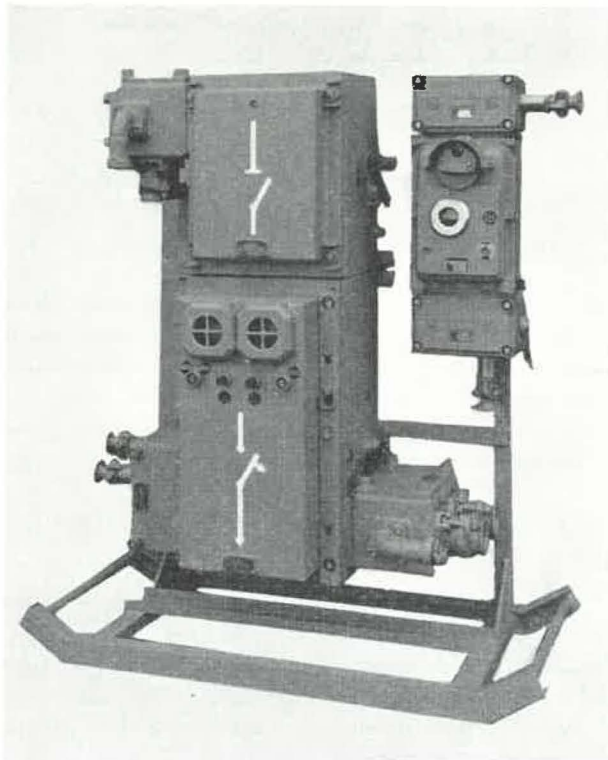


Fig. 14a. — Tranche de disjonction 400 A - 500 V à commande par servo-moteur.

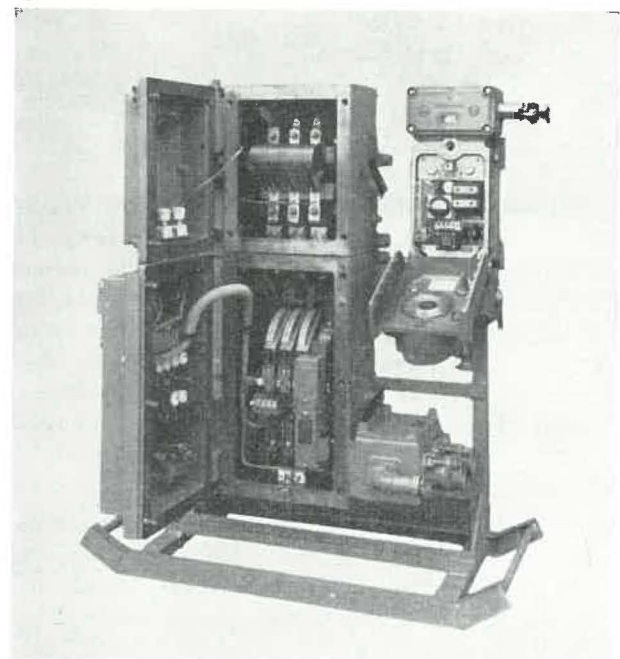


Fig. 14b. — Tranche de disjonction 400 A - 500 V à commande par servo-moteur.

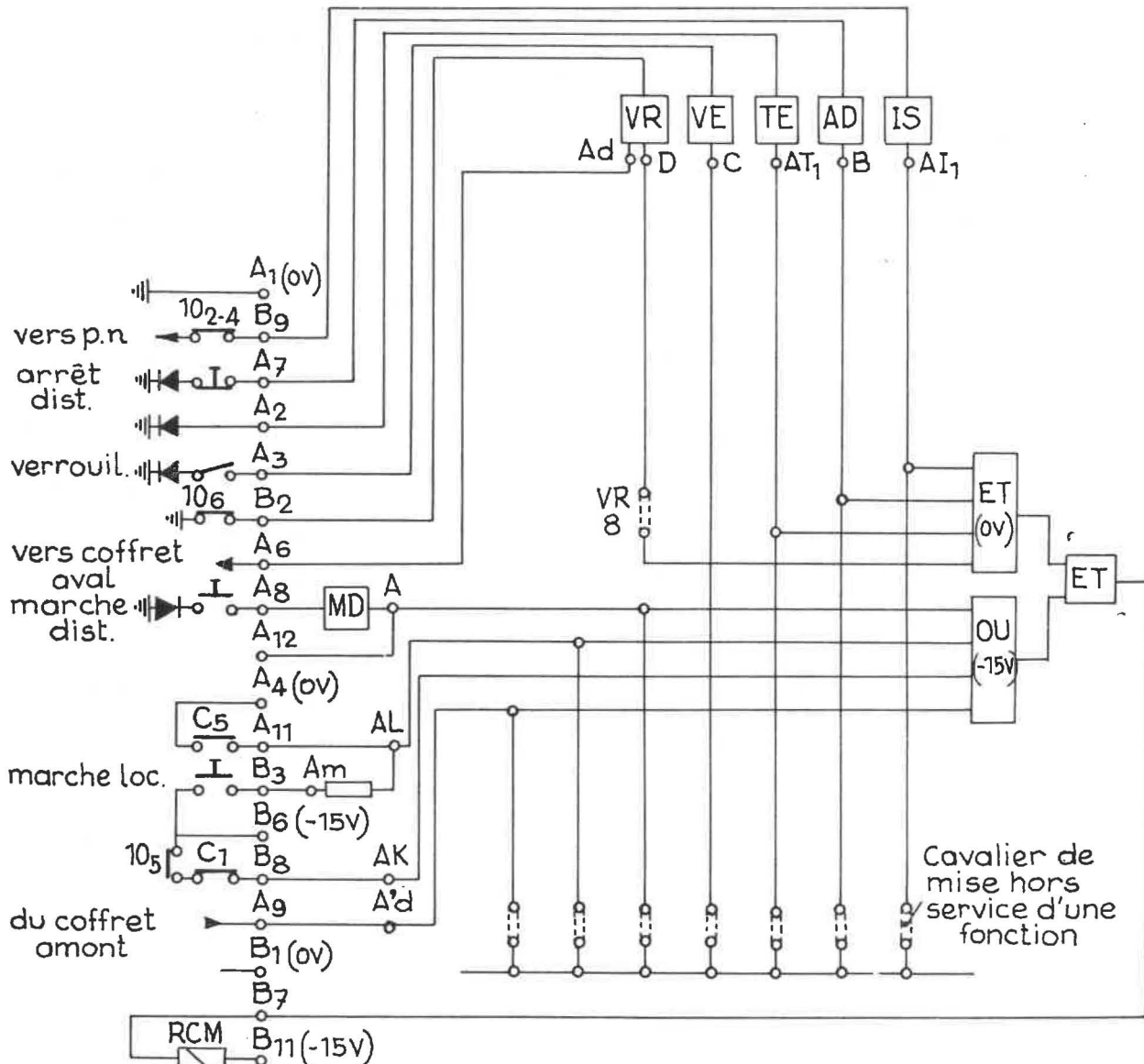


Fig. 15. — Schéma de principe du bloc de sécurité totale RCD₂ (A.C.E.C.). Les contacts 10 symbolisent les contacts du contacteur. Les contacts C symbolisent les contacts d'un commutateur auxiliaire permettant le choix entre 4 modes de fonctionnement.

temporisé VR, un relais de verrouillage VE, un relais de continuité du conducteur de terre TE, un relais d'arrêt à distance AD, un relais de contrôle d'isolement IS. Toutes les informations délivrées par ces différents relais sont appliquées aux entrées d'un élément logique constitué de deux relais ET et d'un relais OU. L'élément logique ne permet l'enclenchement ou le maintien du relais auxiliaire RCM que si toutes les conditions de sécurité et de commande sont remplies.

Pour le contrôle d'isolement, la tension de mesure est de 100 V et le relais d'isolement empêche tout réenclenchement si la résistance d'isolement est inférieure à une valeur choisie entre 20 et 100 kOhms.

L'ensemble (fig. 16) se présente sous forme d'un bloc enfichable composé d'éléments statiques

noyés dans un compound de protection à bas point de fusion. Cette réalisation permet, entre autres avantages, d'obtenir des circuits de sécurité intrinsèque. On aperçoit, sur la face avant, un cavalier de mise hors service d'une fonction. Les dimensions du bloc sont, en mm, de 280 x 94 x 215.

2^e type : Le relais de verrouillage R 1480 ES_p (Siemens).

Bien que de dimensions réduites, le bloc RCD 2 ne peut être incorporé dans les coffrets de chantier de faibles dimensions. Nous avons équipé ces coffrets de relais de verrouillage R 1480 ES_p (fig. 17). Les dimensions de ce bloc enfichable et transistorisé sont, en mm, de : 135 x 77 x 33.

Le circuit de mesure d'isolement de sécurité intrinsèque est alimenté à 50 V, car il ne contrôle



Fig. 16. — Bloc de sécurité totale RCD 2.

que le dernier tronçon du réseau. Le relais empêche tout réenclenchement lorsque l'isolement est inférieur à 50 kOhms.

La figure 18 montre un intérieur de coffret 60 A - 500 V équipé d'un relais de verrouillage.

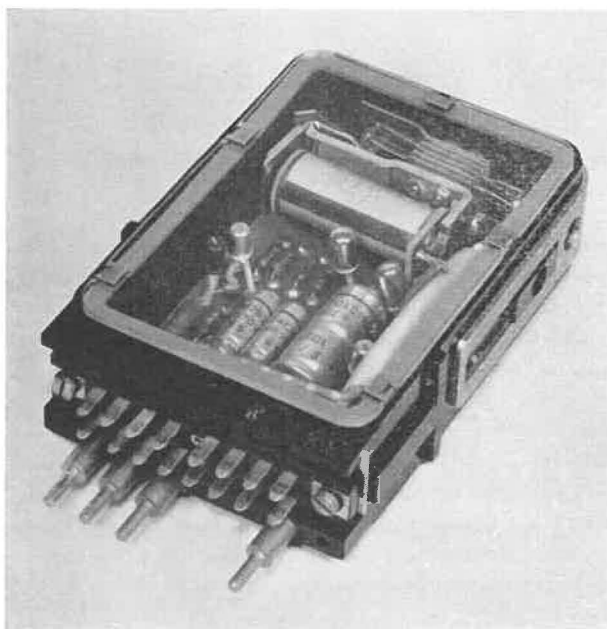


Fig. 17. — Relais de verrouillage R 1480 ES.

34. Expériences acquises lors de l'utilisation de la protection de terre.

Les premiers essais du système décrit ci-avant ont débuté aux Charbonnages de Monceau-Fontaine au commencement de 1960. L'expérience acquise est positive et nous n'avons plus constaté, sur des réseaux équipés, de manifestations extérieures telles que : destruction des câbles par effet thermique, percement d'un carter antidéflagrant.

Ces essais ont entraîné certaines difficultés résultant, soit du manque d'expérience du personnel quant à ce type de matériel, soit de déficiences technologiques. Certaines défaillances ont résulté des conditions exceptionnellement dures rencontrées dans les travaux souterrains. Il convient de signaler, à ce sujet, que les différents constructeurs de ce matériel lui ont apporté ou lui apportent actuellement les modifications nécessaires.

4. COMPARAISON DU SYSTEME DE PROTECTION PAR CONTROLE DE TERRE AVEC LES DIFFERENTS SYSTEMES DE PROTECTION EXISTANTS

Le paragraphe suivant est consacré à une description succincte des différents systèmes de protection existants. Le lecteur désireux d'obtenir des informations plus détaillées se rapportera aux articles originels [11, 12, 14 et 16].

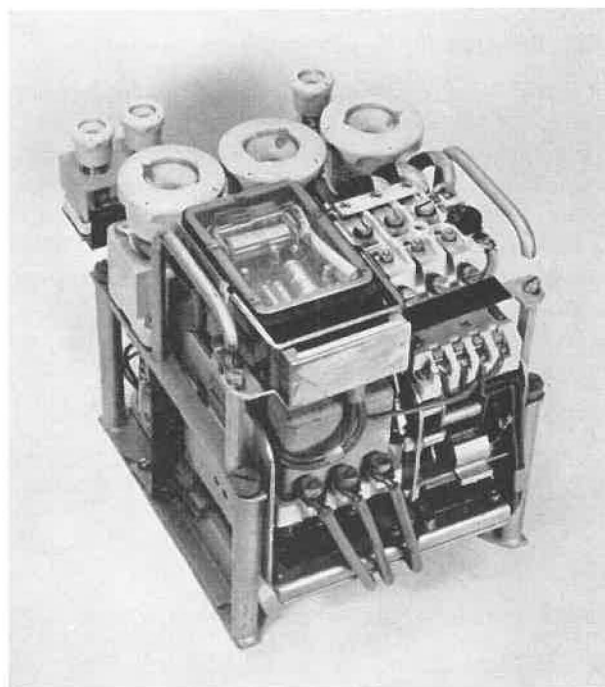


Fig. 18. — Intérieur débrochable d'un coffret de chantier de 60 A - 500 V, équipé d'un relais de verrouillage.

41. Principes des différents systèmes de protection.

411. Principe de la protection par courants inverses.

Le schéma de cette protection est représenté à la figure 19.

Deux transformateurs d'intensité $T I_1$ et $T I_2$ sont excités par les courants traversant les phases 1 et 2. La tension de sortie aux bornes du secondaire du transformateur $T I_2$ est déphasée de 120° .

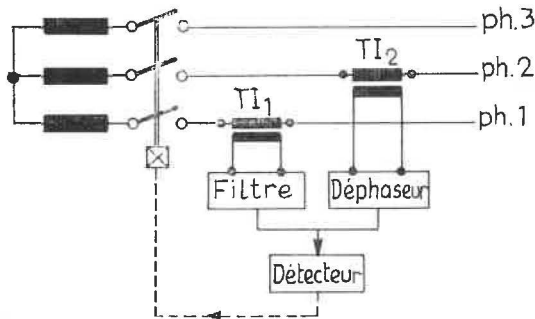


Fig. 19. — Schéma de la protection par courant inverse.

Dans un réseau triphasé, sain et équilibré, les deux tensions appliquées au « Décteur » sont égales en grandeur et en phase, et leur différence, interprétée par le détecteur, est nulle. Lors d'un déséquilibre des intensités, dû par exemple à un défaut biphasé ou une rupture d'un conducteur, la différence des tensions appliquée au « Décteur » agit après amplification sur la bobine de déclenchement de l'appareil de coupure.

412. Principe de la protection homopolaire.

Le dispositif de protection homopolaire le plus simple est schématisé à la figure 20.

Dans un réseau triphasé équilibré, la tension U_n est nulle. Lors d'un déséquilibre, résultant par exemple de la mise à la terre d'une phase, une tension apparaît entre le neutre et la terre, tension qui, appliquée à un « Décteur », peut provoquer l'ouverture de l'appareil de coupure. Un dispositif de protection, basé sur ce principe, ne

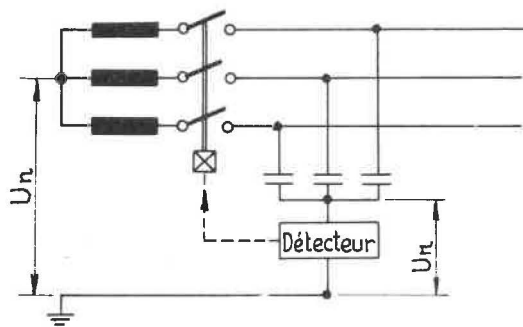


Fig. 20. — Schéma de la protection par détection de tension homopolaire.

peut assurer qu'une protection globale, vu que le déplacement du point neutre dans un réseau est identique en chaque endroit du réseau.

Pour pallier ce manque de sélectivité, certains utilisateurs et constructeurs [11, 12] ont élaboré des dispositifs sélectifs basés sur la détection de la puissance homopolaire d'origine capacitive qui apparaît lors d'un défaut phase-terre. Le schéma de principe de ce type de protection est représenté à la figure 21.

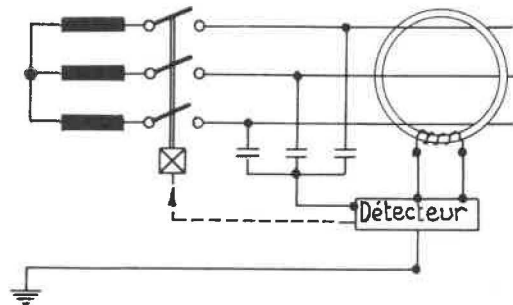


Fig. 21. — Schéma de la protection par détection de puissance homopolaire.

413. Principe de la protection par injection de courant haute fréquence.

Le schéma de ce dispositif est représenté à la figure 22.

Un générateur haute fréquence, constitué par un oscillateur, applique entre phases une tension de fréquence 5.000 Hz par l'intermédiaire de trois transformateurs d'intensité. Un détecteur

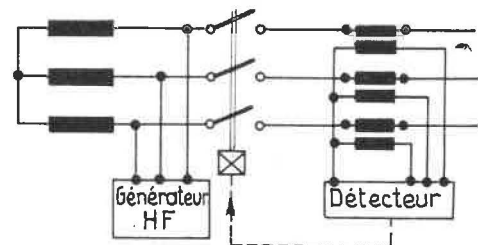


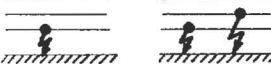
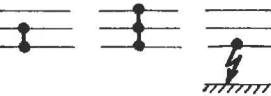
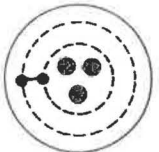


Fig. 22. — Schéma de la protection par injection de courant haute-fréquence.

contrôle la valeur du courant à haute fréquence et assure le déclenchement de l'appareil de coupure lorsque ce courant dépasse une valeur déterminée. L'intérêt de cette protection résulte du fait physique suivant. Si à 50 Hz, l'impédance de l'ensemble ligne-arc de défaut peut offrir une résistance supérieure à celle des moteurs au démarrage, ce qui rend inefficaces les dispositifs de détection de court-circuit basée sur le contrôle de l'intensité, il n'en est pas de même à la fréquence de 5.000 Hz, car l'impédance des moteurs augmente proportionnellement à la fréquence.

Ce type de protection permet également d'assurer une protection contre la mise à la terre.

TABLEAU I
Eléments de comparaison entre les différents systèmes de protection.

Classe	Type	Désignation	Temps de déclenchement (ms)	Nature des défauts détectés	Valeur des défauts détectés (Ohms)	Réseau surveillé hors tension	Indication de l'isolement	Remarque
1	1	Protection par courants inverses.	500 (1)		10 (2)	non	non	
2	2	Contrôleur d'isolement.	150 (1)		0 à 100.000	oui	oui	
3	3.1	Protection homopolaire.	20 à 40 (1)		0 à 1.000	non	non	
	3.2	Protection par injection de courant HF.	20 à 40 (1)		50 (2)	oui	non	
4	4	Déclencheur ultra-rapide.	1 à 2		—	oui	non	

(1) A ce temps, on doit ajouter le temps de déclenchement du disjoncteur pour obtenir le temps total de déclenchement.

(2) Ces valeurs se rapportent à un réseau du fond d'étendue moyenne et d'intensité nominale de 400 A (les valeurs indiquées dans ces colonnes ne sont qu'approximatives, elles sont cependant suffisantes pour une comparaison).

414. Principe de la protection par déclencheurs ultra-rapides.

Devant l'impuissance des dispositifs classiques à assurer une protection certaine contre le danger grisou, le Cerchar a mis au point un dispositif à coupure rapide dénommé « détorrupteur » qui, joint à un câble de conception spéciale, permet d'éviter l'apparition de courts-circuits. Le principe adopté est très simple et est schématisé à la figure 23. Le câble comporte deux écrans conduc-

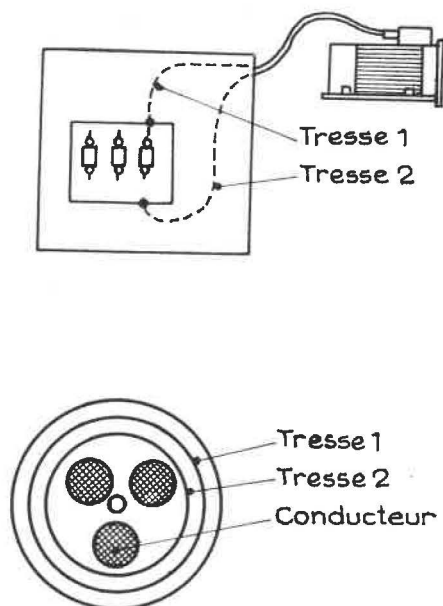


Fig. 23. — Schéma de la protection par déclencheur ultra-rapide.

teurs 1 et 2, isolés l'un par rapport à l'autre. Tout effort mécanique important, appliqué au câble, met en court-circuit les deux écrans qui ferment un circuit. Dans ce circuit sont insérés trois détonateurs qui provoquent l'ouverture du circuit de force motrice. Des dispositifs accessoires permettent simultanément de mettre en court-circuit les bornes des moteurs pour éviter que ces derniers ne débitent sur le défaut.

42. Comparaison des différents systèmes de protection.

Une comparaison valable ne peut être établie qu'en examinant pour chaque système de protection :

- les temps de déclenchement,
- la nature des défauts détectés,
- la valeur des résistances des défauts détectés.

Ces différents éléments sont repris au tableau I dans lequel la classification est établie sur la base des temps de déclenchement.

L'examen de ce tableau met en évidence les avantages du système de protection par injection de courant continu. En effet :

- Il est le seul à permettre une protection contre le danger d'électrocution par contact direct. Le risque d'électrocution par contact direct ne doit pas être sous-estimé, car la probabilité d'arrivée de cet accident est supérieure à celle de l'électrocution par contact indirect, dont les conséquences, généralement plus spectaculaires, frappent l'esprit.
- Il est le seul système qui ne laisse pas subsister plus de 180 millisecondes un défaut qui présente un certain danger.
- Il réalise une protection préventive, ce qui signifie qu'il signale tout défaut en puissance avant que ce dernier ne constitue un danger et permet de suivre son évolution. En particulier, le système à injection de courant continu est indépendant de la configuration du réseau et permet de connaître, avec une précision suffisante, l'isolement global du réseau par rapport à la terre.
- Il introduit automatiquement un verrouillage contre la mise sous tension de tout tronçon d'un réseau présentant un défaut. Cette condition nous semble présenter un intérêt tout particulier si l'on tient compte qu'un nombre relativement élevé d'incidents sur les réseaux électriques se produisent après les travaux d'installation, d'entretien et de déplacement du matériel. En d'autres termes, ces défauts surviennent aux extrémités des réseaux, les installations étant hors tension et la main-d'œuvre spécialisée non présente. Ce verrouillage n'est réalisé par aucun autre dispositif. Il serait cependant possible de l'obtenir avec la protection du type 3.2 (3), ce qui exigerait l'achat d'un équipement coûteux et encombrant.
- On notera également que les systèmes du type 4 n'assurent que la protection des câbles qui doivent d'ailleurs être conçus spécialement. En particulier, ces systèmes ne protègent en aucune manière contre l'électrocution par contact direct, les percements de carters... Un système type 4 ne peut donc constituer une protection de base et il ne peut être considéré que comme complémentaire à un dispositif des types 1, 2 ou 3.

En conclusion, on peut avancer que le système de protection par injection à courant continu, compte tenu du fait qu'il est maintenant sélectif, présente dans son ensemble des avantages tels que l'on peut actuellement le considérer comme étant la solution optimum. On peut cependant lui reprocher une certaine lenteur au déclenchement et un manque de détection entre phases. On peut alors envisager de lui adjoindre un dispositif des

(3) Les différents modes de protection sont définis d'après la classification du tableau 1.

types 1 ou 3 qui agirait sur le disjoncteur principal.

L'intérêt, nous ne dirons pas la nécessité, d'une telle mesure n'est pas évident et la multiplication des protections, surtout lorsqu'elles sont superflues, ne peuvent conduire qu'à une complexité croissante des réseaux miniers, ce qui n'est pas sans risque.

43. Association des différents systèmes de protection.

La protection par injection de courant continu étant, vu ce qui précède, considérée comme protection de base, on examinera les différents systèmes en tant que complémentaires.

431. Système de protection du type 1.

On peut l'exclure pour les trois raisons suivantes :

- a) Son temps de fonctionnement est trop grand.
- b) Il intervient pour des types de défaut dont la nature est essentiellement différente de ceux détectés par le dispositif de base. Ceci présente le désavantage majeur de ne plus permettre la sélectivité. En pratique, cela risque de se traduire par des réenclenchements successifs jusqu'au moment où le dispositif de base agira.
- c) Il ne peut pallier une défaillance volontaire ou involontaire du dispositif de base car il n'agit pas en cas de défaut triphasé.

Ce type de protection présente cependant un intérêt certain pour la protection des réseaux contre les conséquences du fonctionnement des moteurs en monophasé, mais ceci sort du cadre de la présente note.

432. Système de protection type 31.

Tout appareil basé sur la protection homopolaire peut, vu qu'il ne doit pas assurer la sélectivité, être réduit à un appareil de détection du déplacement du point neutre. En effet, toute charge dissymétrique dans un système triphasé provoque, entre la terre et le point neutre, une tension U_n . Nous avons calculé aux figures 24 et 25 les différentes valeurs U_n dans les cas suivants :

- a) Défaut d'une phase à la terre (fig. 24) :
 - avec capacité symétrique,
 - avec capacité dissymétrique.
- b) Défaut biphasé à la terre (fig. 25).
- c) Défaut triphasé à la terre (fig. 25).

De l'examen de ces figures une première remarque s'impose : c'est qu'il suffit, compte tenu des capacités rencontrées en pratique, d'installer un système de mesure du point neutre à déclenchement rapide pour assurer une protection contre les défauts d'une phase à la terre. Pour éviter les fonctionnements intempestifs, il suffirait de placer, entre le neutre et la terre, une capacité de l'ordre de quelques μF .

Le désavantage majeur des dispositifs du type 31 est d'être peu sensibles aux défauts triphasés, même lorsqu'ils présentent une dissymétrie de 30 %, ce qui est à considérer comme un maximum. On pourrait évidemment, à l'aide d'une capacité suffisamment élevée, assurer une protection contre les défauts triphasés dissymétriques, mais on augmente ainsi considérablement l'énergie d'origine capacitive, ce qui n'est pas sans risque et de toute manière le dispositif est insensible aux courts-circuits triphasés symétriques.

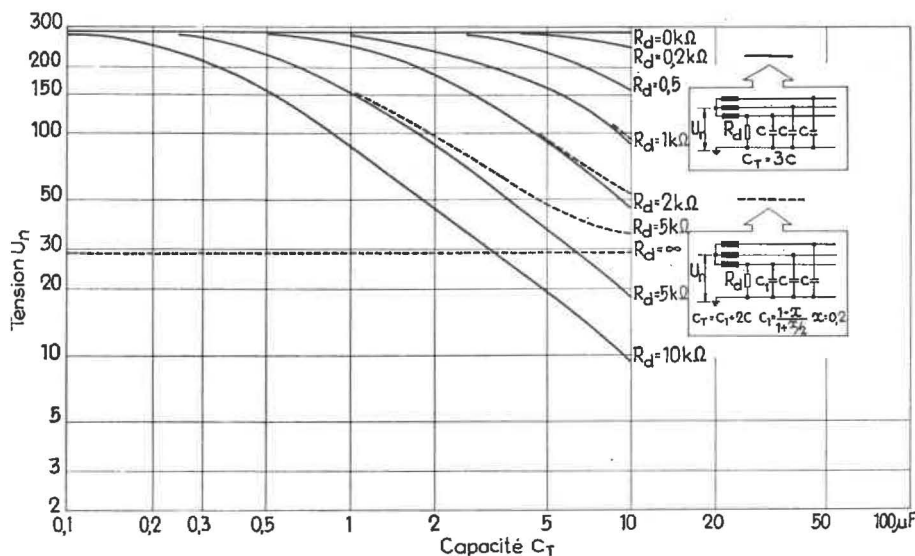


Fig. 24. — Détermination de la tension du point par rapport à la terre en cas de défaut de terre sur une phase.

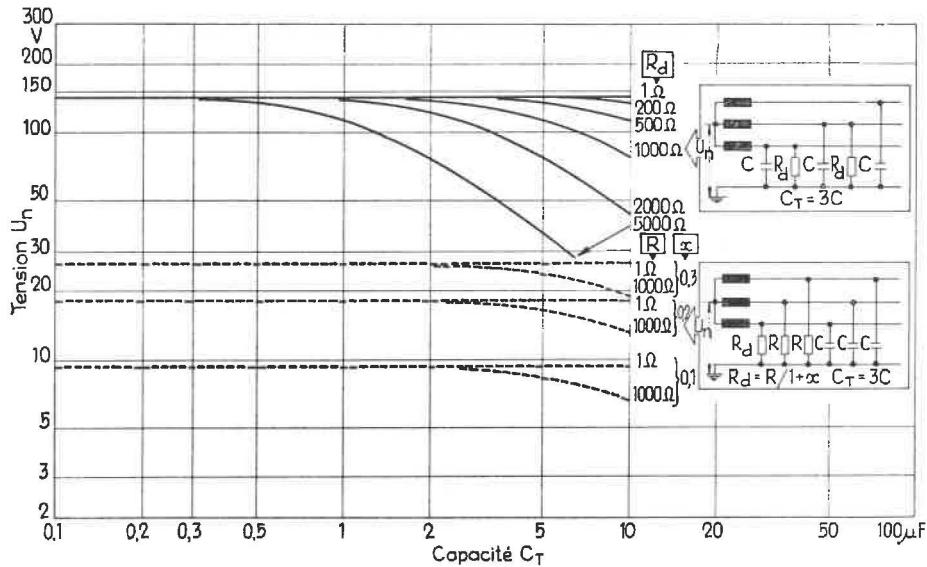


Fig. 25. — Détermination de la tension du point neutre par rapport à la terre en cas de défauts biphasés et de défauts triphasés non symétriques.

Il n'est nullement question ici d'exclure l'utilisation de ce type de protection dont C. Bihl a été le promoteur [11]. Des réseaux 500 V dont la protection de base est assurée par ce type de dispositif présentent un niveau de sécurité élevé et cette solution est encore, actuellement, la plus indiquée dans les réseaux haute-tension.

433. Système de protection du type 32.

Ce système échappe aux reproches formulés ci-avant. L'adoption d'un tel dispositif pourrait éventuellement permettre :

- Une diminution des sections des câbles armés, ce qui présenterait un intérêt économique certain lors de l'alimentation d'utilisateurs, de faible puissance, isolés et éloignés de la sous-station.
- Une élimination de l'action du contrôleur d'isolement en cas de défaut d'une phase à la terre, ce qui permettrait de terminer le poste. Cette élimination ne serait réalisée qu'après localisation du tronçon défectueux. On pourrait ainsi estimer le danger présenté par le défaut et ce, surtout du double point de vue incendie et inflammation du grisou. Le personnel électrique préposé à la surveillance du réseau serait attentif et ne risquerait donc pas d'accident par électrocution directe. Il reste à définir le danger par électrocution indirecte. Le contrôleur d'isolement étant hors service, il existe deux causes d'accidents qui sont :
 - le fait que la mise à la terre d'une phase peut porter une carcasse à un potentiel dangereux par rapport à la terre,
 - l'arrivée d'un deuxième défaut de terre sur une autre phase.

Ces deux causes d'accidents sont analysées dans le paragraphe suivant.

44. Considérations sur le risque de fonctionner avec un réseau présentant un défaut monophasé à la terre.

Analyse de la première cause d'accidents (fig. 26).

Dans ce cas, il n'existe aucun danger, si la résistance de mise à la terre R_t du carter est suffisamment faible. Le graphique de la figure 26 indique les valeurs maximales admissibles de la résistance de mise à la terre R_t qui évitent, entre carcasse et terre, l'apparition d'une tension supérieure à 42 V (règlement allemand) et à 24 V (règlement français).

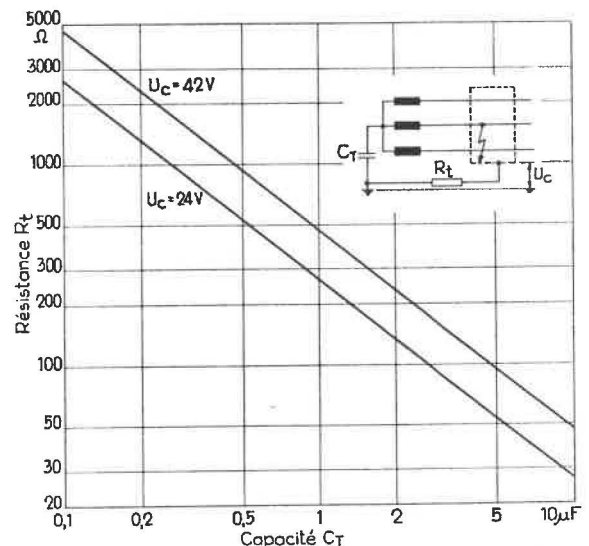


Fig. 26. — Valeur maximum admissible de la résistance de mise à la terre assurant la sécurité électrocution.

Compte tenu du fait qu'à 24 V la résistance minimum du corps humain est de 2.000 Ohms, le courant maximum traversant le corps sera de 12 mA et on est donc largement en dessous de la limite dangereuse. Pour un réseau très étendu dont la capacité totale est de l'ordre de 10 μ F, on lit sur la figure 26 que la résistance de terre R_t doit être inférieure à 26 Ohms pour éviter l'apparition d'une tension supérieure à 24 V. Avec la réglementation allemande, qui conduit à des courants de l'ordre de 25 mA pouvant à la limite présenter un certain danger, il suffirait que la résistance R_t soit inférieure à 46 Ohms. Dans les réseaux du fond, les résistances de terre sont généralement très inférieures à ces valeurs et on peut admettre qu'il n'existe aucun danger d'électrocution pour des réseaux dont la capacité totale C_T n'excède pas 10 μ F.

Le point précédent est une raison supplémentaire pour éviter les réseaux à capacité totale élevée C_T . Dans ce but, on limitera leur étendue et on évitera de prévoir des écrans individuels pour tous les câbles des réseaux 500 V.

Analyse de la 2^e cause d'accidents (fig. 27).

Un défaut monophasé à la terre existant sur la phase 1, supposons qu'un défaut analogue se produise sur la phase 2. Ces deux défauts entraînent un court-circuit bipolaire. Si les deux défauts sont francs et si la résistance R_t est différente de zéro, tout contact avec un carter peut soumettre un être humain à une tension d'électrocution U_c égale à 500 V. Dans la majorité des cas, de tels défauts présentent une résistance totale faible et on peut espérer que le seuil de déclenchement du dispositif détecteur à haute fréquence entraînerait une mise hors tension du réseau. La valeur minimum de la

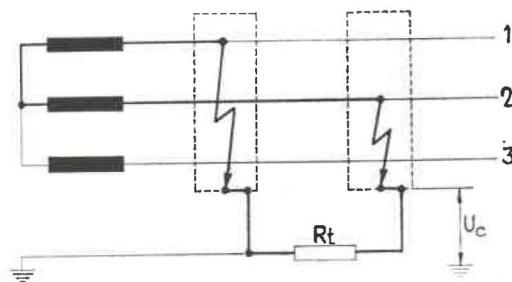


Fig. 27. — Court-circuit bipolaire par double mise à la terre.

résistance du corps humain étant, à 500 V, de 800 Ohms, le courant d'électrocution sera de 0,625 A. La figure 1 indique qu'un tel courant doit être éliminé en moins de 70 millisecondes, ce qui est facilement atteint, avec une protection par injection à haute fréquence.

Le problème de tolérer un fonctionnement lors d'une mise à la terre pour achever un poste d'ex-

traction présente un double aspect. L'aspect économique est évident et à titre indicatif soulignons que, pour 5.000 kW installés dans les travaux souterrains de la S.A. des Charbonnages de Monceau-Fontaine, on totalise annuellement un nombre d'heures d'arrêt par défaut monophasé à la terre d'environ 100 heures, soit une perte d'environ 4.000.000 F. Il n'est nullement question ici de sous-estimer la valeur de la vie humaine. Mais on doit insister sur le fait que, d'une part le risque est minime et que d'autre part toute perte financière touche l'ensemble de la Société, donc dans une économie moderne, saine, le travailleur. Il serait peut-être préférable de consacrer cette somme à d'autres domaines de la sécurité et des améliorations des conditions de travail.

Outre cet aspect économique, il peut également arriver que la mise hors tension d'un réseau puisse entraîner des dangers plus spécifiquement miniers tels que ceux résultant de l'arrêt d'un ventilateur secondaire, d'une pompe d'exhaure, d'une signalisation de sécurité, etc...

5. EXAMEN DE QUELQUES POINTS PARTICULIERS

Cette note serait incomplète si l'on y ignorait les points suivants qui sont actuellement l'objet de controverses de la part de certains spécialistes, à savoir :

- la possibilité de réduire le temps de coupure total d'un défaut par l'utilisation de contacteurs en lieu et place de disjoncteurs,
- la répercussion sur la sécurité de l'utilisation de la tension de 1000 V pour l'alimentation des engins de chantier,
- la réduction de la conductance du conducteur de terre (ou de masse),
- l'examen du danger introduit par l'utilisation d'une tension de mesure de 100 V pour le contrôle de l'isolement.

51. Possibilité de réduire le temps de coupure total d'un défaut par l'utilisation de contacteurs, en lieu et place de disjoncteurs.

Il est possible de réduire de 10 à 15 millisecondes le temps total de coupure, en utilisant des contacteurs en lieu et place de disjoncteurs. Si le gain obtenu est pratiquement négligeable pour les appareils du type contrôleurs d'isolement, la solution peut présenter un certain intérêt pour les appareils de la classe 3, dont les temps propres de déclenchement sont de l'ordre de 30 millisecondes. On doit cependant signaler que se pose alors

un problème de coordination entre les différents éléments constitutifs du coffret de protection. En effet, par principe, les dispositifs de protection décrits dans cette note fonctionnent indépendamment de la valeur du courant du défaut et ils peuvent donc entraîner une ouverture du contacteur, alors que le courant de court-circuit dépasse le pouvoir de coupure de cet appareil. Cette ouverture, en introduisant une résistance d'arc supplémentaire, retarde la fusion des fusibles et le temps d'élimination du défaut pourrait être beaucoup plus important qu'avec le système classique de protection. En principe, la solution de ce problème de coordination de protections est élémentaire : il suffit que, lorsque les valeurs des courants de courts-circuits dépassent le courant maximum de coupure du contacteur, le temps de fusion des fusibles soit inférieur au temps de fonctionnement du dispositif de protection. Pratiquement, cette règle conduit dans les cas d'un contacteur de 125 A (pouvoir de coupure 1.500 A) sur lequel agit un dispositif fonctionnant en 15 millisecondes, à ne pas utiliser de fusibles à *fusion rapide de plus de 100 A*.

52. Répercussion sur la sécurité de l'utilisation de la tension de 1.000 V pour l'alimentation des engins de chantier.

Certains spécialistes de l'électromécanisation pensent que l'utilisation de plus en plus fréquente de machines d'abatage de 150 et même de 200 ch rend souhaitable l'emploi de la tension de 1.000 V. L'étude de la sécurité dans les réseaux à 1.000 V a été réalisée par R. Streich [12]. De cette étude, on peut tirer les trois principaux points suivants :

- la protection contre l'électrocution par contact direct n'est pas réalisable avec les appareils de contrôle d'isolement disponibles actuellement sur le marché, car le temps de déclenchement devrait être ramené de 150 millisecondes à 50 millisecondes;
- le niveau d'isolement doit être maintenu à 80 kOhms pour éviter tout danger d'inflammation du grisou;
- la puissance dissipée dans un défaut d'une résistance déterminée est quatre fois plus importante dans un réseau à 1000 V que dans un réseau à 500 V.

Ces quelques remarques ne doivent pas nécessairement constituer la base d'une opposition systématique à l'emploi de la tension de 1000 V dans les travaux souterrains, mais on doit tenir compte de cet aspect lorsque l'on étudie l'utilisation de cette tension.

53. Réduction de la conductance du conducteur des masses (ou de terre).

Certains auteurs ont proposé une réduction de la section du conducteur des masses lorsque le réseau était protégé par contrôleur d'isolement. Cette proposition ne nous paraît pas acceptable. La section de 16 mm² exigée par le règlement belge est un minimum suffisant.

De plus, un appareil de protection, même à sécurité dite positive, peut toujours être mis en défaut et ce cas, plus fréquent qu'on ne le croit, conduit à devoir toujours considérer le circuit de mise à la terre comme l'élément de base de la sécurité d'utilisation de l'électricité.

54. Examen du danger éventuellement introduit par l'utilisation d'une tension de mesure de 100 V pour le contrôle de l'isolement.

Lors de l'utilisation d'un contrôleur d'isolement, les trois capacités phase-terre sont évidemment chargées à la tension de mesure, soit dans certains cas à 100 V. On a parfois émis l'hypothèse que cette tension pouvait présenter un certain danger.

Si l'on suppose qu'un homme touche une phase d'un réseau contrôlé, il déchargera la capacité suivant une certaine constante de temps qui, pour une capacité de 10 μ F, est de 1/100 de seconde. Le courant initial traversant le corps humain sera de 100 mA pour atteindre 8 mA en 25 millisecondes. La figure 1 montre que cette durée de passage du courant est incapable de créer un danger.

Du point de vue inflammation du grisou, il est normal de se limiter aux câbles souples en taille équipés de connecteurs. La capacité maximum d'une phase par rapport à la terre pour de tels câbles à écrans individuels est de 1,25 μ F/km. La longueur de ces câbles souples étant au grand maximum de 300 m, la capacité d'une phase par rapport à la terre est de 0,375 μ F et la tension minimum d'inflammation de 140 V (fig. 2). Quant à une décharge simultanée des 3 phases *en un même point*, elle est très improbable, mais elle ne conduirait à un danger théorique qu'à partir de 215 m. De toute manière, l'adoption d'une tension de mesure de 90 V conduirait à une longueur de 265 m.

6. CONCLUSIONS

Compte tenu du fonctionnement satisfaisant des récents appareils de protection à injection de courant continu, on peut penser que leur emploi apporte actuellement une solution valable à la minimisation des dangers entraînés par l'électromécanisation des travaux souterrains. Ce mode de protection est minime acceptable en ce sens

qu'il n'entrave pas *exagérément* la continuité de l'exploitation.

D'aucuns pourraient s'étonner de cette conclusion alors que, dans cette même note, on s'empressait d'envisager la possibilité d'admettre la marche avec défaut monophasé pour terminer le poste. En fait, nous croyons que cette possibilité ne dépend pas de la valeur du type de protection adopté, mais du problème très général de la réparation optimum des dépenses d'une société qui peut bénéficier d'une innovation technique, en l'occurrence, la protection par haute fréquence. De toute manière, il est bien connu que, pour éviter un grand nombre d'accidents mortels de la route, il suffirait de placer un gendarme tous les deux cents mètres et pourtant...

Il faut également éviter d'adopter des solutions sous l'influence des accidents d'une période heureusement révolue où les protections des réseaux étaient, il faut le reconnaître pour ne pas handicaper l'avenir, pratiquement inexistantes.

De toute manière, le choix d'une solution unique serait illogique, car on ne doit pas négliger le fait que chaque point de la mine est un cas particulier, et une solution valable pour un chantier de 3^e catégorie ne s'indique pas nécessairement pour une voie d'entrée d'air d'un chantier de 1^{ère} catégorie.

Insistons sur le fait que la seule lacune des protections classiques est leur impuissance à empêcher avec certitude l'inflammation du grisou par un défaut type « coup de hache dans le câble » s'effectuant dans un milieu dont la teneur en méthane est comprise entre 6 et 14 %. Mais en dehors de cette lacune, il subsiste les défaillances d'un appareil de protection qui nous semblent bien plus probables que celles évoquées ci-dessus. Ce problème ne peut être résolu que par l'adoption d'un matériel moderne qui, dans certains domaines de l'électrification du fond, reste encore à penser, et par l'utilisation d'une main-d'œuvre alliant à une grande compétence une haute conscience professionnelle.

Le niveau de sécurité actuellement atteint nous semble devoir entraîner un alignement de certaines parties du règlement sur l'emploi de l'électricité dans les travaux souterrains et en particulier :

- Admettre l'utilisation du matériel à sécurité renforcée.
- Alléger les prescriptions relatives aux joints antidéflagrants afin de faciliter, dans certains cas, l'agrégation du matériel construit suivant les normes étrangères. Le fait que l'on ne par-

vient pas toujours à obtenir cette agrégation plonge les utilisateurs dans un régime monopolistique et les empêche d'adopter des solutions d'un grand intérêt dans les domaines de la télémessure, de la télécommande, de la régulation, pour lesquels il n'existe actuellement, sur le marché belge, qu'un nombre trop restreint d'appareils.

- Tolérer éventuellement une légère augmentation de la teneur limite admissible de grisou dans les endroits où sont installés des engins électriques, nouvelle limite qui s'accorderait plus avec la limite générale de 2 %.

Ces quelques allègements ne pourraient que faciliter l'effort de modernisation entrepris par l'Industrie Charbonnière Belge.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DALZIEL Ch. : Dangerous Electric currents. *Trans. AIEE* 65 — 1946 — p. 579-585.
- [2] BIEGELMEIER G. : Der vollkommene Fehlerschutz in Niederspannungsanlagen. *Elektrotechnik und Maschinenbau* 76 (1959) p. 93-102.
- [3] BRINKMAN K., KOEPPEN S. et LEGGEMANN G. : Ueber die Gefahren des Elektrischen Stromes. *Conti - Elektro-Berichte* 5 (1959) p. 265-272.
- [4] DALZIEL Ch. : A study of the hazards of impulse currents. *Transactions AIEE* 72 (1953) p. 1302-1043.
- [5] MULLER K. : Eigensichere Stromkreise. *Elektrotechnische Zeitschrift A* 78 (1957) p. 177/182.
- [6] ALLSOP G., GUENAULT E.M. et NICOL A.D.I. : Safety in Mines Research Board, Paper n° 104.
- [7] ALLSOP G., HARTWELL F.J., GUENAULT E.M. et BAKER A.R. : Safety in Mines Research Board, Paper n° 106.
- [8] ALLSOP G. et GUENAULT E.M. : Safety in Mines Research Board, Paper n° 107.
- [9] LECLERCQ J. : Inflammations d'huile provoquées par la blessure de câbles électriques. *Annales des Mines de Belgique* n° 1 - Janvier 1959 p. 59-77.
- [10] BOYER J. et SOUILLARD G. : Les fluides hydrauliques résistant au feu. *Bulletin technique du Bureau Véritas*, 45^e année - n° 1 (1961) p. 7-11.
- [11] BIHL C. : Le danger des défauts monophasés dans les réseaux triphasés d'électrification du fond. *Annales des Mines de France* — 1958 — p. 815-838 — 1959 — p. 15-52.
- [12] STREICH R. : Zur Frage der Sicherheit im elektrischen Betrieb unter Tage. *Glückauf Heft* 9 — 1962 — p. 482-489.
- [13] BOREL E. : Le Hasard. *Alcan* (Paris) p. 229.
- [14] BIHL C. : Nouvelles protections dans les réseaux d'électrification du fond. *Revue de l'Industrie Minière* n° 5 — Vol. 41 — (1959) — p. 374-404.
- [15] DELAUW G. : Quelques réflexions concernant l'entretien du matériel électrique utilisé dans les travaux souterrains. *Annales des Mines de Belgique*, n° 7-8 (1962) p. 797-804.
- [16] GAGNIERE C. : Protection des réseaux triphasés par contrôle d'un courant auxiliaire à fréquence élevée. *Revue de l'Industrie Minière*, Vol. 44 — n° 11 (1962) p. 775-785.