ÉLECTRICITÉ

Le réseau de Marseille de la Compagnie Générale Française de Tramways

par L. BARBILLION, *Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble*

(SUITE ET FIN)

FONCTIONNEMENT DE LA SOUS-STATION

Diverses conditions de fonctionnement peuvent être exigées d'une sous-station automatique ; les principales opérations demandées à la sous-station de Coulin sont les suivantes :

Mise en marche et interruption à heure fixe. Ceci s'obtient au moyen de l'horloge à contact, ou par commande à distance.

La sous-station, formée de trois groupes, doit proportionner automatiquement sa puissance à la demande du réseau.

Les trois groupes doivent travailler pendant un même nombre d'heures, de façon que, si la charge demandée par le réseau peut être fournie par un seul groupe, ce ne soit pas toujours le même qui le fasse.

Si une avarie se produit aux groupes en marche, la mise en service des groupes de réserve doit s'effectuer automatiquement.

Fig. 19. — Sous-station automate, cellules H. T.

La tension continue doit être réglée automatiquement pendant la charge.

Si une manœuvre, celle de la mise en marche, d'un groupe, par exemple, échoue, par suite d'avarie, il faut qu'elle soit exécutée par un organe qui ne puisse tenter de l'effectuer à nouveau qu'à un certain nombre de reprises, se succédant à des intervalles déterminés. Une fois la manœuvre réussie, le dispositif doit revenir à l'état initial ; sinon un avertisseur spécial doit prévenir le personnel de l'existence prolongée du défaut.

Un appareillage qui puisse répondre à ces exigences a été étudié et il est caractérisé par des relais thermiques d'un type particulier.

Ce sont des interrupteurs à contacts à mercure dans l'hydrogène. Le mercure, contenu dans un tube, peut interrompre ou établir le contact électrique d'un circuit déterminé. Cette manœuvre s'obtient par rotation du tube de verre dans un plan vertical. Le tube est suspendu à l'extrémité d'une bilame, toute variation de température de la bilame se traduisant par une variation de sa courbure, et en définitive, par un déplacement de son extrémité fixée au tube, donc par la rotation de celui-ci.

Fig. 20. — Sous-station automate à redresseurs à vapeur de mercure, cellule d'ampoule

L'étude théorique et expérimentale de la déformation de la bilame, (qui, parcourue par un courant, s'échauffe) amène à la conclusion que cette déformation suit la loi suivante :

$$\theta = \theta_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

T peut être considérée comme une constante d'échauffement de la bilame.

θ_1 est la valeur de régime permanent de l'angle de rotation.

θ , angle de rotation de l'extrémité de la bilame, qui, comme on le voit, est fonction du temps t.

La valeur de T varie en fonction de la dimension de la bilame, ce qui fait que l'on peut obtenir la déviation 0 en un temps déterminé par le choix convenable des dimensions, d'où la valeur de T.

Plusieurs éléments du type décrit ci-dessus, mais à constantes de temps d'enclenchement différentes, celles-ci de valeurs croissantes, constituent le relais répéteur.

C'est donc un relais de manœuvre temporisé et qui après l'échec des essais successifs des trois éléments, en vue de mettre le groupe en marche, place, au moyen d'un quatrième circuit commandé par un quatrième élément, sous tension l'avertisseur et la signalisation.

Pour la mise en marche de la sous-station, le signal de départ est donné, soit par l'horloge à contacts, soit par un circuit à commande à distance. Cette manœuvre se traduit par la fermeture du circuit du transformateur de chauffage du relais répéteur et par la mise en marche du circuit servo-moteur, ce qui provoque la fermeture du disjoncteur à haute tension du groupe destiné à entrer en service. Le disjoncteur fermé, le circuit de signalisation (lampe rouge) est mis sous tension, comme de même, au moyen des contacteurs prévus, les circuits des transformateurs d'entretien et d'allumage. Le circuit d'entretien reste sous tension tant que le disjoncteur haute tension est enclenché.

Le contacteur d'allumage intercale la batterie sur le circuit comprenant l'une des selfs de cathodes d'entretien et la résistance d'allumage.

La présence de la bobine de self induction augmente considérablement l'énergie de l'étincelle d'allumage et supprime complètement les ratés, d'autant plus que l'allumage s'effectuant en courant continu, la tâche cathodique apparaît toujours sur le mercure.

L'étincelle d'allumage ayant jailli, le courant d'entretien s'établit dans l'ampoule et excite un relais, qui, par son contact, provoque l'ouverture du circuit d'allumage, l'enclenchement du contacteur du groupe avec le réseau et la mise du pôle positif du redresseur en communication avec le voltmètre du groupe.

La fermeture du contacteur de groupe provoque, à l'aide d'un contact auxiliaire, celle du contacteur du ventilateur,

Tout ce que nous venons de dire se vérifie si, par la mise sous tension du transformateur de chauffage du relais répéteur et par la première tentative du premier élément, qui est réglé pour fonctionner au bout de 10 secondes, aucun inconvénient ne se rencontre dans les multiples circuits qui sont appelés à assurer le service.

Si un seul de ceux-ci se refuse à prêter son concours, que cela soit impossible à cause d'une avarie, ou simplement qu'il n'arrive pas à assurer sa fonction au bout du temps prévu, le premier élément du répéteur renonce, et par ce fait permet

au deuxième d'essayer la manœuvre à son tour. Celui-ci agit de la même façon que le premier, mais insiste davantage : 20 secondes. Si cette nouvelle tentative reste aussi sans succès, une troisième est faite par un troisième élément pendant 20 autres secondes.

Pendant une de ces trois tentatives, si le groupe se met en marche, le relais répéteur thermique est alors mis hors circuit et revient à l'état initial.

Si le contraire se produit, à savoir que les trois tentatives restent sans succès, par suite d'une avarie existant dans le groupe qui devait être mis en service, le relais thermique ferme le circuit de la signalisation et le personnel surveillant en est prévenu simultanément.

Si, tout inconvénient évité, le premier groupe s'est mis en marche en débitant sur le réseau, et si, sur la demande de celui-ci, il se voit obligé de débiter une charge supérieure à sa charge normale, il fait appel au deuxième groupe, et ceci comme suit :

La forte intensité créée agit sur un relais à maxima instantané à contact à mercure traversé par le courant primaire du groupe qui ferme le courant sur le relais répéteur du groupe destiné à entrer le deuxième en service.

Mais cette même manœuvre a mis sous tension un autre relais inverseur qui, ainsi, permet à un transformateur de chauffer en même temps un relais à minima d'intensité instantané. Ce qui fait qu'on

a simultanément la déformation des bilames des relais à maxima et minima. Le deuxième groupe ne se mettra en service que si la surcharge persiste, car si non, le relais à minima interviendrait et supprimerait la connexion qui permet la tentative d'enclenchement du deuxième groupe.

Le deuxième groupe en service a un autre relais à minima d'intensité temporisé, qui reste en circuit et provoque le déclenchement de son groupe, si la baisse de charge persiste et quand celle-ci tombe au-dessous de la demi-charge.

Les deux groupes étant en marche et la charge augmentant toujours, le troisième groupe se serait mis, ou aurait essayé de se mettre en service de la même façon et ce serait le deuxième groupe qui aurait, par le fait de la forte intensité et au moyen d'un deuxième relais à maxima, tenté de provoquer cette mise en service. Donc tous les appareils nécessaires pour la mise en marche d'un groupe supplémentaire, au cas d'une augmentation de charge, existent en double.

Un tableau de couplage permet de désigner, suivant sa position, l'ordre de mise en marche successive des trois groupes. En manœuvrant ce coupleur, on peut exécuter toutes les permutations possibles avec les trois groupes.

Dans n'importe quelle condition de marche des groupes, la marche automatique s'exécute de la même façon, la seule différence de montage résidant dans la position de la barrette de couplage.

Fig. 21. — Panneaux et boîte d'interconnexion

En cas d'avarie d'un groupe, le groupe suivant dans l'ordre de la permutation circulaire se met en marche, en même temps qu'est actionné le dispositif d'avertissement.

Les trolleybus qui circulent sur le réseau sont équipés pour marcher en récupération. Lors d'un freinage brusque par récupération, donc avec production d'énergie, la ligne n'ayant qu'un nombre limité de voitures, si limité qu'il se peut qu'au cours du freinage en question, il ne se trouve aucune voiture pour absorber cette énergie, il en résulte une surtension sur le réseau, qui pourrait même être dangereuse pour l'appareillage de la sous-station, si l'on n'avait prévu un appareil susceptible de l'absorber.

C'est une résistance d'absorption qui, en cas de surtension, est branchée automatiquement en dérivation entre les barres positives et négatives de la sous-station. Ceci, au moyen d'un voltmètre à contact et d'un relais que ce voltmètre met sous tension. Cette résistance reste ainsi en circuit, tant qu'il y aura retour de courant.

PROTECTION DE LA SOUS-STATION

La protection contre les court-circuits continus est assurée par les disjoncteurs extra-rapides de départ.

Un relais thermique à maxima, dérivé sur un shunt du circuit principal, est actionné, au cas d'une surcharge permanente du groupe; l'intervention de ce relais thermique produit la fermeture du déclenchement du disjoncteur à haute tension, et le groupe se met hors service.

L'arrêt du ventilateur d'un groupe en marche est à craindre; c'est en vue de cette éventualité qu'est installé un relais thermique, qui produira le déclenchement du groupe en pareil cas.

La protection contre les court-circuits internes des ampoules est assurée par les fusibles d'anodes, qui sont placés sur les connexions entre ampoule et transformateur. L'on a vu qu'on avait créé, au moyen de résistances, des neutres artificiels entre lesquels est inséré un relais qui, au cas où un ou plusieurs fusibles d'anodes viendraient à manquer, rend impossible l'enclenchement du disjoncteur à haute tension. Les transformateurs sont protégés contre des court-circuits intérieurs par les relais directs placés sur les disjoncteurs haute tension. En général, tous les circuits auxiliaires sont protégés séparément par des fusibles apparents et accessibles, contre des courts-circuits éventuels.

Nous avons vu, du reste, que toute avarie pouvant se vérifier en cours de marche est immédiatement signalée, et que ce signal persiste tant qu'on n'intervient pas volontairement pour supprimer le défaut.

Signalons enfin que dans cette sous-station, se trouve installé un groupe alternateur à fréquence musicale qui, au moyen d'un transformateur approprié et d'un condensateur séparateur, est relié aux barres positive et négative et fournit le courant de contrôle pour la remise en marche des groupes après une interruption.

COMMANDE A DISTANCE DE LA SOUS-STATION DE COULIN DEPUIS LA STATION D'AUBAGNE

La sous-station de Coulin peut être commandée par Aubagne, de même que de ce dernier poste, elle peut être constamment surveillée. Un câble à 5 paires réunit Coulin à Aubagne. Ces fils sont branchés sur les relais respectifs, lampes de signa-

lisation, sonnerie et sur un commutateur de commande au moyen duquel les manœuvres peuvent être effectuées.

Les lampes de signalisation font apparaître les circuits qui sont en charge et un indicateur spécial, le nombre de groupes, en service. Une ligne téléphonique relie les deux sous-stations

DISPOSITIF DE CONTROLE DE GIVRE

La ligne à 600 V. des trolleybus se recouvre assez facilement de givre, surtout pendant un hiver un peu rigoureux, d'où les contacts devenant très mauvais, des inconvénients en naîtraient pour l'exploitation si l'on ne prenait pas les précautions nécessaires avant la mise en service des voitures. La présence du givre est signalée par un dispositif spécial installé près de Cuges et qui est mis en route par le Chef de dépôt d'Aubagne. La fusion du givre est réalisée depuis cette sous-station par la mise sous tension de la ligne après fermeture à distance de deux contacteurs situés près de Gémenos, et à Cuges, et réunissant les deux fils positif et négatif. Le débit obtenu dans la ligne ainsi mise en court-circuit est de l'ordre de 500 A. La fusion du givre est obtenue en 30 minutes environ. Cette opération s'effectue chaque jour, ou accidentellement, quand on se rend compte de cette nécessité à Cuges. On en prévient téléphoniquement Aubagne, qui, alors, agit automatiquement à distance.

II. — SOUS-STATION D'AUBAGNE

Comme nous le disions plus haut, la sous-station d'Aubagne avait été installée suivant les mêmes principes de fonctionnement automatique que celle de Coulin. La seule différence avec la première, qui pourrait être signalée, est celle de la puissance totale de la sous-station, car ses trois groupes ont chacun une puissance de 150 kW.

Le fonctionnement de cette sous-station n'était pas exempt de critique, probablement parce que les exigences de service de celle-ci sont un peu différentes de celles de Coulin, ou que les résultats fournis par l'appareillage d'Aubagne n'ont pas été aussi heureux en exploitation. Somme toute, le personnel dirigeant du service électrique du Réseau de Marseille a jugé utile de remanier et de rééquiper entièrement la sous-station d'Aubagne. Le fonctionnement actuel de celle-ci se trouve réalisé uniquement d'après les conditions électriques du Réseau à courant continu. Sa mise en activité s'effectue dès que la tension sur les barres s'abaisse suffisamment; aussitôt après son entrée en fonctionnement, la suite des opérations ne dépend plus que de la charge demandée par la ligne. Elle se remet enfin hors service au-dessous d'une certaine valeur de débit, la tension restant maintenue à 600 V. environ, par suite de la mise en parallèle permanente du feeder-tramways d'Aubagne avec celui de la sous-station de la Barrasse.

Parmi les dispositions automatiques de la sous-station d'Aubagne, nous examinerons un certain nombre d'opérations qui doivent pouvoir normalement s'effectuer, en répondant ainsi aux exigences du service.

1^o MISE EN MARCHÉ DE LA SOUS-STATION

La sous-station d'Aubagne, même arrêtée, est maintenue constamment en parallèle avec celle de la Barrasse, donc ses barres omnibus sont sous la tension normale. Celle-ci ne baissera qu'au cas où une charge est effectivement demandée à la section. Cette chute de tension doit provoquer la mise en marche de la sous-station, qui fonctionne comme sous-station de secours et rétablit sur la ligne la tension à sa valeur normale,

A cet effet, est installé un voltmètre général à contacts, dérivé sur les barres à 600 V.. Dès que la tension sur les barres de la sous-station, donc en bout de ligne de traction, tombe à 500 V., ce voltmètre établit un contact, qui a pour effet de mettre en mouvement simultané les organes de mise en marche, c'est-à-dire le relais commutateur et de distributeur circulaire.

Si la tension normale se rétablit, donc si la charge sur la section disparaît, ces appareils reviennent au repos.

2^o FONCTIONNEMENT DES AUTRES GROUPES DE LA SOUS-STATION EN FONCTION DE LA CHARGE

Au moment de la mise en marche de la sous-station, un seul groupe se met en action et débite sur la section. Mais, si la

relais thermiques ont été remplacés par des relais directs à palettes.

3^o ARRÊT DES GROUPES

Lorsqu'un certain nombre de groupes ont été mis en service pour faire face à la charge de la section, on doit les y maintenir, tant que cette charge ne diminue pas d'une quantité suffisante pour permettre l'arrêt d'un groupe.

Cette baisse de débit persistant un temps suffisamment grand pour ne pas être confondue avec une reprise de charge, on doit alors effectuer l'arrêt d'un groupe. On voit donc que l'arrêt doit être temporisé.

L'appareil automatique qui pourra satisfaire à ces conditions peut être un ampèremètre, dont l'aiguille est sollicitée par un

Fig. 22. — Marseille : Une ligne de tramways longe, sur toute sa longueur, une voie particulièrement agréable à parcourir : La Promenade de la Corniche

charge de celle-ci est trop élevée, de façon à obliger le groupe en question à débiter une intensité plus grande que celle normale, il y aura lieu d'intervenir et mettre en service un deuxième groupe, et en cas de besoin, même le troisième.

Du côté basse tension, et sur le fil de retour de chaque groupe, est monté un ampèremètre thermique à contact fonctionnant sur shunt. Cet appareil est constitué par les lames bimétalliques de la Société Hewittic, dont la déformation pour chacun suit assez fidèlement les variations de charge du groupe auquel elle est affectée, et n'entre en action qu'avec un retard qui, comme il est facile de s'en rendre compte, est fonction de la charge même.

Pour une charge déterminée (250 A.), la déformation de chaque bilame provoque la fermeture d'un contact, (après le retard sus-mentionné, donc il faut que la charge persiste au moins pendant un temps égal à ce retard) qui provoque, par l'intermédiaire de relais, la mise en marche d'un nouveau groupe.

Depuis la mise en service des trains lourds sur Aubagne, ces

équipage différentiel d'effet proportionnel d'une part à ni , et à la charge totale I d'autre part, n étant le nombre de groupes en service, i la capacité d'un groupe. Quand on aura atteint $ni - I \geq i_1$, l'arrêt du groupe pourra s'effectuer.

Tout déclenchement accidentel du côté H.T. pourra être suivi d'une ou de plusieurs tentatives de réenclenchement. En cas d'insuccès, le groupe devra être signalé et éliminé. De même, un trop grand retard à l'allumage ou le refus total d'allumage d'une ampoule devra être signalé à bref délai.

L'ampèremètre général différentiel à contacts donne, lorsque la condition sus-indiquée de baisse de charge se vérifie, le signal de déclenchement en fermant un circuit, par un mouvement lent au bout de 3 minutes, sur un relais O'K, à temps constant. Celui-ci provoque le fonctionnement des autres organes d'arrêt.

Actuellement, on construit au Laboratoire un relais à grand retard (10 à 15 minutes) à la fermeture et à retour instantané,

devant remplacer définitivement le relais temporisé qui assure le service momentanément.

Pour le fonctionnement automatique de marche de la sous-station, d'autres appareils importants sont à considérer.

Ainsi, un relais commutateur à deux directions, constitué par la réunion de deux relais intermédiaires à palettes, est destiné à l'envoi du courant dans les parties du distributeur qui correspondent respectivement à la marche et à l'arrêt.

Afin de pouvoir répartir à peu près également le travail entre les groupes, on a installé un distributeur circulaire qui dirige l'utilisation de ceux-ci, suivant les lois du hasard. Par le jeu de la permutation automatique, on voit qu'avec le temps les probabilités pour la durée de marche de chaque groupe tendent donc à devenir égales.

Le distributeur circulaire envoie des émissions de courant dans la commande des interrupteurs à haute tension et provoque la mise en marche ou l'arrêt des groupes.

Cet appareil comprend essentiellement un balai entraîné par un moteur de très faible puissance, qui tourne lentement autour d'un axe, et vient frotter successivement sur six plots répartis uniformément sur une circonférence.

A ces plots sont raccordés les circuits de marche ou d'arrêt des groupes. Dans sa rotation, le balai recueille le courant sur six secteurs alternativement reliés aux contacts de marche et d'arrêt du relais commutateur, ce qui fait que la position du balai précédent ou suivant, pour chaque manœuvre, peut occuper un point absolument quelconque de la circonférence. Donc, le groupe ainsi désigné pour se mettre en marche, ou, s'il l'est déjà, pour s'arrêter, est pris au hasard.

Si le contacteur à courant continu d'un groupe refuse pour une raison quelconque de s'enclencher, un relais de sécurité interdit au distributeur une deuxième tentative de réenclenchement sur la H. T. et signale le refus.

Chaque relais est constitué par un fléau vertical oscillant autour d'un axe fixe à son extrémité inférieure. Deux bobines à fil fin placées de chaque côté de l'autre extrémité du fléau le font osciller dans un sens ou dans l'autre. La manœuvre d'enclenchement H.T., qui fait pivoter le fléau à gauche, excite la bobine de gauche, isole le plot de marche et enclenche la sonnerie.

La fermeture du contacteur à 600 V. excite la bobine de droite qui ramène le fléau dans sa position initiale, en rétablissant la possibilité de réenclenchement pour une manœuvre ultérieure.

Dans ce qui précède, nous ne donnons que la description des dispositifs d'automatisme, ceux-ci constituant seulement la différence entre la sous-station d'Aubagne et celle de Coulin, qui a été décrite plus particulièrement.

D'après ce que nous connaissons des deux dispositifs, nous pouvons établir une brève étude comparative des avantages ou inconvénients qu'ils représentent, pour les diverses opérations qui, normalement, s'effectuent.

COMMANDE D'UN GROUPE

Avec le dispositif d'Aubagne, un groupe quelconque de la sous-station ne se met en marche que lorsque la surcharge se vérifie dans la section alimentée, et uniquement pendant que celle-ci existe. Avec l'autre dispositif, la commande du groupe désigné par la combinaison adoptée s'effectue à une heure déterminée.

Dans le premier cas, le groupe en service s'arrête dès que la charge est tombée à zéro, durant un quart d'heure. Ce temps est le seul pendant lequel le groupe marche à vide.

Dans le second cas, l'arrêt du groupe s'effectue à heure fixe,

et il ne peut pas y avoir plus de deux arrêts par jour, donc fréquentes marches à vide si la charge est intermittente.

En cas de surcharge, un deuxième groupe de la sous-station d'Aubagne est commandé au bout de 10 secondes au plus.

En cas de non intervention de celui-ci, la commande du suivant s'effectue après un autre délai de 10 secondes ; donc le groupe ne reste surchargé que pour un temps maximum maximum de 20 secondes.

Avec l'autre dispositif, et en cas de surcharge, le groupe suivant est soumis à trois tentatives d'enclenchement respectivement de 10, 20 et 20 secondes. Au cas où les tentatives d'enclenchement échoueraient pour les deux groupes suivants, le groupe en service supporterait la surcharge pendant 100 secondes.

A la sous-station de Coulin, un groupe supplémentaire s'arrête après quelques secondes, si la surcharge est suivie d'une baisse de charge, tandis que le groupe supplémentaire de la sous-station d'Aubagne ne s'arrête, dans ces mêmes conditions, qu'après une temporisation d'un quart d'heure.

En cas de variation de la charge autour de la puissance normale d'un groupe d'Aubagne, on a la commande d'un groupe supplémentaire si la variation est fréquente ou si son amplitude est grande, et celui-ci est maintenu en service tant que sa charge ne s'est pas abaissée d'une façon continue pendant un quart d'heure au-dessous de la puissance normale.

Dans les mêmes conditions de variation de charge et d'après ce qui a été dit plus haut, on conçoit qu'à Coulin, le groupe supplémentaire s'arrête 30 secondes après une baisse de charge et se remette aussi vite en marche que possible, dès que la charge remonte, et ainsi de suite, tant que cette variation de charge, se vérifiera dans les conditions précitées.

AVARIE D'UN GROUPE

Avec le système breveté par la C.G.F.T. en cas d'avarie d'un groupe, son dispositif d'enclenchement est mis hors service automatiquement. Le groupe est mis au repos jusqu'à réparation sans autre intervention.

En cas d'avarie d'un groupe de la sous-station de Coulin, les bilames de son répéteur restent toujours sous tension et le groupe suivant, désigné par le permuteur, ne pourra se mettre en marche sans que les trois tentatives ne soient effectuées par le répéteur du groupe avarié. Ceci dure tant que l'on n'intervient pas.

PERMUTATION DES GROUPES

Comme nous l'avons vu, dans l'étude de la sous-station d'Aubagne, la permutation circulaire est permanente et automatique.

Même en cas de charge faible, si elle est intermittente, tous les groupes travaillent chaque jour.

Dans l'autre système, celui de Coulin, chaque combinaison possible est fixée par le tableau de couplage, et tant que l'on n'interviendra pas, ce sera toujours le même groupe qui se mettra en marche, les deux autres se servant que de renfort. Ceci oblige à modifier manuellement, au moins tous les huit jours, la combinaison de marche. En cas de faible charge, le même groupe travaille pendant une semaine, les autres étant au repos.

Ces comparaisons du fonctionnement des deux appareillages automatiques montrent que, théoriquement, le dispositif étudié par le service électrique du Réseau de Marseille présente des avantages incontestables sur celui de Coulin.