LA HOUILLE BLANCHE

ÉDITIONS J. REY-B. ARTHAUD, Éditeur, GRENOBLE

Abonnement pour une Année { France..... 40 francs }
 { Étranger..... 50 francs } Le Numéro : 7 francs

Compte Chèques Postaux LYON 5-84

SOMMAIRE

MONOGRAPHIE D'USINE. — Sous-Station de Redresseurs à vapeur de mercure de la Galochère, de la Société Hydro-Electrique de Fure et Morge et de Vizille, par V. SYLVESTRE et J. BARTHÉLEMY, ingénieurs.

LES FORCES HYDRAULIQUES. — Nouvelle contribution à l'étude des Barrages en arc (*Etude analytique*), par J. BOUDET, ingénieur A. et M.

HYDRAULIQUE. — Les Tuyaux multiondes frettés, par G. FERRAND, administrateur délégué de la Société Dauphinoise d'Etudes et de Montage, ingénieur aux Etablissements Bouchayer et Viallet.

LÉGISLATION. — Un Exemple de responsabilité civile d'un Concessionnaire à propos d'un arrêt de la Cour d'Alger du 30 décembre 1925, par Paul BOUGAULT, avocat à la Cour d'Appel de Lyon.

DOCUMENTATION. — Résultats récents obtenus avec les Turbines Hélices « Bell », à grande vitesse, par Alexandre PERRIG, ingénieur diplômé E. P. Z.

INFORMATIONS.

BIBLIOGRAPHIE.

MONOGRAPHIE D'USINE

Sous-Station de Redresseurs à Vapeur de Mercure de la Galochère de la Société Hydro-Electrique de Fure et Morge et de Vizille

par V. SYLVESTRE et J. BARTHÉLEMY, Ingénieurs

Le problème de l'alimentation des réseaux de traction électrique est un de ceux qui ont le plus préoccupé les ingénieurs électriciens.

Depuis le début de la traction électrique, les sous-stations de transformation étaient équipées avec des génératrices, moteurs générateurs ou des commutatrices.

L'apparition des redresseurs à vapeur de mercure, en particulier des redresseurs métalliques à grand débit, a fait faire un progrès considérable à la technique de l'alimentation des réseaux de traction. Les redresseurs se construisent maintenant couramment pour des intensités de 2.000 ampères par cylindre et on étudie des types de 10.000 et 15.000 ampères jusqu'à 600 volts.

Le développement pris ces dernières années par les redresseurs à vapeur de mercure est considérable. En France, on en trouve aux Chemins de Fer du Midi, au Métropolitain de Paris, au Nord-Sud, sur beaucoup de chemins de fer départementaux, et pour l'alimentation des tramways de Lyon, Bordeaux, Marseille, Besançon, Grenoble, etc...

Nous donnons ci-après une description de la sous-station de la Galochère des « Voies Ferrées du Dauphiné » qui a été mise en fonctionnement en 1925, en pleine Exposition de la Houille Blanche. Cette installation, absolument nouvelle dans la région des Alpes, a fait l'objet de nombreuses visites de la part des techniciens qui ont suivi les Congrès qui se sont tenus à Grenoble sans interruption pendant les mois de juillet-août 1925.

I. — HISTORIQUE

En 1901, la Société des Voies ferrées du Dauphiné, désirant substituer la traction électrique à la traction à vapeur sur ses lignes Grenoble-Gières-Domène et Grenoble-Gières-Uriage-Vizille, s'adressa pour la fourniture de l'énergie électrique, à la Société Hydro-Electrique de Vizille. Celle-ci possédait à Loula, près Vizille, une chute de 360 mètres de hauteur alimentée par les eaux provenant des lacs de Laffrey. L'usine de Loula, assurant un service d'éclairage et de force motrice, était équipée avec deux groupes turbines-alternateurs triphasés, de 900 ch. chacun, donnant directement 10.000 volts à leurs bornes.

La Société Hydro-Electrique de Vizille accepta de fournir le courant continu nécessaire à la traction et fut chargé de

l'installation complète des sous-stations. Elle s'adressa pour l'étude de cette installation à la Société Anonyme Westinghouse. L'usine étant assez éloignée du centre du réseau, on résolut d'alimenter la ligne en deux points :

1^o Près du terminus de Vizille, au moyen d'une génératrice à courant continu de 150 kW, 600 volts, actionnée directement par une turbine, ce groupe étant monté dans l'usine génératrice de Loula ;

2^o En un point intermédiaire, à la Galochère, faubourg de Grenoble, au moyen d'une sous-station de commutatrices transformant le courant triphasé à 10.000 volts, provenant de l'usine de Loula, en courant continu à 600 volts.

La génératrice à courant continu de Loula et la sous-station

de la Galochère furent mises en marche le 15 août 1902, et furent visitées par de nombreux congressistes lors du premier Congrès de la Houille blanche qui eut lieu à Grenoble en septembre 1902.

Les commutatrices Westinghouse de la sous-station de la Galochère, chacune de 150 kW, 750 t : m, sont les premières commutatrices à 50 p : s qui aient été installées en France. Elles ont assuré leur service jusqu'en juin 1925, c'est-à-dire pendant vingt-trois ans.

En 1905, la Société de Fure et Morge, ayant absorbé la Société Hydro-Electrique de Vizille, voulut bénéficier du bouclage des deux réseaux pour s'assurer la possibilité de fournir, par l'une quelconque de ses usines, la totalité de l'énergie utilisée par la Société des Voies ferrées du Dauphiné. En conséquence, la génératrice à courant continu de l'usine de Loula, entraînée jusque-là par une turbine hydraulique (1), fut transportée à Vizille et accouplée à un moteur asynchrone triphasé Westinghouse branché sur le réseau à 10.000 volts par l'intermédiaire

leurs usines de Brignoud. Ces usines ayant été reprises par la Société des Papeteries de France, l'alimentation, à l'extrémité du feeder côté Froges, est assurée, depuis peu de temps, par les usines de Lancey.

L'accroissement du trafic de la Régie Départementale qui a pris lieu et place de la Société des Voies ferrées du Dauphiné l'amena à demander à la Société Hydro-Electrique de Fure et Morge et de Vizille, le renforcement de la sous-station de la Galochère de façon que celle-ci puisse fournir un débit total de 1.200 ampères sous 600 volts.

C'est alors que, pour satisfaire aux exigences de son nouveau contrat, la Société Hydro-Electrique de Fure et Morge et de Vizille décida d'installer, à la place des anciennes commutatrices, des redresseurs à vapeur de mercure, système Brown Boveri, ces appareils étant particulièrement aptes à un service de traction grâce à leur résistance remarquable aux courts-circuits à leur capacité de surcharge et à leur rendement moyen élevé

Fig. 1. — Schéma de la sous-station de redresseurs.

1. — Transformateurs de tension du comptage.
2. — Transformateur des services auxiliaires.
3. — Transformateurs tri-hexaphasés alimentant les redresseurs.
4. — Bobines d'absorption.
5. — Cylindres redresseurs.

6. — Groupes de pompes à vide.
7. — Transformateurs d'excitation.
8. — Dispositifs d'allumage.
9. — Dispositif donnant l'alarme en cas d'élévation de température anormale des cylindres redresseurs.

d'un transformateur. Mise en service en janvier 1907, cette sous-station reçut un deuxième groupe convertisseur en 1914.

La ligne Grenoble-Gières-Domène a été prolongée par la suite jusqu'à Brignoud, d'abord, et jusqu'à Froges, ensuite.

Comme cette extension nécessitait une nouvelle source d'alimentation, les Voies ferrées du Dauphiné ont demandé aux Usines Fredet de leur fournir l'énergie nécessaire à l'aide de

(1) La station Centrale de LOULA a été transformée en juillet 1924 par la Société Hydro-Electrique de Fure et Morge et de VIZILLE, en une station semi-automatique constituée par un groupe turbine-alternateur de 500 kVA, 1.000 t : m, 3.000 volts. L'alternateur, son transformateur et leurs différents accessoires, en particulier les régulateurs automatiques de tension et de surintensité, ont été fournis par la Compagnie Electro-Mécanique.

II. — DESCRIPTION

La nouvelle sous-station de la Galochère comprend deux groupes transformateurs-redresseurs de 285 kW chacun et le matériel nécessaire à leur protection et à leur contrôle, le tout ayant été fourni et installé par la Compagnie Electro-Mécanique. La puissance nominale de la sous-station n'est donc que de 570 kW, correspondant à un débit de 950 ampères sous 600 volts. Cependant, les redresseurs supportant aisément une surcharge de 25 % pendant une demi-heure, l'installation peut fournir facilement le courant de 1.200 ampères prévu au contrat et qui, naturellement, correspond au fonctionnement en pointe.

Le local autrefois occupé par les trois commutatrices a été complètement transformé et c'est dans une nouvelle salle suré-

levée d'un mètre au-dessus du niveau de l'ancienne, qu'on a prévu l'installation du matériel nouveau.

Cette élévation du sol de la sous-station a été décidée pour éviter le retour des perturbations dues à la proximité d'un torrent qui inondait parfois la sous-station pendant la mauvaise saison.

Poste à haute tension. — Le poste à haute tension de la nouvelle sous-station est complètement séparé de la salle des redresseurs par une cloison ; de plus, les interrupteurs à haute tension sont commandés à distance et tout l'appareillage à basse tension est placé à l'intérieur du caisson du tableau de contrôle. Ces dispositions rendent impossible tout contact du personnel de surveillance avec les appareils ou barres sous tension et lui assurent le maximum de sécurité.

Dans le poste à haute tension, deux lignes de cellules ont été édifiées de part et d'autre d'un couloir central. L'une des rangées est affectée aux trois transformateurs d'alimentation des redresseurs (dont un de réserve) et aux trois bobines de self d'absorption dont le rôle sera précisé plus loin.

L'autre rangée de cellules abrite les deux arrivées à 10.000 volts, les interrupteurs automatiques protégeant les groupes transformateurs-redresseurs, les transformateurs de comptage à haute tension, ainsi qu'un transformateur de 10 kVA destiné à l'alimentation des services auxiliaires.

Les transformateurs d'alimentation des redresseurs sont du type tri-hexaphasé, c'est-à-dire qu'ils possèdent un primaire triphasé en étoile et un secondaire composé de deux enroulements en étoile dont les six extrémités de phases et les deux points neutres sont sortis sur le couvercle. Ces appareils sont à refroidissement naturel dans l'huile.

Les bobines de self d'absorption, constituées par des transformateurs monophasés dont les deux colonnes sont couplées en opposition, ont les extrémités de leur enroulement reliées aux deux points neutres secondaires des transformateurs correspondants. Les points milieux de ces bobines constituent les pôles négatifs des groupes transformateurs-redresseurs et sont reliés à la barre générale négative (schéma général : *fig. 1*).

La bobine d'absorption, encore appelée dispositif de liaison inductive, doit son nom au fait qu'elle absorbe les harmoniques multiples de trois et non multiples de six qui pourraient être introduits dans le réseau primaire du fait des redresseurs. Elle a pour autres conséquences importantes de diminuer la puissance apparente du transformateur d'alimentation, d'améliorer le facteur de puissance du groupe et de donner à sa caractéristique de chute de tension une allure telle qu'il puisse fonctionner convenablement en parallèle avec des commutatrices, depuis une charge très faible jusqu'à la pleine charge.

Chaque transformateur est protégé du côté primaire par un interrupteur automatique tripolaire à bain d'huile muni de deux relais directs à réglages indépendants du temps et de l'intensité, et d'une bobine de déclenchement auxiliaire à tension nulle. Un transformateur d'intensité à bain d'huile alimente un ampèremètre mesurant l'intensité absorbée au primaire par chaque groupe transformateur-redresseur.

La Compagnie Electro-Mécanique a pourvu le nouveau poste à haute tension de la sous-station de la Galochère des derniers perfectionnements, et, en particulier, de dispositifs d'évacuation d'huile en cas d'accident aux cuves des transformateurs ou des interrupteurs.

Salle des Redresseurs. — Dans cette deuxième partie de la sous-station, on a installé les deux redresseurs à vapeur de mercure, accompagnés chacun d'un dispositif d'entretien du vide et entourés de treillis métallique les isolant complètement du personnel. Le tableau de contrôle du poste se trouve égale-

ment dans cette salle, adossé à la cloison du poste à haute tension (*fig. 3 et 4*).

Les groupes redresseurs proprement dits se composent chacun d'un cylindre du type GRZ 136 (*fig. 2*) et d'un dispositif d'entretien du vide constitué par une pompe rotative à commande électrique et une pompe statique à vide élevé, à vapeur de mercure.

Les cylindres refroidis par circulation d'eau, comportent six anodes ; ces dernières sont simplement munies d'ailettes en fonte assurant leur refroidissement. Chacun des cylindres peut débiter en service continu un courant de 475 ampères sous une tension de 600 volts.

Une conduite de vide relie chaque redresseur au groupe de pompes cité plus haut et un robinet permet de séparer les deux appareils d'un groupe déterminé, tandis qu'une vanne spéciale commandée par huile sous pression, relie la pompe rotative à la

Fig. 2. — Redresseur BROWN BOVERI type GRZ 136, 285 kW, 600 volts, 475 ampères.

pompe statique, de telle sorte qu'en cas d'arrêt de la première, le vide peut se maintenir très longtemps à une valeur élevée.

Chaque groupe comporte enfin un dispositif indicateur de vide, système Mac Leod, grâce auquel le personnel de service peut vérifier à tout instant, par une manœuvre aisée, l'état du vide dans les cylindres et dans les conduites.

Le tableau de contrôle comporte six panneaux dont l'un est réservé au troisième cylindre à installer éventuellement. Notons en passant que ce troisième cylindre prendrait place entre les deux premiers groupes, de façon à être raccordé à une des deux pompes.

Le tableau permet la commande et le contrôle de la cellule d'arrivée, des deux groupes transformateurs-redresseurs, de trois départs à courant continu, à 600 volts, deux de 350 ampères et un de 250 ampères. Des appareils appropriés permettent en outre le comptage de l'énergie à haute tension ainsi que celui du courant continu total débité par la sous-station, tandis qu'un

ampèremètre enregistreur inscrit sous forme de diagramme le même débit continu.

Chaque redresseur comporte un appareillage spécial nécessité particulièrement par l'allumage et l'excitation. En effet, un service de traction tel que celui de la sous-station de la Galochère comporte de nombreuses périodes à charge très faible ou même nulle, pendant lesquelles il est indispensable que l'arc soit entretenu et ceci s'effectue grâce à un petit redresseur, à deux anodes, contenu dans la cuve principale. Le circuit d'excitation exige un transformateur spécial d'alimentation, une bobine de self et une résistance réglant son débit à une valeur constante.

Au moment de la mise en route, il y a lieu de provoquer l'amorçage de l'arc d'excitation, ce qui s'obtient en produisant à l'intérieur de la cuve une étincelle entre le mercure de la cathode et une pièce mobile, dite anode d'allumage.

La sous-station de la Galochère est la première installation

se réduit à un très petit nombre de manœuvres extrêmement simples. On met sous tension les barres générales à 10.000 volts et le primaire du ou des groupes transformateurs-redresseurs en fermant du tableau les deux ou trois interrupteurs dans l'huile correspondants, munis à cet effet de commandes à distance. Il suffit ensuite de fermer le ou les interrupteurs du côté continu des redresseurs pour avoir aux barres générales à courant continu la tension de 600 volts.

En effet, lorsque l'interrupteur primaire d'un groupe se ferme, un commutateur, placé en bout d'arbre, branche le transformateur d'excitation sur les barres auxiliaires à 210 volts, de telle sorte qu'au même moment les anodes principales et les anodes d'excitation se trouvent reliées à leurs transformateurs respectifs. Le transformateur d'excitation débite immédiatement dans le circuit d'allumage, provoque l'amorçage des anodes d'excitation et leur mise en service sur leur circuit particulier; un relais spécial placé dans le tableau coupe alors automatiquement le

Fig. 3. — Salle des machines de la sous-station de la Galochère.

en France qui utilise du courant alternatif pour l'amorçage. En effet, il était réalisé jusqu'à présent, à l'aide de courant continu à 110 volts produit par un petit groupe convertisseur rotatif. Grâce aux expériences de la Société Brown Boveri, il a été possible de mettre au point l'allumage par courant alternatif, ce qui, non seulement supprime un matériel assez compliqué, mais encore simplifie, comme nous le verrons plus loin, les opérations de mise en route.

Le dispositif d'allumage reste le même et comporte essentiellement un électro-aimant, placé à la partie supérieure du redresseur et dont l'armature est reliée à l'anode d'allumage. Celle-ci est attirée de haut en bas et aussitôt ramenée en arrière, par un ressort, ce qui détermine l'étincelle d'amorçage.

III. — MISE EN ROUTE

Grâce aux dispositions proposées par la Compagnie Electro-Mécanique, la mise en route de la sous-station de la Galochère

circuit d'allumage et le redresseur est prêt à fournir sa tension normale.

Cette unique manœuvre est incomparablement plus rapide que la mise en vitesse et l'accrochage d'une commutatrice et il ne faut pas oublier que la durée de la mise en route peut avoir une très grosse importance, lorsque, par suite d'un appel de courant inattendu, on est amené à mettre en route dans le plus bref délai une deuxième unité.

Bien entendu, les groupes de pompes à vide ont été mises en route au préalable par la simple fermeture d'un interrupteur rotatif placé sur le tableau. D'ailleurs, ces pompes à vide ne sont utiles que pendant les premiers mois de l'exploitation et elles peuvent être arrêtées à peu près complètement dès que les gaz occlus dans le métal de la cuve et des anodes ont été complètement expulsés par un fonctionnement d'une certaine durée.

IV. — CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT

La Compagnie Electro-Mécanique a garanti pour les deux groupes transformateurs-redresseurs des valeurs très intéressantes pour le $\cos \varphi$ ainsi que pour le rendement global calculé en faisant le rapport de l'énergie débitée du côté continu à l'énergie consommée du côté alternatif haute tension. Le tableau ci-après les indique pour chacune des charges envisagées :

CHARGES	5/4	4/4	3/4	2/4	1/4
Cosinus φ	0,95	0,94	0,93	0,91	0,88
Rendement ..	94,3	94,4	94,4	94,3	92,5

Ainsi que nous l'avons dit plus haut, ces groupes sont suscep-

teurs-générateurs, d'une part, et de commutatrices, d'autre part, celles-ci ayant fonctionné pendant vingt-trois ans à l'entière satisfaction du client, malgré le service pénible qu'elles eurent à assurer. La puissance de la sous-station de commutatrices devant être accrue pour répondre aux nécessités du trafic, il eût paru justifié de lui adjoindre une machine moderne du même genre, les premières subsistant comme réserve et au besoin comme appoint pour les pointes exceptionnelles.

Cette Société a cependant estimé, après étude approfondie, qu'elle avait avantage à adopter des redresseurs remplaçant totalement ses commutatrices de la Galochère.

Le lecteur aura certainement dégagé de l'exposé précédent les principales raisons qui l'y ont déterminée :

Supériorité considérable de rendement ;

Fig. 4. — Salle des machines de la sous-station de la Galochère.

tibles de supporter des surcharges importantes. Elles peuvent atteindre :

- 25% pendant trente minutes,
- 40% pendant quinze minutes,
- 100% pendant trois minutes.

Il est facile de constater qu'avec des rendements aussi élevés aux diverses charges, le rendement moyen journalier d'une telle sous-station se maintient à une valeur très supérieure à celui qu'on obtient avec des commutatrices et, *a fortiori*, avec des groupes moteurs générateurs. Ce rendement élevé est particulièrement intéressant pour un service de traction où la charge est toujours très variable.

V. — CONCLUSION

La Société Hydro-Electrique de Fure et Morge et de Vizille alimentait les Voies ferrées du Dauphiné au moyen de groupes

- Capacité de surcharge très élevée ;
- Sécurité de fonctionnement très grande ;
- Réduction marquée de l'encombrement ;
- Suppression presque complète de tout entretien.

Il résulte des renseignements qui nous ont été fournis par la Société exploitante que ces redresseurs se sont parfaitement comportés depuis leur mise en service. Le rendement global mensuel de la sous-station déterminé au moyen des compteurs placés d'une part sur l'arrivée à 10.000 volts et d'autre part sur les départs à courant continu à 600 volts, se tient régulièrement entre 91 et 90. Il faut noter que dans la détermination de ce rendement entre en ligne de compte la consommation des services auxiliaires : pompes à vide, pompe de circulation d'eau, l'éclairage de la sous-station et des logements des deux agents affectés à la sous-station.