ÉLECTRICITÉ

La Transformation moderne des Courants alternatifs en Courants continus.

Les Redresseurs à Vapeur de Mercure à grand débit

SUITE (1)

Par V. SYLVESTRE, Ingénieur A. M. et I. E. G.

Les difficultés de construction pour des puissances élevées furent considérables. Le remplacement du récipient en verre par un récipient en acier permet, pour de fortes intensités, la construction d'amenées étanches et isolées. Les électrodes doivent pouvoir recevoir des courants élevés, sans que des détériorations de l'isolation ou de l'étanchéité par les élévations inévitables de température soient à craindre. Un joint étanche, constitué par de l'amiante et une garniture de mercure, a parfaitement rempli ces conditions et a permis le développement du redresseur. La figure 34 représente schématiquement la disposition de cette garniture de mercure. Les plaques d'amiante annulaires horizontales peuvent être, à l'aide de l'écrou S,

Fig. 34
a) mercure — b) amiante — c) anode

fortement pressées les unes contre les autres, de telle façon que la garniture de mercure ne puisse pas être chassée, par des surpressions extérieures, vers l'intérieur du cylindre; si les surfaces jointives sont bien ajustées, le mercure est si fortement étranglé contre les parois environnantes, qu'aucune introduction d'air extérieur ne peut se produire. De cette façon, on peut construire de grands récipients de redresseurs en plusieurs pièces et y maintenir un vide élevé ($1/10.000 \frac{mv}{m}$ de colonne de mercure).

Abstraction faite des dimensions des électrodes obtenues par l'expérience, de la surface de condensation du mercure et d'autres détails, ce sont principalement les courts-circuits qui menaçaient au début d'opposer un obstacle insurmontable au déve-

oppement de la puissance des redresseurs. En particulier, la sécurité de service paraissait ne pas permettre de dépasser une tension de 220 v.

Toutes ces questions comme la condensation de gouttes de mercure à la surface de l'anode, l'entrée en contact de celles-ci avec le mercure condensé redescendant, l'irradiation par des rayons ultra-violet ou le contact direct avec le flot de vapeur jaillissant de la cathode et enfin le vide insuffisant, ont pu être résolues par les découvertes successives de formes d'exécution répondant à toutes les exigences et supprimant tout court-circuit, comme l'ont prouvé de nombreuses années de service.

La figure 35 représente les éléments fondamentaux d'une nouvelle exécution de redresseur, ayant en grande partie les mêmes

Fig. 35
a) solénoïde d'allumage — b) enveloppe réfrigérante — c) cylindre de condensation — d) plaque d'anodes — e) chambre principale — f) anode principale — g) enveloppe d'anode — h) collecteur de l'arc — i) cathode — k) anode d'allumage — l) anode d'excitation.

formes que celle déjà publiée (1). La grande chambre principale inférieure porte au milieu de sa plaque de base la cathode de mercure isolée; elle est fermée à sa partie supérieure par une

(1) Voir *La Houille Blanche*, Septembre-Octobre 1923 · Novembre-Décembre 1923; Mars-Avril 1924.

(1) Voir *Revue Brown-Boveri*, octobre 1915 et 1916.

plaque annulaire, massive, portant les anodes. Cette dernière, grâce au joint avec la garniture de mercure déjà décrite, peut être enlevée et permet ainsi d'atteindre facilement, pour toute réparation l'intérieur du cylindre et les six anodes principales. A côté des anodes principales se trouvent encore deux anodes d'excitation qui, indépendamment du courant principal, maintiennent l'excitation de la cathode constante au moyen d'un courant alternatif monophasé.

La plaque porte-anodes est surmontée par le cylindre de condensation dont le couvercle porte le solénoïde d'allumage.

Le cylindre de condensation et le cylindre principal sont entourés d'une chambre en tôle de fer dans laquelle une circulation d'eau permanente réfrigère les parois du redresseur.

On peut constater d'après la figure 35 que les anodes principales sont parfaitement bien protégées contre tout court-cir-

La construction intérieure reste identique pour des tensions de service comprises entre de larges limites; il suffit donc de tenir compte, de l'intensité du courant. La Société Brown-Boveri a construit ces dernières années (figure n° 36) trois types de cylindres pour tensions de 110 à 800 volts : le modèle G. 3/6 pour 300 ampères, le modèle G. 4/6 pour 600 ampères, et le modèle G. 5/6 pour 1.000 ampères.

Actuellement, les différents types de cylindres construits sont :

Type GRZ. 136.	Intensité maxima :	500 ampères.
Type GRZ. 56.	—	1.000 amp. (v. fig. 37).
Type GRZ. 156.	—	750 ampères.
Type GRZ. 16.12	—	1.500 ampères.

Tous ces derniers modèles de cylindres, sauf le GRZ. 56 (max. 800 volts), sont capables de maintenir des tensions continues, allant jusqu'à 3.000 volts.

Fig. 36
1.200 kw. (type G 5/6) 600 kw. (type G 4/6) 300 kw. (type G 3/6)
Cylindres de redresseurs à vapeur de mercure (anciens modèles)

cuit. Elles sont garanties d'un côté, par l'isolateur d'entrée, et de l'autre par une enveloppe cylindrique en tôle de fer. A l'embouchure de cette enveloppe d'anode, on a disposé des lames de tôles sous forme de jalousie, ayant pour but de briser le trajet de l'arc électrique de sorte que toute influence nuisible de la cathode, telle que des rayons ultra-violet, un flot de vapeur neutre, etc..., soit éliminée. Les vapeurs métalliques sans charge qui montent de la cathode sont du reste influencées par le collecteur de tôle des arcs électriques, de telle façon que ce flot de vapeur neutre, nuisible au parcours du courant, s'échappe de côté au-dessus de l'orifice central du collecteur. Seule la partie ionisée, sous l'influence du champ électrique atteindra l'anode.

Types normaux : Contrairement aux groupes rotatifs, dont les divers degrés de puissance correspondent à une série de modèles de différentes grandeurs, quelques modèles de redresseurs à vapeur de mercure satisfont à toutes les puissances courantes.

La tension normale étant de l'ordre de 650 volts, l'intensité décroît pour les tensions continues comprises entre 650 et 3.000 volts. La tension maximum, atteinte actuellement, est de 6.000 volts pour une puissance maximum de 2.000 kw. par cylindre (1).

Dans chaque modèle, la réfrigération de la cathode est constituée par le contact direct de la masse de mercure avec la plaque de base, cette dernière étant refroidie par l'eau de réfrigération. Abstraction faite de la tache de cathode, c'est-à-dire du point d'arrivée de l'arc lumineux où la température atteint plus de 2.000° C., la température moyenne ne dépasse pas 70° C. Les anodes par contre, supportent de plus hautes températures et à pleine charge, elles deviennent légèrement rouges. L'anode de

(1) Voir le rapport remarquable de M. Odermatt « Les redresseurs à vapeur de mercure dans les réseaux de tramways », au XVIII^e Congrès International de Tramways à Bruxelles, 2-7 octobre 1922.

100 ampères de l'ancien modèle G. 3/6 ne possédait pas de réfrigération spéciale. Les pertes par chaleur dégagée (correspondant à environ 1,4 kw. par anode), sont en partie livrées par les isolateurs d'entrée à la plaque d'anodes fortement réfrigérée, mais en plus grande partie par rayonnement, à l'intérieur du redresseur. Le modèle suivant G. 4/6 (fig. 38) avec une perte provenant de la chaleur dégagée d'environ 2,8 kw. par anode, a sur chacune

Fig. 37 — Redresseur type GRZ 56, ouvert (nouv. modèle)
Au milieu on voit l'anode d'allumage.

Fig. 38. — Anode de 200 A.

de celles-ci un réfrigérant de forme cylindrique à ailettes en tôle et à circulation d'eau, servant en même temps à l'amenée du courant. Ce système de réfrigération est très effectif. Pour les types à haute tension, on a adopté la réfrigération par circulation d'air, la partie de la tige de l'anode extérieure au récipient, étant munie, d'ailettes de réfrigération.

Les anodes sont formées d'un cylindre de fer de 70 à 110^m/_m de diamètre et de même hauteur.

Afin de supprimer les arêtes vives, favorables à la formation de courts-circuits, la face des anodes dirigée vers la cathode est arrondie et évidée en son milieu, ce qui a l'avantage en outre d'augmenter sa surface.

Dans les redresseurs, l'allumage se fait par contact indirect, procédé qui, parmi les autres, s'est montré comme donnant le plus de sécurité. Dans ce but, un fil d'acier de 3 ^m/_m de diamètre va du solénoïde fixé au couvercle supérieur, à travers tout le re-

dresseur, jusqu'à l'anode d'allumage qui, au repos, se trouve à environ 10 ^m/_m de la surface du mercure. Lorsque le courant traverse le solénoïde, le noyau de fer et par suite le fil d'acier et l'anode d'allumage qui y sont fixés, sont attirés en tendant le ressort *f*, jusqu'à l'entrée en contact de l'anode d'allumage et de la surface de la cathode. Le schéma des connexions (fig. 39), est compris de telle façon que la séparation des deux électrodes

Fig. 39. — Couplage de mise en marche.
a) solénoïde d'allumage. — b) anode d'allumage. — c) cathode. — f) ressort — d) contact à pression. — Ra, R2 résistance d'allumage.

à lieu instantanément, aussitôt après l'entrée en contact ; l'étincellerésultante suffit à allumer les arcs principaux. L'opération est faite en quelques secondes et remplace la synchronisation nécessaire dans les convertisseurs synchrones avant leur mise en service. Le redresseur est encore muni, en plus des petites conduites pour la pompe à air, d'un robinet à vide, et d'anneaux de levage,

Accessoires.

1) *Le transformateur.* — De même que pour les commutatrices, il existe entre la tension du courant continu, débité par un redresseur, et la tension du courant alternatif fourni, un rapport bien déterminé et constant. Dans un redresseur hexaphasé, pour un courant continu de 230 volts, la tension secondaire nécessaire par phase a été déterminée précédemment égale à 218 volts(1). Il est très rare que cette tension soit fournie directement, le plus souvent la haute tension disponible devra être transformée en basse tension. Le transformateur doit encore avoir du côté secondaire le point neutre dimensionné pour l'intensité de courant continu totale demandée.

La puissance du côté primaire P_1 correspond à la puissance du courant continu demandée P_c , considération prise du rendement, et du facteur de puissance

$$P_1 = \frac{P_c}{\eta \cos \varphi}$$

La puissance primaire du transformateur doit être choisie seulement de 20 % $> P_c$, car η et $\cos. \varphi$ atteignent en moyenne chacun environ 90 %. Du côté secondaire par contre, il faut tenir compte d'une puissance apparente notablement plus forte

$$P_2 = n \, e_p \, i_p$$

ou n est le nombre de phases, e_p et i_p la tension et le courant de phase. Après introduction des valeurs déjà obtenues pour e_p et i_p on aura :

$$P_2 = n \frac{e_c + \varepsilon + e_1 \cdot e_s}{1.35 \, c_2} \times \frac{i_c}{\sqrt{\eta \, c_3}}$$

(1) Voir *La Houille Blanche*, Novembre-Décembre 1923, p. 221

et pour $n = 6$

$$\begin{aligned} C_1 &= 0.2 & C_2 &= 0.97 & C_3 &= 1.15 \\ \varepsilon &= 20 \text{ volts} & e_s &= 30 \text{ volts.} \\ P_2 &= 1.61 (e_c + 26) i_c \end{aligned}$$

C'est-à-dire que le secondaire du transformateur destiné à un redresseur haxaphasé, doit être choisi de 70 à 80 % plus grand que ne le demande la puissance du courant continu. Il faut insister à nouveau, ici, sur le fait, que l'augmentation de la puissance fournie n'occasionne pas une dépense proportionnelle en matériel, mais qu'elle dépend uniquement de la valeur momentanée du courant secondaire. Dans le redresseur hexaphasé, la valeur effective du courant secondaire du transformateur est très élevée, en comparaison de la valeur du courant continu résultant et nécessite donc une section de conducteur plus grande.

Primaire et secondaire demandent ensemble une puissance du transformateur, d'environ 40 à 50% plus élevée, que celle correspondant à la puissance demandée au courant continu.

Dans un transformateur pour redresseur monophasé, on a de même la relation :

$$P_1 = \frac{P_c}{\tau_i \cos \varphi}$$

Au secondaire, ainsi que cela a déjà été montré, la somme des deux courants de phase est $\sqrt{2}$ fois plus grande que le courant continu à fournir.

On a alors :

$$P_2 = \sqrt{2} i_c \cdot \frac{e_c + \varepsilon + C_1 e_s}{0.9 \cdot C_2}$$

ou avec : $C_1 = 0,2$ $C_2 = 0,98$ $\varepsilon = 20$ volts $e_s = 30$ volts

On obtient sensiblement : $P_2 = 1,60 (e_c + 26) i_c$, c'est-à-dire la même valeur que pour le redresseur hexaphasé. En plus des trois bornes ordinaires du côté haute tension, des six bornes et du point neutre du côté basse tension, le transformateur possède encore des prises permettant une variation de $\pm 3,5$ % de la tension secondaire, et par conséquent une correction de la tension du courant continu fourni.

Bobines de self d'anodes. — Pour toutes les valeurs courantes d'intensité de courant, la chute de tension dans l'arc est pratiquement constante si l'on considère sa faible diminution entre la marche à vide et la marche en charge. Le courant par anode ne pouvant pas, pour des raisons constructives, atteindre une valeur quelconque, il faudra, à partir d'une certaine limite de l'augmentation de puissance, coupler plusieurs anodes, ou plusieurs redresseurs en parallèle. La caractéristique négative de l'arc $\varepsilon = f(i)$ déjà mentionnée, est cause qu'un service en parallèle ne peut être possible, que si une chute de tension extérieure additionnelle, transforme la caractéristique tension en fonction de l'intensité des circuits en parallèle, en une caractéristique positive, c'est-à-dire en une caractéristique, pour laquelle, à un accroissement de courant correspond aussi un accroissement de la chute de tension totale. Ceci peut être obtenu très simplement, lors de la connexion de plusieurs redresseurs à un seul transformateur, par l'insertion de bobines de self entre le transformateur et les redresseurs ; cette disposition est d'ailleurs à rejeter autant que possible, car l'expérience a montré qu'elle avait parfois, pour conséquence, d'amplifier les surtensions qui peuvent se produire dans le circuit alternatif basse tension. La tendance actuelle est d'alimenter les cylindres redresseurs par des transformateurs individuels, dans ce cas, chacun des ensembles transformateurs-redresseurs ayant une caractéristique positive, ni les bobines de self d'anodes, ni les sectionneurs d'anodes ne sont nécessaires,

Le dispositif de mise en marche. — Pour la mise en marche du redresseur, c'est-à-dire pour l'allumage de l'arc auxiliaire entre l'anode d'allumage et la cathode de mercure, un courant de 5 ampères et 110 volts est nécessaire. En général, cette énergie est fournie par un petit groupe convertisseur formé d'un moteur asynchrone accouplé directement à une génératrice à courant continu. Un contact à pression situé sur le tableau permet de fermer le circuit d'allumage, d'où le solénoïde d'allumage reçoit 2,0 à 2,5 ampères et l'anode d'allumage environ 5 ampères. Des résistances spéciales placées derrière le tableau servent à limiter convenablement le courant en question. Un ampèremètre gradué pour 10 ampères en permet le contrôle.

L'allumage au moyen d'une électrode auxiliaire mobile, alimentée par du courant continu, est jusqu'à présent la méthode la meilleure. Les essais d'allumage par induction, comme celui qui est employé dans les lampes à vapeur de mercure, ou par l'utilisation d'un courant alternatif au lieu d'un courant continu, comme dans les petits redresseurs à récipient de verre, n'ont donné jusqu'ici que des résultats défavorables. Il est très possible, par contre, que dans un avenir prochain, on puisse remplacer le groupe d'allumage par des cathodes incandescentes dans une atmosphère d'argon.

Dans les installations de redresseurs pour la charge des batteries d'accumulateurs, le courant d'allumage peut être fourni par la batterie elle-même. On peut alors supprimer le groupe de mise en marche. La figure 40 représente un schéma de connexions

Fig. 40. — Allumage d'un redresseur par la batterie à charger.

pour allumage par la batterie à charger. Ce dispositif a été appliqué, avec des frais d'installation minimes, dans plusieurs installations.

Excitation. — Dans les installations à service discontinu, par exemple dans les chemins de fer électriques, la demande d'énergie tombe parfois à zéro. Si dans ce cas, le courant continu est fourni par un redresseur, l'arc s'éteindra et le personnel de service devra intervenir pour le rallumer lors d'un nouvel appel d'énergie. Ceci n'est naturellement pas admissible. Afin de garder la cathode de mercure en état de service permanent, on munit le redresseur d'une ou de deux électrodes auxiliaires qui maintiennent un arc entre l'anode auxiliaire et la cathode, indépendamment du courant principal. La désignation « d'excitation » a été donnée à ce procédé.

On peut employer pour l'arc d'excitation, du courant continu ou du courant alternatif, 5 ampères sous 20 volts. Le courant alternatif (fig. 41) a l'avantage de permettre l'excitation simultanée de plusieurs unités de redresseurs, indépendamment les uns des autres, au moyen de petits transformateur

dexcitation. Ces transformateurs dimensionnés pour une puissance de 1,0 KVA peuvent fournir au secondaire 2×130 et 2×60 volts. La plus basse de ces tensions ne peut être utilisée, dans le but de réduire les pertes par excitation, qu'avec un vide suffisant dans le redresseur. Le primaire demande une puissance de 700 et respectivement 300 watts. Derrière le tableau de com-

Fig. 41. — Excitation par courant alternatif.
a) transformateur principal. — b) transformateur d'excitation. — c) bobine de self d'amortissement.

mande, à côté du transformateur correspondant, on place une bobine de self et une résistance qui servent à stabiliser le courant d'excitation.

La pompe à vide. — La pression intérieure normale dans un redresseur est d'environ $1/10.000 \frac{mm}{m}$ de mercure. Le but à atteindre est de maintenir ce vide élevé

Fig. 41a. — Coupe de la pompe auxiliaire. (schéma de principe).
a) tuyaux de communication. — b) pompe à vide élevé. — c) robinet. — d) clapet de retenue. — e) pompe auxiliaire.

invariable même lors de grandes charges, c'est-à-dire d'éviter toute introduction d'air. La construction des redresseurs a fait de si grands progrès que cette dernière condition, soit une étanchéité pratiquement parfaite du récipient d'acier, peut être obtenue sans grande difficulté.

Si le redresseur est parfaitement étanche, la durée de fonctionnement de la pompe à vide, mise en action au début, n'est qu'une question de temps. Elle fonctionnera jusqu'à ce que les

résidus de gaz mis en liberté par l'élévation de température aient été éliminés à tel point, que le redresseur puisse continuer à fonctionner sans l'intervention de la pompe.

Avant d'atteindre cet état, la pompe à vide doit cependant aspirer des quantités considérables de gaz et de vapeur d'eau.

Grâce aux nouvelles pompes à vide excessivement efficaces que nous décrirons plus loin, combinées avec des sécheurs, l'évacuation d'air préliminaire, dans les ateliers et dans les endroits d'utilisation, pendant laquelle le redresseur débite avec une intensité croissante sur des résistances, ou sur le réseau, dure seulement, trois à quatre jours. La continuation de l'évacuation de l'air se fait ensuite en service normal à l'aide de la pompe à vide; on augmente alors graduellement la charge du redresseur en se basant sur la lecture de l'indicateur de vide. L'expérience a montré que le redresseur peut fonctionner à pleine charge au bout de deux semaines et que la suppression de la pompe à vide peut se faire environ après trois mois de fonctionnement

Fig. 42. — Groupe moto-pompes à vide, du type G R L W, avec indicateur de vide, système McLeod.

La coupe d'une pompe à vide élevé, telle qu'elle est employée pour les redresseurs, est représentée par le schéma de principe de la figure 41a. Le groupe représenté sur la figure 42 se compose d'une pompe à vide rotative auxiliaire, et d'une pompe à vide élevé à mercure, basée sur la propriété que possèdent les jets de vapeur d'entraîner les molécules d'air. La pompe auxiliaire à vide, entraînée par un moteur asynchrone de $\frac{1}{2}$ HP produit un vide d'environ $0,01 \frac{mm}{m}$. Ce vide est porté à $0,0001 \frac{mm}{m}$ par la seconde pompe. En plus de la sécurité du vide élevé, que cette

dernière procure, elle a l'avantage d'extraire entièrement les gaz les plus légers comme l'hydrogène, même à de hauts degrés de dilution. Une plaque de chauffe placée dans son socle et consommant environ 500 watts est utilisée pour le service de la pompe à mercure. Le jet de vapeur de mercure développé s'élève tout d'abord verticalement; à la partie supérieure un chapeau conique le projette contre les parois du récipient où il se condense. La figure de principe N° 41 *a* représente le type de construction exécuté par Langmuir. La quantité d'eau de réfrigération nécessaire est d'environ un litre par minute. Le jet de vapeur de mercure agissant constamment, aspire les gaz qui se condensent dans la partie inférieure du récipient, d'où ils sont expulsés dans l'atmosphère par la pompe auxiliaire.

Le mode de fonctionnement de la pompe à huile à vide, est compréhensible si l'on examine la figure N° 41 *a* sur laquelle le tambour excentrique et la palette sont nettement visibles. Pour éviter qu'en cas d'arrêt de la pompe à vide, l'huile ne s'introduise dans les conduites à vide par suite de la pression atmosphérique extérieure, la tubulure d'aspiration est munie d'un clapet de retenue, sous forme d'un flotteur en aluminium à sièges coniques et d'un robinet d'arrêt. En cas d'arrêt du redresseur, il suffit de fermer le robinet de la pompe auxiliaire à vide. Ce robinet était jusqu'à ces derniers temps commandé à la main ou par électro-aimant; maintenant il est prévu pour être commandé par huile sous pression. A cet effet, une petite pompe à huile est montée en bout d'arbre de la pompe à vide et détermine dès la mise en route du moteur la pression d'huile nécessaire à l'ouverture du robinet; en cas d'arrêt du moteur, le robinet se ferme donc automatiquement. Il est à noter, que toutes les pompes à vide, sont actuellement exécutées, conformément au modèle représenté par la figure 42.

Dispositif de mesure du vide. — L'estimation du vide se fait à l'aide de l'indicateur de vide de Mc' Leod. Cet appareil est basé sur le fait qu'une quantité déterminée de gaz, à une pression extérieure déterminée, pourra être d'autant plus comprimée que sa pression initiale est petite.

Dans la position de repos de l'indicateur de vide (fig. 43) la sphère de mesure est remplie par le mélange de gaz et d'air con-

Fig. 43. — Indicateur de vide de Mc' Leod.
(à gauche, en position de repos, à droite en position de mesure)

tenu dans le redresseur. Ce petit volume de gaz sera comprimé dans le tube capillaire par l'élévation de mercure, lors du fonctionnement de l'appareil. On fera monter le mercure dans le tube en verre en communication avec le redresseur, jusqu'à ce qu'il soit arrivé à la même hauteur que le sommet du tube capil-

laire. La pression initiale, c'est-à-dire le vide dans le redresseur, peut être facilement évalué à l'aide de la loi générale des gaz ($p \cdot v = \text{constante}$) la différence (h) entre la hauteur des colonnes de mercure dans les deux tubes étant connue. Désignons par V le volume du gaz au repos dans la sphère de mesure, le tube capillaire et le tube de communication (ce volume (V) est à la pression cherchée : p_x en $\frac{\text{mm}}{\text{m}}$ de mercure) et soit v le volume dans le tube capillaire après la compression. Nous aurons :

$$V \cdot p_x = v \cdot h, \text{ d'où } p_x = \frac{v}{V} \cdot h.$$

En calibrant et mesurant les volumes entrant en ligne de compte, on pourra obtenir pour l'indicateur de vide, une échelle qui donnera par lecture directe le vide à mesurer.

Pour utiliser l'indicateur de vide Mc' Leod avec les redresseurs, il a fallu lui donner une forme constructive et résistante. Les appareils de verre sont placés à l'intérieur d'un bâti métallique pouvant être placé aux hauteurs convenables à l'aide d'une manivelle et d'une poulie.

Le manomètre décrit ci-dessus est l'appareil donnant le moyen le plus sûr pour l'appréciation de vides très élevés, car il peut donner distinctement des différences de pression de l'ordre de : un millionième de $\frac{\text{mm}}{\text{m}}$ de mercure. Il ne permet pas cependant une observation constante de la pression. Dans ce but, diverses méthodes électriques de mesure ont été réalisées. Une partie de ces dernières ont, en plus d'une exactitude suffisante, l'avantage de permettre un contrôle à distance.

La figure 44 représente une de ces méthodes basée sur la dépendance existant entre la pression et la conductance dans le re-

Fig. 44. — Méthode de mesure du vide d'après le principe de la conductance.

Fig. 45. — Méthode de mesure du vide, d'après le principe du bolomètre.

dresseur. On met un petit transformateur T , ayant au secondaire une tension d'environ 200 volts en série avec un voltmètre et une anode spéciale. L'aiguille du voltmètre monte avec l'augmentation du vide, mais ses indications ne sont pas tout à fait indépendantes de la charge du redresseur. On ne peut donc avoir ainsi qu'un contrôle du vide et non pas une mesure proprement dite. Ce contrôle est obtenu très simplement et d'une façon suffisamment exacte.

La figure 45 représente un dispositif basé d'un côté sur la grande variation de la conductibilité thermique de l'air raréfié et de l'autre, sur l'accroissement de la résistance électrique d'une feuille de métal avec l'augmentation de température. Une mince feuille de platine, d'une résistance d'environ 25 ohm est placée dans un récipient de verre communiquant avec le redresseur et forme avec trois résistances extérieures r_1 , r_2 et r_3 un milliampèremètre et une batterie (b), un pont de Wheatstone. Les faibles variations de pression, atteignant jusqu'à 0,0001 $\frac{\text{mm}}{\text{m}}$ de mercure peuvent être déterminées avec suffisamment d'exactitude à l'aide de ce dispositif. En outre, les lectures sont complètement indépendantes de la charge du redresseur. Le tube de mesure

(L) peut être intercalé aisément entre le redresseur et la pompe à vide. Quant à l'instrument de lecture directe, on le place de préférence sur le tableau de commande.

Le socle. — Le potentiel du cylindre du redresseur, par rapport à la terre, n'est qu'un peu plus faible que celui de la cathode isolée. On ne pourra donc procéder ici à une mise à la terre, ainsi que cela se fait ordinairement pour les autres machines électriques, car de petites décharges par arc se produiraient entre les anodes et le bâti de métal. On utilise alors un dispositif isolant tout le cylindre du redresseur en le plaçant sur six isolateurs-supports. Ces derniers reposent de leur côté sur un socle de fer forgé ou de fonte. (Voir installation figure 46).

Dans les anciens modèles de redresseurs, on utilisait le socle comme emplacement pour les bobines de self d'anodes, les

La réfrigération. — Dans le cas le plus simple, c'est-à-dire lors d'une réfrigération directe par l'eau courante, il suffit d'installer des conduites d'amenée et d'évacuation (fig. 47). Suivant la température ambiante, il faut de 0,5 à 1 litre-minute d'eau de réfrigération pour 100 ampères courant continu, débités par le redresseur. L'augmentation de température de la plaque d'anodes est alors de 15° à 30° C.

Si l'on ne peut pas disposer d'une quantité d'eau suffisante ou si l'eau disponible est de mauvaise qualité (calcaire ou acide), on doit procéder à une réfrigération de l'eau de circulation elle-même dans des réfrigérants (fig. 48). Pour un redresseur débitant un courant de 500 ampères la perte totale à pleine charge atteint : $20 \text{ V.} \times 500 \text{ A.} = 10 \text{ KW.}$, soit environ 2,4 cal/kg. par seconde.

Pour la réfrigération de l'eau de retour et le maintien de la

Fig. 46. — Installation de deux cylindres redresseurs, d'une puissance totale de 1000 kw. (courants primaire triphasé 6000 volts, 50 périodes, courant continu à 600 volts)

coupe-circuits et l'ensemble des connexions principales. Les parois latérales étaient facilement démontables et permettaient ainsi de placer, les uns à côté des autres, un nombre quelconque de redresseurs. Leur socle commun formait un tout, facile à installer, dans les salles de machines.

Nous avons vu qu'actuellement les bobines de self d'anodes et les coupe-circuits étaient dans la plupart des cas supprimés. Lorsqu'ils existent, ils sont montés derrière le tableau de commande. Cela permet de réduire le socle à un simple anneau de fonte. Dernièrement, il a été construit des redresseurs mobiles sur galets, ce qui rend tout engin de levage superflu et permet de les disposer derrière le tableau. En cas d'avarie, le cylindre du redresseur peut être séparé des autres appareils du groupe et transporté dans un emplacement favorable aux recherches et aux réparations.

plaque d'anodes (organe du redresseur le plus chaud) à une température d'environ 53° C., de bons résultats ont été obtenus avec des réfrigérants en tôles ondulées et, ces temps derniers, avec des tuyaux de fonte munis d'ailettes. La tuyauterie doit être d'assez grand diamètre (30 à 40 $\frac{\text{mm}}{\text{m}}$) afin de diminuer la perte de charge. Il est à recommander d'assurer la circulation de l'eau par une pompe.

On peut prévoir aussi, dans le cas d'un service forcé ou d'une température ambiante très élevée, un apport d'eau fraîche. Dans les régions du Midi où la température des locaux varie pendant de longues périodes entre 30 et 35° C., la surface du réfrigérant devrait être de très grande dimension. On peut, pour les mêmes conditions de service, diminuer cette dimension d'environ un tiers par l'adjonction d'une petite pompe rotative à grande vitesse et d'un ventilateur.

La relation, entre la température et la pression de la vapeur de mercure dans le cylindre, est représentée sur la figure 50. On peut remarquer, d'après cette figure, qu'avec une pression maximum admise dans le redresseur de $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$ de mercure, la température des parois peut croître jusqu'à 75°C. , c'est-à-dire que pour une température ambiante de 35°C. , la surélévation de tempéra-

Fig. 47. — Schéma de la réfrigération par eau fraîche.

Fig. 48. — Schéma de la réfrigération de l'eau de retour.

ture peut atteindre au maximum 40°C. Lors de pressions plus élevées entre $0,2$ et $0,3 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$ de mercure, il pourrait se produire des décharges par court-circuit dans le redresseur.

5) Exploitation.

Mise en service. — L'abolition de toute synchronisation est un des avantages principaux du redresseur. Il suffit, comme préparatif de mise en service, de chauffer à blanc un point de la surface de la cathode. Comme cela a déjà été dit plus haut, on em-

Fig. 49. — Schéma de la réfrigération de l'eau de retour avec pompe de circulation et ventilateur.

ploie pour cela une anode mobile d'allumage. Le courant d'allumage peut être fourni par exemple, par une petite dynamo de 110 v. et 5 ampères ou par une batterie d'accumulateurs. Avant de mettre le redresseur en charge, dans le cas d'excitation indépendante, il est bon de mettre celle-ci en circuit et de faire débiter ensuite le redresseur avec un courant de 50 à 100 ampères sur une résistance de charge auxiliaire. Avec des redresseurs ayant été longtemps en service et ayant atteint un vide suffisant, cette règle peut être abolie et observée seulement pendant les premiers mois. Il est bon de charger, et de chauffer individuelle-

ment les anodes après une interruption de service de plusieurs semaines, étant donné la propriété de l'arc électrique de ne pas se répartir également sur les anodes après un long arrêt, ce qui ferait courir le risque de courts-circuits internes. Il est aussi nécessaire de contrôler le vide existant, avant chaque mise en service, et l'on doit généralement en premier lieu actionner la pompe à vide.

La mise en service de nouvelles installations, qui exige cinq à dix minutes, peut être dans des installations existant déjà depuis un certain temps, réduite à une seconde. Dans ces dernières, il suffit, après avoir enclenché l'interrupteur haute tension, d'agir sur le contact d'allumage, après quoi, la charge peut être introduite directement. La fourniture de courant continu s'obtient donc aussi simplement qu'avec par exemple une batterie d'accumulateurs.

Mise en parallèle. — Pour l'alimentation d'un réseau, on peut aussi bien mettre plusieurs redresseurs en parallèle, que des grou-

Fig. 50. — Diagramme température-pression.

pes rotatifs à courant continu. La répartition du courant est parfaitement assurée, grâce à la modification de la caractéristique de tension des redresseurs, soit par la construction de groupes indivisibles transformateurs-redresseurs lorsqu'ils sont alimentés en haute tension, soit par l'emploi de bobines de self et de la liaison de ces dernières, par un enroulement additionnel, dans le cas du branchement direct de plusieurs cylindres sur les mêmes barres basse tension du côté alternatif. La chute de tension à faible charge dans de nouvelles installations est sensiblement plus grande qu'à pleine charge. La mise en parallèle de plusieurs redresseurs peut être, par conséquent, grandement facilitée par le couplage du redresseur non encore en service, sur une résistance de charge auxiliaire amenant sa chute de tension à la même valeur que celle des redresseurs déjà en service. Dans les installations depuis longtemps en exploitation, cette règle est aussi superflue et le couplage des redresseurs se fait aussitôt après leur allumage.

S'il s'agit, de la mise en parallèle de redresseurs et de groupes rotatifs, il faut alors que la chute de tension de toutes les sources de courant, soit autant que possible, la même. De petites différences peuvent être admises. Pour des écarts plus grands (30 à 50%) entre les valeurs de la chute de tension à pleine

charge, des différences marquées se produisent dans la répartition du courant. Ces différences ne peuvent être éliminées que par une adaptation des caractéristiques de charge individuelles. La chute de tension dans le redresseur peut être réglée dans de grandes limites. On peut obtenir par des moyens simples, entre la marche à très faible charge et la pleine charge, une chute de tension totale de 3 % (bobines de self d'absorption). Si l'on désire une chute beaucoup plus forte on peut, par le choix de grandes bobines de self d'anodes ou par un couplage approprié du transformateur, la faire monter jusqu'à 20 %.

Il existe déjà de nombreuses installations de redresseurs travaillant en parallèle aussi bien avec des batteries d'accumulateurs qu'avec des commutatrices ou des groupes moteurs générateurs. Ainsi qu'il a déjà été dit, le service en parallèle est tout à fait sûr et satisfaisant. Dans le cas de batteries d'accumulateurs, ces dernières peuvent, de même qu'avec des génératrices rotatives, servir au tamponnement et procurer une charge constante du redresseur. La mise au point de la charge résulte de la régulation de la tension du redresseur.

Régulation de la tension. — Le réglage de la tension du courant continu fourni par le redresseur ne peut se faire qu'en agissant sur la tension du courant alternatif. Ceci peut être obtenu de deux façons : soit par la variation de la self-induction du côté alternatif, c'est-à-dire avec des bobines de self, soit directement par la variation de la tension primaire ou secondaire du transformateur lui-même. L'insertion de bobines de self entre le redresseur et le transformateur ne peut se faire que pour de toutes petites puissances, pour une puissance de courant continu fourni, d'environ 20 à 50 kw. Dans ces limites même, cette insertion ne peut intervenir que s'il s'agit de la charge de batteries d'accumulateurs où la limitation de l'intensité du courant de la charge est plus importante que la régulation de la tension.

Pour la mise en parallèle de plusieurs redresseurs à l'aide de bobines de self, on peut aussi utiliser, pour la régulation de la tension, une subdivision en plusieurs étages de l'enroulement additionnel (fig. 51). Les courbes de régulation obtenues sont représentées sur la figure 52.

Fig. 51. — Régulation de la tension à l'aide des bobines de self d'anodes.

Fig. 52. — Courbes de régulation obtenues avec le couplage de la figure 51.

Le dispositif employé le plus fréquemment consiste en un transformateur survolteur à échelons ou dans la variation du nombre de spires du primaire du transformateur lui-même. On utilise aussi le régulateur d'induction, quoique son prix soit plus élevé, que celui d'un transformateur à échelons, car il a l'avantage d'assurer une régulation constante et sans à-coup de la tension.

Si le redresseur doit débiter à toute charge avec tension autant que possible constante, Monsieur J. Kubler (Ingénieur à la Société Brown-Boveri) recommande l'emploi d'une bobine de

self dite d'absorption (fig. 53). Par suite des connexions adoptées, les courants continus parcourant les deux moitiés d'enroulement se font équilibre, tandis que les courants alternatifs sont totalement absorbés. Cette bobine de self d'absorption en plus de la réduction de la chute de tension à environ 3 % entre la marche à vide et la marche à pleine charge, cause aussi une diminution des courants effectifs de phase. Des oscillogrammes mon-

Fig. 53. — Couplage de la bobine de self d'absorption.

Fig. 54. — Allure de la courbe de la tension avec bobine de self d'absorption.

trent qu'on peut obtenir une action simultanée des trois phases. Le recouvrement important des courants de phases ainsi obtenu procure du côté courant continu un courant faiblement pulsatoire favorable. La puissance de la bobine de self d'absorption correspond aux 10 % environ de la puissance du transformateur spécial. D'après la courbe de la tension, conforme à celle représentée sur la figure 54, on voit qu'à une décharge complète du redresseur correspond une augmentation importante de la tension continue. La chute de tension entre la marche à vide et la pleine charge est limitée à quelques pour cent, car une fraction d'ampère suffit déjà pour dépasser le coude de la courbe.

Dans le cas où, pour une charge croissante, une caractéristique croissante de la tension est exigée, on peut de même obtenir un dispositif approprié (fig. 55). Le principe sur lequel ce couplage est basé, est que la tension du courant fourni par un

Fig. 55. — Couplage de compoundage.

transformateur survolteur, inséré entre le redresseur et le transformateur principal, variera à l'aide d'une bobine de self compoundée, quand le courant de charge augmentera. La saturation croissante de la bobine de self compoundée abaissera pratiquement à 0, à pleine charge, son effet de réactance. Un surcompoundage de 10 %, et plus, pourra s'obtenir par un choix judicieux du transformateur survolteur.

Surcharge. — La limite de charge d'un redresseur est déterminée principalement par l'augmentation de la pression correspondant à l'accroissement du débit du courant et à l'échauffement qui en résulte. Si l'on dépasse cette limite, la forte augmentation de pression qui s'ensuivra aura pour conséquence une forte chute de tension du courant continu fourni, et la possibilité de formation de courts-circuits. La charge admissible constante du redresseur pourrait donc coïncider avec la charge maximum. Pour les mêmes considérations que pour les surcharges normales des groupes rotatifs, la charge constante du redresseur sera choisie un peu plus faible qu'il ne

longues périodes de service. Il est bon par contre et en particulier pendant les premiers mois, il est nécessaire de vérifier le vide régnant dans le redresseur et le bon état des différents joints étanches. Le contrôle de l'étanchéité se fait le plus aisément à la fin des périodes de service quand, par suite de l'échauffement, le mercure du joint est visible à l'embouchure du trou de remplissage. Les appareils auxiliaires, tels que la pompe à vide et éventuellement le transformateur d'excitation nécessitent aussi quelque surveillance. Cette dernière sera fortement réduite dans le cas d'une circulation d'eau de réfrigération sans appareils spéciaux et d'une excitation du redresseur par courant

Fig. 56. — Compagnie du Chemin de fer Métropolitain de Paris, Sous-station de la Nation (Intensité normale côté continu 1800 ampères)
Diagramme de la charge débitée par le poste, le 5 Mars 1924 (Service journalier normal)
Ce diagramme démontre d'une manière péremptoire la remarquable aptitude des redresseurs à supporter les pointes les plus dures

serait possible de l'admettre d'après ce que nous disons ci-dessus. En général, les redresseurs peuvent supporter les surcharges suivantes, 25 % pendant une demi-heure, 50 % pendant 15 minutes et 100 % pendant quelques minutes à condition, bien entendu, de dimensionner en conséquence les transformateurs d'alimentation. Ceci correspond, à ce qui se présente par exemple dans l'alimentation d'un réseau de tramways ou de chemin de fer (voir fig. 56). Le redresseur est insensible aux courts-circuits rapides dans le circuit du courant continu, vu l'absence d'effort mécanique. Il est protégé contre des court-circuits de longue durée, avant les anodes, du côté courant continu et du côté primaire de transformateur principal, par des dispositifs de sécurité.

Service intermittent. — L'échauffement du redresseur, par suite de sa chute de tension constante, est non pas proportionnel au carré de la charge instantanée, mais à sa valeur moyenne. Cependant, le redresseur possédant dans son circuit des bobines de self, des transformateurs, etc..., dans le cas d'un service intermittent, la valeur moyenne des carrés ne doit pas dépasser le carré de la charge normale. Outre les surcharges momentanées, il se produit aussi des intervalles de temps, pendant lesquels la demande de courant peut devenir absolument nulle, par exemple lors de l'alimentation de chemins de fer d'intérêt local à faible trafic. Il est nécessaire alors d'avoir recours à une excitation indépendante de la cathode afin que le redresseur soit toujours prêt à fonctionner. Si ces périodes sans consommation de courant sont au maximum de 15 à 30 minutes, le redresseur peut rester sous tension pendant toute leur durée. Dans le cas d'arrêts plus longs, une heure et plus, il est préférable, au contraire, de couper le courant haute tension, car la vapeur de mercure se précipitant sur les anodes, en train de se refroidir, pourrait causer des courts-circuits.

Entretien. — L'arc électrique n'utilise aucun organe du redresseur, l'échauffement laissant les anodes intactes et ne provoquant aucune perte du mercure de la cathode. L'entretien du redresseur peut donc être réduit à un minimum pendant de

alternatif. En général, après quelques mois de service, on peut supprimer la pompe à vide. La sécurité d'exploitation du redresseur est alors pareille à celle du transformateur de courants alternatifs. Elle est même si grande, que la Compagnie Electro-Mécanique est en mesure d'établir des sous-stations avec redresseurs à vapeur de mercure à fonctionnement complètement automatique. (Voir plus loin, sous-station de la rue de Mulhouse, à Nancy).

La figure 57 représente le schéma de principe d'une sous-station redresseurs dans laquelle on admet que le groupe

Fig. 57. — Installation automatique de redresseurs.

convertisseur d'allumage et le moteur de la pompe peuvent être mis en marche sans démarreur. Le courant débité par le redresseur, cesserait naturellement en cas d'interruption imprévue de la tension primaire. Lors du retour de la haute tension, le groupe d'allumage et la pompe à air se remettent automatiquement en service. Une fois l'allumage exécuté, le courant d'excitation i_2 agit sur deux interrupteurs automatiques qui coupent le circuit du groupe d'allumage. La figure 57_a représente le schéma général de principe des connexions d'un redresseur à vapeur de mercure à 6 anodes.

Installations à trois conducteurs. — La figure 58 représente le schéma le plus simple d'un montage à trois conducteurs. Deux redresseurs sont couplés en série et alimentent séparément les deux moitiés du réseau. L'inconvénient de ce couplage est que les redresseurs doivent être prévus pour la tension moitié. Leur rendement en est alors relativement diminué. Comme nous l'avons vu pour les redresseurs en verre, il est donc avantageux de prévoir le redresseur pour la tension totale du courant continu et de relier les conducteurs par un groupe équilibreur (figure 59) ou une batterie tampon. Abstraction faite de la réduction du prix de l'installation, ce montage a aussi l'avantage d'un meilleur rendement. La grandeur du groupe équilibreur est déterminée par la valeur des déséquilibres qui peuvent se produire dans la charge des deux ponts.

Rendement et facteur de puissance.

Les pertes dans le redresseur sont causées par la chute de tension dans l'arc. Cette chute indépendante de l'intensité du courant, ainsi que de la tension, est, comme nous l'avons vu, constante et égale à 15 à 20 volts. La perte dans le redresseur seul s'obtiendra par conséquent, par le produit de la chute de ten-

le transformateur principal. Le rendement du redresseur, constant à toutes charges, est influencé par les pertes dans le fer du transformateur ; aux environs du quart de charge le rendement total commence à baisser si la charge diminue encore. Par contre, ce rendement total ne varie pas entre 1/4 et 5/4 de charge, ainsi que nous le montrerons plus loin. (Voir figure n° 61).

APPAREILS	Pertes en watts pour un redresseur du type G 4/6 - pour 500 ampères - 600 volts	PERTES EN %	REMARQUES
Redresseur ...	10.000 env.	3.1	= constante à toute charge (en %).
Transformateur	9.000 —	2.8	Pour des charges partielles le rendement diminue.
Bobines de self d'anodes (I).	480 —	0.15	Les pertes diminuent approximativement proportionnellement à la charge.
Excitation par courant alternatif	600 à 300 —	0.09	Pertes constantes de 600 watts au début, puis 300 watts plus tard.
Pompe à vide et pompe à mercure...	900 —	0.28	Pertes constantes jusqu'à 3 cylind. (Nulles quand la pompe n'est pas en service).
Régulateur de tension à 5 %.....	800 —	0.24	Le rendement dépend de la charge et de la position du régulateur.
TOTAL	21.480 env.	6.66	
$\text{Rendement} = \frac{300.000}{300.000 + \Sigma \text{ pertes}} = \frac{300.000}{321.480} = 93,5 \%$			
pour un redresseur de 300 KW.			

Le tableau ci-dessus montre clairement les différentes pertes se produisant dans un redresseur et ses appareils auxiliaires. Les

Fig. 57a. — Schéma des connexions d'un redresseur à vapeur de mercure à 6 anodes.

sion et de la valeur moyenne du courant redressé. Pour un redresseur débitant 500 ampères et ayant une chute de tension d'environ 20 volts, les pertes à pleine charge seront d'environ 10 kw. Lors de charges plus faibles, les pertes diminuent proportionnellement.

Aux pertes dans le redresseur seul s'ajoutent les pertes dans

Fig. 58. — Schéma d'installation d'un service à 3 conducteurs.

pertes principales sont celles du redresseur et du transformateur principal, tandis que les pertes dans les autres parties de

(1) Les bobines de self d'anodes, ne sont plus employées que très rarement aujourd'hui.

l'installation, comme les bobines de self, le dispositif d'excitation et la pompe à vide, n'ont qu'une influence relativement très faible.

Ainsi que nous l'avons déjà dit, la chute de tension dans le redresseur est *constante* pour toutes les charges et toutes les tensions de service. Il en résulte que plus la *tension est élevée*, plus le redresseur travaille économiquement. Si l'on compte que la chute de tension dans l'arc est de l'ordre de 18 volts, les rendements sont :

95 % pour une tension de 350 volts, côté continu.

96.5 % — 500 volts —

97 % — 600 volts —

Ce rendement s'élèverait à 99,2 % à 2.400 volts côté continu.

Les courbes de la figure N° 63 permettent de comparer les rendements globaux obtenus dans les trois installations de même puissance, savoir 200 kw. à 800 volts, dont l'une est équipée avec un redresseur (r_r), l'autre avec une commutatrice (r_c) et la troisième avec un groupe moteur-générateur (r_g).

La supériorité du rendement du redresseur y ressort d'une façon frappante. Cette supériorité, étant donnée la constance du rendement en fonction de la charge, devient surtout remarquable, dans les services à fortes variations de charge, tels que services de traction, dans lesquels la charge moyenne n'est qu'une fraction de la puissance normale du convertisseur.

Si, dans une installation de 200 kw, nous admettons cette puissance moyenne de l'ordre de 80 kw, nous voyons par les

Fig. 59. — Redresseur fonctionnant sur un réseau à 3 fils, avec groupe équilibreur.

Fig. 60. — Série de redresseurs à vapeur de mercure, 600 ampères en plate-forme d'essais

Etant donné le caractère ondulatoire du courant redressé, il faut distinguer deux rendements différents. Dans le cas, par exemple, de la charge d'une batterie d'accumulateurs ou de l'alimentation de bains électrolytiques par un courant continu débité par un redresseur, on distingue un rendement « électrolytique » en opposition à un rendement « énergétique » acceptant, comme effet utile, le total de l'énergie fournie du côté courant continu. La différence entre ces deux rendements peut devenir importante quand le courant redressé est un courant fortement pulsatoire comme c'est le cas avec le redresseur monophasé. Par contre, avec le redresseur hexaphasé, les différences sont si faibles que la puissance fournie peut être estimée pratiquement d'une manière suffisamment exacte par le produit de l'intensité du courant et de la tension, ces dernières valeurs étant mesurées à l'aide d'instruments à courant continu (instruments à cadre mobile). Ce procédé de mesure donne une valeur plutôt trop faible que trop élevée pour le rendement du redresseur.

courbes de la figure 63 que les rendements moyens sont les suivants :

62 % pour le groupe moteur-générateur ;

83 % pour la commutatrice ;

94 % pour le redresseur à vapeur de mercure.

De plus, il est à remarquer qu'un choix approprié des transformateurs d'alimentation permet d'influencer la courbe de rendement global en fonction de la charge. On augmentera le rendement moyen d'une installation qui travaille souvent à charges partielles en choisissant un transformateur avec pertes à vide très faibles.

On peut facilement se rendre compte d'avance des économies réalisées par l'installation d'un redresseur à la place d'un convertisseur rotatif. Il suffit, à cet effet, de tracer la courbe de consommation annuelle, ou ce qui est mieux, la courbe de consommation journalière, d'y porter les pertes provenant de la transformation

en fonction de la charge et cela pour les commutatrices et les redresseurs. La surface comprise entre les courbes ainsi obtenues, donne le nombre de kilowatt-heures économisés par an ou par jour. Nous avons établi cette comparaison pour une sous-station de traction de 1.200 kw. à une tension continue de 1.500 volts, d'où il résulte que la consommation de la commutatrice dépasse de 650 kwh. par jour, celle du redresseur.

Fig. 61. — Rendement et facteur de puissance en fonction de la charge d'une installation de redresseurs.

Courbe 1 = rendement.

Courbe 2 = facteur de puissance.

L'économie annuelle du redresseur par rapport à la commutatrice, est de 237.000 kw.-h. environ.

Nous avons relevé la courbe de consommation journalière (figure 64) d'un chemin de fer d'intérêt local à courant continu alimenté à 850 volts, pour procéder à des essais identiques en usines. Les résultats obtenus ont été des plus concluants, comme

Fig. 64. — Courbe de consommation journalière d'une sous-station de commutatrice de 250 kw, 850 v. — C = court-circuit.

on peut s'en rendre compte par le tableau synoptique suivant :

	COMMUTATRICE	REDRESSEUR
Données des installations	250 kW	— 850 v
Consommation journalière moyenne (voir fig. 64)	1/3 de la charge normale	1/3 de la charge normale
Compteur (côté primaire)	1.062 kWh	1.110 kWh
Compteur (côté secondaire)	921 kWh	1.042 kWh
Rendement	100 $\frac{921}{1.062} = 86,8\%$	100 $\frac{1.042}{1.110} = 94,1\%$

Avec une commutatrice, la consommation d'énergie du côté

primaire aurait été, égale à : $\frac{1042}{0,868} = 1203$ kwh. L'économie réalisée par l'emploi d'un redresseur s'élève donc à 93 kwh. par jour ou environ 33.900 kwh. par an. Le prix de l'énergie étant

Fig. 62. — Relevé oscillographe de la tension continue, le redresseur débitant sur une résistance ohmique pure.

Coefficient d'ondulation $\frac{a}{b} = 0,06$

1 = tension pour un courant redressé d'environ 200 A ; fréquence du courant alternatif d'alimentation, 50 pér/sec.
2 = tension d'étalonnage.

Fig. 63. — Comparaison du rendement η_r d'un redresseur (appareils auxiliaires compris) aux rendements η_c d'une commutatrice et η_g d'un groupe moteur-génératrice.

par exemple de 0 fr. 10 par kwh. le redresseur permettrait ainsi une économie annuelle de 3.390 francs correspondant à environ 10 % du prix de revient de l'installation (1).

L'économie réalisée dans une installation de convertisseurs rotatifs par l'aménagement de redresseurs à vapeur de mercure, suffit donc pour payer les intérêts, et amortir les frais d'installation.

Il est par conséquent possible de remplacer, pour ainsi dire, sans frais, une installation de convertisseurs rotatifs par une

(1) Il s'agit, dans cet exemple, d'une installation Suisse, les prix sont en francs suisses.

installation de redresseurs. Dans les essais officiels qui ont été exécutés en mars dernier, sur les redresseurs de la sous-station de la Nation du Métropolitain de Paris, installation sur laquelle nous reviendrons, on a relevé un rendement global moyen de 92,3 %, valeur tout à fait remarquable.

Le facteur de puissance d'un groupe transformateur-redresseur dépend en premier lieu des harmoniques d'ordre supérieur

d'indication, les valeurs du $\cos. \varphi$ relevés aux essais de la sous-station de la Nation du Métropolitain ont varié

de 0.95 à la charge 1/4 ;

à 0.983 à la charge 3/4 ;

à 0.985 à la charge 5/4.

Actuellement, par sa marche silencieuse, la disparition de toute usure, la sécurité et la simplicité de service, le redresseur à vapeur de mercure représente le type le plus parfait de conver-

Fig. 65. — Sous-station d'Asnières de l'Union d'Electricité.

(Redresseur de 300 kw. 600 volts continu. - Une des première sous-stations françaises de redresseur à vapeur de mercure).

du circuit du courant continu. Si ces harmoniques sont faibles, comme c'est le cas par exemple avec le redresseur hexaphasé, on pourra obtenir du côté primaire du transformateur principal un facteur de puissance élevé pouvant atteindre 0,95. A titre

tisseur. Le problème de l'électrification des chemins de fer, à des tensions de 3.000 à 5.000 volts continu est plus facilement réalisable avec des redresseurs à vapeur de mercure qu'avec des machines rotatives.

PRINCIPALES INSTALLATIONS FRANÇAISES

de Redresseurs à vapeur de mercure, système "BROWN BOVERI"

Nos	CLIENTS	INSTALLATIONS	Courant continu		Courant alternatif			Redresseurs		Genre d'Application	Installé en
			kw.	Volts	Phases	Volts	Fréquences	Nombre	Type		
1	Union d'Electricité.....	Sous-st. d'Asnières ...	300	600	3	5.600	50	1	G 4/6	Traction	1919
2	Compagnie Générale du Gaz pour la France et l'Etranger	Usine à Gaz de Pau..	145	520	3	5.000	50	1	G 3/6	Traction	1920
3	C ^{ie} s Réunies de Gaz et d'Elect...	St. Cent. de Besançon ..	522	580	3	5.500	50	1	G 5/6	Traction	1920
4	C ^{ie} s Réunies du Gaz et d'Elect...	St. Cent. de Besançon ..	1.215	450	3	5.500	50	3	G 5/6	Force et Lum.	1920
5	Société d'Electricité de la Région de Valenciennes-Anzin ..	Sous-stat. de Denain..	180	600	3	10.250	50	1	G 3/6	Traction	1921
6	Société d'Electricité de la Région de Valenciennes-Anzin,	Sous-stat. de Fresnes.	180	600	3	10.250	50	1	G 3/6	Traction	1921
7	Les Petits-Fils de François de Wendel	Usines de Jamailles ...	2.820	520	3	3.000	50	6	G 5/6	Laminaires	1920
8	Société Anon. d'Erouville.....	à Crusnes (M.-et-M.) ..	300	500	3	3.100	50	1	G 4/6	Force et Lum.	1921
9	C ^{ie} des Chem. de Fer du Midi ..	Sous-station de Pau ..	3.600	1.575	3	60.000	50	6	GRZ 156	Traction	1921
10	C ^{ie} des Chem. de Fer du Midi ..	Sous-stat. de Lourdes.	3.600	1.575	3	60.000	50	6	GRZ 156	Traction	1921
11	C ^{ie} des Chem. de Fer du Midi ..	Sous-stat. de Tarbes ..	3.600	1.575	3	60.000	50	6	GRZ 156	Traction	1921
12	C ^{ie} des Chem. de Fer du Midi ..	S.-stat. de Lannemezan	4.800	1.575	3	60.000	50	8	GRZ 156	Traction	1921
13	C ^{ie} des Chem. de Fer du Midi ..	S.-stat. de Montréjeau	3.600	1.575	3	60.000	50	6	GRZ 156	Traction	1921
14	C ^{ie} des Forges et Aciéries de la Marine et Homécourt.....	Usine d'Assailly	435	750	3	10.000 30.000	50	1	G 4/6	Laminaires	1922
15	Sté des Hauts-Fourneaux, Forges et Aciéries de Denain et Anzin	S.-stat. de la Chapelle..	1.800	680	3	5.500	50	3	GRZ 56	Laminaires	1922
16	C ^{ie} des Omnibus et Tramways de Lyon	Sous-stat. de la Croix-Rousse (Semi-aut.)..	900	510	3	10.000	50	2	GRZ 56	Traction	1922
17	C ^{ie} Lorraine d'Electricité	Sous-stat. de la rue de Mulhouse, à Nancy (automatique)	424	2.235	3	5.400	50	2	GRZ 56	Force et Lumière. Réseau 3 Fils.	1922
18	Brasserie et Etablissements Frigorifiques de Monaco		160	550	3	9.500	25	1	G 3/6	Force	1922
19	C ^{ie} du Chemin de Fer Métropolitain	Sous-station de la Nation	1.080	600	3	5.000	25	2	GRZ 56	Traction	1922
20	Chemins de Fer de l'Etat	Sous-station de Meudon-Val-Fleury.....	1.000	650	3	15.000	25/50	2	GRZ 56	Traction	1922
21	Chambre de Commerce de Rouen	Port de Rouen	1.100	550	3	5.500	50	2	GRZ 56	Engins de Levage	1923
22	Chambre de Commerce de Boulogne	Port de Boulogne.....	550	575	3	15.000	50	1	GRZ 56	Engins de Levage	1923
23	C ^{ie} Lorraine d'Electricité	Sous-station de la rue Guerrier-de-Dumast	848	2.235 470	2 1	5.400	50	2 1	GRZ 56	Force et Lum. Rés. 3 Fils	1923
24	C ^{ie} du Chemin de Fer de Paris à Orléans	Sous-station de Paris-Ivry	1.160	650	3	5.500	50	2	GRZ 56	Force	1923
25	C ^{ie} Générale d'Energie Electrique à Rouen	Sous-stat. de la Place du Vieux-Marché....	297	270	3	5.500	50	1	GRZ 56	Force et Lum.	1923
26	C ^{ie} Centrale d'Energie Electrique à Rouen	Sous-stat. de la Place du Marché-aux- Fleurs	297	270	3	5.500	50	1	GRZ 56	Force et Lum.	1923
27	C ^{ie} d'Electricité de l'Ouest-Parisien (Ouest-Lumière).....	Sous-stat. de Neuilly..	1.000	600	3	10.250	50	2	GRZ 56	Traction	1923
28	Sté Minière des Terres Rouges..	Audun-le-Tiche	1.000	550	3	5.000	50	2	GRZ 56	Traction	1923
29	Chambre de Commerce de Rouen	Port de Rouen	1.100	550	3	5.500	50	2	GRZ 56	Engins de L.	1923
30	C ^{ie} Electro-Mécanique	Plate-forme d'essais, usine du Havre	750	2.500 5.000	3	5.500	50	1	GRZ 156	Essais	1923
31	Electricité de Strasbourg.....	Sous-stat. de traction ..	585	610	3	3.100	50	1	GRZ 56	Traction	1924
32	C ^{ie} Lorraine d'Electricité à Nancy	Sous-stat. de la rue Guerrier-de-Dumast	424	470	3	5.400	50	1	GRZ 56	Force et Lum.	1924
33	C ^{ie} des Tramways de Cambrai et de Saint-Quentin	Sous-stat. de Saint-Quentin	300	580	3	15.000	50	2	6 3/6	Traction	1924
34	Forces Motrices du Haut-Rhin..	S.-stat. de Mulhouse	648	600		6.000	50	2	6 4/6	Traction	1924
35	C ^{ie} des Tramways Strasbourgeois	Sous-stat.									
	—	de Wibolsheim ..	300	800	3	12.000	50	1	46 4/6	Traction	1924
	—	de Boofsheim... ..	240	800	»	—	»	1	—	—	—
	—	de Artolsheim... ..	200	800	»	—	»	1	—	—	—
	—	de Offenheim... ..	550	800	»	—	»	2	—	—	—
	—	de Marlenheim ..	240	800	»	—	»	1	—	—	—

C'est la solution qui a été adoptée par la Compagnie des chemins de fer du Midi, pour l'alimentation à 1.500 volts continu de son nouveau réseau.

À la Compagnie Electro-Mécanique, concessionnaire en France des brevets Brown-Boveri, a été confiée la construction de seize groupes convertisseurs à vapeur de mercure, du type duodécaphasés, d'une puissance unitaire de 1.200 kilowatts, redressant des courants triphasés 60.000 volts en courant continu 1.500 volts. Ces groupes sont depuis plusieurs mois en service et ont donné des résultats tout à fait remarquables.

La grande simplicité du redresseur à vapeur de mercure, l'absence complète de pièces en mouvement, d'entretien et d'usure font qu'il se prête très bien à la commande automatique. Il existe en ce moment des sous-stations complètement automatiques (voir Nancy). Cette particularité des redresseurs intéressera surtout les compagnies de chemins de fer et les sociétés de tramways, qui trouveront là une plus grande sécurité dans le service et une diminution sensible des frais généraux.

Une expérience industrielle d'environ dix années, dans de nombreuses installations en service, a montré que les redresseurs se prêtent à toutes les applications du courant continu, sauf à celles où la récupération est nécessaire.

L'ondulation du courant ne se fait sentir ni sur la lumière ni sur la marche des moteurs à courant continu. La marche complètement silencieuse est un avantage précieux, pour les sous-stations devant être installées dans les villes, au milieu des habitations.

De nombreux essais ont montré qu'ils supportent facilement les fortes surcharges (200 % aux essais du Métropolitain), et les courts-circuits instantanés les plus violents. De plus, nous avons vu que leur propriété peut-être la plus, remarquable était la constance du rendement en fonction de la charge ; ces différentes propriétés rendent l'emploi du redresseur particulièrement intéressant, pour les applications où les charges sont très variables, et où il y a de forts à-coups, telles que la traction, la commande des moteurs pour engins de levage, laminoirs, etc.

Nous avons vu ouvrir un redresseur qui fonctionnait depuis cinq années d'une façon ininterrompue et qui avait débité plusieurs millions de kilowatts-heures ; ses anodes étaient intactes, le mercure de la cathode et des joints n'avait pas subi d'altération.

Les redresseurs à vapeur de mercure sont des machines actuellement parfaitement au point, permettant de satisfaire aux exigences les plus dures de l'industrie.

Au premier mai 1924, un total de 87 cylindres étaient en fonctionnement en France, représentant une puissance de 41.150 kw.

La nomenclature des sous-stations de redresseurs installées en France que nous donnons ci-joint, permettra aux lecteurs de la *Houille Blanche*, de se faire une idée du rôle important que ces machines sont appelées à jouer dans l'électrification des chemins de fer à l'aide du courant continu à haute tension.

En terminant, nous tenons à dire un mot sur la question des sous-stations automatiques. Nous avons vu que le redresseur à vapeur de mercure à grand débit, en sa qualité de convertisseur statique, pouvait facilement se passer d'une surveillance continue. Son emploi est donc tout indiqué pour l'équipement de sous-stations automatiques où le contrôle périodique est assuré par un appareillage automatique. D'excellents résultats ont été

obtenus par la Société Brown-Boveri à la sous-station Baan, des services électriques de la ville de Rotterdam et par la Compagnie Electro-Mécanique à la sous-station de la rue de Mulhouse, à Nancy.

Les avantages des redresseurs apparaissent dans ces stations automatiques beaucoup mieux que dans n'importe quelle autre application. C'est qu'en effet, aux nombreux avantages déjà signalés, vient s'ajouter ici l'économie considérable résultant du fait que le personnel de service est remplacé par un appareillage automatique.

Comme le disait M. Odermatt au XVIII^e Congrès International de Tramways et Chemins de Fer, à Bruxelles, en octobre 1922 :

« La sous-station de redresseur à vapeur de mercure avec équipement automatique, constitue incontestablement le convertisseur de courant le plus simple, le plus économique et le plus sûr ; c'est la sous-station idéale pour l'alimentation des réseaux de traction électrique. »

Nous ajouterons que c'est la solution qui s'impose en France pour l'électrification des chemins de fer et des réseaux de tramways départementaux, étant donné la pénurie de main-d'œuvre, qui se fait si fortement sentir depuis la fin de la guerre.

Nous décrirons, dans un prochain article, les installations françaises les plus intéressantes de redresseur à vapeur de mercure, comme celles de la Compagnie des chemins de fer du Midi, de la Compagnie Lorraine d'Electricité, à Nancy (automatique), de la Compagnie du chemin de fer métropolitain, de Paris (semi-automatique), et de la Compagnie des Omnibus et Tramways de Lyon (La Croix-Rousse, semi-automatique).

BIBLIOGRAPHIE

Cooper Hervitt. American Institute of Electrical Engineers, avril 1901. *Revue BBC*. 1919, N^{os} 5, 6, 7, 8 et 9.

Compagnie Electro-Mécanique, brochure 617 F. Décembre 1919.

Charge de batteries d'accumulateurs par redresseurs à vapeur de mercure. *Revue BBC*. Juillet 1919.

Redresseurs Cooper Hervitt. Notice 75. Hervitt Electric Co et Westinghouse Cooper Hervitt. Suresnes (Seine).

The Brown Boveri Mercury arc rectifier for large output (Morrison). *The Electrical Review*. Février 1921, page 217.

Les redresseurs de mercure à vapeur à grand débit (H. Giroz). *R. G. E.* 20 novembre 1920, page 721.

Les redresseurs à vapeur de mercure (F. Aubert). *Technique Moderne*, juillet 1921, page 290. Voir aussi *Technique Moderne*, août 1909, page 411, et août 1914, page 101.

Les applications du redresseur à vapeur de mercure de moyenne puissance en verre (M. Leblanc fils). *R. G. E.* 25 novembre 1921, page 765.

High. Power Mercury. Arc rectifiers (By, Morrison, *Electrical Review*, 24 march 1922).

Les redresseurs à vapeur de mercure à grand débit (H. Giroz). Communication au Congrès scientifique international de Liège, juin 1922.

Les redresseurs à vapeur de mercure dans les réseaux de tramways (rapport de M. Odermatt, ingénieur de la Société Brown-Boveri, au XVIII^e Congrès International de tramways. Bruxelles, octobre 1922.

Les applications des redresseurs à vapeur de mercure (H. Giroz.) Communication à la Société Internationale des Electriciens, juin 1924.)