État actuel de la question de la transformation des courants alternatifs en courants continus.

Par V. SYLVESTRE, *Ingénieur A. M. et I. E. G., Ingénieur à la Compagnie Electro-Mécanique,*
et ESCANDE, *Ingénieur I.E.G., Licencié ès-Sciences, Ingénieur à la Compagnie Electro-Mécanique.*

Les transports d'énergie électrique à grande distance se font tous actuellement à l'aide de courants alternatifs à haute tension. Le courant alternatif, par suite de ses grandes facilités de production et de transformation, a supplanté incontestablement le courant continu. En Europe, on ne trouve plus comme transport en courant continu que la ligne Moutiers-Lyon, système Thury à intensité constante, et celle du Bois-Noir à Lausanne, celle-ci étant d'ailleurs en voie de transformation.

Toutefois, le courant continu est employé dans un certain nombre d'applications, soit qu'il soit absolument nécessaire : charge des batteries d'accumulateurs, électrolyse, électrochimie, soit qu'il conduise à des installations plus souples : alimentation des tramways, électrification des chemins de fer, triage magnétique des métaux, etc...

On a donc dû envisager de bonne heure le problème de la transformation des courants alternatifs mono ou polyphasés en courant continu. Jusqu'à ces dernières années, les différents moyens de transformation alternatif-continu, étaient les suivants :

- 1° Groupe convertisseur } Moteur synchrone — dynamo cont.
 } Moteur asynchrone — dynamo cont.
- 2° Commutatrices.
- 3° Permutatrices (pour mémoire).
- 4° Soupapes ou clapets électrolytiques.
- 5° Redresseurs à vapeur de mercure à ampoule de verre (petits débits).

Depuis ces dernières années, un progrès remarquable a été réalisé dans la transformation des courants alternatifs en courant continu par la mise au point des redresseurs à vapeur de mercure à grand débit à enveloppe d'acier.

Nous allons résumer succinctement les propriétés, les avantages et les inconvénients des différents systèmes de transformations, puis nous donnerons des renseignements plus détaillés sur les redresseurs à vapeur de mercure à grand débit et leurs applications les plus récentes.

GRUPE CONVERTISSEUR

Se compose de deux machines accouplées mécaniquement sur un même arbre, mais dont les parties électriques sont complètement séparées.

Le moteur peut être soit un moteur synchrone, soit un moteur asynchrone, la génératrice peut être à excitation shunt ou compound.

A Moteur synchrone-dynamo :

Pour démarrer un tel groupe, il faut l'accrocher sur le réseau. Ce démarrage peut se faire par les procédés suivants :

- en asynchrone.
- avec moteur auxiliaire.
- du côté continu.

Le moteur synchrone supporte mal la surcharge, il se décroche facilement, ce qui est un inconvénient. Il faut prévoir le moteur sensiblement plus puissant qu'il est nécessaire.

Il permet (surexcitation) de fournir du courant déwatté au réseau, ce qui tend à relever le $\cos \varphi$.

B Moteur asynchrone-dynamo :

Comme dans le cas précédent, l'alimentation du moteur se fait directement si la tension de distribution n'est pas trop élevée, jusqu'à environ 5000 volts ; au-dessus on emploie des transformateurs abaisseurs. Le démarrage est très simple, il se fait comme celui du moteur asynchrone (rhéostat dans l'induit) pour les moteurs à bagues, sous tension réduite pour les moteurs à induit en court-circuit.

Le moteur asynchrone supporte plus facilement les surcharges. A vide le courant absorbé est relativement grand (1/3 ou 1/4 du courant de pleine charge), il est dû à l'entrefer : le rendement est donc médiocre à faible charge.

Les groupes moteur-asynchrone-dynamo sont plus simples, moins délicats, et d'un prix de revient moindre que les groupes moteur-synchrone-dynamo, car le moteur asynchrone peut toujours être prévu à induit en court-circuit même pour les grosses puissances.

Les groupes moteur-asynchrone-dynamo et moteur-synchrone-dynamo présentent d'assez grandes différences que nous résumons dans les tableaux ci-après :

Groupe moteur synchrone-dynamo	<ul style="list-style-type: none"> Ne démarre pas seul. Nécessite un rhéostat de champ et un ampèremètre sur l'inducteur. Décroche facilement. Facteur de puissance élevée.
Groupe moteur asynchrone dynamo	<ul style="list-style-type: none"> Démontre par simple manœuvre d'un interrupteur. Nécessite un appareillage plus sommaire. Ne décroche pas facilement. Ne permet pas de relever le $\cos \varphi$ du réseau.

Donc, si l'amélioration du $\cos \varphi$ du réseau n'est pas en jeu, on donnera la préférence au groupe moteur asynchrone-dynamo dont le fonctionnement est meilleur et la sûreté de marche plus grande.

COMMUTATRICES

Se compose d'une dynamo ordinaire possédant un collecteur et du côté opposé des bagues isolées, reliées à des points déterminés de l'induit.

La machine ainsi constituée peut être assimilée à un moteur synchrone confondu avec une génératrice à courant continu.

La commutatrice est réversible ; on peut l'alimenter du côté alternatif et recueillir du courant continu sur l'induit, et inversement on peut l'alimenter du côté continu et recueillir du courant alternatif, ce dernier cas permet de faire de la récupération dans les sous-stations alimentant des chemins de fer ou des tramways dont les moteurs peuvent à certains moments fonctionner en récupération.

On peut également entraîner mécaniquement la commutatrice et recueillir (génératrice polymorphique) simultanément ou séparément du courant alternatif ou du courant continu.

RAPPORT DE TRANSFORMATION

Il existe un rapport constant entre la tension alternative U_a et la tension continue U_c d'une commutatrice.

$$\frac{U_a}{U_c} = K$$

En supposant que le courant alternatif est sinusoïdal et que la commutatrice fonctionne à vide,

Si n représente le nombre de phases du courant alternatif, on a :

$$\frac{U_a}{U_c} = K = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{n}$$

Nombre de phases n	Valeur de $\frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{n}$	Valeur de K
Mono	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	0.707
Triphasé	$\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}$	0.612
Diphasé	$\frac{1}{2}$	0.50
Hexaphasé	$\frac{1}{2\sqrt{2}}$	0.353
Hexaphasé	Connexions diamétrales	0.707
Hexaphasé	Connexions en double triangle	0.612

DÉMARRAGE

Les commutatrices se démarrent comme les moteurs synchrones.

a) *Démarrage en moteur asynchrone* (Brown Boveri). — Le circuit amortisseur joue le rôle d'induit en cage d'écureuil. Un interrupteur permet de brancher la commutatrice sur une prise faite sur le transformateur à 25 % environ de la tension normale. On peut intercaler une bobine de self pour affaiblir l'à coup de courant.

Ce mode de démarrage est très rapide on peut démarrer en 60 secondes une commutatrice de 1000 KW.

Dès que la commutatrice a atteint la vitesse synchrone, on contrôle la polarité de la machine ; si elle ne correspond pas au fonctionnement normal, on déclanche l'interrupteur principal et on le réenclanche au bout d'une ou deux secondes. Cette manière de changer la polarité est rapide et sûre.

b) *Démarrage par moteur auxiliaire asynchrone*. — Un moteur asynchrone est calé sur l'arbre de la commutatrice, sa puissance est de 8 à 10 % de la puissance de la commutatrice et son nombre de pôles moindre que celui de la commutatrice, de façon à pouvoir atteindre une vitesse supérieure à celle du synchronisme. On lance le groupe et on l'accroche sur le réseau alternatif comme un moteur synchrone.

c) *Démarrage en moteur shunt*. — Dans les sous-stations où l'on dispose d'une source à courant continu, on peut démarrer le groupe en moteur shunt et on l'accroche sur le courant alternatif.

Dans ce mode de démarrage, la polarité est à contrôler, car elle dépend de celle de la source de démarrage. Si la polarité est mauvaise, il faudra croiser les connexions de la source continue de démarrage.

RÉGLAGE DE LA TENSION

Le rapport de la tension alternative à la tension continue étant déterminé, la tension continue est presque indépendante de l'excitation et ne dépend que de la tension alternative d'alimentation. La variation du courant d'excitation a surtout pour influence de faire varier l'intensité absorbée et le décalage (voir courbe en V de Morday). Pour pouvoir faire varier la tension aux bornes du côté continu, il est nécessaire d'agir sur la tension alternative.

On peut agir des façons suivantes :

a) *Emploi d'une bobine de self*. — On intercale dans le circuit alternatif des bobines de self et on agit sur l'excitation.

b) *Emploi d'un régulateur d'induction*. — On monte en série avec la commutatrice du côté alternatif un régulateur d'induction. Le réglage de la tension se fait dans ce cas d'une façon tout à fait continue et régulière.

c) *Emploi d'un survolteur-dévolteur*. — On monte en série avec l'induit de la commutatrice l'induit d'un petit alternateur, accouplé sur l'arbre de la commutatrice et excité indépendamment. Il a le même nombre de pôles que la commutatrice. En faisant varier l'excitation de ce survolteur, on peut faire varier la tension du côté continu d'environ 10 %.

d) *Emploi d'un transformateur avec prises*. — Lorsque la variation de la tension du côté continu n'est que de quelques pour cents, on fait des prises sur le secondaire du transformateur d'alimentation et à l'aide d'un commutateur spécial on se branche sur les différentes prises.

Tous ces procédés ne permettent pas de faire varier la tension dans de grandes limites. Si le réglage devait être de l'ordre de 30 à 40 %, il faudrait renoncer à l'emploi de la commutatrice et prendre un groupe moteur-générateur.

PROGRÈS DANS LA CONSTRUCTION DES COMMUTATRICES

Les premières installations de commutatrices en France eurent lieu vers 1895 à la Société Régionale d'Electricité de Caen, à la Société Normande d'Electricité (110 KW, Alioth) ; les machines tournaient lentement, 500 tours, et leur puissance était relativement petite. Puis vers 1902 fut installée la première sous-station avec commutatrice à 50 périodes, c'est la sous-station de La Galochère à Grenoble, équipée avec 3 commutatrices triphasées Westinghouse de 150 KW, 750 tours, 50 périodes, tension 600 volts au collecteur. Cette sous-station fonctionne encore aujourd'hui avec les mêmes machines.

Le grand développement pris par les réseaux de tramways et par le problème de l'électrification des chemins de fer a poussé les constructeurs électriciens à faire de nouveaux progrès dans la construction des commutatrices.

On est parvenu aujourd'hui à augmenter beaucoup la vitesse de régime de ces machines. Les vitesses suivantes sont atteintes couramment pour la fréquence 50 périodes.

3000 KW — 375 tours

1000 KW — 750 tours

500 KW — 1500 tours

Malgré les vitesses circonférencielles élevées, les commutatrices fonctionnent bien sans étincelles aux balais, aux charges les plus diverses, et en supportant des surcharges qui peuvent atteindre momentanément 100 %.

On est limité dans la tension qu'il est possible d'obtenir du côté continu par le collecteur. Il semblerait que la limite de tension

admissible entre 2 touches consécutives d'un collecteur est de l'ordre de 13 volts pour les fréquences de l'ordre de 50 périodes, et de 15 volts pour les fréquences inférieures.

La vitesse périphérique du collecteur croît avec la tension continue et avec la fréquence.

En prenant 13 volts comme tension maximum entre lames consécutives du collecteur, et une vitesse périphérique limite de 40 mètres seconde, les tensions continues maxima que l'on peut atteindre pour le moment dans un seul collecteur d'une commutatrice sont :

Fréquence en pér/sec.....	15	25	33	40	50
Tension en volts	3500	2000	1500	1300	1000

Pour la tension de 1500 volts, 50 périodes, qui est celle adoptée

pour l'électrification des chemins de fer français, on montera en série 2 commutatrices de chacune 750 volts.

Ainsi, pour le projet d'électrification de la ligne Culoz-Modane on envisage des types de sous-stations avec 2 commutatrices hexaphasées de 1000 KW chacune avec collecteur en série 750×2 volts, 12 pôles, 500 tours, démarrage direct en asynchrone en 3 temps.

Toutefois, pour les Chemins de fer du Midi, le C^{ie} Electro-Mécanique construit des commutatrices de 750 KW, 750 tours, 50 périodes donnant directement 1500 volts.

Nous n'envisagerons pas la transformation du courant alternatif en courant continu à l'aide des permutatrices et des clapets électrolytiques, les premiers n'ayant pas donné tout ce qu'on en espérait dans la pratique, les derniers n'étant applicables que pour de très faibles puissances.

Redresseurs à vapeur de mercure.

1° REDRESSEURS A PETIT DÉBIT, A AMPOULE DE VERRE

Le redresseur en verre de Cooper Hewitt est connu déjà depuis 1902. Il consiste en une ampoule de verre, avec une cathode de mercure à la base et deux ou trois anodes en fer ou en graphite. Le vide est fait à l'intérieur de l'ampoule et doit rester constant pendant un service de plusieurs milliers d'heures.

L'appareil étant alimenté par du courant alternatif et l'arc amorcé entre l'anode et la cathode, on constate que le courant ne passe que dans le sens anode-cathode.

En Amérique, ces petits redresseurs sont construits par la Général Electric Co et la Westinghouse Co et employés couramment jusqu'à 50 KW. En France, l'Hewitt Electric Co à Suresnes en construit pouvant donner 200 ampères sous 250 volts.

La grande difficulté qu'il y a eu à vaincre dans la construction des redresseurs en verre, comme nous le verrons aussi par la suite pour les grands redresseurs métalliques, est celle des entrées d'anodes.

Dans les redresseurs en verre, ces entrées sont en platine fondu dans le verre. L'Hewitt Electric a tourné la difficulté en employant un joint constitué par une capote en platine soudée dans le verre. Un conducteur extérieur en cuivre et un conducteur intérieur en fer sont soudés de part et d'autre au fond de cette capote. La partie latérale de la capote qui assure le joint n'est pas traversée par le courant, elle peut donc être très mince. Il a été constaté par l'usage que ce genre d'entrée peut supporter des surcharges de 100 %.

La chute de tension dans le redresseur est égale à la somme des chutes de tension dans l'anode, dans la cathode qui sont pratiquement constantes et de la chute de tension dans l'arc; celle-ci est fonction de la longueur de l'arc, de l'intensité du courant et de la pression intérieure de l'ampoule.

La chute de tension totale est assez faible, de 15 à 18 volts. Comme cette chute de tension est pratiquement constante, les pertes étant le produit de cette chute de tension par l'intensité du courant, il en résulte que le rendement reste sensiblement constant en fonction de la charge. Le rendement sera d'autant plus élevé que la tension du courant continu sera elle-même plus élevée (98 % à 700 volts).

Le rapport existant entre la tension alternative et la tension continue est approximativement à vide :

$$U_a = (2,35 U_c) + 35 \text{ en monophasé.}$$

$$U_a = (1,6 U_c) + 28 \text{ en triphasé.}$$

Il faut donc ajuster la tension alternative d'alimentation à la tension continue d'utilisation et souvent un transformateur statique est nécessaire.

Moyennant certaines dispositions constructives, on peut lorsque l'intensité est supérieure à 50 ampères connecter en parallèle deux ou plusieurs ampoules débitant simultanément sur le même circuit.

Pour une distribution à 3 fils, on monte le redresseur entre les conducteurs extrêmes (tension maximum) et on obtient le point neutre en montant entre les fils extrêmes, soit une batterie, soit deux redresseurs en série, soit un groupe équilibreur.

Les redresseurs à ampoule de verre sont très employés en Angleterre et en Amérique pour la charge des batteries d'accumulateurs pour électro-mobilité.

Cette charge peut se faire automatiquement. On l'emploie aussi pour l'alimentation de petits moteurs à courant continu à vitesse variable tels que ceux des machines à imprimer, calendriers, ponts roulants, ascenseurs, etc. On trouve également une application courante des redresseurs aux électro-aimants de levage, dans les installations téléphoniques et télégraphiques, aux arcs cinématographiques dont le fonctionnement sur courant alternatif laisse à désirer.

Il s'applique aux travaux d'électrolyse, galvanisation, à l'alimentation des appareils électro-médicaux, radiographie, thermocautères, etc.

Des milliers d'appareils fonctionnent aujourd'hui dans les applications les plus diverses. Leur avantage est de n'avoir aucune pièce en mouvement, de fonctionner sans bruit et de ne nécessiter aucune surveillance.

Leur mise en marche est très simple, la fermeture d'un interrupteur suffit.

Leur poids et leurs dimensions sont à puissance égale 4 à 5 fois moindres que ceux de groupes rotatifs. Ils ne nécessitent aucune fondation, l'appareil forme un ensemble complet monté derrière son tableau.

L'ampoule est aussi hermétiquement fermée qu'une lampe à incandescence, il n'y a aucun dégagement de vapeur corrosive.

Au point de vue électrique, leur grand avantage est celui du rendement qui est très élevé. Ce rendement est d'autant meilleur que la tension continue est plus élevée. Il varie pour le redresseur seul de 85 % à 110 volts à 98 % à 750 volts continu, et comme ce rendement est sensiblement constant en fonction de la charge le redresseur permet de réaliser une grande économie dans la consommation de courant.

2° LES REDRESSEURS MÉTALLIQUES A GRAND DÉBIT

Ces appareils ont été mis au point par la Société Brown-Boveri. Les difficultés de construction pour les puissances élevées furent considérables. Le remplacement du récipient de verre par un récipient en acier permit pour de forts courants la construction d'amenées étanches et isolées.

Le problème de l'amenée de courant dans un récipient où on fait le vide a été résolu par l'emploi d'un joint étanche constitué par de l'amiante et une garniture de mercure.

Les questions de condensation de gouttes de mercure à la surface des anodes, l'entrée en contact des anodes avec le mercure condensé, l'irradiation par les rayons ultra-violet ou le contact direct avec le flot jaillissant de la cathode et enfin le vide insuffisant ont été 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 pratique.

Le redresseur a la forme d'un cylindre, la grande chambre principale inférieure porte au milieu de sa plaque de base la cathode de mercure isolée ; cette chambre est fermée à sa partie supérieure

par une plaque annulaire massive portant les anodes. Cette plaque, grâce au joint avec la garniture de mercure, peut être enlevée et permet ainsi d'atteindre facilement, pour toute réparation, l'intérieur du cylindre et les 6 anodes principales.

A côté des anodes principales se trouvent encore deux anodes d'excitation qui indépendamment du courant principal main-

Schéma général des connexions de 2 cylindres redresseurs à vapeur de mercure à 6 anodes (avec bobines de self d'anodes).

Coupe d'un redresseur métallique à grand débit de construction Brown-Boveri

tiennent 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.

Les anodes sont formées de cylindres de fer de 70 à 110 m/m de diamètre et d'une hauteur de 70 à 110 m/m, à bords arrondis pour rendre plus difficile la formation d'un arc de retour.

Une pompe à vide spéciale permet de maintenir à l'intérieur du cylindre un vide de 0,01 m/m de mercure.

TYPES NORMAUX

Contrairement aux groupes rotatifs dont les divers degrés de puissance conduisent à une série de modèles différents, quelques types de redresseurs à vapeur de mercure satisfont à toutes les puissances courantes. Il suffit pour des puissances plus grandes que la puissance nominale de monter en parallèle le nombre de cylindres voulu.

Les modèles actuellement sur le marché sont :

N° 1	Cylindre G 3/6,	300 ampères côté continu	} tension jusqu'à 800 volts
N° 2	— G 4/6,	600 — — —	
N° 3	— G 5/6,	1000 — — —	

Des modèles spéciaux sont établis pour les tensions de 800 à

3.000 volts et plus. Ces cylindres peuvent supporter les surcharges suivantes :

- 25 % pendant une demi-heure.
- 40 % pendant trois minutes.
- 100 % momentanément.

RAPPORT DE TRANSFORMATION

De même que pour les commutatrices, il existe entre la tension du courant continu débité et la tension alternative d'alimentation, un rapport déterminé et constant. Il est donc nécessaire d'employer un transformateur d'alimentation permettant d'amener la tension du réseau à la valeur correspondante à celle que l'on veut obtenir du côté continu. Ce transformateur permet d'autre part le couplage en hexaphasé avec point neutre formant le négatif de la distribution continue.

Si l'on désigne par :

E_c la tension continue,

E_{eff} la tension alternative par phase du courant d'alimentation,

dont la valeur maximum est E_{max}

On a approximativement :

$$E_{max} = E_{eff} \sqrt{2} = E_c + \varepsilon$$

ε = chute de tension dans l'arc, soit environ 20 volts.

$$\text{D'où} \quad E_{eff} = \frac{E_c + \varepsilon}{\sqrt{2}}$$

Plus exactement, on a

$$E_{eff} = \frac{(E_c + \varepsilon) K}{\sqrt{2} \left[\sin \alpha \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) + \frac{1}{\pi} \right]} \quad (1)$$

où α pour un courant hexaphasé est égal à 60° et pour un courant triphasé à 45° .

K est un facteur de correction dépendant de la forme des courbes.

Dans la pratique, l'équation (1) peut s'imprimer comme suit, dans le cas le plus fréquent d'un redresseur alimenté en hexaphasé :

$$E_{eff} = \frac{E_c + \varepsilon + q \cdot E_s}{1,35 K} \quad (2)$$

où ε = chute de tension dans l'arc = 20 volts.

E_s = tension de bobines de self des anodes.

q = facteur de correction dépendant du couplage choisi.

Exemple : Admettons que la tension continue désirée soit 230 volts et que l'on emploie plusieurs bobines de self d'anodes avec une chute de tension nominale de 30 volts. En hexaphasé $q = 1,2$

$$K = 0,97$$

la tension de phase :

$$E_{eff} = \frac{230 + 20 + 1,2 \times 30}{1,35 \times 0,97} = 218 \text{ volts.}$$

Le transformateur d'alimentation devra donc fournir à pleine charge 218 volts entre le point neutre et chaque borne extérieure.

La tension à vide du transformateur devra être plus élevée.

L'expérience a montré qu'il fallait compter sur une chute de tension deux fois plus forte que celle obtenue en charge avec un courant alternatif sinusoïdal et un $\cos \varphi = 0,9$.

Si, dans l'exemple précédent, la chute de tension normale à pleine charge et $\cos \varphi = 0,9$ égale 3 %, la tension à vide du transformateur devra être :

$$1,06 \times 218 = 231 \text{ volts.}$$

La valeur exacte de la tension à vide du transformateur sera déterminée par la considération de la chute de tension totale du

redresseur. Si la chute de tension est inadmissible, on munira les bobines de self d'enroulements en court-circuit.

RELATIONS ENTRE LES COURANTS ALTERNATIFS ET CONTINUS

La relation entre le courant continu I_c et les courants de phases I_1, I_2, I_n , avec (n) comme nombre de phases, est :

$$I_c = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{\frac{2\pi}{n}} I_1^2 dx + \int_{\frac{2\pi}{n}}^{\frac{4\pi}{n}} I_2^2 dx + \dots + \int_{\frac{(n-1)\pi}{n}}^{\frac{2\pi}{n}} I_n^2 dx \right)$$

$$\text{ou} \quad I_c = \sqrt{\frac{n}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{n}} I_1^2 dx} = I_{eff} \sqrt{n}$$

$$I_{eff} = \frac{I_c}{\sqrt{n}}$$

Donc, la valeur théorique du courant passant dans chaque câble alimentant les anodes est égale à la valeur du courant continu divisée par la racine carrée du nombre de phases.

Dans le cas le plus général, d'alimentation en hexaphasé $\sqrt{n} = \sqrt{6} = 2,45$.

En réalité, la valeur efficace du courant de phase sera plus faible que celle donnée par le calcul, car dans le circuit d'utilisation ou le circuit des anodes, il y a toujours une self induction produisant un recouvrement des courants de phase. L'expérience montre que dans un redresseur hexaphasé au lieu du facteur $\frac{1}{2,45}$ il faut introduire la valeur $\frac{1}{2,8}$ ou $\frac{1}{3,0}$.

Il résulte donc des valeurs obtenues pour les rapports de tension de courant dans un redresseur hexaphasé que le secondaire du transformateur d'alimentation doit être dimensionné pour environ 1,75 fois la puissance du côté continu et le primaire pour 1,25 fois cette même puissance.

En moyenne, on prend un transformateur d'une puissance 1,5 fois plus grande.

Le primaire doit être couplé en triangle et le secondaire en hexaphasé ouvert.

FRÉQUENCE

La fréquence n'a d'influence ni sur le rendement, ni sur le facteur de puissance du redresseur.

Elle n'entre en considération que pour les dimensions du transformateur ou d'autres questions secondaires.

RENDEMENT DU FACTEUR DE PUISSANCE

Les pertes d'un redresseur à vapeur de mercure ne proviennent que de la chute de tension dans l'arc (15 à 20 volts). Par conséquent, le rendement est donné par le rapport :

$$n = \frac{E_c}{E_c + \varepsilon}$$

E_c étant la tension normale côté continu et ε la chute de tension dans l'arc.

Le rendement d'un redresseur possède donc la propriété remarquable d'être indépendant du débit et d'être d'autant plus élevé que E_c est plus élevé, ε étant constant.

Pour un redresseur déviant 500 ampères et ayant une chute de tension de 20 volts environ, les pertes à pleine charge seront d'environ $500 \times 20 = 10$ kilowatts. Le rendement du redresseur seul est donc extrêmement élevé (98 % à 1000 volts) mais aux pertes dans le redresseur seul s'ajoutent les pertes dans le transformateur principal d'alimentation (1).

(1) On a constaté sur une installation de 250 Kws une économie annuelle de 33.500 kilowat-heures par an pour un débit annuel

Trois types normaux de redresseurs à vapeur de mercure, de respectivement 300, 600 et 1000 ampères côté continu, tension jusqu'à 800 volts.
(L'encombrement très faible de ces appareils est tout à fait remarquable).

Le rendement du redresseur constant à toutes charges est influencé par les pertes dans le fer du transformateur ; aux environs du 1/4 de la charge le rendement total commence à baisser si la charge diminue encore.

Par contre, ce rendement total ne varie pas sensiblement entre 1/4 et 5/4 de la charge. Le tableau que nous donnons ci-contre montre clairement les différentes pertes pour un redresseur (de 500 ampères 600 volts) et ses appareils auxiliaires. Les pertes principales se créent dans le redresseur et le transformateur principal, tandis que les pertes dans les autres parties de l'installation comme les bobines de self, le dispositif d'excitation et la pompe à vide, n'ont qu'une influence relativement très faible.

Des essais ont été effectués en mai 1919 sur un redresseur triphasé de 750 KW, 580 volts alimentant les tramways de Berne (centrale de Monbijou). Ce redresseur composé de 3 cylindres avec bobines de self compensées ont été branchés séparément ou en parallèle sur le réseau de tramways. Le rendement général a été déterminé alors pour le service, avec un, deux ou trois cylindres. Le rendement maximum a été trouvé égal à 95,5 %, dépassant de 2 % la valeur garantie.

La chute de tension maximum a atteint entre 0 et 1350 ampères environ 10 %. Cette chute de tension est adaptée à celle des anciens groupes moteurs générateurs de la centrale avec lesquels le redresseur travaille parfois en parallèle. Les résultats les meilleurs sont obtenus avec le couplage en triangle au primaire du transformateur d'alimentation et l'insertion d'une bobine de self d'absorption dans le neutre du secondaire.

Il faut remarquer aussi que même avec un couplage en étoile du primaire du transformateur, l'insertion de la bobine de self d'absorption procure une amélioration importante du facteur de puissance.

d'environ 350.000 kilowatt-heures par suite de la substitution d'un groupe redresseur à un groupe rotatif. L'économie réalisée annuellement était d'environ 10 % du prix global de l'installation.

Appareils	Pertes en watts pour un redresseur type G 4/6, 500 A 600 volts	Pertes en %	Remarques
Redresseur	10.000	3,10	Constante à toute charge.
Transformateur . . .	9.000	2,80	Pour des charges partielles, le rendement diminue.
Bobines de self d'anodes	480	0,15	Les pertes diminuent approximativement proportionnellement à la charge.
Excitation par courant alternatif . . .	600 à 300	0,09	Pertes constantes, 600 watts au début puis 300 watts plus tard.
Pompe à vide et pompe à mercure	900	0,28	Pertes constantes jusqu'à 3 red. (nulles quand la pompe n'est pas en service).
Régulateur de tension = $\pm 5\%$. . .	800	0,24	Rendement dépend de la charge et de la position du régulateur.
Total	21.480	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.

Principales installations de convertisseurs à vapeur de mercure

RAISON SOCIALE	INSTALLATION	COTÉ CONTINU		COTÉ ALTERNATIF			REDRESSEURS		GENRE d'application	Année
		Puissance en kilowatts	Tension en volts	Phases	Tension en volts	Fréquence en périodes	Nombre	Type		
Services électriques de la Ville de Strasbourg.	Sous-station de Detwiller	55	230	3	5000	50	1	G 3/6	Charge d'accumulateurs, réseau de force et lumière.	1915
Services électriques de la ville de Strasbourg.	Sous station d'Hœrdt	20	110/165	3	5000	50	1	G 3/6	d°	1915
Union Française d'Electricité, Paris.	Edgar Quinet	300	600	3	5600	25	1	G 4/6	Service de tramways.	1919
Société anonyme du Gaz de Mulhouse-Belfort.	Usine à Gaz de Mulhouse	250	520	3	5000	50	1	G 1/6	Réseau de force et lumière.	
Compagnie générale du Gaz pour la France et l'étranger, Paris.	Usine à gaz de Pau	115	520	3	5000	50	1	G 3/6	Service de traction.	1920
Compagnies réunies de Gaz et d'électricité, Besançon (Groupe Th. Vautier). d°	Station centrale de Besançon	1215	450	3	5500	50	3	G 5/6	Réseau de force et lumière.	1920
	—	522	580	3	5500	50	1	G 5/6	Service de traction.	1920
Les Petits Fils de François de Wendel & Co, Hayange (Moselle).	Usine de Jammilles	2350	520	3	10000	50	6	G 5/6	Commande de laminoirs.	1920
Société An. d'Errouville (M.-et-M.).		300	500	3	3100	50	1	G 4/6	Réseau de force et lumière.	1921
Compagnie des Chemins de fer du Midi, 54, boulevard Haussmann, Paris. d°	Sous-station de Pau	3600	1575	3	60000	50	6	HG 4/6	Service de traction.	1921
	Sous-station de Lourde	3600	1575	3	60000	50	6	HG 4/6	d°	1921
	Sous-station de Tarbes	3600	1575	3	60000	50	6	HG 4/6	d°	1921
	Sous-station Lannemezan	4800	1575	3	60000	50	8	HG 4/6	d°	1921
	Sous-station de Montrejeau	3600	1575	3	60000	50	6	HG 4/6	d°	1921
Société d'électricité de la région de Valenciennes-Anzin. d°	Sous-station de Denain	180	600	3	10000	50	1	G 3/6	Service de tramways.	1921
	Sous-station de Fresnes	180	600	3	10000	50	1	G 3/6	d°	1921
Compagnie des Forges et Aciéries de la Marine et d'Homécourt.	Usines d'As-sailly	135	730	3	10000	50	1	G 1/6	C. de laminoirs.	1922
Compagnie des Omnibus et Tramways de Lyon.	Sous-station de la Croix-Rousse	150	510	3	10000	50	2	GRZ 5/6	Service de tramways	1922
Hauts Fourneaux et Aciéries de Denain-Anzin.	Usine de Denain	1800	680	3	5600	50	3	GRZ 5/6	C. de laminoirs.	1922
Compagnie Lorraine d'électricité.	Sous-station de la rue de Mulhouse à Nancy	2 x 212	235/470	3	5400	50	2	GRZ 5/6	Réseau de lumière à 3 fils.	1922
	Lyon			3	9500	25	1	G 3	Force et Lumière.	1922
Brasserie et Etablissements Frigorifiques de Monaco										
Compagnie du Chemin de fer Métropolitain de Paris	Sous-station la Nation	1080	600	3	5000 10000	25	2	GRZ 5/6	Traction.	1922

A noter que les sous-stations commandées par la Cie des Omnibus et Tramways de Lyon (sous-station de la Croix-Rousse) et par le Chemin de fer du Métropolitain de Paris (Sous-station de la Nation) sont du type semi-automatique commandable à distance.

FACTEUR DE PUISSANCE

Le facteur de puissance d'un redresseur dépend en premier lieu des harmoniques d'ordre supérieur du circuit du courant continu. Si ces harmoniques sont faibles, comme c'est le cas par exemple avec le redresseur hexaphasé, on pourra obtenir côté primaire du transformateur d'alimentation un facteur de puissance élevé ($\cos \varphi$) de 0,95 à 0,97.

INSTALLATIONS EXISTANTES DE REDRESSEURS A VAPEUR DE MERCURE A GRAND DÉBIT

La première installation de convertisseur à vapeur de mercure

Vue d'un redresseur type G. R. Z. 56 ouvert. Au milieu on aperçoit l'anode d'allumage

qui a été faite en Europe par la Société An. Brown-Boveri est la petite sous-station de Hordt à Strasbourg équipée en 1912 avec un redresseur de 20 KW 110/165 volts continu, destiné à la charge d'une batterie d'accumulateurs. Une installation semblable fut faite en 1914 à l'Hôpital d'enfants de Zurich.

En 1915, fut exécutée la première installation importante, celle de la sous-station des tramways de la vallée de la Limmat à Schlieren près de Zurich, équipée avec 2 redresseurs de 200 KW, 600 volts, fonctionnant en parallèle avec des groupes rotatifs.

Puis viennent les installations énumérées dans le tableau ci-dessus.

Comme nous le voyons, les applications des redresseurs à vapeur de mercure à grand débit ont pris ces dernières années en France un très grand développement. Au 1^{er} janvier 1922, le nombre des installations exécutées ou commandées à la Société Brown-Boveri et à la Cie Electro-Mécanique, 12, rue Portalis, à Paris, s'élevait à environ 150, représentant environ

350 cylindres, d'une puissance totale de 95.000 kilowatts.

Les deux installations les plus puissantes actuellement en cours d'exécution sont celles de :

1^o MM. Les Petits Fils de François de Wendel à Moyeuvre (Lorraine) constituée par six cylindres redresseurs d'une puissance totale de 2.350 kilowatts, 500 volts continu, destinée à la commande de moteurs de laminoirs.

2^o Cie des Chemins de fer du Midi, qui électrifie actuellement une grande partie de son réseau de traction. Cinq sous-stations de redresseurs à vapeur de mercure seront réparties sur le tronçon Toulouse-Bayonne et équipées avec 16 groupes d'une puissance unitaire de 1200 kilowatts côté continu, transformant du cou-

rant triphasé 60.000 volts, 50 périodes, en courant continu à la tension de 1575 volts. Soit une puissance globale de redresseurs à vapeur de mercure de 19.200 kilowatts. Comme la récupération de la puissance des trams à la descente est rendue irréalisable par le principe même des redresseurs à vapeur de mercure, on installera aux parties les plus accidentées de la ligne Pau-Montréjeau, des sous-stations de commutateurs fonctionnant en parallèle avec les sous-stations à vapeur de mercure. Il y a là un exemple de l'utilisation complète des avantages des deux méthodes de transformation.

AVANTAGES DES REDRESSEURS A VAPEUR DE MERCURE SUR LES CONVERTISSEURS ROTATIFS

Le redresseur à vapeur de mercure possède sur les groupes rotatifs de nombreux avantages qui le feront préférer de plus en plus à ces derniers, lorsque la question récupération ne sera pas en jeu.

Comme le transformateur statique, le redresseur ne comporte aucune partie en mouvement ; il n'occasionne aucun bruit, avantage précieux pour les sous-stations devant être installées dans les villes. Pas de collecteur, ni de bagues soumises à l'usure résultant du frottement de balais. Cette absence de collecteur, organe le plus délicat des machines rotatives, avec l'absence des paliers et de tout graissage, conduit à une économie importante dans la réduction du personnel de surveillance. Le poids à puissance égale est nettement inférieur à celui des groupes tournants, l'encombrement est tout dans le sens de la hauteur, de sorte que l'on peut réaliser une économie importante sur les bâtiments. L'absence de partie tournante et de vibration permet d'éviter les fondations. La mise en service ne nécessite aucune opération de mise en synchronisme. Il suffit d'agir sur un bouton poussoir pour amorcer l'appareil.

Cette rapidité et simplicité de la mise en service font que les sous-stations avec redresseurs à vapeur de mercure se prêtent très facilement à la marche complètement automatique.

Il résiste mieux aux court-circuits et aux surcharges instantanées qui peuvent atteindre 200 %.

Son fonctionnement est absolument indépendant de la fréquence.

Il présente encore le très grand intérêt de pouvoir fonctionner en parallèle dans d'excellentes conditions avec d'autres machines tournantes, de sorte que son emploi n'élimine pas les machines existantes que l'on peut conserver, soit comme secours, soit comme appoint de puissance.

Les installations les plus anciennes ont montré qu'au bout de cinq années de marche, on ne trouvait pas d'usure apparente aux anodes et à la cathode, ni à l'intérieur du cylindre.

Enfin, l'avantage le plus important est son rendement très élevé et constant à toutes les charges. Nous avons vu que ce rendement peut atteindre 98 % au delà de 1000 volts, et que même en tenant compte des pertes dans le transformateur d'alimentation, le rendement est toujours de beaucoup supérieur à celui des commutatrices.

Ces propriétés remarquables font que l'emploi des redresseurs à vapeur de mercure est surtout intéressant dans les applications où les charges sont très variables et où il se présente de forts à-coups telles que dans la traction, la commande des moteurs pour engins de levage, les laminoirs, etc. .

Les redresseurs sont des appareils actuellement parfaitement au point, permettant de satisfaire aux exigences les plus dures de l'industrie ; leur emploi se répand de plus en plus et ils sont appelés à jouer un rôle important dans la question de l'électrification des chemins de fer à l'aide du courant continu haute tension.