

ÉLECTRICITÉ

La Transformation moderne des Courants alternatifs en Courants continus.

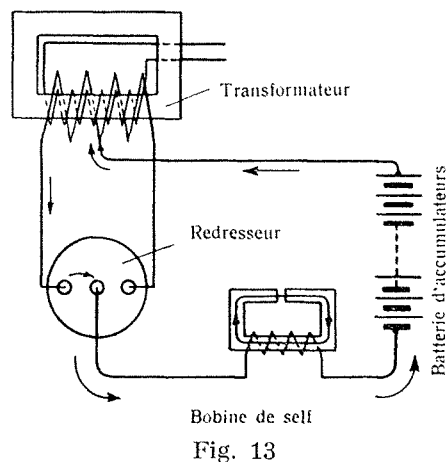
Les Redresseurs à Vapeur de Mercure.

(SUITE)

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

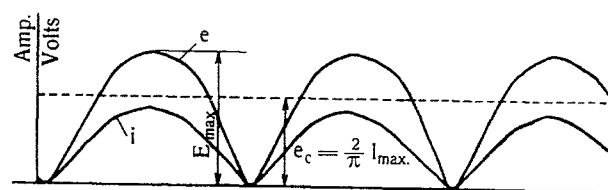
LE REDRESSEUR MONOPHASÉ

Le redresseur monophasé de courant continu intermittent, obtenu avec une valve d'électrons unipolaire, trouve peu d'applications en pratique, il serait tout au plus utilisable pour la charge d'une batterie d'accumulateurs. En outre, pour conserver l'arc lumineux principal, il est indispensable de maintenir l'alimentation par courant continu de l'arc auxiliaire ou d'allumage, afin d'obtenir l'élévation de température nécessaire au maintien de la tache de cathode de l'électrode de mercure. Sans cette « excitation » de la cathode, les pulsations de même sens du courant cesseraient immédiatement au premier changement de sens de la tension alternative, car la rupture du courant de cette cathode pendant seulement 1×10^{-5} secondes, suffit pour refroidir la base de l'arc lumineux à la surface du mercure, et pour interrompre le courant d'électrons.

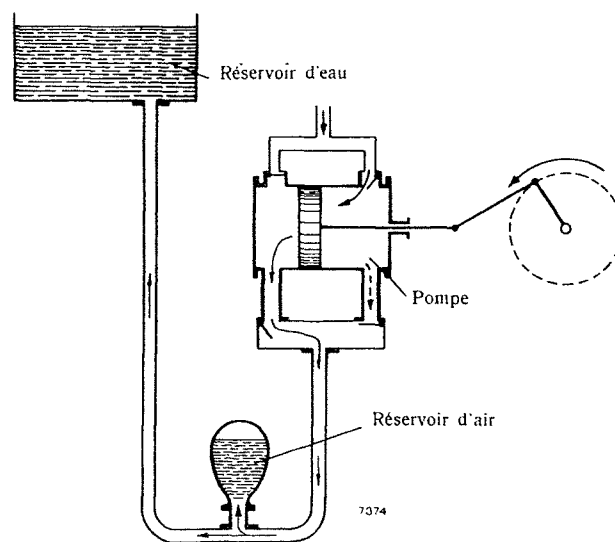


Pour obtenir un courant redressé d'une source de courant alternatif monophasé, le schéma représenté par la figure 13 est essentiellement avantageux, car il permet de rendre utile au circuit du courant continu les deux parties de la sinusoïde de la tension alternative. L'enroulement secondaire du transformateur fournisseur de courant est en deux parties et le point neutre de cet enroulement est connecté à une borne de façon que seule la moitié d'enroulement ayant une force électromotrice, dirigée du point neutre à l'extérieur, soit parcourue par le courant, car le redresseur branché dans le circuit ne peut être traversé que par ces ondes de courant-là. Pendant ce temps, l'autre moitié d'enroulement reste sans courant. Si le courant alternatif est par exemple de 50 périodes, les deux moitiés d'enroulement seront parcourues par le courant, tour à tour, pendant 1/100 de seconde. Par contre, dans l'enroulement primaire passe un courant alternatif proprement dit, ce dont il est facile de se rendre compte si l'on remplace par la pensée les deux enroulements secondaires I et II par un seul enroulement parcouru, par les deux ondes de courant. Il est compréhensible que la construction de transformateurs pour redresseur monophasé, relativement à la réparti-

tion de l'enroulement secondaire sur l'enroulement primaire, résulte des mêmes considérations que la construction des transformateurs à trois conducteurs, c'est-à-dire du moins de dispersion possible causée, par une charge inégale des deux moitiés d'enroulements.



D'après la figure 13, il est facile de voir que le point neutre du transformateur forme le pôle négatif du circuit à courant continu et la cathode du redresseur le pôle positif. Si l'on connecte un redresseur pareil, sur une résistance ohmique pure,



par exemple, sur des lampes à incandescence, on obtient la courbe de tension représentée par la figure 14 qui, par suite du genre de charge choisi, ne diffère de la courbe de courant que par les ordonnées. Si le courant, comme c'est ici le cas, descend jusqu'à zéro, l'arc dans le redresseur sera interrompu, ainsi que cela a été déjà dit. Afin d'éviter cette interruption, on peut employer l'excitation séparée déjà mentionnée de la cathode, ou brancher dans le circuit à courant continu une bobine de self, chose toujours nécessaire dans le cas de charge de moteurs sensibles. Cette bobine, fonctionne alors, comme accumulateur d'énergie qui, suivant sa grandeur, peut amortir à volonté les pulsations du courant et de la tension.

Au point de vue mécanique, elle est comparable à un volant ou à un réservoir d'air. La figure 15 représente un dispositif avec

pompe à piston qui, au point de vue mécanique, est complètement analogue au dispositif électrique de la figure 13. De même qu'au point de vue mécanique dans une machine à piston, le mouvement alternatif du piston envoie de l'eau automatiquement par les soupapes dans un réservoir surélevé où le réservoir d'air sert de régulateur de pression; le transformateur, le redresseur, la batterie d'accumulateurs et la bobine de self agissent identiquement au point de vue électrique.

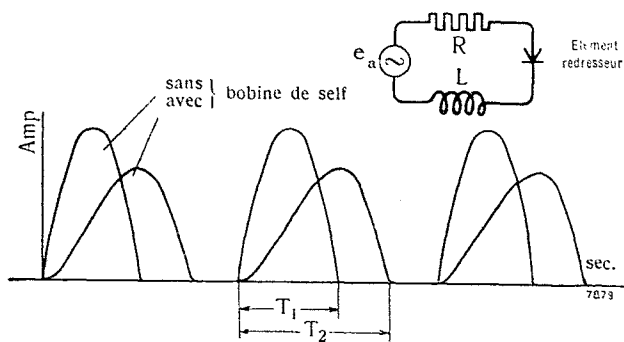


Fig. 16

Pour plus de clarté, il est nécessaire de détailler davantage le rôle de la bobine de self en connexion avec des redresseurs. Si l'on forme un circuit fermé, composé, d'une source de courant alternatif, d'un redresseur en série avec une résistance ohmique et une bobine de self, et que l'on mesure le courant avec ou sans self-induction, on obtient les courbes de la figure 16. La relation entre le temps et la valeur instantanée (*i*) du courant est donnée par l'équation (1) au moyen de laquelle, pour des valeurs déterminées, de la résistance R, de la self-induction L, et pour une amplitude donnée de la tension alternative, une fréquence $f = \frac{\omega}{2\pi}$ les courbes déformées de la figure 16 ont pu être construites graphiquement :

$$i = \frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[\sin(\omega t + \varphi) + \sin \varphi \cdot e^{-\frac{R}{L} t} \right] \quad (1)$$

où $\text{tg. } \varphi = \frac{\omega L}{R}$

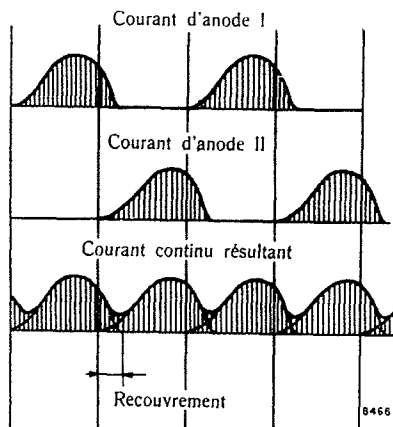


Fig. 17

L'effet de la bobine de self, consiste, en une augmentation du temps de durée du courant de T_1 à T_2 avec aplatissement des courbes sinusoïdales. Le temps T_1 représente exactement une demi-période, T_2 est, par l'influence de la bobine de self, plus grand que T_1 , d'où il résultera dans le couplage de la figure 13 un recouvrement momentané, des deux courbes de courant, si bien que le courant continu résultant ne passera plus par zéro, comme cela se produirait, dans le cas d'une charge non inductive.

Si l'on réunit, comme dans la figure 17, des courbes de courant ayant une distance entre elles égale à une demi-période et qu'on additionne les valeurs momentanées, on obtient au secondaire du redresseur une courbe de courant résultant, sous forme d'une ligne ondulée. Ce courant est appelé courant ondulatoire.

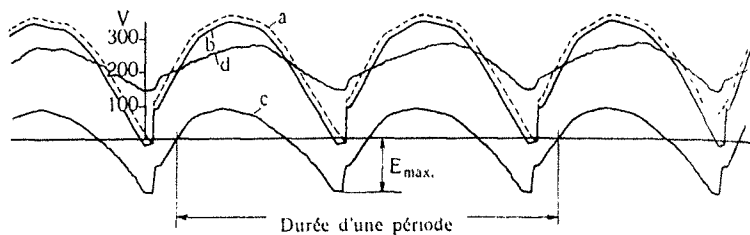


Fig. 18

La figure 18 montre comment se comporte la tension correspondante dans le circuit d'un redresseur avec bobine de self. On remarque que la tension de la bobine de self, de fréquence deux fois plus grande que la fréquence initiale, donne, combinée avec la tension du transformateur, amoindrie, par la chute de tension dans l'arc, une tension continue faiblement ondulatoire dans un redresseur monophasé.

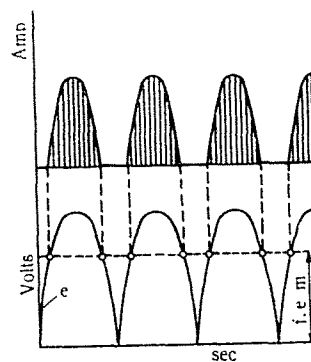


Fig. 19.

Sous l'influence des fluctuations de courant, il se formera dans l'enroulement de la bobine de self des tensions induites, d'action contraire aux tensions du transformateur, tendant à dépasser rapidement une valeur moyenne. Si l'on tient compte des valeurs admissibles des fluctuations de courant et de tension fixées par les prescriptions, la bobine de self du redresseur correspondant pourra se calculer comme suit : Les valeurs limites du courant i_{max} et i_{min} (fig. 21) correspondent dans le noyau de fer de la bobine de self, aux saturations B_{max} et B_{min} qui passent de la fréquence initiale à une fréquence double. Pour un nombre de spires n et une section de fer de $Q \text{ cm}^2$ l'amplitude de la tension résultante découle de la figure 18.

$$E_{max} = 2\pi (2\sim) \frac{B_{max} - B_{min}}{2} Q \cdot n \cdot 10^{-8} \text{ volts} \quad (2)$$

Pour l'estimation de la grandeur de la bobine de self, en tenant compte de la forme de courbe désirée, il faut prendre en considération les points suivants : 1° Les enroulements doivent supporter la totalité du courant nécessaire au nombre d'ampères tours et à la saturation choisie du noyau de fer. 2° La section Q du fer, ou le nombre de spires (n) (équation n°2) croît rapidement quand la différence $B_{max} - B_{min}$ diminue. Il découle de la relation :

$$Q \cdot n \approx \frac{\text{const.}}{B_{max} - B_{min}} \quad (3)$$

qu'un courant continu parfait ne serait obtenu qu'avec une bobine de self infiniment grande.

Il n'est par conséquent, pas rationnel, de pousser trop loin

recherche d'un courant continu faiblement ondulatoire dans un redresseur monophasé. D'autre part, il faut considérer que des courants en charge ne peuvent être produits par la tension ondulatoire continue et la force contre électromotrice existante, que lorsque la valeur momentanée de la tension du redresseur dépasse la force contre électromotrice des moteurs.

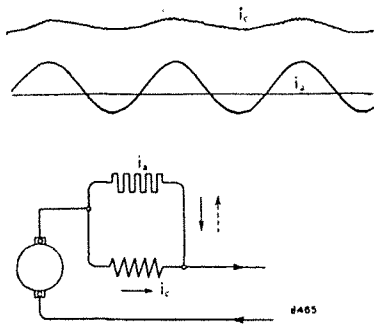


Fig. 20

La bobine de self branchée dans le circuit du courant continu doit donc être dans tous les cas suffisamment grande pour que, aux charges qui se présentent, elle ne laisse pas la valeur momentanée du courant continu, tomber à zéro. Des essais montrent que des moteurs série ou dérivation, branchés sur un redresseur monophasé avec des bobines de self relativement petites, fonctionnent sans étincelles. Les expériences faites jusqu'à présent permettent de dire que les bobines de self correspondant à 30 ou 40 % de la puissance des moteurs suffisent. L'échauffement du moteur reste lui aussi dans les limites admises. Dans les moteurs en dérivation, on constatera un accroissement de température du fer d'induit de 3 à 4° C. Pour les moteurs série, il est recommandé de brancher une résistance ohmique en parallèle avec l'enroulement de champ. Il en résulte que seule la composante de courant continu i_c , livrée par le redresseur monophasé, passe par le circuit principal, tandis que la composante du courant alternatif i_a passe par la dérivation ohmique.

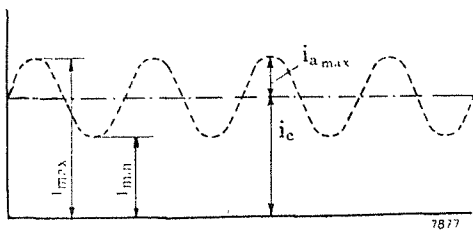


Fig. 21

Ces dispositions ont pour effet d'abaisser le rendement du moteur d'environ 2 à 4 % ; l'échauffement par contre reste dans les limites normales, ce qui peut avoir une importance, dans les moteurs de traction ou de levage.

Relation du courant et de la tension dans le redresseur monophasé.

Ainsi qu'il en a été fait mention précédemment, le courant ondulatoire fourni par un redresseur peut se décomposer en deux composantes : un courant continu i_c et un courant alternatif sinusoïdal i_a , auquel s'ajoute encore éventuellement des harmoniques supérieurs. Si l'on développe la courbe du courant (i) représentée par la figure 14, suivant les termes de la série de Fourier, on obtient :

$$i = J_{\max} \frac{2}{\pi} \left[1 - \frac{2 \cos \left(2 \omega \frac{t}{T} \right)}{1.3} - \frac{2 \cos \left(4 \omega \frac{t}{T} \right)}{3.5} - \frac{2 \cos \left(6 \omega \frac{t}{T} \right)}{5.7} \dots \right] \quad (4)$$

Le premier terme $= \frac{2}{\pi} J_{\max}$ correspond à la valeur moyenne connue d'une demi-onde de sinusoïde et représente donc la partie constante i_c . Dans le second terme, on reconnaît l'onde fondamentale de fréquence $\frac{2 \omega}{T}$ à laquelle viennent s'ajouter les harmoniques d'ordres supérieurs avec des fréquences de $\frac{4 \omega}{T}$, $\frac{6 \omega}{T}$ etc... Il est évident que l'adjonction d'une bobine de self d'amortissement agira principalement sur les fréquences d'ordres supérieurs.

On peut donc dans la plupart des cas représenter le courant et la tension ondulatoires par les expressions :

$$i = i_c + i_{a \max} \sin 2 \omega \frac{t}{T} \quad (5)$$

$$\text{et } e = e_c + e_{a \max} \sin \left(2 \omega \frac{t}{T} + z \right)$$

Il faut donc pour mesurer ce courant prendre garde aux instruments que l'on doit employer. Les instruments à courant continu ne donnent que les valeurs constantes i_c et e_c , tandis que les instruments à courant alternatif donnent au contraire les valeurs effectives dans lesquelles interviennent aussi les composantes alternatives comme :

$$i_{\text{eff}} = \sqrt{i_c^2 + \frac{i_{a \max}^2}{2}} \quad e_{\text{eff}} = \sqrt{e_c^2 + \frac{e_{a \max}^2}{2}} \quad (6)$$

La différence entre ces lectures sera d'autant plus petite que les ondes du courant ondulatoire seront faibles. D'après le professeur Epstein, on entend par « onde » le rapport $\frac{i_{a \max}}{i_c}$ rapport pouvant être utilisé pour mesurer la qualité du courant redressé. On obtient par substitution dans les équations précédentes :

$$F = \frac{i_{a \max}}{i_c} = \sqrt{2 \left[\left(\frac{i_{\text{eff}}}{i_c} \right)^2 - 1 \right]} \quad (7)$$

à l'aide de quoi la table (1) ci-après a été calculée.

TABLE I

Rapport de l'amplitude du courant alternatif au courant continu....	0,00	0,14	0,20	0,28	0,35	0,40	0,45	0,65	0,95	1,17
Rapport de la lecture d'un instrument à courant continu à celle d'un instrument à courant alternatif...	1,000	1,005	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,1	1,2	1,3

On voit que les valeurs relativement très importantes de la composante de courant alternatif ne donnent que de petites différences de lectures qui, pour les appareils de tableaux usuels, restent pour la plupart dans les limites de l'exactitude. Les différences dans la mesure du courant d'anode i_1 ou i_2 (fig. 22) sont au contraire importantes. Avec un appareil à bobine mobile on trouve :

$$i_1 \text{ moyen} + i_2 \text{ moyen} = i_3 \text{ moyen} \quad (8)$$

c'est-à-dire que le résultat i_3 de la lecture de l'appareil de mesure à courant continu, représente la somme des courants continus mesurés dans les anodes. Si, au lieu d'un appareil à bobine mobile qui ne donne que des valeurs moyennes, on insère un ampèremètre thermique et l'on mesure les valeurs effectives seules, on obtient alors :

$$i_1 \text{ eff} + i_2 \text{ eff} = \sqrt{2} i_3 \text{ eff} \quad i_1 \text{ eff} = i_2 \text{ eff} \approx 0.17 i_3 \text{ eff} \quad (9)$$

La section des conducteurs d'anode d'un redresseur monophasé doit donc atteindre pour un même matériel conducteur, au moins 71 % de la section conductrice du circuit à courant continu, ceci est naturellement aussi vrai pour l'enroulement secondaire du transformateur branché avec le redresseur, toute considération gardée concernant la réfrigération.

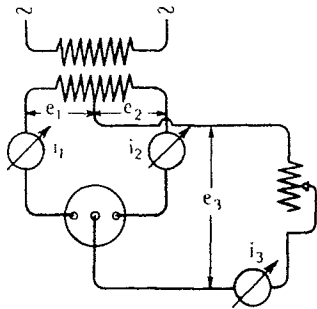


Fig. 22

La figure 14 montre la relation existant entre la tension d'anode e_1 ou e_2 (fig 22) et la tension redressée $e = e_c$. La valeur e_c mesurée au voltmètre à courant continu, représente pour une tension alternative sinusoïdale, la valeur moyenne $\frac{2}{\pi} e_{\text{max}}$. Avec un ampèremètre thermique on obtient $\frac{e_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$. Ces deux résultats sont dans le rapport :

$$\frac{e_3 \text{ eff}}{e_3 \text{ moyen}} = \frac{\frac{e_{\text{max}}}{\sqrt{2}}}{\frac{2}{\pi} e_{\text{max}}} \approx 1.11 \quad (10)$$

où e_{max} représente la valeur maximum de la tension d'anode, déduction faite de la chute de tension dans l'arc.

La tension d'anode ou tension entre le point neutre du transformateur et la borne extérieure se calcule à l'aide de la tension e_c :

$$e_1 \text{ en } = e_2 \text{ en } = \frac{e_{\text{max}}}{\sqrt{2}} - \frac{\pi k}{\sqrt{2} \cdot 2} e_c + \varepsilon$$

où ε représente, avec approximativement 20 volts la chute de tension dans l'arc du redresseur, et k un facteur de correction dépendant de la forme de la courbe de la tension primaire. Si les anodes sont branchées en parallèle, au moyen de bobines de self appropriées, ε doit alors être porté à la valeur $c.e_s$, où c est la chute de tension inductive des bobines de self mesurée pour l'intensité totale de courant et une fréquence de 50 périodes et c un facteur de correction. L'équation devient alors :

$$e \approx 1.11 k, e_c + \varepsilon + c. e_s \quad (11)$$

Les équations 9 et 11 montrent que le secondaire du transformateur branché, avant le redresseur monophasé, doit correspondre à environ 1,65 fois la puissance du courant continu. Du côté primaire il n'y a à prendre en considération que le rendement propre du redresseur (0,85 à 0,95) et le facteur de puissance (environ 0,8 à 0,9).

LE REDRESSEUR POLYPHASÉ (1)

Il s'agit dans la plupart des cas de transformer des courants bi ou triphasés en courant continu. Le redresseur polyphasé est construit d'une façon analogue au monophasé, seul le nombre des anodes augmente avec le nombre de phases, tandis que la cathode de mercure sert à leur ensemble.

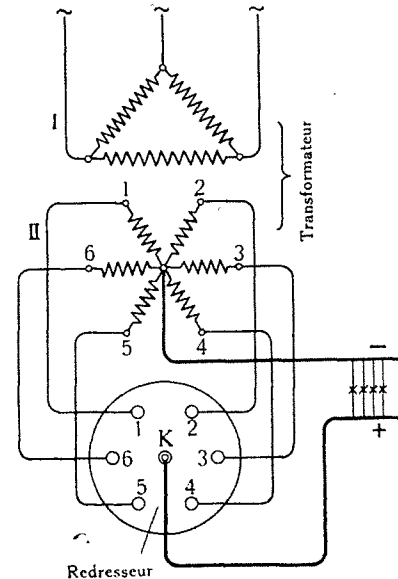


Fig. 23

En ce qui concerne l'allure de la courbe du courant continu résultant, le redresseur polyphasé est plus favorable que le monophasé. Ceci est en particulier le cas pour le redresseur hexaphasé branché au secondaire hexaphasé d'un transformateur, alimenté par un réseau triphasé, ce schéma est représenté par la

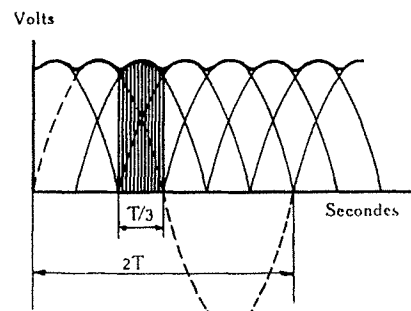


Fig. 24

figure 23. Les enroulements secondaires, par suite de l'effet de valve du redresseur, ne sont parcourus que par les courants allant du point neutre à l'anode. Les six demi-ondes de tension correspondantes ont l'allure représentée sur la figure 24. La courbe tracée en trait fort au-dessus des points d'intersection représente la forme réelle de la tension côté continu dans un redresseur hexaphasé. On remarque que cette courbe a une allure beaucoup plus constante que celle d'un redresseur monophasé, représentée sur la figure 18.

(1) Voir : *Revue B. B. C.*, 1919, Nos 5 à 9.
 Voir : Rapport de M. A. ODERMATT au XVIII^e Congrès international de tramways et chemins de fer (Bruxelles, octobre 1922).

Si l'on branche le redresseur polyphasé sur une résistance ohmique pure, la courbe du courant continu résultant aura exactement l'allure de celle de la tension (fig. 24). Les anodes individuellement ne conduisent du courant que tant que la valeur instantanée de la tension de phase considérée dépasse les autres, c'est-à-dire pendant un sixième de période. La présence d'une résistance inductive dans le circuit du courant continu produit un recouvrement temporaire des courants de phase, ainsi que cela a été montré avec le redresseur monophasé. On peut obtenir avec un couplage spécial des bobines de self, qu'au même instant, deux ou trois anodes branchés à différentes phases soient parcourues par le courant. Ainsi, le courant redressé obtenu sera considérablement amélioré et l'effet ondulatoire, c'est-à-dire le rapport entre la composante de courant continu et l'amplitude de la composante de courant alternatif qui lui est superposée (de 61 % avec le redresseur monophasé) diminuera à environ 8 %

Relation entre le courant et la tension dans le redresseur polyphasé. — Entre la valeur effective de la tension de phase du secondaire du transformateur et la tension du courant obtenu, on peut établir la relation suivante :

$$e \sim \frac{(e_0 + \varepsilon) k}{1,2 \left[\sin \alpha \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) + \frac{1}{\pi} \right]} \quad (12)$$

α pour un courant hexaphasé est égal à 60° et pour un courant tétraphasé à 45°, k est un facteur de correction dépendant de la forme des courbes. Pour simplifier et dans la pratique l'équation (12) peut s'exprimer comme suit dans le cas le plus fréquent d'un redresseur hexaphasé :

$$e \sim \frac{e_c + \varepsilon + c e_s}{1,35 k} \quad (13)$$

où : ε représente la chute de tension dans l'arc, soit environ 20 volts, e_s la tension des bobines de self des anodes (mesurée à l'aide de courant alternatif sinusoïdal de même intensité que le courant d'anode normal). c et k sont des facteurs de correction dépendant du couplage choisi.

Admettons par exemple que l'on veuille obtenir un courant continu à 230 volts et que l'on emploie dans ce but plusieurs bobines de self d'anode avec une chute de tension nominale de 30 volts. La tension de phase demandée se calcule alors comme suit :

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

où les valeurs 1,2 et 0,97 sont introduites pour c et k . Le transformateur précédant le redresseur doit donc fournir à pleine charge 218 volts entre le point neutre et les bornes extérieures. La tension à vide du transformateur doit être choisie plus élevée, et l'expérience a montré qu'il fallait calculer avec une chute de tension deux fois plus forte que celle obtenue en charge, avec un courant alternatif pur et un $\cos \varphi = 0,9$. Si, dans l'exemple ci-dessus, cette dernière valeur atteint 3 %, la tension à vide du transformateur deviendra alors : $1,06 \times 218 = 231$ volts. On peut alors calculer la tension à vide du redresseur :

$$e_1 = 1,35 \times 0,97 \times (231 - 20) = 282 \text{ volts}$$

et la chute de tension totale : $282 - 230 = 52$ volts ou 18,5 %. Si une pareille chute est inadmissible, les bobines de self devront être pourvues d'enroulement en court-circuit ; on aura alors dans l'équation (13), $c = 0,2$ (au lieu de $c = 1,2$). Dans ce cas, le trans-

formateur fournira à vide 210 volts et à pleine charge 198 volts avec une chute de tension totale du côté courant continu de 23 v. seulement, c'est-à-dire 9 %. Si l'on a affaire à des tensions plus élevées, les chutes de tension dans l'arc et les bobines de self diminuent d'importance et la perte en % est par suite fortement réduite.

La relation entre le courant continu i_c et les courants i_1, i_2, \dots, i_n avec (n) comme nombre de phases donne :

$$i_c = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{\frac{2\pi}{n}} i_1^2 dx + \int_{\frac{2\pi}{n}}^{\frac{4\pi}{n}} i_2^2 dx + \dots + \int_{\frac{(n-1)2\pi}{n}}^{2\pi} i_n^2 dx \right)}$$

et la valeur, entre parenthèses sous la racine, composée de n termes semblables, pourra s'écrire :

$$i_c = \sqrt{\frac{n}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{n}} i_1^2 dx} = i_{\text{eff}} \sqrt{n} \text{ ou } i_{\text{eff}} \frac{i_c}{\sqrt{n}} \quad (14)$$

c'est-à-dire que le courant de phase effectif est théoriquement égal au total du courant continu, divisé par la racine carrée du nombre de phases. Dans le cas de courant hexaphasé $\sqrt{n} = \sqrt{6} = 2,45$. Pour un courant continu obtenu de 500 ampères la valeur effective de l'intensité du courant dans chaque phase sera de $\frac{500}{2,45} = 203$ ampères. Ce courant mesuré avec un ampère-

mètre à courant continu ne donnerait en revanche que $\frac{500}{6} = 83$ ampères. Il s'agit donc de prendre garde, lors de la mesure du courant de phase, si l'on utilise un ampèremètre à bobine mobile ou un ampèremètre thermique, afin d'éviter aux anodes des surcharges pouvant être la cause d'avarie.

En réalité, la valeur effective du courant de phase tombera à une valeur 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. Des résultats d'expérience montrent que dans un redresseur hexaphasé au lieu du facteur $\frac{1}{\sqrt{6}}$ ou $\frac{1}{2,45}$ il faut introduire le facteur : $\frac{1}{2,8}$ à $\frac{1}{3,0}$.

Il résulte des valeurs obtenues pour les rapports de tension et de courant dans un redresseur hexaphasé que le secondaire du transformateur doit être dimensionné pour environ 1,75 fois la puissance du courant continu et le primaire pour environ 1,25 fois cette même puissance. En moyenne, il faut donc compter avec une puissance du transformateur 1,5 fois plus grande. Il faut encore remarquer que le primaire doit être couplé en triangle et le secondaire en couplage hexaphasé ouvert.

Lors de courants primaires à très haute tension, le couplage en étoile peut devenir nécessaire ; il en résulte alors une chute de tension plus forte et des courants de phase plus faibles que ceux calculés plus haut.

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 la détermination du transformateur d'alimentation ou autres questions secondaires.

(A suivre.)