

6. ENSEMBLES GRADATEUR-TRANSFORMATEUR-DIODES
DESTINES A L'OBTENTION DE TRES HAUTES OU
DE TRES BASSES TENSIONS REDRESSEES VARIABLES

C. ROMBAUT, P. GOERGER, G. SEGUIER
Université des Sciences et Techniques de Lille , France.

Les montages bien connus /1/ permettant la réalisation de tensions continues variables à partir du réseau alternatif sont peu satisfaisants dans le cas de très hautes et très basses tensions secondaires. Il est alors intéressant d'alimenter le transformateur, fortement élévateur ou abaisseur, sous une tension alternative variable obtenue à l'aide d'un gradateur.

Plusieurs montages étant possibles, les auteurs examinent les configurations donnant une tension redressée d'ordre six et effectuent leur comparaison.

INTRODUCTION

Les montages permettant l'obtention de tensions continues variables à partir du réseau alternatif sont bien connus. Ils utilisent des redresseurs, thyristors et diodes, redressant les tensions secondaires d'un transformateur. Parmi les différents montages, il est possible de choisir celui qui convient le mieux à chaque application. Il y a néanmoins deux domaines où ce type de redressement est peu satisfaisant, il s'agit de l'obtention de très hautes ou de très basses tensions continues variables. Dans ces deux cas, les tensions secondaires du transformateur étant très élevées ou très basses, les thyristors du montage redresseur travaillent dans de mauvaises conditions. Dans le premier cas, ils ont à bloquer des tensions très élevées, dans le second, au moins pour les montages puissants, ils doivent écouler des courants très importants. Il est alors intéressant d'utiliser l'association gradateur-transformateur-diodes /2/. Le gradateur, inséré entre les bornes du réseau alternatif et le primaire du transformateur, fait varier la tension aux bornes de celui-ci. Les tensions secondaires sont redressées par un montage à diodes. Malgré l'adjonction des diodes opérant le redressement, le coût de l'installation est réduit car les thyristors du gradateur ont des calibres, tension et courant, habituels ce qui diminue fortement le coût des composants.

De plus, ce convertisseur a des avantages liés au fait que le réglage de la tension continue est opéré par variation de la tension primaire du transformateur. La réduction de la tension s'accompagne d'une diminution des pertes dans le fer du transformateur et des courants dans le bobinage de celui-ci, donc des pertes cuivre. Ainsi, les facteurs de puissance, primaire et secondaire et le rendement de la transformation alternatif-continu décroissent moins vite quand on réduit la tension continue

qu'avec un montage redresseur usuel.

On peut réaliser ce convertisseur de plusieurs façons, en choisissant différents groupements de redresseurs, tant pour le gradateur que pour le redresseur. On se bornera ici à l'étude de ceux permettant d'obtenir une tension redressée d'ordre six.

Du côté secondaire deux montages sont possibles : le montage en pont à six diodes et le montage en "double étoile" à bobine interphase /3/. Le premier est utilisé pour la réalisation des hautes tensions continues, le deuxième pour l'obtention des très basses tensions car dans ce cas on ne peut tolérer la chute de tension dans deux diodes en série.

Du côté primaire le gradateur peut être réalisé de trois façons différentes. Les enroulements du transformateur peuvent être couplés soit en étoile, soit en triangle, les trois groupes de thyristors connectés tête-bêche étant interposés entre la source et les bornes du transformateur, on peut aussi insérer les trois groupes de thyristors dans les phases du transformateur couplé en triangle.

Afin de choisir le type de montage le plus approprié à une application déterminée nous étudierons le fonctionnement des trois montages possibles utilisant un gradateur triphasé associé à un transformateur et un montage redresseur en pont, le cas du montage double-étoile avec bobine interphase se déduisant aisément des précédents.

L'examen des caractéristiques de ces montages permettra d'effectuer la comparaison et la détermination de critères de choix.

Afin de montrer les modes de raisonnement permettant la détermination des caractéristiques de ces ensembles, nous effectuerons l'analyse détaillée d'un de ces montages.

I. ASSOCIATION D'UN GRADATEUR TRIPHASÉ TOUT THYRISTORS DISPOSE DANS LA LIGNE D'ALIMENTATION, D'UN TRANSFORMATEUR TRIANGLE-ETOILE ET D'UN MONTAGE REDRESSEUR EN PONT A DIODES.

Le gradateur triphasé tout thyristors est formé de trois groupes de deux thyristors, th_A et th'_A , th_B et th'_B , th_C et th'_C connectés tête-bêche et disposés entre les bornes de la source et du transformateur (fig.1)./4/.

Le circuit magnétique à trois noyaux N_A , N_B et N_C est représenté en traits discontinus, Φ_A , Φ_B et Φ_C désignant les flux dans ces noyaux. Les enroulements du primaire du transformateur sont couplés en triangle et les enroulements secondaires

AGS

couplés en étoile voient leurs tensions redressées par six diodes, D_A, D_B, D_C à cathodes réunies, D'_A, D'_B, D'_C à anodes réunies, formant un montage redresseur à commutation parallèle double. La tension redressée u_C est prise entre le point de jonction des anodes de D'_A, D'_B, D'_C et le point de jonction des cathodes de D_A, D_B, D_C .

On désigne par V_A, V_B, V_C les tensions simples d'alimentation sinusoïdales, de pulsation ω , comptées par rapport au point neutre de la source. On a : $V_A = V_m \sin \theta$, $V_B = V_m \sin (\theta - \frac{2\pi}{3})$,

$V_C = V_m \sin (\theta - \frac{4\pi}{3})$ avec $\theta = \omega t$ et $V_m = V\sqrt{2}$

V étant la valeur efficace de la tension simple d'alimentation. On notera $V_{AC} = V_A - V_C$, $V_{BA} = V_B - V_A$, $V_{CB} = V_C - V_B$ les tensions composées de la source d'impédance interne négligeable.

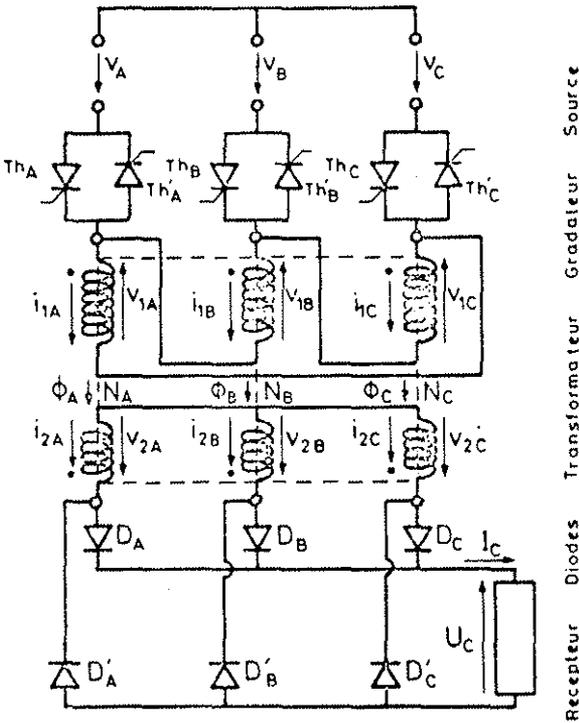


Figure 1 : Schéma du montage

Les enroulements primaires de n_1 tours ont des tensions aux bornes V_{1A}, V_{1B}, V_{1C} et sont parcourus par des courants i_{1A}, i_{1B}, i_{1C} . Les enroulements secondaires de n_2 tours sont sièges des tensions V_{2A}, V_{2B}, V_{2C} et traversés par les courants i_{2A}, i_{2B}, i_{2C} .

Les tensions aux bornes des trois ensembles de thyristors sont notées $V_{thA}, V_{thB}, V_{thC}$ et celles aux bornes des diodes $V_{DA}, V_{DB}, V_{DC}, V'_{DA}, V'_{DB}, V'_{DC}$. Les trois courants en ligne sont désignés par j_{1A}, j_{1B}, j_{1C} .

On suppose parfait le transformateur et tous les redresseurs ce qui revient à négliger toutes les causes de chute de tension en charge, les fuites de flux, le courant magnétisant et les pertes dans le fer du transformateur. Dans ces conditions les tensions aux bornes des bobinages sont liées par les relations :

$$\frac{V_{1A}}{V_{2A}} = \frac{V_{1B}}{V_{2B}} = \frac{V_{1C}}{V_{2C}} = \frac{n_1}{n_2} = m \quad (1)$$

Comme de plus $\phi_A + \phi_B + \phi_C = 0$, nous avons :

$$n_1 \frac{d\phi_A}{dt} + n_1 \frac{d\phi_B}{dt} + n_1 \frac{d\phi_C}{dt} = 0 \text{ et ainsi}$$

$$V_{1A} + V_{1B} + V_{1C} = 0 \quad (2)$$

Le primaire du transformateur est couplé en triangle donc aucune condition spéciale n'est imposée aux courants alternatifs primaires. De plus la valeur moyenne du courant dans un enroulement secondaire est nulle du fait de la symétrie du montage redresseur et de celle du gradateur. Nous pouvons donc écrire la compensation des ampères-tours sur chaque noyau :

$$\begin{cases} m i_{1A} = i_{2A} \\ m i_{1B} = i_{2B} \\ m i_{1C} = i_{2C} \end{cases} \text{ avec en ligne } \begin{cases} j_{1A} = i_{1A} - i_{1E} = (i_{2A} - i_{2B})/m \\ j_{1B} = i_{1B} - i_{1C} = (i_{2B} - i_{2C})/m \\ j_{1C} = i_{1C} - i_{1A} = (i_{2C} - i_{2A})/m \end{cases} \quad (3)$$

On suppose de plus que le courant i_C débité par le montage redresseur est parfaitement lissé et donc que sa valeur instantanée peut être confondue tout au long de la période avec sa valeur moyenne I_C .

Le couplage en étoile du secondaire entraîne :

$$i_{2A} + i_{2B} + i_{2C} = 0 \quad (4)$$

On déclenche les thyristors dans l'ordre suivant, $th_A, th'_C, th_B, th'_A, th_C, th'_B$ à des intervalles de temps égaux d'un sixième de période. Le déclenchement de th_A est repéré par l'angle ψ compté à partir du moment où V_A devient positive donc à partir de $\theta = 0$.

Le montage étant symétrique, les mêmes phénomènes se reproduisent dans les trois phases à $2\pi/3$ ou $4\pi/3$ près. De plus, les thyristors th'_A, th'_B, th'_C étant déclenchés une demi-période après th_A, th_B, th_C les différents courants et tensions ont des formes d'onde telles que l'alternance négative est identique, au signe près, à l'alternance positive. Ces symétries permettent de limiter à un sixième de période l'étude de l'évolution des variables.

Pour les courants primaires, par exemple, puisque

$$\begin{aligned} i_{1A}(\theta) &= -i_{1C}(\theta + \frac{\pi}{3}) = i_{1B}(\theta + \frac{2\pi}{3}) = -i_{1A}(\theta + \pi) = i_{1C}(\theta + \frac{4\pi}{3}) = \\ &= -i_{1B}(\theta + \frac{5\pi}{3}) \end{aligned}$$

On aura :

$$i_{1A}(\theta + \frac{\pi}{3}) = -i_{1B}(\theta); \quad i_{1A}(\theta + \frac{2\pi}{3}) = i_{1C}(\theta)$$

$$i_{1A}(\theta + \pi) = -i_{1A}(\theta); \quad i_{1A}(\theta + \frac{4\pi}{3}) = i_{1B}(\theta)$$

$$i_{1A}(\theta + \frac{5\pi}{3}) = -i_{1C}(\theta).$$

Quand l'angle ψ croît de 0 à $\frac{5\pi}{6}$, trois modes de fonctionnement caractérisés par le nombre de redresseurs simultanément conducteurs se succèdent :

- Premier mode : conduction de 3 ou 2 thyristors
débit de 2 ou 3 diodes
- Deuxième mode : conduction de 2 thyristors
débit de 3 diodes
- Troisième mode : conduction de 2 ou 0 thyristor
débit de 3 ou 6 diodes

I.1. Premier mode de fonctionnement : $0 < \psi < \pi/3$

- Pendant l'intervalle $\psi < \theta < \pi/3$, Th_A, Th'_B, Th_C, D'_B

et D_C conduisent .

Un thyristor par phase est conducteur, on retrouve les tensions composées du réseau aux bornes des enroulements primaires. $V_{1A} = V_{AC}$, $V_{1B} = V_{BA}$, $V_{1C} = V_{CB}$

d'après (1) $V_{2A} = V_{AC}/m$, $V_{2B} = V_{BA}/m$, $V_{2C} = V_{CB}/m$

Durant cet intervalle, V_{2C} étant la plus positive des tensions secondaires, D_C conduit et de ce fait entraîne ou confirme le blocage de D_A et D_B car :

$$V_{DC} = 0, V_{DA} = V_{2A} - V_{2C} = -3V_C/m < 0$$

$$V_{DB} = V_{2B} - V_{2C} = 3V_B/m < 0$$

V_{2B} étant la plus négative des tensions secondaires, D_B conduit et de ce fait entraîne ou confirme le blocage de D'_A et D'_C car :

$$V_{D'B} = 0, V_{D'A} = V_{2B} - V_{2A} = -3V_A/m < 0$$

$$V_{D'C} = V_{2B} - V_{2C} = 3V_B/m < 0$$

tension redressée u_c est alors égale à $V_{2C} - V_{2B}$

$$u_c = V_{CB}/m - V_{BA}/m = -3V_B/m$$

Les diodes D_C et D'_B écoulent le courant i_c donc :

$$i_{2C} = -i_{2B} = I_C \text{ et } i_{2A} = 0$$

Les relations (2) donnent alors : $j_{1A} = j_{1C} = I_C/m$,
 $j_{1B} = -2I_C/m$

- Pendant l'intervalle $\pi/3 < \theta < \pi/3 + \pi/3$, th_A , th'_B , D_A , D'_C et D'_B conduisent.

A l'instant où $\theta = \pi/3$, la tension $V_{DA} = -3V_C/m$ devient positive ce qui provoque l'entrée en conduction de D_A . Supposons alors que la conduction de D_A entraîne le blocage de D_C , alors D_A écoule I_C et $i_{2A} = I_C$ et $i_{2C} = 0$. Les relations (2) donnent $j_{1A} = -j_{1C} = I_C/m$ et $j_{1B} = 0$. Cela nécessite la conduction de th'_C alors qu'il n'a pas encore reçu son impulsion de déblocage, ce fonctionnement est impossible.

Les diodes D_A et D_C vont conduire simultanément, ce fait simultané entraîne l'égalité des tensions V_{2A} et V_{2C} donc celle de V_{1A} et V_{1C} . Les bornes primaires A et C ne peuvent plus être reliées simultanément à la source. le thyristor th_C va se bloquer et le courant fourni par th_A va s'écouler par th'_B .

Puisque $V_{1B} = V_{BA}$, $V_{1C} = V_{1A}$ et $V_{1A} + V_{1B} + V_{1C} = 0$

il vient $V_{1A} = V_{1C} = -V_{BA}/2$

Nous en déduisons les expressions des tensions aux bornes des thyristors et des diodes :

$$V_{th_A} = V_{th_B} = 0 \text{ et } V_{th_C} = V_C - V_{1C} - V_B = 3V_C/2$$

$$V_{DA} = V_{DC} = V_{D'B} = 0, V_{DB} = -V_{2A} + V_{2B} = 3V_{BA}/2m$$

$$V_{D'A} = V_{2B} - V_{2A} = 3V_{BA}/m, V_{D'C} = V_{2B} - V_{2C} = 3V_{BA}/2m$$

La tension redressée u_c vaut alors $u_c = V_{2A} - V_{2B} = -3V_{BA}/2m$

Le courant j_{1C} étant nul, $j_{1A} = -j_{1B}$

Les diodes D'_A et D'_C sont bloquées donc D'_B écoule I_C et $i_{2B} = -I_C$.

La diode D_B est bloquée donc $i_{2A} + i_{2C} = I_C$ d'après (4).

Dans ces conditions, comme $m j_{1A} = i_{2A} - i_{2B}$
 $m j_{1B} = i_{2B} - i_{2C}$

alors $i_{2A} = i_{2C} = I_C/2$.

En ligne nous trouvons $j_{1A} = I_C/2m$, $j_{1B} = -I_C/2m$, $j_{1C} = 0$ ce qui confirme bien les conductions des thyristors th_A et th'_B .

- A l'instant où $\theta = \psi + \pi/3$, une impulsion de déblocage est envoyée sur th'_C . La tension à ses bornes, $-3V_C/2$, étant positive, ce thyristor se met à conduire. Les thyristors th_A , th'_B et th'_C conduisent alors et on retrouve les tensions composées du réseau aux bornes des enroulements, la tension V_{2A} étant la plus positive des tensions secondaires le débit de D_A entraîne le blocage de D_C .

- La limite de ce mode est obtenu quand disparaît le fonctionnement à 3 thyristors conducteurs soit quand $\psi = \pi/3$.

On a représenté (figure 2) pour $\psi = 0$ et $\pi/6$, les diagrammes de conduction et les formes d'onde des différents courants et tensions.

1.2. Deuxième mode de fonctionnement : $\pi/3 < \psi < \pi/2$

Pendant l'intervalle $\psi < \theta < \psi + \pi/3$, th_A , th'_B , D_A , D'_C , D'_B conduisent.

A l'instant où $\theta = \psi$, on amorce th_A alors que th'_B , th'_C , D'_A , D'_B et D_C conduisent. Le déblocage de th_A entraîne la conduction de D_A et l'extinction de D'_A et th_C comme dans la 2ème partie du premier mode.

- A l'instant où $\theta = \psi + \pi/3$, une impulsion de déblocage est envoyée sur th'_C , la tension à ses bornes, $-3V_C/2$, étant positive, il se met à conduire entraînant la conduction de D'_C et l'extinction de D_C et th'_B . On retrouve un fonctionnement analogue à celui rencontré un sixième de période plus tôt.

- Ce mode cesse quand on amorce th'_C alors que la tension aux bornes des 3 diodes bloquées D'_A , D'_C , D_B , $3V_{BA}/2m$ cesse d'être négative, soit pour $\psi = \pi/2$.

On a représenté (fig. 2) pour $\psi = \pi/3$ et $\pi/2$ les diagrammes de conduction et les formes d'onde des différents courants et tensions.

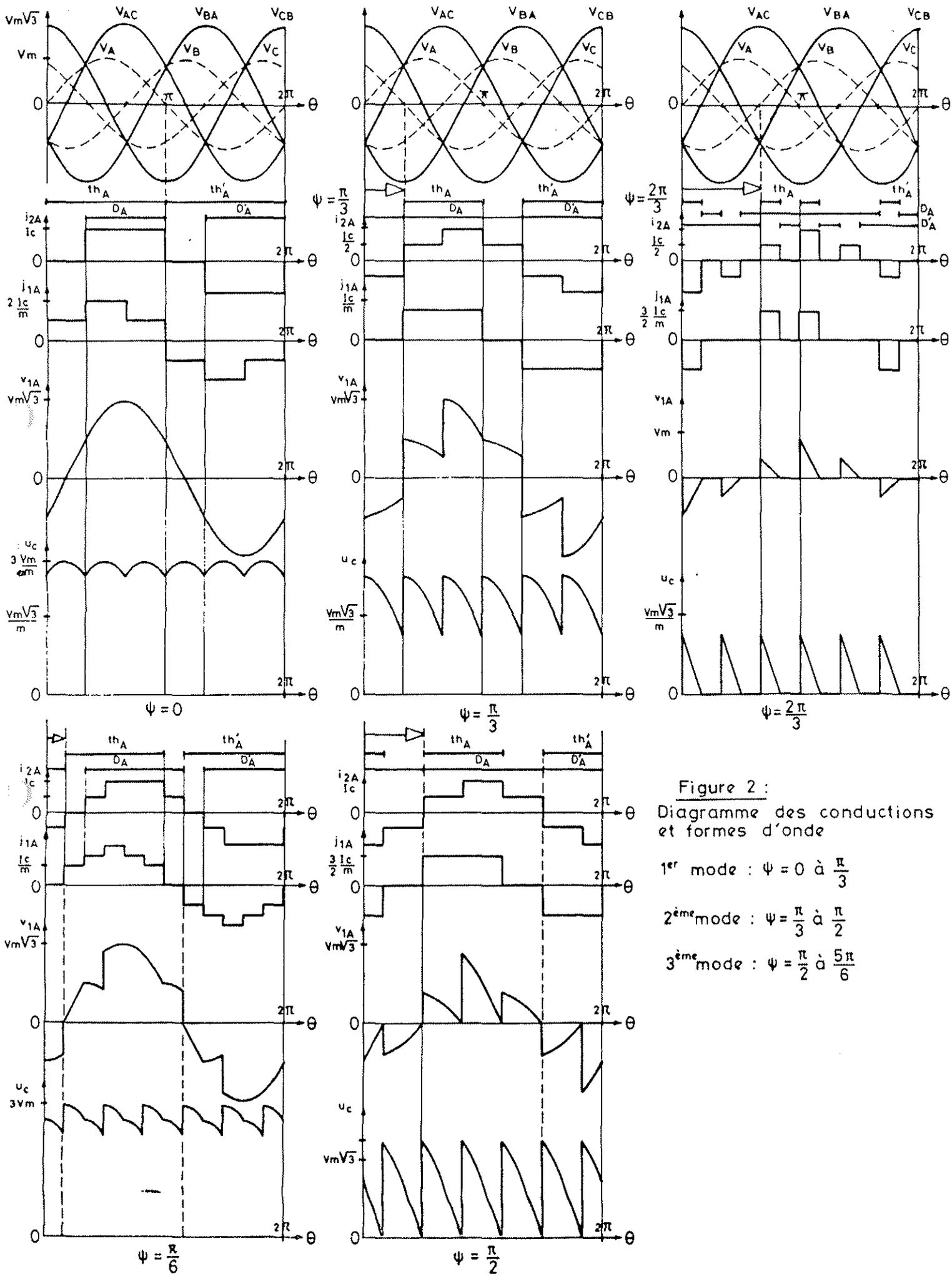
1.3. Troisième mode de fonctionnement : $\pi/2 < \psi < 5\pi/6$

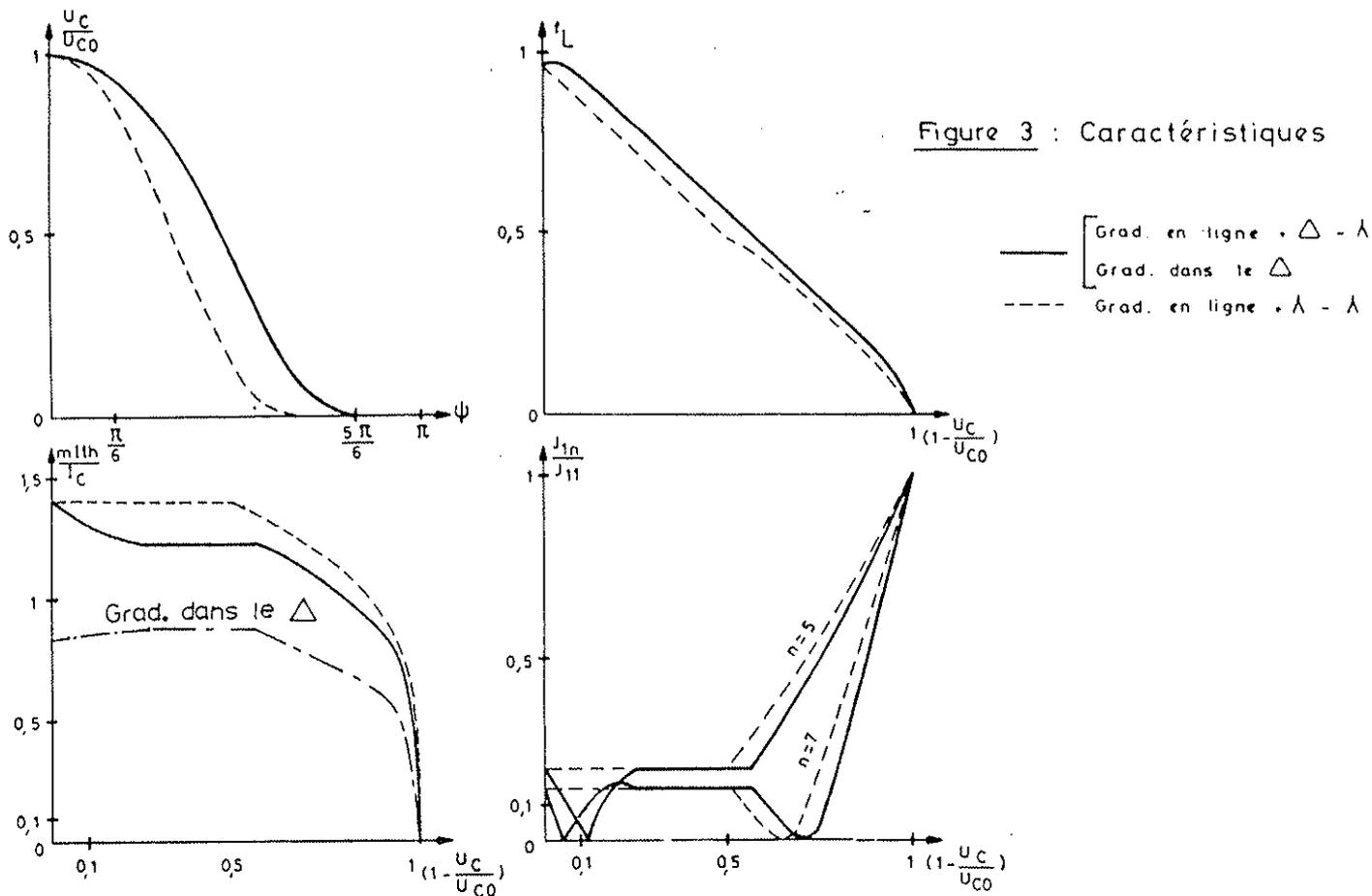
- Pendant l'intervalle $\psi < \theta < 5\pi/6$, th_A , th'_B , D_A , D'_C , D'_B conduisent.

A l'instant où $\theta = \psi$, on amorce th_A et th'_B (impulsion de confirmation) et l'on retrouve le fonctionnement à 2 thyristors précédemment étudié.

- Pendant l'intervalle $5\pi/6 < \theta < \psi + \pi/3$, les 6 diodes conduisent.

A l'instant où $\theta = 5\pi/6$, la tension $3V_{BA}/2m$ aux bornes des diodes D'_A , D'_C et D_B cesse d'être négative, les 6 diodes vont conduire simultanément. Les 3 tensions secondaires étant alors égales, les 3 tensions primaires vont l'être aussi ce qui suppose le primaire du transformateur déconnecté du réseau, donc que les thyristors th_A et th'_B se bloquent. Les tensions aux bornes des enroulements et des diodes ainsi que la tension redressée sont toutes nulles.





Les courants primaires sont tous nuls. au secondaire comme $i_{2A} = i_{2B} = i_{2C} = 0$ et comme $i_{1A} + i_{1B} + i_{1C} = i_{D'A} + i_{D'B} + i_{D'C} = I_C$ le courant se partage dans les 6 diodes donc dans chaque diode on retrouve $I_C/3$.

De plus on retrouve les tensions du réseau aux bornes des thyristors. En mettant en parallèle sur chaque groupe de thyristors des résistances égales fortes valeurs on réalise l'équilibrage des tensions aux bornes des groupes de thyristors et $V_{thA} = V_A, V_{thB} = V_B, V_{thC} = V_C$.

- A l'instant où $0 = \psi + \pi/3$, on déclenche th'_C et th'_A simultanément. Puisque la tension aux bornes de l'ensemble th'_A, th'_C est telle que $V_{thA} + V_{thC} = V_{AC} > 0$, ces thyristors s'amorcent et on retrouve un fonctionnement analogue à celui rencontré un sixième de période plus tôt.

- Le mode cesse quand le thyristor th'_C n'a plus sa tension anodique positive lors de l'envoi des impulsions de déblocage. Or V_{AC} s'annule pour $\psi = \pi/6$. La valeur limite de ψ est obtenue quand $\psi + \pi/3 = 7\pi/6$ soit $\psi = 5\pi/6$.

- Dans l'intervalle $5\pi/6 < \psi < 2\pi$, les thyristors des gradateurs ne peuvent pas être déblocés, le transformateur est déconnecté du réseau, la tension u_C est constamment nulle.

On a représenté (fig. 2) pour $\psi = 2\pi/3$ les diagrammes de conduction et les formes d'onde des courants

et tensions. Toutes les formes d'onde ont évidemment été vérifiées expérimentalement.

Notons que, lors du troisième mode, quand on veut déblocuer un thyristor dans son premier intervalle de conduction de la période, il faut réamorcer celui qui conduisait un sixième de période auparavant. Pour cela on peut :

- soit commander par des créneaux ou des rafales d'impulsions ayant une largeur supérieure à $\pi/3$
- soit envoyer des impulsions de confirmation, c'est à dire envoyer des impulsions sur les 2 thyristors qui doivent être déblocés simultanément.

I.4. Caractéristiques

Connaissant les expressions des courants et tensions durant les divers intervalles qui composent une période il est aisé de calculer leurs valeurs. On montrera comment, en fonction de l'angle ψ évolue la valeur moyenne de la tension redressée u_C , et, à courant redressé I_C donné, les courants primaires et secondaires du transformateur ainsi que les courants en ligne.

Cela nous permettra de comparer les performances du montage étudié à celles d'autres montages du même type et à celles du montage classique à 6 thyristors en pont au secondaire du transformateur.

- Caractéristique de réglage

La valeur moyenne de u_C est donnée par :

$$U_C = 6/T \int_0^{T/6} u_C dt$$

Pour $\psi = 0$, $U_{CO} = 9V_m / m$

Pour le 1er mode : $U_C = U_{CO} \frac{1 + \cos \psi}{2}$

Pour le 2ème mode : $U_C = U_{CO} \frac{\sqrt{3}}{2} (\sin(\psi + \pi/3))$

Pour le 3ème mode : $U_C = U_{CO} \frac{\sqrt{3}}{2} [1 - \cos(\psi - 5\pi/6)]$

La courbe $U_C / U_{CO} = f(\psi)$ (fig.3) montre comment U_C passe de U_{CO} à 0 quand ψ va de 0 à $5\pi/6$.

- Caractéristiques des courants primaires et secondaires.

Le courant débité étant supposé constant et égal à I_C et le montage symétrique, le courant moyen dans chaque enroulement est nul. La valeur efficace I_2

de i_{2A} est calculée par $I_2 = \left(\frac{2}{T} \int_0^{T/2} i_{2A}^2 dt \right)^{1/2}$

On obtient pour le 1er mode : $I_2 = I_C \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{\psi}{2\pi}}$

pour le 2ème mode : $I_2 = \frac{I_C}{\sqrt{2}}$

pour le 3ème mode : $I_2 = I_C \sqrt{\frac{3}{2} \left(\frac{5}{6} - \frac{\psi}{\pi} \right)}$

Pour les courants primaires $I_1 = \frac{I_2}{m}$.

- Caractéristiques relatives au courant en ligne

Le courant moyen en ligne est nul. Sa valeur efficace est $J = \frac{I_1}{\sqrt{3}}$ puisqu'il n'y a pas d'harmonique de rang 3 ou multiple de 3 dans les courants primaires.

On en déduit alors le facteur de puissance en ligne

donné par $f_L = \frac{U_C I_C}{3J \cdot V_m / \sqrt{2}}$

La somme des courants en ligne étant toujours nulle et la demi-onde positive étant identique au signe près à la demi-onde négative, le développement en série des courants ne comprendra ni les harmoniques de rang 3 ou multiples de 3 ni les harmoniques pairs outre le fondamental, on trouvera donc les harmoniques de rang 5, 7, 11, 13,

La valeur efficace de l'harmonique de rang n est donnée par :

$$J_{1n} = \frac{8}{\sqrt{2}T} \int_0^{T/4} j(t) \sin(n\omega t) dt$$

On obtient pour le 1er mode :

$$J_{1n} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi \cdot m \cdot n} I_C \cos^2\left(n\frac{\pi}{6}\right) \left| \cos\left(n\frac{\psi}{2}\right) \right|$$

pour le 2ème mode :

$$J_{1n} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi \cdot m \cdot n} I_C \left| \cos^3\left(n\frac{\pi}{6}\right) \right|$$

pour le 3ème mode :

$$J_{1n} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi \cdot m \cdot n} I_C \left| \sin\left(n\frac{\pi}{3}\right) \sin n \left| \frac{5\pi}{12} - \frac{\psi}{2} \right| \right|$$

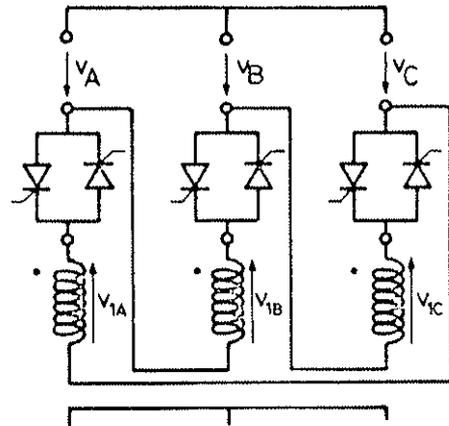
Tension de crête et courant efficace maximum dans les redresseurs

$$V_{th_{max}} = \frac{3}{2} V_m \quad I_{th_{eff_{max}}} = \sqrt{2} \cdot I_C / m$$

$$V_{D_{max}} = 3V_m / m \quad I_{C_{eff_{max}}} = I_C \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}$$

On a représenté (fig.3) les différentes caractéristiques du montage.

II. ASSOCIATION D'UN GRADATEUR TRIPHASE TOUT THYRISTORS DONT LES 3 GROUPES DE THYRISTORS SONT INSERES DANS LES PHASES DU TRANSFORMATEUR TRIANGLE-ETOILE ET D'UN MONTAGE REDRESSEUR EN PONT A DIODES



Transformateur Gradateur Source

Figure 4 : Grad. dans le Δ

En utilisant trois ensembles gradateur monophasé (fig.4) couplés en triangle, on règle directement le courant dans les phases primaires du transformateur. Le secondaire est disposé de la même manière qu'au paragraphe précédent.

L'existence d'une composante homopolaire dans les courants polygonaux ne modifie pas le fonctionnement du montage, mais ne permet pas la compensation des ampères-tours par noyau.

Lorsque ψ varie de 0 à $5\pi/6$, trois modes de fonctionnement se succèdent :

- . premier mode : conduction de 2 ou 1 thyristors
débit de 2 ou 3 diodes
- . deuxième mode : conduction de 1 thyristor
débit de 3 diodes
- . troisième mode : conduction de 1 ou 0 thyristor
débit de 3 ou 6 diodes

Ce montage nécessite des thyristors de moindre calibre que le précédent car $I_{th_{eff_{max}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I_C}{m}$

ainsi qu'un simple déclenchement.

Il n'est cependant pas utilisable à forte puissance.

This is repeated in figure 8.

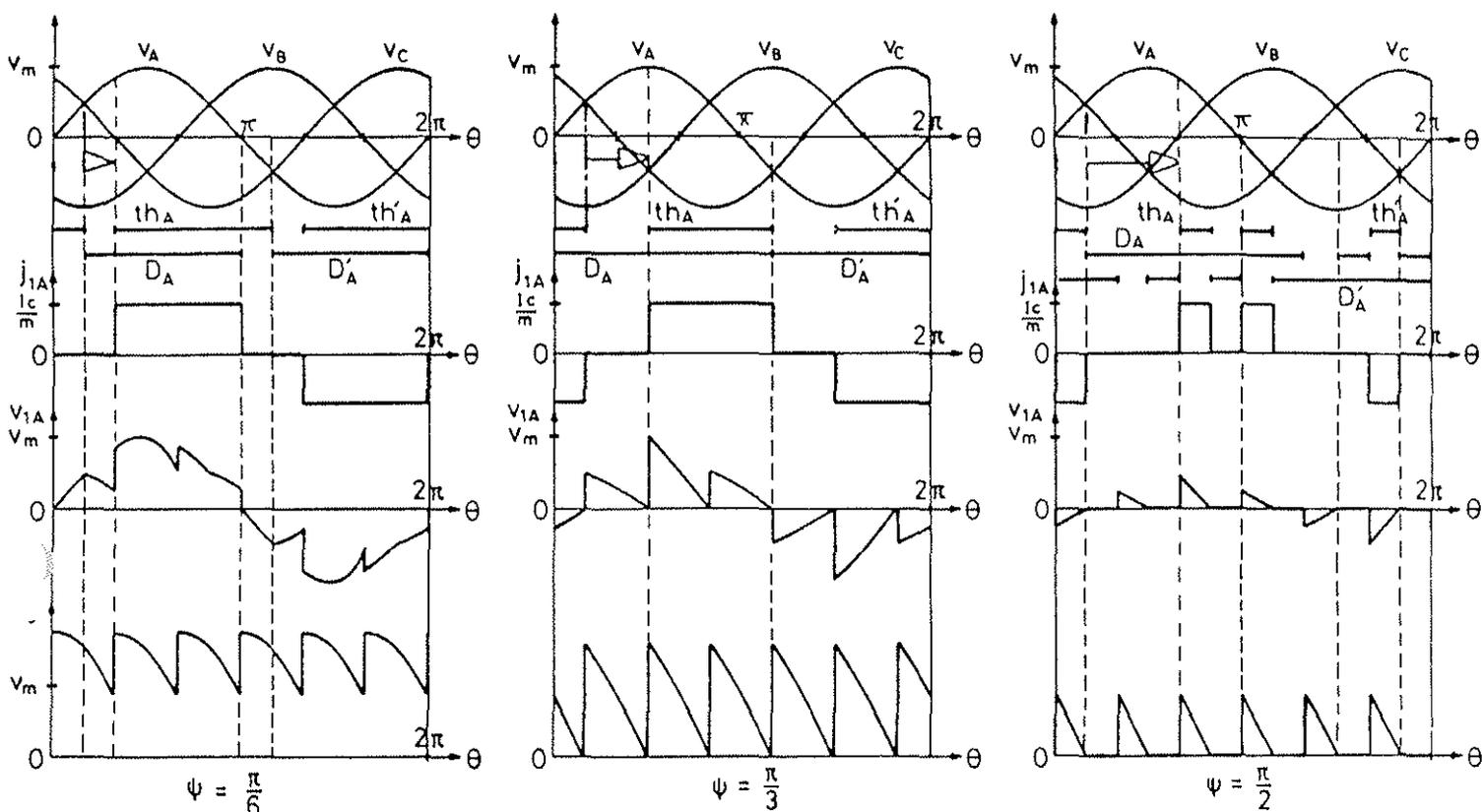
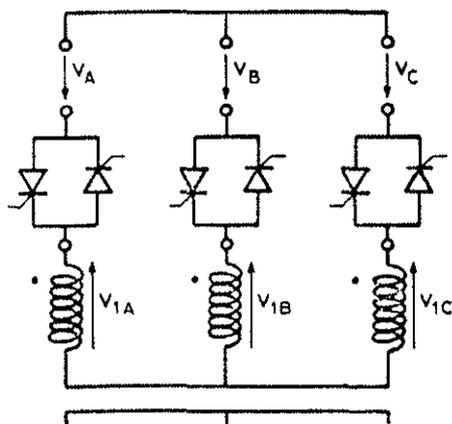


Figure 5 : Diagramme des conductions et formes d'onde

III. ASSOCIATION D'UN GRADATEUR TRIPHASE TOUT THYRISTORS, D'UN TRANSFORMATEUR ETOILE-ETOILE ET D'UN MONTAGE REDRESSEUR EN PONT A DIODES

Ce montage se présente de la manière suivante au primaire du transformateur (fig.6)



Transformateur Gradateur Source

Figure 6 : Grad. en ligne .λ -λ

Le secondaire est disposé de la même manière qu'aux paragraphes précédents.

On considère le rapport de transformation $m' = n'_1/n'_2$

Les équations de compensation d'Ampères-tours pour tout circuit magnétique fermé :

$$m'(i_{1B} - i_{1C}) = i_{2B} - i_{2C}$$

$$m'(i_{1C} - i_{1A}) = i_{2C} - i_{2A}$$

se complètent avec les 2 relations :

$$i_{1A} + i_{1B} + i_{1C} = 0$$

$$i_{2A} + i_{2B} + i_{2C} = 0$$

pour donner :

$$m'(2i_{1B} + i_{1A}) = 2i_{2B} + i_{2A}$$

$$m'(+i_{1B} + 2i_{1A}) = i_{1B} + 2i_{2A}$$

d'où :

$$\begin{cases} m'i_{1A} = i_{2A} \\ m'i_{1B} = i_{2B} \\ m'i_{1C} = i_{2C} \end{cases}$$

Il y a donc compensation des ampères-tours par noyau.

Quand l'angle ψ croit de 0 à $2\pi/3$, deux modes de fonctionnement se succèdent :

- . premier mode : conduction de 3 ou 2 thyristors débit de 2 ou 3 diodes
- . deuxième mode : conduction de 2 ou 0 thyristors débit de 3 ou 6 diodes

Nous n'allons pas faire une étude détaillée des modes de fonctionnement mais nous nous cantonnerons à en dégager les particularités.

III.1. Premier mode de fonctionnement $0 < \psi < \pi/3$

- Pendant l'intervalle $\psi + \pi/6 < 0 < \pi/2$, $th_A, th'_B, th_C, D'_A, D'_B$ conduisent.

Les équations (5) laissent supposer que th_C est bloqué. En fait ces équations ne sont pas suffisantes pour expliquer le fonctionnement, il faut ajouter à chaque courant primaire calculé le courant magnétisant nécessaire à la circulation du flux dans le transformateur. Ce courant sensiblement déphasé de $\pi/2$ en arrière par rapport à la tension dans l'enroulement, va maintenir th_C conducteur entre $\psi + \pi/6$ et $\pi/2$.

- Pendant l'intervalle $\pi/2 < 0 < \psi + \pi/2$, $th_A, th'_B, D'_A, D'_B, D'_C$ conduisent.

A $0 = \pi/2$, la diode D'_C se met à conduire car la tension cesse d'être négative à ses bornes. Par un raisonnement analogue à ceux effectués au premier mode de fonctionnement des deux autres montages, D'_C va conduire simultanément avec D'_B et ainsi entraîner le blocage de th_C .

III.2. Deuxième mode de fonctionnement: $\pi/3 < \psi < 2\pi/3$

- Pendant l'intervalle $\psi + \pi/6 < 0 < 5\pi/6$, $th_A, th'_B, D'_A, D'_B, D'_C$ conduisent.

C'est le même fonctionnement qu'à la deuxième partie du premier mode avec la nécessité d'envoyer une double impulsion afin de débloquent simultanément les 2 thyristors qui doivent conduire en même temps.

- Pendant l'intervalle $5\pi/6 < 0 < \psi + \pi/2$; les 6 diodes conduisent.

A $0 = 5\pi/6$, les 6 diodes vont conduire simultanément ce qui provoque l'extinction des thyristors. Toutes les tensions s'annulent. On a représenté (fig.5) les formes d'onde des différents courants et tensions.

III.3. Caractéristiques

Celles ci sont représentées (fig.3) sur les mêmes diagrammes que les caractéristiques des montages précédents afin de faciliter la comparaison.

- Caractéristique de réglage

Pour $\psi = 0, U'_{co} = 3\sqrt{3}V_m / m'\pi$

Pour le 1er mode : $U'_c = U'_{co} \cos \psi$

Pour le 2ème mode : $U'_c = U'_{co} [1 - \cos(2\pi/3 - \psi)]$

Avec le même rapport de transformation que pour les 2 montages précédents, la tension redressée maximale est plus faible car on redresse ici des tensions simples au lieu de tensions composées.

Afin de rendre $U'_{co} = U_{co} = \frac{9V_m}{m\pi}$ et pouvoir effectuer ainsi une comparaison intéressante, on va utiliser un transformateur dont le rapport de transformation sera $m' = m/\sqrt{3}$.

- Viennent alors les valeurs efficaces des courants primaires et secondaires avec :

$I_1 = I_2 / m' = I_2 \sqrt{3} / m$

Pour le 1er mode : $I_2 = I_c \sqrt{\frac{2}{3}}$

Pour le 2ème mode : $I_2 = I_c \sqrt{\frac{4}{3} - \frac{2\psi}{\pi}}$

I_1 est aussi la valeur efficace du courant au ligne d'où le facteur de puissance en ligne f_L .

La valeur efficace de l'harmonique de rang n ($n=5,7,11,13\dots$) sera :

Pour le 1er mode : $J_m = \frac{I_c}{\pi \cdot m \cdot n} \cdot \frac{3}{\sqrt{2}}$

Pour le 2ème mode : $J_m = \frac{2\sqrt{6} \cdot I_c}{\ln \pi \cdot m \cdot n} |\sin(n\frac{\pi}{3}) \cdot \sin(n(\frac{\pi}{3} - \frac{\psi}{2}))|$

- Tension de crête et courant efficace maximum dans les redresseurs :

$V_{th_{max}} = \frac{3}{2} V_m$ $I_{th_{eff_{max}}} = I_c \sqrt{2} / m$

$V_{D_{max}} = 3V_m / m$ $I_{D_{eff_{max}}} = I_c \sqrt{\frac{2}{3}}$

III.4. Variantes

Deux variantes du montage étudié peuvent être envisagées. Celles-ci ont pour but de faciliter la commande des thyristors et de réduire la valeur efficace des courants passants dans ceux-ci.

On considère d'abord le montage suivant (fig.7) où les groupes de thyristors sont placés en aval du primaire du transformateur.

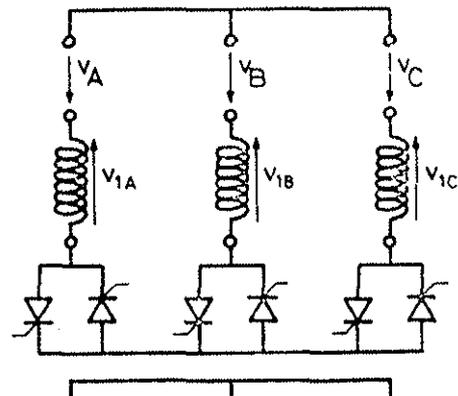


Figure 7 : Grad. en aval, A

Tous les thyristors ont un point commun ce qui facilite la commande.

Un autre montage est possible (fig.8), les trois groupes de thyristors en aval du primaire du transformateur sont alors disposés en triangle.

Ce montage possède deux avantages :

- Il ne nécessite plus la double impulsion car l'amorçage d'un seul thyristor permet le passage du courant.

- le courant efficace dans les thyristors est divisé par $\sqrt{2}$.

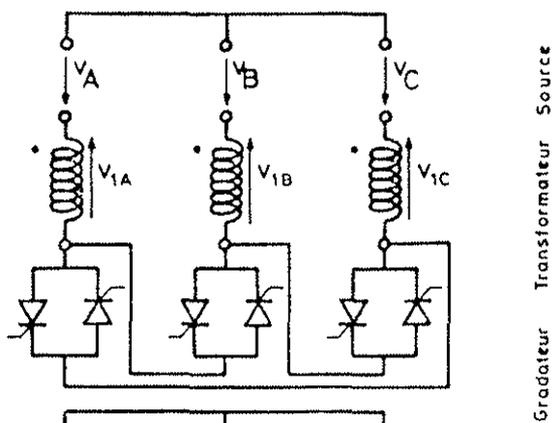


Figure 8 : Grad. en aval, Δ

IV COMPARAISON ET CHOIX DES MONTAGES

L'analyse du fonctionnement des différents montages et le tracé de leurs caractéristiques permettent d'effectuer leur comparaison afin de choisir le montage le plus approprié pour une application. Ce choix peut s'effectuer en considérant les caractéristiques relatives aux redresseurs, le rendement de la transformation alternatif-continu et l'importance relative des harmoniques pris au réseau.

Pour que la comparaison soit significative, le rapport de transformation du transformateur doit permettre l'obtention des mêmes tensions et courants redressés, à partir de la même source d'alimentation.

Quelle que soit la façon dont on couple les thyristors au primaire du transformateur, les diodes secondaires ont les mêmes contraintes tension-courant.

Si les thyristors sont insérés dans la ligne d'alimentation, que le transformateur soit couplé en étoile ou en triangle, ceux-ci sont traversés par le même courant et ont à bloquer la même tension maximale. Dans ces deux configurations, l'obtention des plus basses tensions continues nécessite l'envoi d'impulsions de confirmation.

En branchant en triangle, en aval des phases primaires, les trois paires de thyristors, on simplifie nettement la commande puisqu'il est possible de faire varier continûment la tension redressée de son maximum à zéro en n'envoyant sur les thyristors qu'une seule impulsion par période. De plus, leur durée de conduction étant réduite, ils écoulent un courant $\sqrt{2}$ fois plus faible que s'ils étaient insérés dans la ligne d'alimentation alors que la tension maximale à bloquer est de $2/\sqrt{3}$ fois plus forte.

L'association en triangle de 3 gradateurs mono-phasés permet elle aussi la réduction du courant efficace maximum traversant les thyristors puisque ceux-ci règlent une alternance du courant polygonal au lieu d'une alternance du courant en ligne alors que, comme précédemment la tension maximale à bloquer passe de $1,5V_m$ à $\sqrt{3}V_m$.

Pour les montages classiques où le réglage de la tension continue est opéré par des thyristors branchés au secondaire du transformateur, la valeur efficace du courant dans les bobinages reste constante, à courant continu donné, pour toutes les valeurs de la tension redressée. En utilisant l'association gradateur-transformateur-redresseur, la réduction de tension continue est opérée par diminution de la tension primaire. Celle-ci entraîne une réduction des pertes fer et pertes Joule dans le transformateur et une amélioration du rendement.

Afin de caractériser cette amélioration on a représenté (fig.9) les courbes donnant les variations des pertes Joule dans les enroulements ramenées à celles du montage classique avec thyristors au secondaire.

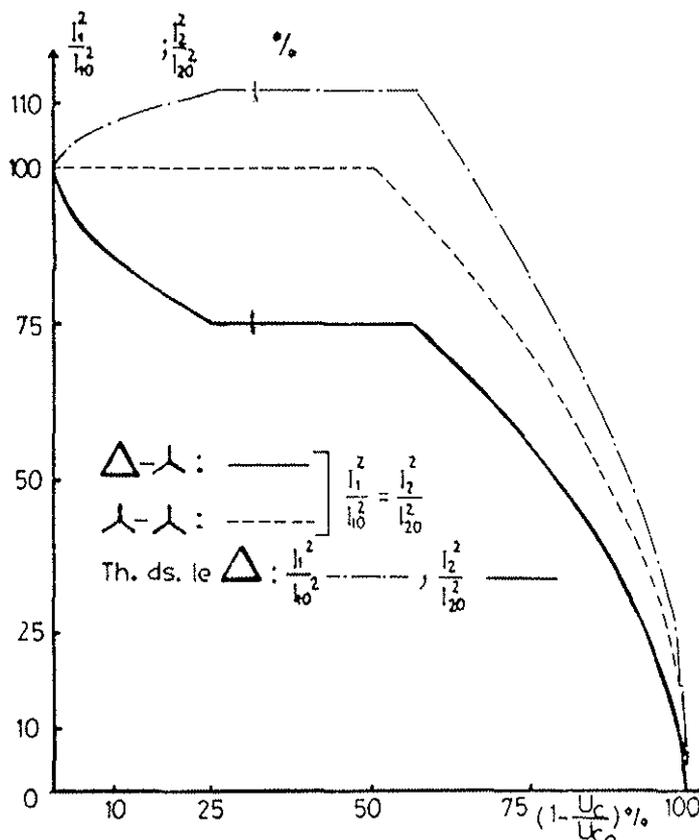


FIGURE 9 : Pertes Joule dans les enroulements

L'association en triangle de 3 gradateurs mono-phasés, n'assurant pas la compensation des A.T par noyau, est peu intéressante. Les harmoniques de rang 3 et multiples de 3 traversant les enroulements primaires entraînent une augmentation relative des pertes Joule dans ceux-ci. Il y a néanmoins réduction notable des pertes dans les enroulements secondaires.

En couplant le transformateur en étoile, la diminution des pertes n'intervient qu'après réduction de la tension de 50%.

Par contre, si le primaire est couplé en triangle, l'amélioration est sensible dès que le réglage commence. Lorsque la tension atteint 75% de la valeur maximale, les pertes sont déjà réduites de 25%.

Le branchement en triangle des 3 paires de thyristors (fig.8) réalise les mêmes connexions que le montage étoile (fig.5) et a donc les mêmes performances.

L'examen des caractéristiques donnant l'importance des premiers harmoniques ramenés au fondamental montre que quelque soit le groupement de redresseurs, c'est en couplant les phases primaires du transformateur en triangle que la valeur efficace des harmoniques demandés au réseau est la plus faible.

Cette comparaison permet de choisir le montage approprié :

Pour les montages de moyenne et forte puissance, c'est la réduction des harmoniques de courant demandés au réseau et le rendement de la transformation qui importent le plus. Le montage thyristors en ligne et primaire du transformateur en triangle est le plus performant.

Pour les montages de plus faible puissance, le couplage en triangle des 3 paires de thyristors en aval du primaire du transformateur permet une simplification de la commande et une réduction du calibre courant des thyristors, tout en conservant les caractéristiques du montage étoile.

BIBLIOGRAPHIE

- 1/ G. SEQUIER - 1974 -
L'électronique de puissance - Dunod.
- 2/ E. PERRIN et L.T. SCHONHOLZER - 1973 -
Fundamental operation of rectifiers with thyristor A.C. power control
I.E.E.E. transactions on I.A. vol I_An°4
July-August 73 p.453-461
- 3/ G. SEQUIER, A. NIART, C. ROMBAUT et J.L. DUMOULIN - 1980 -
Association gradateur-transformateur-abaisseur diode destinée à l'obtention de basses tensions continues variables
RGE janvier 1980 t.89n°1 p.37-48
- 4/ C. ROCHAUD et G. SEQUIER - 1974 -
Caractéristiques des gradateurs
Revue Jeumont-Schneider n°17 p.33-46
n°18 p.29-46