

CHAP IV : LES GRADATEURS

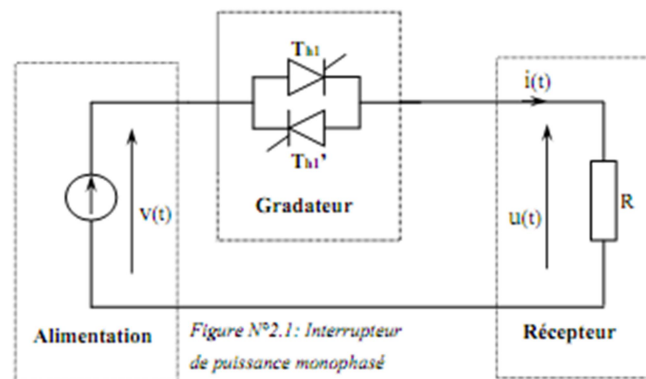
1. Introduction

Les gradateurs peuvent assurer la commande et le réglage du courant débité par une source dans un récepteur. Ils permettent d'assurer la liaison constante entre la source et la charge puis intermittente cette liaison et, par-là, de régler l'intensité du courant que la source débite dans le récepteur; c'est, le fonctionnement en gradateur. L'élément de base est, formé de deux thyristors montés en connexions croisées (on dit aussi en parallèle inverse ou tête-bêche) et placés entre la source et le récepteur.

2. Marche en interrupteur

2.1 Principe

La figure suivante montre les deux thyristors, Th_1 et Th_1' , permettant d'établir ou de couper la liaison source-récepteur.



Si on envoie sur la gâchette de Th_1 un signal de déblocage dès le début de l'alternance positive de la tension d'alimentation $v(t)$, sur la gâchette de Th_1' un signal positif dès le début de l'alternance négative, le courant alternatif $i(t)$ passe tantôt par Th_1 tantôt par Th_1' . L'interrupteur est, fermé, si on néglige la chute de tension directe des redresseurs, la tension aux bornes de la charge est :

$$u(t) = v(t).$$

En fait, pour que le courant puisse effectivement passer alors que son onde est, déphasée d'un angle φ_R égal à l'argument du récepteur, par rapport à l'onde de la tension $v(t)$, il faut que le signal de déblocage soit encore appliqué à la gâchette de Th_1 , que G_1' soit encore alimenté quand $i(t)$ devient négatif ;

Cela suppose :

* soit l'emploi de signaux de déblocage très larges (90° si le récepteur est inductif et d'argument très variable cas des moteurs par exemple).

* soit l'envoi en permanence sur les gâchettes d'impulsions à haute fréquence rapprochées.

*soit l'alimentation des gâchettes à partir des tensions anodiques.

Si on supprime les signaux de déblocage des gâchettes le thyristor en conduction se bloque dès-que $i(t)$ s'annule, l'autre ne peut s'amorcer ; l'interrupteur est, ouvert : $i(t) = 0$; $v_{TH1} = -v_{TH1}' = v$.

3. Marche en gradateur monophasé

3.1 Principe

Le gradateur monophasé permet le réglage continu de la valeur efficace du courant qu'une source de tension alternative débite dans un récepteur. Il est, constitué par un ensemble de deux thyristors, connectés en parallèle inverse, placé entre la source de tension et le récepteur.

3.2 Cas d'un récepteur purement résistif

Supposons d'abord que le récepteur soit une résistance pure R . Si au lieu de déblocquer le thyristor Th_1 dès le début de l'alternance positive de la tension $v(t)$, on n'envoie l'impulsion de courant sur sa gâchette qu'à l'instant $t = \psi/\omega$, Th_1 ne sera conducteur que pour $\psi \leq \omega t \leq \pi$.

En déphasant de même l'impulsion de gâchette de Th_1' , on amputera de la même façon le début de l'alternance négative du courant $i(t)$. On peut donc, par action sur ψ , régler le temps de conduction des redresseurs et, par-là la valeur efficace I du courant alternatif $i(t)$.

Si on néglige la chute de tension dans le thyristor conducteur on a :

$$i(t) = \frac{V_m \sin(\omega t)}{R} \quad \text{pour} \quad [\psi, \pi] \cup [\pi + \psi, 2\pi]$$

$$i(t) = 0 \quad \text{pour le reste de la période}$$

D'où la valeur efficace I : $I^2 = \frac{2}{2\pi} \int_{\psi}^{\pi} \frac{V_G^2}{R^2} \sin^2(\theta) d\theta$ avec $\theta = \omega t$ on a $\sin^2 = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}$

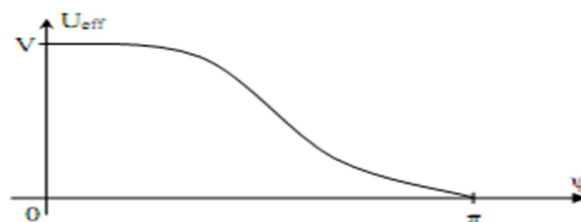
$$\Rightarrow I^2 = \frac{V_G^2}{\pi R^2} \int_{\psi}^{\pi} \left(\frac{1 - \cos 2\theta}{2} \right) d\theta = \frac{V_G^2}{2\pi R^2} \left[\theta - \frac{1}{2} \sin 2\theta \right]_{\psi}^{\pi} = \frac{V_G^2}{2\pi R^2} \left[\pi - \psi + \frac{1}{2} \sin 2\psi \right]$$

$$\Rightarrow I^2 = \frac{V_G^2}{2R^2} \left[\frac{\pi - \psi}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\psi \right]$$

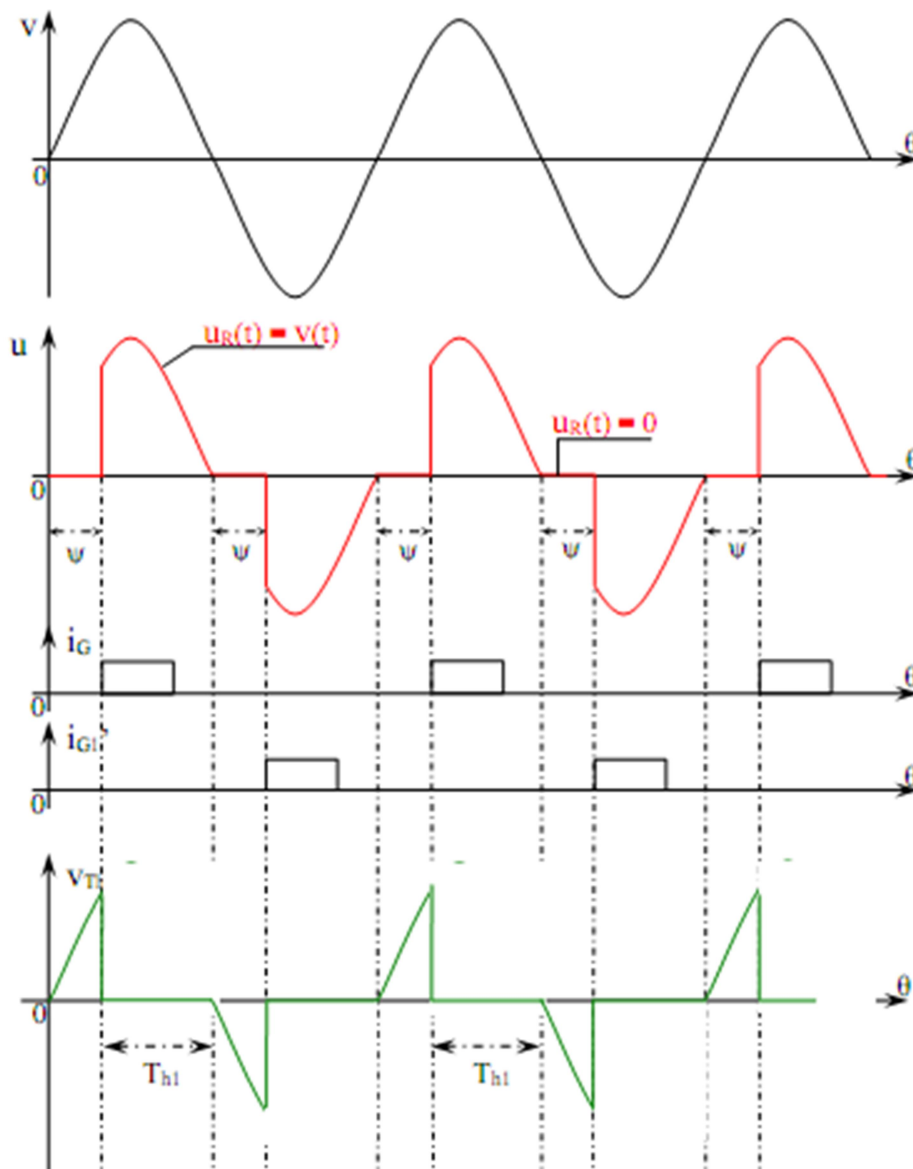
$$\text{donc} \quad I = \frac{V_m}{R\sqrt{2}} \sqrt{\left(1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin(2\psi)}{2\pi} \right)}$$

En faisant varier l'angle ψ de zéro à π , on fait varier I de son maximum $\frac{V}{R}$ à zéro.

Pour $\psi \in [0, \pi]$ on a $U_{\text{eff}} = f(\psi)$ donc $U_{\text{eff}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin(2\psi)}{2\pi} \right)}$



* Formes d'ondes des différentes grandeurs



3.3. Cas d'un récepteur résistif et inductif

L'argument φ_R du récepteur réduit la variation de l'angle ψ qui assure le passage de I de son maximum à zéro.

3.3.1. Fonctionnement pour $\varphi_R < \psi < \pi$

Le thyristor Th_1 est, débloqué $t = t_0$, tel que $\omega t_0 = \psi$. A partir de cet instant on a :

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V_m \sin(\omega t)$$

C'est une équation différentielle de 1^{er} ordre avec second membre sinusoïdale.

Le courant i est, la somme de deux courants i_f courant permanent ou forcé et i_l courant libre ou transitoire

Donc $i = i_f + i_l$.

On a donc :

$$i(\theta) = \frac{V_M}{Z} \sin(\theta - \varphi_R) + K \exp\left(-\frac{\theta}{\tau}\right) \text{ avec } Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}, \tau = \frac{L\omega}{R}, \varphi_R = \text{Arctg}\left(\frac{L\omega}{R}\right) \text{ et } \theta = \omega t.$$

$$\text{Pour } \theta = \psi \text{ on a } i(\psi) = 0 = \frac{V_M}{Z} \sin(\psi - \varphi_R) + K \exp\left(-\frac{\psi}{\tau}\right) \Rightarrow K = -\frac{V_M}{Z} \sin(\psi - \varphi_R) \cdot \exp\left(\frac{\psi}{\tau}\right)$$

$$\text{Donc : } i(\theta) = \frac{V_M}{Z} \left[\sin(\theta - \varphi_R) - \left(\sin(\psi - \varphi_R) \exp\left(-\frac{\theta - \psi}{\tau}\right) \right) \right]$$

3.3.1.1. Analyse du fonctionnement

■ Th_1 reste conducteur entre l'intervalle $[\psi, \theta_1]$ avec ψ l'angle d'amorçage de Th_1 et θ_1 l'instant d'annulation du courant $i(\theta)$, il se bloque avant l'amorçage de Th_1' à $\theta = \psi + \pi$.

■ Si $\theta \in [\theta_1, \psi + \pi]$ aucun thyristor n'est, passant $i(\theta) = 0$, $u_R(\theta) = 0$ et $v_{Th_1}(\theta) = -v_{Th_1}'(\theta) = v(\theta)$.

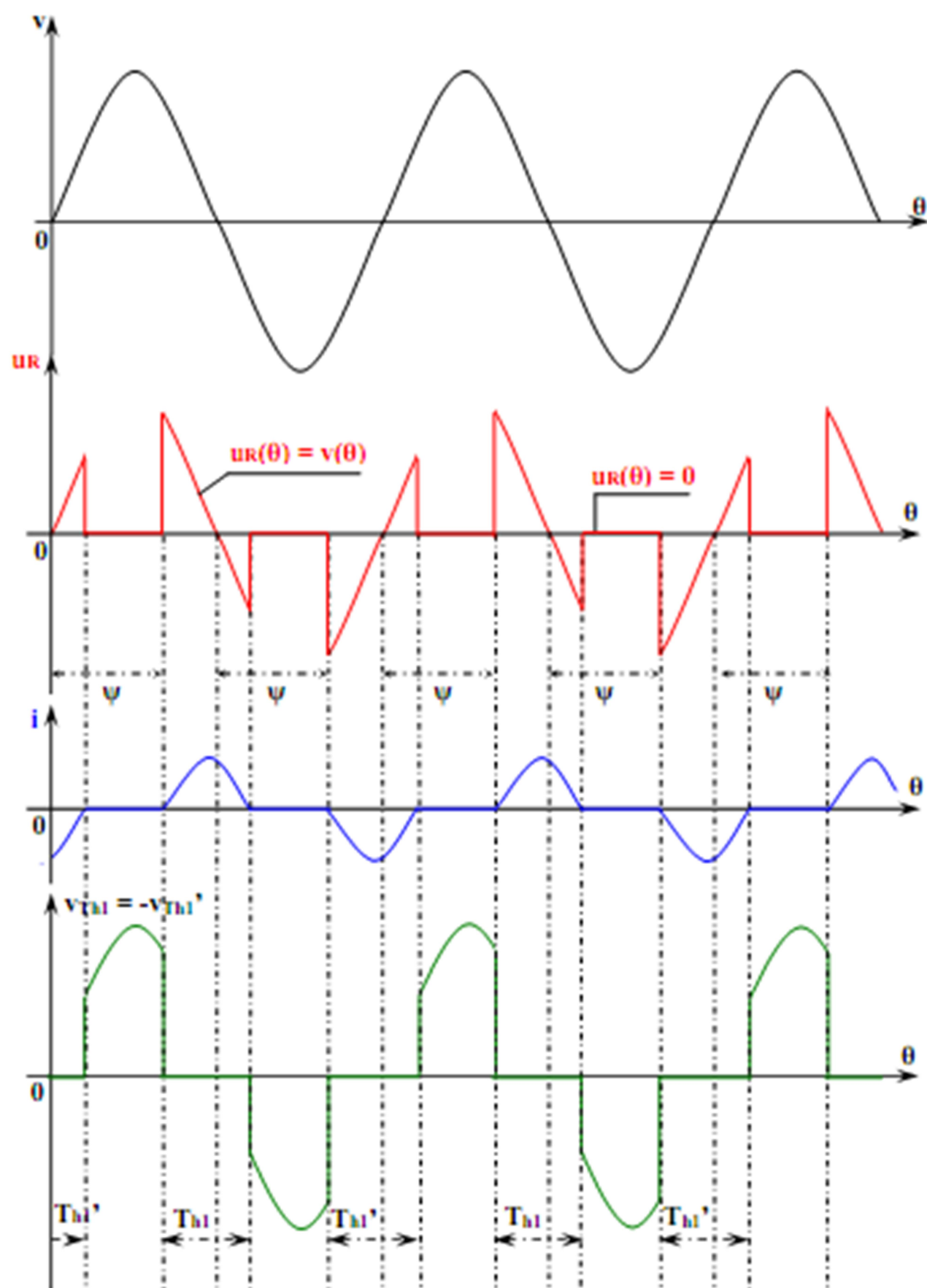
■ Pour $\theta \in [\psi + \pi, 2\pi]$ à $\theta = \psi + \pi$ Th_1' devient passant donc $v_{Th_1}(\theta) = v_{Th_1}'(\theta) = 0$,

$$u_R(\theta) = L\omega \frac{di(\theta)}{d\theta} + Ri(\theta) \text{ et } i(\theta) = \frac{V_M}{Z} \left[\sin(\theta - \varphi_R) - \left(\sin(\psi - \varphi_R) \exp\left(-\frac{\theta - \psi}{\tau}\right) \right) \right];$$

Th_1' se bloque pour $\theta = \theta_1 + \pi$ quand le courant qui le traverse s'annule.

■ A $\theta = \psi + 2\pi$ on a Th_1 est, à nouveau amorcé le phénomène devient périodique, il est, donc possible de régler le courant en agissant sur ψ pour $\psi \in [\varphi_R, \pi]$.

- Formes d'ondes des différentes grandeurs



3.3.2. Fonctionnement pour $\psi < \varphi_R$

Lorsque l'angle ψ devient inférieur à φ_R , le fonctionnement dépend de la nature des signaux appliqués aux gâchettes :

3.3.2.1. Cas d'impulsion de gâchette de courte durée

Si Th_1 est, le premier à recevoir une impulsion utile, il entre en conduction. Le courant $i(\theta)$ est, encore donné par :

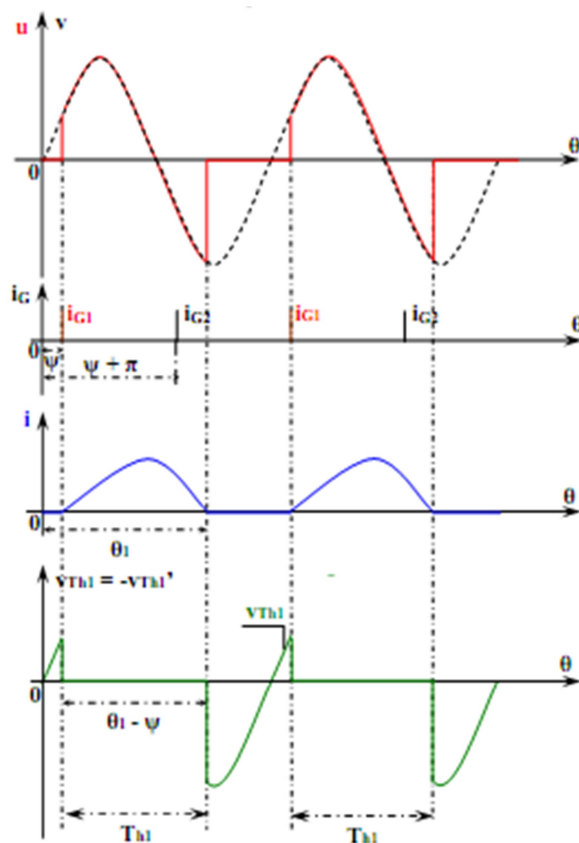
$$i(\theta) = \frac{V_M}{Z} \left[\sin(\theta - \varphi_R) - \left(\sin(\psi - \varphi_R) \exp - \left(\frac{\theta - \psi}{\tau} \right) \right) \right] = i_d(\theta) + i_i(\theta).$$

On remarque que $i_d(\theta)$ et $i_i(\theta)$ sont maintenant de même signe; le courant s'annule pour θ_1 supérieur à $\psi + \varphi_R$ donc supérieur $\psi + \pi$.

L'impulsion envoyée sur la gâchette du thyristor Th_1' pour $\theta = \psi + \pi$ trouve ce redresseur avec tension anodique négative, elle est, donc sans effet. Quand $v_{Th_1}'(\theta)$ devient positif pour $\theta = \theta_1$; il n'y a plus de courant sur la gâchette de Th_1' .

Le montage fonctionne en redresseur simple alternance avec un courant de sortie unidirectionnel, donc de façon anormale. Au passage de ψ par la valeur φ_R , brusquement une alternance du courant $i(\theta)$ disparaît faisant passer I de V/Z à V_{max}/Z .

* Formes d'ondes des différentes grandeurs



3.3.2.2. Cas d'impulsion de gâchette de largeur suffisante (train d'impulsions)

Supposons à nouveau que le redresseur Th_1 entre le 1^{er} en conduction ; il reste passant jusqu'à l'instant $\theta = \theta_1$ comme précédemment.

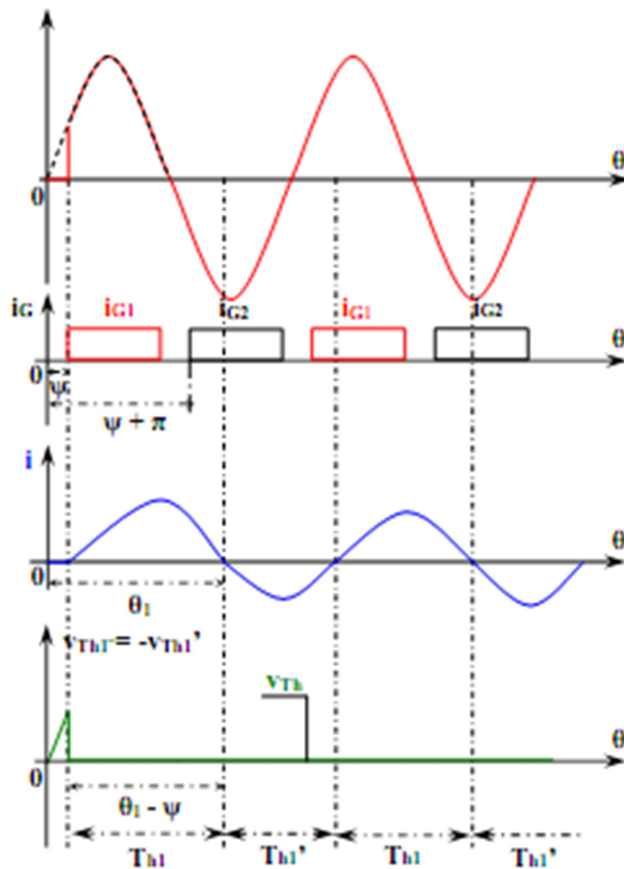
Pour $\theta = \theta_1$, la tension aux bornes du thyristor Th_1 devient positive et sa gâchette alimentée depuis $\theta = \psi + \pi$ reçoit encore un courant de déblocage; ce redresseur entre donc en conduction.

Au bout de quelques périodes, le terme $i_l(\theta)$ a disparu, le courant $i(\theta)$ devient sinusoïdal.

Le passage de l'angle ψ à une valeur inférieure à ϕ_R est, maintenant sans inconvénient.

La valeur efficace I du courant reste égale à V/Z ; le gradateur fonctionne en interrupteur fermé en permanence.

* Formes d'ondes des différentes grandeurs



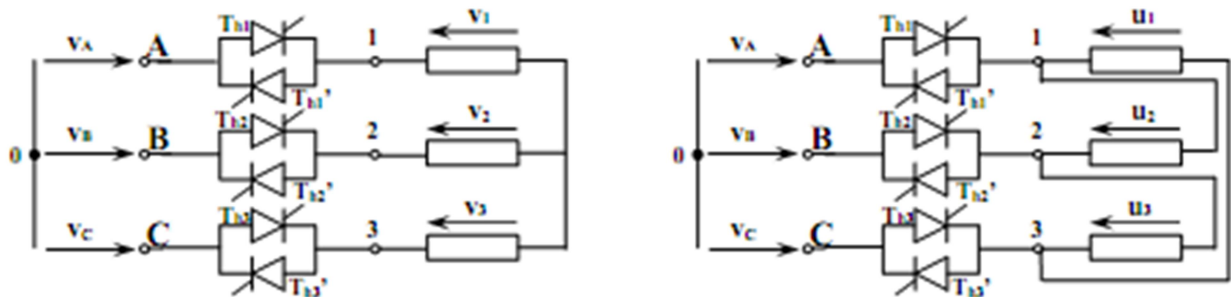
Conclusion : le fonctionnement en gradateur est, possible que si $\phi < \psi < \pi$

4. Les gradateurs triphasés tous thyristors

4.1. Montage

Pour obtenir de meilleures performances, il faut utiliser trois groupes de deux thyristors; un par phase.

Les vrais gradateurs triphasés sont formés de trois ensembles de deux thyristors montés entre le réseau et la charge couplée en triangle ou en étoile.



4.2 Analyse de fonctionnement

Leur étude est, un peu plus complexe ; suivons par exemple, les régimes successifs rencontrés dans le cas d'un récepteur en étoile de trois résistances égales.

On prend $v_A(\theta) = V_{max}\sin(\theta)$ comme origine des phases :

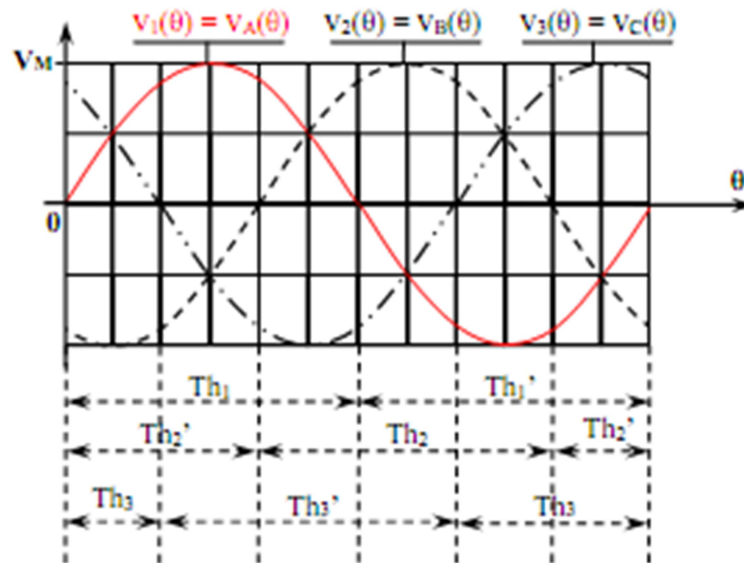
4.2.1 1^{er} cas $0 < \psi < \pi/3$

Il y a 3 ou 2 thyristors conducteurs :

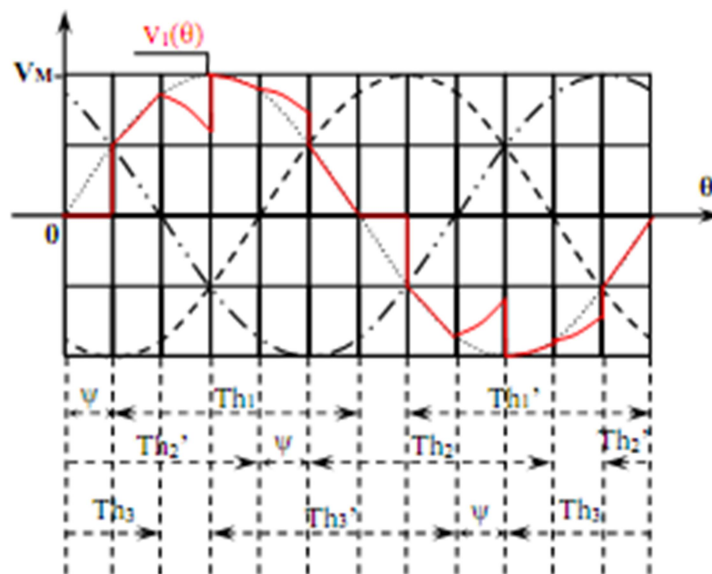
- $\psi \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$; Th_1, Th_2' et Th_1 conducteurs $\Rightarrow v_1(\theta) = v_A(\theta), v_2(\theta) = v_B(\theta)$ et $v_3(\theta) = v_C(\theta)$.
- $\frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} + \psi$; Th_1 et Th_2' conducteurs $\Rightarrow v_1(\theta) = \frac{1}{2}[v_A(\theta) - v_B(\theta)] = -v_2(\theta)$ et $v_3(\theta) = 0$.
- $\frac{\pi}{3} + \psi \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3}$; Th_1, Th_2' et Th_1 conducteurs $\Rightarrow v_1(\theta) = v_A(\theta), v_2(\theta) = v_B(\theta)$ et $v_3(\theta) = v_C(\theta)$.
- --- etc

Les tensions de sortie ont pour valeur efficace $V_i = V \sqrt{1 - \frac{3\psi}{2\pi} + \frac{3}{4\pi} \sin(2\psi)}$

Exemple : Allure de $v_1(\theta)$ pour $\psi = 0$



Exemple : Allure de $v_1(\theta)$ pour $\psi = \pi/6$



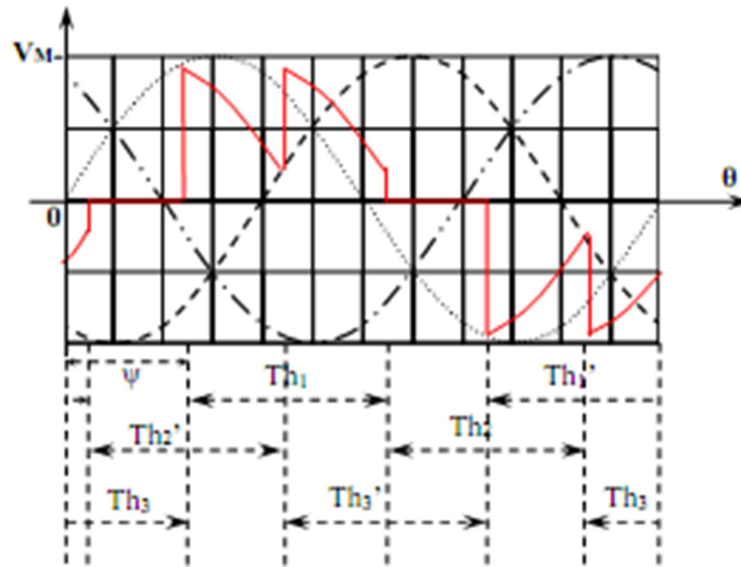
4.2.2 2^{ème} cas $\pi/3 < \psi < \pi/2$

Il y a toujours 2 thyristors conducteurs :

- $\psi \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} + \psi$; Th_1 et Th_2' conducteurs $\Rightarrow v_1(\theta) = \frac{1}{2} [V_A(\theta) - V_B(\theta)] = -v_2(\theta)$ et $v_3(\theta) = 0$.
- $\frac{\pi}{3} + \psi \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3}$; Th_1 et Th_2' conducteurs $\Rightarrow v_1(\theta) = \frac{1}{2} [V_A(\theta) - V_B(\theta)] = -v_3(\theta)$ et $v_2(\theta) = 0$.
- ... etc

Les tensions de sortie ont pour valeur efficace $V_i = V \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \sin\left(\frac{\pi}{6} + 2\psi\right)}$

Exemple : Allure de $v_1(\theta)$ pour $\psi = \frac{2,5\pi}{6}$



4.2.3 3^{ème} cas $\pi/2 < \psi < 5\pi/6$

Il y a toujours 2 ou 0 thyristors qui sont passants ; il faut envoyer des « impulsions de conformations » quand on débloque un redresseur, il faut en même temps envoyer une impulsion sur la gâchette de celui qui était entré en conduction un sixième de période auparavant :

- $\psi \leq \theta \leq \frac{5\pi}{6}$; Th_1 et Th_2' conducteurs $\Rightarrow v_1(\theta) = \frac{1}{2} [v_A(\theta) - v_B(\theta)] = -v_2(\theta)$ et $v_3(\theta) = 0$.
- $\frac{5\pi}{6} \leq \theta \leq \psi + \frac{\pi}{3}$; pas de thyristors conducteurs $\Rightarrow v_1(\theta) = v_2(\theta) = v_3(\theta) = 0$.
- $\psi + \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{6} + \frac{\pi}{3}$; Th_1 et Th_3' conducteurs $\Rightarrow v_1(\theta) = \frac{1}{2} [v_A(\theta) - v_C(\theta)] = -v_3(\theta)$ et $v_2(\theta) = 0$.
- --- etc

Les tensions de sortie ont pour valeur efficace $V_i = V \sqrt{\frac{5}{4} - \frac{3\psi}{2\pi} + \frac{3}{4\pi} \sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\psi\right)}$

Exemple : Allure de $v_1(\theta)$ pour $\psi = \frac{4\pi}{6}$

