

III- Marche en gradateur monophasé

III-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.

III-2- Cas d'un récepteur purement résistif

Supposons d'abord que le récepteur soit une résistance pure R . Si au lieu de débloquent 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 :

$$\odot i(t) = \frac{V_M \sin(\omega t)}{R} \text{ pour } \psi \leq \omega t \leq \pi \text{ et } \pi + \psi \leq \omega t \leq 2\pi$$

$\odot 0$ pendant le reste de la période.

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

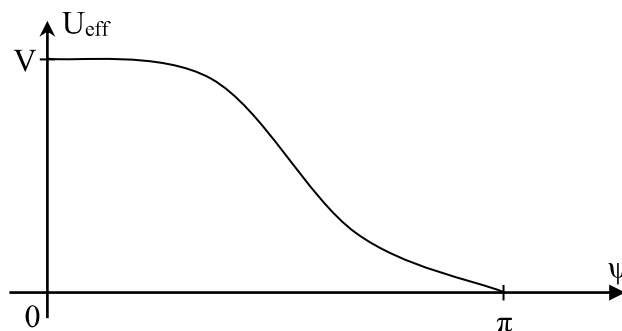
$$\Rightarrow I^2 = \frac{V_M^2}{\pi R^2} \int_{\psi}^{\pi} \left(\frac{1 - \cos 2\theta}{2} \right) d\theta = \frac{V_M^2}{2\pi R^2} \left[\theta - \frac{1}{2} \sin 2\theta \right]_{\psi}^{\pi} = \frac{V_M^2}{2\pi R^2} \left[\pi - \psi + \frac{1}{2} \sin 2\psi \right]$$

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

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

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

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



* Formes d'ondes des différentes grandeurs

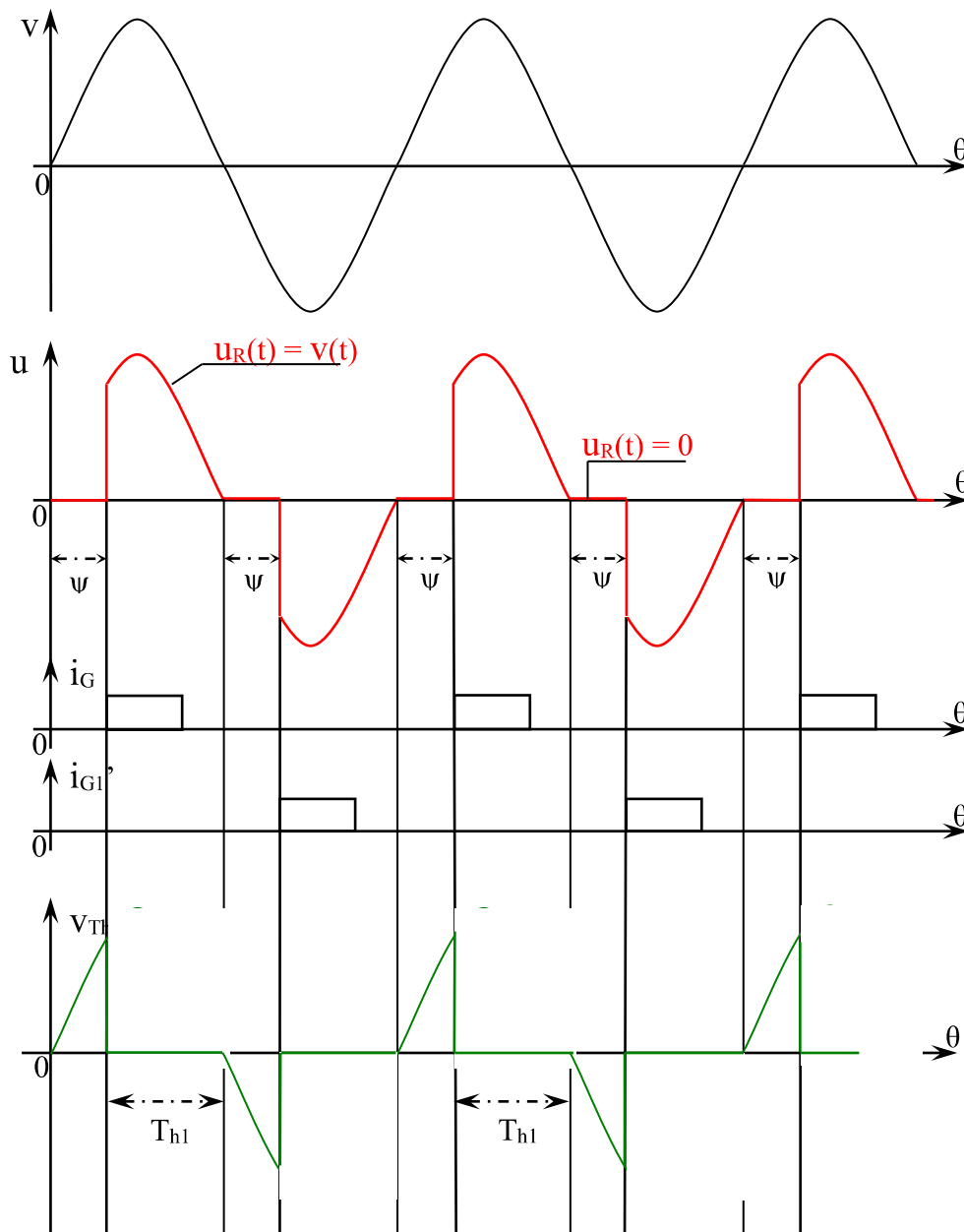


Figure N°2.5: Formes d'ondes des grandeurs électriques d'un gradateur monophasé

Remarque

Le courant $i(t)$ dans la charge n'est plus sinusoïdal. Il est possible de décomposer son allure en une onde fondamentale (première harmonique) et une série d'harmoniques d'ordre supérieur. On constate, que l'onde fondamentale i_1 est déphasée de l'angle ϕ_1 par rapport à la tension d'alimentation v .

Il en découle, que le réseau d'alimentation doit fournir une certaine puissance réactive, même si la charge est purement ohmique.

III-3- Cas d'un récepteur résistant 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.

III-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 :

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

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

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

III-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 $\theta \in [\theta_1, \pi + \psi]$: aucun thyristor n'est, passant $i(\theta) = 0$, $u_R(\theta) = 0$ et $v_{Th1}(\theta) = -v_{Th1'}(\theta) = v(\theta)$.

■ Pour $\theta \in [\pi + \psi, 2\pi]$: à $\theta = \psi + \pi$ Th_1' devient passant donc $v_{Th1}(\theta) = v_{Th1'}(\theta) = 0$,

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

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 on agissant sur ψ pour $\psi \in [\varphi_R, \pi]$.

III-3-1-2- Formes d'ondes des différentes grandeurs

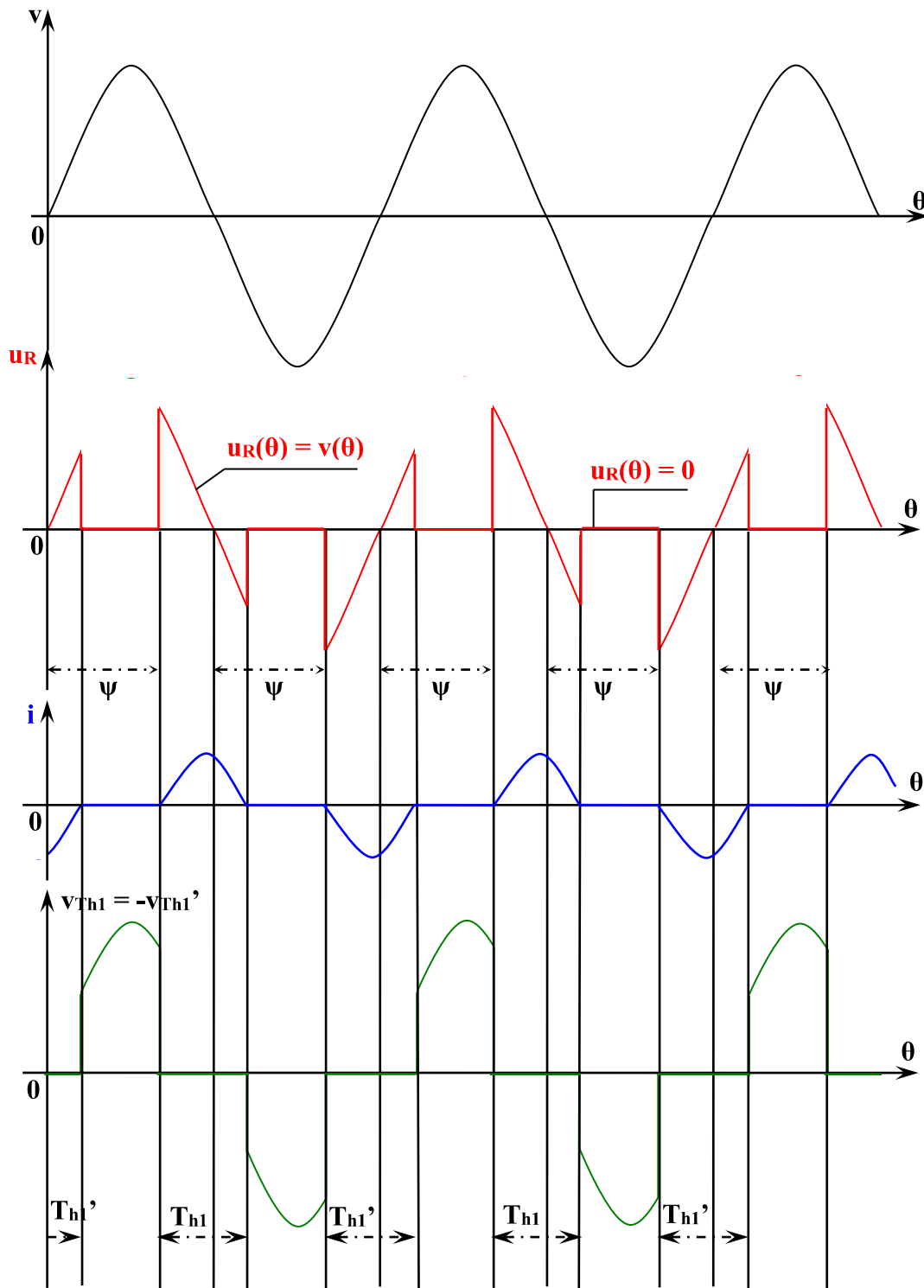


Figure N°2.6 : Formes d'ondes des grandeurs électriques d'un gradateur monophasé

Charge R-L pour $\varphi_R < \psi < \pi$

III-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 :

III-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

$$\text{donné par } i(\theta) = \frac{V_M}{Z} \left[\sin(\theta - \varphi_R) - \left(\sin(\psi - \varphi_R) \exp - \left(\frac{\theta - \psi}{\tau} \right) \right) \right] = i_f(\theta) + i_l(\theta).$$

On remarque que $i_f(\theta)$ et $i_l(\theta)$ 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 $v_{Th1}(\theta)$ 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 $\frac{V}{Z}$ à $\frac{V\sqrt{2}}{Z}$.

* Formes d'ondes des différentes grandeurs

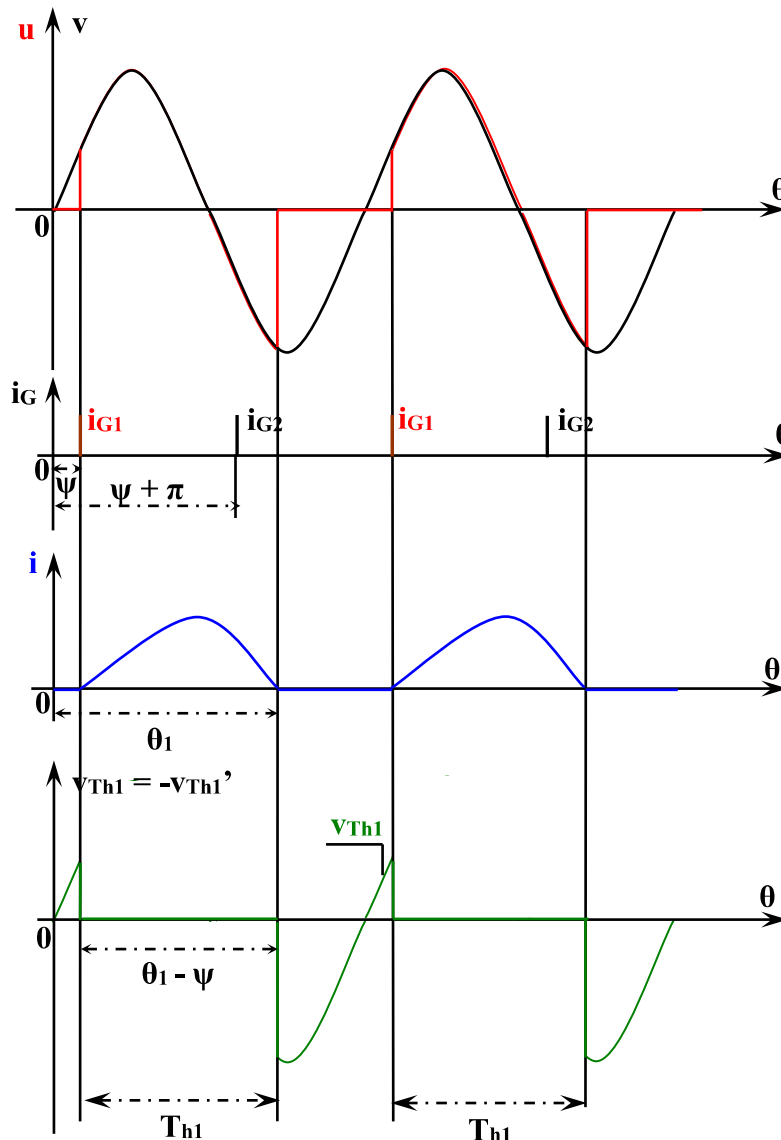


Figure N°2.7 : Formes d'ondes des grandeurs électriques d'un gradateur monophasé Charge R-L pour $\psi < \varphi_R$ et impulsion des gâchettes courte durée

III-3-2-2- Cas d'impulsion de gâchette de largeur suffisante

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 $i_1(\theta)$ 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 $\frac{V}{Z}$; le gradateur fonctionne en interrupteur fermé en permanence.

* Formes d'ondes des différentes grandeurs

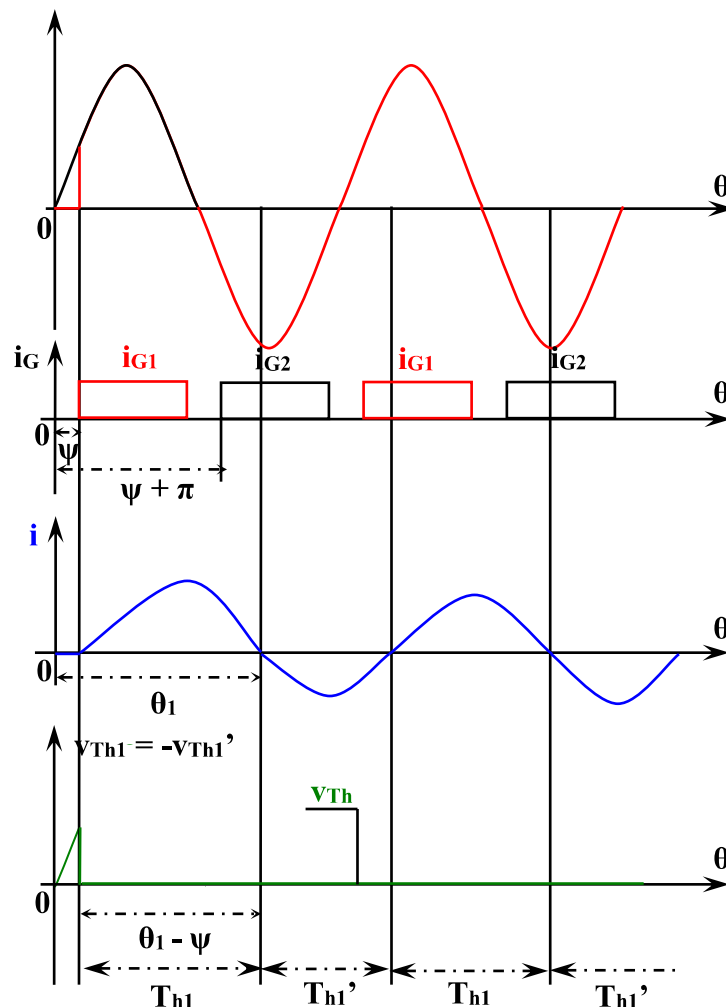


Figure N°2.8 : Formes d'ondes des grandeurs électriques d'un gradateur monophasé
Charge R-L pour $\psi < \phi_R$ et impulsion des gâchettes de largeur suffisante

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

IV- Les gradateurs triphasés tous thyristors

IV-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.

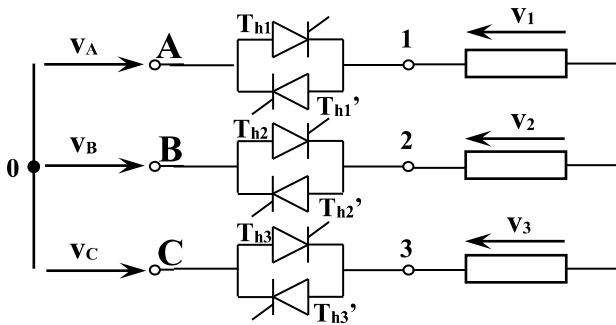


Figure N°2.9: Charge résistive couplée en étoile

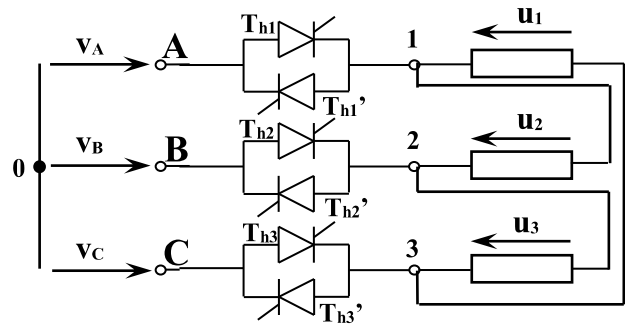


Figure N°2.10: Charge résistive couplée en triangle

IV-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 $v_A(\theta) = V\sqrt{2} \sin \theta$ comme origine des phases :

IV-2-1- 1^{er} Cas $0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{3}$

il y a 3 ou 2 thyristors conducteurs :

- $\psi \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$; T_{h1}, T_{h2}' et T_{h1} conducteurs $\Rightarrow v_1(\theta) = v_A(\theta), v_2(\theta) = v_B(\theta)$ et $v_3(\theta) = v_C(\theta)$.
- $\frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} + \psi$; T_{h1} et T_{h2}' conducteurs $\Rightarrow v_1(\theta) = \frac{1}{2} [v_A(\theta) - v_B(\theta)] = -v_2(\theta)$ et $v_3(\theta) = 0$.
- $\frac{\pi}{3} + \psi \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3}$; T_{h1}, T_{h2}' et T_{h1} 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 $V_1 = V \sqrt{1 - \frac{3\psi}{2\pi} + \frac{3}{4\pi} \sin(2\psi)}$