Chapitre IV

Les triacs et conversion AC/AC directe

1 Introduction

On désigne sous le nom de gradateurs tous les convertisseurs statiques qui, alimenté sous une tension sinusoïdale, il donne à sa sortie une tension alternative :

- de même fréquence que la tension d'entrée;
- de valeur efficace réglable.

Il est constitué par un ensemble de deux thyristors connectés en parallèle inverse (tête-bêche). Les deux thyristors doivent être commandés avec le même angle de retard α pour obtenir une tension alternative de valeur moyenne nulle. Pour les faibles puissances, les deux thyristors sont remplacés par un triac.

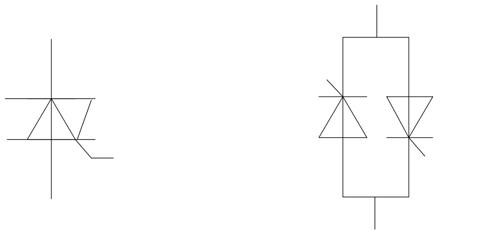


Figure 1: *Symbole*

- **Commande des thyristors**

Deux modes de commande de l'énergie transférée à la source sont possibles :

- ✓ **commande par la phase**: la variation de la valeur efficace **U** est obtenue en agissant sur l'angle de retard α.
- ✓ **Commande par train d'ondes** : les deux thyristors sont commandés plein onde pendant p périodes de la tension V puis sont bloqués pendant **p'** période, la variation de **p/p'** permet de commander la tension efficace.

N.B: cette deuxième commande et peu adaptée à la variation de vitesse aussi nous limiterons à présenter la première commande pour différents charge.

Il existe 2 types de gradateur :

- Gradateur monophasé ;
- Gradateur triphasé.

2 Gradateurs monophasés

2.1 Charge résistive

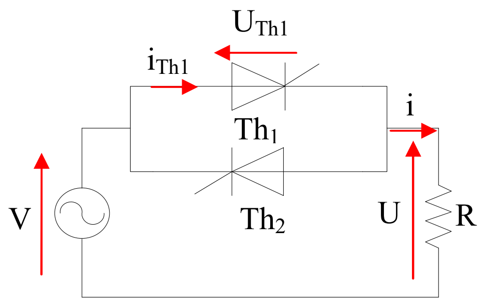


Figure 2: *Schéma du gradateur monophasé (Charge résistive)*

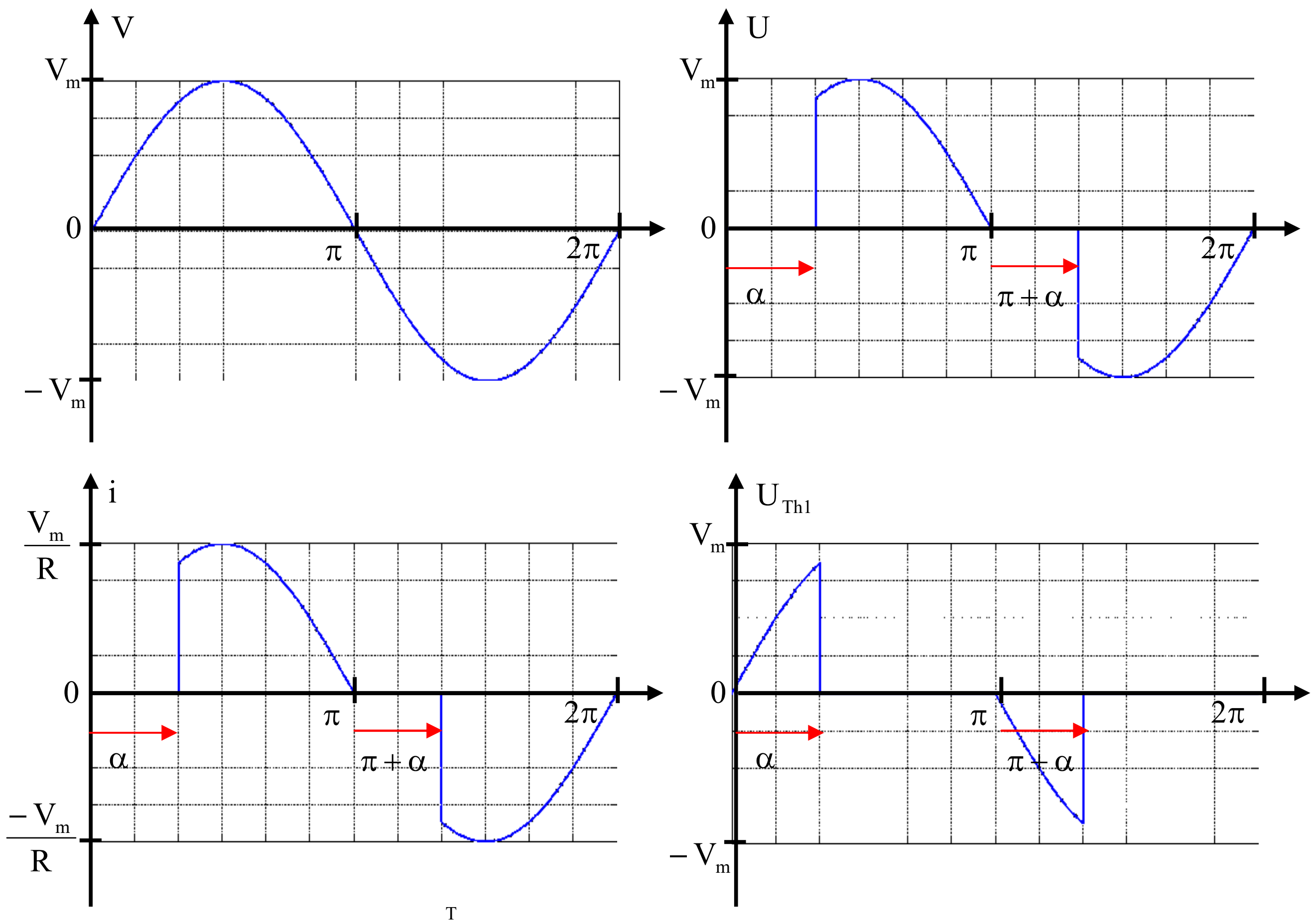
À partir d'un montage (figure 2), nous pouvons observer l'allure de la tension aux bornes de la charge.

Le circuit est alimenté sous une tension alternative monophasée ($V = V_m \sin(\omega t)$). Il comporte deux thyristors montés "tête-bêche" anti-parallèle (Th_1 et Th_2) et une charge résistive R.

a) Analyse du fonctionnement

Intervalles	$0 \rightarrow \alpha$	$\alpha \rightarrow \pi$
Thyristors passants	/	Th_1
Tension U	U=0	U=V
Courant i	$i = \frac{U}{R} = 0$	$i = \frac{U}{R} = \frac{V}{R}$
Tension aux bornes du thyristor Th_1	$U_{Th1}=V$	$U_{Th1}=0$

Intervalles	$\pi \rightarrow \alpha + \pi$	$\alpha + \pi \rightarrow 2\pi$
Thyristors passants	/	Th_2
Tension U	U=0	U=V
Courant i	$i = \frac{U}{R} = 0$	$i = \frac{U}{R} = \frac{V}{R}$
Tension aux bornes du thyristor Th_1	$U_{Th1}=V$	$U_{Th1}=0$



$$U_{moy} = \frac{1}{T}\int_0^T U(t)dt \rightarrow U_{moy} = \frac{1}{T}\int_{\alpha}^{\frac{T}{2}} V_m \sin(\omega t)dt + \frac{1}{T}\int_{\frac{T}{2}+\alpha}^{T} V_m \sin(\omega t)dt \rightarrow U_{moy} = 0$$

$$i_{moy} = 0$$

$$U_{eff}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T U^2(t)dt \rightarrow U_{eff}^2 = \frac{1}{T}\int_{\alpha}^{\frac{T}{2}} V_m^2 \sin^2(\omega t)dt + \frac{1}{T}\int_{\frac{T}{2}+\alpha}^{T} V_m^2 \sin^2(\omega t)dt \rightarrow$$

$$U_{eff} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

$$i_{eff} = \frac{V_m}{R\sqrt{2}}\sqrt{1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

2.2 Charge résistive et inductive

La charge résistive est remplacée par une charge à caractère inductif composée d'une résistance R et d'une inductance L.

Même fonctionnement que précédemment sauf que l'instant d'extinction du courant de charge diffère du cas précédemment.

Expression de courant de charge : pendant la conduction des thyristors on a:

$$V = Ri + \frac{Ldi}{dt} = V_m \sin(\omega t) \Rightarrow i = Ae^{-\frac{R}{L}t} + I_m \sin(\omega t - \varphi)$$

Avec: $I_m = \dfrac{V_m}{\sqrt{R^2+(L\omega)^2}}$, $\tan(\varphi) = \dfrac{L\omega}{R}$, $\omega t = \theta$,

A= ? $i(\frac{\alpha}{\omega}) = 0 \Rightarrow A = -I_m \sin(\alpha - \varphi)e^{\frac{R\alpha}{L\omega}}$

Donc: $i = I_m \sin(\varphi - \alpha)e^{\frac{R\alpha}{L\omega}}e^{-\frac{R}{L}t} + I_m \sin(\omega t - \varphi) = I_m \sin(\varphi - \alpha)e^{-\frac{R}{L}\left(t-\frac{\alpha}{\omega}\right)} + I_m \sin(\omega t - \varphi)$

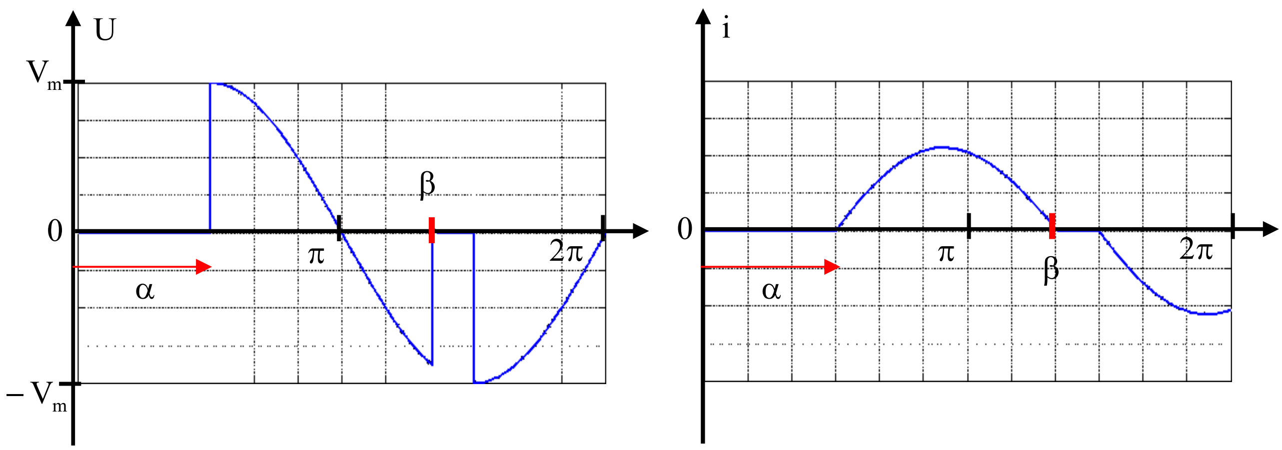
L'instant de blocage du Th_1 est déterminé par l'équation: $i(\frac{\beta}{\omega}) = 0$,

Telle que : $\sin(\beta - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi)e^{-\frac{R}{L}\left(\frac{\beta}{\omega}-\frac{\alpha}{\omega}\right)}$

Selon la nature de la charge (φ) on peut discuter 3 cas selon l'équation précédente.

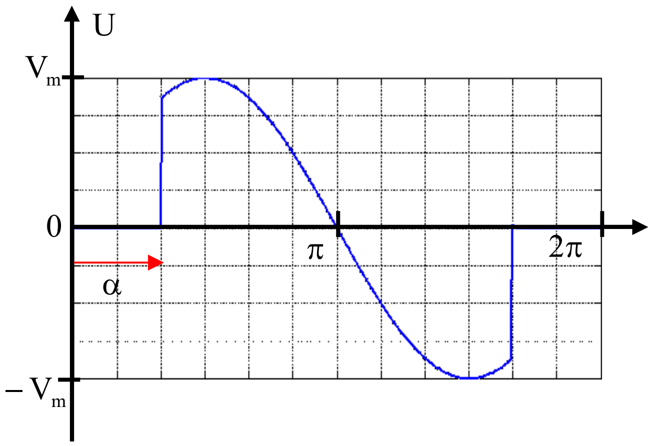
- **1er cas:** $\alpha > \varphi$: alors $\sin(\alpha - \varphi) > 0 \Rightarrow \sin(\beta - \varphi) > 0$ et $\beta - \varphi < \pi$.

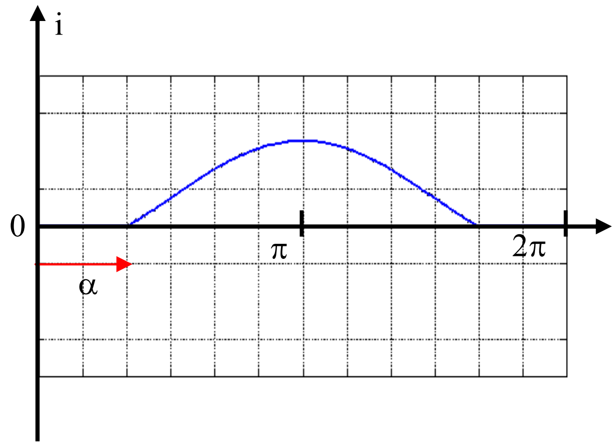
Alors $\beta < \pi + \varphi < \pi + \alpha$ par suite Th_1 se bloque avant l'amorçage de Th_2 et on se trouve dans un fonctionnement normal du gradateur.



- **2ème cas:** $\alpha = \varphi \Rightarrow \beta = \pi + \alpha$: chaque thyristor conduit une $\frac{1}{2}$ période et le gradateur fonctionne en pleine onde.
- **3ème cas:** $\alpha < \varphi$ même raisonnement que précédemment et on trouve $\beta > \pi + \alpha$, Le fonctionnement du gradateur dépend de la nature des signaux appliqués aux gâchettes.
- **Impulsions de courte durée :**

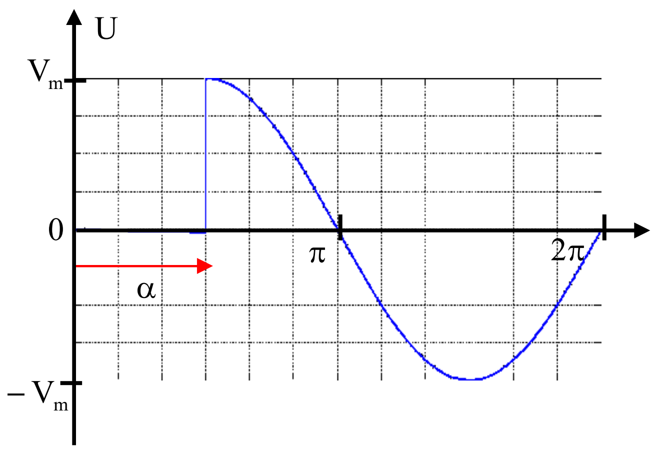
Le thyristor Th_2 ne peut pas s'amorcer, le courant va s'annuler. Le thyristor Th_1 pourra être réamorcé à l'instant $T + \alpha$: les valeurs moyennes de la tension et de l'intensité de sortie ne sont pas nulles, le gradateur fonctionne en redresseur mono alternance.

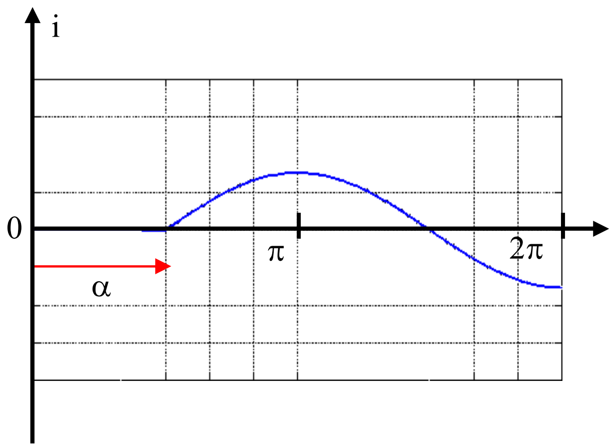




- **Impulsions de longue durée :**

Le thyristor Th_2 s'amorce lorsque le courant devient négatif. Au bout d'un certain temps, le régime transitoire disparaît, le courant devient sinusoïdal: le gradateur se comporte comme un interrupteur fermé, l'action sur l'angle de retard à l'amorçage est inopérante tant que $\alpha < \varphi$.





3 Gradateur triphasé

En groupant 3 montages élémentaires monophasés, on constitue un gradateur triphasé qui sera largement utilisé dans l'industrie où les charges sont souvent triphasées. L'application principale de ce gradateur se situe au niveau du démarrage électronique des moteurs asynchrones.

3.1 Gradateurs triphasés tout thyristors (en étoile)

3.1.1Charge résistive

On choisit une représentation en étoile de l'alimentation et de la charge.

Il existe trois modes de conduction suivant la valeur de :

- 1^{er} mode : $0 \le \psi < \frac{\pi}{3}$
- $2^{ème}$ mode : $\frac{\pi}{3} \le \psi < \frac{\pi}{2}$
- $3^{ème}$ mode : $\frac{\pi}{2} \le \psi < \frac{5\pi}{6}$

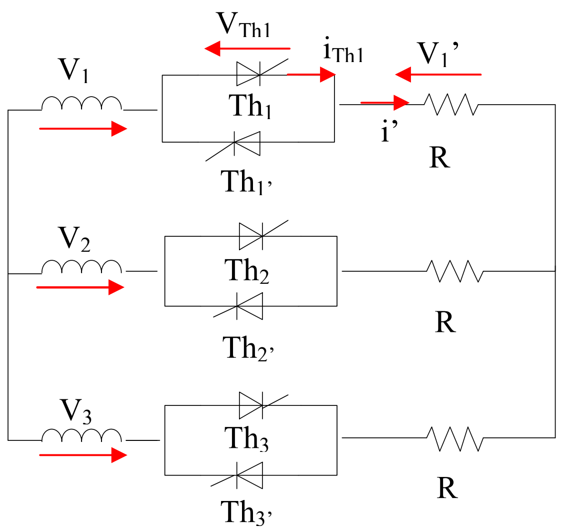


Figure 4: *gradateurs triphasés tout thyristors (en étoile) (Charge résistive)*

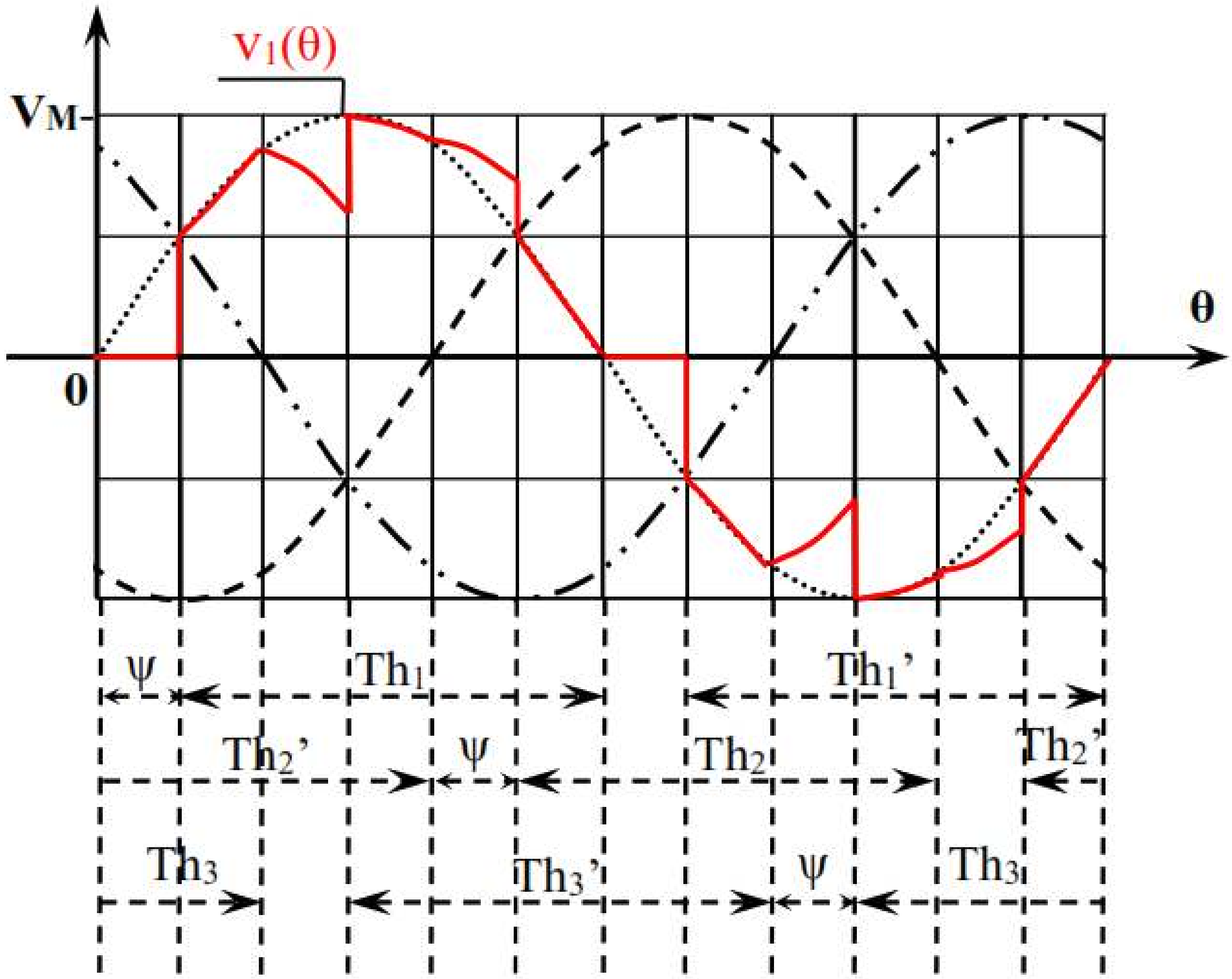
1^{er} mode : $0 \le \psi < \frac{\pi}{3}$

Ce mode est caractérisé par la conduction de 2 ou 3 éléments (thyristors).

Thyristors	Intervalles de conduction
Th_1	$\alpha \to \pi$
Th_1'	$\pi + \alpha \to 2\pi$
Th_2	$\frac{2\pi}{3} + \alpha \to \frac{5\pi}{3}$
Th_2'	$0 \to \frac{2\pi}{3}$ et $\frac{5\pi}{3} + \alpha \to 2\pi$
Th_3	$\frac{4\pi}{3} + \alpha \to 2\pi$ et $0 \to \frac{\pi}{3}$
Th_3'	$\frac{\pi}{3} + \alpha \to \frac{4\pi}{3}$

Exemple : $\psi = \frac{\pi}{6}$

Intervalles	$\alpha \to \frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{3} \to \frac{\pi}{3} + \alpha$
Thyristors passants	Th_1, Th_2'et Th_3	Th_1 et Th_2'
Tension (V_1')	$V_1' = V_1$	$V_1' = \frac{V_1 - V_2}{2}$

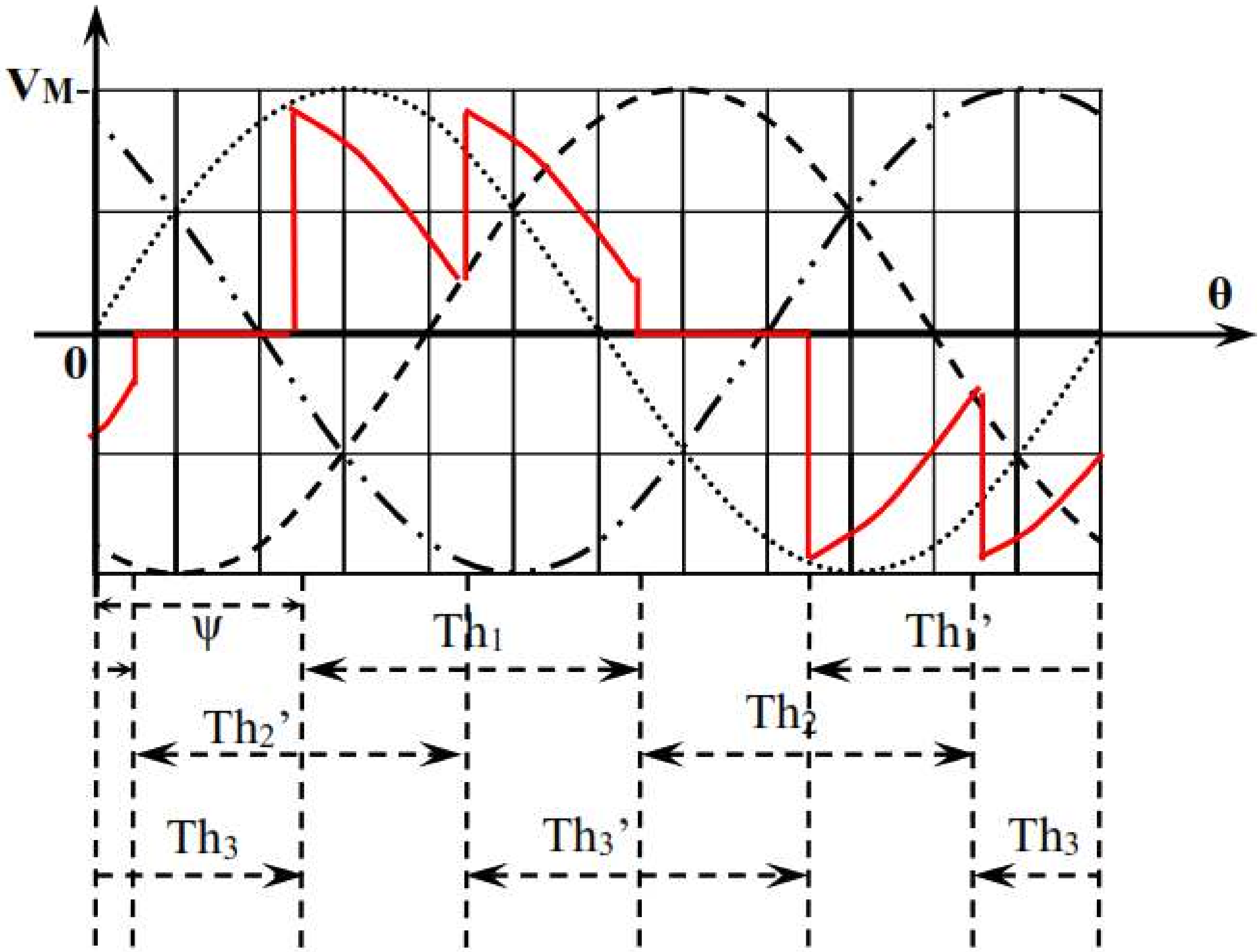


2ème mode : $\frac{\pi}{3} \le \psi < \frac{\pi}{2}$

Ce mode est caractérisé par la conduction de 2 thyristors.

Intervalles	$\alpha \rightarrow \frac{\pi}{3} + \alpha$
Thyristors passants	Th_1, Th_2'
Tension (V_1')	$V_1' = \frac{V_1 - V_2}{2}$

Exemple: $\psi = \frac{5\pi}{12}$

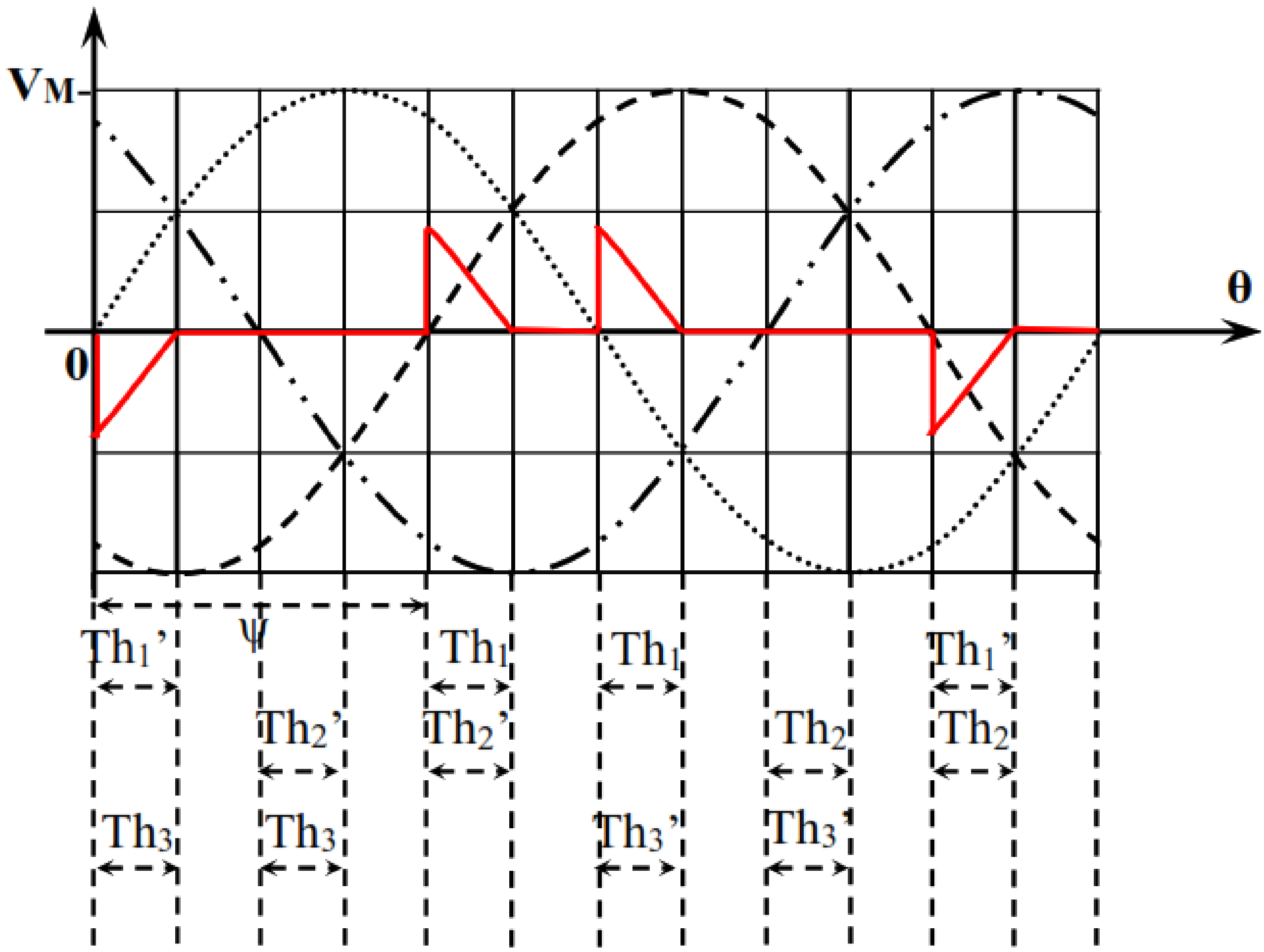


$3^{ème}$ mode : $\frac{\pi}{2} \leq \psi < \frac{5\pi}{6}$

Ce mode est caractérisé par la conduction de 0 ou 2 thyristors.

Intervalles	$\psi \rightarrow \frac{5\pi}{6}$	$\frac{\pi}{3} \rightarrow \frac{\pi}{3} + \psi$
Thyristors passants	Th_1 et Th_2'	aucun thyristor
Tension (V_1')	$V_1' = \frac{V_1 - V_2}{2}$	$V_1' = 0$

- **Exemple:** $\psi \rightarrow \frac{4\pi}{6}$

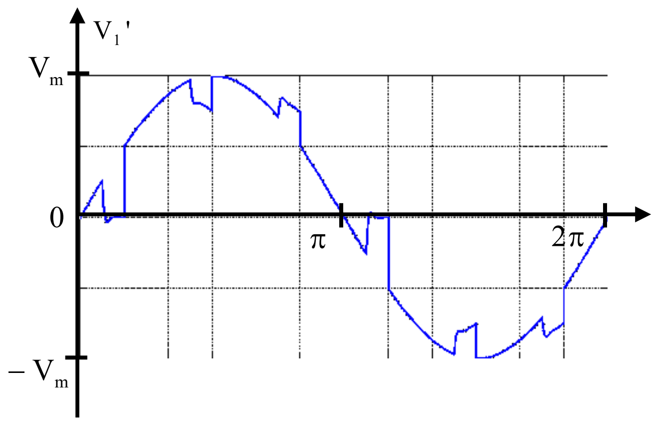


3.1.2 Charge résistive et inductive

La charge est formée par une résistance R en série avec une inductance L.

N.B: le mode 2 ne peut pas exister pour ce type de récepteur.

Exemple:1er mode $\psi = \frac{\pi}{6}$



3.2 Applications des gradateurs

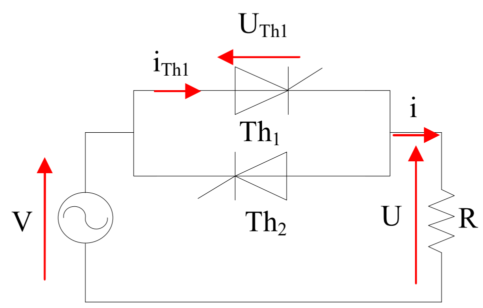
Le gradateur monophasé est utilisé pour faire varier la luminosité de lampes d'éclairage dans un domaine de puissance allant de 100W jusqu'à 10kW environ ainsi que pour régler le courant dans d'autres appareils monophasés, comme cuisinières, appareils de chauffage électriques, etc.

On utilise le gradateur triphasé pour les mêmes applications, mais à des puissances plus élevées. De plus, on peut alimenter des moteurs asynchrones à tension statorique variable, permettant ainsi de faire varier, dans une certaine mesure, les vitesses de ces moteurs.

TD 4

Exercice 1

Le circuit gradateur monophasé représenté sur la figure suivante, fonctionne dans le mode (on/off).



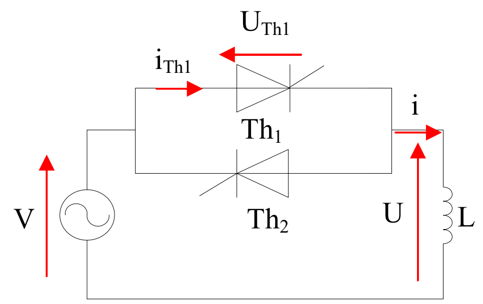
1. Déduire l'expression de la valeur efficace de la tension de sortie.
2. Tracer la forme de la tension U_{Th1}.
3. Supposant que Th_2 est totalement bloqué,

- Tracer U_{Th1} et déduire la nature du fonctionnement du circuit.

N.B: l'angle d'amorçage est $\alpha = 0$.

Exercice 2

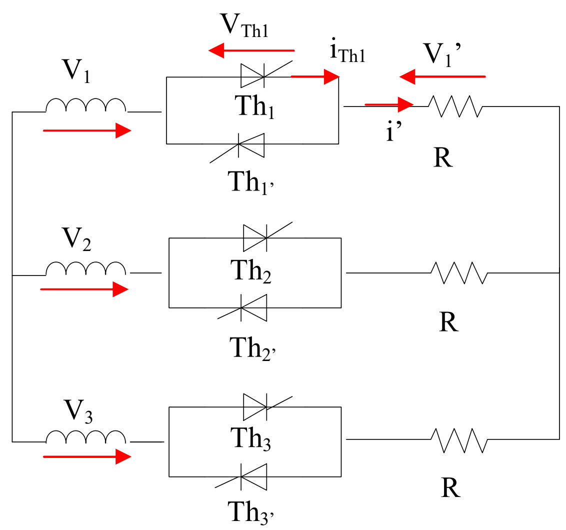
La figure ci-dessous, est représenté un gradateur monophasé, alimentant une inductance pure L. Th_1 est commandé à la fermeture sur la demi alternance positive de la tension V, avec un angle de commande α compté à partir de 0. Th_2 est commandé de la même manière sur la demi-alternance négative de la tension V. On note $V(t) = V_m \sin(\omega t)$, avec $\omega t = \theta$.



1) Écrire l'équation différentielle liant i(t) et V(t) lorsque Th_1 est passant.
2) Résoudre cette équation en tenant compte qu'à l'instant d'amorçage de Th_1, i(t) = 0. Vérifier que: $i(t) = \frac{V_m}{L\omega}(\cos\alpha - \cos\omega t)$.
3) Pour $\alpha = \frac{\pi}{2}$ que devient l'équation de i(t) lorsque Th_1 est passant ? tracer i(t).

Exercice 3

Soit le gradateur triphasé débitant sur une charge résistive équilibrée représenté ci-contre.



Pour $\alpha = \frac{\pi}{6}$

1) Déterminer les intervalles de conduction des différents thyristors pendant une période
2) Représenter la tension V_1'.
3) Trouver l'expression de la tension efficace $V_1'_{eff}$.

TD 4 Corrigé

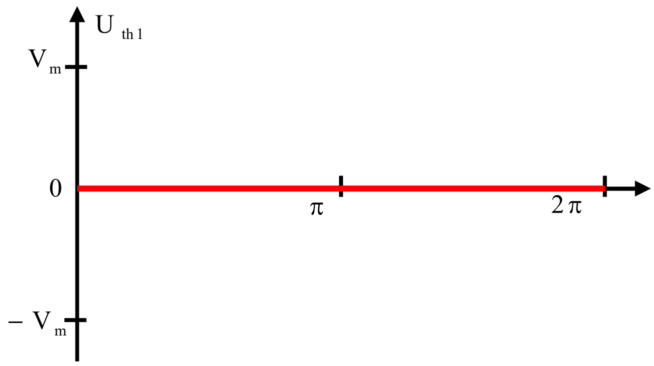
Corrigé 1

1) Valeur de la tension efficace aux bornes de la charge

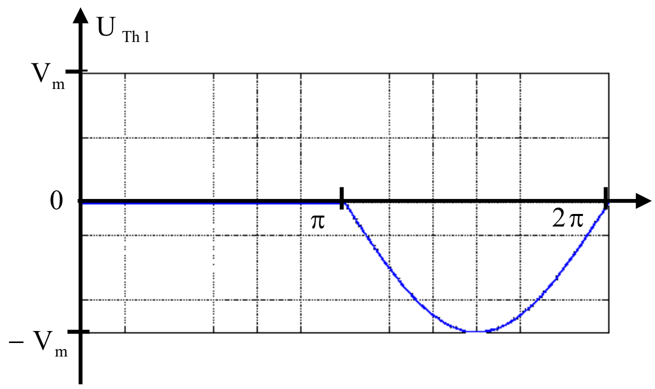
$$U_{eff}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T U^2(t)dt \rightarrow U_{eff}^2 = \frac{1}{T}\int_{\alpha}^{\frac{T}{2}} V_m^2 \sin^2(\omega t)dt + \frac{1}{T}\int_{\frac{T}{2}+\alpha}^{T} V_m^2 \sin^2(\omega t)dt \rightarrow$$

$$U_{eff} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

2)



3)



Nature du fonctionnement du circuit :

Redresseur simple alternance monophasé

Corrigé 2

1) L'équation différentielle liant i(t) et V(t) lorsque Th_1 est passant

$$V = \frac{Ldi}{dt} = V_m \sin(\omega t)$$

2) Résoudre cette équation en tenant compte qu'à l'instant d'amorçage de Th_1, i(t) = 0. Vérifier que

$$i(t) = \frac{V_m}{L\omega}(\cos\alpha - \cos\omega t)$$

$$V = \frac{Ldi}{dt} = V_m \sin(\omega t) \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{V_m}{L}\sin(\omega t)$$

En intégrant, on obtient $i(t) = -\frac{V_m}{L\omega}\cos(\omega t) + A$

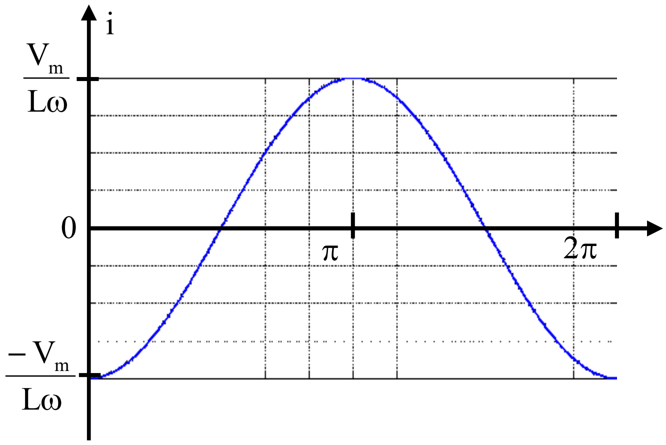
A une constante d'intégration

$t = \frac{\alpha}{\omega}$ on a $i\left(\frac{\alpha}{\omega}\right) = 0 \rightarrow A = \frac{V_m}{L\omega}\cos(\alpha)$

En remplaçant A par sa valeur dans l'équation $i(t) = -\frac{V_m}{L\omega}\cos(\omega t) + A$

Donc $i(t) = -\frac{V_m}{L\omega}\cos(\omega t) + \frac{V_m}{L\omega}\cos(\alpha)$

$\Rightarrow i(t) = \frac{V_m}{L\omega}(\cos\alpha - \cos\omega t)$

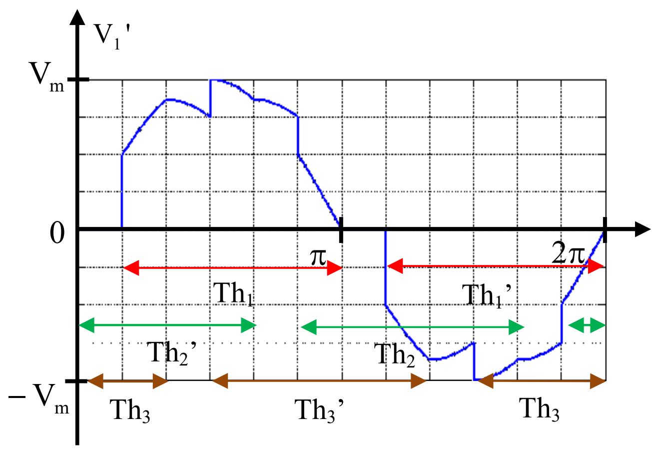


3) Pour $\alpha = \frac{\pi}{2}$

$i(t) = -\frac{V_m}{L\omega}\cos\omega t$

Corrigé 3

1) Les intervalles de conduction : **Th₁**$(\frac{\pi}{6} \rightarrow \pi)$, **Th₁'** $(\frac{7\pi}{6} \rightarrow 2\pi)$, **Th₂** $(\frac{5\pi}{6} \rightarrow \frac{5\pi}{3})$, **Th₂'** $(0 \rightarrow \frac{2\pi}{3}$ et $\frac{11\pi}{6} \rightarrow 2\pi)$, **Th₃**$(\frac{3\pi}{2} \rightarrow 2\pi$ et $0 \rightarrow \frac{\pi}{3})$, **Th₃'** $(\frac{\pi}{2} \rightarrow \frac{4\pi}{3})$ **avec :** $T = 2\pi$.



$$V_{1\,eff}'^2 = \frac{1}{T}\int_{\frac{T}{12}}^{\frac{T}{6}} V_1^2 dt + \frac{1}{T}\int_{\frac{T}{6}}^{\frac{T}{4}}\left(\frac{V_1 - V_2}{2}\right)^2 dt + \frac{1}{T}\int_{\frac{T}{4}}^{\frac{T}{3}} V_1^2 dt + \frac{1}{T}\int_{\frac{T}{3}}^{\frac{5T}{12}}\left(\frac{V_1 - V_3}{2}\right)^2 dt + \frac{1}{T}\int_{\frac{5T}{12}}^{\frac{T}{2}} V_1^2 dt$$

Avec :

$V_1 = V_m \sin(\omega t)$, $V_2 = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$ et $V_3 = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$.