

Chapitre 6

Les Convertisseurs Alternatifs/ Alternatifs

Les Montages Gradateur monophasé

6-1 objectifs

Étudier le fonctionnement et les caractéristiques d'un montage gradateur monophasé à thyristors sur des charges résistives et inductives.

6-2-Introduction

Les gradateurs peuvent assurer la commande et le réglage du courant débité par une source alternative dans une charge aussi alternative, avec valeur efficace contrôlée sans changement de fréquence .La variation de cette valeur efficace se fait par découpage de la tension à l'aide d'un interrupteur statique. Les gradateurs possèdent deux types de fonctionnement les plus utilisés :

Gradateur à train d'ondes : Utilisé dans l'électrothermique spécialement les fours.

Gradateur a angle de phase : Utilisé pour la commande des moteurs asynchrones aussi pour l'éclairage.

6-3 Etude du Gradateur monophasé à commande en retard de phase:

6-3-1- Débit sur circuit résistif

a- Montage

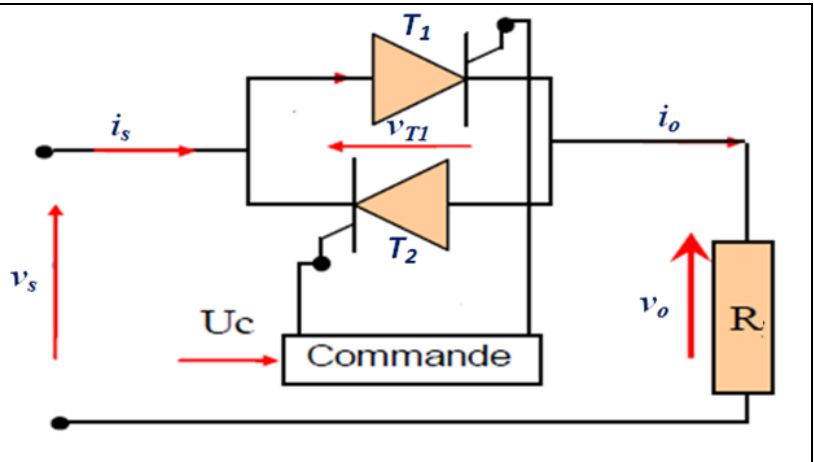
L'élément de base est formé de deux thyristors montés en têtes bêtes (ou en antiparallèle) et placés entre la source et le récepteur .La source de la tension v_s est supposée parfaite; elle fournit une tension sinusoïdale.

$$v_s = V_M \cdot \sin\theta$$

$$\text{avec } \theta = \omega \cdot t; \omega = 2 \cdot \pi \cdot f;$$

$$f = \frac{1}{T} = 50\text{Hz} \rightarrow T = 20\text{ms}, T = 2 \cdot \pi$$

$$V_M = V \cdot \sqrt{2}$$



Les thyristors sont débloqués avec un retard en angle de α , c'est à dire que des impulsions de déblocage sont envoyées sur les gâchettes des thyristors respectivement aux angles:

$$\text{Pour } T_1: \omega t = \alpha + 2k\pi$$

$$\text{Pour } T_2: \omega t = \pi + \alpha + 2k\pi$$

b- Principe de fonctionnement

Les différentes phases de fonctionnement du montage sont alors décrites par le tableau suivant:

Intervalles	Thyristor passant	Tension redressée	Tension aux bornes de T_1 et T_2
$0 < \theta < \alpha$	aucun	$v_o = 0$	$v_{T1} = -v_{T2} = v_s$
$\alpha < \theta < \pi$	T_1	$v_o = v_s$	$v_{T1} = v_{T2} = 0$
$\pi < \theta < \pi + \alpha$	aucun	$v_o = 0$	$v_{T1} = -v_{T2} = v_s$
$\pi + \alpha < \theta < 2 \cdot \pi + \alpha$	T_2	$v_o = v_s$	$v_{T2} = v_{T1} = 0$

D'où v_o et i_o ont la même forme

c- La valeur efficace de la tension de la tension au bornes de la charge est donnée par:

$$\begin{aligned}
 V_0 &= \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi} \int_{\alpha}^{\pi} (v_o)^2 \cdot d\theta} = \sqrt{\frac{4 \cdot V^2}{2 \cdot \pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sin\theta)^2 \cdot d\theta} = \sqrt{\frac{4 \cdot V^2}{4 \cdot \pi} \left[\theta - \frac{\sin 2\theta}{2} \right]_{\alpha}^{\pi}} \\
 &= \sqrt{\frac{V^2}{\pi} \left[\pi - \frac{\sin 2\pi}{2} - \left(\alpha - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]} = V \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2 \cdot \pi}}
 \end{aligned}$$

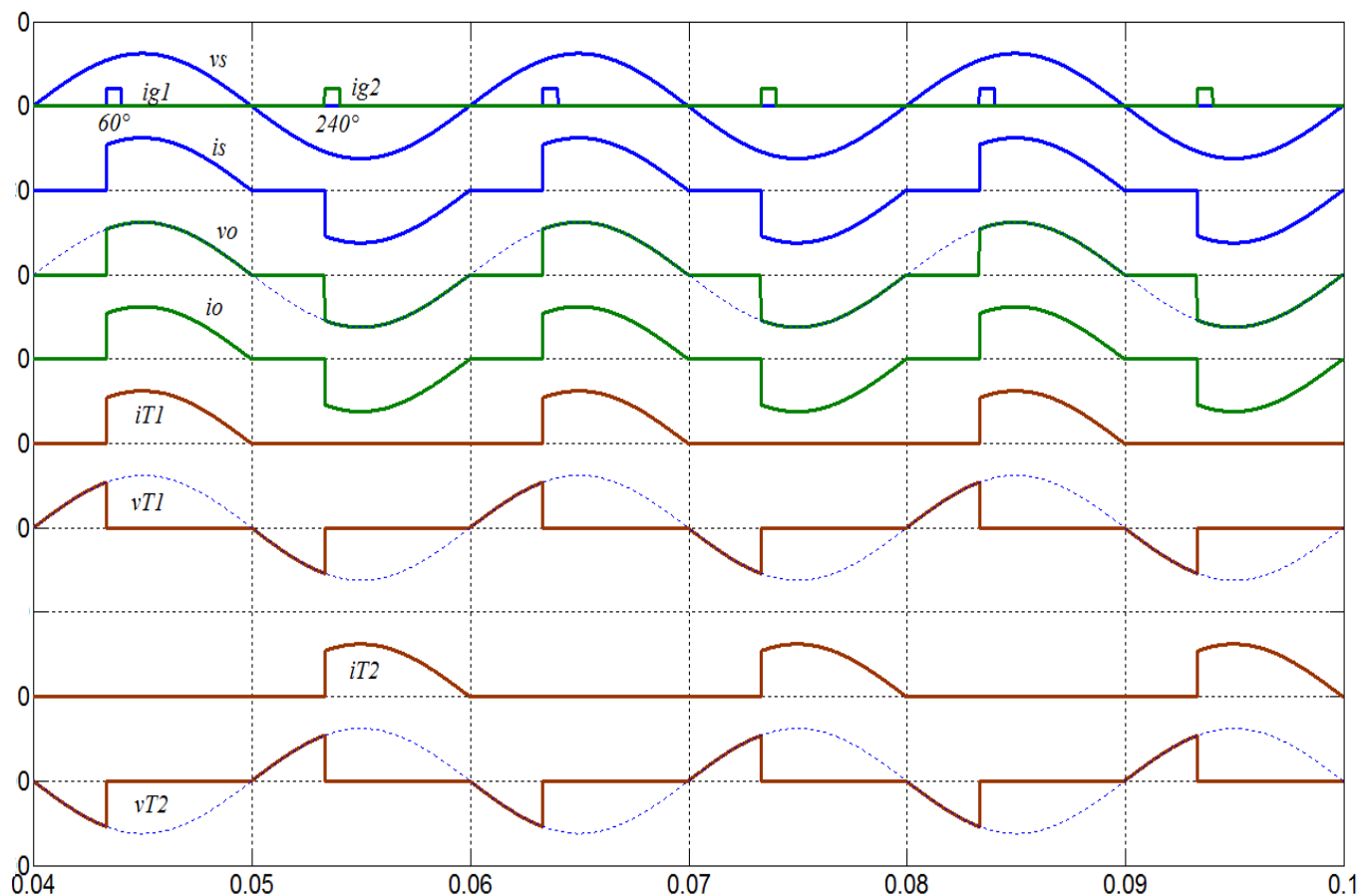
Application numérique:

$$V = 220V, \alpha = 60^\circ, R = 10\Omega,$$

$$V_0 = 197.36V$$

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{197.36}{10} = 19.75A$$

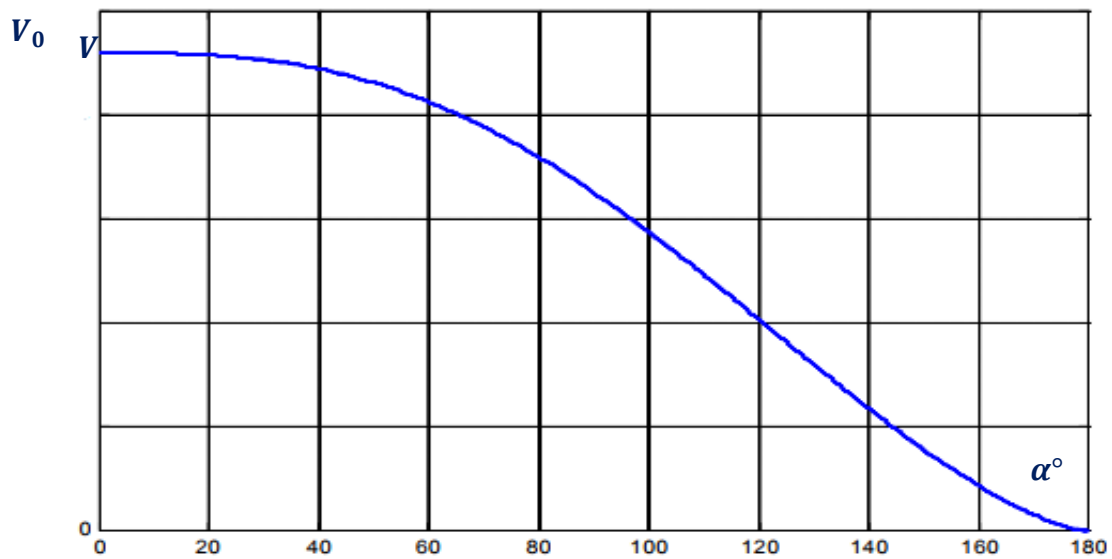
• La valeur moyenne de la tension de sortie est positive et dépend des paramètres de la tension et de α .



Allure des tensions des courants aux bornes de la charge purement résistive.

d- Caractéristique de réglage

$$V_0 = V \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2 \cdot \pi}}$$



caractéristique de réglage.

on remarque de la caractéristique de réglage que la valeur efficace de la tension de sortie V_0 varie de V (valeur efficace de la tension d'entrée) à 0 lorsque α varie de 0 à 180° .

6-3-2- Débit sur circuit résistif inductif

a- Montage

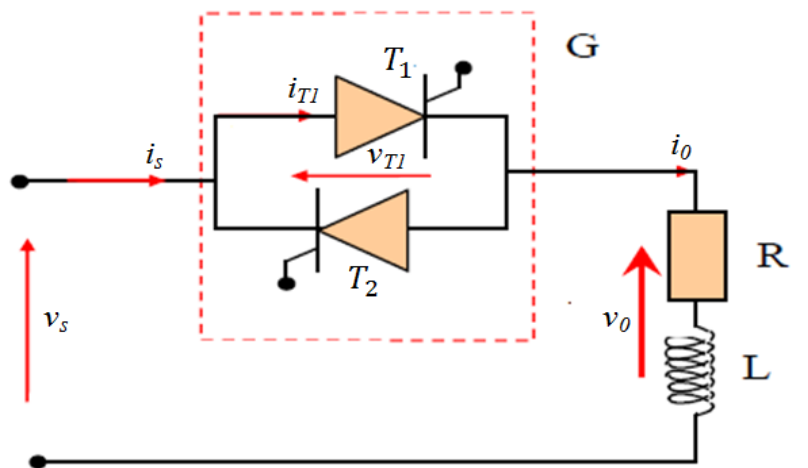
À cause de l'effet inductif, la conduction se poursuit après la fin de l'alternance, jusqu'à θ_1 l'instant d'annulation du courant $i_o(\theta)$.

$$v_s = V_M \cdot \sin \theta$$

$$\text{avec } \theta = \omega \cdot t; \omega = 2 \cdot \pi \cdot f;$$

$$f = \frac{1}{T} = 50\text{Hz} \rightarrow T = 20\text{ms}, T = 2 \cdot \pi$$

$$V_M = V \cdot \sqrt{2}$$



b- Principe de fonctionnement

Lors de l'allumage, l'expression du courant est donnée par :

$$L \cdot \frac{di_o}{dt} + R \cdot i_o = v_o = v_s$$

Solution homogène $i_H(t)$ donne:

$$L \cdot \frac{di_o}{dt} + R \cdot i_o = 0 \Rightarrow i_o = K \cdot e^{-\frac{\theta}{\omega \cdot \tau}} = K \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

avec

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Solution particulière $i_p(t)$ donne:

$$i_o = \frac{V_M}{Z} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) = \frac{V_M}{Z} \cdot \sin(\theta - \varphi)$$

La solution générale de i_o est alors :

$$i_o = K \cdot e^{-\frac{\theta}{\omega \cdot \tau}} + \frac{V_M}{Z} \cdot \sin(\theta - \varphi)$$

$$i_o = K \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{V_M}{Z} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi)$$

$$\begin{cases} \tan \varphi = \frac{L \cdot \omega}{R} \\ \frac{V_M}{Z} = \frac{V_M}{\sqrt{R^2 + (L \cdot \omega)^2}} \end{cases}$$

Condition initiale à:

$$\omega \cdot t_1 = \alpha \Rightarrow i_o(\alpha) = 0$$

$$K \cdot e^{-\frac{\alpha}{\omega \cdot \tau}} + \frac{V_M}{Z} \cdot \sin(\alpha - \varphi) = 0 \Rightarrow$$

$$K = -\frac{V_M}{Z} \cdot \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{\frac{\alpha}{\omega \cdot \tau}}$$

Finalement l'expression générale i_o est:

$$i_o = \frac{V_M}{Z} \cdot \left[\sin(\theta - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{\theta - \alpha}{\omega \cdot \tau}} \right]$$

$$i_o = \frac{V_M}{Z} \cdot \left[\sin(\omega \cdot t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{t - t_1}{\tau}} \right]$$

ainsi:

L'analyse du courant i_o , permet d'avoir trois cas possibles suivant le signe de $\alpha - \varphi$

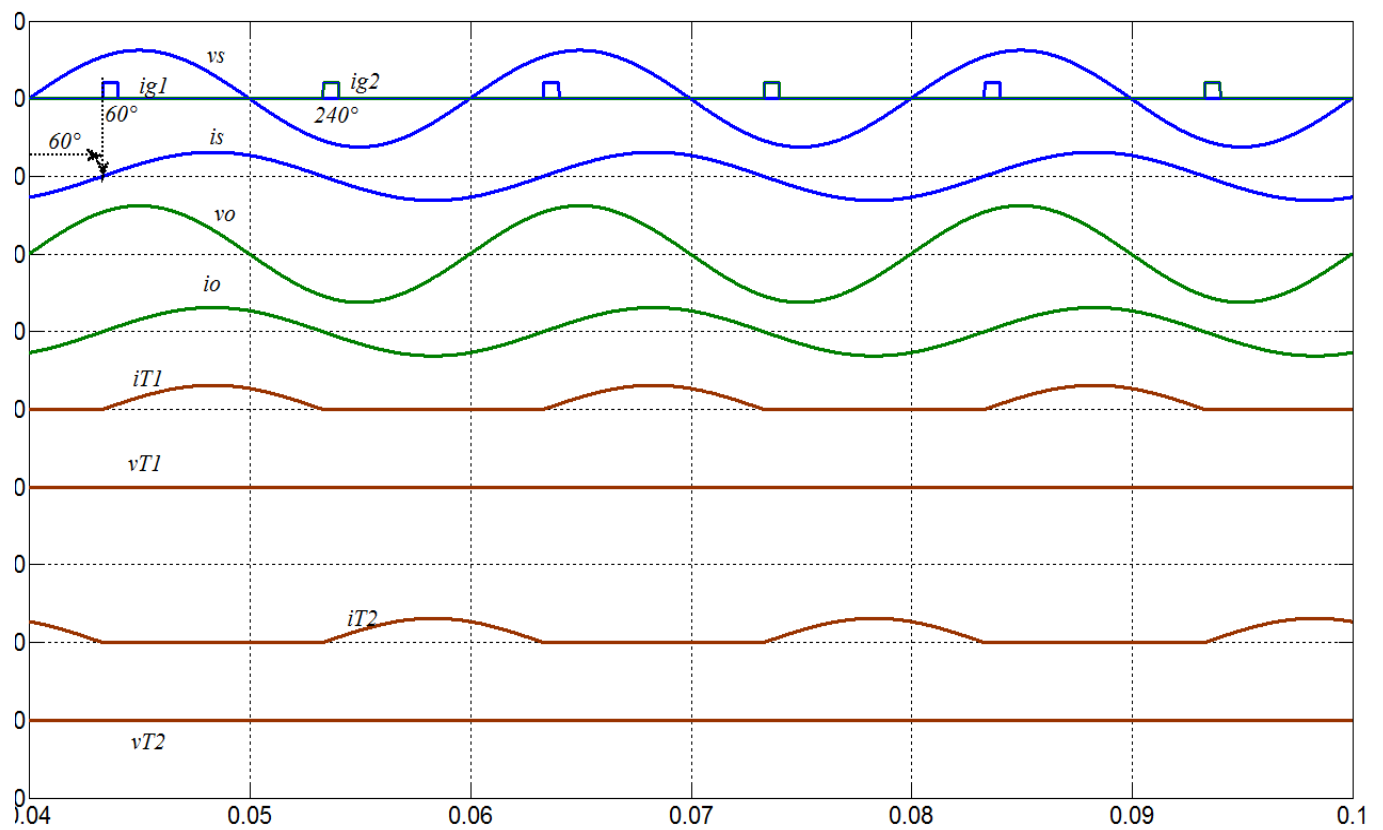
▪ **cas où $\alpha = \varphi$:**

Dans ce cas le courant i_o est donné par l'expression suivante et le régime de fonctionnement devient sinusoïdale et le gradateur ne joue aucun rôle.

$$i_o = \frac{V_M}{Z} \cdot \sin(\theta - \varphi)$$

$$i_o = \frac{V_M}{Z} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi)$$

Dans cas il n'y a pas de régime transitoire



Allure des tensions et des courants aux bornes de la charge R-L avec $\alpha = \varphi$.

Application numérique:

$$V = 220V, \theta_1 = 233.28^\circ, \alpha = 90^\circ, L = 55.1mH, R = 10\Omega,$$

$$\varphi = \arctg \frac{L \cdot \omega}{R} = \arctg \frac{0.0551 \times 2 \times \pi \times 50}{10} = 60^\circ$$

$$\alpha = 60^\circ \leq \varphi = 60^\circ$$

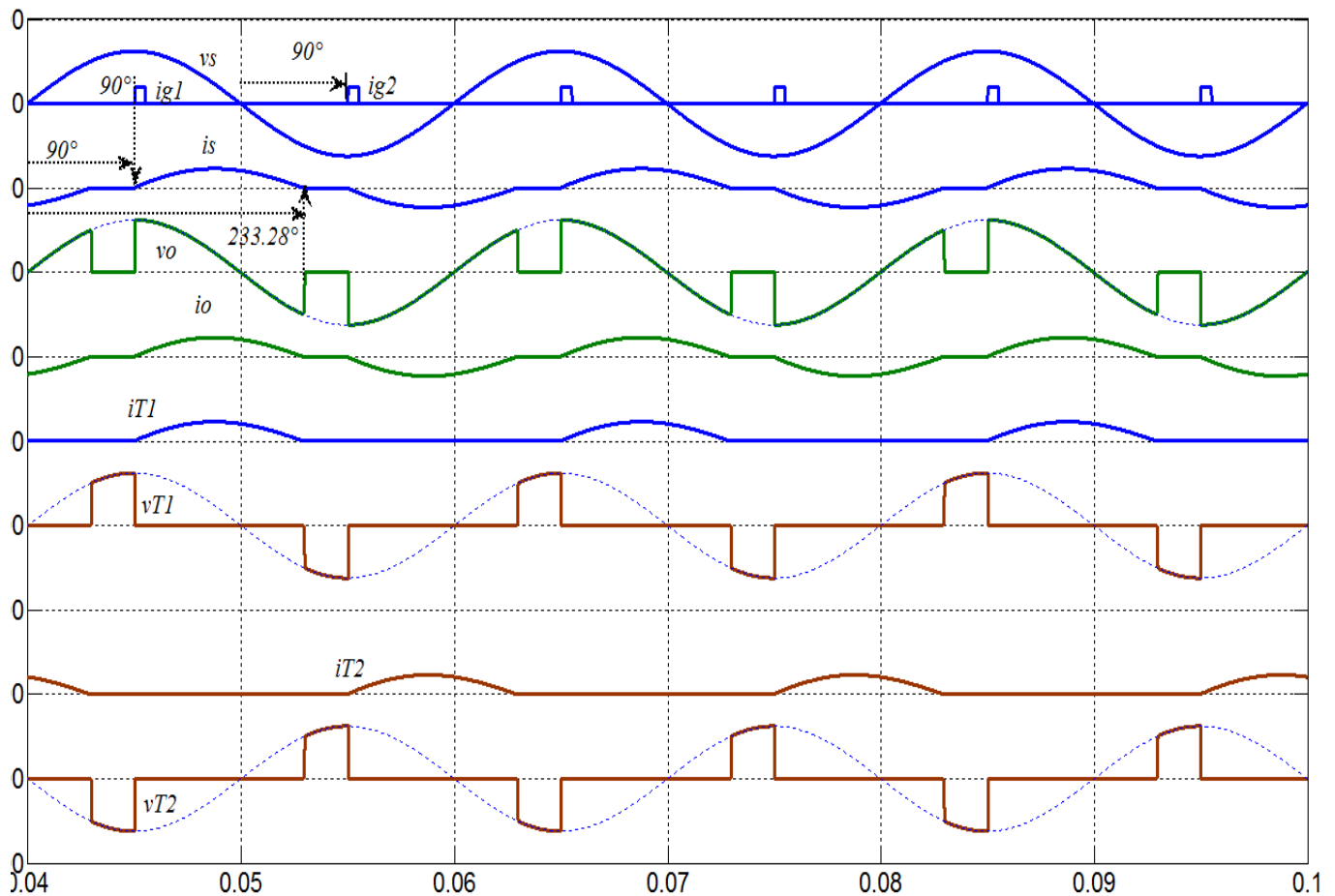
$$V_o = V = 220$$

$$I_o = \frac{V}{Z} = \frac{220}{\sqrt{(10)^2 + (0.0551 \times 2 \times \pi \times 50)^2}} = \frac{220}{20} = 11A$$

■ cas où $\varphi < \alpha < \pi$

Le thyristor T_1 amorcé à $\theta = \alpha$ cesse de conduire à:

$$\theta_{ext} = \theta_1 \Rightarrow i_o = 0 \Rightarrow \sin(\theta_1 - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{\theta_1 - \alpha}{\tau}} = 0$$



Allure des tensions et des courants aux bornes de la charge R-L avec $\alpha > \varphi$

c- La valeur efficace de la tension de la tension au bornes de la charge est donnée par:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi} \int_{\alpha}^{\theta_1} (v_o)^2 \cdot d\theta} = \sqrt{\frac{4 \cdot V^2}{2 \cdot \pi} \int_{\alpha}^{\theta_1} (\sin\theta)^2 \cdot d\theta} = \sqrt{\frac{4 \cdot V^2}{4 \cdot \pi} \left[\theta - \frac{\sin 2\theta}{2} \right]_{\alpha}^{\theta_1}}$$

$$= V \sqrt{\frac{\theta_1 - \alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} - \frac{\sin 2\theta_1}{2\pi}}$$

Application numérique:

$$V = 220V, \theta_1 = 233.28^\circ, \alpha = 90^\circ, L = 55.1mH, R = 10\Omega,$$

$$\varphi = \arctg \frac{L \cdot \omega}{R} = \arctg \frac{0.0551 \times 2 \times \pi \times 50}{10} = 60^\circ$$

$$\alpha = 90^\circ \geq \varphi = 60^\circ$$

$$V_o = V \sqrt{\frac{\theta_1 - \alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} - \frac{\sin 2\theta_1}{2\pi}}$$

$$V_o = 176.58V$$

■ **cas où $\alpha < \varphi$**

Lorsque l'angle α est inférieur à φ , le fonctionnement dépend de la nature des signaux appliqués aux gâchettes

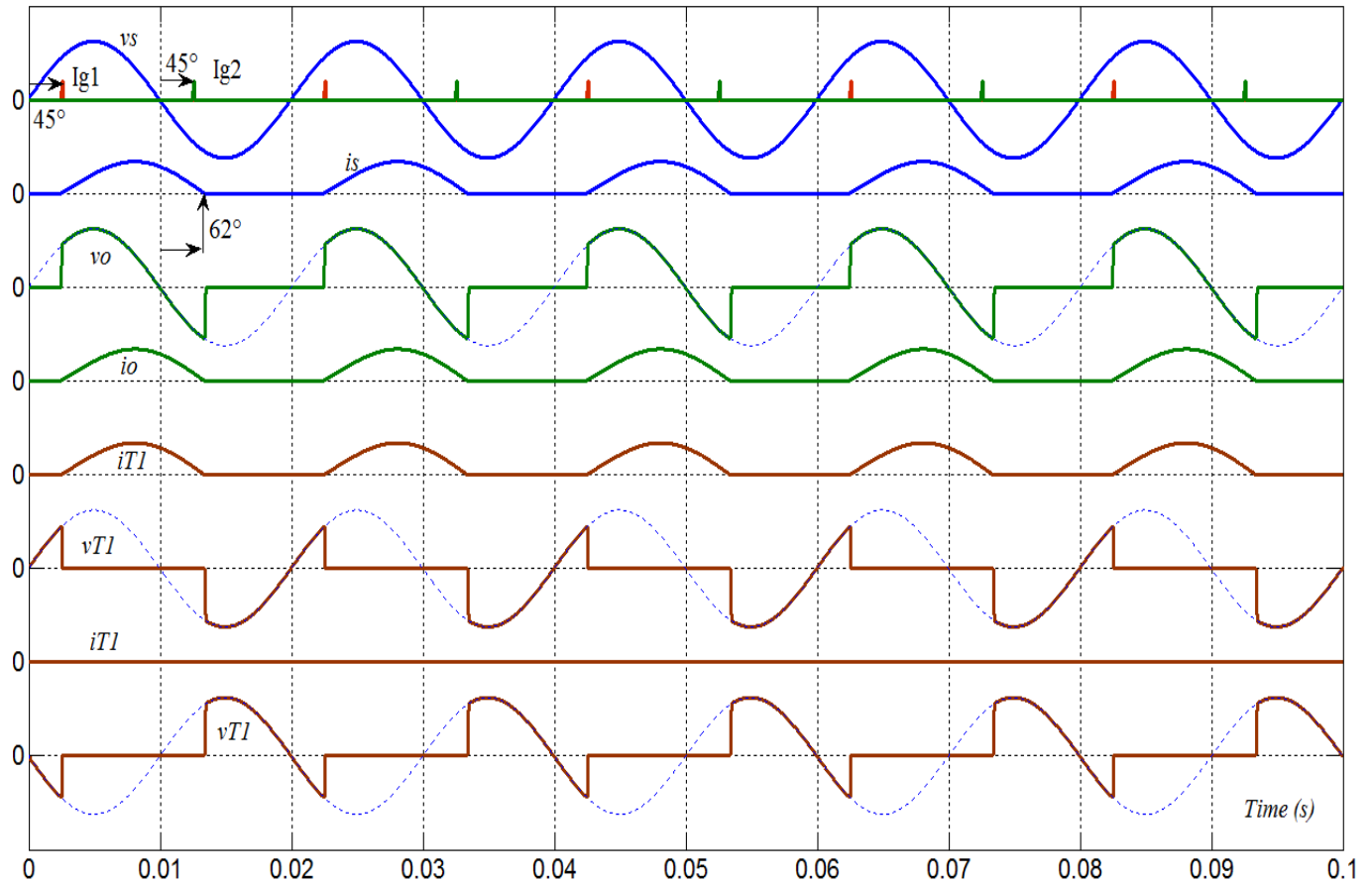
◆ **brèves impulsions (Impulsion de courte durée).**

T_1 entre en conduction. Le courant i_0 est, encore:

$$i_o = \frac{V_M}{Z} \cdot \left[\sin(\theta - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{\theta - \alpha}{\omega \tau}} \right]$$

le courant s'annule pour θ_1 supérieur $\alpha + \pi$.

L'impulsion envoyée sur la gâchette du thyristor T_2 pour $\theta = \alpha + \pi$ trouve ce thyristor avec tension anodique négative, elle est donc sans effet. Quand v_{T2} devient positif pour $\theta = \theta_1$; il n'y a plus de courant sur la gâchette de T_2 . Le montage gradateur fonctionne en redresseur simple alternance avec un courant de sortie unidirectionnel.



Allure de la tension et du courant aux bornes de la charge R-L avec $\alpha < \varphi$.

$$\begin{aligned} V_o &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\theta_1} (v_o)^2 \cdot d\theta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\theta_1} V_M^2 \cdot \sin^2 \theta \cdot d\theta} = \sqrt{\frac{V_M^2}{4 \cdot \pi} \left\{ \left[\theta - \frac{\sin 2\theta}{2} \right]_{\alpha}^{\theta_1} \right\}} \\ &= \frac{V}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\theta_1 - \alpha + \frac{\sin 2 \cdot \alpha}{2} - \frac{\sin 2 \cdot \theta_1}{2}} \end{aligned}$$

Application numérique:

$$V = 220V, \theta_1 = 242^\circ, \alpha = 45^\circ, L = 55.1mH, R = 10\Omega,$$

$$\varphi = \arctg \frac{L \cdot \omega}{R} = \arctg \frac{0.0551 \times 2 \times \pi \times 50}{10} = 60^\circ$$

$$\alpha = 45^\circ \leq \varphi = 60^\circ$$

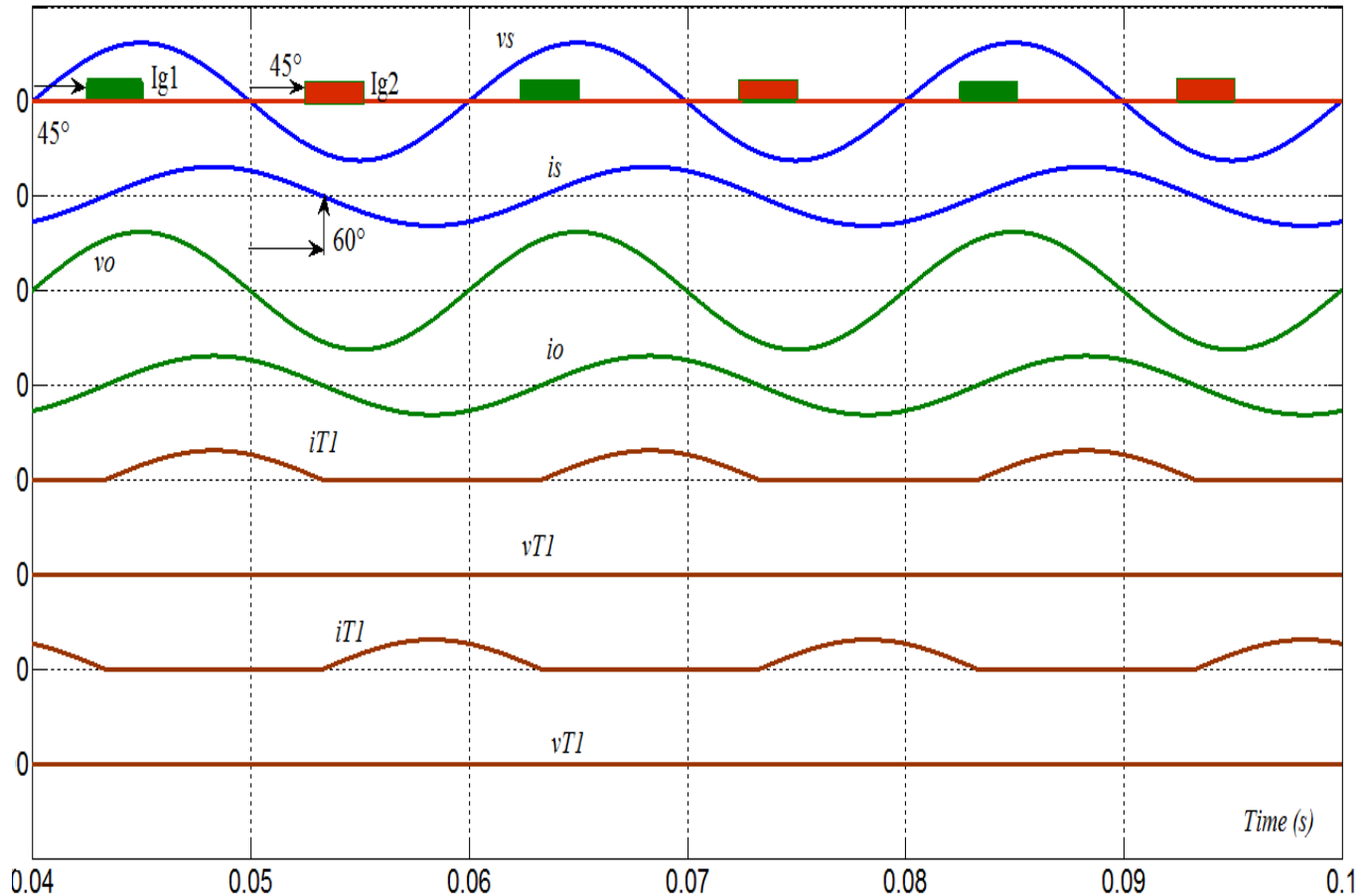
$$V_o = \frac{V}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\theta_1 - \alpha + \frac{\sin 2 \cdot \alpha}{2} - \frac{\sin 2 \cdot \theta_1}{2}}$$

$$V_o = 164.8V$$

◆ Train impulsions (Commande par impulsion large)

On amorce le thyristor T_1 , il reste passant jusqu'à l'instant $\theta = \theta_1$ comme précédemment. Pour $\theta = \theta_1$, la tension aux bornes du thyristor T_2 devient positive et sa gâchette alimentée depuis $\theta = \alpha + \pi$ reçoit encore un courant de déblocage; ce redresseur entre donc en conduction. Au bout de quelques périodes, le courant $i_o(\theta)$ devient sinusoïdal. Le passage de l'angle α à une valeur inférieure à φ est, maintenant sans inconvénient.

Dans ce cas, on doit utiliser un train d'impulsions ou bien une impulsion large afin d'assurer la conduction de deuxième thyristor lors de l'arrêt de conduction (extinction) de premier thyristor.



Application numérique:

$$V = 220V, \theta_1 = 242^\circ, \alpha = 45^\circ, L = 55.1mH, R = 10\Omega,$$

$$\varphi = \arctg \frac{L \cdot \omega}{R} = \arctg \frac{0.0551 \times 2 \times \pi \times 50}{10} = 60^\circ$$

$$\alpha = 45^\circ \leq \varphi = 60^\circ$$

$$V_o = V = 220$$

$$I_o = \frac{V}{Z} = \frac{220}{\sqrt{(10)^2 + (0.0551 \times 2 \times \pi \times 50)^2}} = \frac{220}{20} = 11A$$

Conclusion : le fonctionnement en gradateur est, possible que si $\varphi < \alpha < \pi$.