

CHAPITRE I

Etude théorique des gradateurs

I.1.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.

Actuellement tous les gradateurs fonctionnent sur le principe de la commande de phase qui consiste à amorcer l'interrupteur statique avec un retard réglable, et à laisser le blocage s'effectuer en commutation naturelle. L'interrupteur doit permettre le passage du courant dans les deux sens. On utilise deux thyristors montés tête-bêche ou un triac pour les faibles puissances. le courant débité est ininterrompu. En effet, comme, un gradateur comporte simplement, par phase, un interrupteur placé en série avec la charge. Il s'ensuit que l'on ne pourra pas faire abstraction de la nature de la charge et que, comme pour toute étude en courant discontinu, il faudra raisonner sur une succession de cas particuliers. Pour ne pas alourdir la description, nous nous limiterons cependant aux cas les plus usuels de débit sur circuit résistif et sur circuit inductif pour le monophasé et circuit résistif seulement pour le gradateur triphasé. [6]

I.2. Définition :

Le gradateur est un appareil qui permet de convertir une tension alternative sinusoïdale à fréquence fixe et de valeur efficace constante en une tension alternative de valeur efficace réglable.

Il est le plus souvent constitué de deux thyristors en antiparallèles ou des triacs pour les faibles puissances.

I.3. Principe :

La figure (I.1) Donne le schéma de base. Il est formé de deux thyristors, T_1 et T_2 ouvrant ou Fermant la liaison source-récepteur. [1]

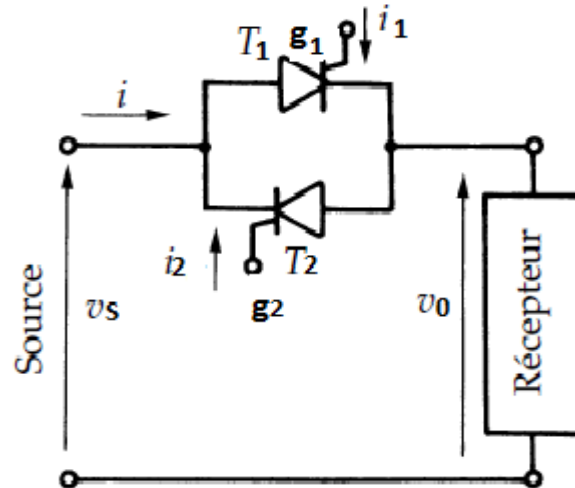


Fig (I.1) : Gradateur monophasé

À partir de l'instant où on veut fermer l'interrupteur, on envoie en permanence des signaux de déblocage sur les gâchettes des deux thyristors. À cet instant, T_1 conduit si v_s est positif, c'est T_2 qui conduit si v_s est négatif. Quand le courant i change de signe, il passe d'un thyristor à l'autre. Si on néglige la chute de tension directe des thyristors, la tension v_0 aux bornes de la charge est égale à v_s .

Pour ouvrir l'interrupteur, on cesse d'envoyer des signaux de déblocage aux deux thyristors. Celui qui conduit continuera d'écouler le courant i jusqu'à ce que celui-ci s'annule, puis i reste nul.

I.4. Constitution d'un gradateur :

Le gradateur est constitué de deux parties Suivantes :

- La partie puissance est constituée de deux Thyristors montés « tête-bêche » pour les fortes puissances (> 10 kW) ou d'un triac pour les puissances inférieures.
- La partie commande est constituée de divers circuits électroniques permettant d'élaborer les signaux de commande des thyristors à partir d'un ordre de commande extérieur

I.5. Types de gradateurs

La tension aux bornes de la charge évolue suivant la séquence de commande, ainsi on différenciera deux types de gradateurs [13] :

I.5.1 Gradateur à angle de phase

I.5.1.1 Principe de fonctionnement

Dans ce type de gradateur, Le thyristor T_1 est amorcé durant l'alternance positive avec un angle de retard par rapport au passage par zéro de la tension secteur. Le thyristor T_2 est amorcé durant l'alternance négative avec le même angle de retard.

I.5.1.2 Domaine d'utilisation :

- Chauffage
- éclairage
- variation de vitesse des moteurs alternatifs de faible puissance (perceuse, aspirateurs de quelques centaines de Watts)

I.5.2 Gradateur à train d'onde

I.5.2.1 Principe de fonctionnement :

Dans ce type de gradateur, Le thyristor T_1 et le thyristor T_2 sont amorcés de manière continue pendant le temps T_{on} (période de conduction) et ils sont ensuite bloqués jusqu'à la fin de la période de modulation. On obtient alors aux bornes de la charge la tension suivante :

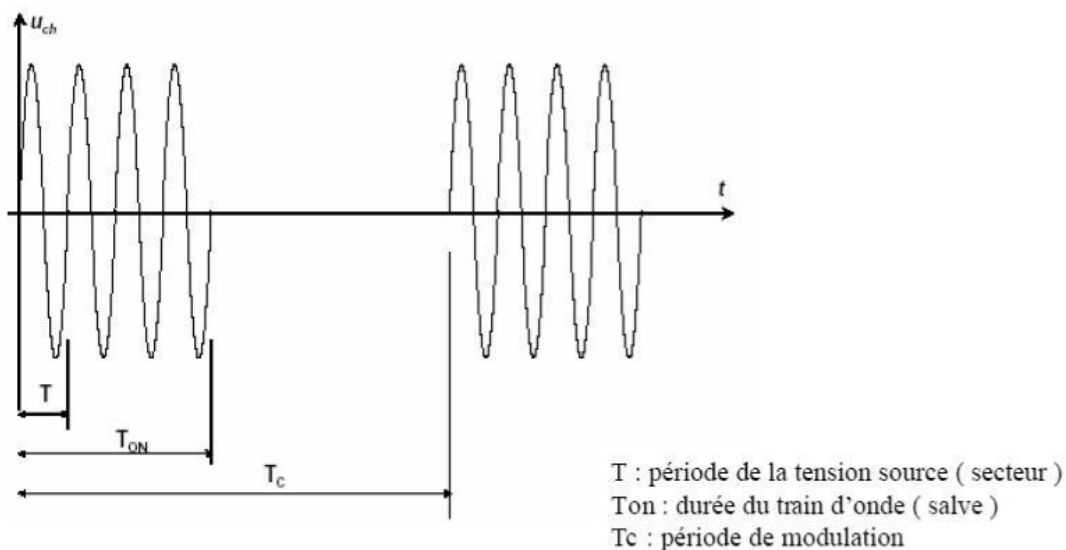


Fig (I.2) : amorçage du gradateur monophasé a train d'onde

I.5.2.2 Domaine d'utilisation :

- Chauffage
- utilisés sur des systèmes d'une inertie thermique important

I.6 Application des gradateurs:

Les gradateurs sont des convertisseurs simples à réaliser. On les utilise pour [12] :

- ✓ Contrôle de l'éclairage / éclairage dans les circuits d'alimentation en courant alternatif.
- ✓ Chauffage par induction.
- ✓ Chauffage industriel et chauffage domestique.
- ✓ Changement de prise du transformateur (lors du changement de prise du transformateur de charge).
- ✓ Régulation de la vitesse des moteurs à induction
- ✓ Commandes d'aimant AC

I.7. Avantages et inconvénients :

Les avantages de l'« interrupteur statique » sont évidents [1] :

- ✓ pas de risque de rebondissement,
- ✓ établissement du courant à un instant précis,
- ✓ ouverture avec un retard égal au maximum à une demi-période,
- ✓ ouverture sans rupture de courant, donc sans surtension,
- ✓ possibilité de cadences de fonctionnement très rapides : on peut ne laisser passer le courant que pendant quelques alternances, ce qui est très intéressant pour le soudage par points par exemple.

Mais cet «interrupteur » :

- ✓ est plus fragile en cas de surcharge qu'un interrupteur électromécanique,
- ✓ il ne présente pas de coupure « visible »,
- ✓ il produit une chute de tension « au contact » beaucoup plus élevée.

I.8. Définition du thyristor

Le thyristor : en électrotechnique est équivalent à un interrupteur unidirectionnel à fermeture commandé et ouverture naturelle. [4]

*Symbole :

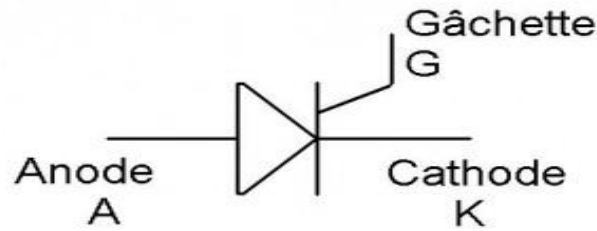


Fig (I.3) : Symbole électrique d'un gradateur

1.2 -fonctionnement du thyristor.

*pour amorcer le thyristor :

Il faut :

- que la tension v_{ak} soit positive.
- un impulsion de courant sur la gâchette.

*pour bloquer le thyristor :

Il faut :

- que le courant i_{ak} s'annule.
- Appliquant une tension v_{ak} négative.

2-2 Angle de retarde à l'amorçage.

L'instant où l'on envoie à l'impulsion de gâchette par rapport au début de chaque demi-période s'appelle le retarde à l'amorçage ce retarde être réglé. Ce qui permet faire varier la valeur moyenne

I.9. Le triac :

Est équivalent à deux thyristors montés en opposition. Il n'existe qu'une gâchette et deux anodes. [9]

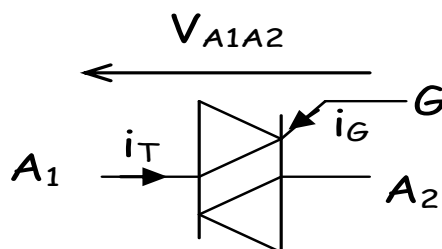
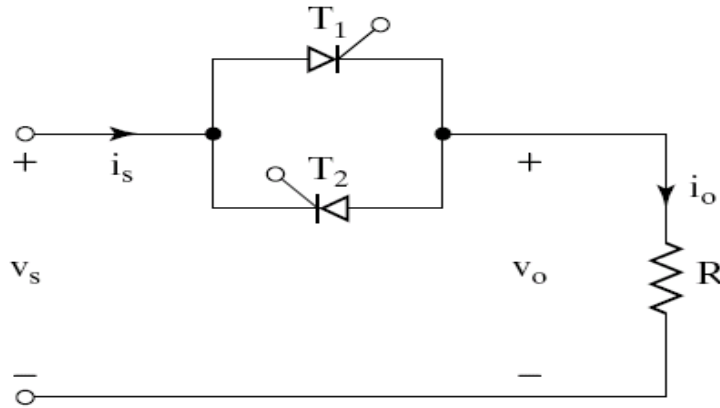


Fig (I.4) : Symbole électrique du triac

I.10. Gradateur monophasé commandé en retard de phase:

I.10.1. Charge résistive :



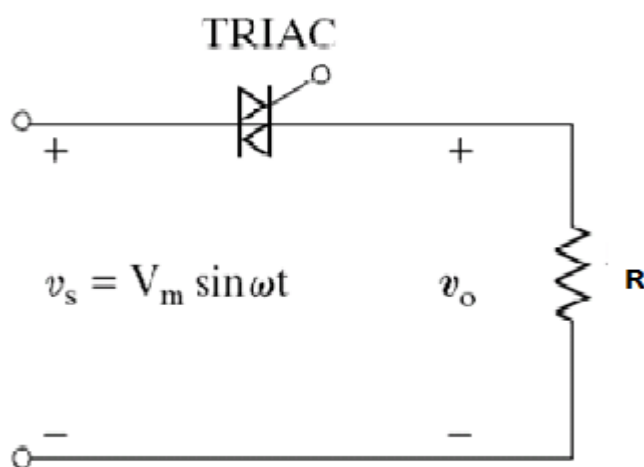
Fig(I.5) : Gradateur monophasé utilisant des thyristors

I.10.1.1 Principe

Les thyristors T_1 et T_2 sont montés en tête- bêche en peuvent être remplacés par un seul triac.

Le thyristor T_1 est polarisé en direct pendant le demi-cycle positif de l'alimentation d'entrée Tension. Le thyristor T_1 est déclenché avec un angle de retard de ' α ' ($0 \leq \alpha \leq \pi$ radians). Considérant le thyristor T_1 en tant que commutateur fermé idéal, la tension d'alimentation d'entrée apparaît à travers la charge la résistance R et la tension de sortie $v_o = v_s$ pendant $\omega t = \alpha$ à π radians. Le courant de charge circule à travers le thyristor T_1 et à travers la résistance de charge R vers le bas pendant le temps de conduction de T_1 de $\omega t = \alpha$ à π radians. À $\omega t = \pi$, lorsque la tension d'entrée tombe à zéro, le courant du thyristor (qui coule à travers la résistance de charge R) tombe à zéro et par conséquent T_1 s'éteint naturellement. Aucun courant ne circule le circuit pendant $\omega t = \pi$ à $(\pi + \alpha)$. Le thyristor T_2 est polarisé en avant lors de la négation cycle d'alimentation d'entrée et lorsque le thyristor T_2 est déclenché avec un angle de retard $(\pi + \alpha)$, la sortie la tension suit le demi-cycle négatif de l'entrée de $\omega t = (\pi + \alpha)$ à 2π . Lorsque T_2 est ON, le courant de charge circule dans le sens inverse (direction ascendante) à travers T_2 pendant $\omega t = (\pi + \alpha)$ à 2π radians. L'intervalle de temps (espacement) entre les impulsions de déclenchement de la porte de T_1 et T_2 est maintenu à π radians ou 180° . À $\omega t = 2\pi$ la tension d'alimentation d'entrée tombe à zéro et donc le courant de charge tombe également à zéro et le thyristor T_2 s'éteint naturellement. Au lieu

d'utiliser deux SCR en parallèle, un Triac peut être utilisé pour le contrôle de la tension alternative pleine onde. [12]



Fig(I.6) : Gradateur monophasé (gradateur bidirectionnel) utilisant TRIAC

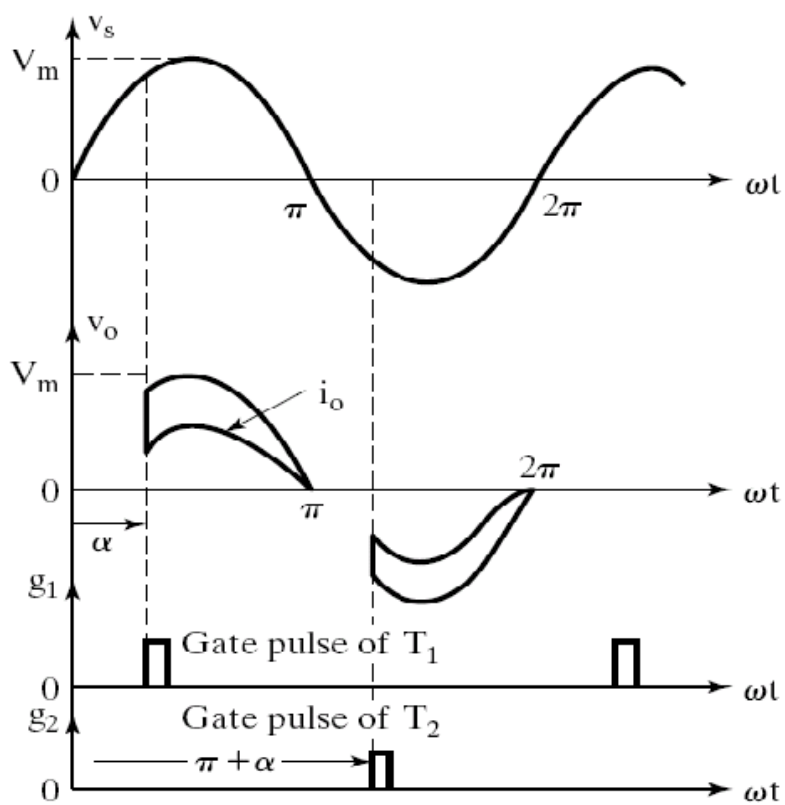


Fig (I.7) : Forme d'onde d'un gradateur monophasé

I.10.1.2 Partie théorique

Si $v_s = \sqrt{2}V_s \sin \omega t$ est la tension d'entrée et que les angles de retard des thyristors T_1 et T_2 sont ($\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$), la tension efficace de sortie peut être trouvée à partir de :

$$\begin{aligned} V_0 &= \left[\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} 2V_s^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \left[\frac{4V_s^2}{4\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (1)$$

Le courant efficace de la charge

$$\begin{aligned} I_A &= \frac{1}{2\pi R} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} \sin \omega t d(\omega t) \\ I_A &= \frac{\sqrt{2}V_s}{2\pi R} (\cos \alpha + 1) \end{aligned} \quad (2)$$

Le courant efficace du thyristor

$$\begin{aligned} I_R &= \left[\frac{1}{2\pi R^2} \int_{\alpha}^{\pi} 2V_s^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \left[\frac{2}{4\pi R^2} \int_{\alpha}^{\pi} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{V_s}{\sqrt{2}R} \left[\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (3)$$

I.10.2 Gradateur monophasé avec charge résistive inductive (RL)

I.10.2.1 Principe

En pratique, la plupart des charges sont inductives dans une certaine mesure. Un gradateur monophasé pleine onde avec une charge RL est montré à la figure suivante :

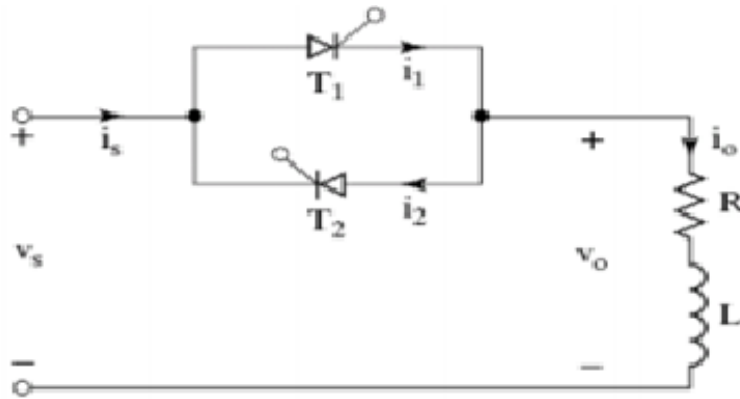
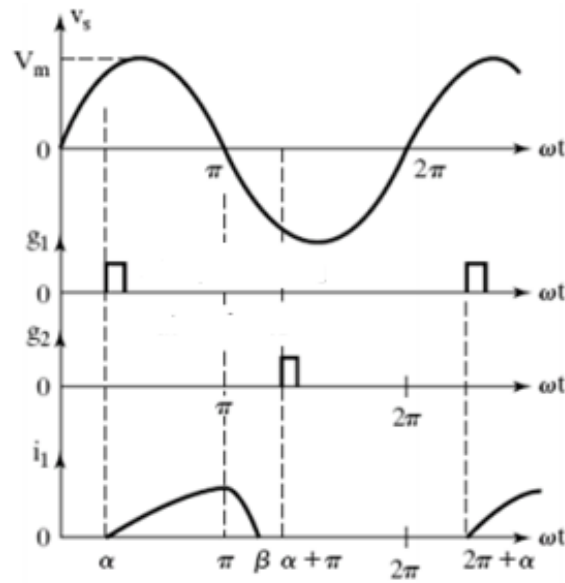


Fig (I.8) : Gradateur monophasé avec charge RL

Supposons que T_1 soit déclenché pendant le demi-cycle positif et supporte le courant de charge, en raison de l'inductance dans le circuit, le courant du thyristor T_1 ne tomberait pas à zéro à $\omega t = \pi$, lorsque la tension d'entrée commence à être négative. Le thyristor T_1 continuera à conduire jusqu'à ce que le courant i_1 tombe à zéro jusqu'à $\omega t = \beta$. L'angle de conduction du thyristor T_1 est $\delta = \beta - \alpha$ et dépend de l'angle de retard α et de l'angle de facteur de puissance de la charge θ . [2,12]

Les formes d'onde du courant du thyristor, des impulsions de déclenchement et de la tension d'entrée sont indiquées sur la figure suivante :



FIG(1.9) : Forme d'onde d'un gradateur monophasé avec charge RL

1.10.2.2 Partie théorique

Si $v_s = \sqrt{2}v_s \sin \omega t$ est la tension d'entrée instantanée et l'angle du thyristor T_1 est α , le courant i_1 de thyristor peut être trouvé à partir de :

$$L \frac{di_1}{dt} + R i_1 = \sqrt{2}v_s \sin \omega t \quad (4)$$

La solution d'équation (1) est de la forme :

$$i_1 = \frac{\sqrt{2}v_s}{Z} \sin(\omega t - \theta) + A_1 e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \quad (5)$$

Où l'impédance de charge $Z = [R^2 + (\omega L)^2]^{\frac{1}{2}}$ et angle de charge $\theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$

La constante A_1 peut être déterminée à partir de la condition initiale :

$$\text{À } \omega t = \alpha, i_1 = 0$$

De l'équation (5) A_1 est trouvé comme :

$$A_1 = -\frac{\sqrt{2}v_s}{z} \sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega}\right)} \quad (6)$$

Substitution d'A1 à partir de l'équation (6) dans l'équation (5) donne :

$$i_1 = \frac{\sqrt{2}v_s}{z} \left[\sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega - t}\right)} \right] \quad (7)$$

L'angle β , lorsque le courant i_1 tombe à zéro et que le thyristor T_1 est bloqué, peut être trouvé à partir de la condition $i_1 = (\omega t = \beta) = 0$ dans Eq (7) est donné par la relation :

$$\sin(\beta - \theta) = \sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right)(\alpha - \beta)/\omega} \quad (8)$$

L'angle β , également connu sous le nom d'angle d'extinction, peut être à partir de cette équation transcendante est nécessite itérative de résolution.

Une fois l'angle β est connu, l'angle de conduction δ du thyristor T_1 peut être trouvé :

$$\delta = \beta - \alpha \quad (9)$$

La tension efficace de sortie :

$$\begin{aligned} v_0 &= \left[\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} 2v_s^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \left[\frac{4}{4\pi} v_s^2 \int_{\alpha}^{\beta} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= v_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\beta - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\sin 2\beta}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (10)$$

Le courant efficace du thyristor peut être trouvé à partir de l'équation (7) comme :

$$\begin{aligned} i_R &= \left[\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i_1^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{v_s}{z} \left[\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \{ \sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) \} e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega - t}\right)} d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (11)$$

Et le courant efficace du thyristor peut être déterminé en combinant le courant efficace de chaque thyristor comme :

$$I_0 = (I_R^2 + I_R^2)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{2} I_R \quad (12)$$

La valeur moyenne du courant de thyristor peut également être trouvée à partir de l'équation (7) comme :

$$\begin{aligned} I_A &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i_1 d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{2}v_s}{2\pi z} \int_{\alpha}^{\beta} \{ \sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) \} e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega - t}\right)} d(\omega t) \end{aligned} \quad (13)$$

Les signaux de déclenchement du thyristor pourraient être des impulsions courtes pour un gradateur avec des charges résistive .ce pendant, de telles impulsion courtes ne sont pas adaptées aux charges inductive .cela peut être explique en référence à la Fig (I.9) [2,12]

Lorsque le thyristor T_2 est déclenche à $\omega t = \pi + \alpha$, le thyristor T_1 est toujours conducteur en raison de l'inductance de charge .Au moment de T_1 tombe à zéro et T_1 est éteint à

$\omega t = \beta = \alpha + \delta$, l'impulsion de porte de thyristor T_2 a déjà cassé et par conséquent, T_2 ne sera pas allumé. [2,12]

En conséquence, seul le thyristor T_1 fonctionnera, provoquant des formes d'onde asymétriques de tension et de courant de sortie .cette difficulté peut être résolue en utilisant des signaux de porte continus d'une durée de $(\pi - \alpha)$ comme indiqué sur la Fig(I.10) suivant :

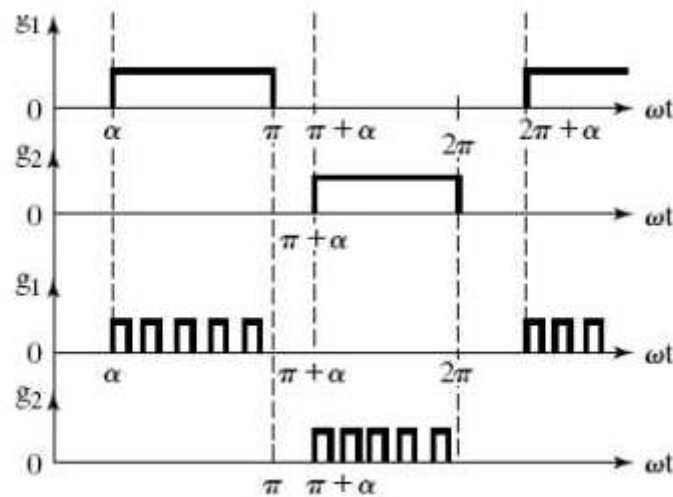


Fig (I.10) : Gradateur plein d'onde avec charge RL

Dés que le courant T_1 tombe a zéro, le thyristor T_2 (avec des impulsions de gâchette comme indiqué sur la Fig(I.10), est activé, mais une impulsion de gâchette continue augmente la perte de commutation des thyristors est nécessite un transformateur d'isolement plus grand pour le circuit de déclenchement. En pratique, un train d'impulsion avec des durées courtes, comme indiqué sur la Fig(I.9), est normalement utilisé pour surmonter ces problèmes .l'équation (7) indique que la tension de charge et le courant sera sinusoïdale si l'angle de retard α est inférieur à l'angle de charge θ .

Si α est supérieur à θ , le courant de charge serait discontinu et non sinusoïdal. [2,12]

Remarque

1. si $\alpha = \theta$, de Eq (8) $\sin(\beta - \theta) = \sin(\alpha - \theta) = 0$ (14)

Et $\beta - \alpha = \delta = \pi$ (15)

2. si l'angle de conduction, δ ne peut pas dépasser π et que le courant de charge doit passer par zéro, l'angle de retard α ne peut pas être inférieur à θ et l'intervalle de contrôle est :

$$\theta \leq \alpha \leq \pi \quad (16)$$

3. si $\alpha \leq \theta$ et les impulsions de gâchette des thyristors sont de longue durée, le courant de charge ne changerait pas avec α , mais les deux thyristors conduiraient pour π .

Le thyristor T_1 s'allume $\omega t = \theta$ et Le thyristor T_2 s'allume à $\omega t = \pi + \theta$

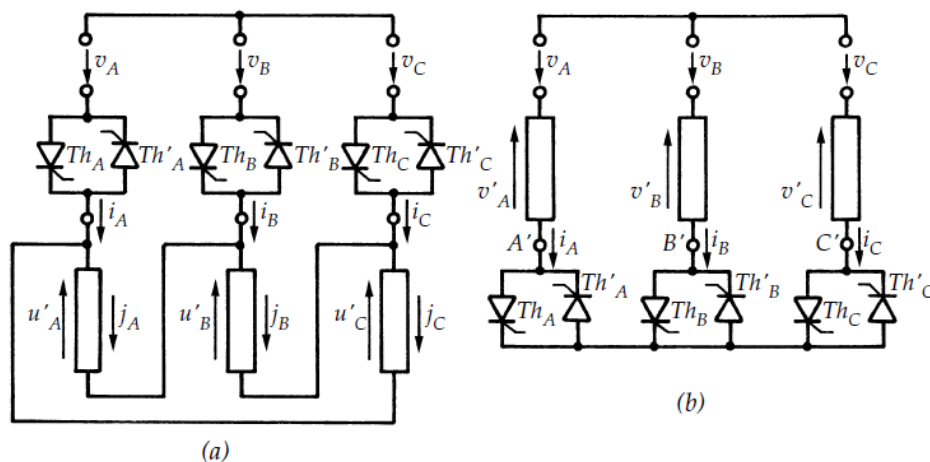
I.11. Gradateur triphasé

Il existe de nombreux types de circuits utilisés pour les gradateurs triphasés alternatifs (tension alternative à alternative). Contrairement aux monophasés. Les charges triphasées (équilibrées) sont connectées en étoile ou triangle. Deux thyristors connectés antiparallèles, ou un triac, sont utilisés pour chaque phase dans la plupart des cas. Circuits comme décrit. Deux circuits sont d'abord pris en charge, tous deux avec une charge résistive équilibrée (R) gradateur triphasé à trois fils avec résistivité équilibrée Charge. [4]

I.11.1 Type des gradateurs triphasés

I.11.1.1 Gradateur triphasé tout thyristors

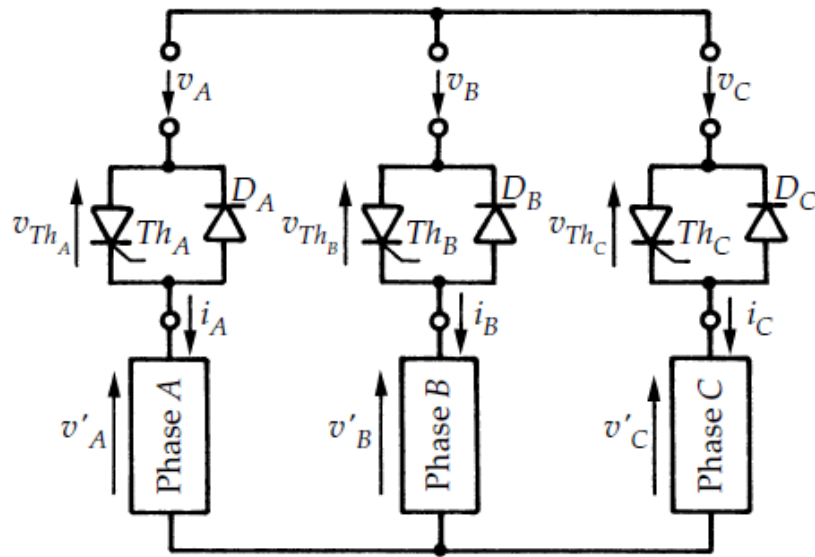
Les vrais gradateurs triphasés sont formés de trois ensembles de deux thyristor tête-bêche montés entre les bornes ABC du réseau et celles 1, 2,3 du récepteur équilibré couplé en étoile Fig (I.11.b) où en triangle Fig (I.11.C)



Fig(I.11) : Les gradateurs triphasés couplés en étoile et triangle

I.11. 1.2 Gradateur triphasé mixte

On trouve également des structures mixtes, obtenues avec les dernières structures, en remplaçant les thyristors Th_1' , Th_2' et Th_3' par trois diodes.



Fig(I.12) : Gradateur triphasé mixte

I.11. 2 Gradateur triphasé couplé en étoile :

I.11.2.1 Principe

Le gradateur triphasé normal est formé de trois groupes de deux thyristors, T_1 et T_4 , T_3 et T_6 , T_2 et T_5 , montés entre les trois bornes de la source et celles du récepteur Fig (I.13)

On désigne v_{AN} , v_{BN} , v_{CN} les tensions simples d'alimentation sinusoïdales, de pulsation ω Comptées par rapport au point neutre de la source,

$$v_{AN} = \sqrt{2}v_S \sin(\omega t), v_{BN} = \sqrt{2}v_S \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}), v_{CN} = \sqrt{2}v_S \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

Les phases du récepteur sont parcourues par des courants i_A , i_B et i_C .

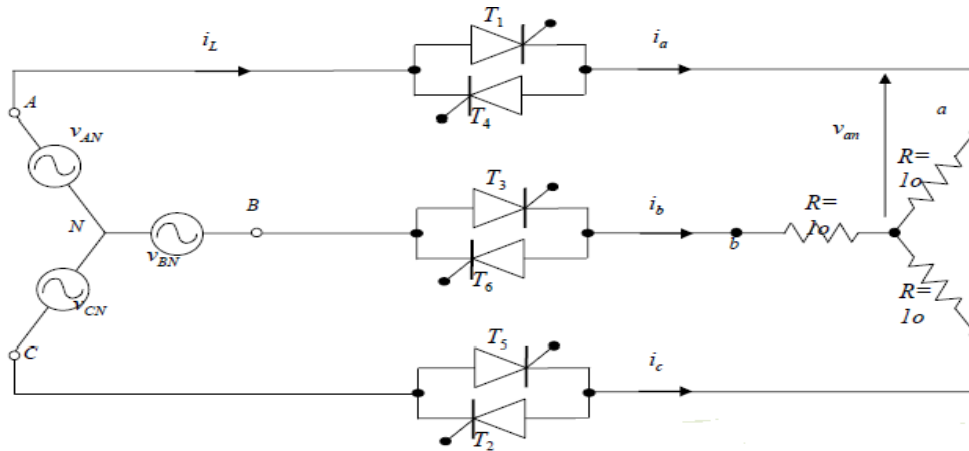
v_A , v_B et v_C désignent les tensions aux bornes de ces phases.

v_{Th_A} , v_{Th_B} et v_{Th_C} les tensions aux bornes des trois groupes de thyristors.

Les thyristors sont débloqués à des intervalles égaux de un sixième de période dans l'ordre suivant : $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$. On repère le retard au déblocage par l'angle α ; le thyristor Th_A reçoit son impulsion de commande pour $\theta = \alpha$.

Les thyristors de la même phase sont commandés avec un décalage de 180°.

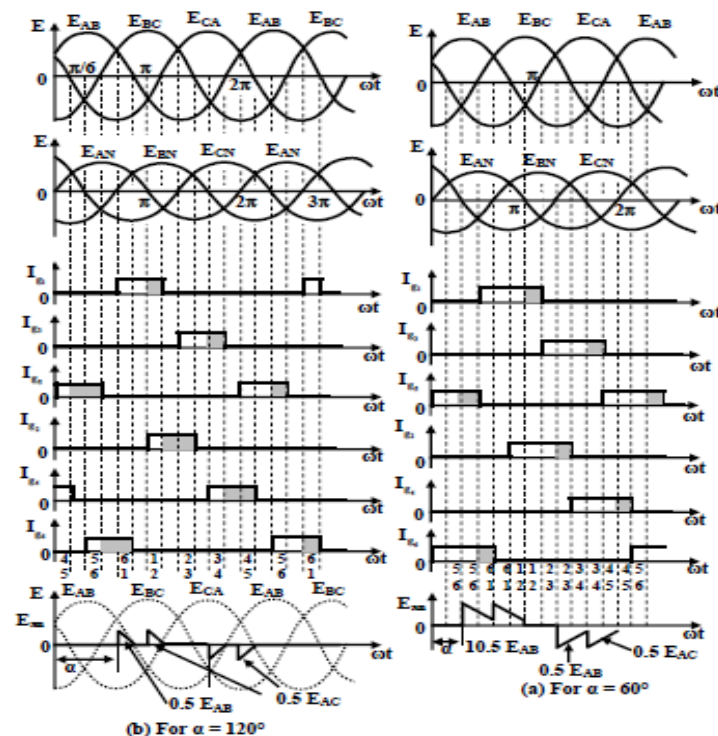
Les thyristors de la phase 2 sont commandés selon un décalage de 120° par rapport à ceux de la phase 1 [1]



Fig(I.13) : Gradateur triphasé couplé en étoile avec charge résistive

Les formes d'onde des tensions d'entrée, les angles de conduction des thyristors et la sortie

Les tensions de phase 1 pour les angles de retard de déclenchement (α) de (a) 60° et (b) 120° sont illustrées à la Fig(I.14) [10,11]



Fig(I.14) : Formes d'onde pour le gradateur triphasé

Pour $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ ($\pi/6$), immédiatement avant le déclenchement du thyristor 1, de deux thyristors (5 et 6) conduite. Une fois que le thyristor 1 est déclenché, trois thyristors (1, 5 et 6) sont conduits. Comme indiqué précédemment, un le thyristor s'éteint lorsque le courant passe à zéro. Les conditions alternent entre deux et trois thyristors conducteurs.

À tout moment, seuls deux thyristors conduisent à $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. Bien que deux thyristors conduisent à tout moment.

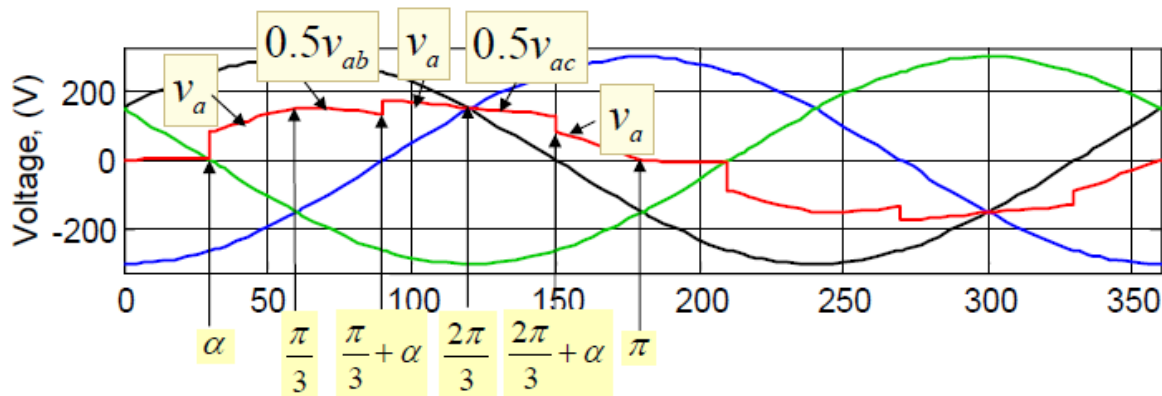
Pour $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$, il y a des périodes pendant lesquelles aucun thyristor n'est allumé.

Pour $\alpha \geq 150^\circ$, il n'y a pas de période pour laquelle deux thyristors sont allumés, et la tension de sortie devient nulle à $\alpha = 150^\circ$ ($5\pi/6$). La plage d'angle de retard est $0^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$. [11,2]

1.11.2.2 Partie théorique

Les expressions de la valeur efficace de la tension de sortie par phase pour symétrique en étoile charge résistive sont les suivantes. Veuillez noter que $\theta = \omega t$. [3]

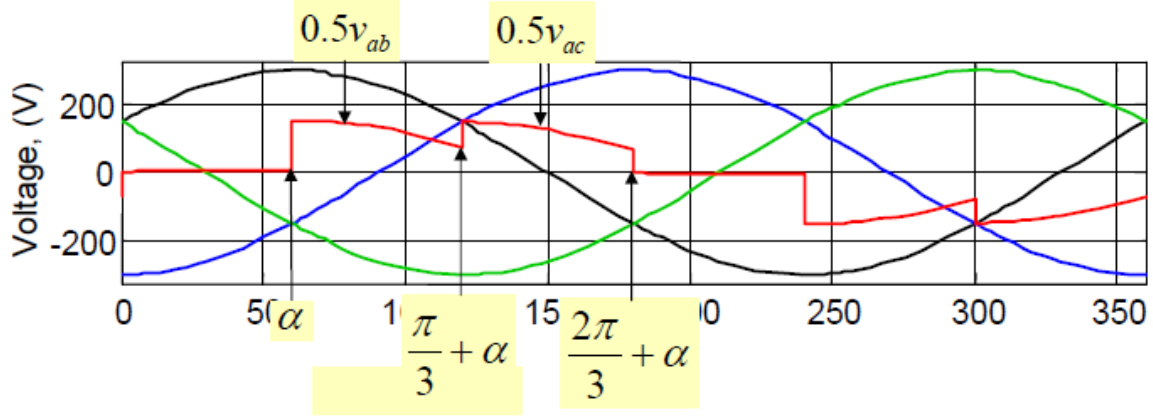
Pour $0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$



$$\begin{aligned}
 V_0 &= \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_a^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= \left\{ \frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\frac{\pi}{3}} v_a^2 d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}+\alpha} \frac{v_{ab}^2}{4} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}} v_a^2 d(\omega t) + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \frac{v_{ac}^2}{4} d(\omega t) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \int_{\frac{2\pi}{3}+\alpha}^{\pi} v_a^2 d(\omega t) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \\
 &= \sqrt{6} V_s \left\{ \frac{2}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\frac{\pi}{3}} \frac{\sin^2 \omega t}{3} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}+\alpha} \frac{\sin^2(\omega t + \frac{\pi}{6})}{4} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}} \frac{\sin^2 \omega t}{3} d(\omega t) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \frac{\sin^2(\omega t - \frac{\pi}{6})}{4} d(\omega t) + \int_{\frac{2\pi}{3}+\alpha}^{\pi} \frac{\sin^2 \omega t}{3} d(\omega t) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned}$$

$$=\sqrt{6}V_S \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Pour $60^\circ \leq \alpha < 90^\circ$



$$V_0 = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_{an}^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$V_0 = \left[\frac{2}{2\pi} \left\{ \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{3}+\alpha} \frac{v_{ab}^2}{4} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \frac{\sin^2}{4} d(\omega t) \right\} \right]^{\frac{1}{2}}$$

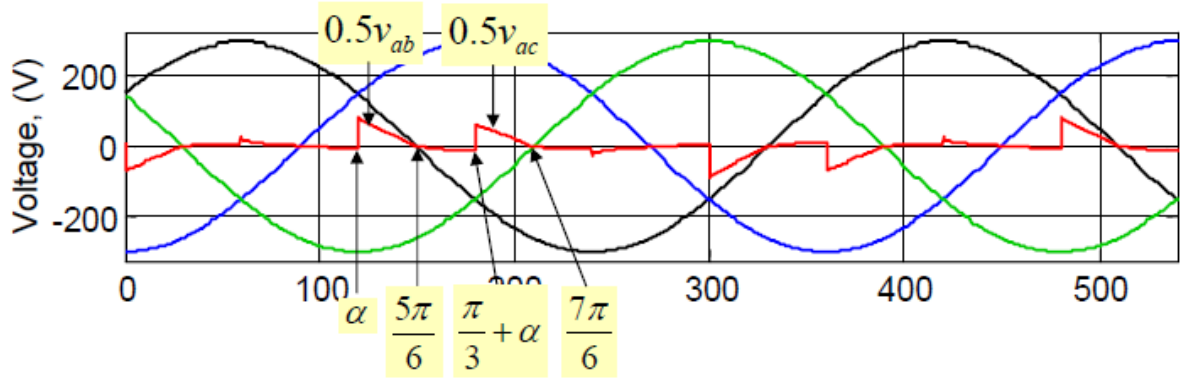
$$V_0 = \sqrt{6}V_S \left[\frac{2}{2\pi} \left\{ \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{3}+\alpha} \frac{\sin^2(\omega t + \frac{\pi}{6})}{4} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \frac{\sin^2(\omega t - \frac{\pi}{6})}{4} d(\omega t) \right\} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$V_0 = \sqrt{6}V_S \left[\frac{2}{2\pi} \left\{ \int_{\alpha+\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{3}+\alpha+\frac{\pi}{6}} \frac{\sin^2 \omega t}{4} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha-\frac{\pi}{6}}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha-\frac{\pi}{6}} \frac{\sin^2 \omega t}{4} d(\omega t) \right\} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$V_0 = \sqrt{6}V_S \left[\frac{2}{2\pi} \left\{ \int_{\alpha+\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \frac{\sin^2 \omega t}{4} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \frac{\sin^2 \omega t}{4} d(\omega t) \right\} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$=\sqrt{6}V_S \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{12} + \frac{3 \sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

Pour $90^\circ \leq \alpha < 150$



$$\begin{aligned}
 V_0 &= \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_{an}^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\
 V_0 &= \left[\frac{2}{2\pi} \left\{ \int_{\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} \frac{v_{ab}^2}{4} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{7\pi}{6}+\alpha} \frac{\sin^2}{4} d(\omega t) \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \\
 V_0 &= \sqrt{6}V_S \left[\frac{2}{2\pi} \left\{ \int_{\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} \frac{\sin^2(\omega t + \frac{\pi}{6})}{4} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{7\pi}{6}+\alpha} \frac{\sin^2(\omega t - \frac{\pi}{6})}{4} d(\omega t) \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \\
 V_0 &= \sqrt{6}V_S \left[\frac{2}{2\pi} \left\{ \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\frac{\pi}{6}} \frac{\sin^2 \omega t}{4} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{3}-\frac{\pi}{6}}^{\frac{7\pi}{6}-\frac{\pi}{6}} \frac{\sin^2 \omega t}{4} d(\omega t) \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \\
 V_0 &= \sqrt{6}V_S \left[\frac{2}{2\pi} \left\{ \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\pi} \frac{\sin^2 \omega t}{4} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\pi} \frac{\sin^2 \omega t}{4} d(\omega t) \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= \sqrt{6}V_S \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{5\pi}{24} + \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)
 \end{aligned}$$

CHAPITRE II

Simulation des gradateurs

Le logiciel MATLAB/SIMULINK, est un bon moyen d'étude des conditions du fonctionnement voulus de plusieurs types de circuits. Il nous permet d'observer de manière réaliste des phénomènes électriques et physiques (couple, vitesse, tension, courant).

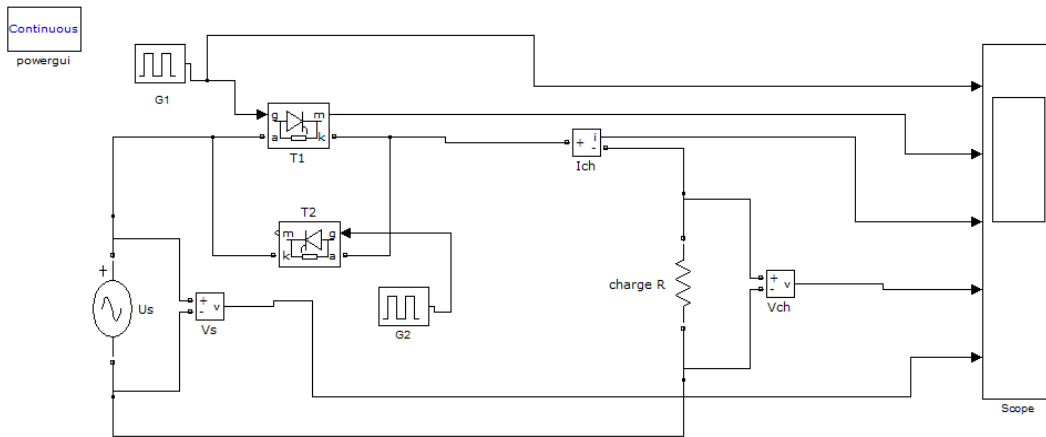
II.1 Gradateur Monophasé

II.1.1 charge R

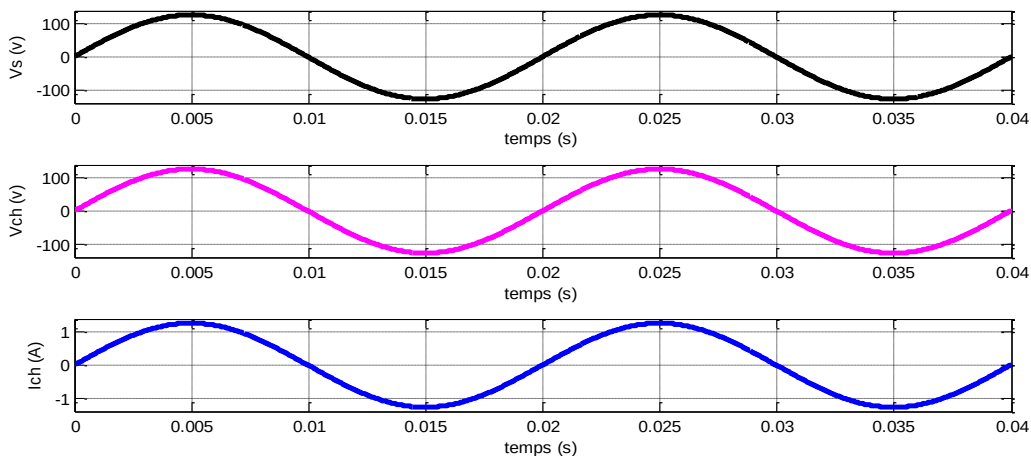
Résultat et Les courbes de simulation :

Données : $R=100\ \Omega$, $V_{eff_s}=90\ V$

- ❖ Pour $\alpha=0^\circ$ $V_{eff_{ch}}=92\ v$, $I_{eff_{ch}}=0.92\ A$, $I_{eff_{T1}}=0.62\ A$
- ❖ $V_{eff_{ch}}$ (La tension efficace de charge) $I_{eff_{ch}}$ (Le courant efficace de charge)
 $I_{eff_{T1}}$ (Le courant efficace du thyristor 1)



Fig(II.15) : schéma bloc de simulation d'un gradateur monophasé avec une charge résistive



Fig(II.16): La tension de source, la tension et le courant de charge

❖ Pour $\alpha = 30^\circ$

$$V_{eff_{ch}} = 91 \text{ v} , I_{eff_{ch}} = 0.91 \text{ A} , I_{eff_{T1}} = 0.61 \text{ A}$$

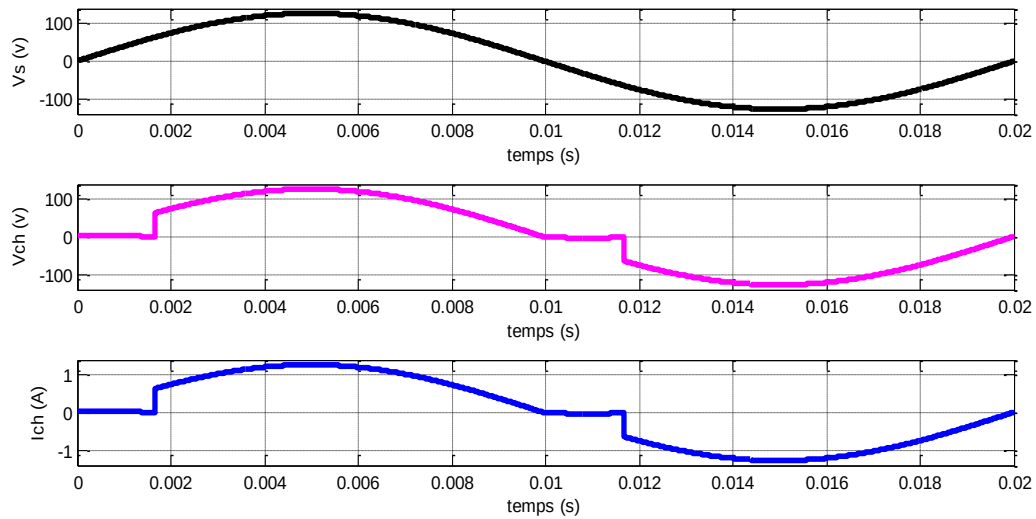


Fig (II.17): La tension de source, la tension et le courant de charge

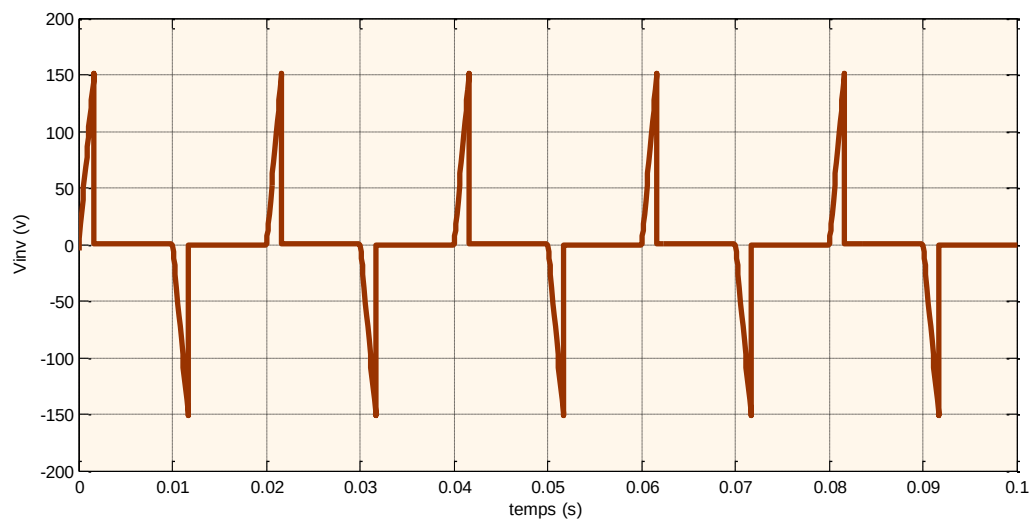
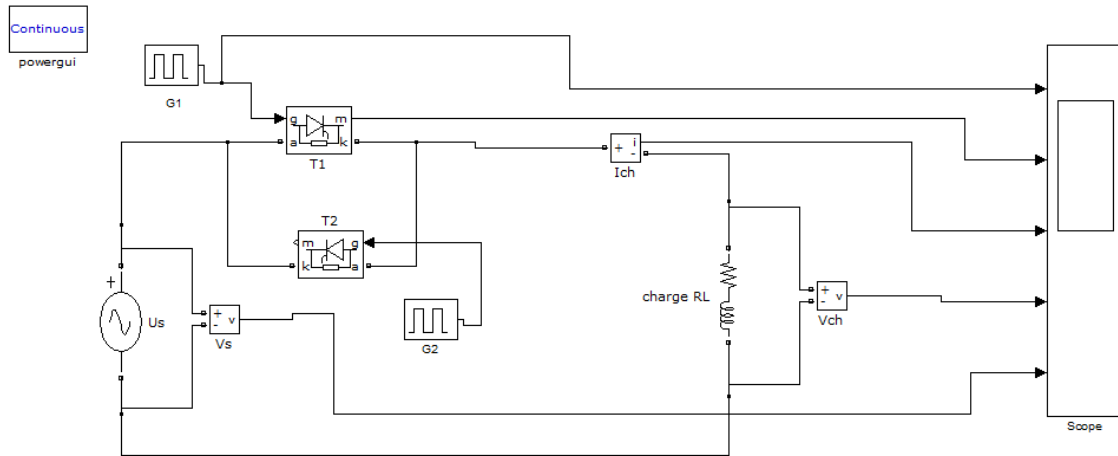


Fig (II.18) : La tension inverse

II.1.2 Gradateur Monophasé avec une charge RL

❖ Pour $\alpha = 30^\circ$

$$V_{eff_{ch}} = 92.02 \text{ v} , \quad I_{eff_{ch}} = 0.92 \text{ A} , \quad I_{eff_{T1}} = 0.63 \text{ A}$$



Fig(II.19) : schéma bloc de simulation d'un gradateur monophasé avec une charge résistive inductive

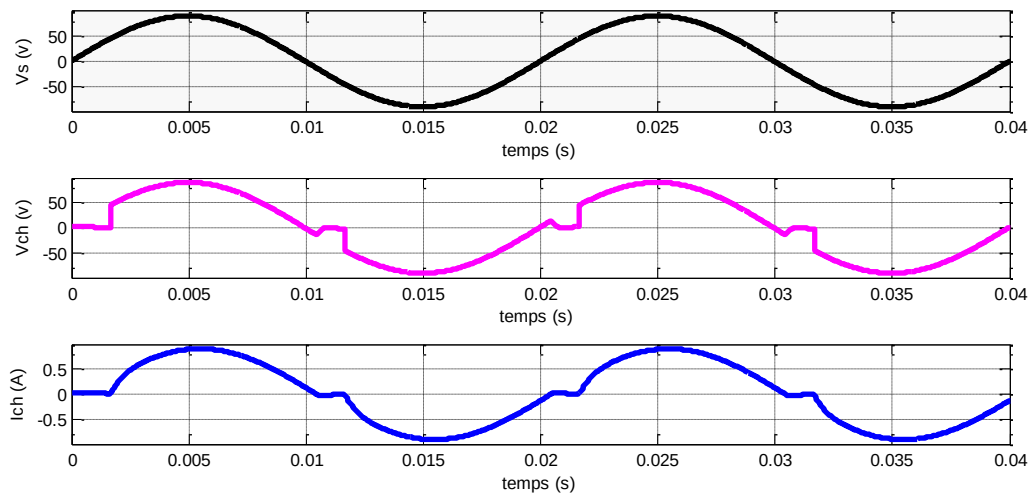


Fig (II.20): La tension de source, la tension et le courant de charge

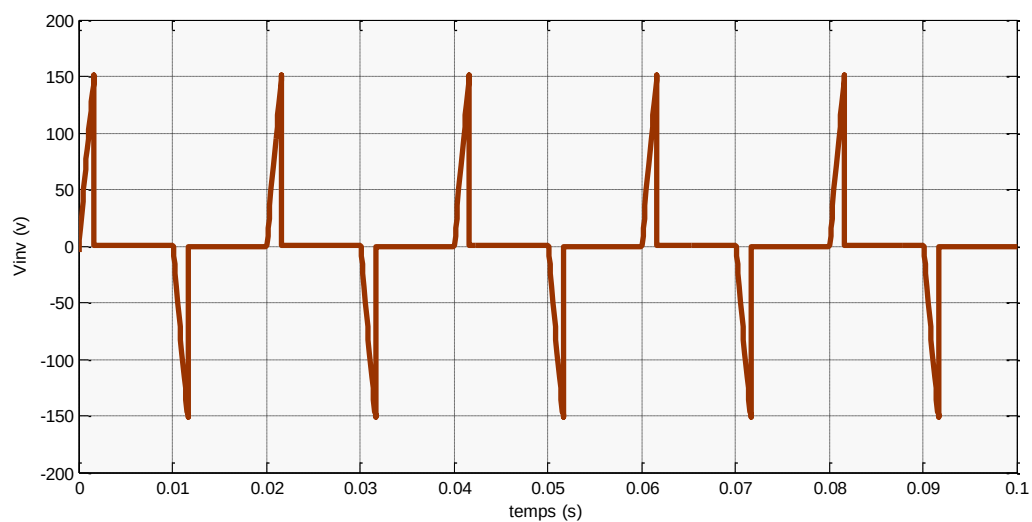


Fig (II.21): La tension inverse du thyristor

❖ Pour $\alpha = 60^\circ$

$$V_{ch} = 87.6 \text{ v} , I_{ch} = 0.88 \text{ A} , I_{T1} = 0.59 \text{ A}$$

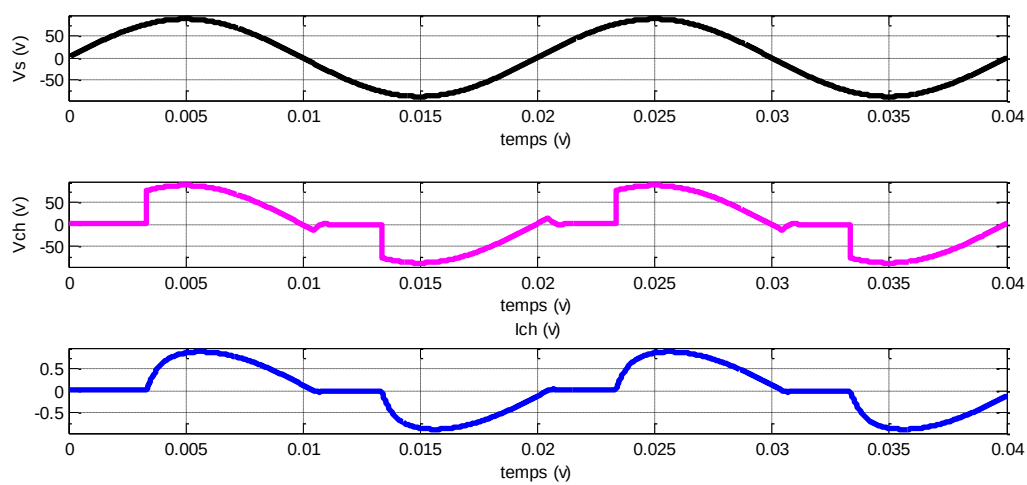


Fig (II.22): La tension de source, la tension et le courant de charge

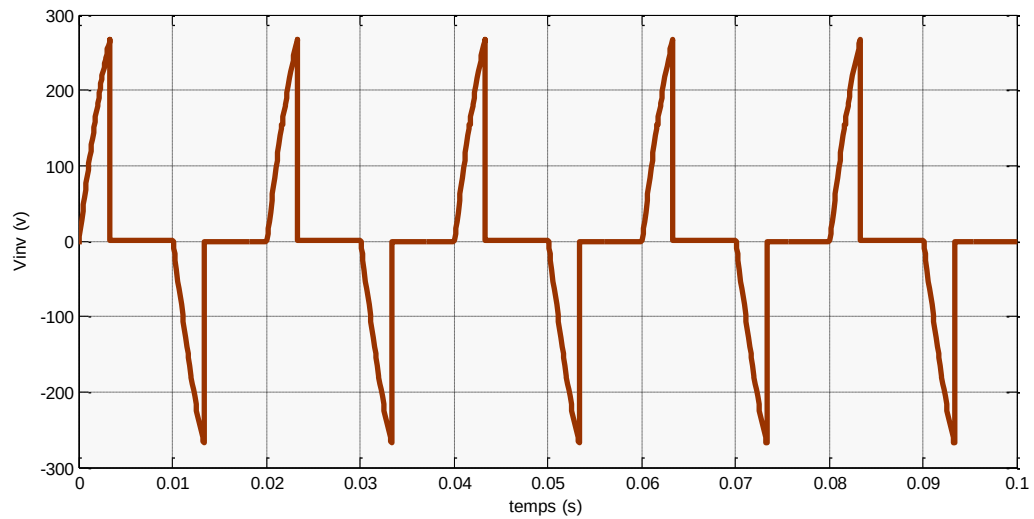


Fig (II.23): La tension inverse du thyristor

II.2 Simulation d'un gradateur triphasé avec charge résistive

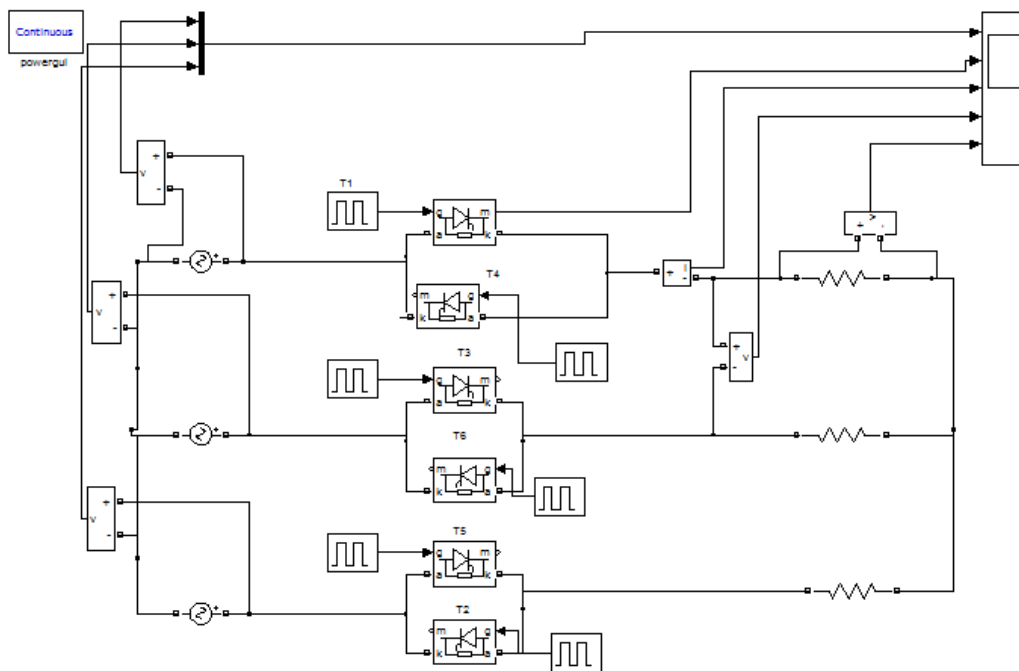


Fig (II.24) : schéma bloc de simulation d'un gradateur triphasé avec une charge résistive

❖ Pour $\alpha = 30^\circ$

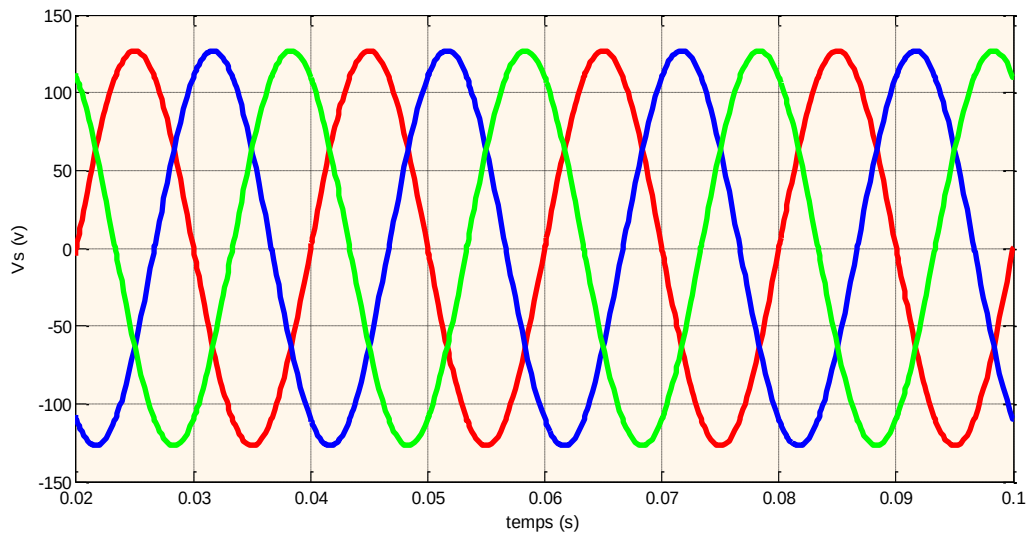
$$V_{eff_{ph1}} = 88 \text{ v} , I_{eff_{ph1}} = 0.89 \text{ A} , I_{eff_{T1}} = 0.61 \text{ A} , V_{com} = 147 \text{ v}$$

$V_{eff_{ph1}}$ (La tension efficace de la phase 1)

$I_{eff_{ph1}}$ (Le courant efficace de la phase 1)

$I_{eff_{T1}}$ (Le courant efficace du thyristor 1)

V_{com} (La tension composée)



Fig(II.25) : la tension de source

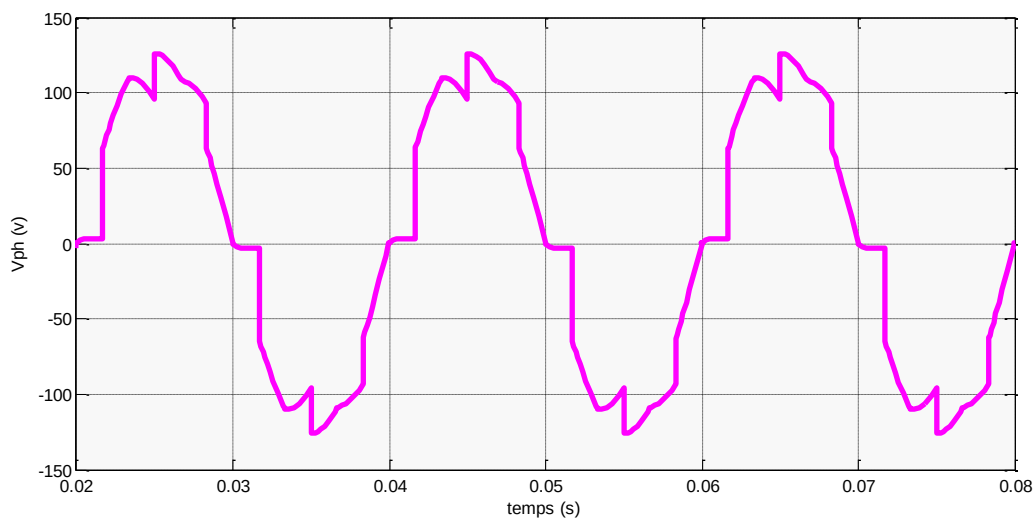


Fig (II.26) : la tension de la phase 1

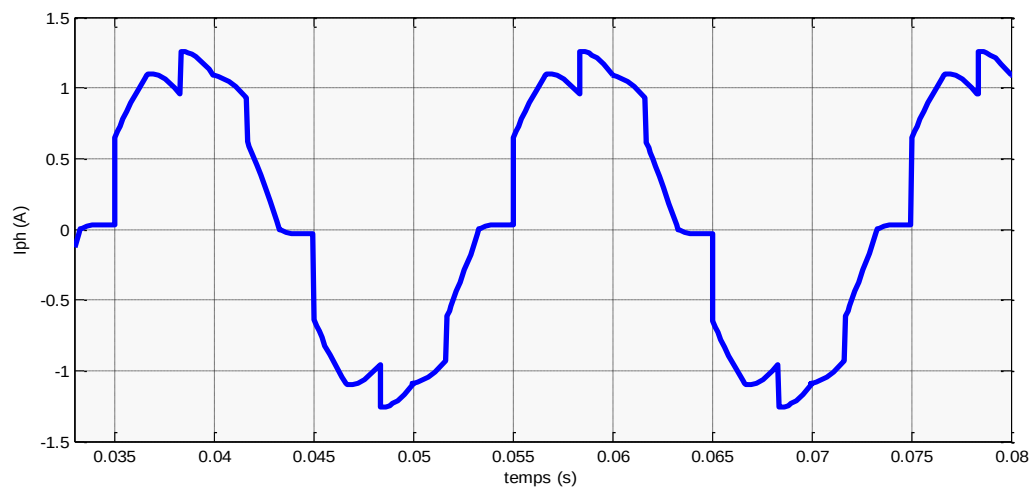


Fig (II.27) : le courant de la phase 1

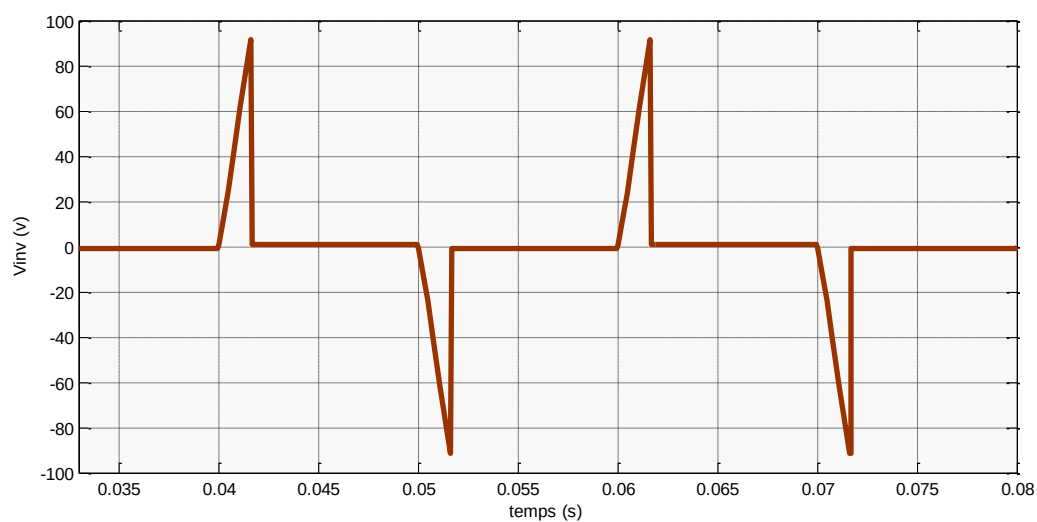


Fig (II.28): La tension inverse du thyristor

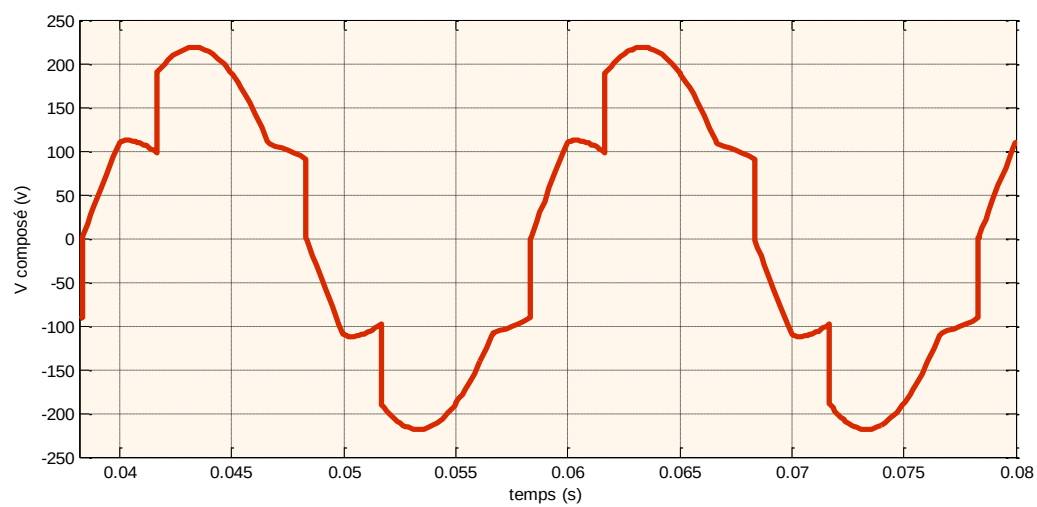


Fig (II.29) : la tension composée

❖ Pour $\alpha = 66^\circ$

$$V_{eff_{ph1}} = 68 \text{ v} , I_{eff_{ph1}} = 0.68 \text{ A} , I_{eff_{T1}} = 0.55 \text{ A} , V_{com} = 127 \text{ v}$$

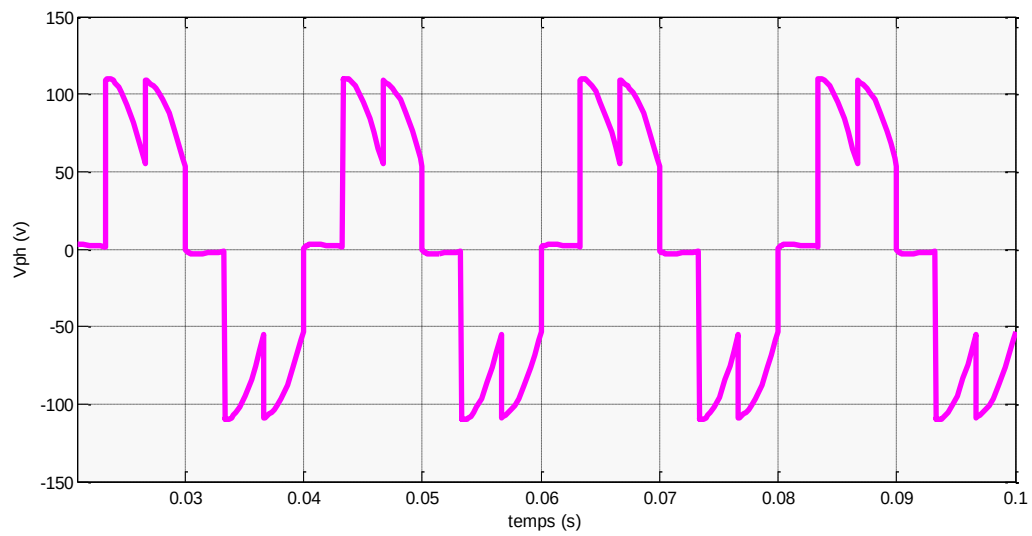


Fig (II.30) : la tension de la phase 1

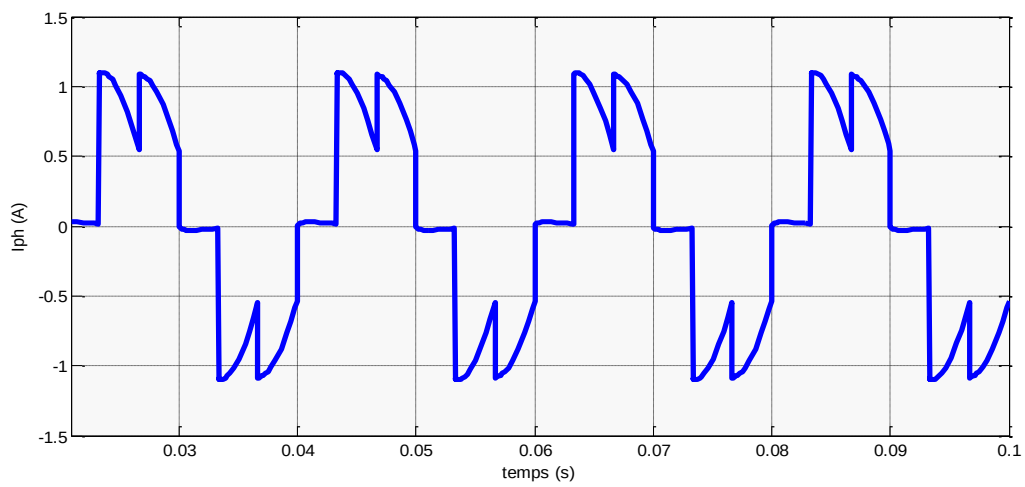


Fig (II.31) : le courant de la phase1

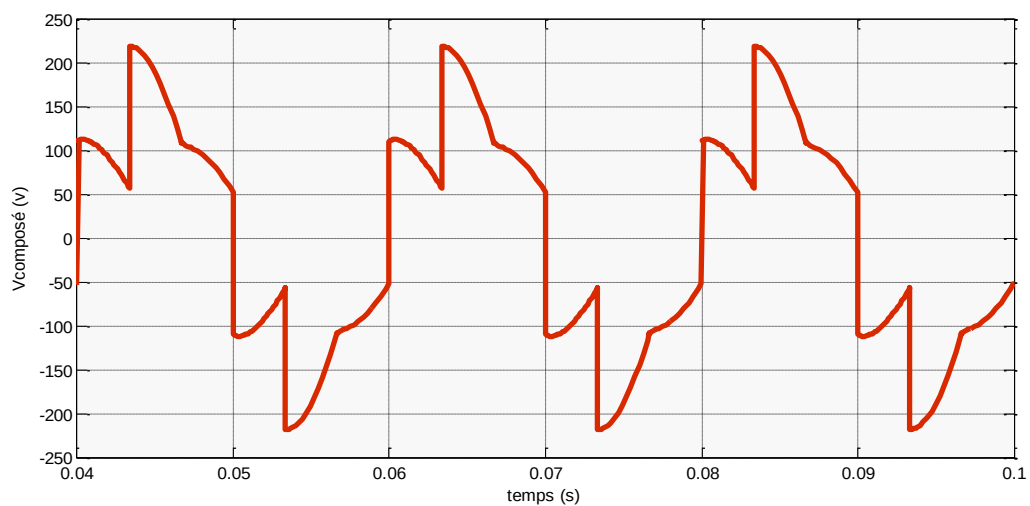


Fig (II.32) : La tension composée

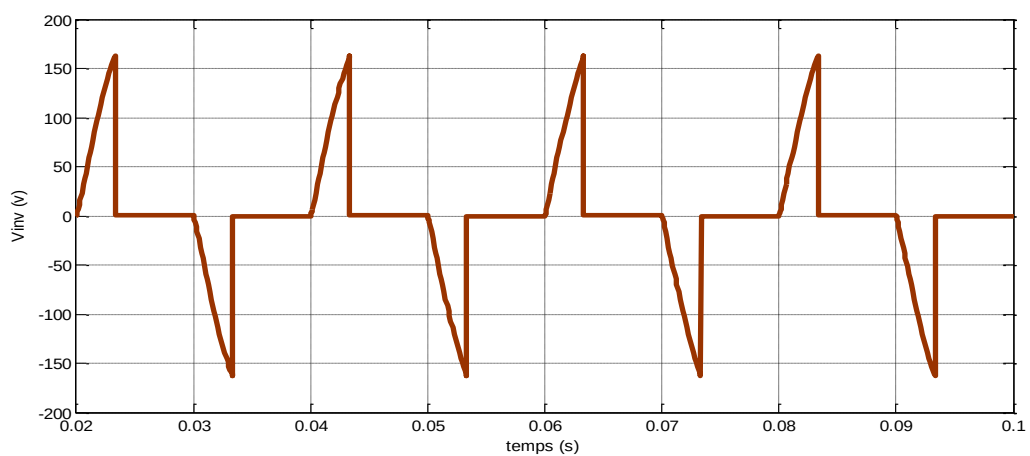


Fig (II.33): La tension inverse du thyristor

❖ Pour $\alpha = 94^\circ$

$$V_{eff_{ph1}} = 43 \text{ v} , I_{eff_{ph1}} = 0.43 \text{ A} , I_{eff_{T1}} = 0.35 \text{ A} , V_{com} = 80 \text{ v}$$

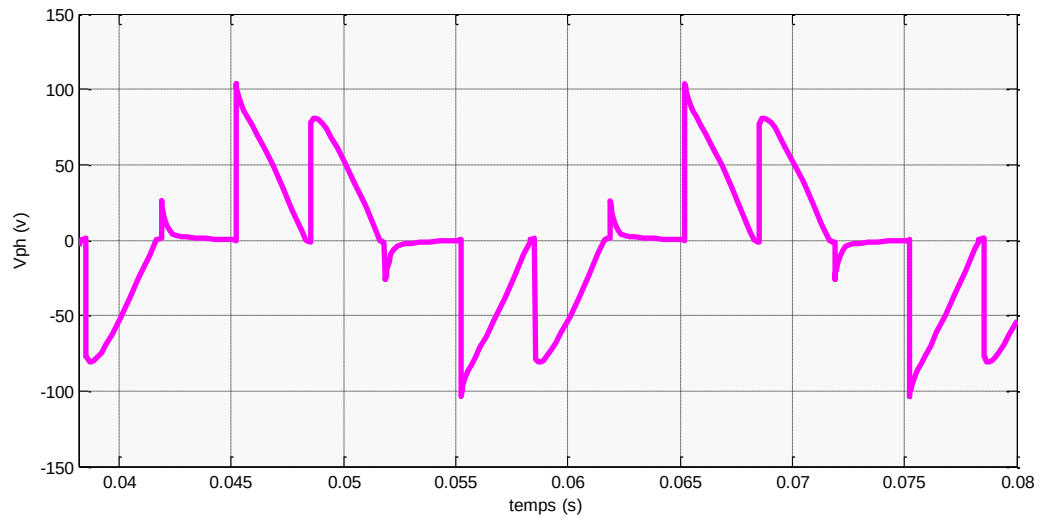


Fig (II.34): La tension de la phase 1

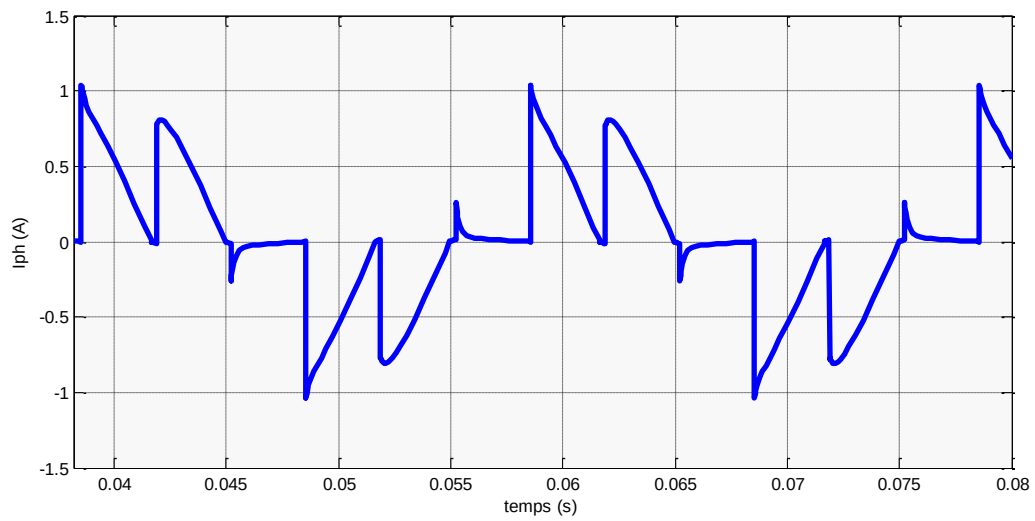


Fig (II.35): le courant de la phase 1

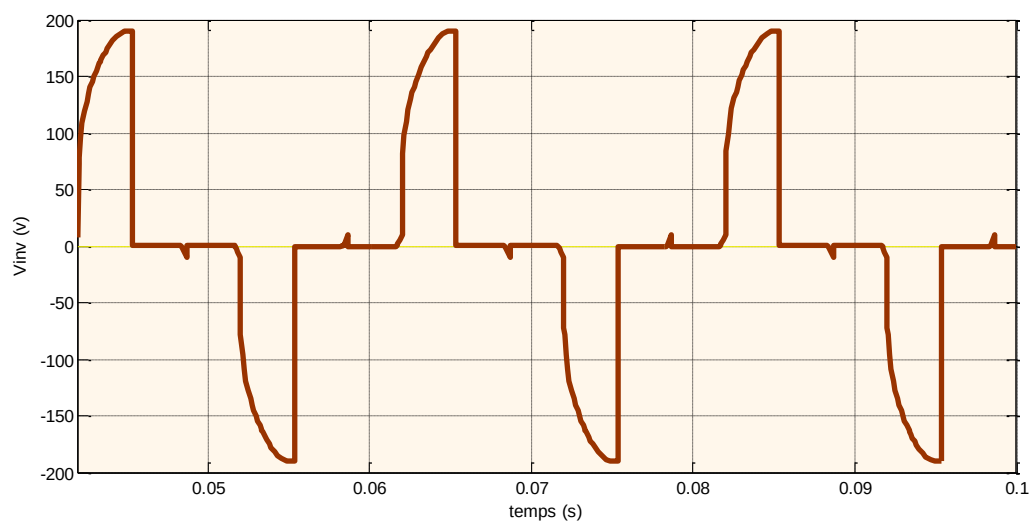


Fig (II.36): La tension inverse du thyristor

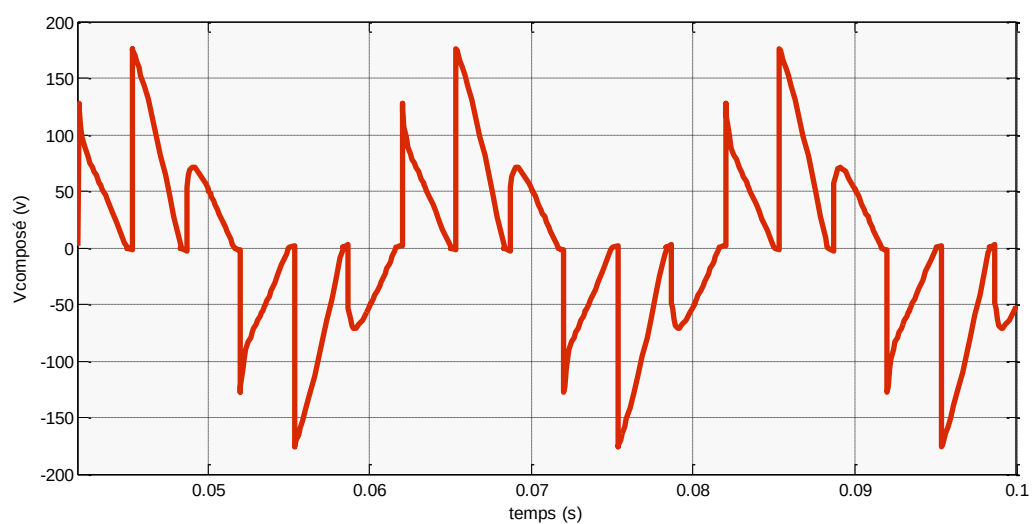


Fig (II.37): La tension composée

Pour valider les résultats obtenus par simulation, des tests expérimentaux ont été effectués sur un circuit représentant un gradateur triphasé commandé débitant sur une charge triphasée purement résistive, le schéma de la manipe est présenté sur la Fig.33. [2]

III.1 LES MONTAGES DE L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE:

Le montage est constitué de quatre circuits de base, suivante :

III.1.1 Circuit de commande :

Il comporte les éléments suivants :

- Le dispositif nécessaire à la commande des circuits de puissance
- La source d'alimentation de faible puissance avec les éléments de protection
- Un circuit de puissance du gradateur triphasé commandé
- Un circuit de charge (résistance, inductance, et capacité)
- Appareillage de mesure (voltmètre et ampèremètre)
- Carte d'interface pour connecter la manipe avec le PC
- Un PC pour visualiser les grandeurs de sortie du gradateur

III.1.2 Circuit de puissance :

Il comporte l'appareillage nécessaire au fonctionnement des récepteurs de puissance. Suivant un automate bien défini ; On trouve:

Une source de puissance (généralement réseau triphasé).

- Un appareil d'isolement (sectionneur).
- Un appareil de protection (fusible, relais thermique).
- Les contacts de puissance.
- Des récepteurs de puissance (R, L, RL).

III.1.3 Circuit d'amplification

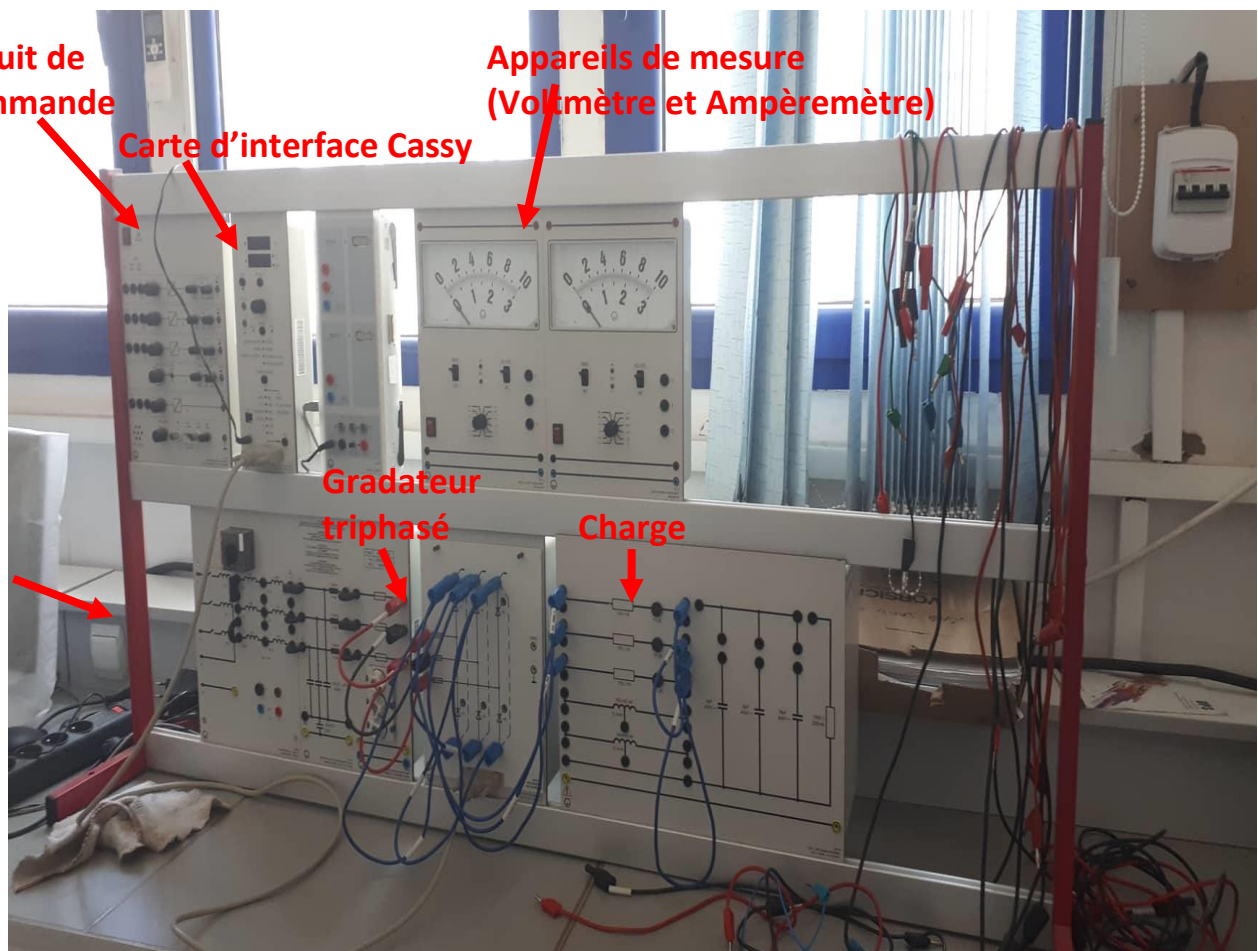
Ce bloc est utilisé pour amplifier le signal généré par le bloc de commande et transmettre vers la base ou la gâchette des interrupteurs électroniques.

III.1.4 Circuit de protection

Ce circuit assure l'isolation galvanique (opto-coupleur-transformateur d'impulsion) entre la partie puissance et la partie commande (faible puissance)

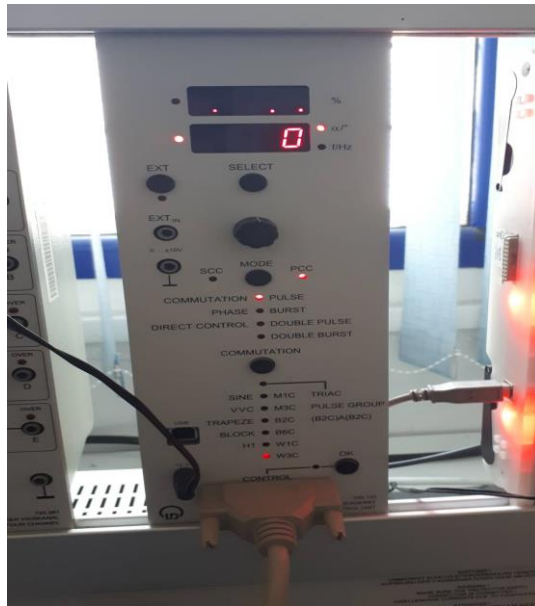
III.2 BANC D'ESSAI ET DIFFERENTS DISPOSITIFS DE MESURE

Le banc d'essai est illustré sur la Fig (III.38)



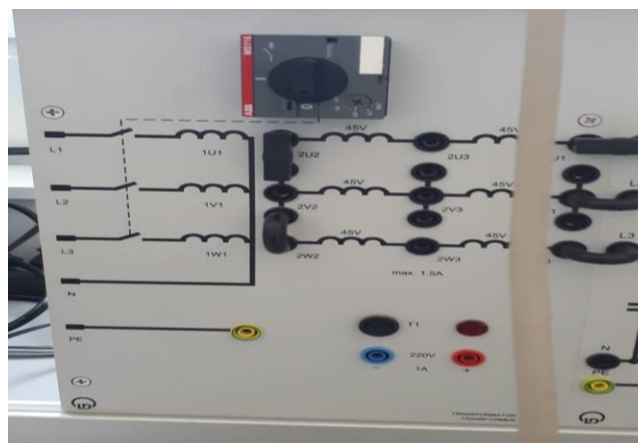
FIG(II.38) : Le banc d'essais

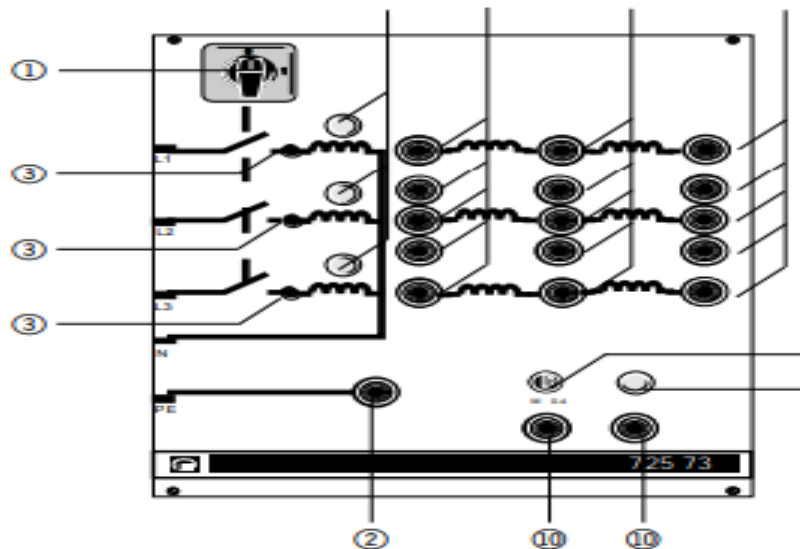
III.2.1 Unité (circuit) de commande du gradateur



- 1- affichage de la tension d'entrée et la fréquence
- 2- affichage pour le limiteur d'angle de contrôle
- 3- Sélection manuelle de la fréquence et de l'angle d'amorçage
- 4- sélection manuelle de la forme d'impulsion
- 5- sélection manuelle de la topologie du pont
- 6- lads pour la topologie du pont
- 7- sélection manuelle du signal externe
- 8- entrée pour le contrôle du signal externe ($\pm 10 V$)
- 9- Connecteur femelle 25 pôles

III.2.2 Description Transformateur 45/90 0,3 kW



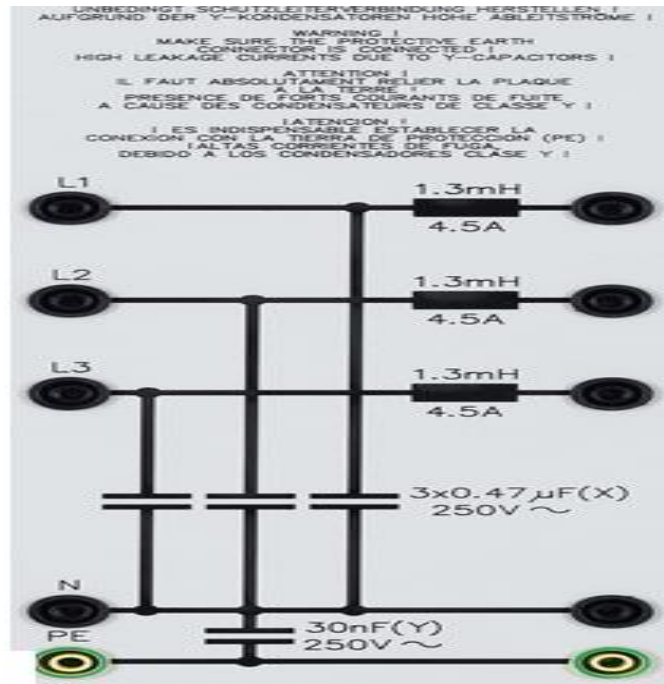


- 1-Interrupteur principal
- 2- Douille de sécurité (PE) pour conducteur de protection
- 3- Disjoncteur d'application 0,8 A pour tension secteur L1 / L2 / L3
- 4- Témoins de vérification de la tension secteur de L1 / L2 / L3
- 5- Prises de sécurité, (2U1, 2V1, 2W1) pour le taraudage de la tension de sortie CA.
- 6 -Prises de sécurité, (2U2, 2V2, 2W2) pour exploiter la tension de sortie CA
- 7-Prises de sécurité, (2U3, 2V3, 2W3) pour exploiter la tension de sortie CA.
- 8-Fusible principal T 1,0 pour la tension d'excitation
- 9- Lampe de contrôle pour surveiller la tension d'excitation
- 10-Prise de sécurité, (=) pour le taraudage de la tension d'excitation pour les machines (DC) excitées séparément.

III.2.3 FILTRE A CONTROLE DE BRUIT DE PHASE 3×4.5 A

DESCRIPTION

Filtre antiparasitage triphasé à un étage avec amortissement élevé en mode commun et en mode normal, particulièrement adapté aux expériences en électronique de puissance avec circuits convertisseurs à commutation automatique et à commutation de ligne. Le filtre est connecté entre l'alimentation triphasée et le montage de l'expérience et réduit la sortie des signaux d'interférence liés à la ligne dans le réseau basse tension conformément à la norme en 5008-1.



III.2.4 Fusible triple action super rapide



Les fusibles à action rapide RK1 de la série KLNR / KLSR ont été le premier type de fusible limiteur de courant développé. Leur conception à maillons en argent à élément unique leur permet de fournir une protection contre les surcharges et les courts-circuits à action rapide. Lorsqu'ils sont utilisés pour protéger les charges inductives telles que les moteurs, les solénoïdes et les transformateurs, les fusibles de la série KLNR / KLSR doivent être largement surdimensionnés pour éviter d'ouvrir les fusibles sur des courants d'appel inoffensifs. Dans de telles applications, les fusibles de la série KLNR / KLSR peuvent uniquement assurer une protection contre les courts-circuits.

Applications

*Résistances

*Circuits d'éclairage

* Charges non inductives

Les centres de charge et les panneaux de distribution des disjoncteurs à boîtier moulé ont des capacités de coupure accrues lorsqu'ils sont «classés en série» avec les fusibles à action rapide Littelfuse KLNK / KLSR Classe RK1. Reportez-vous à la documentation du fabricant du tableau de distribution pour obtenir la liste des fusibles et des panneaux de distribution homologués UL. Des indices de série allant jusqu'à 200 000 ampères sont disponibles.

III.3 Tests expérimentaux

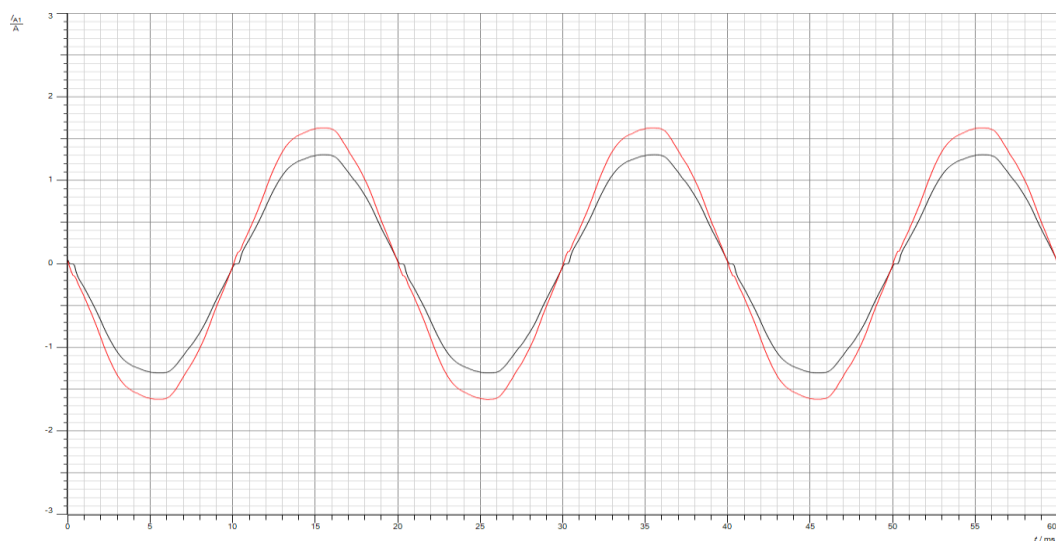
Pour valider les résultats obtenus par simulation, des tests expérimentaux avec différents angles d'amorçages ont été effectués sur le banc d'essais présenté sur la Fig.33.

III.3.1 Gradateur monophasé

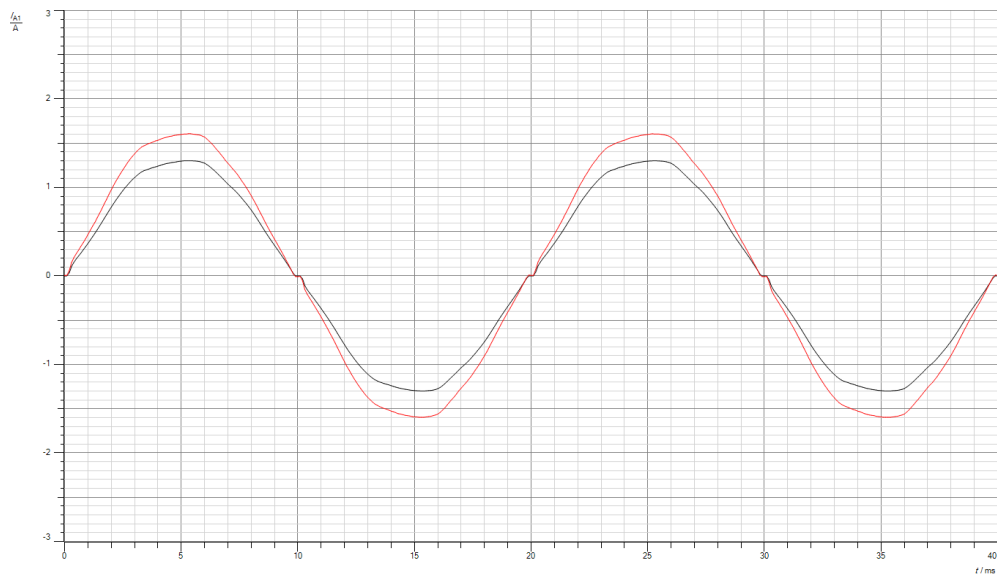
III.3.1.1 Charge resistive $R=100\ \Omega$ $V_{effs}=90\text{ v}$

❖ Pour $\alpha=0^\circ$

$$V_{eff_{ch}}=102\text{ v} \quad I_{eff_{ch}}=0.9\text{ A}$$



Fig(III.39) : La tension et le courant de source



(III.40) : la tension et le courant de charge

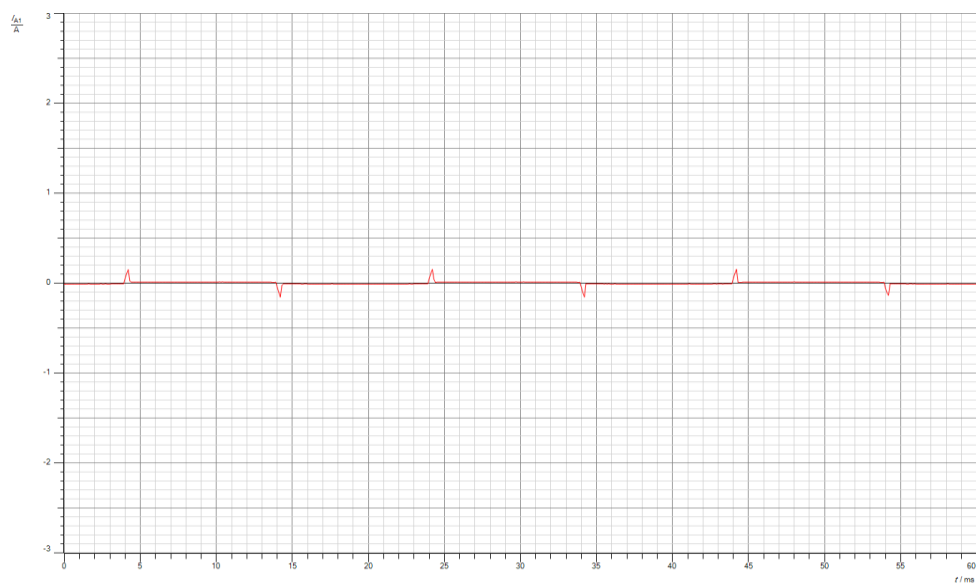


Fig (III.41) : la tension inverse du thyristor T1

❖ Pour $\alpha=30^\circ$

$$V_{eff_{ch}} = 95 \text{ v} \quad I_{eff_{ch}} = 0.8 \text{ A}$$

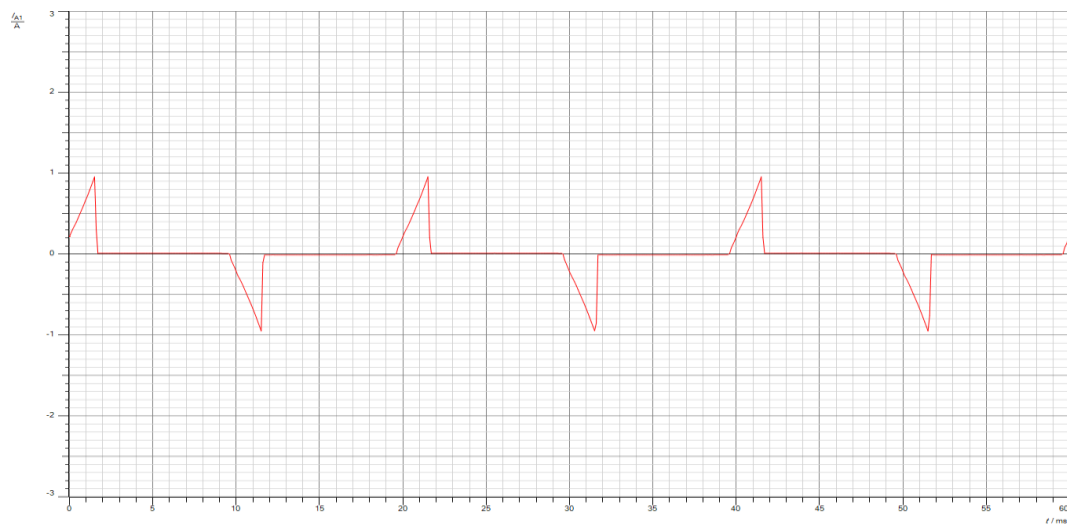


Fig (III.42) : la tension inverse du thyristor T1

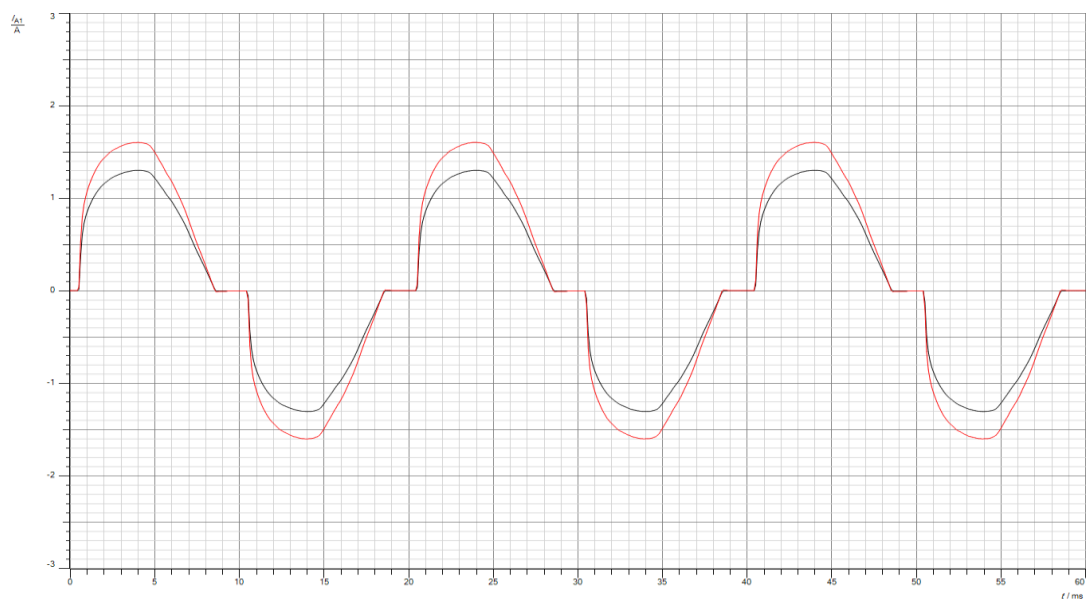


Fig (III.43) : la tension et le courant de charge

III.3.1.2 gradateur monophasé avec une charge RL

$R=100\ \Omega$ $L=50\text{mH}$ $V_{\text{effs}}=90\text{ v}$

❖ Pour $\alpha=30^\circ$

$V_{\text{eff}ch}=95\text{ v}$ $V_{\text{eff}ch}=0.85\text{ A}$ $I_{T1}=0.6\text{ A}$

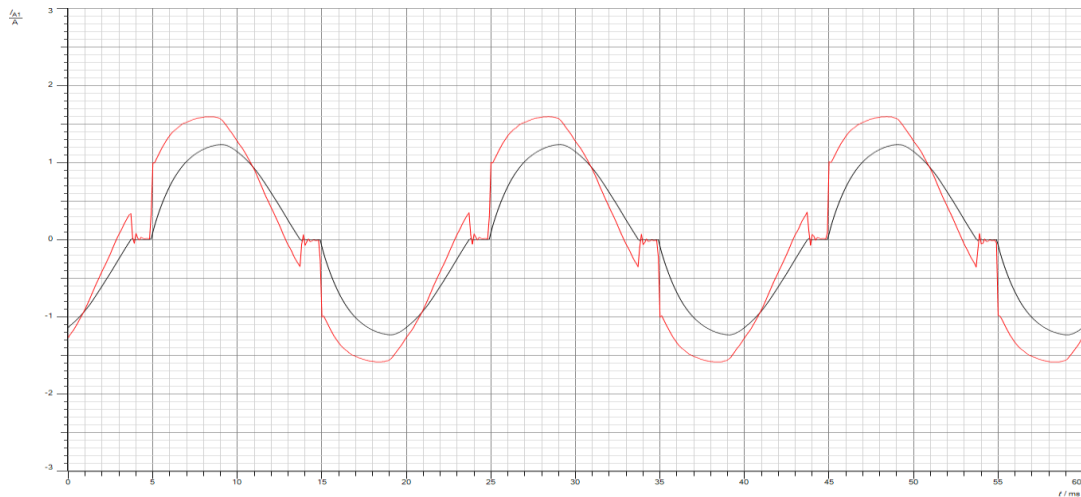


Fig (III.44) : la tension et le courant de charge

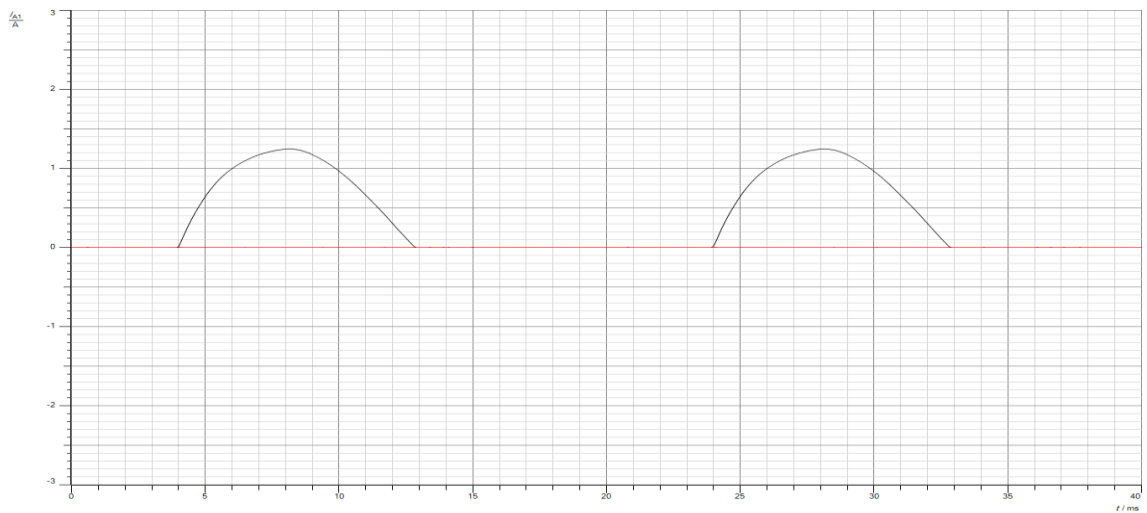


Fig (III.45) : la tension inverse du thyristor T1

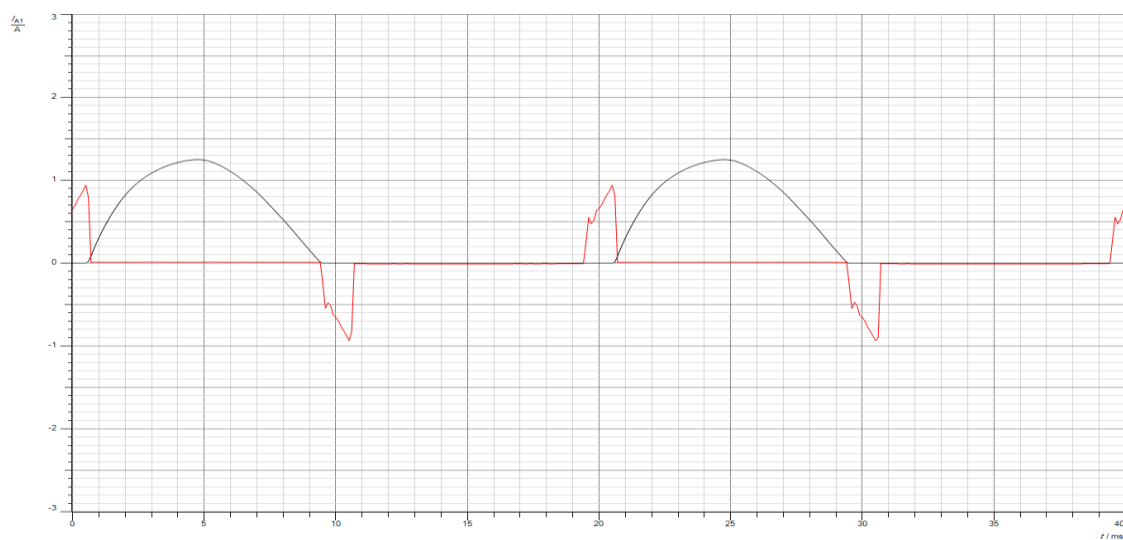
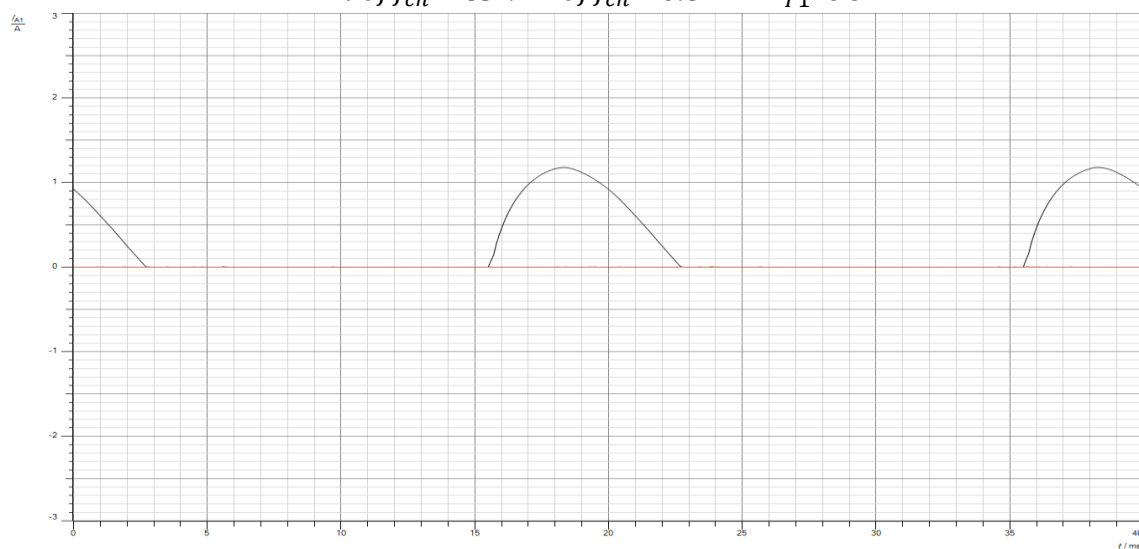


Fig (III.46) : la tension inverse et le courant du thyristor T1

❖ Pour $\alpha=60^\circ$

$$V_{eff_{ch}} = 89 \text{ v} \quad I_{eff_{ch}} = 0.87 \text{ A} \quad I_{T1} = 0.5 \text{ A}$$



Fig(III.47) : la tension inverse du thyristor

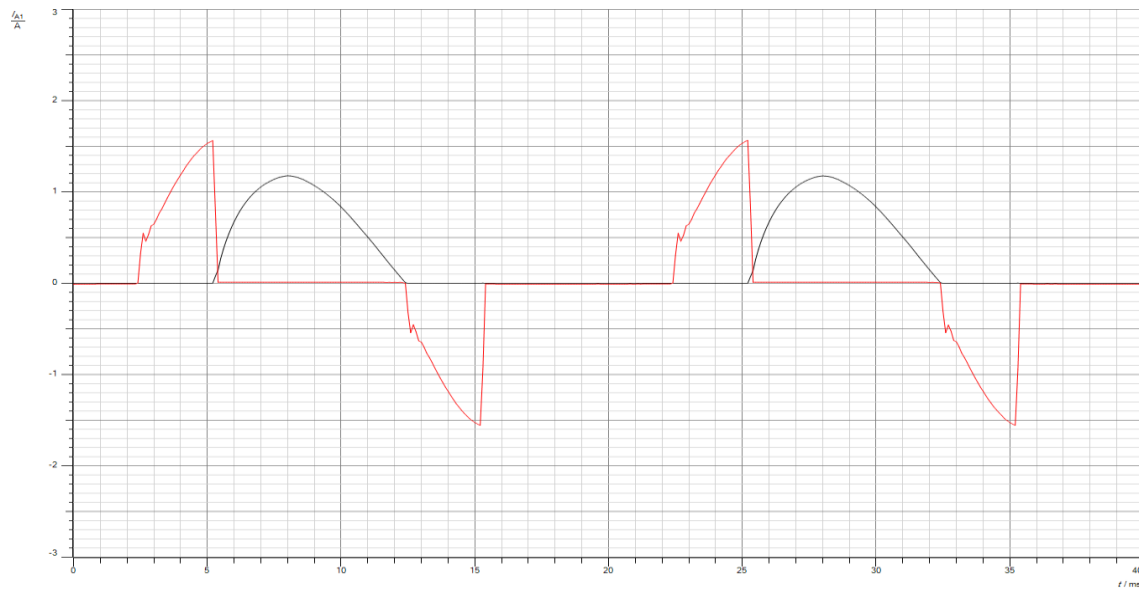


Fig (III.48) : la tension inverse et le courant du thyristor T1

III.3.2 Gradateur triphasé charge résistive $R=100\ \Omega$

❖ Pour $\alpha=30^\circ$

$$V_{eff_{ph1}} = 95\text{V} , \quad I_{eff_{ph1}} = 0.95\text{ A} , \quad V_{com} = 160\text{ V}$$

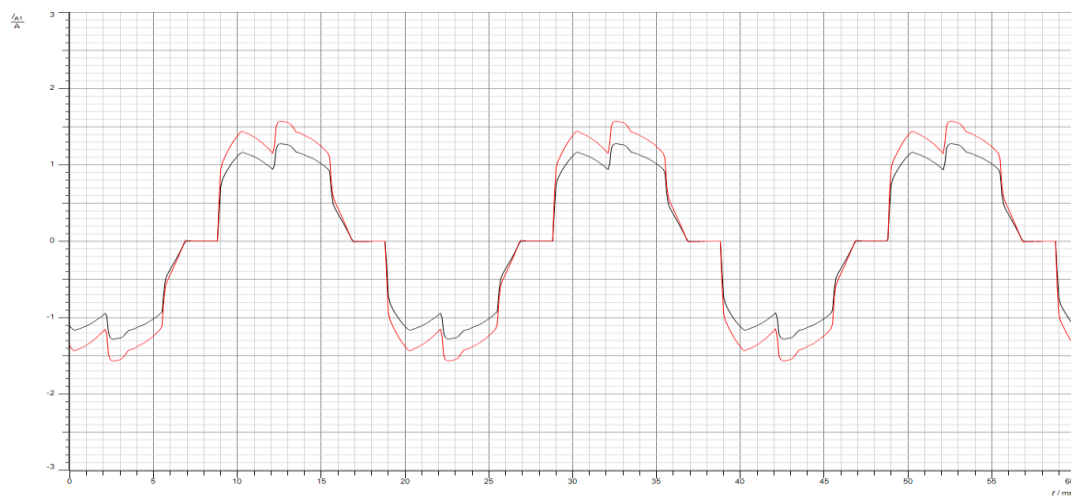
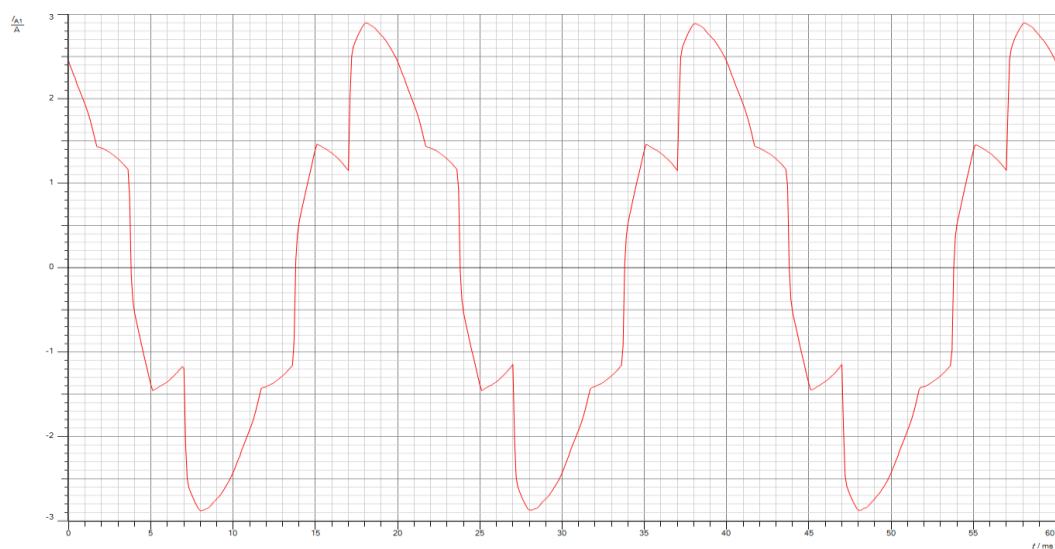


Fig (III.49) : La tension simple de la phase 1 et le courant



Fig(III.50) : La tension composée

❖ Pour $\alpha=66^\circ$

$$V_{eff_{ph1}}=70\text{v} \quad I_{eff_{ph1}}=0.7 \text{ A} \quad , \quad V_{com}=125 \text{ V}$$

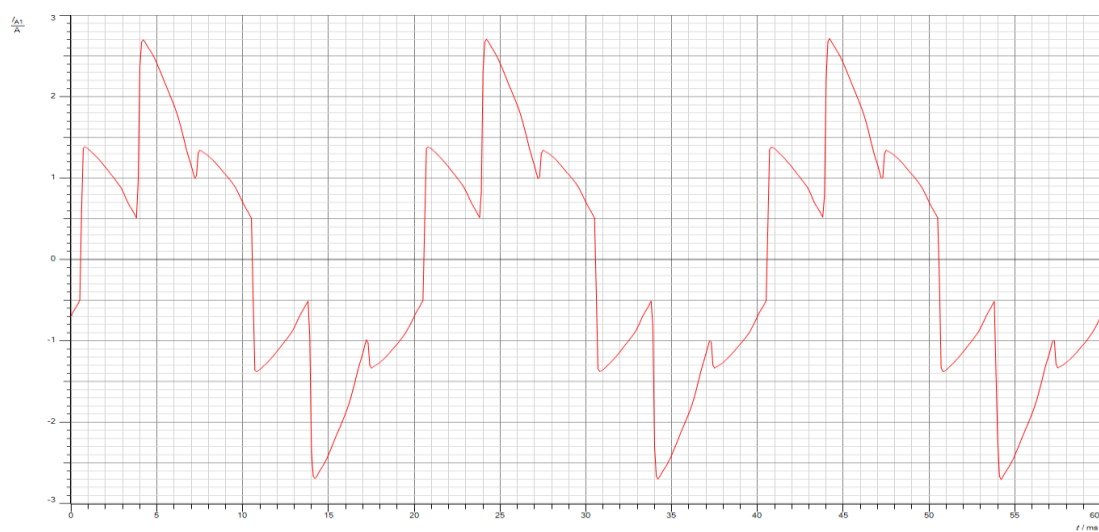


Fig (III.51) : La tension composée

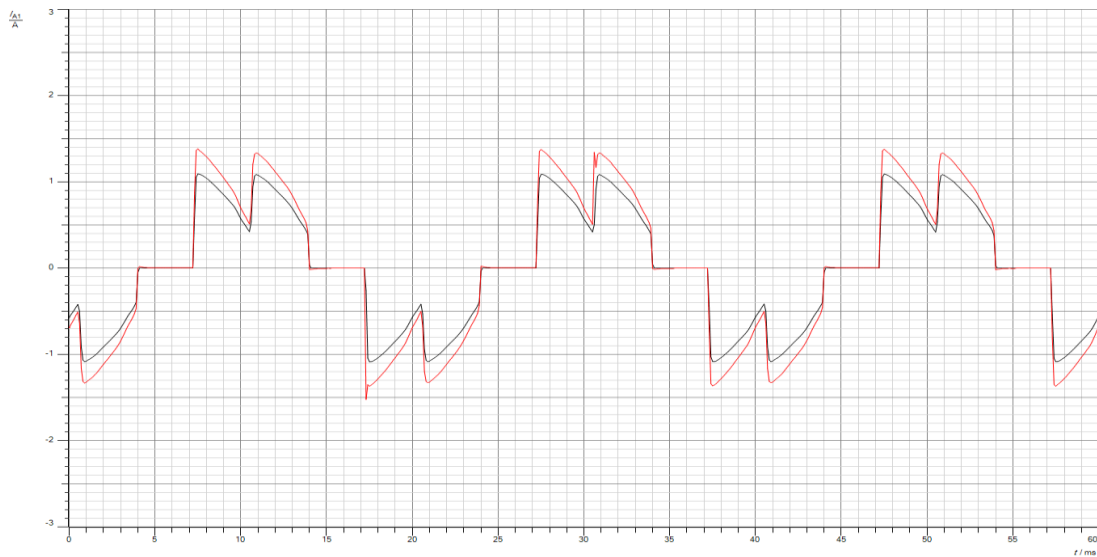


Fig (III.52) : La tension simple de la phase 1 et le courant

❖ Pour $\alpha = 94^\circ$

$V_{ph1} = 45 \text{ V}$, $I_{ph1} = 0.4 \text{ A}$, $V_{com} = 75 \text{ V}$

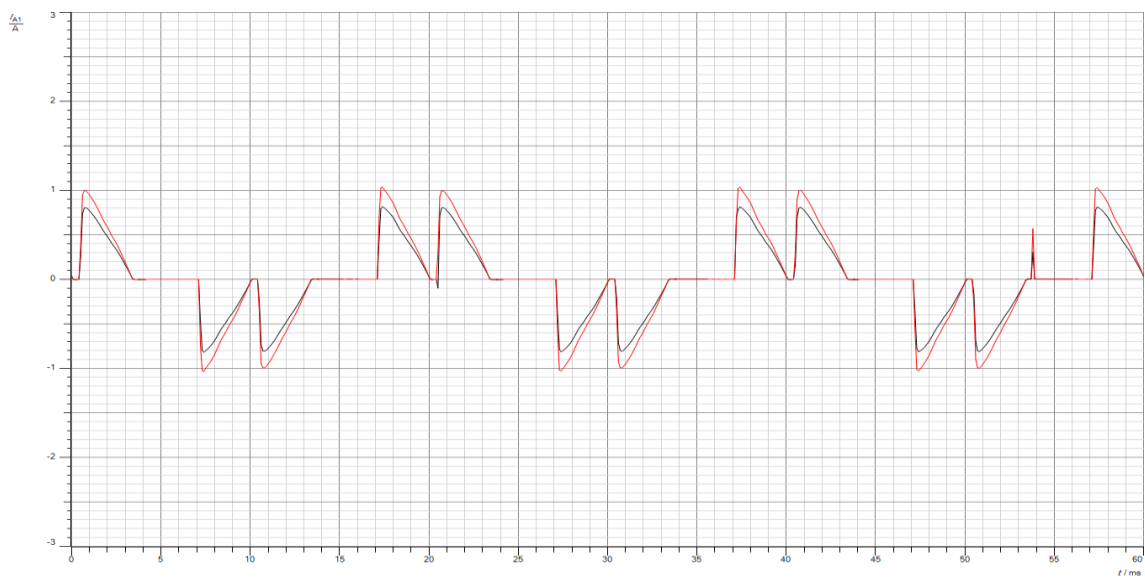


Fig (III.53) : La tension simple de la phase 1 et le courant

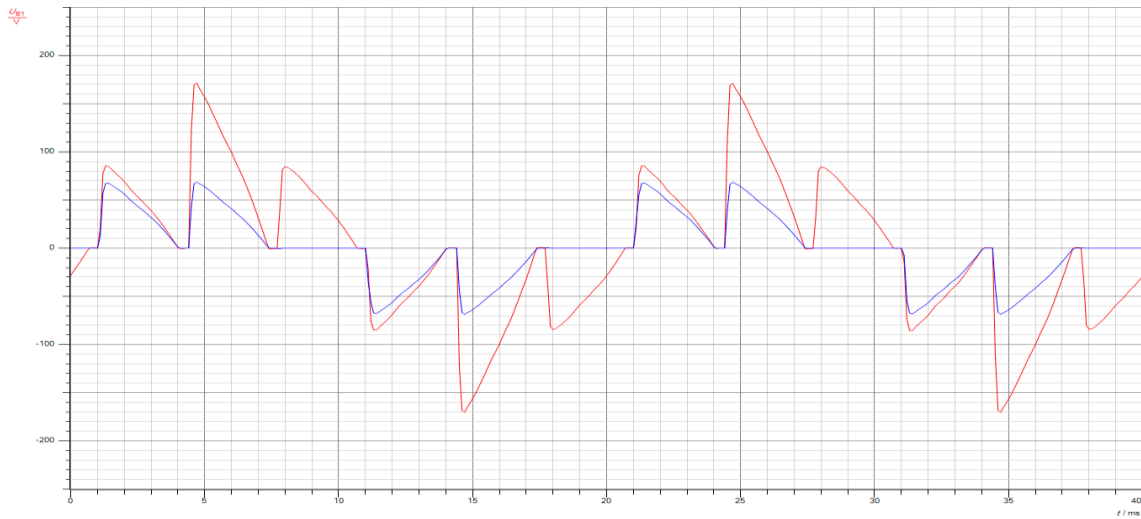


Fig (III.54) : La tension composée et le courant de la phase 1

CHAPITRE IV

Comparaison des résultats théoriques, de simulation et expérimentaux

IV.1 Calcul Théorique (calcul de la tension et du courant efficace):

Le calcul théorique est réalisé en prenant en considération les paramètres suivants :

Données : $R=100\ \Omega$ $V_s=90\text{ V}$

IV.1.1 Gradateur monophasé charge R :

➤ La tension efficace de la charge :

$$V_{ch} = V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

➤ Le courant efficace de la charge

$$I_{ch} = \frac{V_{ch}}{R}$$

❖ Pour $\alpha = 0^\circ$

$$V_{ch} = V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$V_{ch} = 90 \left[\frac{1}{\pi} \left(\pi - 0 + \frac{\sin 0}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$V_{ch} = 90\text{ V}$$

$$I_{ch} = \frac{V_{ch}}{R}$$

$$I_{ch} = \frac{90}{100} = 0.9\text{ A}$$

❖ Pour $\alpha = 30^\circ$

$$V_{ch} = V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$V_{ch} = 90 \left[\frac{1}{\pi} \left(\pi - 30 + \frac{\sin 60}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$V_{ch} = 88\text{ V}$$

$$I_{ch} = \frac{V_{ch}}{R}$$

$$I_{ch} = \frac{88}{100} = 0.88\text{ A}$$

IV.1.1.2 Gradateur triphasé charge R :

➤ La tension efficace de la charge :

$$\text{Pour } 0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$$

$$V_{an} = \sqrt{6}V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right) \right]^{1/2}$$

Pour $60^\circ \leq \alpha < 90^\circ$

$$V_{an} = \sqrt{6}V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{12} + \frac{3 \sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{1/2}$$

Pour $90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$

$$V_{an} = \sqrt{6}V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{5\pi}{24} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{1/2}$$

➤ Le courant efficace de la charge :

$$I_a = V_{an} / R$$

❖ **Pour $\alpha = 30^\circ$**

$$V_{an} = \sqrt{6}V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right) \right]^{1/2}$$

$$V_{an} = 77,73 \text{ V}, \quad I_a = 0,7773 \text{ A}$$

❖ **Pour $\alpha = 66^\circ$**

$$V_{an} = \sqrt{6}V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{12} + \frac{3 \sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{1/2}$$

$$V_{an} = 64.71 \text{ V}, \quad I_a = 0,64 \text{ A}$$

❖ **Pour $\alpha = 94^\circ$**

$$V_{an} = \sqrt{6}V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{5\pi}{24} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{1/2}$$

$$V_{an} = 51.56 \text{ V}, \quad I_a = 0,51 \text{ A}$$

IV.2 Tableaux de comparaison des résultats théoriques, de simulation et expérimentaux

* IV.2 .1 Gradateur monophasé avec charge résistive

❖ **Pour $\alpha = 0^\circ$**

Les résultats obtenus pour $\alpha = 0^\circ$ sont résumés dans le tableau ci-dessous :

$\alpha=0^\circ$	théoriques	simulations	expérimentaux
V_{ch} (V)	90	92	102
I_{ch} (A)	0.9	0,92	0.9

On observe une petite différent entre Les résultats obtenus par simulation et testes expérimentaux les résultats de calcul. Les erreurs sont due principalement aux erreurs de lecture et la precision des appareils de mesures. Donc Les résultats des simulations et testes expérimentaux concordance avec les résultats théoriques (calcul)

❖ **Pour $\alpha = 30^\circ$**

Les resultats obtenus pour $\alpha = 30^\circ$ sont résumés dans le tableau ci-dessous :

$\alpha = 30^\circ$	théoriques	simulations	expérimentaux
V_{ch} (V)	88	91	95
I_{ch} (A)	0.89	0 ,91	0.8

On note presque la même différence dans les résultats comme expliquer précédemment cela est dû aux erreurs de lectures sur les appareils de mesures .Donc on peut dire que les résultats de simulation et expérimentaux sont en concordance avec les résultats théoriques

***IV.2 .2 Gradateur triphasé commandé avec charge résistive**

❖ **Pour $\alpha = 30^\circ$**

Les resultats obtenus pour $\alpha = 30^\circ$ sont résumés dans le tableau ci-dessous :

$\alpha = 30^\circ$	théoriques	simulations	expérimentaux
V_{ch} (V)	77.73	88	95
I_{ch} (A)	0.77	0 ,89	0.95

On observe une petite différent entre Les résultats obtenus par simulation et testes expérimentaux les résultats de calcul. Les erreurs sont dus principalement aux erreurs de lecture et la precision des appareils de mesures. Donc Les résultats des simulations et testes expérimentaux concordent avec les résultats théoriques (calcul)

❖ **Pour $\alpha = 66^\circ$**

Les resultats obtenus pour $\alpha = 66^\circ$ sont résumés dans le tableau ci-dessous :

$\alpha = 66^\circ$	théoriques	simulations	expérimentaux
V_{ch} (V)	64.71	68	70
I_{ch} (A)	0.64	0,68	0.7

On note presque la même différence dans les résultats comme expliquer précédemment cela est dû aux erreurs de lectures sur les appareils de mesures .Donc on peut dire que les résultats de simulation et expérimentaux sont en concordance avec les résultats théoriques

❖ **Pour $\alpha = 94^\circ$**

Les resultats obtenus pour $\alpha = 94^\circ$ sont résumés dans le tableau ci-dessous :

$\alpha = 94^\circ$	théoriques	simulations	expérimentaux
V_{ch} (V)	51.56	43	45
I_{ch} (A)	0.51	0,43	0.4

On remarque presque la même différence dans les résultats comme expliquer précédemment cela est dû aux erreurs de lectures sur les appareils de mesures .Donc on peut dire que les résultats de simulation et expérimentaux sont en concordance avec les résultats théoriques

Conclusion

Les résultats obtenus par simulation et testes expérimentaux concordent avec les résultats de calcul. Les erreurs sont dus principalement aux erreurs de lecture et la precision des appareils de mesures.

Conclusion general

Le premier chapitre décrit la structure et le montage d'un gradateur monophasé et triphasé et les principes de fonctionnements pour différentes charges, les types et domaine d'utilisations des gradateurs, et nous avons étudié théories de calcul des gradateurs avec différentes charges et différent angle d'amorçages.

Le deuxième chapitre est réservé a l'étude par simulation des gradateurs triphasés avec des récepteurs résistifs et résistif inductif. La simulation a été effectuée dans l'environnement Simulink / MATLAB. Les ondes de courant et de tension pour différent angle d'amorçages sont mesurées.

Le troisième chapitre : l'étude théorique est validée par simulation et par des essais expérimentaux effectuée sur des gradateurs (monophasé et triphasé)

La quatrième chapitre : Les résultats obtenus par calculs théorique, par simulation et par testes expérimentaux sont comparés et montrent qu'ils sont en concordance avec les résultats théorique

On observe une petite différence entre les résultats obtenus cela est dus aux erreurs de lecture et de precision des appareils de mesures. Donc Les résultats des simulations et testes expérimentaux concordent avec les résultats théoriques

Le fonctionnement en gradateur est, possible que si $\varphi < \alpha < \pi$.

Les gradateurs à trains d'ondes présentent un bon facteur de puissance. D'autre part, ils perturbent moins les ondes radio que les gradateurs à découpage de phase car ils génèrent moins d'harmoniques « haute fréquence ».