

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

Faculté : Sciences de L'Ingéniorat

Département : Électromécanique

## MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

***Gradateur monophasé et triphasé, modélisation  
et application***

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Electromécanique**

**Spécialité : Electromécanique**

**Par :MECHAOUF MED LAMINE**

**DEVANT LE JURY**

<b>Président :</b>	<b>M SAAD S</b>	<b>U.B.M. Annaba</b>
<b>Directeur de mémoire :</b>	<b>M SAAD S</b>	<b>U.B.M. Annaba</b>
<b>Examineur :</b>	<b>M BOURAS S</b>	<b>U.B.M. Annaba</b>
<b>Examineur :</b>	<b>M FARAH L</b>	<b>U.B.M. Annaba</b>
<b>Examineur :</b>	<b>M BOURAS H</b>	<b>U.B.M. Annaba</b>

**Année 2019**

# *Remerciements*

*Je remercie en premier lieu DIEU le tout puissant qui m'avoit donné la bonne foi et le courage pour accomplir ce modeste travail ainsi que mes parents L'aboutissement à la réalisation d'un travail est le fruit de toutes les années de formation, c'est donc à tous mes enseignants que je voudrai d'abord exprimer mon respect et gratitude.*

*Mes sincères remerciements d'abord à mon prometteur " « Pr. SAAD SALAH » qui a suivi l'évolution de mon mémoire, surtout, pour son aide précieux, je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude et reconnaissance.*

*Je tiens à remercier également les membres de jury pour avoir accepté de jurer ce mémoire. J'adresse mes vifs remerciements, mes amies et tous qui m'aident par leurs encouragements chacun de son nom.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire*

*A mes chers parents, à ma mère et mon père*

*Pour leur patience, leur amour, leur soutien et  
leur encouragement.*

*A mes frères.*

*A mes amies et mes camarades.*

*Sans oublier tout les professeurs que ce soit du  
primaires, du moyen, du secondaire ou de  
L'enseignement supérieur*

# Sommaire

Introduction générale.....	1	
<i>CHAPITRE I</i>	<i>Etude théorique des gradateurs</i> .....	4
<i>I.1. INTRODUCTION :</i> .....		4
<i>I.2. Définition :</i> .....		4
<i>I.3. Principe :</i> .....		4
<i>I.4. Constitution d'un gradateur :</i> .....		5
<i>I.5. Types de gradateurs</i> .....		5
I.5.1 Gradateur à angle de phase.....		6
I.5.1.1 Principe de fonctionnement .....		6
I.5.1.2 Domaine d'utilisation :.....		6
I.5.2 Gradateur à train d'onde.....		6
I.5.2.1 Principe de fonctionnement :.....		6
I.5.2.2 Domaine d'utilisation :.....		6
<i>I.6 Application des gradateurs:</i> .....		7
<i>I.7. Avantages et inconvénients :</i> .....		7
<i>I.8. Définition du thyristor</i> .....		7
<i>I.9. Le triac :</i> .....		8
<i>I.10. Gradateur monophasé commandé en retard de phase:</i> .....		9
I.10.1. Charge résistive : .....		9
I.10.1.1 Principe .....		9
I.10.1.2 Partie théorique .....		11
I.10.2 Gradateur monophasé avec charge résistive inductive (RL).....		11
I.10.2.1 Principe .....		11
I.10.2.2 Partie théorique .....		12
<i>I.11. Gradateur triphasé</i> .....		15
I.11.1 Type des gradateurs triphasés .....		15
I.11.1.1 Gradateur triphasé tout thyristors .....		15
I.11. 1.2 <i>Gradateur triphasé mixte</i> .....		16
I.11. 2 Gradateur triphasé couplé en étoile :.....		16
I.11.2.1 Principe .....		16
I.11.2.2 Partie théorique .....		18

CHAPITRE II	Simulation des gradateurs.....	21
II.1 Gradateur Monophasé.....		21
II.1.1 charge R .....		21
$\alpha = 0^\circ$ .....		21
Pour $\alpha = 30^\circ$ .....		22
II.1.2 Gradateur Monophasé avec une charge RL .....		23
Pour $\alpha = 30^\circ$ .....		23
Pour $\alpha = 60^\circ$ .....		24
II.2 Simulation d'un gradateur triphasé avec charge .....		25
❖ Pour $\alpha = 30^\circ$ .....		26
❖ Pour $\alpha = 66^\circ$ .....		28
❖ Pour $\alpha = 94^\circ$ .....		30
CHAPITRE III	Etude expérimentales des gradateurs .....	32
III.1 LES MONTAGES DE L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE: .....		32
III.1.1 Circuit de commande : .....		32
III.1.2 Circuit de puissance : .....		32
III.1.3 Circuit d'amplification .....		32
III.1.4 Circuit de protection .....		33
III.2 BANC D'ESSAI ET DIFFERENTS DISPOSITIFS DE MESURE .....		33
III.2.1 Unité (circuit) de commande du gradateur .....		34
III.2.2 Description Transformateur 45/90 0,3 kW .....		34
III.2.3 FILTRE A CONTROLE DE BRUIT DE PHASE $3 \times 4.5$ A .....		35
III.2.4 Fusible triple action super rapide.....		36
III.3 Tests expérimentaux .....		37
III.3.1 Gradateur monophasé .....		37
III.3.1.1 Charge resistive .....		37
Pour $\alpha = 0^\circ$ .....		37
Pour $\alpha = 30^\circ$ .....		39
III.3.1.2 gradateur monophasé avec une charge RL .....		40
Pour $\alpha = 30^\circ$ .....		40
Pour $\alpha = 60^\circ$ .....		41
III.3.2 Gradateur triphasé charge résistive $R = 100$ ohm.....		42
Pour $\alpha = 30^\circ$ .....		42

Pour $\alpha=66^\circ$ .....	43
Pour $\alpha=94^\circ$ .....	44
<i>CHAPITRE IV Comparaison des résultats théoriques, de simulation et expérimentaux .....</i>	<i>46</i>
<i>IV.1 Calcul Théorique (calcul de la tension et du courant efficace): .....</i>	<i>46</i>
IV.1.1 Gradateur monophasé charge R : .....	46
Pour $\alpha =0^\circ$ .....	46
Pour $\alpha =30^\circ$ .....	46
IV.1.1.2 Gradateur triphasé charge R : .....	46
Pour $\alpha =30^\circ$ .....	47
Pour $\alpha =66^\circ$ .....	47
Pour $\alpha =94^\circ$ .....	47
<i>IV.2 Tableaux de comparaison des résultats théoriques, de simulation et expérimentaux .....</i>	<i>47</i>
IV.2 .1 Gradateur monophasé avec charge résistive .....	47
___ Pour $\alpha =0^\circ$ .....	47
___ Pour $\alpha =30^\circ$ .....	48
IV.2 .2 Gradateur triphasé commandé avec charge résistive .....	48
___ Pour $\alpha =30^\circ$ .....	48
___ Pour $\alpha =66^\circ$ .....	49
___ Pour $\alpha =94^\circ$ .....	49
Conclusion .....	50
Conclusion général .....	51
Référence .....	52

## Listes des figures

<i>Fig(I.1) : Gradateur monophasé.....</i>	<i>5</i>
<i>Fig(I.2) : amorçage du gradateur monophasé a train d'onde.....</i>	<i>6</i>
<i>Fig(I.3) : Symbole électrique d'un gradateur .....</i>	<i>8</i>
<i>Fig(I.4) : Symbole électrique du triac.....</i>	<i>8</i>
<i>Fig(I.5) : Gradateur monophasé utilisant des thyristors .....</i>	<i>9</i>
<i>Fig(I.6) : Gradateur monophasé (gradateur bidirectionnel) utilisant TRIAC.....</i>	<i>10</i>
<i>Fig(I.7) :Forme d'onde d'un gradateur monophasé.....</i>	<i>10</i>
<i>Fig(I.8) : Gradateur monophasé avec charge RL.....</i>	<i>11</i>
<i>FIG(I.9) : Forme d'onde d'un gradateur monophasé avec charge RL .....</i>	<i>12</i>
<i>Fig(I.10) : Gradateur plein d'onde avec charge RL.....</i>	<i>14</i>
<i>Fig(I.11) :les gradateurs triphasés couplés en étoile et triangle.....</i>	<i>15</i>
<i>Fig(I.12) : Gradateur triphasé mixte.....</i>	<i>16</i>
<i>Fig(I.13) : Déphasage entre les3 phase A ,B ,C .....</i>	<i>17</i>
<i>Fig(I.14) : Formes d'onde pour le gradateur triphasé.....</i>	<i>17</i>
<i>Fig(II.15) : Schéma bloc de simulation d'un gradateur monophasé avec une charge résistive .....</i>	<i>21</i>
<i>Fig(II.16): La tension de source, la tension et le courant de charge.....</i>	<i>21</i>
<i>Fig(II.17): La tension de source, la tension et le courant de charge.....</i>	<i>22</i>
<i>Fig(II.18) : La tension inverse .....</i>	<i>22</i>
<i>Fig(II.19) : Schéma bloc de simulation d'un gradateur monophasé avec une charge résistive inductive .....</i>	<i>23</i>
<i>Fig(II.20) : La tension de source, la tension et le courant de charge.....</i>	<i>23</i>
<i>Fig(II.21) : La tension inverse du thyristor.....</i>	<i>24</i>
<i>Fig(II.22) : La tension de source, la tension et le courant de charge.....</i>	<i>24</i>
<i>Fig(II.23) : La tension inverse du thyristor.....</i>	<i>25</i>
<i>Fig(II.24) : Schéma bloc de simulation d'un gradateur triphasé avec une charge résistive..</i>	<i>25</i>
<i>Fig(II.25) : La tension de source .....</i>	<i>26</i>
<i>Fig(II.26) : La tension de la phase.....</i>	<i>26</i>
<i>Fig(II.27) : Le courant de la phase .....</i>	<i>27</i>
<i>Fig(II.28) : La tension inverse du thyristor.....</i>	<i>27</i>
<i>Fig (II.29) : La tension composée .....</i>	<i>27</i>
<i>Fig(II.30) :La tension de la phase.....</i>	<i>28</i>

<i>Fig (II.31) : Le courant de la phase</i> .....	28
<i>Fig(II.32) : La tension composée</i> .....	29
<i>Fig(II.33) : La tension inverse du thyristor</i> .....	29
<i>Fig(II.34) : La tension de la phase</i> .....	30
<i>Fig(II.35) : Le courant de la phase</i> .....	30
<i>Fig(II.36) : La tension inverse du thyristor</i> .....	31
<i>Fig(II.37) : La tension composée</i> .....	31
<i>FIG(II.38) : Le Banc D'essais</i> .....	33
<i>Fig(III.39) : La tension et le courant de source</i> .....	37
<i>Fig(III.40) : La tension et le courant de charge</i> .....	38
<i>Fig(III.41) : La tension inverse du thyristor T1</i> .....	38
<i>Fig(III.42) : La tension inverse du thyristor T1</i> .....	39
<i>Fig(III.43) : La tension et le courant de charge</i> .....	39
<i>Fig(III.44) : La tension et le courant de charge</i> .....	40
<i>Fig(III.45) :La tension inverse du thyristor T1</i> .....	40
<i>Fig(III.46) :La tension inverse et le courant du thyristor T1</i> .....	41
<i>Fig(III.47) :La tension inverse du thyristor</i> .....	41
<i>Fig(III.49) : La tension simple de la phase 1 et le courant</i> .....	42
<i>Fig(III.49) : La tension inverse et le courant de T1</i> .....	42
<i>Fig(III.50) : La tension composée</i> .....	43
<i>Fig(III.51) : La tension composée</i> .....	43
<i>Fig(III.52) : La tension simple de la phase 1 et le courant</i> .....	44
<i>Fig(III.53) : La tension simple de la phase 1 et le courant</i> .....	44
<i>Fig(III.54) : La tension composée et le courant du phase</i> .....	45

## Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire est focalisé sur le principe de fonctionnement et le développement théorique des équations déterminant les paramètres de la modélisation du gradateur monophasé et triphasé commandé. Les schémas de puissance et de commande avec des charges différents sont validés par simulation dans l'environnement Matlab / Simulink. Ces derniers sont aussi confirmés expérimentalement pour différentes charges et angle d'amorçage.

Les ondes et les paramètres (tensions et courants de charge, courant et tension inverse du thyristor ainsi que le courant de source) obtenues par simulation et par tests expérimentaux sont comparés aux résultats calculés à partir des équations théoriquement.

Les résultats obtenus montrent une concordance entre les résultats théoriques, de simulation et des tests expérimentaux.

## Abstract

The work presented in this thesis focuses on the operating principle and the theoretical development of the equations determining the parameters of the modeling of the single-phase and three-phase AC controllers. Current and voltage waveforms with different loads are validated by simulation in Matlab / Simulink environment. These are also experimentally confirmed for different loads and firing angles.

The waves and the parameters (voltages and load currents, thyristor current and inverse voltage as well as the source current) obtained by simulation and by experimental tests are compared with the results calculated from the theoretical equations.

The results obtained show a total agreement between the theoretical results, simulation and experimental tests.

## المخلص

يركز العمل الذي قدمه المرشح على مبدأ التشغيل والتطوير النظري للمعادلات التي تحدد الإعدادات ونمذجة باهتة التحكم أحادية الطور والثلاثية. يتم التحقق من مخططات الطاقة والتحكم ذات الأحمال المختلفة عن طريق المحاكاة في بيئة Matlab / Simulink. تم تأكيد هذه أيضًا بشكل تجريبي للأحمال المختلفة وزوايا البدء.

تتم مقارنة الموجات و الإعدادات (الفولتية وتيارات الحمل ، التيار التايرستور والجهد العكسي التايرستور وكذلك تيار المصدر) التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة والاختبارات التجريبية مع النتائج المحسوبة من المعادلات المقدمة نظرياً .

يركز العمل المقدم في هذه الأطروحة على المحاكاة والتجربة الباهتة. تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها التوافق بين النتائج النظرية والمحاكاة والاختبارات التجريبية

## **Introduction générale :**

L'électronique de puissance est une branche de l'électronique qui a pour objet la conversion statique de l'énergie électrique.

Cette fonction est réalisée par des convertisseurs statiques qui transforment l'énergie électrique disponible en une forme adaptée à l'alimentation d'une charge bien déterminée.

Avantages de ses convertisseurs [5] :

- bon rendement
- Taille et masse réduites
- Fonctionnement silencieux

Les principales applications :

- cas d'urgence (hôpitaux, salle informatique)
- photo volumique
- gestion, transport et distribution d'EE
- commande de machine électrique (variateur de vitesse)
- applications domestiques et industrielles

## **Différents types de convertisseurs statiques [8] :**

- **Convertisseur alternatif- Continu (redresseur)** est également appelé convertisseur alternatif/continu. C'est un convertisseur destiné à alimenter une charge qui nécessite une tension ou un courant continu à partir d'une source alternative. L'alimentation est, la plupart du temps, un générateur de tension

- **Convertisseur Continu-Continu (Hacheur)**

Les hacheurs sont les convertisseurs statiques continu-continu permettant de fabriquer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe

- **Convertisseur Continu-alternatif(Onduleur)**

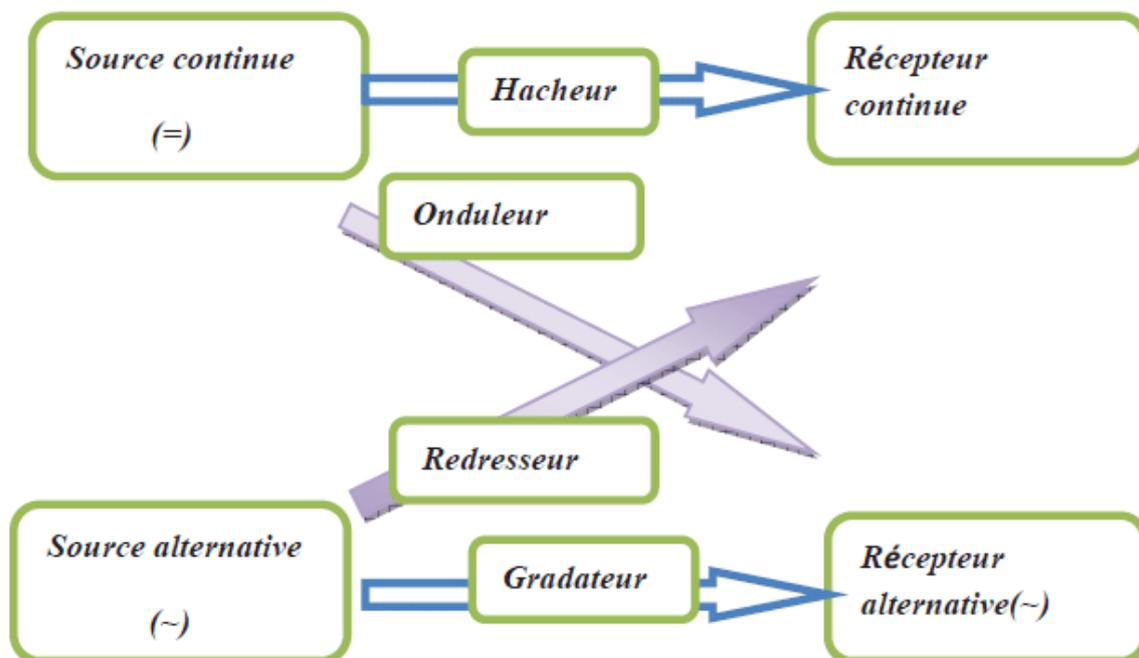
Les onduleurs sont les convertisseurs statiques continu-alternatif permettant de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue.

- **Convertisseur alternatif-alternatif(Gradateur)**

On désigne sous le nom de gradateurs tous les convertisseurs statiques qui, alimentés par un réseau alternatif, fournissent une ou plusieurs tensions à valeur moyenne nulle, de même

fréquence que celle du réseau d'alimentation, mais de valeur efficace différente, celle-ci étant habituellement réglable.

Bien que cela ne soit pas la seule technique possible, tous les gradateurs fonctionnent actuellement sur le principe de la commande de phase, déjà vu en redressement commandé, et qui, rappelons-le, consiste à amorcer les thyristors avec un retard réglable, par exemple par rapport au passage par zéro d'une tension d'alimentation, et à laisser le blocage s'effectuer en commutation naturelle. Ceci permet l'emploi de composants de type thyristors, le fonctionnement bidirectionnel étant obtenu grâce à l'association tête-bêche de deux éléments. Tant que les puissances mises en jeu le permettent, on peut évidemment remplacer cette structure par un triac, ce qui simplifie en particulier la conception des circuits de commande.



**Figure. I.1.** les symboles électriques des convertisseurs statiques.

On utilise des interrupteurs réalisés à partir de semi-conducteurs tels que : la diode, les transistors, thyristor, GTO, TRIAC ...

Ces éléments fonctionnent exclusivement en régime de commutation.

On utilise également des composants à dissipation minimale tels que les condensateurs, les inductances et les transformateurs. [5]

### **Quelques applications des convertisseurs statiques [7] :**

On peut citer quelques les applications des convertisseurs statiques dans le domaine industrielle

- ✓ Alimentation des moteurs à courant continu, charge des batteries. (Redresseur)
- ✓ Commande des moteurs à courant continu (vitesse variable) fonctions d'interrupteur onduleurs ou alimentation à découpage. (Hacheur)
- ✓ Production de tensions alternatives, alimentation des appareils électriques autonomes, protection contre les surtensions et coupures de réseau (informatique), commande des machines à courant alternatif. (Onduleur)
- ✓ Production des vitesses variables en alternatif (Levage, machine-outil). (Gradateur)

### **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]

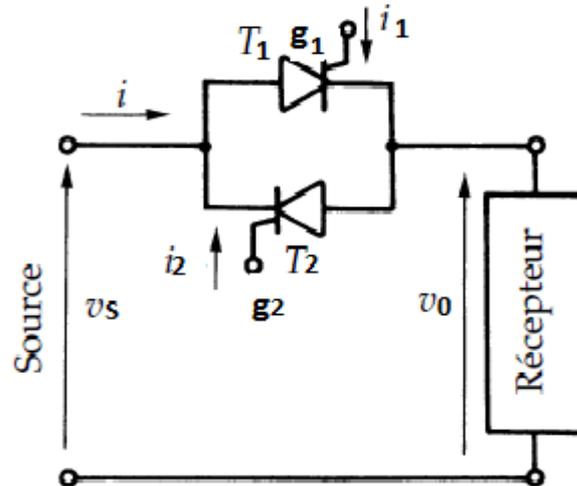


Fig (I.1) : Gradateur monophasé

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.

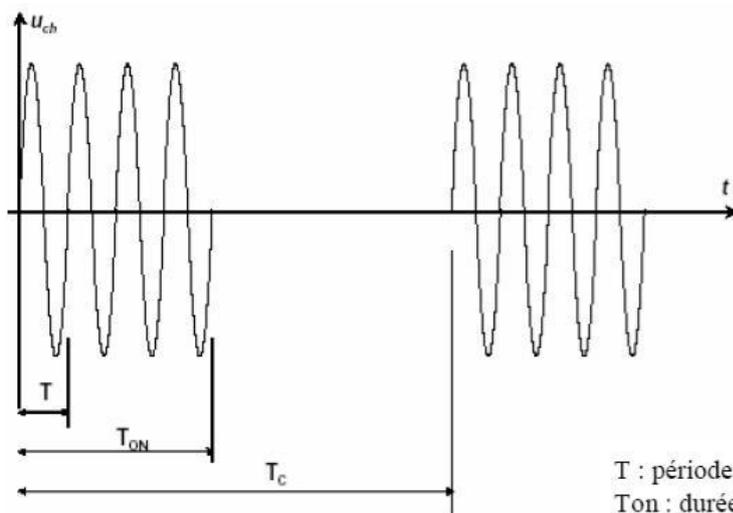
#### I.5.1.2 Domaine d'utilisation :

- 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 :



$T$  : période de la tension source ( secteur )  
 $T_{on}$  : durée du train d'onde ( salve )  
 $T_c$  : période de modulation

**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.

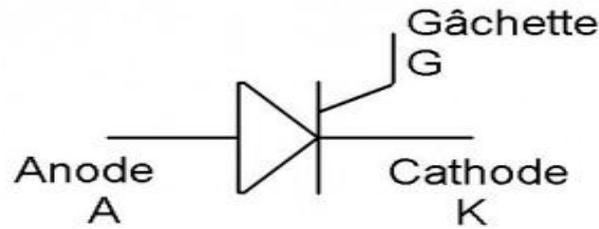
Mais cet «interrupteur » :

- ✓ 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 :

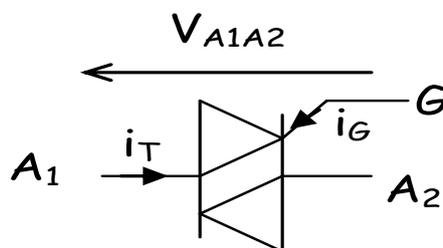
- que le courant  $i_{ak}$  s'annule.
- Appliquant une tension  $v_{ak}$  négative.

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 varie la valeur moyenne

### **I.9. Le triac :**

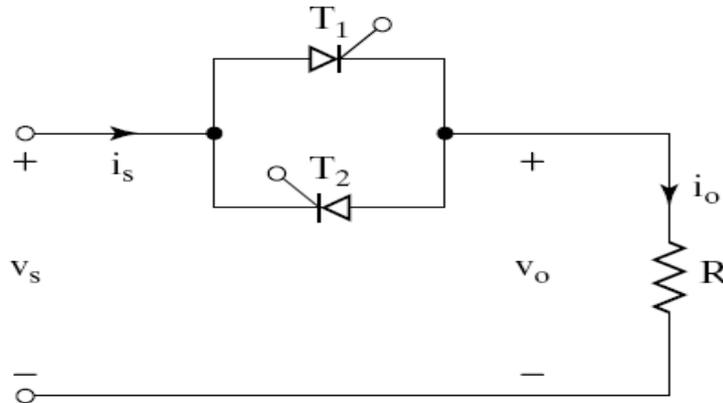
Est équivalent à deux thyristors montés en opposition. Il n'existe qu'une gâchette et deux anodes. [9]



**Fig (I.4) :** Symbole électrique du triac

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

### I.10.1. Charge résistive :



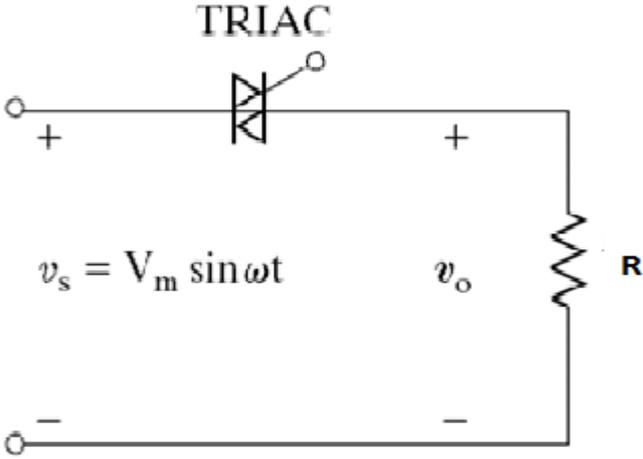
Fig(I.5) : Gradateur monophasé utilisant des thyristors

#### 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 ' $\alpha$ ' ( $0 \leq \alpha \leq \pi$  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  $\pi$  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  $\pi$  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  $2\pi$ . 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  $2\pi$  radians. L'intervalle de temps (espacement) entre les impulsions de déclenchement de la porte de  $T_1$  et  $T_2$  est maintenu à  $\pi$  radians ou  $180^\circ$ . 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

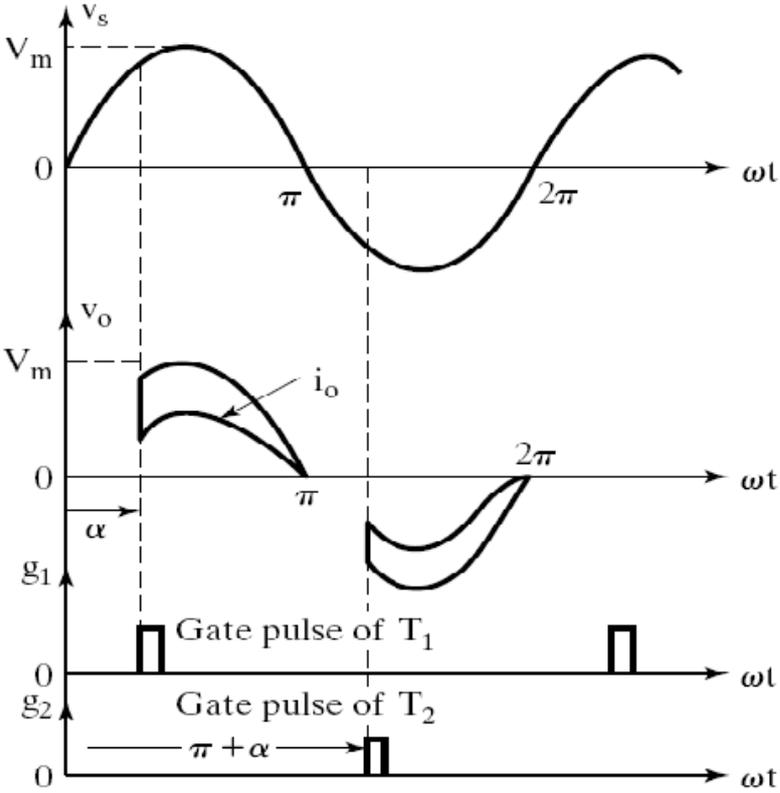


Fig (I.7) : Forme d'onde d'un gradateur monophasé

### 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 :

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

Le courant efficace de la charge

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

Le courant efficace du thyristor

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

## 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 :

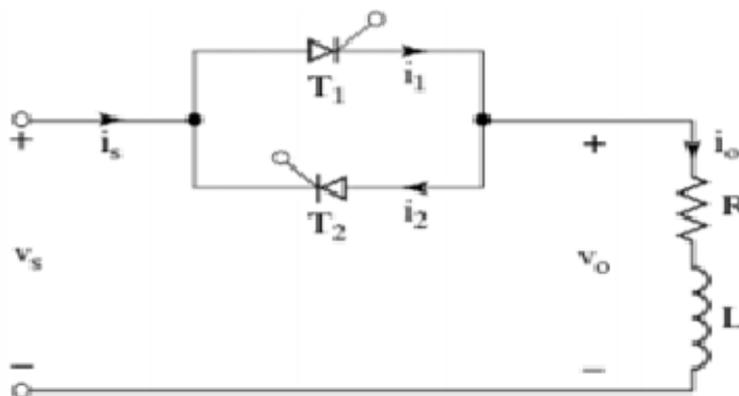
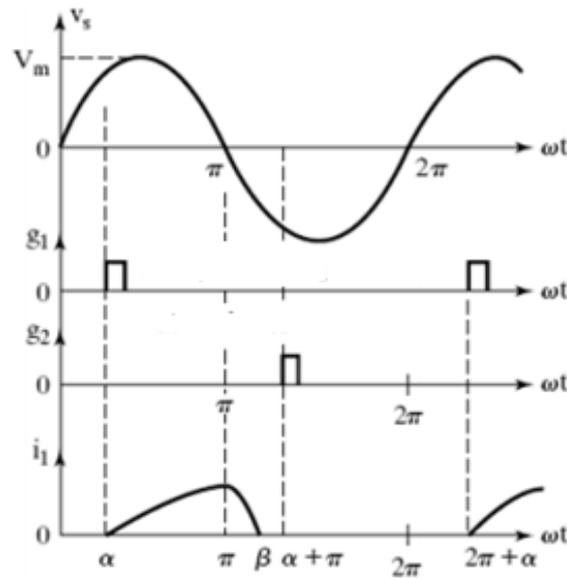


Fig (I.8) : Gradateur monophasé avec charge RL

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 sa 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 alpha et de l'angle de facteur de puissance de la charge  $\theta$ . [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 suivant :



FIG(I.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  $\alpha$ , 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  $\beta$ , lorsque le courant  $i_1$  tombe à zero 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  $\beta$ , 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  $\beta$  est connu, l'angle de conduction  $\delta$  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 :

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

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 :

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

Les signaux de déclenchement du thyristor pourraient être des impulsions courtes pour un gradateur avec des charges résistive .ce pendent, 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 :

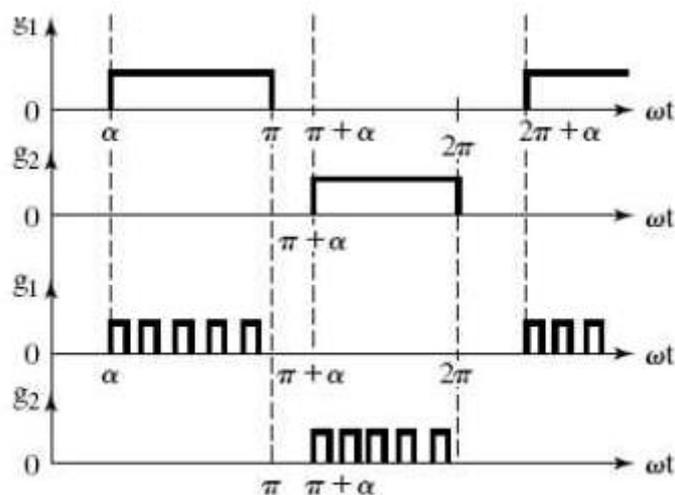


Fig (I.10) : Gradateur plein d'onde avec charge RL

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  $\alpha$  est inférieur à l'angle de charge  $\theta$ .

Si  $\alpha$  est supérieur à  $\theta$ , 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,  $\delta$  ne peut pas dépasser  $\pi$  et que le courant de charge doit passer par zéro, l'angle de retard  $\alpha$  ne peut pas être inférieur à  $\theta$  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  $\alpha$ , mais les deux thyristors conduiraient pour  $\pi$ .

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

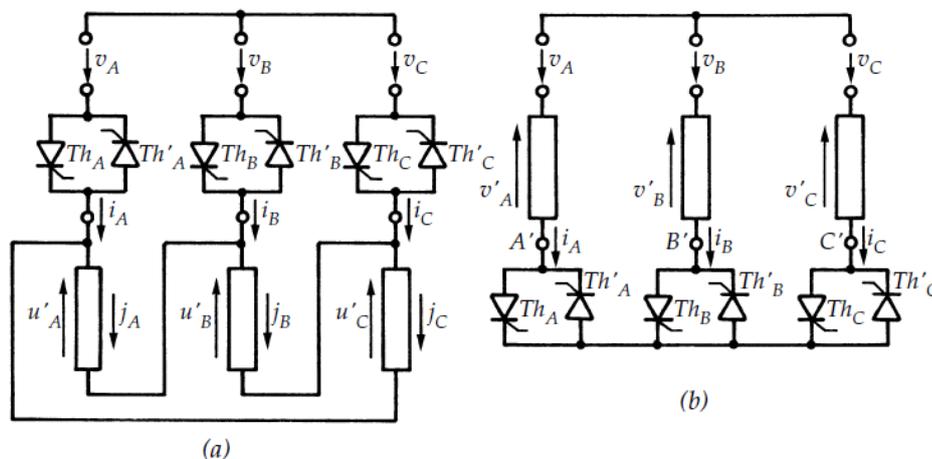
## I.11. Gradateur triphasé

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

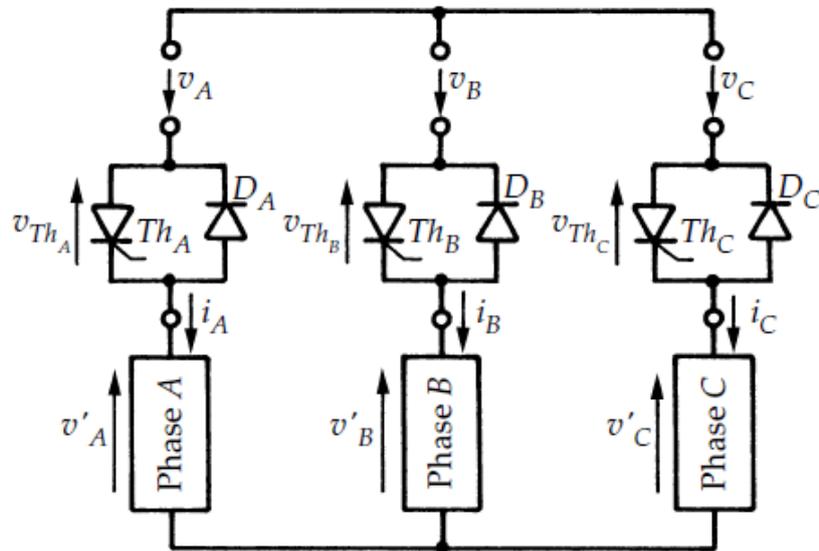
Les vrais gradateurs triphasés sont formés de trois ensembles de deux thyristor tête-bêche montés entre les bornes ABC du réseau et celles 1, 2,3 du récepteur équilibré couplé en étoile Fig (I.11.b) où en triangle Fig (I.11.C)



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

### 1.11. 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

## 1.11. 2 Gradateur triphasé couplé en étoile :

### 1.11.2.1 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  $\omega$  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  $i_C$ .

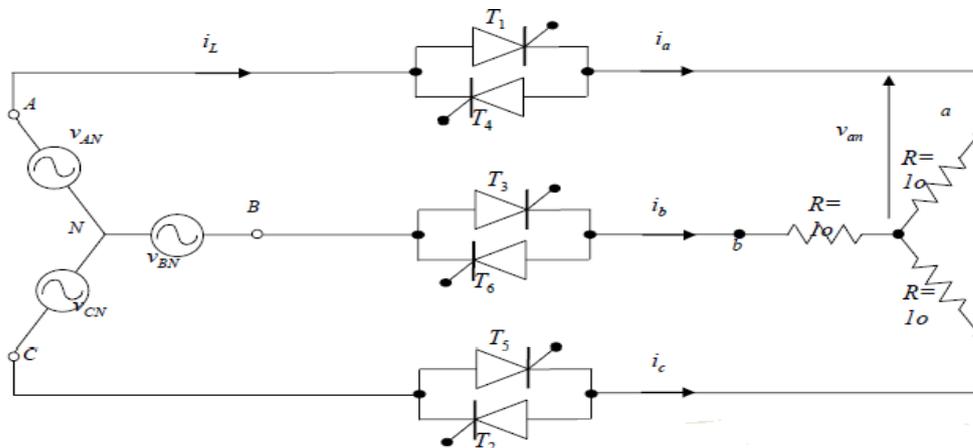
$v_A$ ,  $v_B$  et  $v_C$  désignent les tensions aux bornes de ces phases.

$v_{Th_A}$ ,  $v_{Th_B}$  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  $\alpha$ ; 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°.

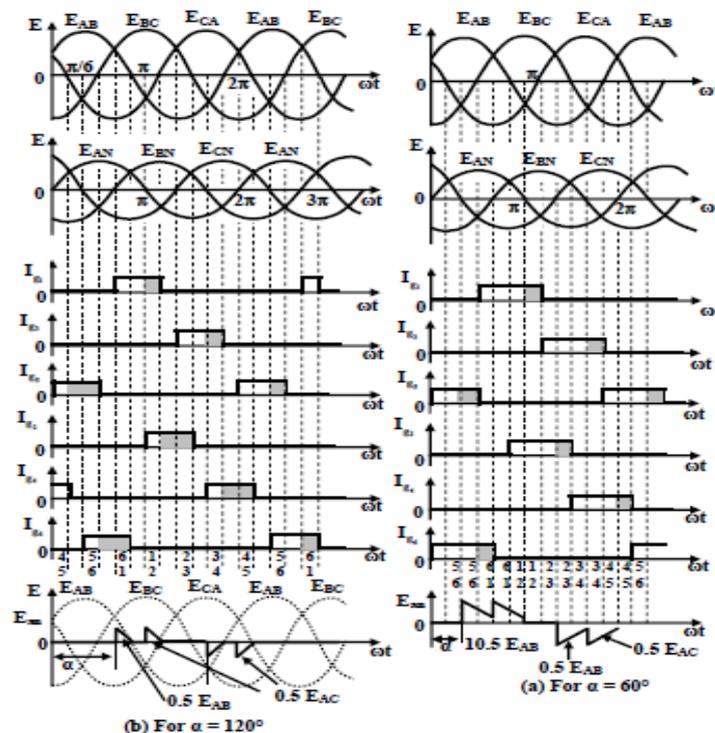
Les thyristors de la phase 2 sont commandés selon un décalage de  $120^\circ$  par rapport à ceux de la phase 1 [1]



**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 ( $\alpha$ ) de (a)  $60^\circ$  et (b)  $120^\circ$  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.

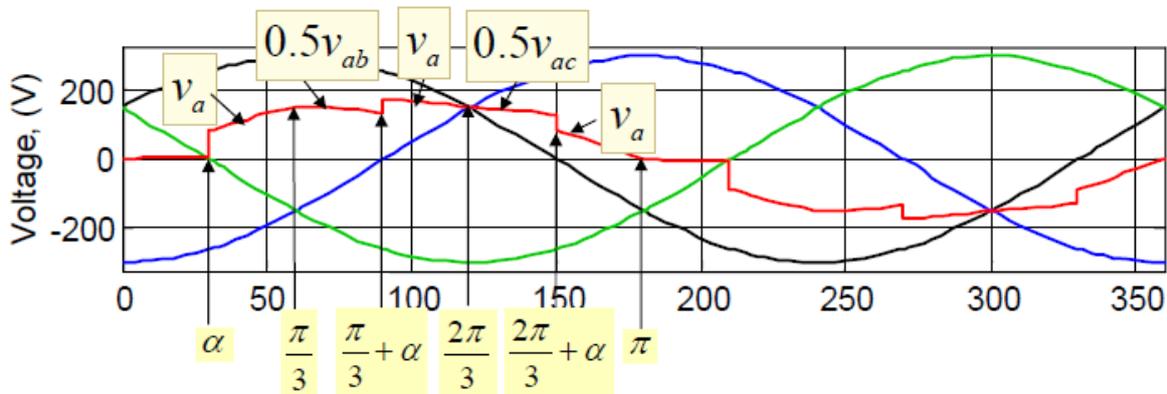
Pour  $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ , il y a des périodes pendant lesquelles aucun thyristor n'est allumé.

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]

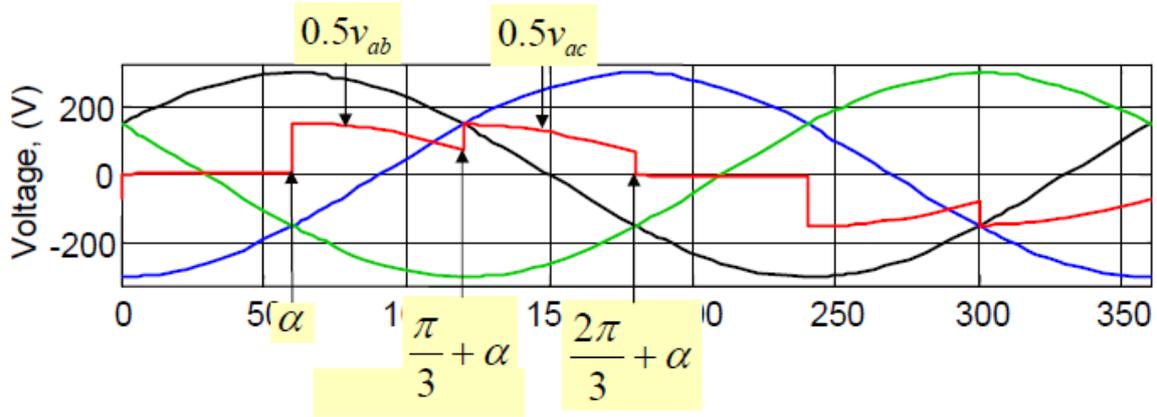
Pour  $0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$



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

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

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



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

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

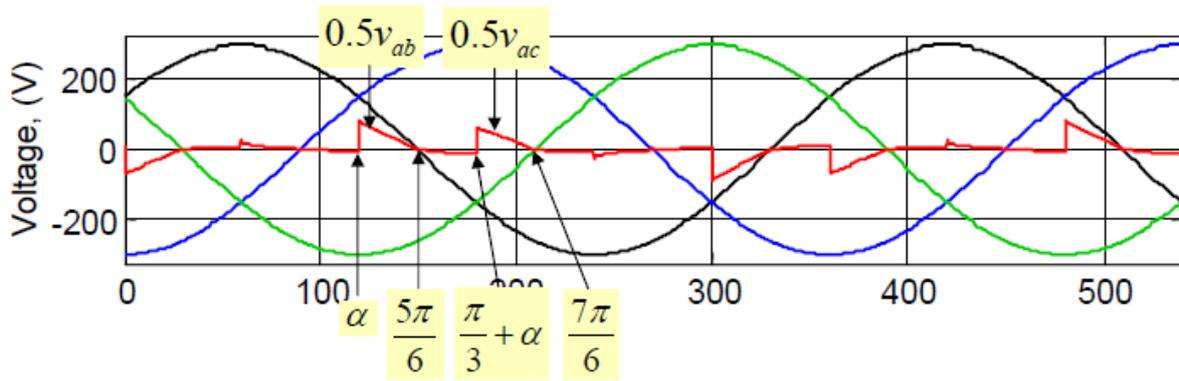
$$V_0 = \sqrt{6}V_S \left[ \frac{2}{2\pi} \left\{ \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{3}+\alpha} \frac{\sin^2(\omega t + \frac{\pi}{6})}{4} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \frac{\sin^2(\omega t - \frac{\pi}{6})}{4} d(\omega t) \right\} \right]^{\frac{1}{2}}$$

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

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

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

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



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

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

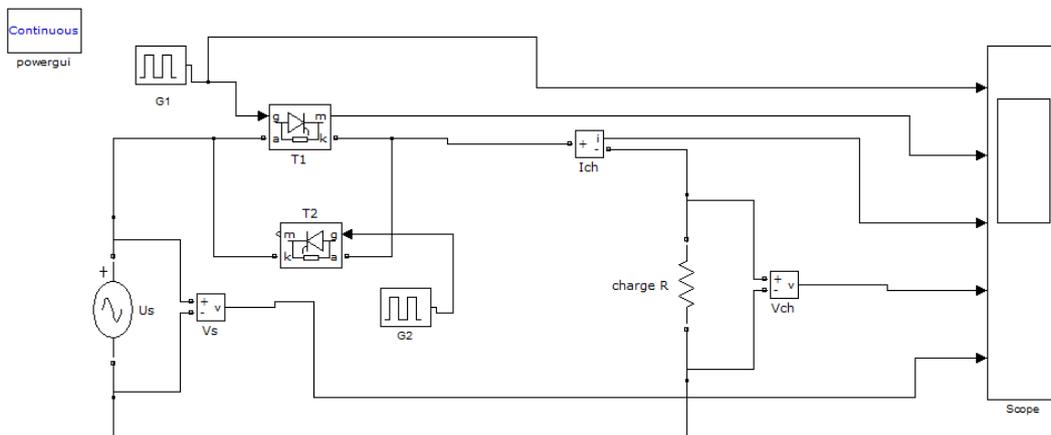
II.1 Gradateur Monophasé

II.1.1 charge R

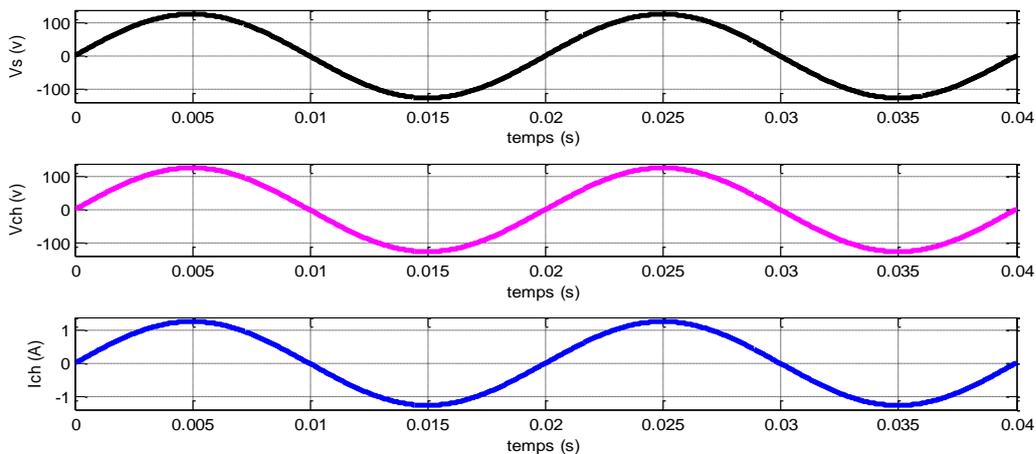
Résultat et Les courbes de simulation :

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)



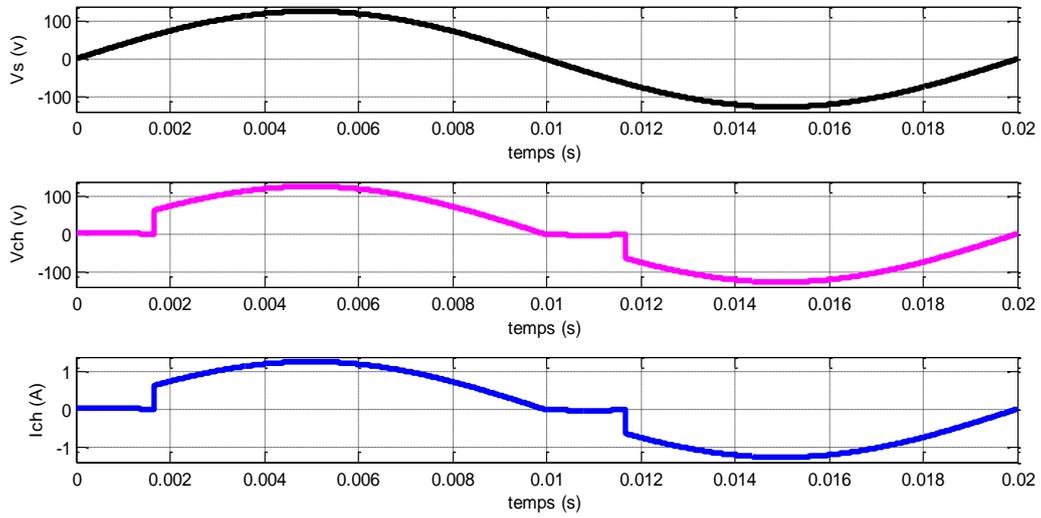
Fig(II.15) : schéma bloc de simulation d'un gradateur monophasé avec une charge résistive



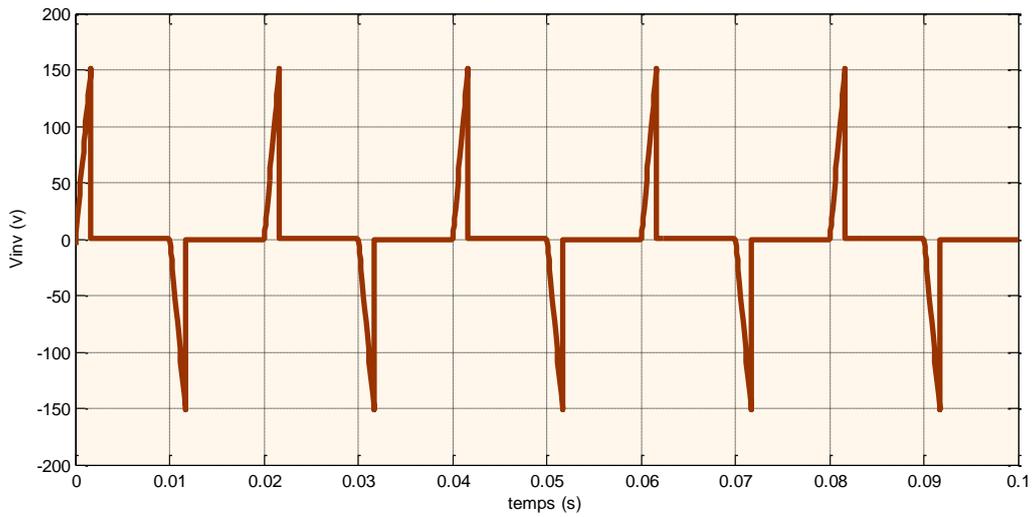
Fig(II.16): La tension de source, la tension et le courant de charge

❖ 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

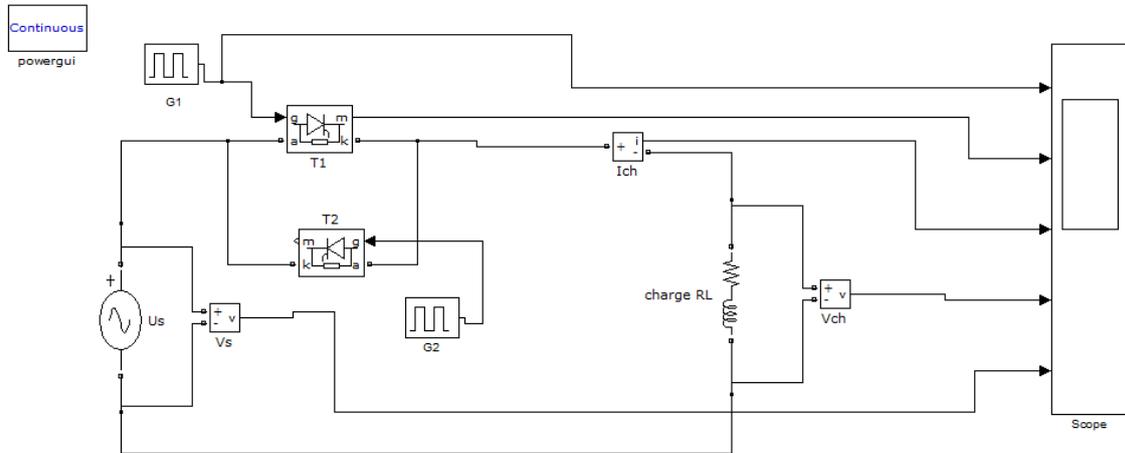


**Fig (II.18) :** La tension inverse

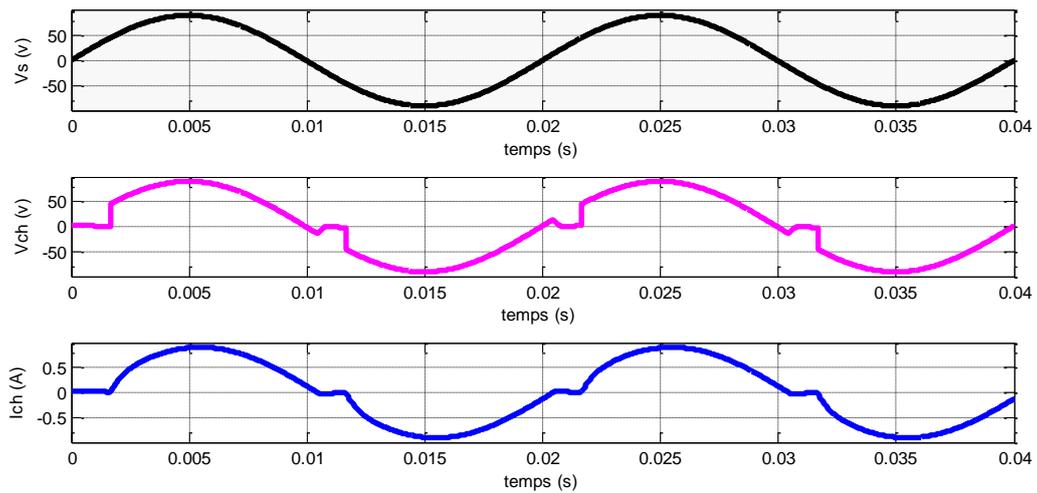
## II.1.2 Gradateur Monophasé avec une charge RL

❖ Pour  $\alpha = 30^\circ$

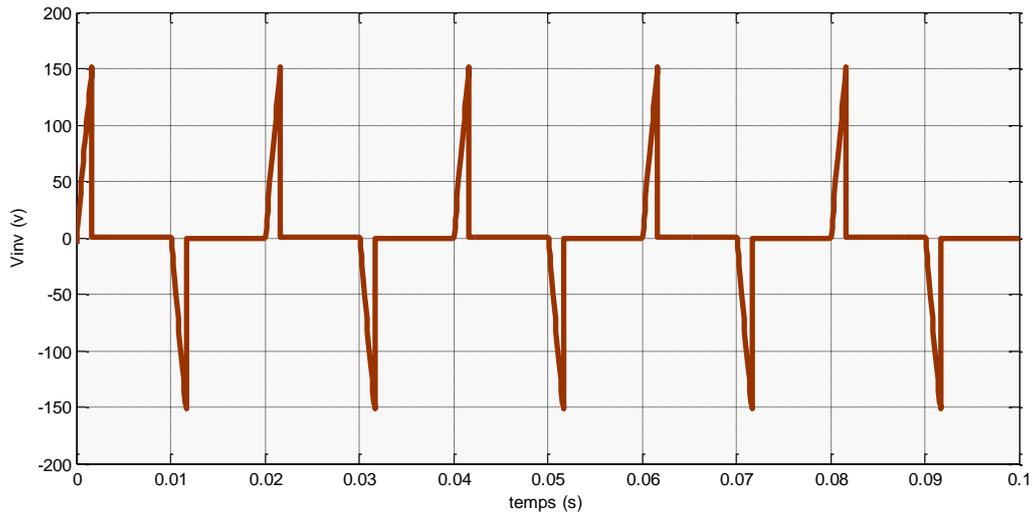
$$V_{eff_{ch}} = 92.02 \text{ v} , I_{eff_{ch}} = 0.92 \text{ A} , I_{eff_{T1}} = 0.63 \text{ A}$$



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



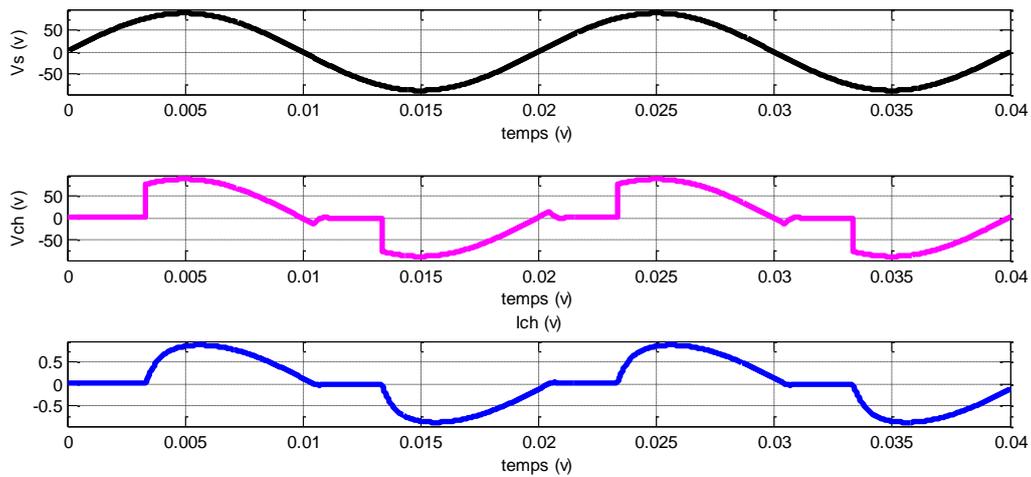
**Fig (II.20)**: La tension de source, la tension et le courant de charge



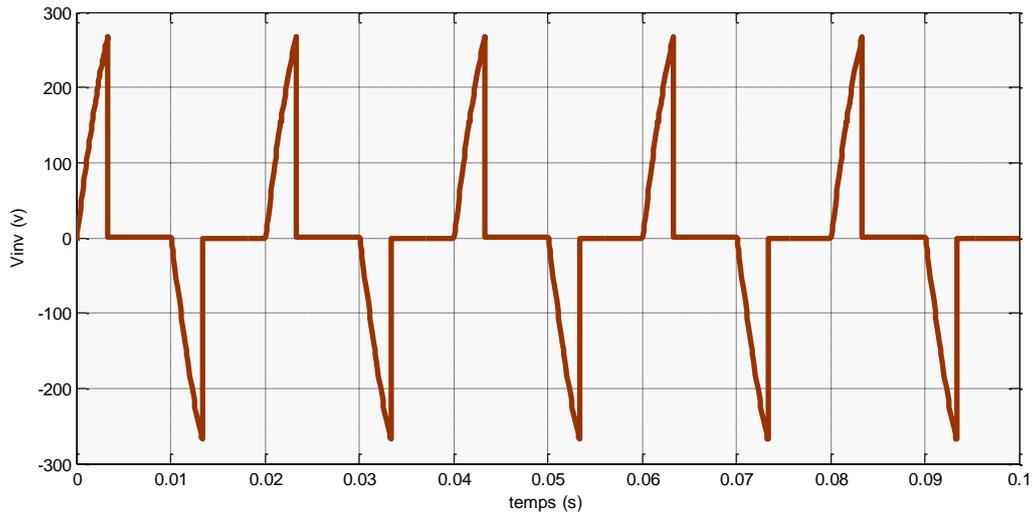
**Fig (II.21):** La tension inverse du thyristor

❖ Pour  $\alpha = 60^\circ$

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

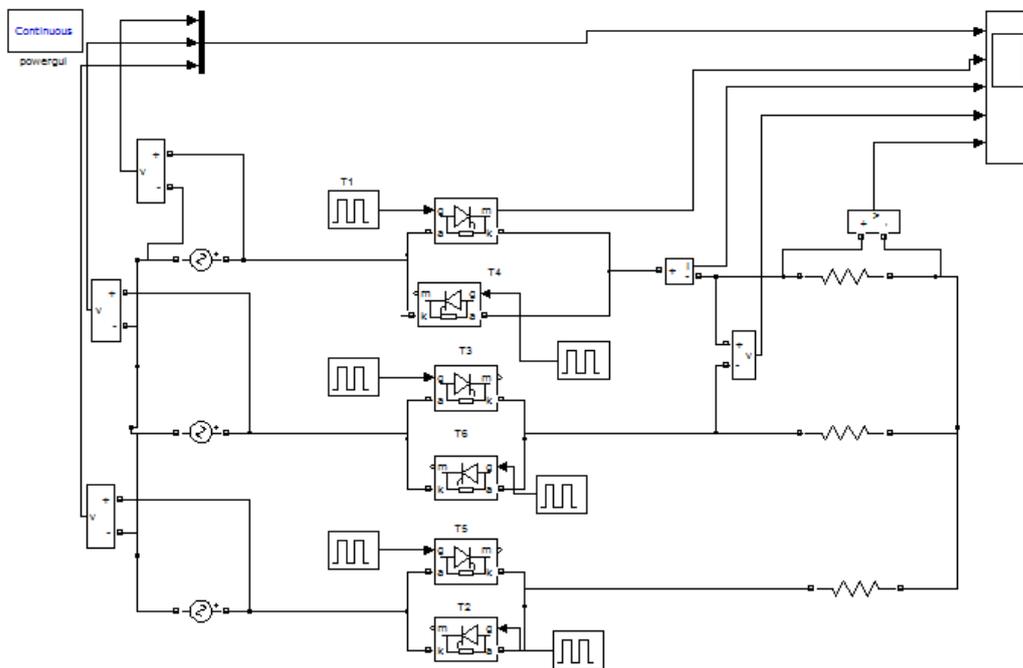


**Fig (II.22):** La tension de source, la tension et le courant de charge



**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  $\alpha = 30^\circ$

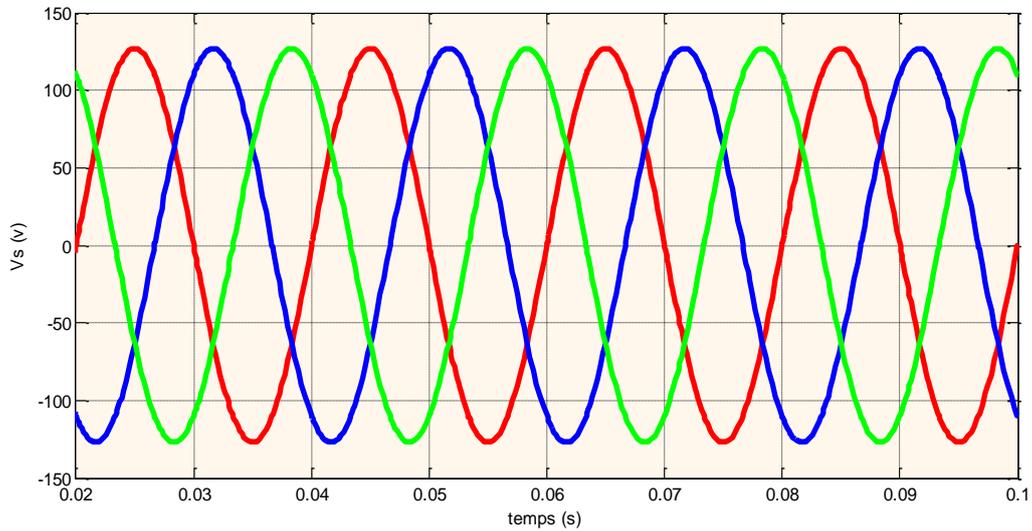
$$V_{eff_{ph1}} = 88 \text{ v} , I_{eff_{ph1}} = 0.89 \text{ A} , I_{eff_{T1}} = 0.61 \text{ A} , V_{com} = 147 \text{ v}$$

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

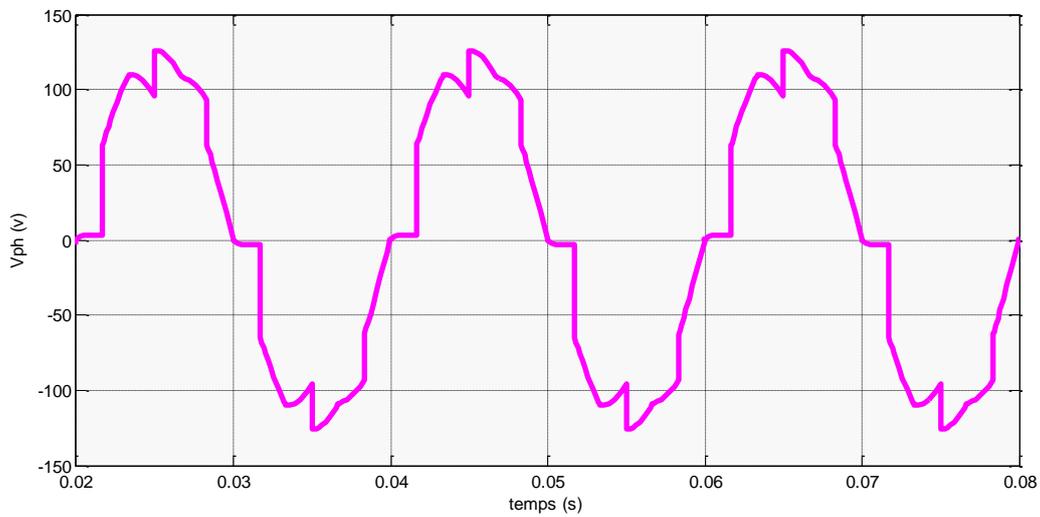
$I_{eff_{ph1}}$ (Le courant efficace de la phase 1)

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

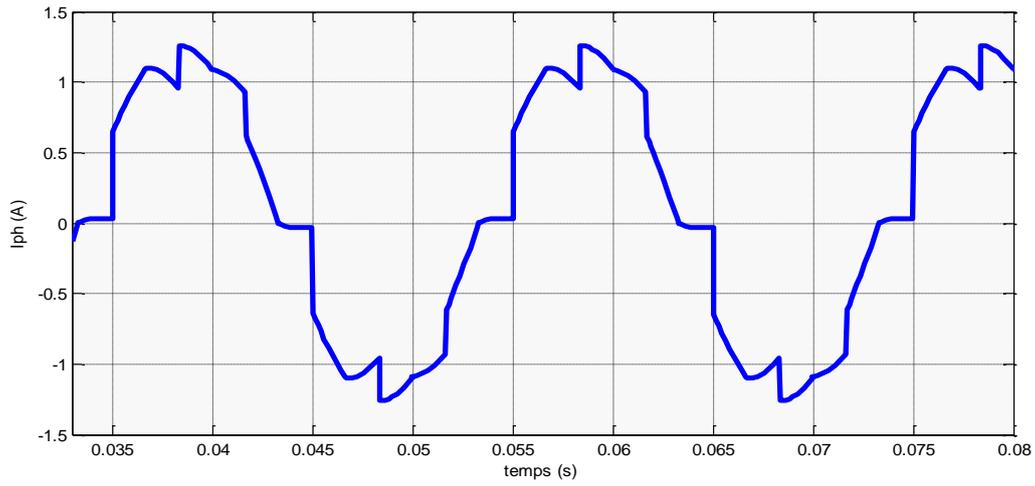
$V_{com}$ (La tension composée)



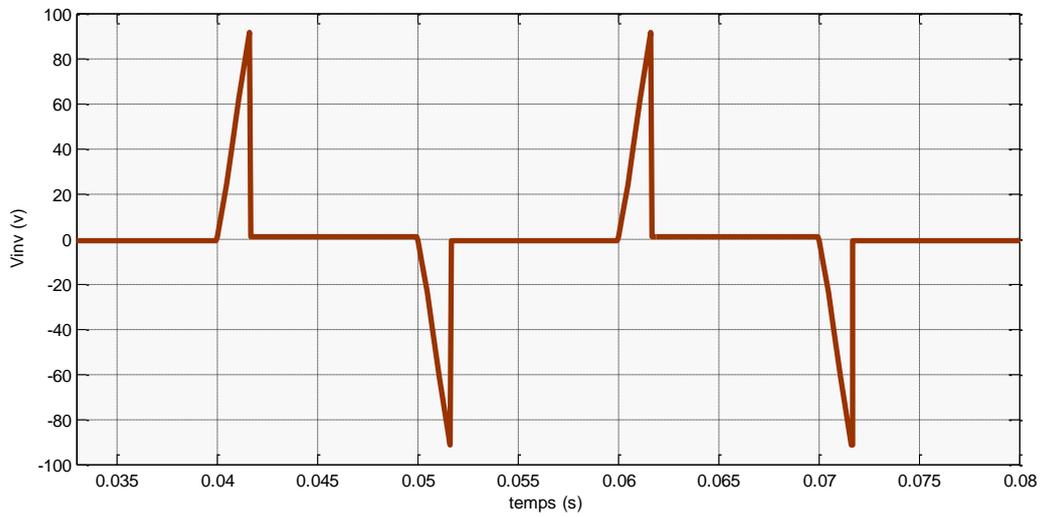
**Fig(II.25) :** la tension de source



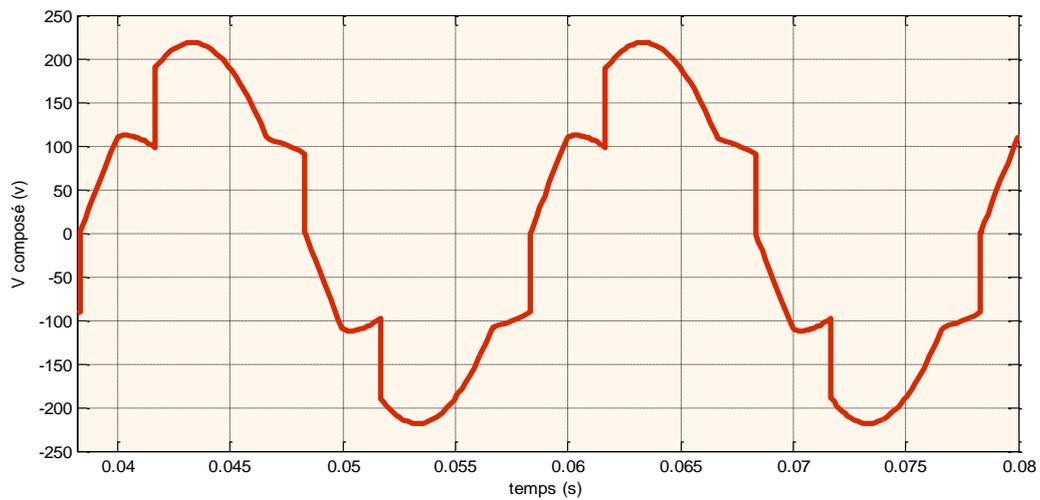
**Fig (II.26) :** la tension de la phase 1



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



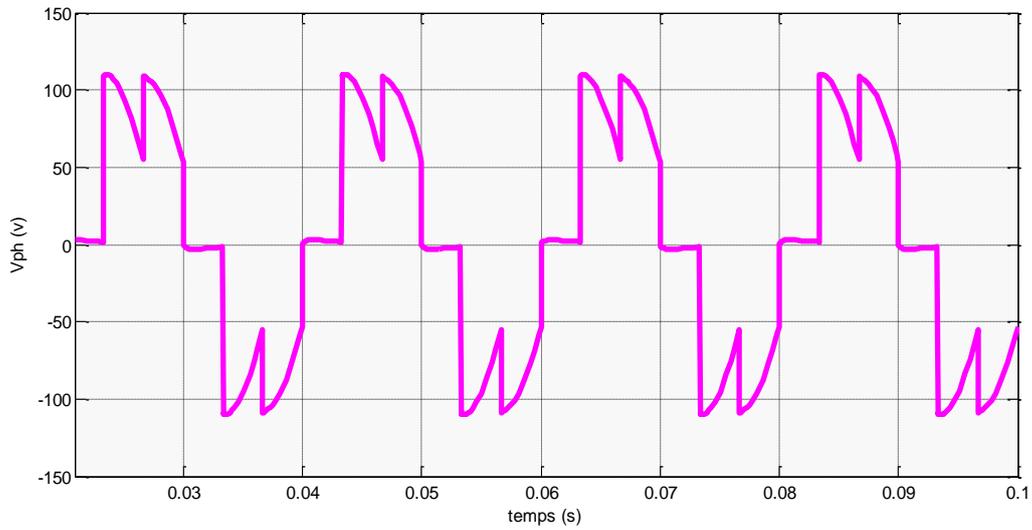
**Fig (II.28):** La tension inverse du thyristor



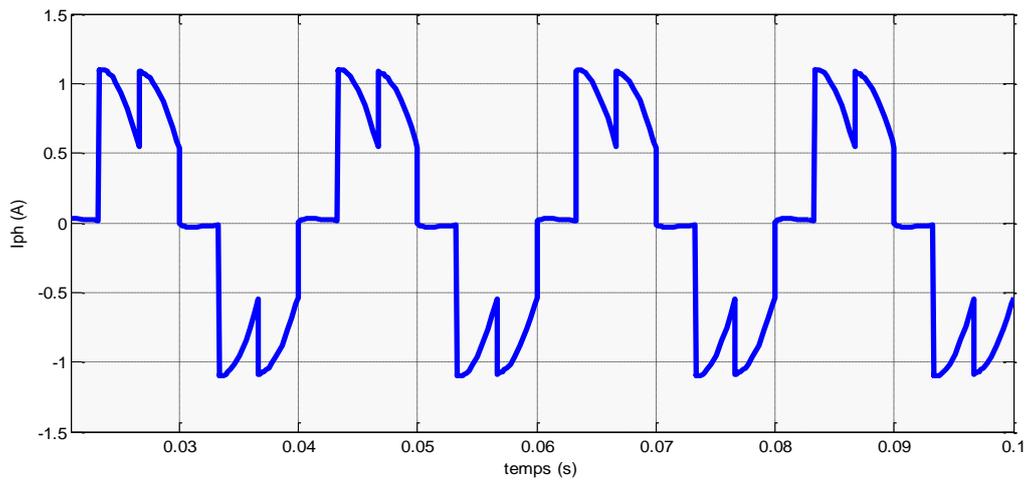
**Fig (II.29) :** la tension composée

❖ Pour  $\alpha = 66^\circ$

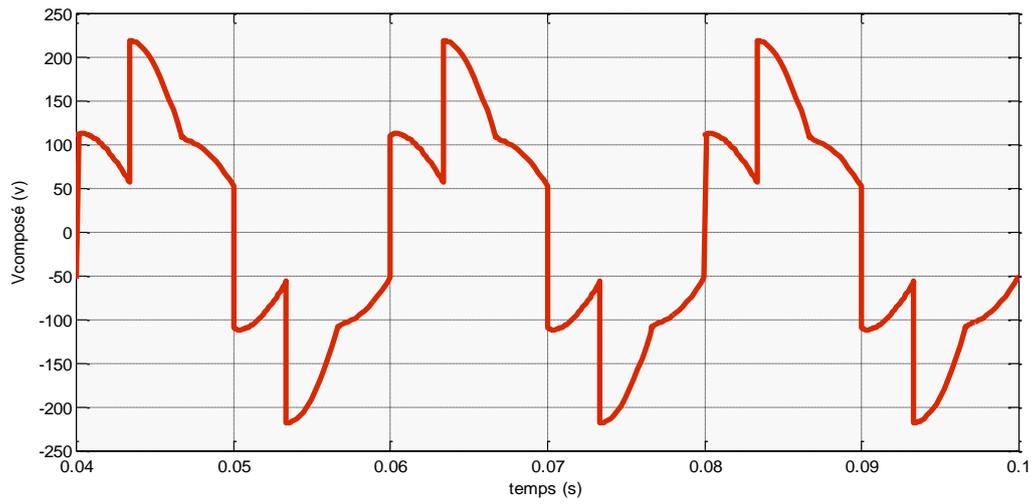
$V_{eff_{ph1}} = 68 \text{ v}$  ,  $I_{eff_{ph1}} = 0.68 \text{ A}$  ,  $I_{eff_{T1}} = 0.55 \text{ A}$  ,  $V_{com} = 127 \text{ v}$



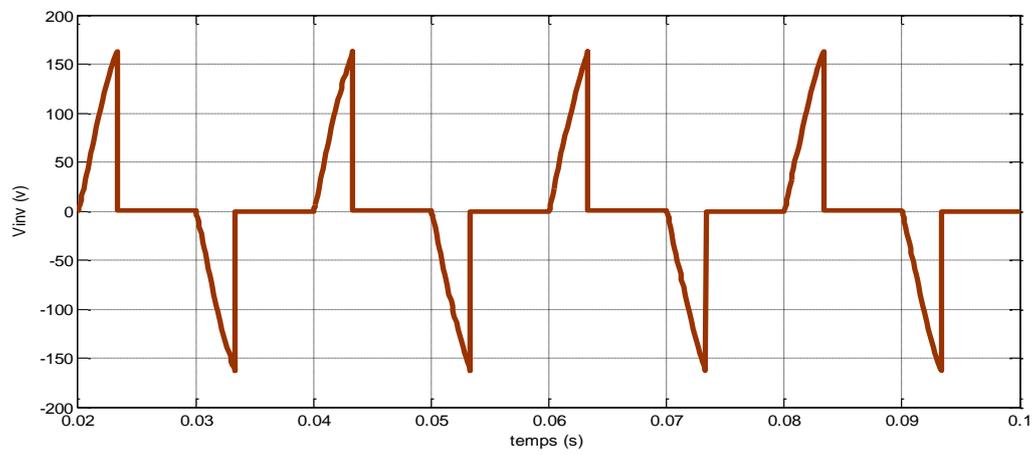
**Fig (II.30) :** la tension de la phase 1



**Fig (II.31) :** le courant de la phase 1



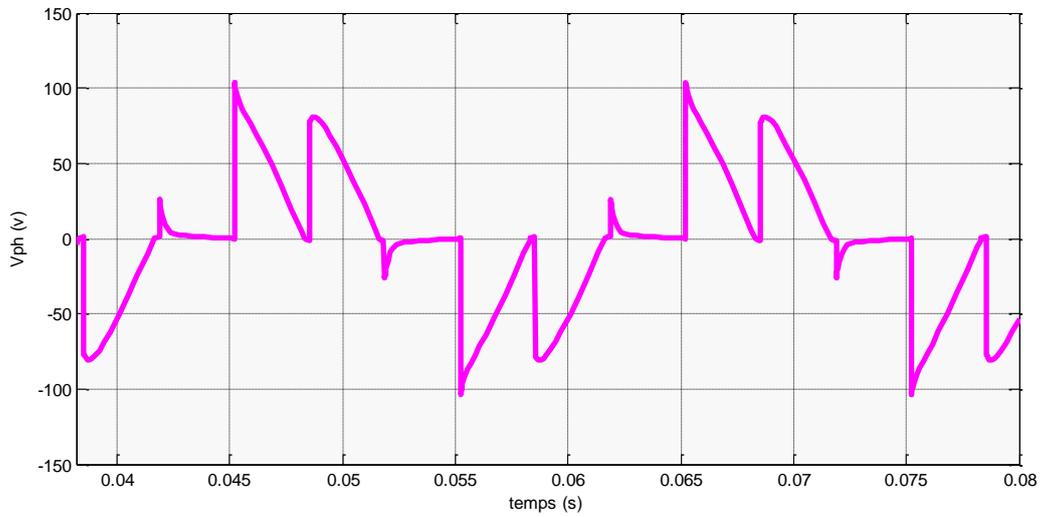
**Fig (II.32) :** La tension composée



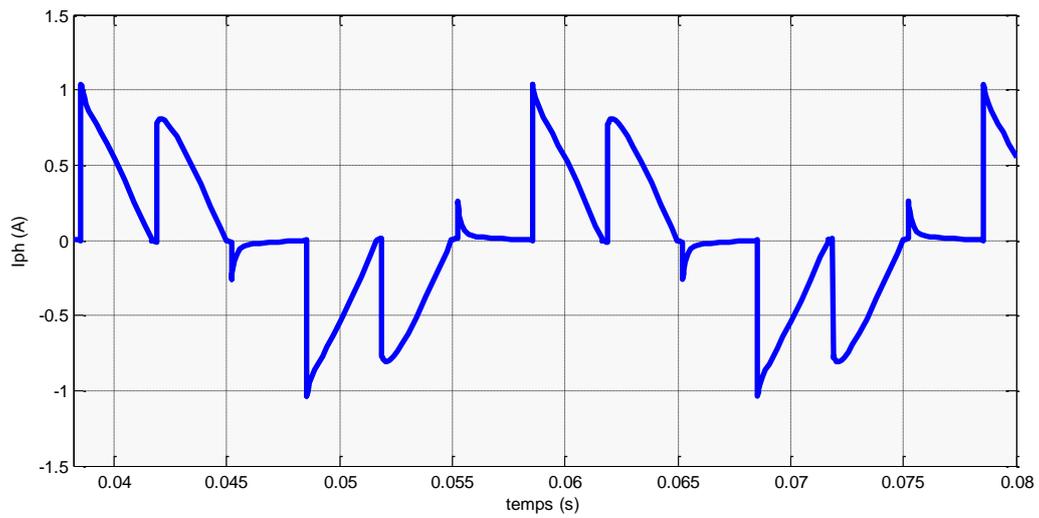
**Fig (II.33):** La tension inverse du thyristor

❖ Pour  $\alpha = 94^\circ$

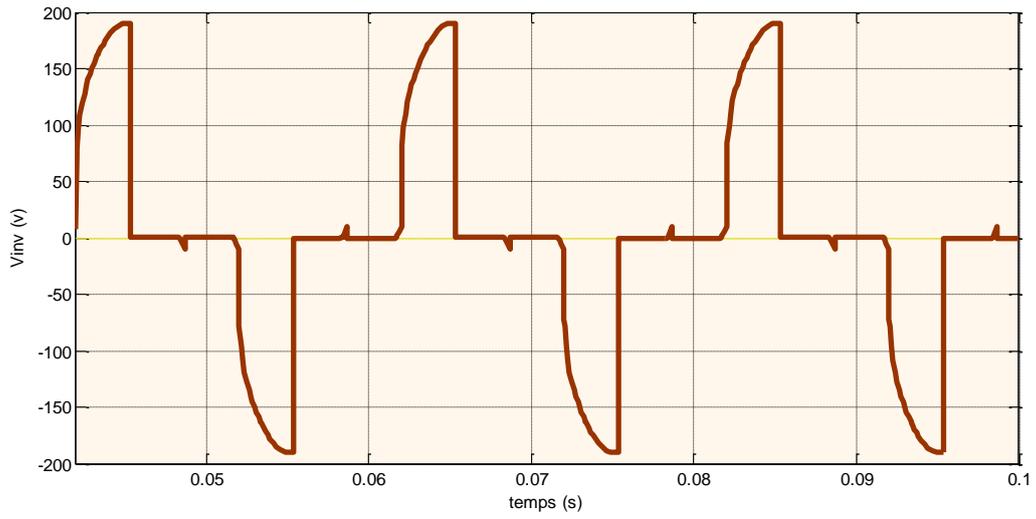
$$V_{eff_{ph1}} = 43 \text{ v} , I_{eff_{ph1}} = 0.43 \text{ A} , I_{eff_{T1}} = 0.35 \text{ A} , V_{com} = 80 \text{ v}$$



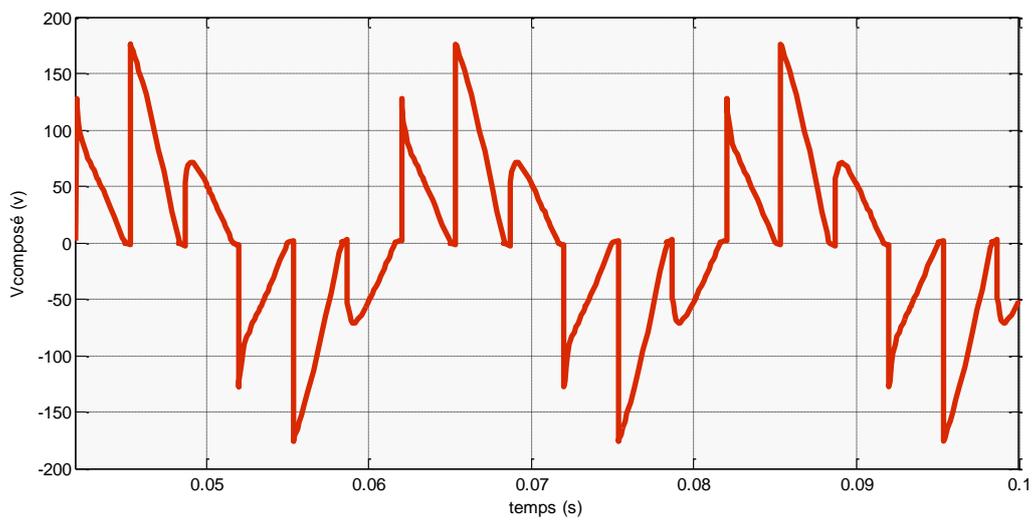
*Fig (II.34):* La tension de la phase 1



*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 automatisme 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**

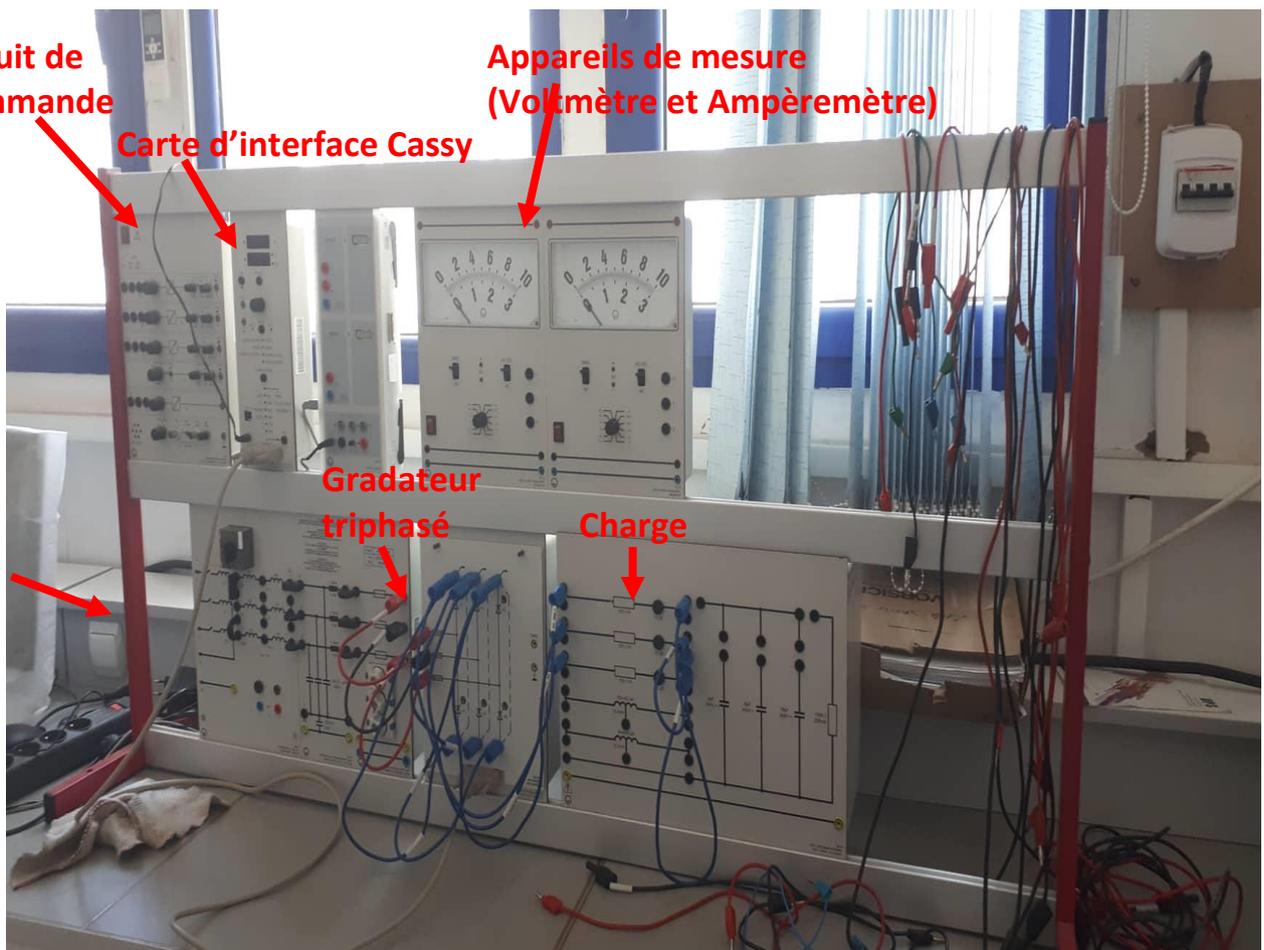
Ce bloc est utilisé pour amplifier le signal généré par le bloc de commande transmet vers la base ou la gâchette des interrupteurs électroniques.

### 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)

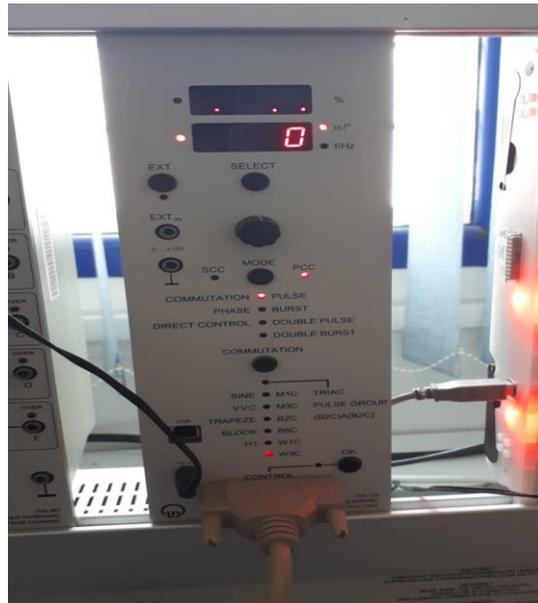
## III.2 BANC D'ESSAI ET DIFFERENTS DISPOSITIFS DE MESURE

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



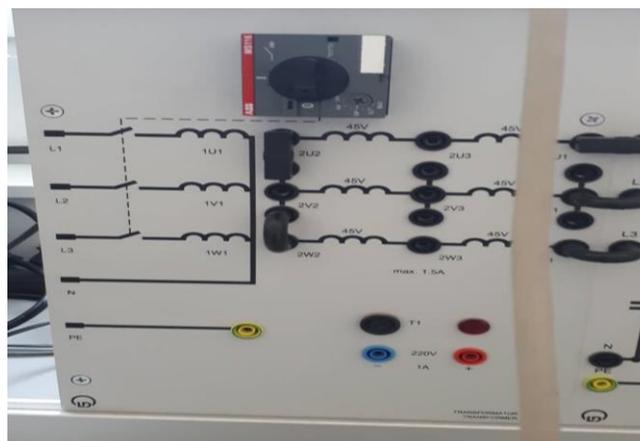
**FIG(II.38)** : Le banc d'essais

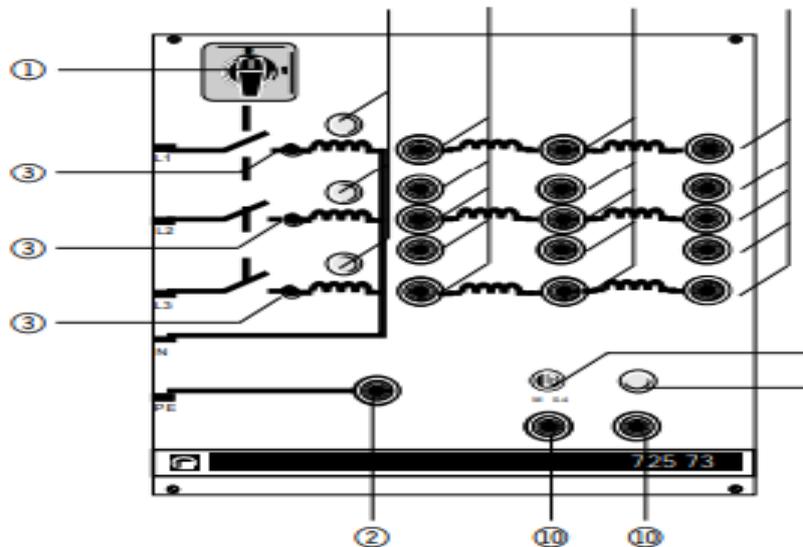
### III.2.1 Unité (circuit) de commande du gradateur



- 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



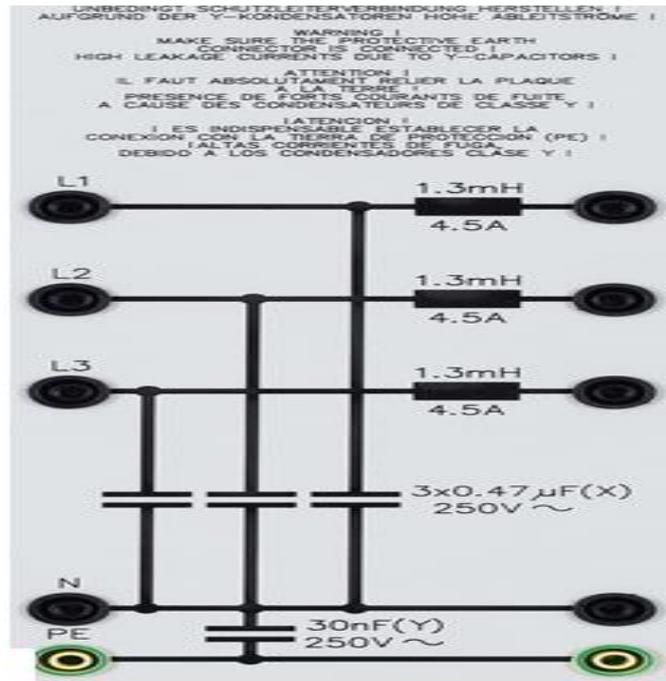


- 1-Interrupteur principal
- 2- Douille de sécurité (PE) pour conducteur de protection
- 3- Disjoncteur d'application 0,8 A pour tension secteur L1 / L2 / L3
- 4- Témoins de vérification de la tension secteur de L1 / L2 / L3
- 5- Prises de sécurité, (2U1, 2V1, 2W1) pour le taraudage de la tension de 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 KLNR / 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

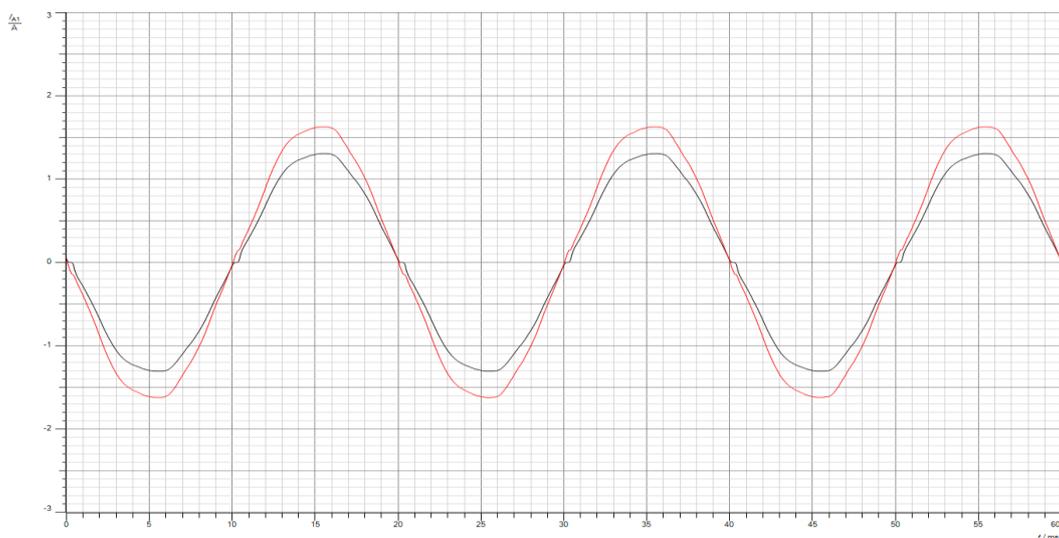
Pour valider les résultats obtenus par simulation, des tests expérimentaux avec différents angles d'amorçages ont été effectués sur le banc d'essais présenté sur la Fig.33.

#### III.3.1 Gradateur monophasé

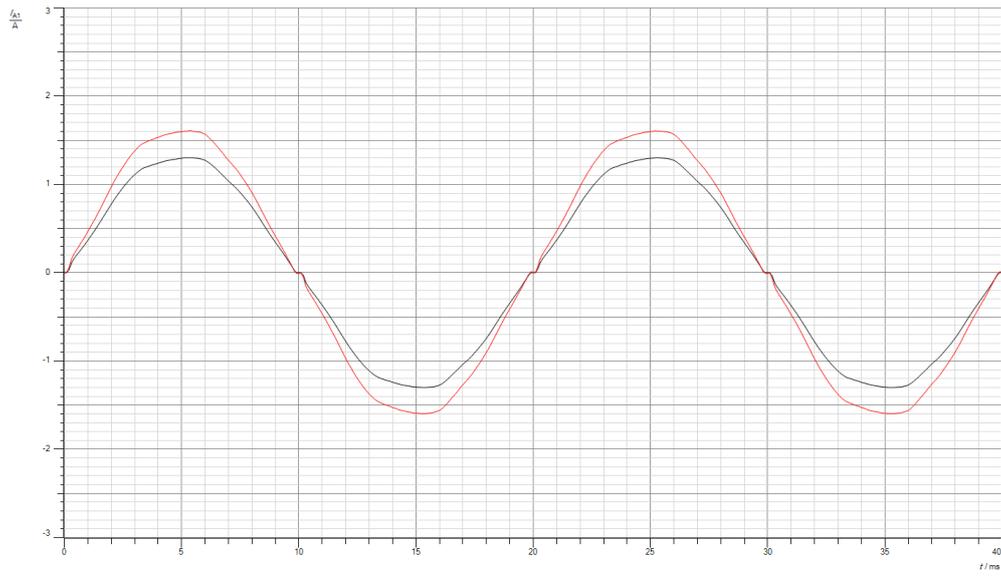
III.3.1.1 Charge resistive  $R=100 \Omega$   $V_{effs}=90 \text{ v}$

❖ Pour  $\alpha=0^\circ$

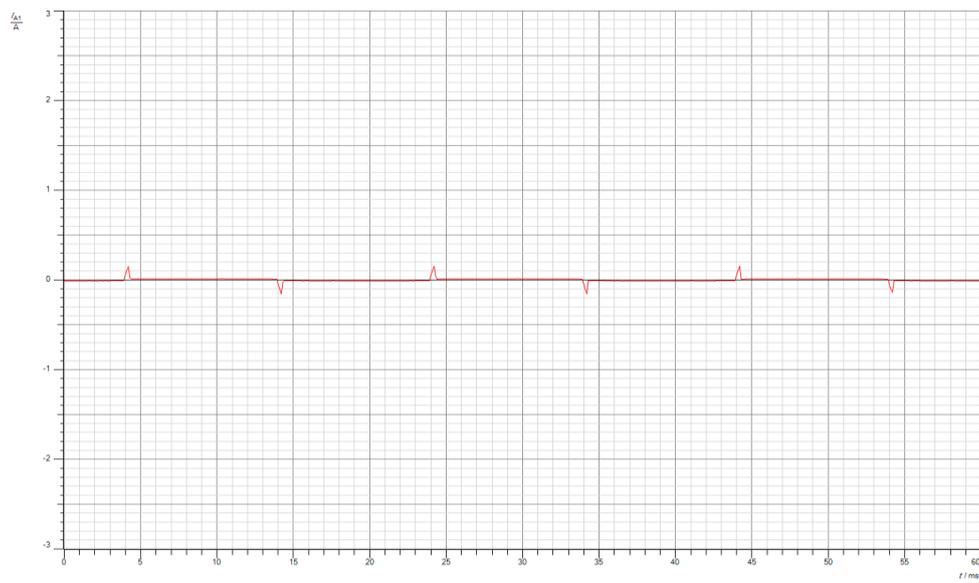
$$V_{eff_{ch}}= 102 \text{ v} \quad I_{eff_{ch}}= 0.9 \text{ A}$$



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



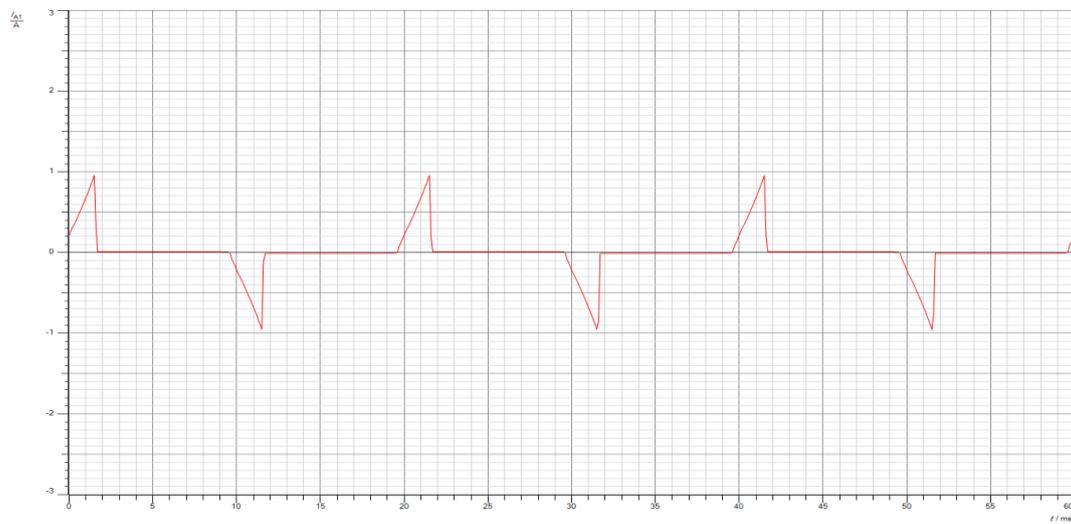
**(III.40) :** la tension et le courant de charge



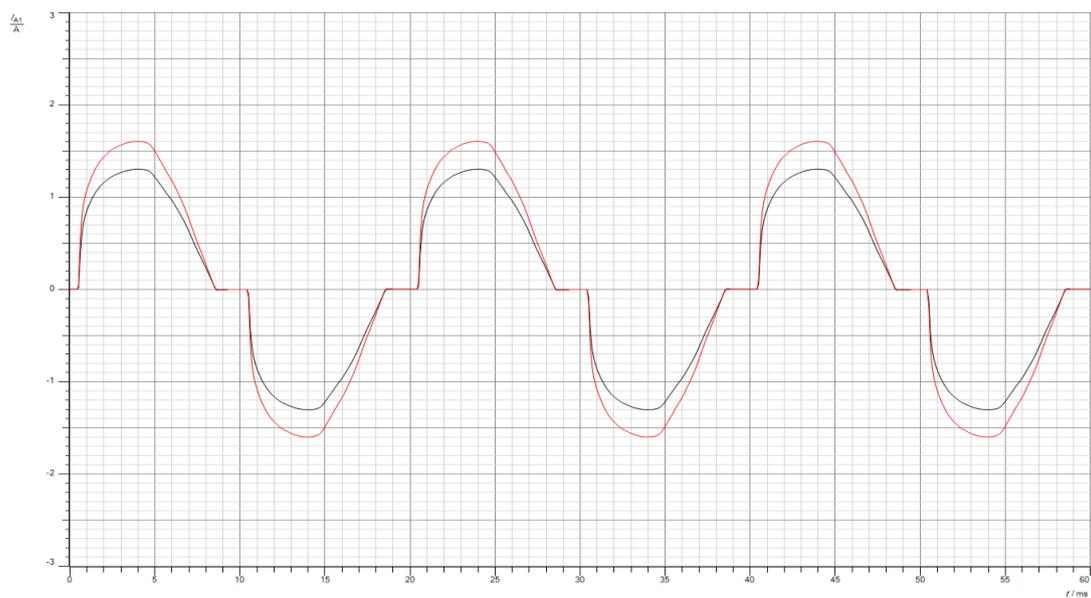
**Fig (III.41) :** la tension inverse du thyristor T1

❖ 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



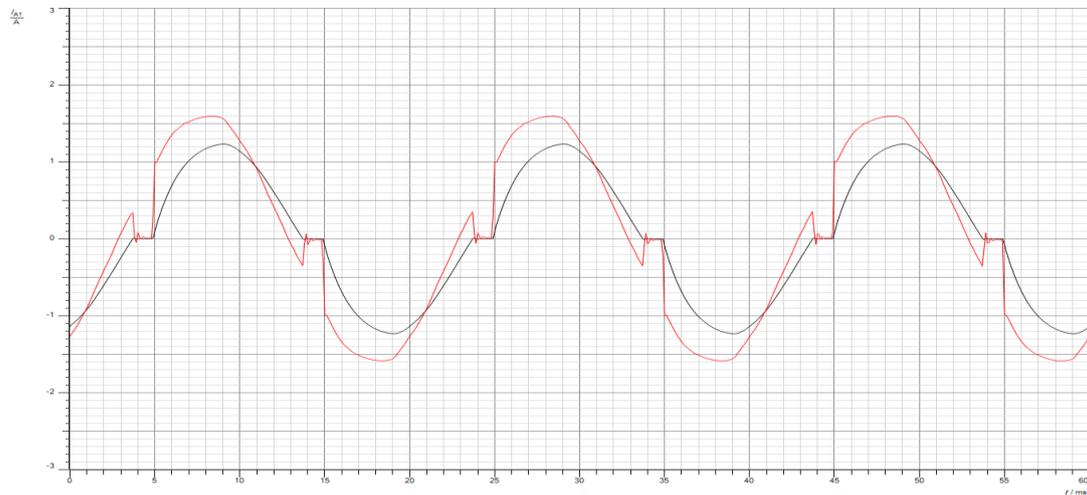
**Fig (III.43) :** la tension et le courant de charge

### III.3.1.2 gradateur monophasé avec une charge RL

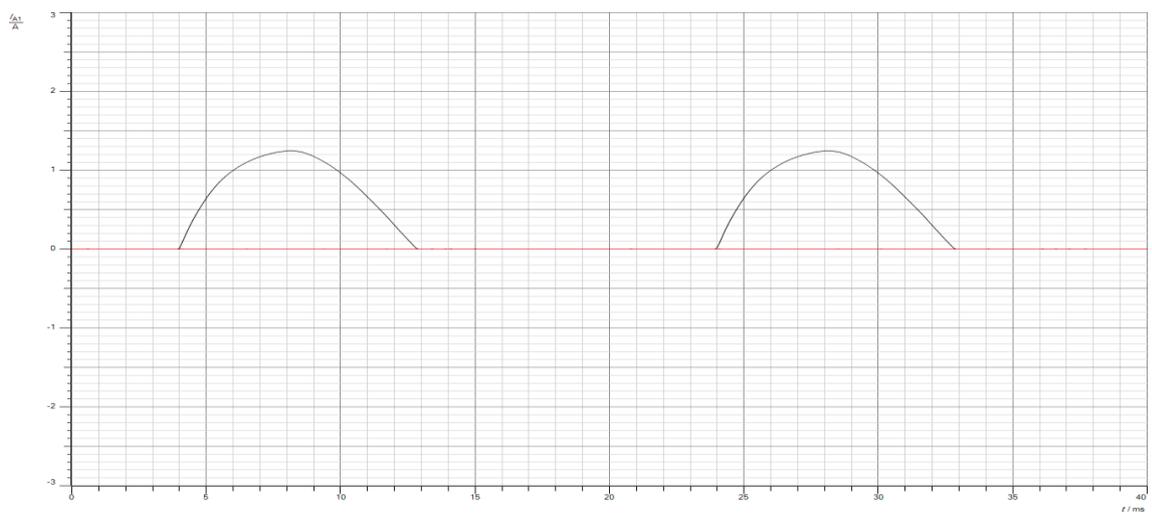
$R=100\ \Omega$   $L=50\text{mH}$   $V_{\text{effs}}=90\text{ v}$

❖ Pour  $\alpha=30^\circ$

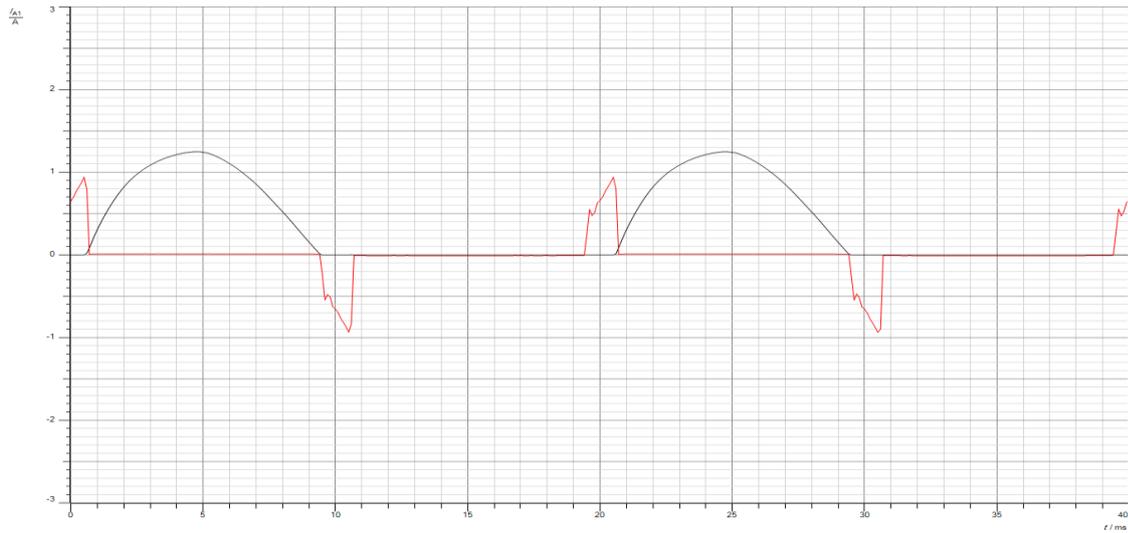
$V_{\text{eff}_{ch}}=95\text{ v}$   $V_{\text{eff}_{ch}}=0.85\text{ A}$   $I_{T1}=0.6\text{ A}$



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



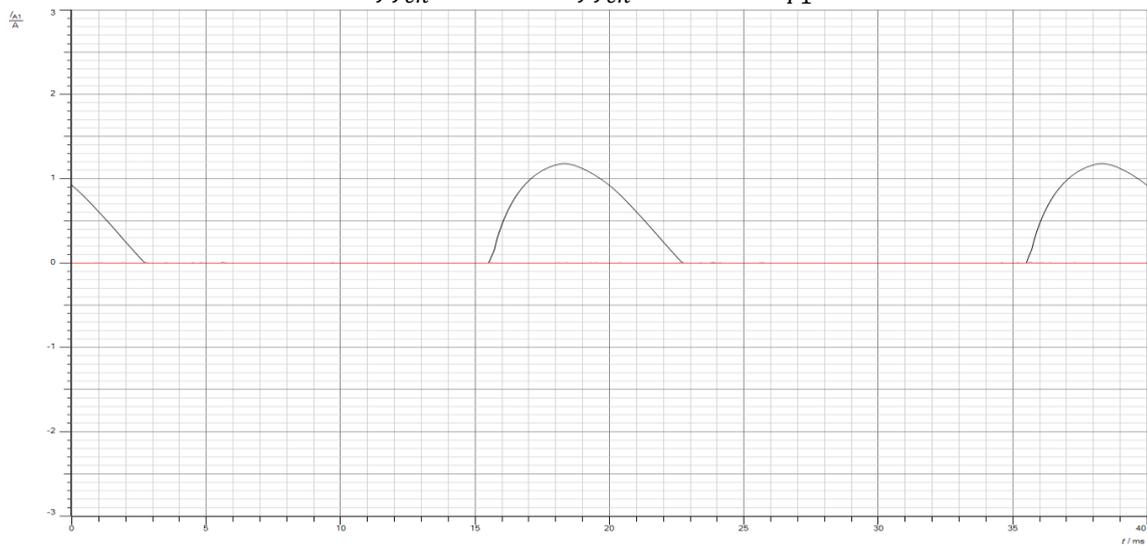
**Fig (III.45) :** la tension inverse du thyristor T1



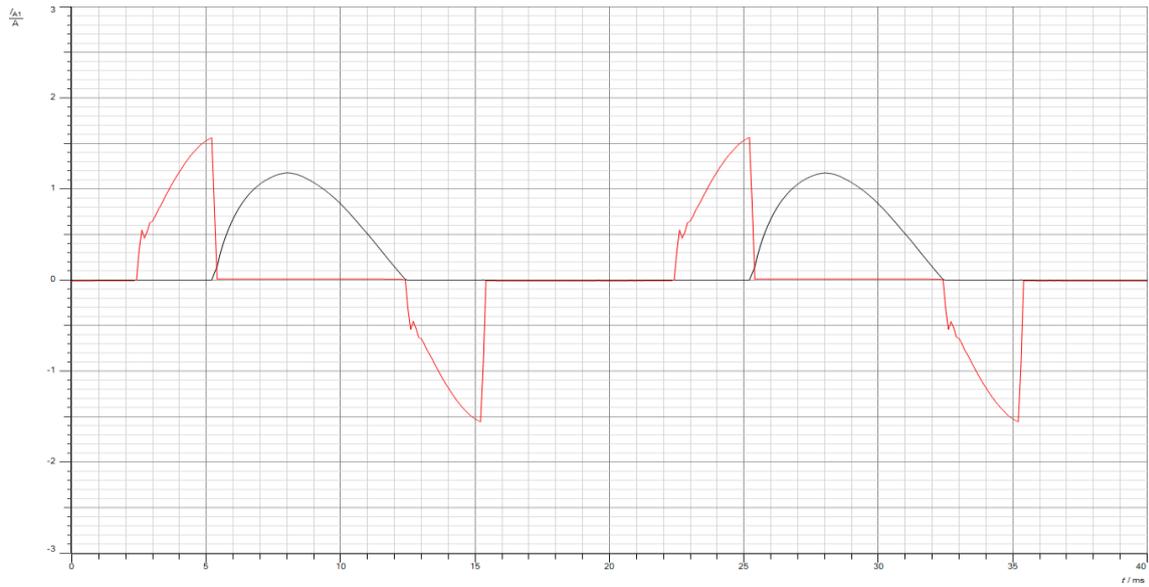
**Fig (III.46) :** la tension inverse et le courant du thyristor T1

❖ 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

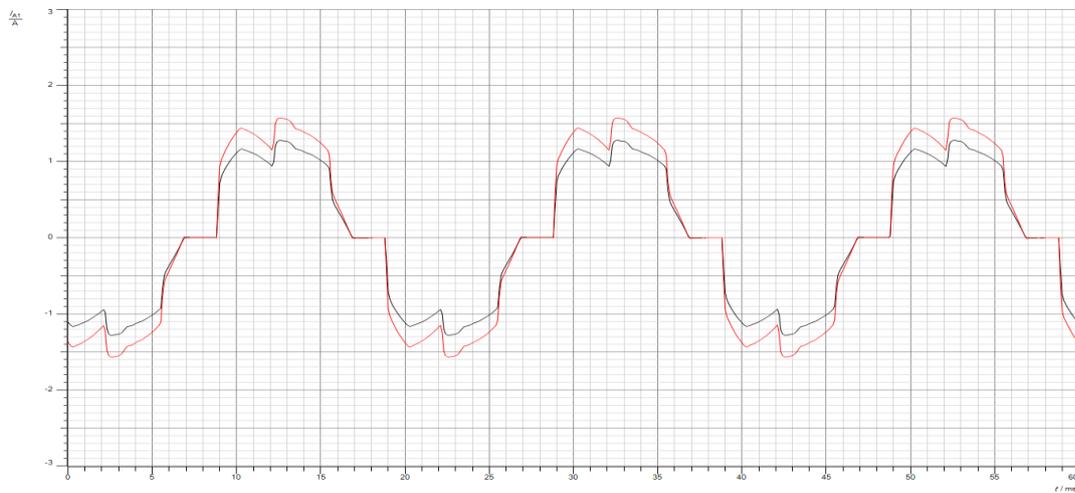


**Fig (III.48) :** la tension inverse et le courant du thyristor T1

### III.3.2 Gradateur triphasé charge résistive R=100 ohm

❖ Pour  $\alpha=30^\circ$

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



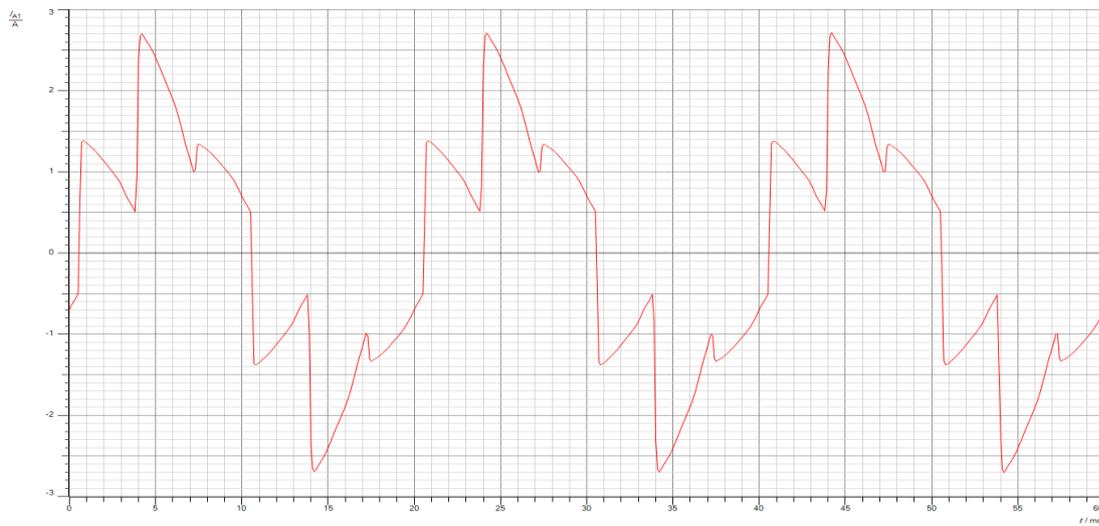
**Fig (III.49) :** La tension simple de la phase 1 et le courant



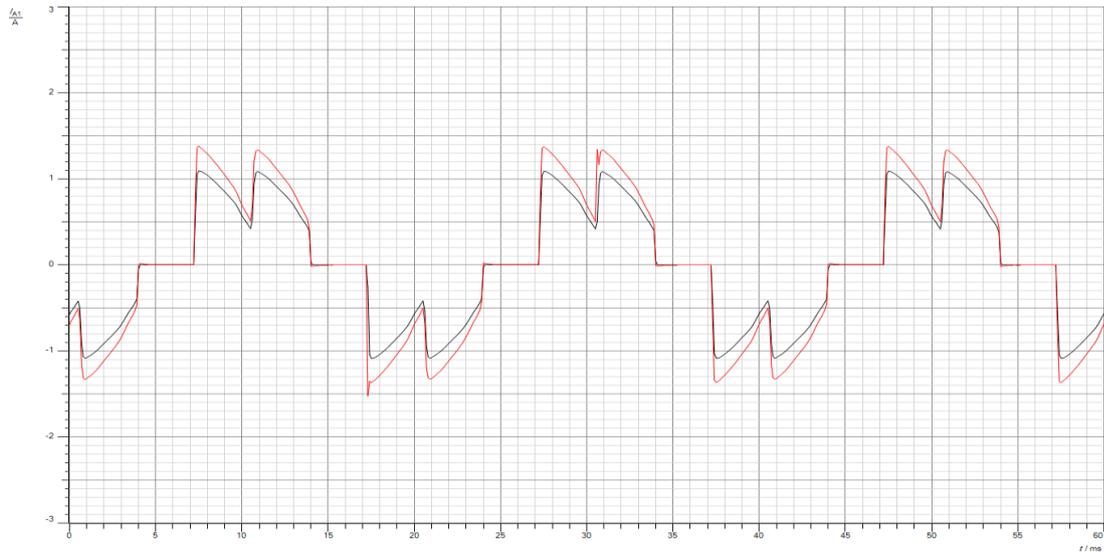
**Fig(III.50) : La tension composée**

❖ Pour  $\alpha=66^\circ$

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



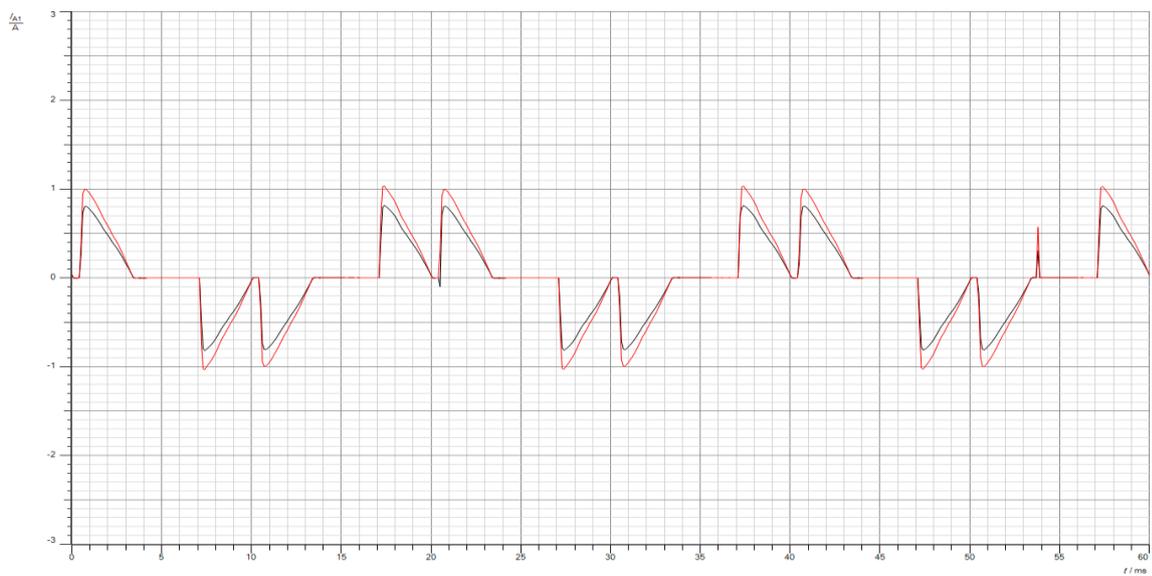
**Fig (III.51) : La tension composée**



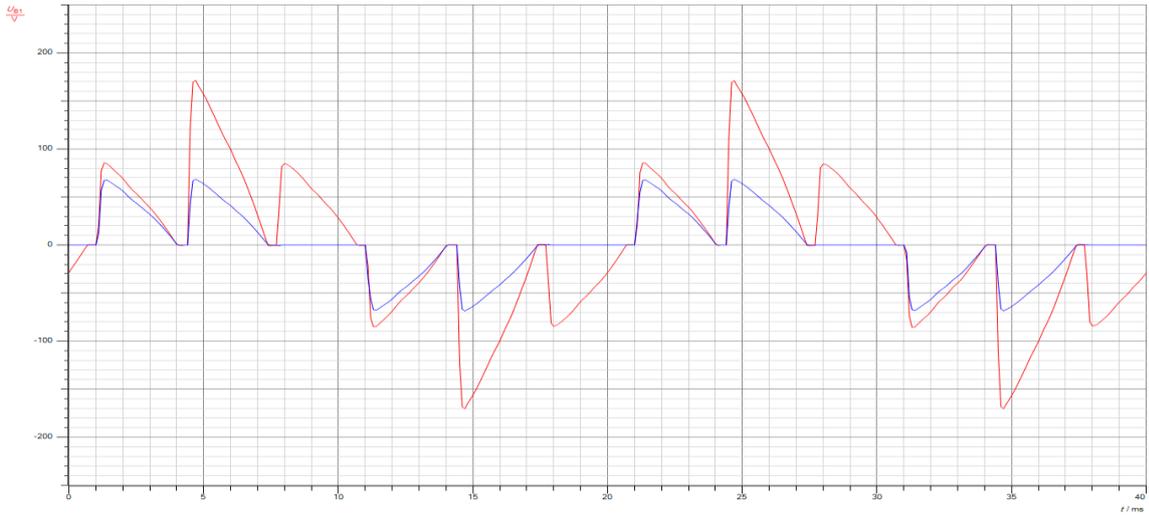
**Fig (III.52) :** La tension simple de la phase 1 et le courant

❖ Pour  $\alpha=94^\circ$

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



**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 :

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

##### 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 précision 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 ».

## Référence

- [1] GUY SEGUIER, Électronique de puissance Structures, commandes, applications 10 eme édition parution aout 2015.
- [2] BOUALI MOHAMED LAMINE, Etude théorique et expérimentale d'un gradateur triphasé commandé, Université BADJIMOKHTAR-ANNABA, 2018.
- [3] RAMDANI khadidja, RAMDANI Oum Elhana , Mémoire master académique , Etude des différents types de convertisseurs utilisés dans la production des énergies renouvelables,université KASDI MERBAH OUARGLA ,2015
- [4]Mme hajji omedaad, cour, convertisseur de puissance ,2010-2011
- [5] otay nabiha , travaux pratique , Electronique de puissance , institut supérieure des Eudes technologique des siliana 2015-2016
- [6] *Ourabi.Lassaad, Support de cours d'électronique de puissance*, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Bizerte
- [7] Hidri Imed, *Support de cours d'électronique de puissance EI2, Les convertisseurs AC-DC et AC-AC*, Institut supérieur des études technologiques de Nabeul
- [8] BENNACEUR YACINE, MASTERE ACADEMIQUE EN ELECTROTECHNIQUE, Commande d'un convertisseur CA/CC et contrôle par différentes, Université D'EL OUED 2015
- [9] <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Gradateur/Triac>
- [10] <https://www.pantechsolutions.net/introduction-of-three-phase-ac-voltage-controller>
- [11] [https://nptel.ac.in/courses/108105066/PDF/L-27\(NKD\)\(PE\)%20\(\(EE\)NPTEL\)%20.pdf](https://nptel.ac.in/courses/108105066/PDF/L-27(NKD)(PE)%20((EE)NPTEL)%20.pdf)
- [12] [http://kaigoldmedal0yolasite.com/resources/power Electronics /AC%20VOLTAGE%20CONTROPLLER%20CIRCUIT.PDF](http://kaigoldmedal0yolasite.com/resources/power%20Electronics%20/AC%20VOLTAGE%20CONTROPLLER%20CIRCUIT.PDF)
- [13] Mammar Khaled ,cours d'électronique de puissance & Application avec SimPowerSystems (Matlab/Simulink),Enseignant Génie Electrique à l'université de Bechar

-



