

# CHAPITRE 3

## **LES CONVERTISSEURS ALTERNATIFS/ ALTERNATIFS**

### **LES GRADATEURS**

## **LES CONVERTISSEURS ALTERNATIFS / ALTERNATIFS**

### **LES GRADATEURS**

#### **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 à 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 mono phasé et circuit résistif seulement pour le gradateur triphasé.

## 2- GRADATEUR MONOPHASÉ COMMANDE EN RETARD DE PHASE :

### 2-1- Débit sur circuit résistif

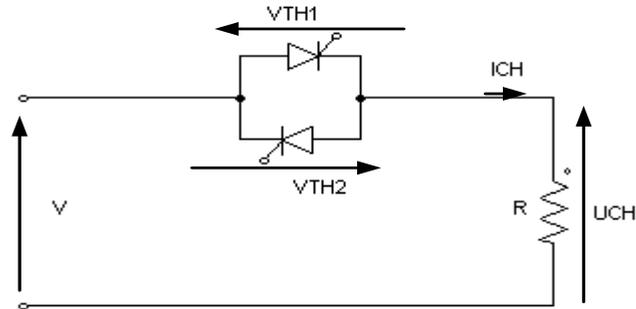


Figure 49 : montage redressement commandé mono-alternance charge résistive

#### a)-Analyse de fonctionnement

Les thyristors TH<sub>1</sub> ou TH<sub>2</sub> sont passants qu'à partir du moment où l'on envoie le signal de gâchette et à la condition que la tension V<sub>AK</sub> soit positive

- ✓ L'amorçage s'effectue avec un retard  $t_0$  après chaque début de période T
- ✓ Le signal de gâchette doit être synchronisé avec celui de la tension V
- ✓ L'angle  $\alpha = \omega t_0$  s'appelle l'angle de retard à l'amorçage.

- Pour  $0 < \theta < \alpha$

on a  $V > 0$  pas d'impulsion sur la gâchette donc TH<sub>1</sub> et TH<sub>2</sub> sont bloqués,

alors  $i_{ch} = 0, v_{ch} = 0$  et  $V_{th} = V$

- pour  $\alpha < \theta < \pi$

on a  $V > 0$ , envoie une impulsion de commande (courant d'amorçage) donc TH<sub>1</sub> devient

conducteur, alors  $V_{CH} = V_{MAX} \sin(\theta)$

- pour  $\pi < \theta < \pi + \alpha$

$V_{CH} = 0, I_{CH} = 0$  le thyristor TH<sub>1</sub> se bloque.

- Pour  $\pi + \alpha < \theta < 2\pi$

TH<sub>2</sub> reçoit une impulsion. Il est alors polarisé en direct, Il s'amorce.  $V_{CH} = V_{MAX} \sin(\theta)$

**b)-Forme d'onde des différentes grandeurs**

Pour un angle d'amorçage  $\alpha = \frac{\pi}{6}$

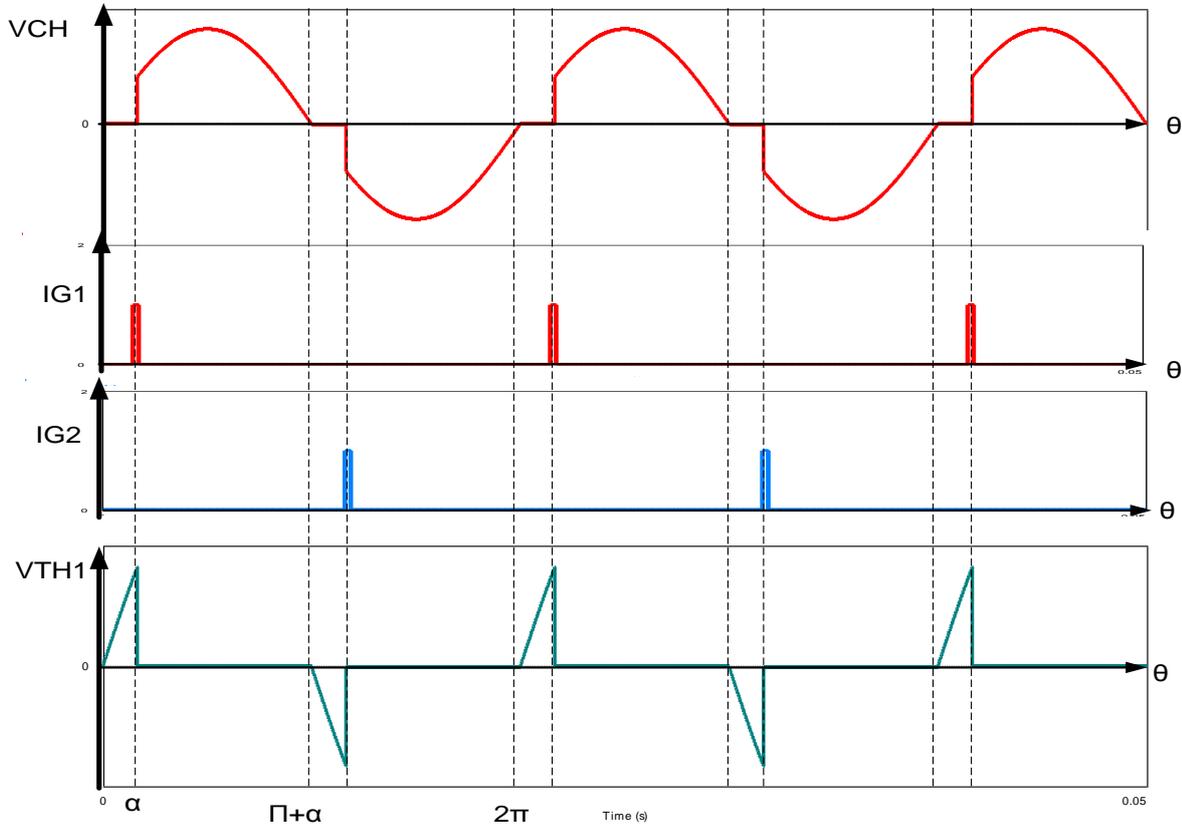


Figure 50 : Forme d'ondes simple alternance charge résistive

**c)-Grandeurs caractéristiques Tension et courant**

Valeur moyenne

$$u_{chmoy} = 0$$

Valeur efficace

$$u_{cheff} = \frac{V_m}{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

Valeur de courant

$$I = V/R$$

la puissance est alors

$$P = \left( \frac{V^2}{R} \right) \left( 1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right)$$

**d)-Remarque**

Le courant  $i(t)$  dans la charge n'est plus sinusoïdal. Il est possible de décomposer son allure en une onde fondamentale (première harmonique) et une série d'harmoniques d'ordre

supérieur. On constate que l'onde fondamentale  $i_1$  est déphasée de l'angle  $\varphi_1$  par rapport à la tension d'alimentation  $V$ .

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

## 2-2- Débit sur circuit inductif

À cause de l'effet inductif, la conduction se poursuit après la fin de l'alternance, jusqu'à  $\theta_1$  l'instant d'annulation du courant  $i(\theta)$ ,

lorsque l'angle  $\alpha$  devient inférieur à  $\varphi$  L'argument du récepteur, le fonctionnement dépend de la nature des signaux appliqués aux gâchettes :

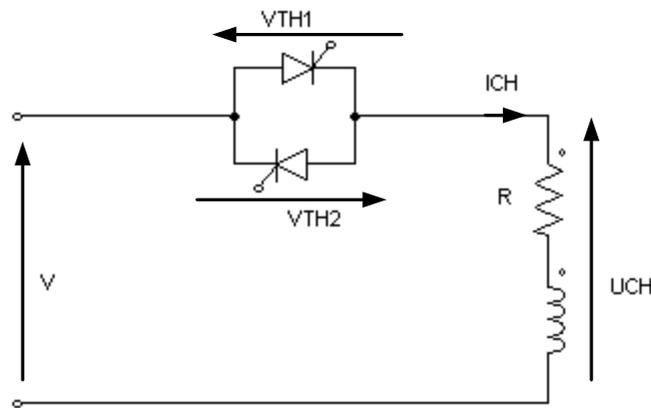


Figure 51 : Montage simple alternance charge inductive

### a)-Analyse de fonctionnement pour $\varphi < \alpha < \pi$

$$V_{ch} = Ri_{ch} + L \frac{di_{ch}}{dt} = V_{MAX} \sin(\omega t)$$

Le courant dans la charge est la somme d'une composante libre

$i_{chl}$  caractérisant le régime transitoire et d'une composante forcée  $i_{chf}$  caractérisant le régime permanent.

$$i_{ch} = i_{chl} + i_{chf}$$

La composante  $i_{chl}$  est solution de l'équation sans second membre

$$V_{ch} = Ri_{ch} + L \frac{di_{ch}}{dt} = 0 ; i_{ch} = ke^{-\frac{Rt}{L}}$$

La composante  $i_{chf}$  est solution de l'équation sans second membre

$$V_{ch} = Ri_{ch} + L \frac{di_{ch}}{dt} = V_{MAX} \sin(\omega t) ; I_{ch} = I_{chMAX} \sin(\theta - \varphi)$$

et

$$I_{chMAX} = \frac{V_{MAX}}{\sqrt{(R^2 + (L\omega)^2)} ; \operatorname{tg}(\varphi) = \frac{L\omega}{R} = Q ; Z = \sqrt{R^2 + L\omega^2}$$

la solution est

$$i_{ch} = \frac{V_m}{Z} \left[ \sin(\theta - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) e^{-\frac{\theta - \alpha}{\varrho}} \right]$$

- pour  $\alpha < \theta < \theta_1$

TH<sub>1</sub> reste conducteur, il se bloque avant l'amorçage de TH<sub>2</sub> à  $\pi + \alpha$

- pour  $\theta_1 < \theta < \pi + \alpha$

aucun thyristor n'est amorcé,  $i(\theta) = 0$ , et  $v_{TH1}(\theta) = -v_{TH2}(\theta) = v(\theta)$ .

- pour  $\pi + \alpha < \theta < 2\pi$

TH<sub>2</sub> devient conducteur, il se bloque pour  $\theta = \theta_1 + \pi$  quand le courant qui le traverse s'annule.

- Pour  $\theta = \alpha + 2\pi$

on a TH<sub>1</sub> est à nouveau amorcé le phénomène devient périodique, il est donc possible de régler le courant on agissant sur  $\alpha$  pour  $\varphi < \alpha < \pi$ .

### b)-Forme d'onde des différentes grandeurs

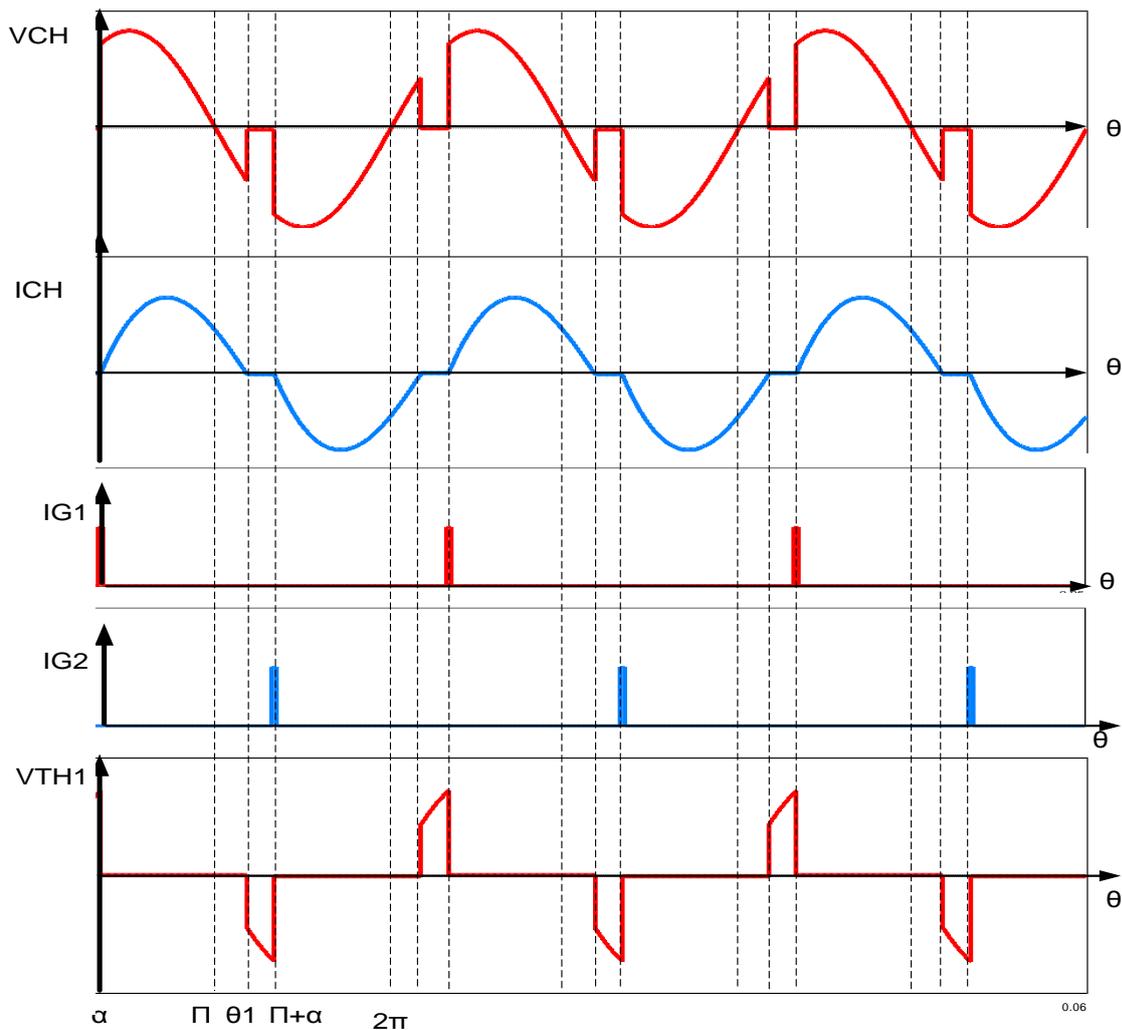


Figure 52: Forme d'ondes simple alternance charge inductive

**c)-Analyse de fonctionnement pour  $\alpha < \varphi$** 

Lorsque l'angle  $\alpha$  devient inférieur à  $\varphi$ , le fonctionnement dépend de la nature des signaux appliqués aux gâchettes :

**d)-Cas d'impulsion de gâchette de courte durée**

$$i_{ch} = \frac{V_m}{Z} \left[ \sin(\theta - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) e^{-\frac{\theta - \alpha}{\varrho}} \right]$$

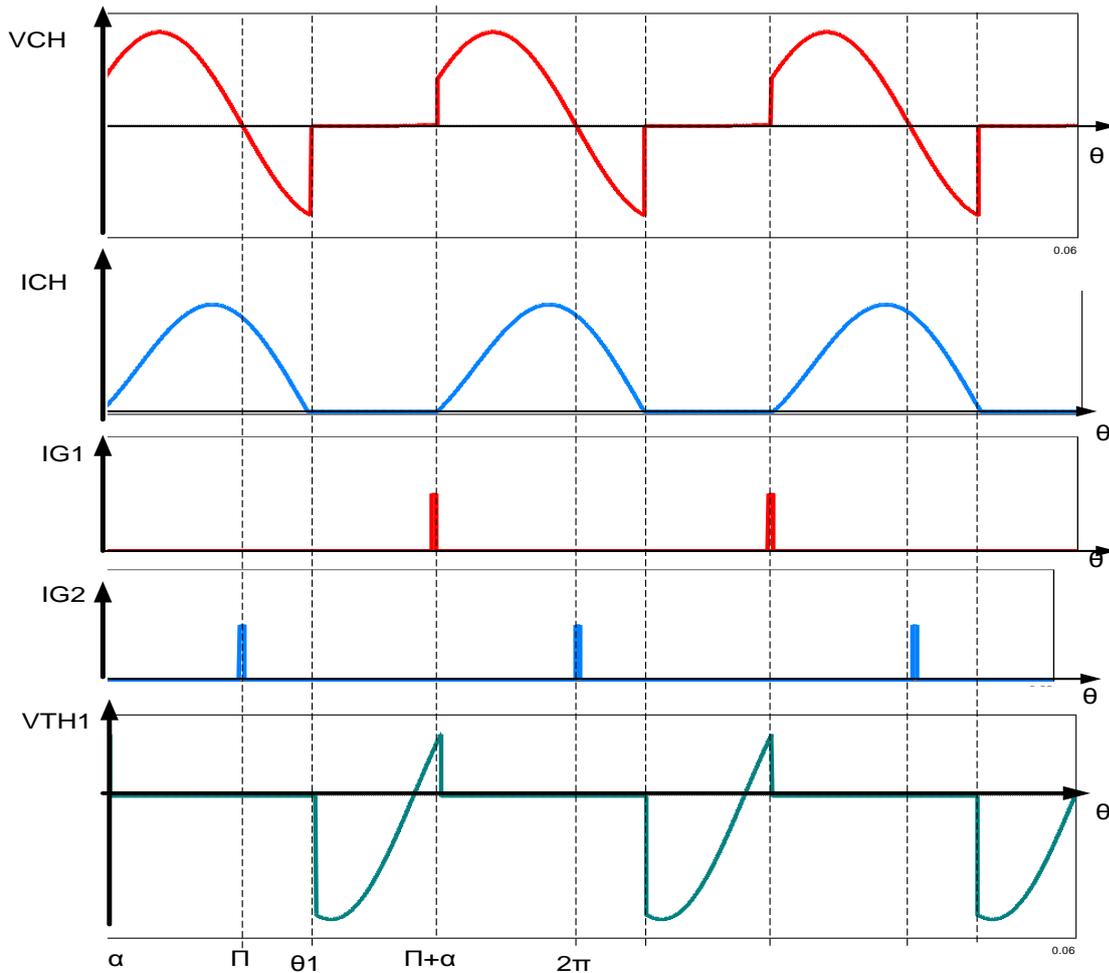
Th<sub>1</sub> entre en conduction. Le courant  $i(\theta)$  est, encore

le courant s'annule pour  $\theta_1$  supérieur à  $\alpha + \pi$ .

L'impulsion envoyée sur la gâchette du thyristor TH<sub>2</sub> pour  $\theta = \alpha + \pi$  trouve ce redresseur avec tension anodique négative, elle est donc sans effet. Quand  $V_{TH2}(\theta)$  devient positif pour  $\theta = \theta_1$  ; il n'y a plus de courant sur la gâchette de TH<sub>2</sub>.

Le montage fonctionne en redresseur simple alternance avec un courant de sortie unidirectionnel.

**e)-Forme d'onde des différentes grandeurs**



**Figure 53 :** Formes d'ondes des grandeurs électriques d'un gradateur monophasé

Charge R-L pour  $\psi < \varphi_R$  et impulsion des gâchettes courte durée

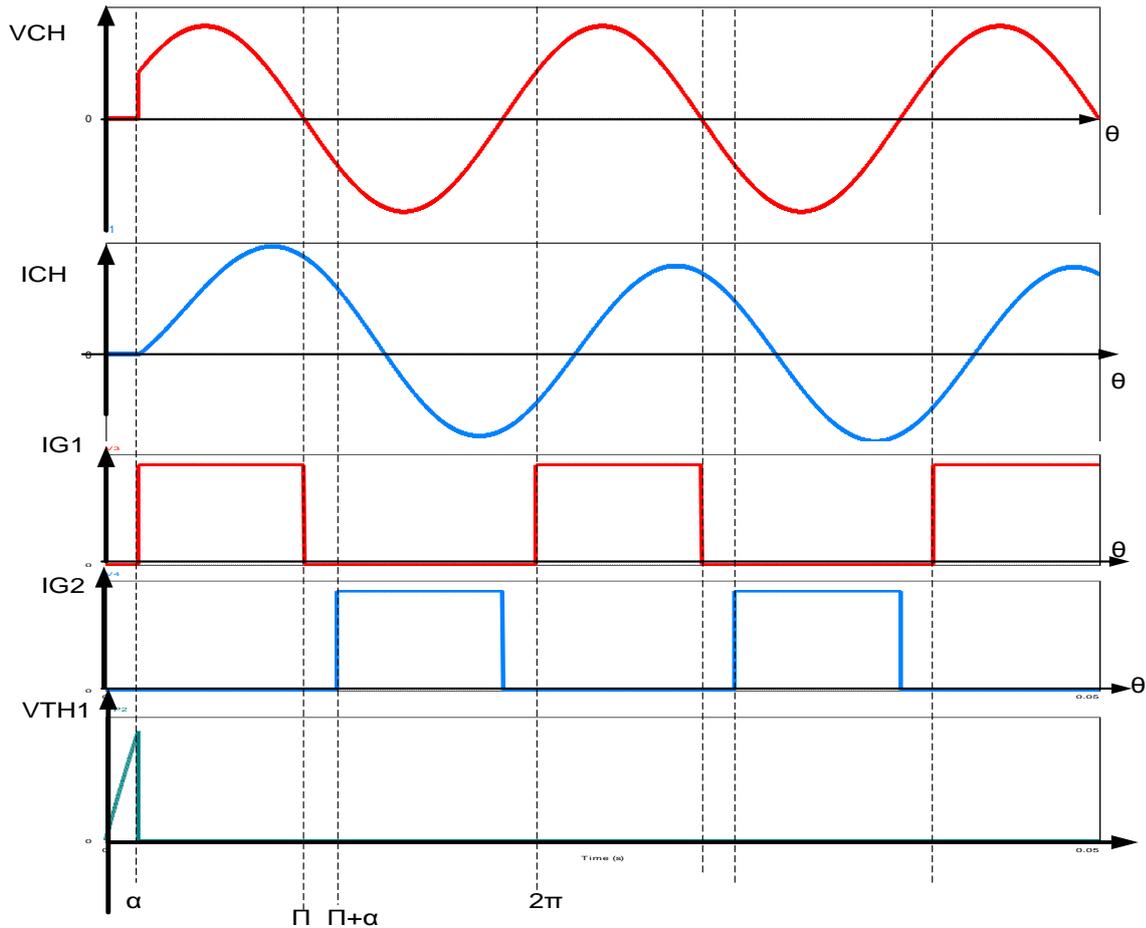
#### f)-Cas d'impulsion de gâchette de largeur suffisante

On amorce le thyristor TH<sub>1</sub>, il reste passant jusqu'à l'instant  $\theta = \theta_1$  comme précédemment.

Pour  $\theta = \theta_1$ , la tension aux bornes du thyristor TH<sub>2</sub> devient positive et sa gâchette alimentée depuis  $\theta = \alpha + \pi$  reçoit encore un courant de déblocage; ce redresseur entre donc en conduction. Au bout de quelques périodes, le courant  $i(\theta)$  devient sinusoïdal.

Le passage de l'angle  $\alpha$  à une valeur inférieure à  $\varphi$  est, maintenant sans inconvénient

#### g)-forme d'onde des différentes grandeurs



*Figure 54 : Formes d'ondes des grandeurs électriques d'un gradateur monophasé Charge R-L pour  $\psi < \varphi_R$  et impulsion des gâchettes de largeur suffisante*

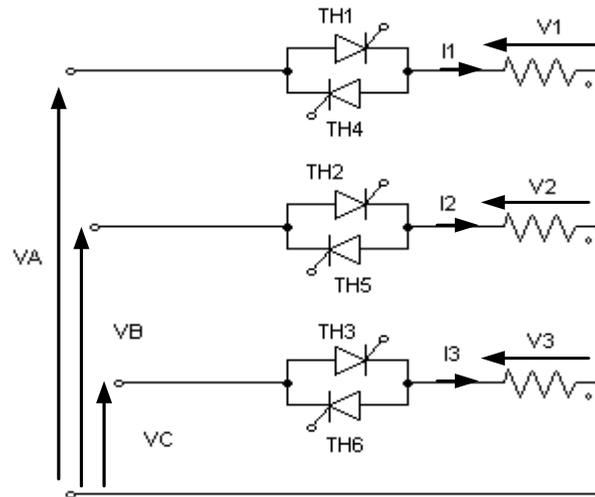
**Conclusion :** le fonctionnement en gradateur est, possible que si  $\varphi < \alpha < \pi$ .

### 1- GRADATEUR TRIPHASÉ COMMANDE EN RETARD DE PHASE :

Contrairement au monophasé, les gradateurs triphasés donnent des meilleures performances. Il existe plusieurs façons d'associer l'interrupteur avec la charge. Les vrais gradateurs triphasés sont formés de trois ensembles de deux thyristors montés entre le réseau et la charge couplés en triangle ou en étoile.

#### 3-1-Débit sur charge résistive avec neutre :

Lorsque l'alimentation et la charge possèdent effectivement la structure en étoile et offrent des points communs accessibles, on peut envisager de relier ces derniers. On obtient alors l'équivalent de trois gradateurs monophasés.

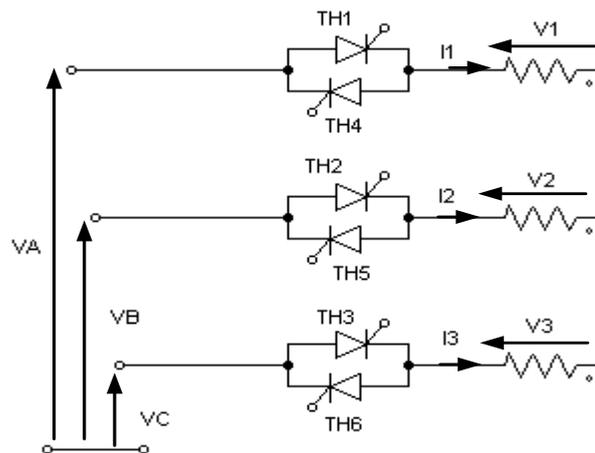


*Figure 55 : montage gradateur triphasé charge résistive avec neutre*

Ce dispositif, qui a l'avantage de faciliter la commande puisqu'elle ne nécessite pas d'impulsion de confirmation, présente l'inconvénient de laisser circuler en ligne les harmoniques de courant multiples de trois générés par les gradateurs monophasés ( alors que ces composantes, qui forment un système homopolaire, ne peuvent pas exister dans le montage "3 fils"). C'est pourquoi, même si la structure le permet, on s'abstient généralement de relier les neutres.

### 3-2-Débit sur charge résistive sans neutre :

L'étude du gradateur triphasé va se faire avec une charge purement résistive en étoile sans neutre relié.



*Figure 56 : montage gradateur triphasé charge résistive sans neutre*

Vu la structure du montage, la conduction isolée d'un interrupteur est impossible. Il ne pourra donc y avoir que trois possibilités:

a) Un interrupteur est commandé : Pas de conduction du courant possible (pas de boucle pour le courant)

b) deux interrupteurs sont commandés :

Les impédances dans chaque phase conductrice étant identiques, la tension composée correspondante se répartit de façon égale entre les deux éléments concernés. Ainsi, par

exemple, si [TH<sub>1</sub>;TH<sub>4</sub>] et [TH<sub>2</sub>;TH<sub>5</sub>] sont passants, on a 
$$V_1(\theta) = \frac{1}{2}(V_A(\theta) - V_B(\theta)) = -V_2$$

[TH<sub>3</sub>;TH<sub>6</sub>] bloqué. La loi des mailles, appliquée aux phases 2 et 3 donne 
$$V_C - V_{TH3} - V_3 + V_2 - V_B = 0$$
.

Comme  $v_3 = 0$  et  $V_2(\theta) = \frac{1}{2}(V_B(\theta) - V_A(\theta))$ , on en déduit, tous calculs faits, que 
$$V_{TH3} = \frac{2}{3}V_C$$

c) trois interrupteurs sont commandés :

L'installation correspond alors à une installation triphasée équilibrée

On se limitera au tracé des tensions de sortie exemple  $v_1$ , les autres étant identiques à des décalages de  $2\pi/3$  près).

L'étude complète montre que, suivant la valeur de l'angle de retard à l'amorçage de chaque thyristor, trois modes de fonctionnement sont possibles.

**1er Cas** où :  $0 < \alpha < \frac{\pi}{3}$

il y a 3 ou 2 thyristors conducteurs :

- $\alpha < \theta < \frac{\pi}{3}$  TH<sub>1</sub>, TH<sub>5</sub> et TH<sub>3</sub> conducteurs d'où  $V_1(\theta) = V_A(\theta)$ ,  $V_2(\theta) = V_B(\theta)$ ,  
 $V_3(\theta) = V_C(\theta)$ .
- $\frac{\pi}{3} < \theta < \frac{\pi}{3} + \alpha$  TH<sub>1</sub> et TH<sub>5</sub> conducteurs d'où  $V_1(\theta) = \frac{1}{2}(V_A(\theta) - V_B(\theta))$ ,  $V_2(\theta) = -V_1(\theta)$ ,  
 $V_3(\theta) = 0$ .
- $\frac{\pi}{3} + \alpha < \theta < \frac{2\pi}{3}$  TH<sub>1</sub> et TH<sub>5</sub> conducteurs d'où  $V_1(\theta) = V_A(\theta)$ ,  $V_2(\theta) = V_B(\theta)$ ,  
 $V_3(\theta) = V_C(\theta)$ .

- Ect ..

La tension de sortie a pour valeur efficace 
$$V_1 = V \sqrt{1 - \frac{3\alpha}{2\pi} + \frac{3}{4\pi} \sin(2\alpha)}$$

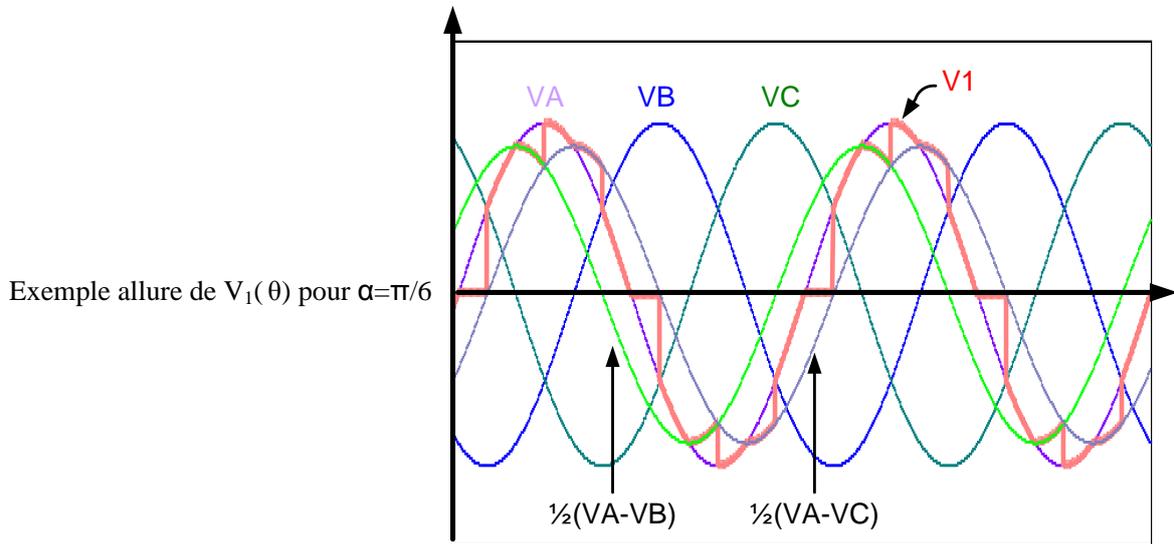


Figure 57 : allure de  $V_1(\theta)$  pour  $\alpha = \pi/6$

2<sup>ème</sup> Cas où :  $\frac{\pi}{3} < \alpha < \frac{\pi}{2} + \alpha$

il y a 2 thyristors conducteurs :

- $\alpha < \theta < \frac{\pi}{3} + \alpha$  TH<sub>1</sub> et TH<sub>5</sub> conducteurs d'où  $V_1(\theta) = \frac{1}{2}(V_A(\theta) - V_B(\theta))$ ,  $V_1(\theta) = -V_2(\theta)$ ,

et  $V_3(\theta) = 0$ .

- $\frac{\pi}{3} + \alpha < \theta < \frac{2\pi}{3}$  TH<sub>1</sub> et TH<sub>5</sub> conducteurs d'où  $V_1(\theta) = \frac{1}{2}(V_A(\theta) - V_B(\theta))$ ,

$V_1(\theta) = -V_3(\theta)$ ,  $V_2(\theta) = 0$ .

- Ect ..

La tension de sortie a pour valeur efficace 
$$V_1 = V \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \sin(\frac{\pi}{6} + 2\alpha)}$$

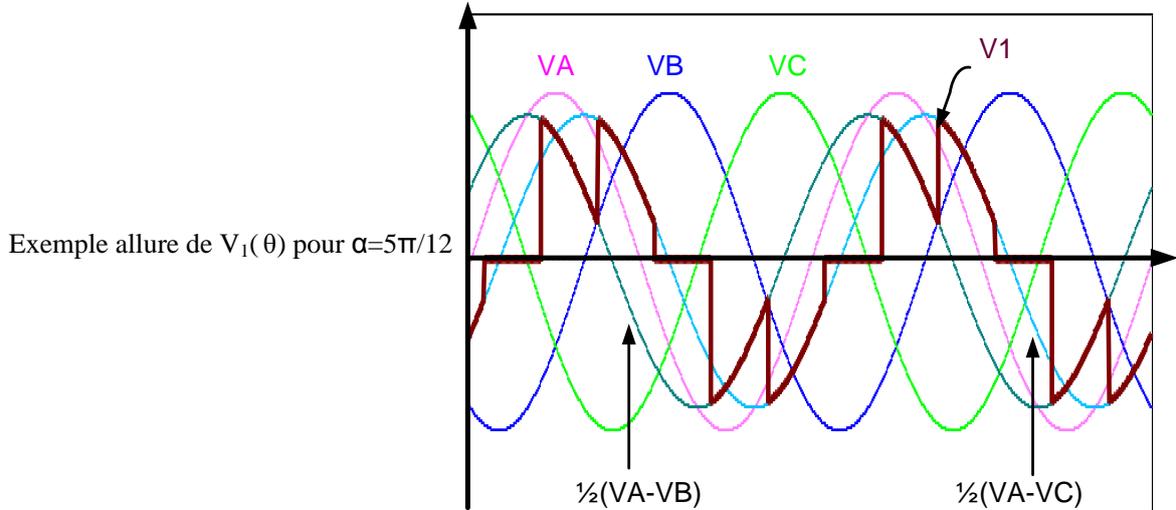


Figure 58 : allure de  $V_1(\theta)$  pour  $\alpha=5\pi/12$

3<sup>ème</sup> Cas où :  $\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{5\pi}{6}$

il y a toujours 2 ou 0 thyristor passant; il faut envoyer des « impulsions de conformations » : quand on débloque un redresseur, il faut en même temps envoyer une impulsion sur la gâchette de celui qui avait entré en conduction un sixième de période auparavant

- $\alpha < \theta < \frac{5\pi}{6}$  TH<sub>1</sub> et TH<sub>5</sub> conducteurs d'où  $V_1(\theta) = V_2(\theta) = V_3(\theta) = 0$ .
- $\alpha + \frac{\pi}{3} < \theta < \frac{5\pi}{6} + \frac{\pi}{3}$  TH<sub>1</sub> et TH<sub>6</sub> conducteurs d'où  $V_1(\theta) = \frac{1}{2}(V_A(\theta) - V_C(\theta))$ ,  
 $V_1(\theta) = -V_3(\theta)$ ,  $V_2(\theta) = 0$ .
- Ect ..

La tension de sortie a pour valeur efficace 
$$V_1 = V \sqrt{\frac{5}{4} - \frac{3}{2} \frac{\alpha}{\pi} + \frac{3}{4\pi} \sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha\right)}$$

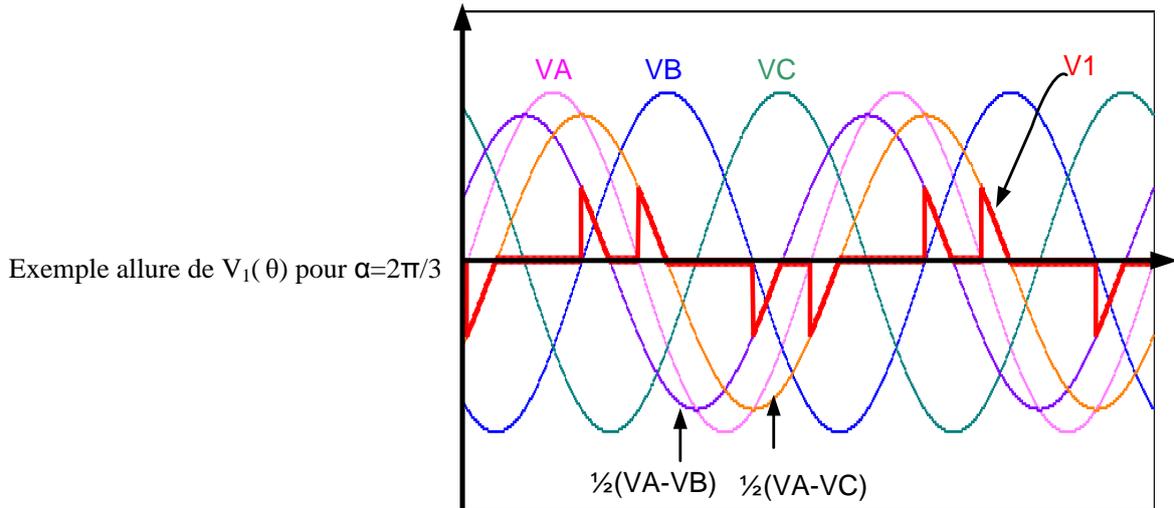


Figure 59 : allure de  $V_1(\theta)$  pour  $\alpha=2\pi/3$

**4-GRADATEURS COMMANDES PAR TRAIN D’ONDES :**

Il fournit à partir du réseau alternatif monophasé ou triphasé, par séries, des périodes entières consécutives de tension (amplitude et fréquence du réseau) séparées par des absences totales de tension à un rythme modulable.

Il permet donc le réglage d’énergie.

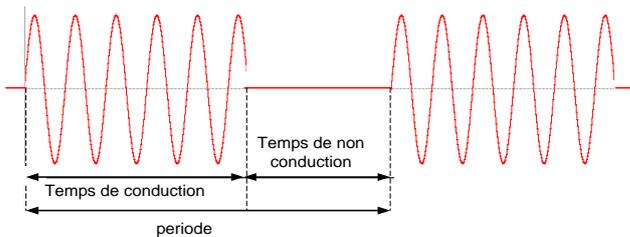


Figure 60 : tension de commande d’un gradateur à train d’ondes

La puissance est fournie pendant le temps de conduction.

Le rapport du temps de conduction sur la période de modulation donne le pourcentage de la puissance max transmise.

Exemple : Si  $t_{on}= 80$  ms et  $T= 200$  ms et que cette tension alimente une résistance de chauffage de 1 kW, la puissance moyenne transmise est alors :

Il ne crée pas de perturbations radioélectriques (harmoniques) et ne dégrade pas le facteur de puissance de l'installation.

Les gradateurs par trains d'ondes sont utilisés avec des machines à fortes inerties (applications surtout en électrothermie: four à résistance).

Les gradateurs peuvent aussi fonctionner en mode tout ou rien (contrôle de température). On parle alors de contacteur statique.

#### **4-1-Applications des gradateurs:**

On peut faire varier la tension d'alimentation d'un moteur, il est aussi utilisé pour faire démarrer un moteur asynchrone à vide (ou faiblement chargé), avec ce type de démarrage, on peut limiter le courant d'appel.

##### **4-1-1-la commande de la puissance dissipée par effet JOULE dans une résistance.**

Il est possible alors de régler la puissance thermique émise par une plaque chauffante ou une lampe à incandescence ou le four électrique

##### **4-1-2-la commande en vitesse de moteurs à courant alternatif**

Un exemple de commande en vitesse de moteurs à courant alternatif c'est le compensateur statique. c'est un montage permettant la commande de puissance réactive

La puissance réactive absorbée dépend de la commande par l'angle de retard à l'amorçage  $\delta$ .

En réalité, cette puissance est « fournie » au réseau. Il y a réglage de Q en fonction de  $\delta$  et la possibilité d'améliorer de manière souple le facteur de puissance du réseau...

## ***BIBLIOGRAPHIE***

-Gy.Seguir : (1995) : **Les convertisseurs de l'électronique de puissance Tom 3** (TEC&DOC)

-Gy.Seguir : (1995) : **Les convertisseurs de l'électronique de puissance Tom 4**  
(TEC&DOC)

-Francis Milsant (1995) : **Machines synchrones et asynchrones Commande électronique**  
(ellipses)

-Jean Louis DALMASSO : **Electronique de puissance - commutation.** (DIA-BELIN)

-A.Cunière, G.Feld, M.Lavabre :(2012) : **Electronique de Puissance** (Casteilla)

-Jacques Laroche :(2005) : **Electronique de Puissance Convertisseur** (Dunod)

-Lavabre.M (2001) : **Electronique de puissance conversion de l'énergie** (Casteilla) -

Gy .Seguir : (1999) : **Electronique de puissance** 7<sup>em</sup> édition (Dunod)

-Alain Hebert, Claude Naudet et Michel Pinard (1997) : **Machines Electriques  
Electronique de Puissance** (DUNOD)

-Gy.Chateiger, Michel Boès, Daniel Bouix, Jaque Vaillant (2006) : **Manuel de Génie  
Electrique**(Dunod)

## ***Nétographie***

Fabrice Sincère ; version 2.0 <http://perso.orange.fr/fabrice.sincere>