

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 monophasé et circuit résistif seulement pour le gradateur triphasé.

2. GRADATEUR MONOPHASÉ COMMANDE EN RETARD DE PHASE :

2.1 Débit sur circuit résistif

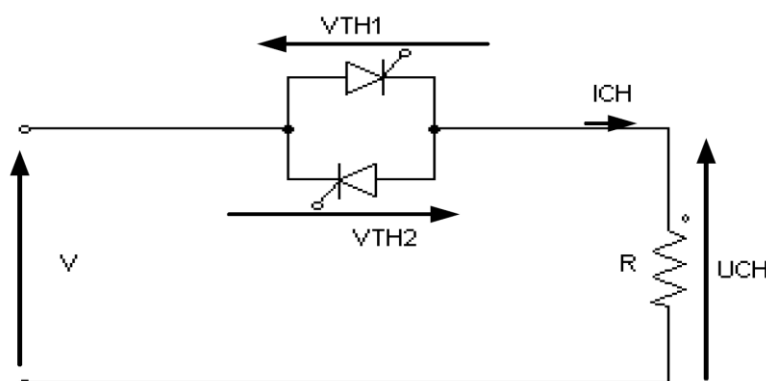


Figure 1 : montage redressement commandé mono-alternance charge résistive

a. Analyse de fonctionnement

Les thyristors TH1 ou TH2 sont passants qu'à partir du moment où l'on envoie le signal de gâchette et à la condition que la tension VAK 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 TH1 et TH2 sont bloqués, Alors $i_{ch} = 0$, v_{ch} et $V_{th} = V$
 - pour $\alpha < \theta < \pi$
On a $V > 0$, on envoie une impulsion de commande (courant d'amorçage) donc TH1 devient conducteur, alors $V_{CH} = V_{MAX} \sin \theta$
 - pour $\pi < \theta < \pi + \alpha$
 $V_{CH} = 0$, $I_{CH} = 0$ Le thyristor TH1 se bloque.
 - Pour $\pi + \alpha < \theta < 2\pi$
TH2 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 $\alpha = \frac{\pi}{6}$

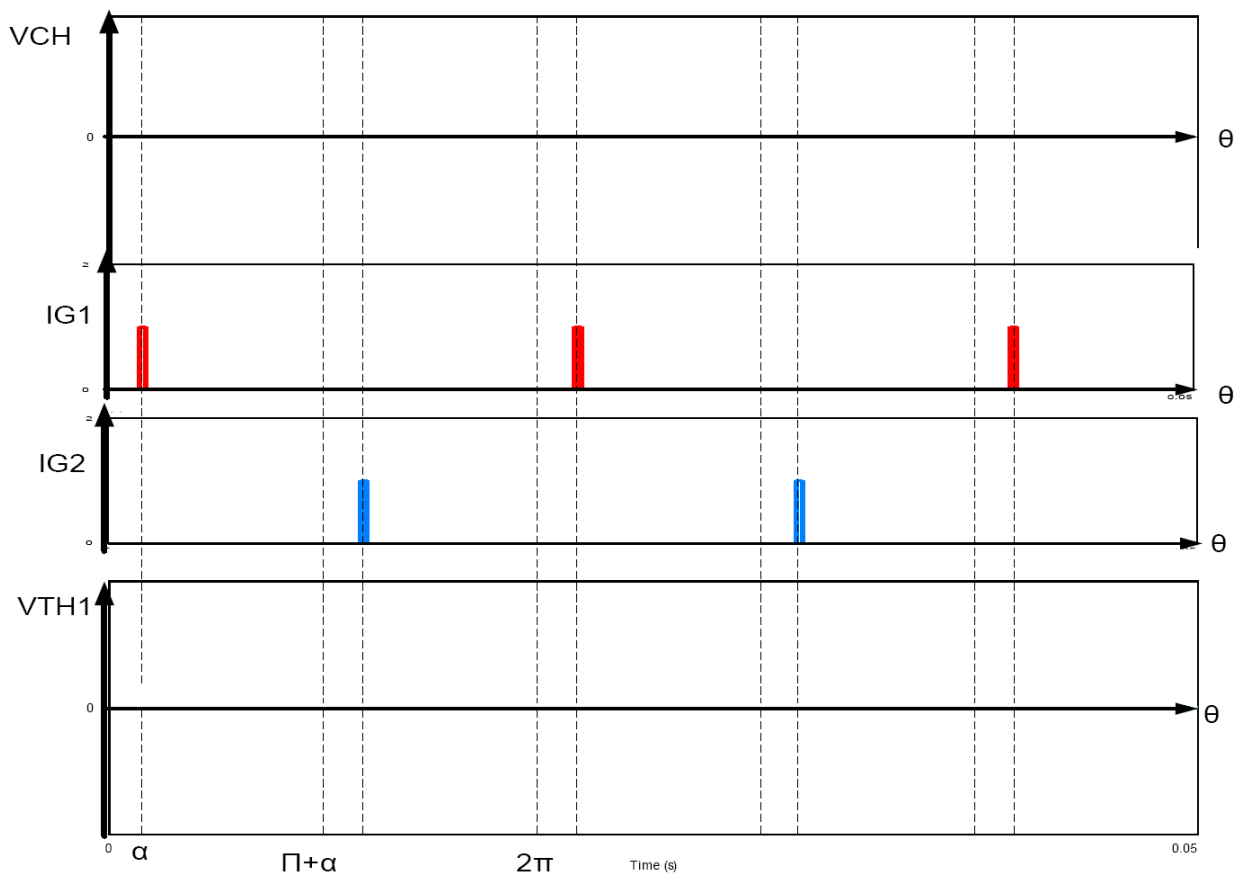
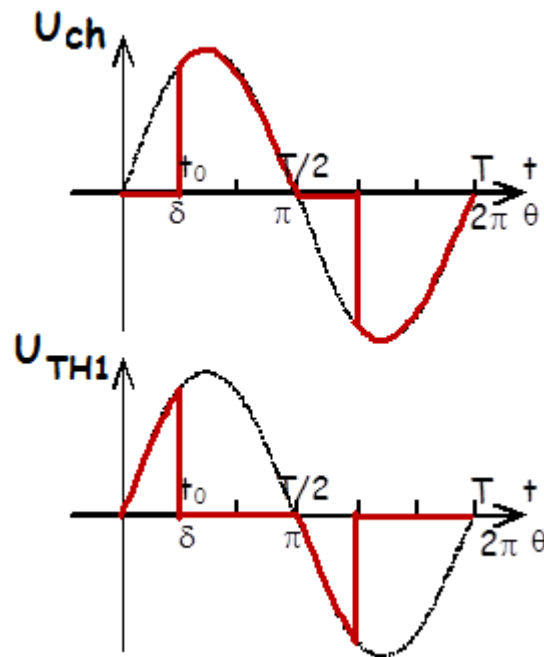


Figure 2 : Forme d'ondes simple alternance charge résistive



c. Grandeurs caractéristiques Tension et courant

Valeur moyenne	Valeur efficace	Valeur de courant
$u_{chmoy} = 0$	$u_{cheff} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$	$I = \frac{V}{R}$
$P = \left(\frac{V^2}{R}\right) \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right)$		

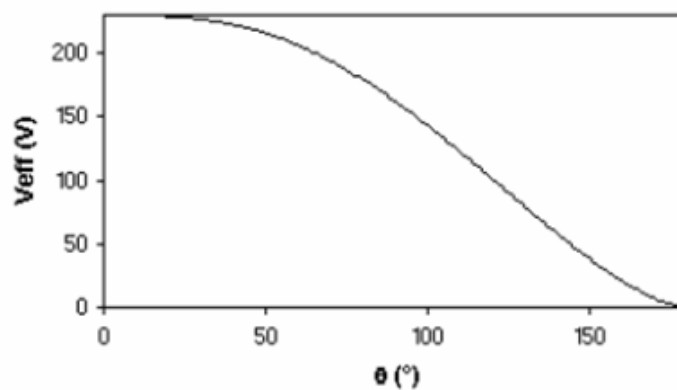


Figure 2 : Variation de u_{cheff} en fonction de α

Exemple d'application : Commande de chauffage d'un radiateur

Un radiateur de résistance $R=35\Omega$ est commandé par un gradateur.

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

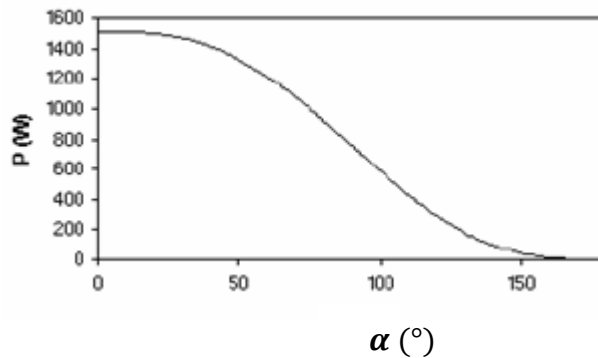


Figure 3 : Variation de la puissance P en fonction de α

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 i1 est déphasée de l'angle φ1 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 θ1 l'instant d'annulation du courant i(θ), lorsque l'angle devient inférieur à φ L'argument du récepteur, le fonctionnement dépend de la nature des signaux appliqués aux gâchettes :

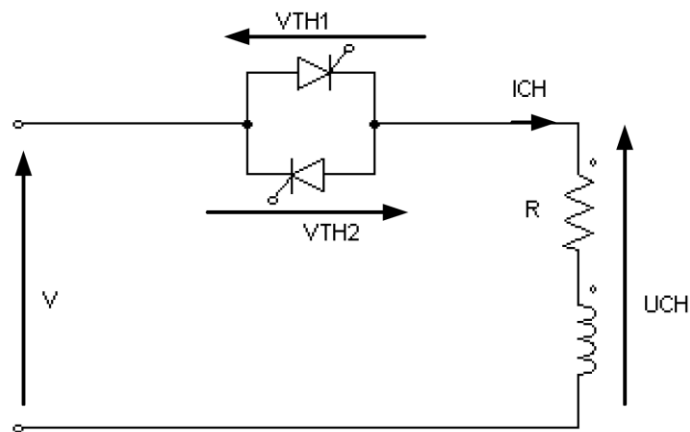


Figure 4 : Montage simple alternance charge inductive

a. Analyse de fonctionnement pour φ < α < π

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

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

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

La composante i_{chf} est la solution de l'équation avec second membre

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

$$\text{avec } I_{chMAX} = \frac{V_{MAX}}{\sqrt{(R^2 + (L\omega)^2)}} ,$$

$$\text{tg}(\varphi) = \frac{L\omega}{R} = Q$$

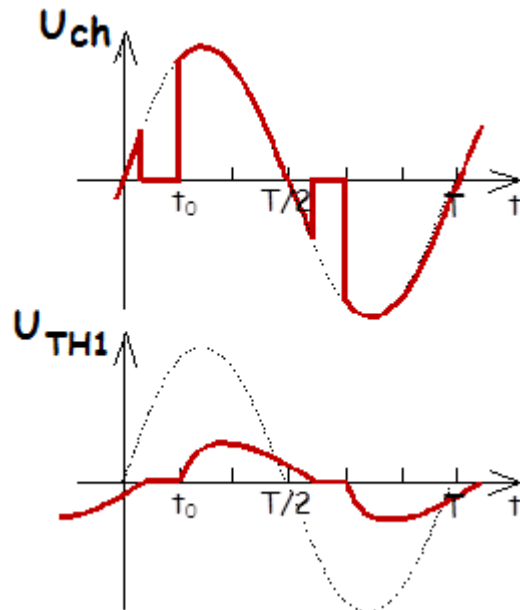
et

$$Z = \sqrt{R^2 + L\omega^2}$$

la solution est

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

- pour $\alpha < \theta < \theta_1$
TH1 reste conducteur, il se bloque avant l'amorçage de TH2 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 $\pi + \alpha < \theta < 2\pi$
TH2 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 TH1 est à nouveau amorcé le phénomène devient périodique, il est donc possible de régler le courant on agissant sur α pour $\varphi < \alpha < \pi$.



b. Forme d'onde des différentes grandeurs

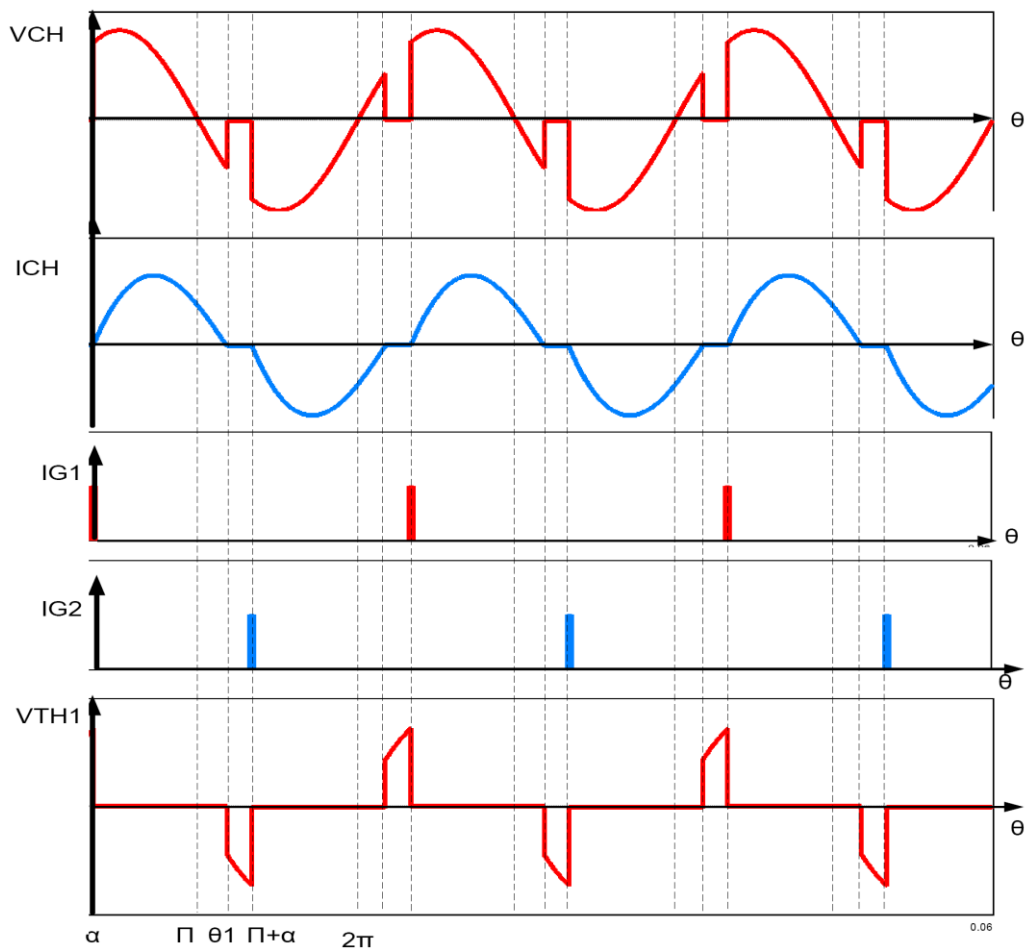


Figure 5: Forme d'ondes simple alternance charge inductive

3. 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 sans 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.

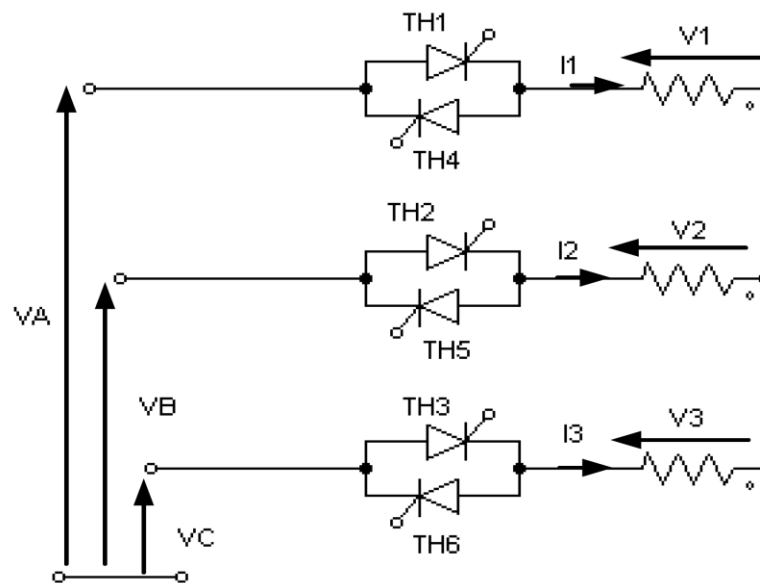


Figure 6 : montage gradateur triphasé charge résistive

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 [TH1;TH4] et [TH2;TH5] sont passants, on a

$$V_1(\theta) = \frac{1}{2}(V_A(\theta) - V_B(\theta)) = -V_2$$

[TH3;TH6] 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).

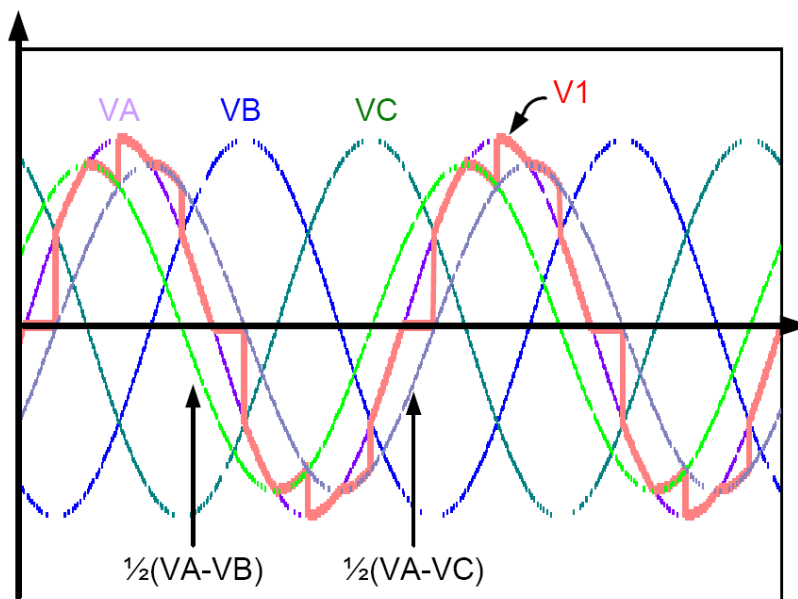
L'étude complète montre que, suivant la valeur de l'angle de retard à l'amorçage de chaque thyristor, trois modes de fonctionnement sont possibles.

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

il y a 3 ou 2 thyristors conducteurs :

- $\alpha < \theta < \frac{\pi}{3}$
 TH1, TH5 et TH3 conducteurs d'où
 $V_1(\theta) = V_A(\theta), V_2(\theta) = V_B(\theta), V_3(\theta) = V_C(\theta)$
- $\frac{\pi}{3} < \theta < \frac{\pi}{3} + \alpha$
 TH1 et TH5 conducteurs d'où
 $V_1(\theta) = \frac{1}{2}(V_A(\theta) - V_B(\theta))$ et $V_1(\theta) = -V_2(\theta), V_3(\theta) = 0$
- $\alpha + \frac{\pi}{3} < \theta < \frac{2\pi}{3}$
 TH1, TH5 et TH6 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 $V_1 = V \sqrt{1 - \frac{3\alpha}{2\pi} + \frac{3}{4\pi} \sin(2\alpha)}$



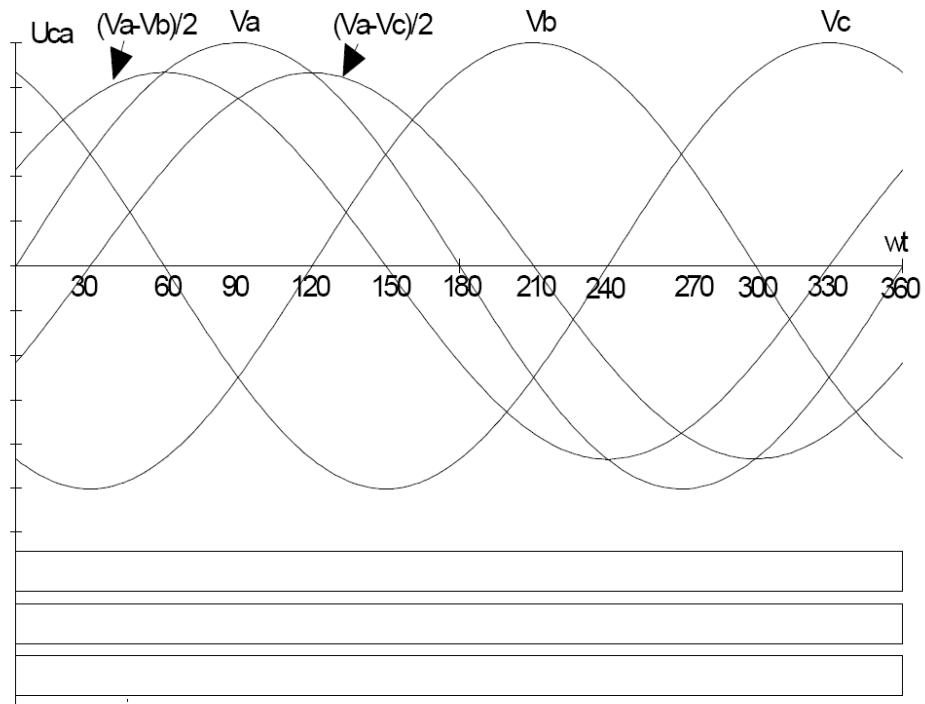


Figure 7 : allure de $V_1(\theta)$ pour $\alpha = \frac{\pi}{6}$

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

il y a 2 thyristors conducteurs :

- $\alpha < \theta < \frac{\pi}{3} + \alpha$ TH1 et TH5 conducteurs d'où
 $V_1(\theta) = \frac{1}{2}(V_A(\theta) - V_B(\theta))$ et $V_1(\theta) = -V_2(\theta)$, $V_3(\theta) = 0$
- $\frac{\pi}{3} + \alpha < \theta < \frac{2\pi}{3}$ TH1 et TH6 conducteurs d'où
 $V_1(\theta) = \frac{1}{2}(V_A(\theta) - V_C(\theta))$ et $V_1(\theta) = -V_3(\theta)$, $V_2(\theta) = 0$
- Ect ..

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

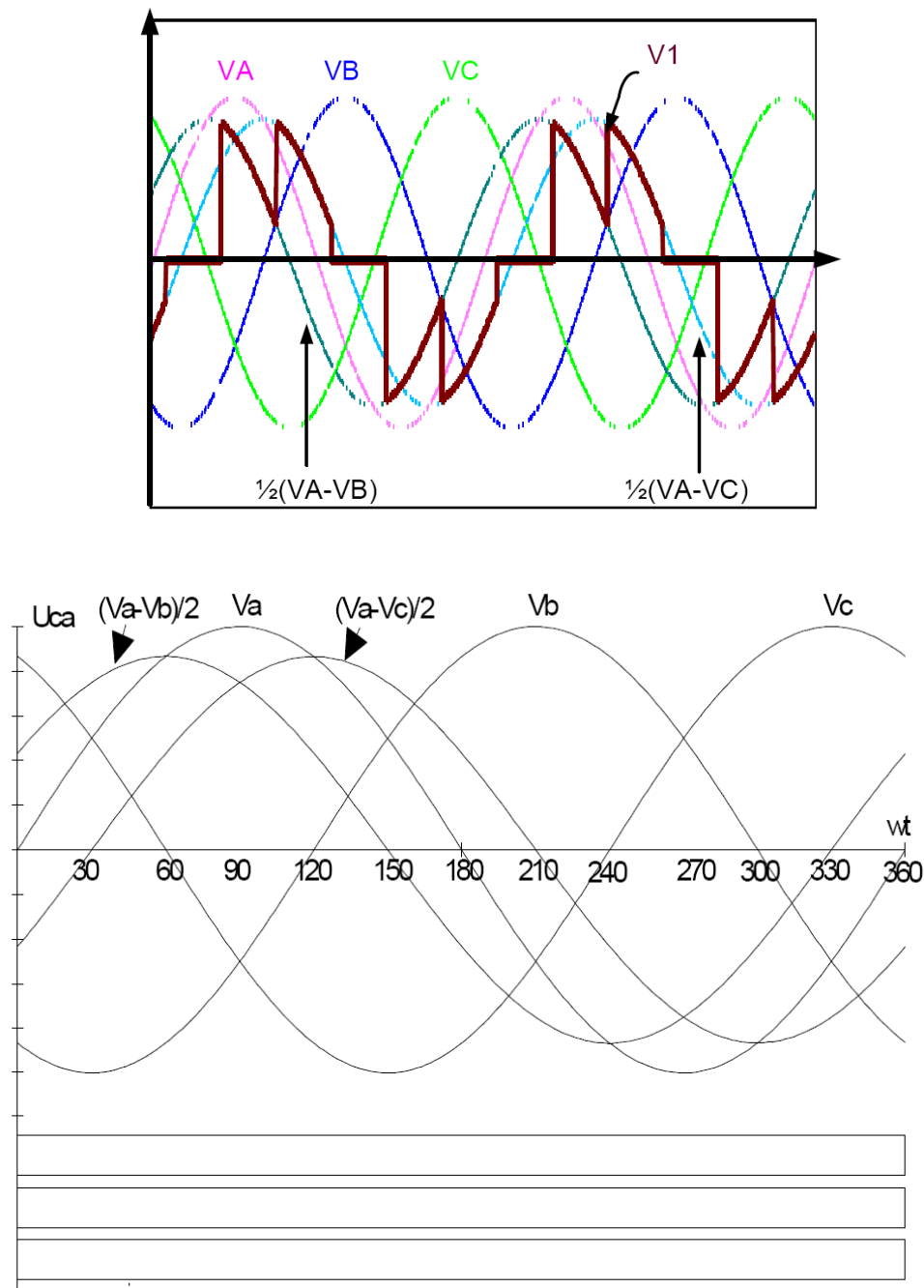


Figure 8 : allure de $V_1(\theta)$ pour $\alpha = 5\pi/12$

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

il y a toujours 2 ou 0 thyristor passant;

- $\alpha < \theta < \frac{5\pi}{6}$ TH1 et TH5 conducteurs d'où
 $V_1(\theta) = \frac{1}{2}(V_A(\theta) - V_B(\theta))$ et $V_1(\theta) = -V_2(\theta)$, $V_3(\theta) = 0$
- $\frac{\pi}{3} + \alpha < \theta < \frac{2\pi}{3}$ TH1 et TH6 conducteurs d'où
 $V_1(\theta) = \frac{1}{2}(V_A(\theta) - V_C(\theta))$ et $V_1(\theta) = -V_3(\theta)$, $V_2(\theta) = 0$
- Ect ..

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

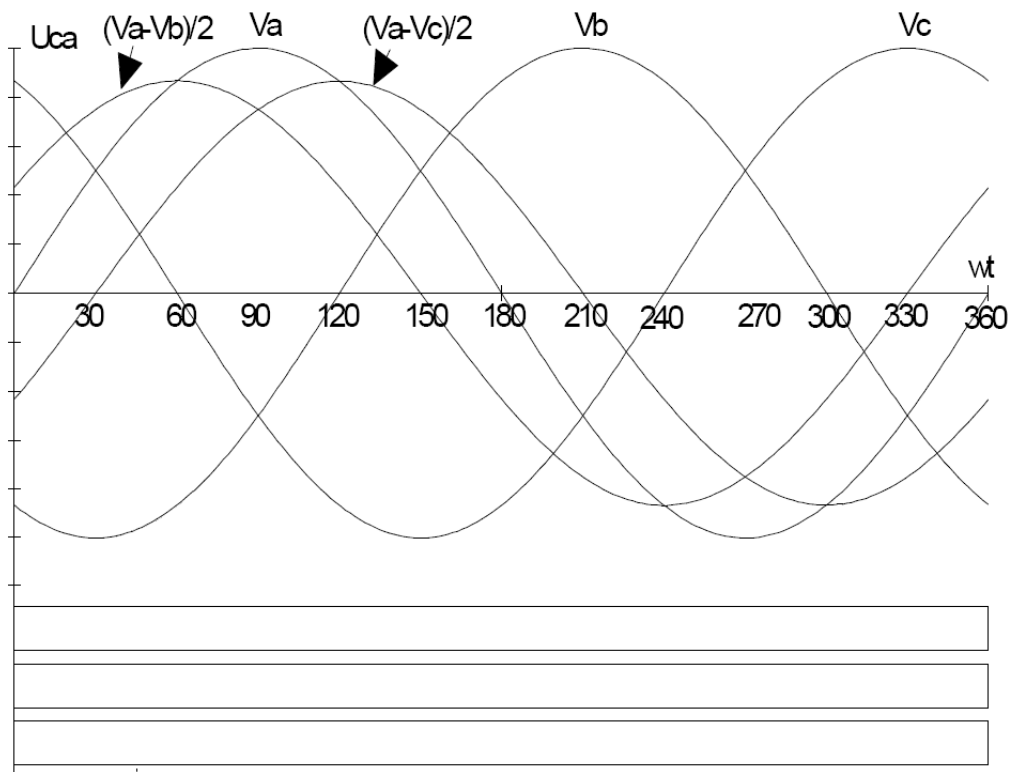
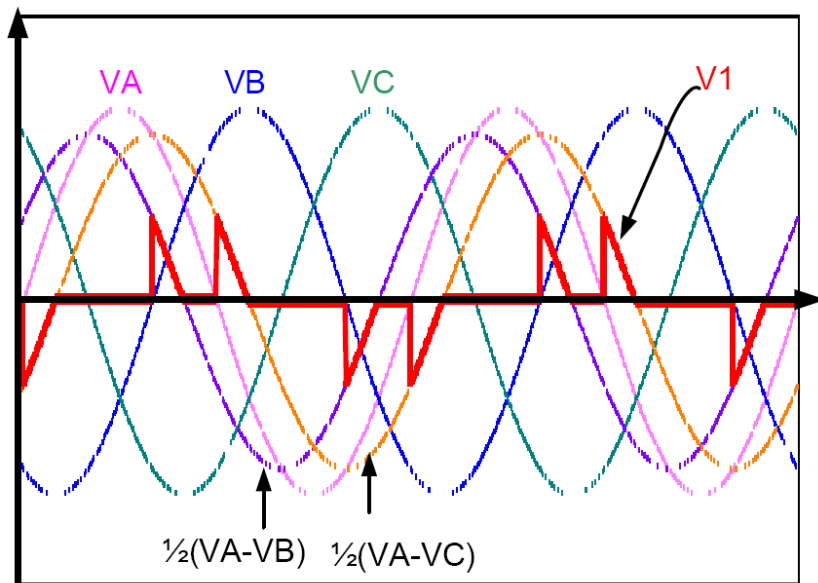


Figure 9 : allure de $V_1(\theta)$ pour $\alpha=2\pi/3$

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.

Dans ce type de gradateur, le signal envoyé sur l'entrée de commande du gradateur est de type TOR.

Le thyristor Th1 et le thyristor Th2 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 :

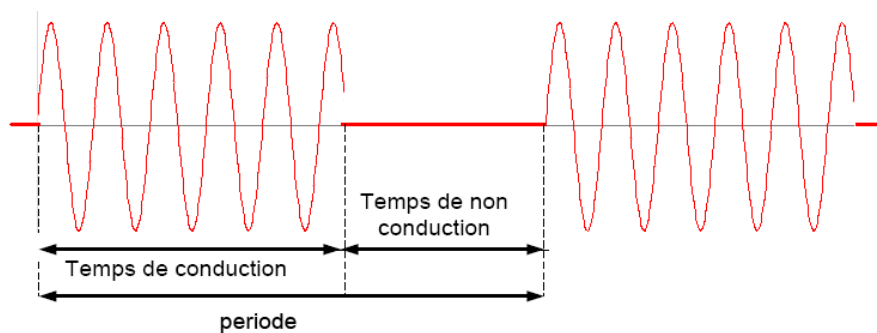


Figure 10 : tension de commande d'un gradateur à train d'ondes

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 :

Domaine d'utilisation de ce genre de gradateur :

- ✓ Chauffage
- ✓ Utilisés sur des systèmes présentant une inertie thermique importante

Avantages:

- ✓ La tension aux bornes de la charge est alternative sinusoïdale, donc le courant absorbé sera aussi alternatif sinusoïdal. La présence d'harmonique de courant sera donc nulle.
- ✓ On a une relation linéaire entre la puissance moyenne dans la charge et le signal de commande b

Principales relations

Valeur de la tension efficace aux bornes de la charge : $U_{ch} = U_{source} \cdot \sqrt{\beta}$

Avec U_{source} : tension efficace fournie par la source

β : Rapport cyclique

Puissance moyenne dissipée dans la charge : $P_{moy} = P_{max} \cdot \frac{T_{ON}}{T_c} = P_{max} \cdot \beta$ avec $P_{max} = \frac{U_{source}^2}{R}$

Avec R : valeur de la résistance de charge

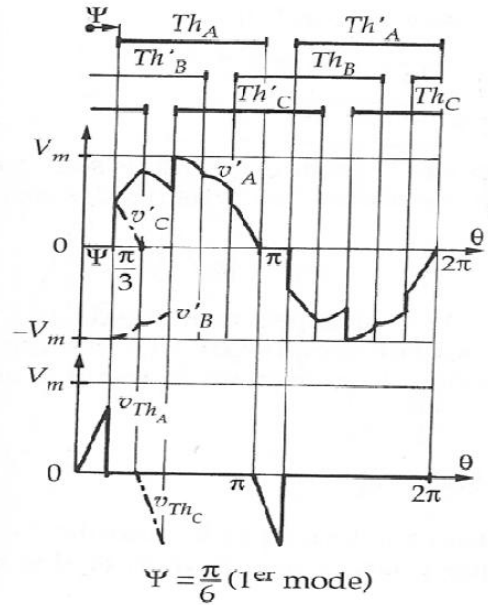
1.2.A. Analyse de fonctionnement

Si le récepteur est formé de trois résistances R égales, lorsque Ψ croit de 0 à π , trois modes de fonctionnement se succèdent.

a. Mode 1 = 2 ou 3 thyristors passants

1. Etude :

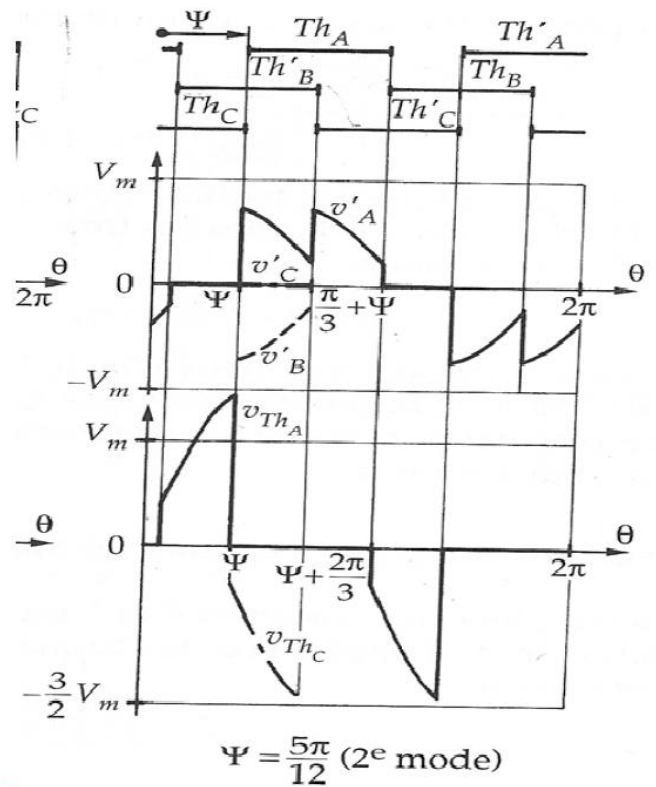
Exemple



b. Mode 2 = 2 thyristors passants

1. Etude

Exemple



2. Conclusion

c. Mode 3 = 0 ou 2 thyristors passants

1. Etude

2. Conclusion

Th_B' se bloque en 150° avant amorçage de Th_C' ; comme Th_A ne peut conduire seul, tous les thyristors sont bloqués de 150° à $+60^\circ$.

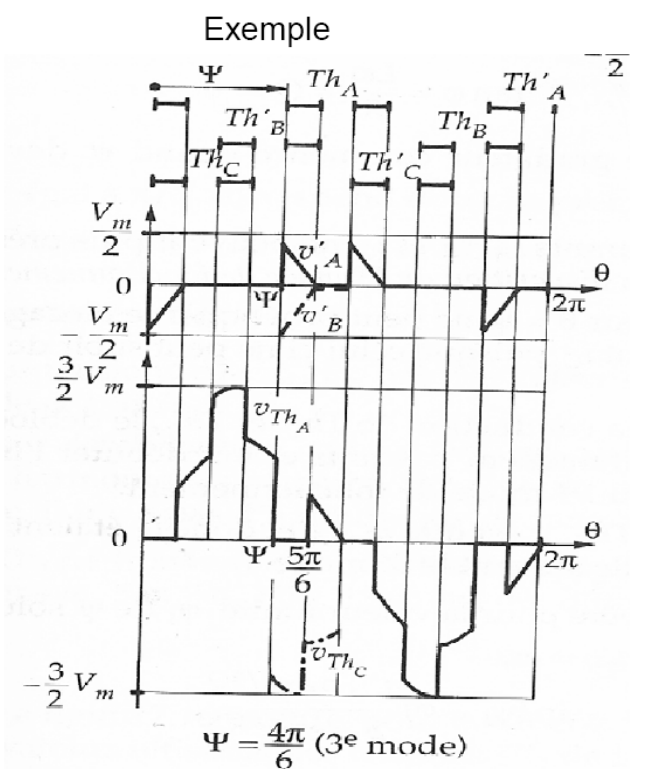
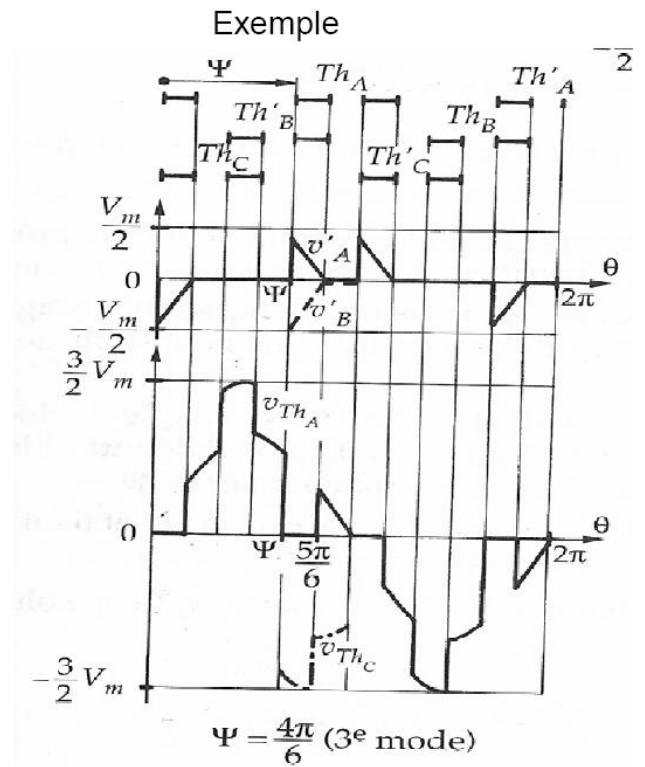
A cet instant, on amorce Th_C' et il faudra réamorcer Th_A pour pouvoir avoir de nouveau conduction.

Pour que Th_A et Th_B' puissent conduire, il faut $u_{AB} > 0$ donc $\theta < 150^\circ$

Si $\theta > 150^\circ$, aucune conduction ne sera possible

Le déblocage simultané de Th_A et Th_C' pour $\theta = 180^\circ$ se produit pour une valeur négative de $v_A - v_C$.

Les thyristors ne peuvent plus entrer en conduction, le gradateur équivaut à un interrupteur toujours ouvert



1.2. B. Calcul de la tension efficace

Soit V' la tension efficace aux bornes d'une phase de la charge; nous avons:

$$V'^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\psi}^{\psi+2\pi} v_A'^2(\theta) d\theta \quad \text{La fonction étant alternative} \quad V'^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\psi+\pi} v_A'^2(\theta) d\theta$$

Les symétries de la fonction v_A' : $v_A'(\theta + \frac{\pi}{3}) = -v_B'(\theta)$ et $v_A'(\theta + \frac{2\pi}{3}) = -v_C'(\theta)$

$$V'^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\psi+\frac{\pi}{3}} [v_A'^2(\theta) + v_B'^2(\theta) + v_C'^2(\theta)] d\theta$$

Nous devons envisager divers cas suivant le mode de fonctionnement

Mode 1 : le gradateur fonctionne dans ce mode si

$\psi < \theta < \frac{\pi}{3}$ Th_A , Th_B' et Th_C sont passants

$$v_A' = v_A, v_B' = v_B \text{ et } v_C' = v_C$$

$\frac{\pi}{3} < \theta < \psi + \frac{\pi}{3}$ Th_A et Th_B' sont passants

$$v_A' = -v_B' = u_{AB}/2, v_C' = 0$$

1.2. B. Calcul de la tension efficace

$$V'^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\frac{\pi}{3}} [V_{\max}^2 \sin^2(\theta) + V_{\max}^2 \sin^2(\theta - \frac{2\pi}{3}) + V_{\max}^2 \sin^2(\theta + \frac{2\pi}{3})] d\theta$$

$$+ \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\psi+\frac{\pi}{3}} [\frac{3}{2} V_{\max}^2 \sin^2(\theta + \frac{\pi}{6})] d\theta$$

$$V' = V \sqrt{1 - \frac{3\psi}{4\pi} + \frac{3}{4\pi} \sin(2\psi)}$$

Mode 2: le gradateur fonctionne dans ce mode si

$\psi < \theta < \psi + \frac{\pi}{3}$ Th_A et Th_B' sont passants

$$v_A' = -v_B' = u_{AB}/2, v_C' = 0$$

$$V'^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\psi+\frac{\pi}{3}} [\frac{3}{2} V_{\max}^2 \sin^2(\theta + \frac{\pi}{6})] d\theta$$

$$V' = V \sqrt{\frac{3}{2\pi} (\psi + \frac{\pi}{3} - \psi) + \frac{3}{4\pi} \sin(2\psi + \frac{\pi}{3}) - \frac{3}{4\pi} \sin(2(\psi + \frac{\pi}{3}) + \frac{\pi}{3})}$$

1.2. B. Calcul de la tension efficace

$$V' = V \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \sin(2\psi + \frac{\pi}{6})}$$

Mode 3: le gradateur fonctionne dans ce mode si

$$\psi < \theta < \frac{5\pi}{6} \quad Th_A \text{ et } Th_B' \text{ sont passants}$$

$$V'_A = -V'_B = u_{AB}/2, \quad V'_C = 0$$

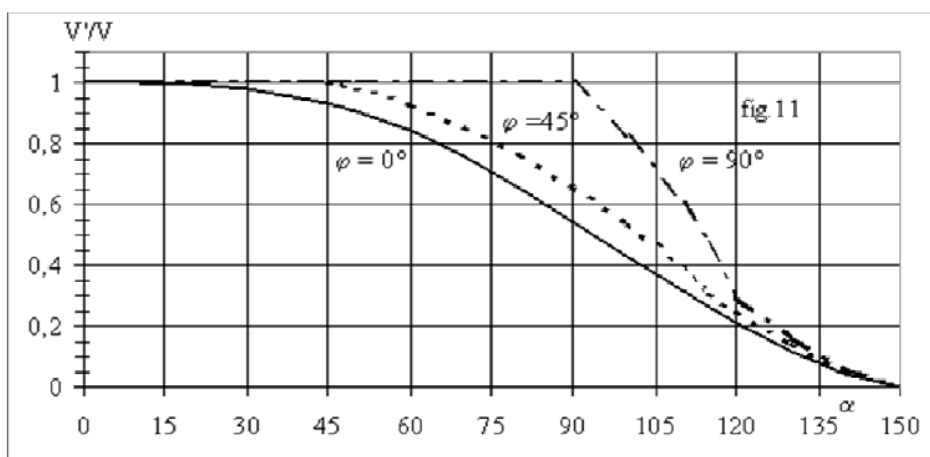
$$V'^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\frac{5\pi}{6}} \left[\frac{3}{2} V_{\max}^2 \sin^2(\theta + \frac{\pi}{6}) \right] d\theta$$

$$V' = V \sqrt{\frac{3}{2\pi} \left(\frac{5\pi}{6} - \psi \right) + \frac{3}{4\pi} \sin(2\psi + \frac{\pi}{3}) - \frac{3}{4\pi} \sin(2(\frac{5\pi}{6}) + \frac{\pi}{3})}$$

$$V' = V \sqrt{\frac{5}{4} - \frac{3\psi}{2\pi} + \frac{3}{4\pi} \sin(2\psi + \frac{\pi}{3})}$$

1.2. B. Calcul de la tension efficace

suivant le type de charge et le mode de fonctionnement on détermine la valeur efficace



1.2. C. Harmoniques des grandeurs

Compte tenu des symétries de la tension v'_A , sa décomposition en série de Fourier ne contient pas d'harmoniques de rang pair ni de rang multiple de 3. Les harmoniques sont donc de fréquence $f, 5.f, 7.f, 11.f, 13.f, 17.f, \dots$

L'harmonique de rang n de v'_n est de la forme

$$v'_n = V\sqrt{2} [a'_n \sin(n\theta) + b'_n \cos(n\theta)] = V'_n \sqrt{2} \sin(n\theta + \varphi'_n)$$

$$V'_n = V\sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{et} \quad \varphi'_n = \text{artg}\left(\frac{b'_n}{a'_n}\right)$$

Donnons les résultats pour la charge R

Mode 1

$$a'_1 = \frac{3}{2\pi} \left(\frac{\pi}{3} - \psi + \frac{\pi}{3} + \frac{1}{2} \sin(2\psi) - \frac{1}{2} \sin\left(2 \cdot \frac{\pi}{3} + \frac{4\pi}{3}\right) \right)$$

$$b'_1 = \frac{3}{4\pi} \left(\cos(2\psi) - \cos\left(2 \cdot \frac{\pi}{3} + \frac{4\pi}{3}\right) \right)$$

1.2. C. Harmoniques des grandeurs

Mode 2

$$a'_1 = \frac{3}{2\pi} \left(\frac{\pi}{3} - \frac{1}{2} \sin(2\psi - \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{2} \sin(2\psi) \right)$$

$$b'_1 = -\frac{3}{4\pi} \left(\cos(2\psi - \frac{2\pi}{3}) - \cos(2\psi) \right)$$

Mode 3

$$a'_1 = \frac{3}{2\pi} \left(\frac{5\pi}{6} - \psi - \frac{1}{2} \sin(2\psi - \frac{2\pi}{3}) \right)$$

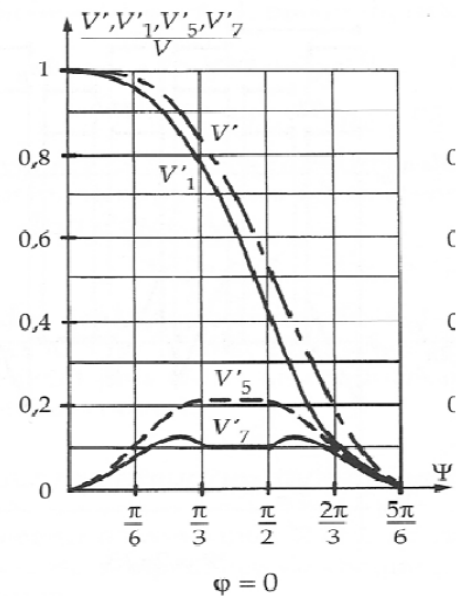
$$b'_1 = -\frac{3}{4\pi} \left(\cos(2\psi - \frac{2\pi}{3}) + 1 \right)$$

Pour calculer les harmoniques du courant i_1 , il suffit de faire une étude en régime sinusoïdal à chaque fréquence

$$v'_n = V'_n \sqrt{2} \sin(n\theta + \varphi_n)$$

L'impédance de la charge à la fréquence nf est :R

$$i'_n = \frac{V'_n}{R} \sqrt{2} \sin(n\theta + \varphi_n)$$



1.2. D. Étude énergétique

Le réseau étant purement sinusoïdal, seul le fondamental de l'intensité peut créer de la puissance active et de la puissance réactive. Ce fondamental est:

$$i_F = \sqrt{2} I_F \sin(\theta + \varphi_F) \quad \text{avec} \quad I_F = \frac{V_1}{R}, \quad \varphi_F = \varphi_1$$

La puissance active est $P = 3.V.I_F \cos(\varphi_F)$

La puissance réactive est $Q = 3.V.I_F \sin(\varphi_F)$

La puissance apparente est $S = 3.V.I_{eff}$

Le facteur de puissance est $F_p = \frac{P}{S}$

La puissance déformante $D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$