

# Redresseur commandé

## I.1 Introduction

Le redresseur à thyristors réalise une conversion commandée alternatif-continu. La commande est réalisée en agissant sur l'angle retard à l'amorçage  $\alpha$ . On nomme « redresseur commandé » un montage redresseur dont le semi-conducteur est commandable et réalisé à partir d'un Thyristor.

Pour l'étude des différents montages redresseurs on considère les hypothèses suivantes :

- Thyristor supposés idéaux  $\rightarrow$  commutation instantanée, pas de chute de tension direct.
- Source supposée parfaite  $\rightarrow$  impédance de source nulle.
- L'angle de retard à l'amorçage ( $\alpha = \omega t$ ) est comptée à partir de l'amorçage naturel.

## I.2 Redresseur simple alternance

### I.2.1 Charge résistive

La structure de ce montage est représentée sur la figure 1.

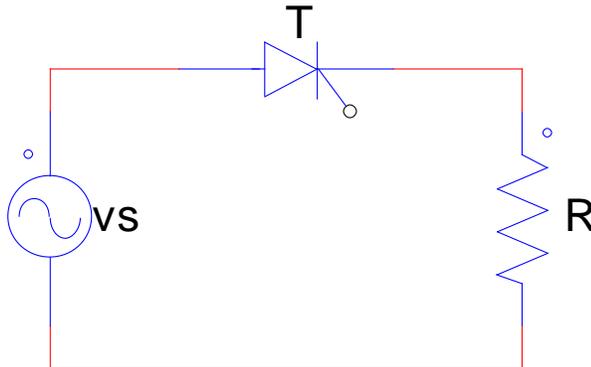


Figure 1 : Redresseur simple alternance charge résistive (R)

#### a) Analyse de fonctionnement

- $0 < \omega t < \alpha$  : pas d'impulsion sur la gâchette, donc T est bloqué, alors :

$$i_{ch} = 0 ; R \cdot i_{ch} = v_{ch} = 0 ; v_s(t) = v_T(t) + v_{ch}(t) \rightarrow v_T(t) = v_s(t) > 0$$

- $\alpha < \omega t < \pi$  : on envoie une impulsion de commande (courant d'amorçage), donc T devient conducteur, alors

$$v_T(t) = 0 ; v_{ch}(t) = v_s(t) = V_m \sin(\omega t) \rightarrow i_{ch}(t) = v_{ch}(t)/R$$

- $\pi < \omega t < 2\pi$  : Thyristor bloqué (commutation naturelle)

$$i_{ch} = 0 ; R \cdot i_{ch} = v_{ch} = 0 ; v_T(t) = v_s(t) < 0$$

**b) Formes d'ondes**

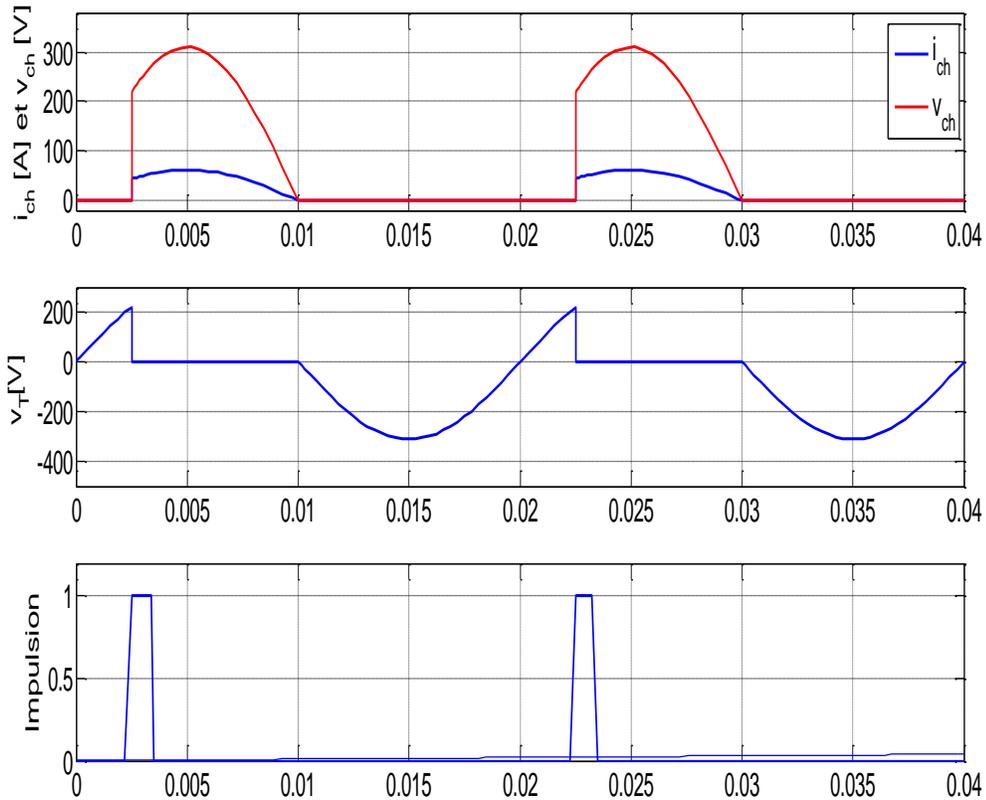


Figure 2 : Formes d'onde redresseur simple alternance charge R)

**c) Grandeur caractéristique**

- ❖ Valeur moyenne

$$V_{ch} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{ch}(t) dt = \frac{V_M}{2\pi} (1 + \cos(\alpha))$$

❖ Valeur efficace

$$V_{ch\_eff} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{ch}^2(t) dt = \frac{V_M}{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

### I.2.2 Charge inductive

Considérons le montage de la figure suivante

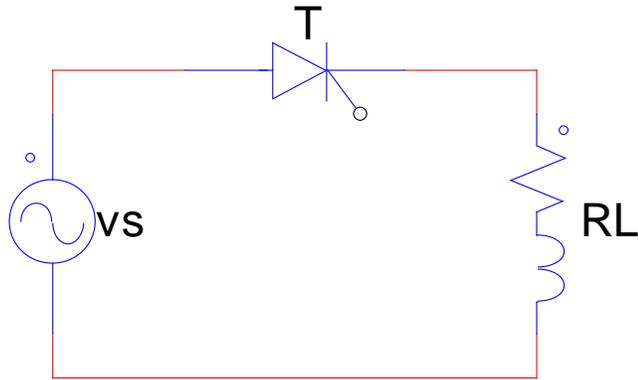


Figure 3 : Redresseur simple alternance charge inductive (RL)

#### a) Analyse de fonctionnement

On constate trois intervalles de fonctionnement

- $0 < \vartheta < \alpha$  : Thyristor bloqué (aucune impulsion)

$$i_{ch} = 0 ; R \cdot i_{ch} = v_{ch} = 0 ; v_s(t) = v_T(t) + v_{ch}(t) \rightarrow v_T(t) = v_s(t) > 0$$

- $\alpha < \vartheta < \vartheta_{ext}$  : (avec  $\vartheta_{ext} > \pi$ ) Thyristor passant

Le courant de charge continue à circuler à travers le thyristor ( T ) mal grés que la tension entre ces bornes devient négatif (lorsque de l'insertion de l'inductance L)

$$v_T(t) = 0 ; v_{ch}(t) = v_s(t) = V_m \cdot \sin(\omega t) \rightarrow i_{ch}(t) = v_{ch}(t)/R$$

- $\vartheta_{ext} < \vartheta < 2\pi$  : Thyristor bloqué (commutation naturelle)

$$i_{ch} = 0 ; R \cdot i_{ch} = v_{ch} = 0 ; v_T(t) = v_s(t) < 0$$

#### b) Expression du courant de charge

Pendant de la phase de conduction de Thyristor  $\alpha < \vartheta < \vartheta_{\text{ext}}$  on peut écrire l'équation différentielle suivante :

$$Ri_{ch}(t) + L \frac{di_{ch}(t)}{dt} = v_{ch}(t) = v_s(t) = V_M \sin(\omega t)$$

La solution de cette équation est :

$$i_{ch}(t) = \frac{V_M}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

Avec :

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}; \tan(\varphi) = \frac{\omega L}{R}; \tau = \frac{L}{R}$$

On détermine A avec les conditions initiales suivante  $i_{ch}\left(\frac{\alpha}{\omega}\right) = 0$

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

**c) Formes d'ondes**

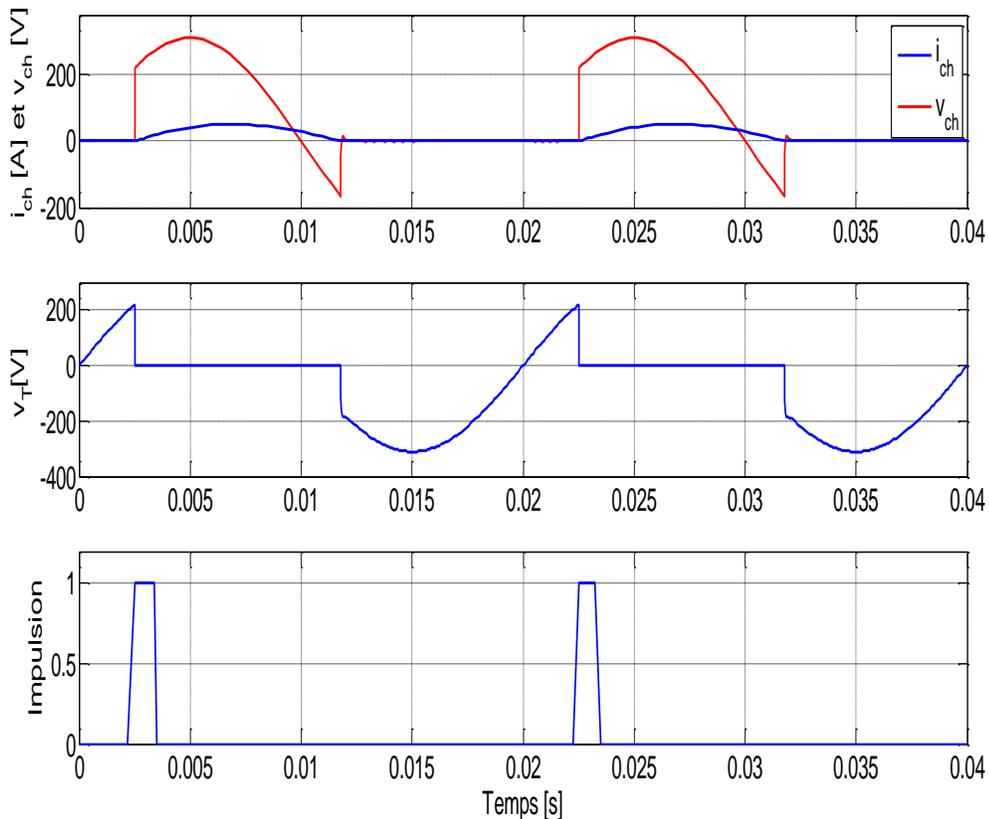


Figure 4 : Formes d'onde redresseur simple alternance charge RL

**d) Grandeur caractéristique**

❖ Valeur Moyenne

$$V_{ch} = \frac{V_M}{2\pi} (-\cos(\theta_{ext}) + \cos(\alpha))$$

❖ Valeur efficace

$$V_{ch_{eff}}^2 = \frac{V_M^2}{2\pi} \left[ \frac{\theta_{ext} - \alpha}{2} - \frac{1}{4} [\cos(2\theta_{ext}) - \cos(2\alpha)] \right]$$

### I.3 Redresseur double alternance

#### I.3.1 charge résistive

La structure d'une redresseur double alternance est représentée sur la figure suivante

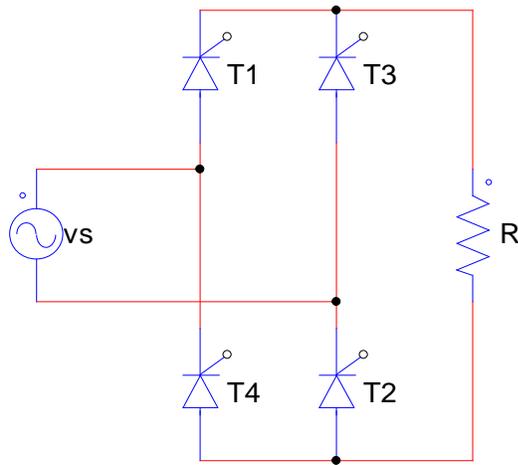


Figure 5 : Redresseur double alternance charge résistive (R)

#### a) analyse de fonctionnement

Les Thyristors fonctionnent deux à deux (T<sub>1</sub> et T<sub>2</sub>) et (T<sub>3</sub> et T<sub>4</sub>)

Les Thyristors sur une même bras sont complémentaire

On trouve deux intervalles de conduction

- $\alpha < \theta < \pi \rightarrow T_1$  et  $T_2$  conduisent ;  $T_3$  et  $T_4$  bloqués

$$v_{T1,2}(t) = 0 ; v_{ch}(t) = v_s(t) = V_m \sin(\omega t) \rightarrow i_{ch}(t) = v_{ch}(t)/R$$

- $\alpha + \pi < \theta < 2\pi \rightarrow T_3$  et  $T_4$  conduisent ;  $T_1$  et  $T_2$  bloqués

$$v_{T3,4}(t) = 0 ; v_{ch}(t) = -v_s(t) = -V_m \sin(\omega t) \rightarrow i_{ch}(t) = v_{ch}(t)/R$$

- $0 < \theta < \alpha$  et  $\pi < \theta < \pi + \alpha$  → aucuns éléments conduisent

**b) grandeur caractéristique**

- ❖ Valeur moyenne

$$V_{ch} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_M \sin(\theta) = \frac{V_M}{\pi} (1 + \cos(\alpha))$$

- ❖ Valeur efficace

$$V_{ch\_eff}^2 = \frac{V_M^2}{\pi} \left[ \pi - \alpha - \frac{1}{4} \cdot \sin(2\alpha) \right]$$

**d) Formes d'ondes**

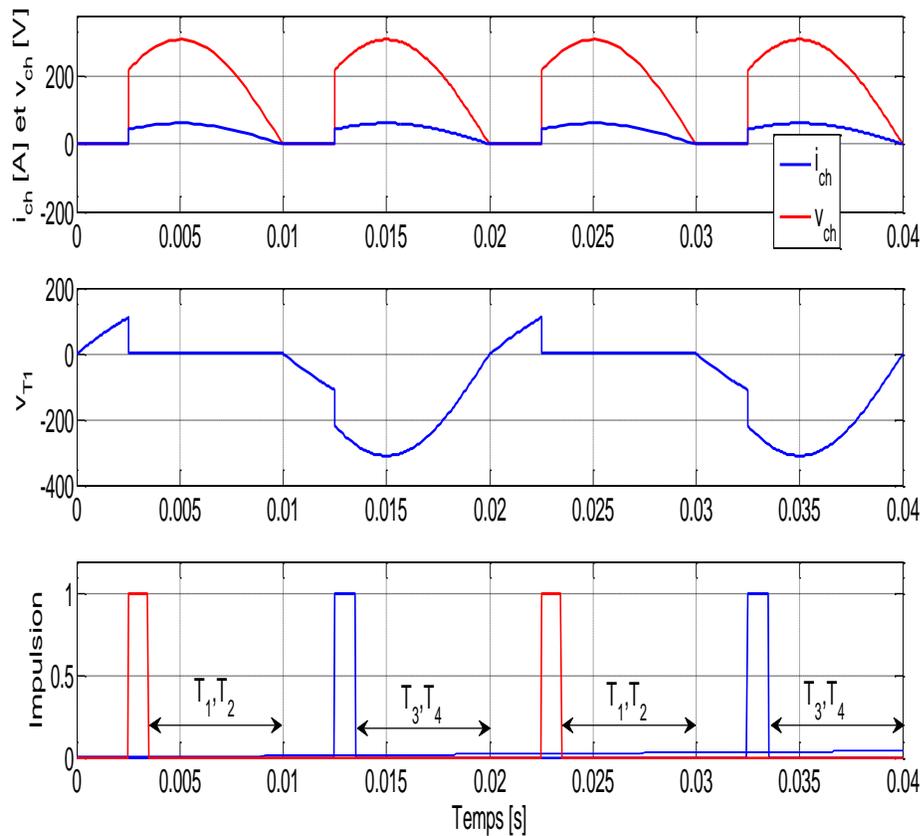


Figure 6 : Formes d'ondes redresseur double alternance charge résistive

**I.3.2 Charge inductive**

La figure 7 est illustré la structure d'une redresseur double alternance alimenté une charge inductive (RL)

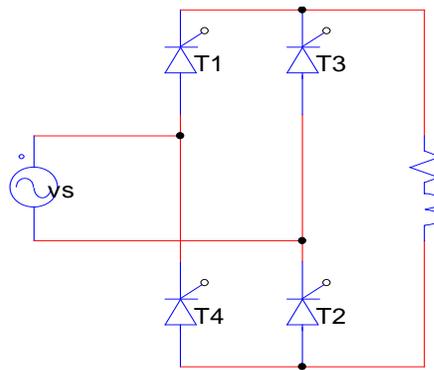


Figure 7 : Redresseur double alternance charge inductive (RL)

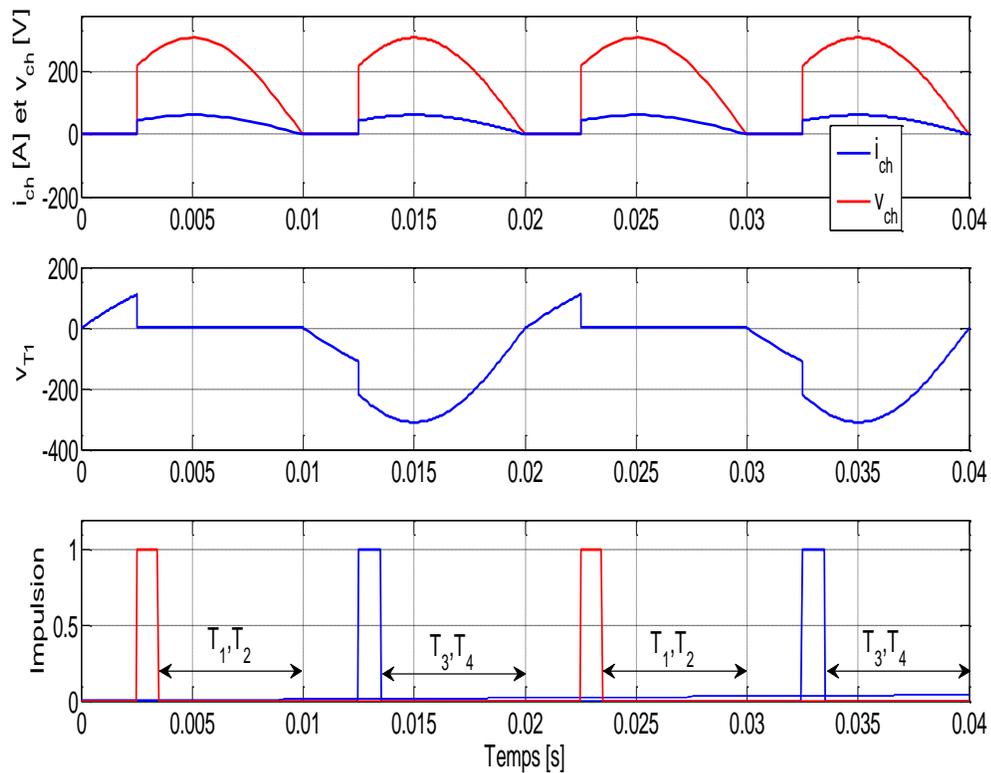


Figure 8 : a) Formes d'ondes redresseur charge inductive (conduction discontinue)

Suivante la nature de la charge utilisée on distingue deux modes (régime) de fonctionnement.

a) *Fonctionnement à courant interrompe (conduction discontinue)*

Le principe de fonctionnement est le même avec le montage précédent, seulement l'inductance déphasé le courant par rapport la tension. Ce fonctionnement est rencontre avec une charge purement

résistive. L'évolution des courant et la tension de charge et la tension entre les bornes de Thyristor un sont représenté sur la figure 8.a.

b) *Fonctionnement à courant continu (conduction continue) :*

Il est rencontré avec des charge suffisamment inductive. Toujours, les conditions de commutation sont les mêmes. Aussi, L'évolution des courant et la tension de charge et la tension entre les bornes de Thyristor un sont représenté sur la figure 8.b.

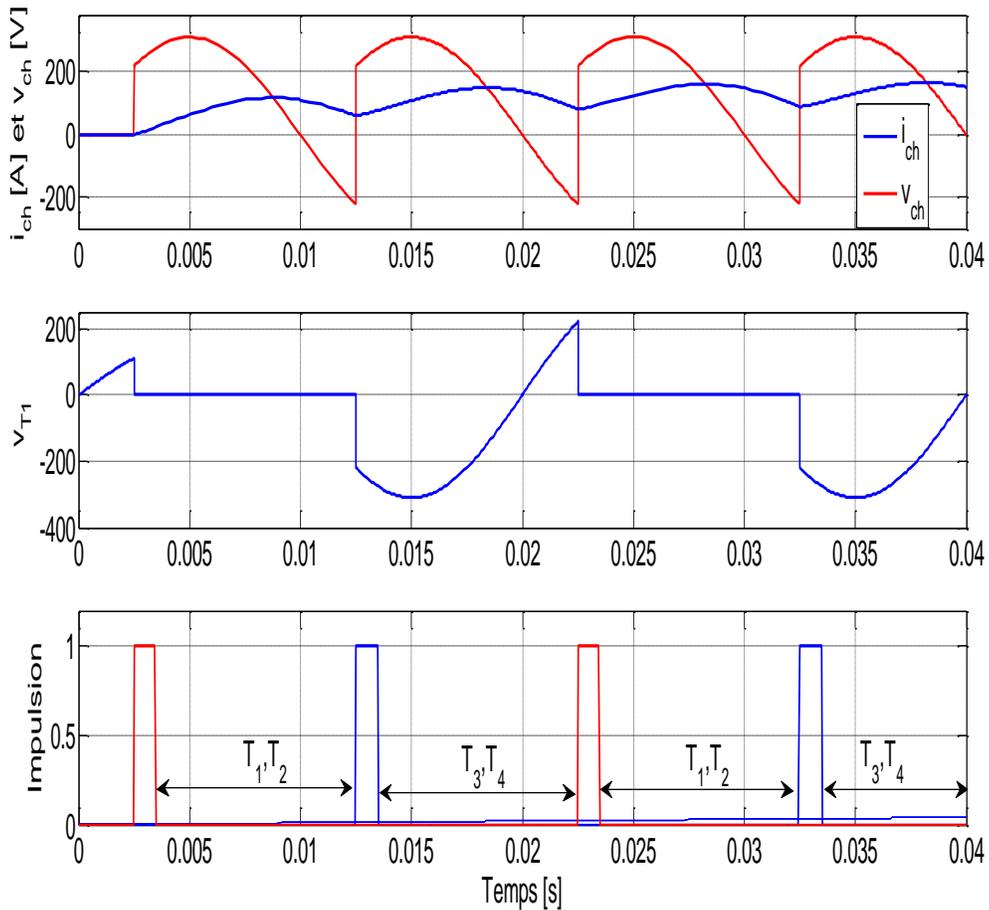


Figure 8 : b) Formes d'ondes redresseur double alternance charge inductive (conduction continue)

c) *Expression du courant en mode continu*

$$Ri_{ch}(t) + L \frac{di_{ch}(t)}{dt} = v_{ch}(t) = v_s(t) = V_M \sin(\omega t)$$

La solution de cette équation est :

$$i_{ch}(t) = \frac{V_M}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

On détermine A des conditions initiales

$$i_{ch}(\alpha) = i_o \text{ et } i_{ch}(\pi + \alpha) = i_o$$

$i_o$  : la valeur de courant continue

$$\frac{V_M}{Z} \sin(\alpha - \varphi) + A. e^{-\frac{\alpha}{w\tau}} = \frac{V_M}{Z} \sin(\pi + \alpha - \varphi) + A. e^{-\frac{(\pi+\alpha)}{w\tau}}$$

Finalement, l'expression de A est donnée par :

$$A = \frac{2. V_M \sin(\alpha - \varphi)}{Z e^{-\frac{\alpha}{w\tau}} (e^{-\frac{\pi}{w\tau}} - 1)}$$

**Remarque :**

Dans ce mode de fonctionnement (mode continue) la valeur moyenne est représentée par :

$$V_{ch} = 2. \frac{V_M}{\pi} \cos(\alpha)$$

**I.4 Redresseur commandé triphasé**

**I.4.1 Redresseur triphasé mon alternance**

**a) Charge résistive**

La figure 9 représenté la topologie du redresseur triphasé demi pont. Pour contrôler la tension de charge, le redresseur à demi-pont utilise trois thyristors à cathode commune. Le thyristor fonctionne (à l'état ON), lorsque la tension entre l'anode et la cathode  $v_{AK}$  est positive et qu'une impulsion de est appliquée à la gâchette.

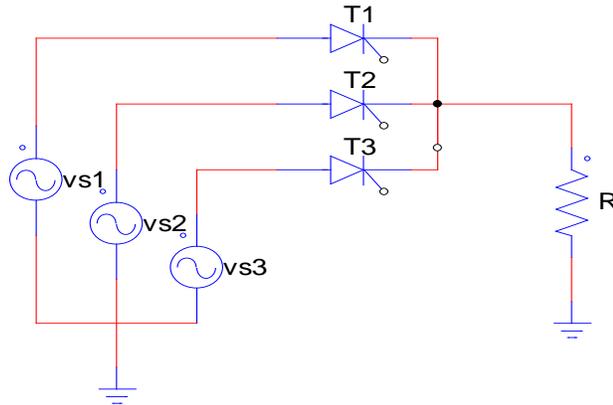


Figure 9 : Redresseur triphasé simple alternance charge résistive (R)

Dans cette structure, on distingue deux modes de fonctionnement :

- Mode en conduction continue ( $\alpha \leq \pi/6$ )
- Mode en conduction discontinue ( $\alpha > \pi/6$ )
- Mode en conduction limite ( $\alpha = \pi/6$ )

Dans les systèmes triphasés on compte l'angle  $\alpha$  à partir des points d'intersection des tensions simple (on prend comme référence  $\pi/6$ ).

Le principe de fonctionnement de cette topologie est le même avec un montage réalisé par des diodes, sauf que les Thyristors commencent à conduire à partir d'un angle de retard  $\alpha$ . Ici chaque Thyristor conduit pendant ( $T/3$ ).

### 1. Conduction continue ( $\alpha < \pi/6$ )

Les formes d'ondes dans ce mode de fonctionnement de courant et la tension de charge et la tension entre les bornes de la première Thyristor (T1) sont représenté sur la figure 10.a

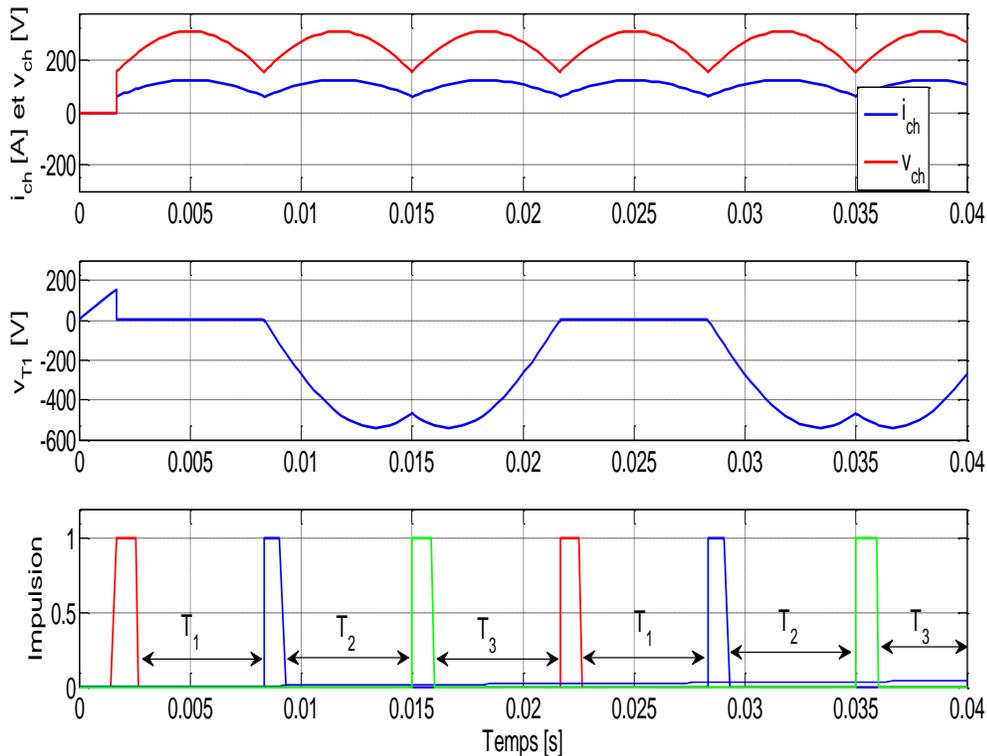


Figure 10 : a) Formes d'ondes redresseur triphasé simple alternance charge résistive ( $\alpha = 0$ )

En mode continu, la valeur moyenne de la tension de charge est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 V_{ch} &= \frac{1}{T} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} V_M \sin(\theta) d\theta = \frac{3V_M}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} \sin(\theta) d\theta \\
 &= \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_M \cos(\alpha)
 \end{aligned}$$

### 2. Mode discontinue ( $\alpha < \pi/6$ )

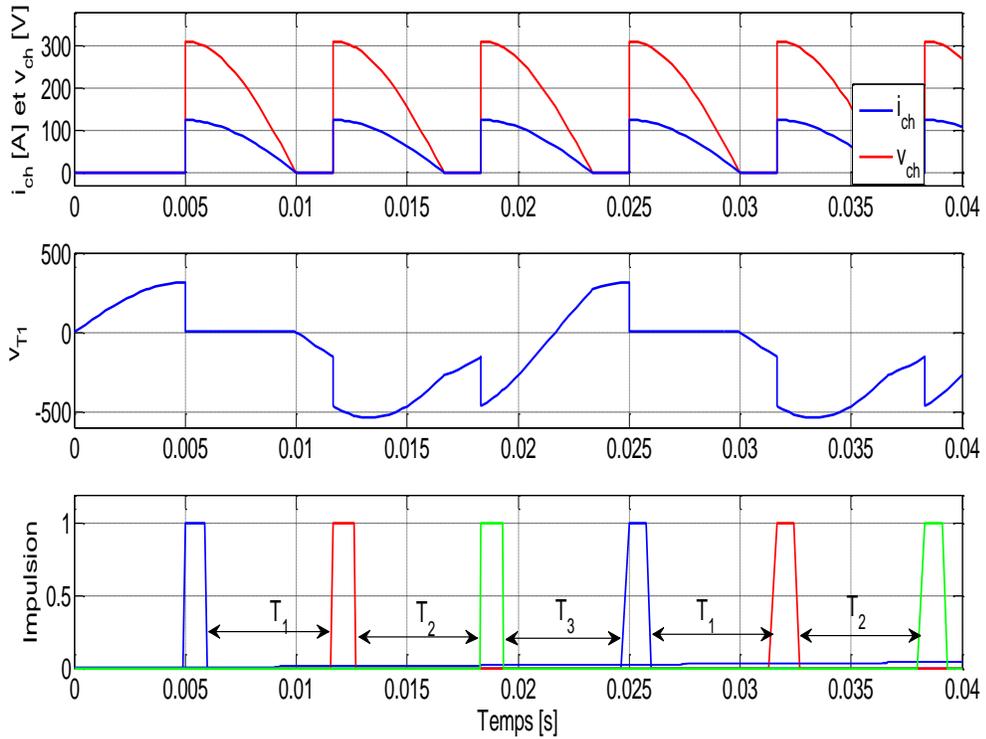


Figure 10 : b) Formes d'ondes redresseur triphasé simple alternance charge résistive ( $\alpha > \pi/6$ )

La valeur moyenne de cette mode de fonctionnement est donnée par l'équation :

$$V_{ch} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi} V_M \sin(\theta) d\theta = \frac{3V_M}{2\pi} [1 + \cos(\alpha + \frac{\pi}{6})]$$

**b) charge inductive**

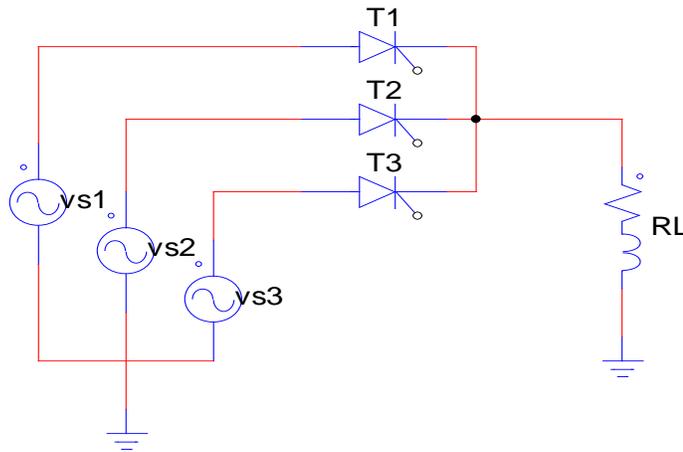


Figure 11 : Redresseur triphasé simple alternance inductive (RL)

Dans cette structure, on distingue trois modes de fonctionnement :

- Mode en conduction continue ( $\alpha < \pi/6$ )
- Mode en conduction limite ( $\alpha = \pi/6$ )
- ( $\alpha > \pi/6$ ) on trouve deux cas
  - Si  $\alpha < \varphi \rightarrow$  conduction continue (charge très inductive  $L_w > R$ )
  - Si  $\alpha > \varphi \rightarrow$  conduction discontinue (la charge n'est pas assez inductive  $R \gg L_w$ )

**1) Mode continue ( $\alpha < \pi/6$ )**

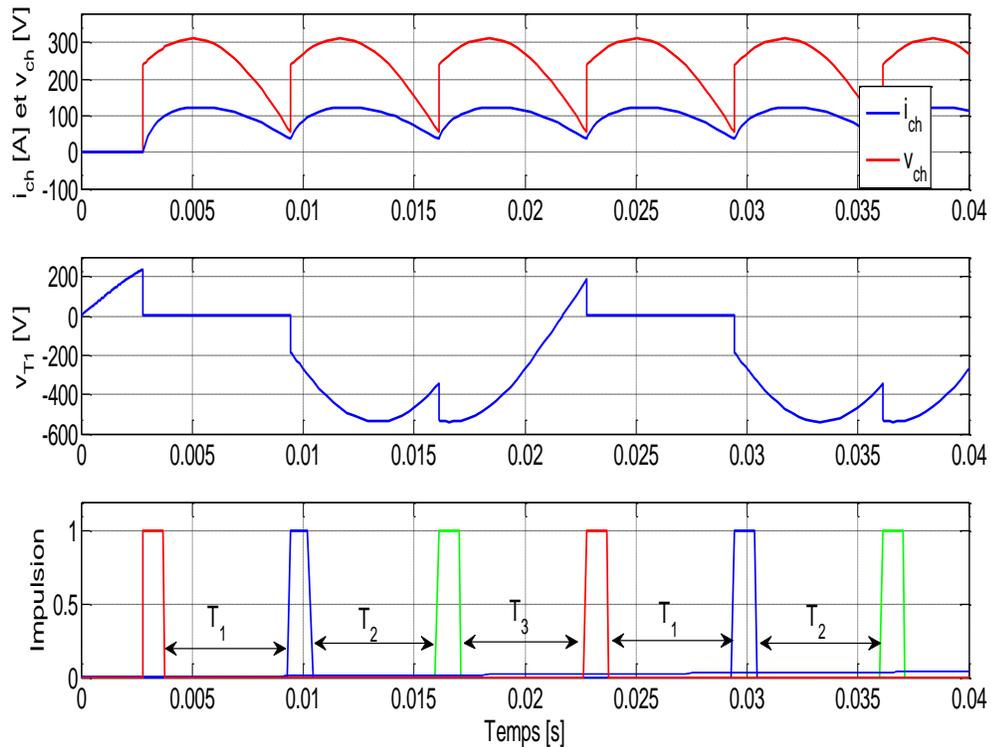


Figure 12 : a) Redresseur triphasé simple alternance charge inductive ( $\alpha < \pi/6$ )

Valeur Moyenne

$$V_{ch} = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} V_M \sin(\theta) d\theta = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_M \cos(\alpha)$$

2) *Mode continue* ( $\alpha > \pi/6$  et  $\alpha < \varphi$ )

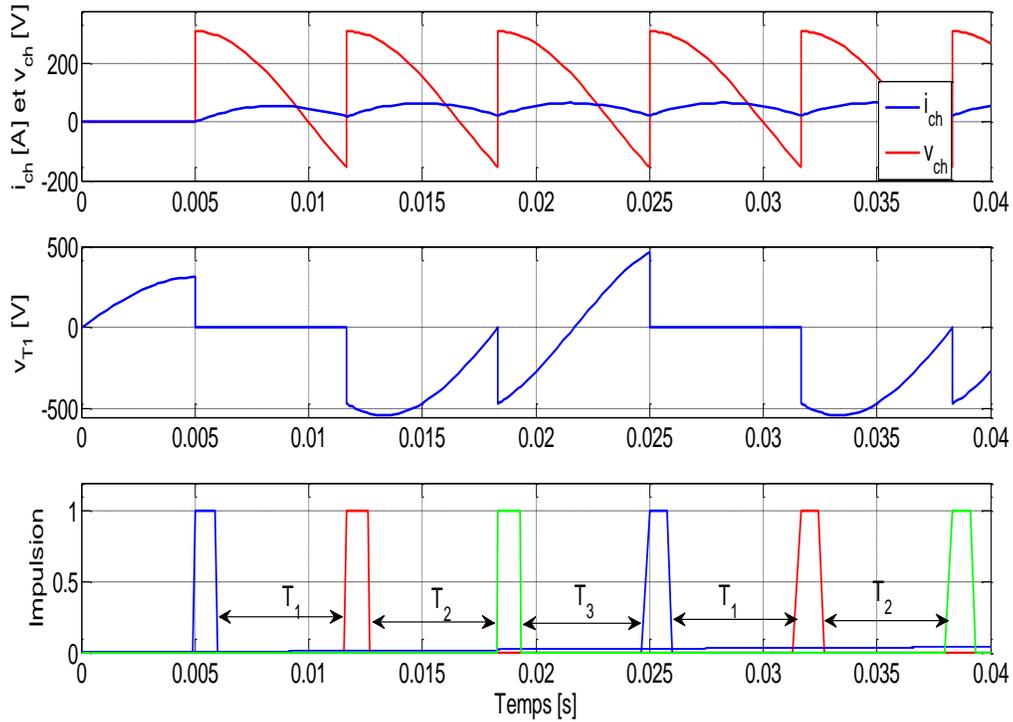


Figure 12 : b) Redresseur triphasé simple alternance charge inductive ( $\alpha > \pi/6$  et  $\varphi > \alpha$ )

3) *Mode discontinue* ( $\alpha > \pi/6$  et  $\alpha > \varphi$ )

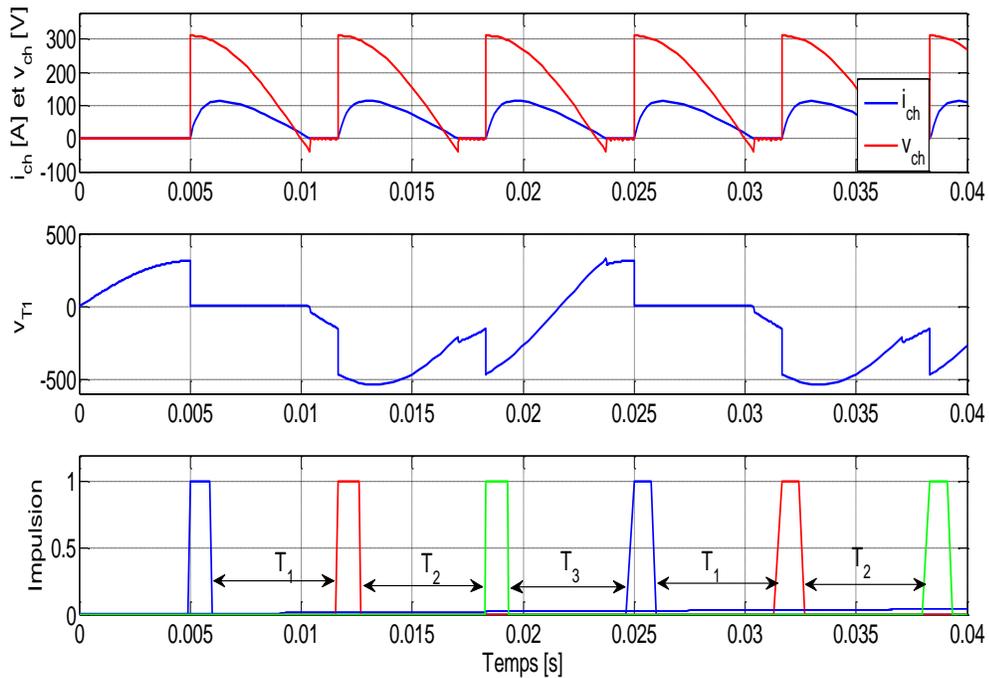


Figure 12 : c) Redresseur triphasé simple alternance charge inductive ( $\alpha > \pi/6$  et  $\varphi < \alpha$ )

### I.4.2 Redresseur triphasé en pont complet

Redresseur triphasé en pont complet est un convertisseur complètement commandable, en utilisant six thyristors connectés sous la forme d'une configuration de pont pleine onde. Tous les six thyristors sont des commutateurs commandés qui sont fonctionné à un moment approprié en appliquant des signaux de gâchette appropriés. Ce circuit est également connu sous le nom de pont triphasé pleine onde ou comme un convertisseur à six Thyristors. Chaque Thyristor conduise dans une période égale  $\pi/3$

#### a) Charge Résistive

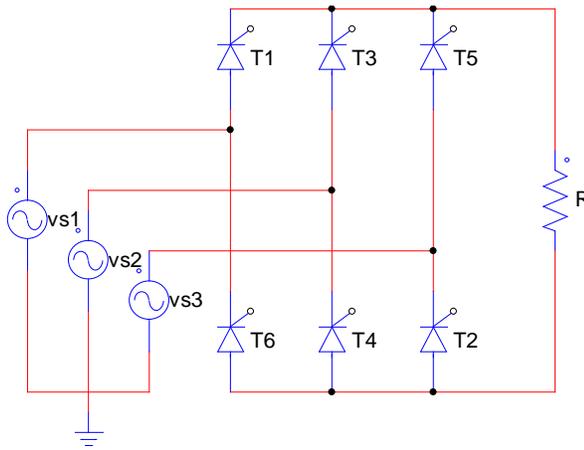


Figure 13 : Redresseur triphasé double alternance charge résistive ®

#### a) Conduction discontinue ( $\alpha = \pi/3$ )

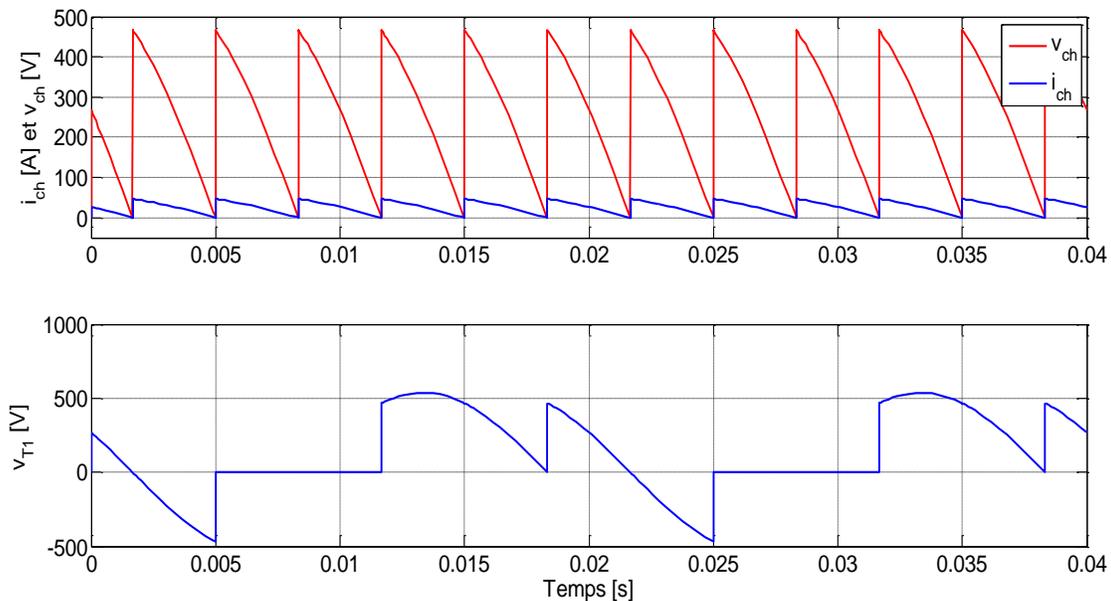


Figure 14 : a) courant et tension de la charge et la tension de la première Thyristor

**Remarque :**

- Chaque Thyristor conduit pendant  $2\pi/3$  ;
- Deux Thyristors conduisent pendant  $\pi/3$  ;
- La période de la tension de charge  $v_{ch}(t)$  est  $\pi/6$  ;
- Pour assurer le démarrage du pont et son fonctionnement en mode discontinu on :
  - o Envoie à chaque Thyristor des impulsions successives décalés de  $\pi/3$  ;
  - o Les impulsions des Thyristors hauts ( $T_1, T_2, T_3$ ) sont décalées de  $2\pi/3$  ;
  - o Les impulsions des Thyristors basses ( $T_6, T_4, T_2$ ) sont décalées de  $2\pi/3$  ;

La figure 14. b représenté les séquences de conduction des Thyristors.

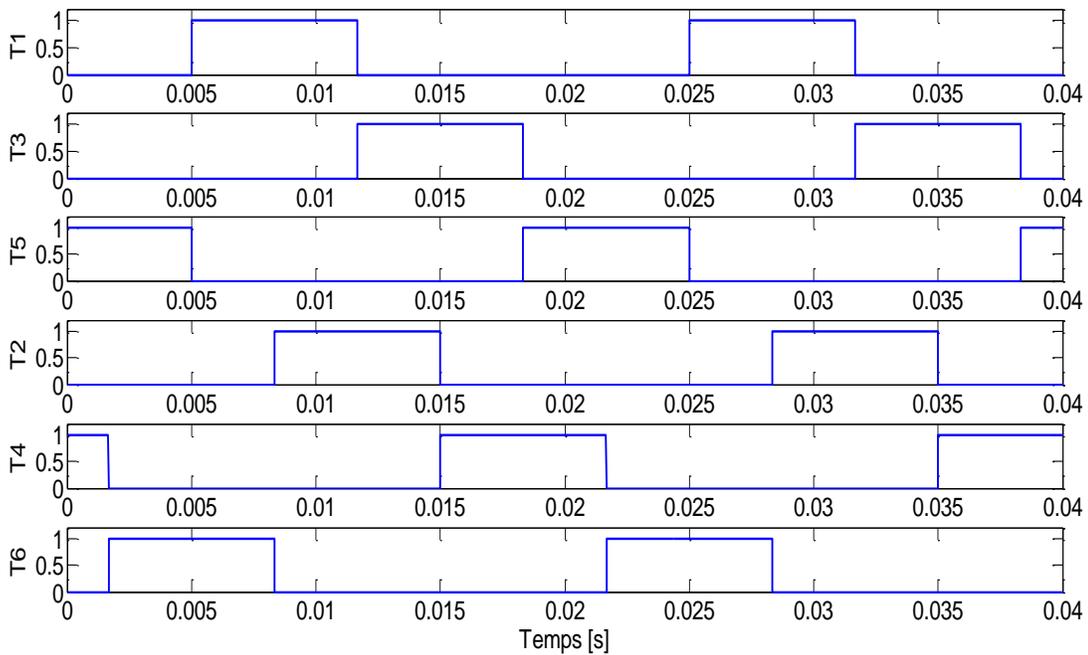


Figure14 : b) Séquence de commutation des Thyristor ( $\alpha = \pi/3$ )

Les tensions simples sont données par :

$$v_1(t) = V_M \sin(\omega t)$$

$$v_2(t) = V_M \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$v_3(t) = V_M \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

Les tensions composées sont représentées par :

$$v_{12}(t) = \sqrt{3}.V_M \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$v_{23}(t) = \sqrt{3}.V_M \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$v_{31}(t) = \sqrt{3}.V_M \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{6}\right)$$

La valeur moyenne est donnée par :

$$V_{ch} = \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \sqrt{3}.V_M \sin\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) d\theta = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_M \cos(\alpha)$$

La valeur efficace est donnée par :

$$V_{ch\_eff} = \sqrt{3}.V_M \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3}{2\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \cos(\alpha)}$$

**b) Charge inductive (RL)**

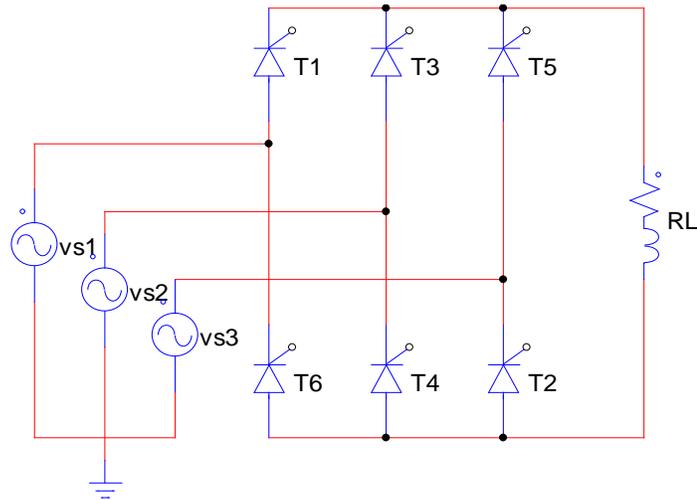


Figure 15 : Redresseur triphasé double alternance charge inductive (RL)

Cour électronique de puissance : Redresseurs commandés

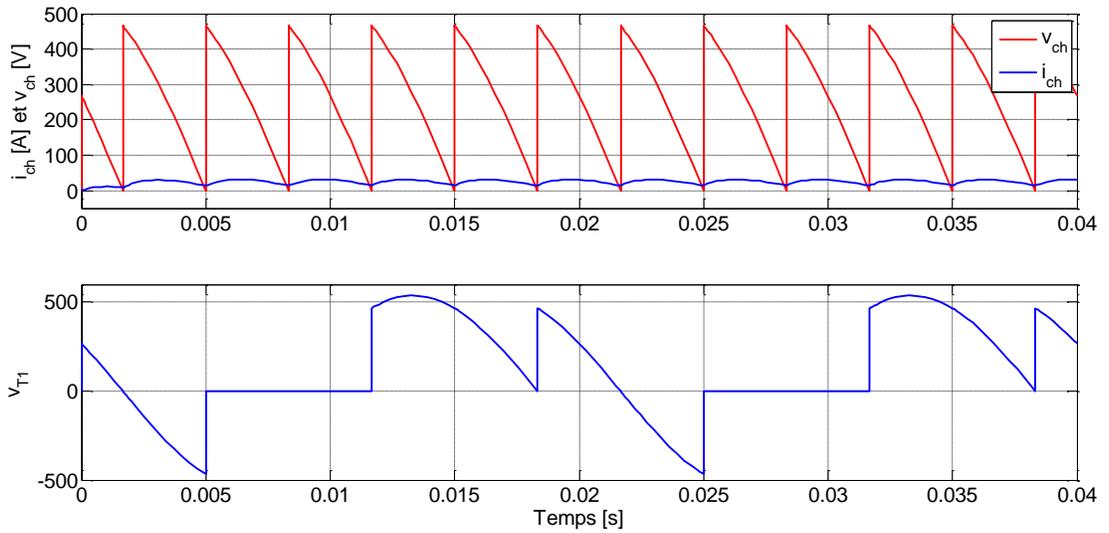


Figure 16 : a) Formes d'ondes des courant et la tension de charge et la tension de  $v_{T1}$  ( $Lw \gg R$ )

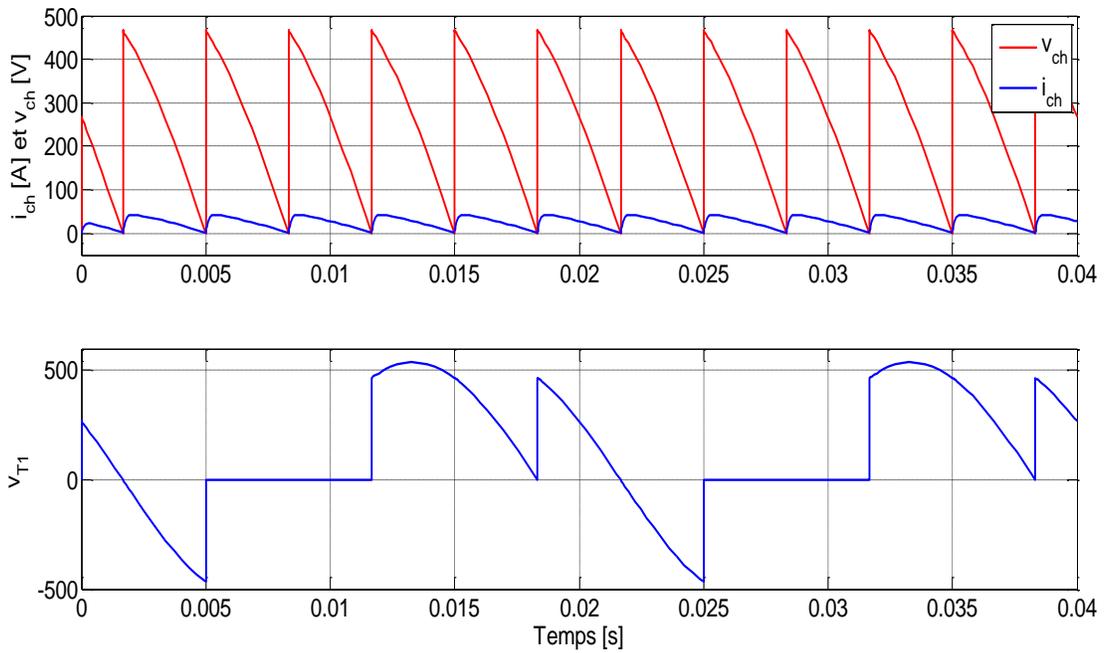


Figure 16 : b) Formes d'ondes des courant et la tension de charge et la tension de  $v_{T1}$  ( $Lw < R$ )