Université Ferhat Abbas-Sétif 1 *23/10/2016*

Faculté de Technologie

Département d'électrotechnique

Electronique de puissance (LET,52)

Chapitre 3

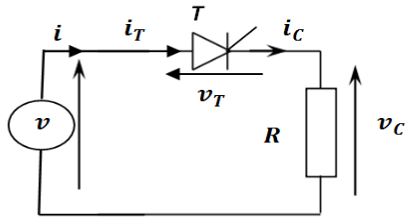
Les Convertisseurs Alternatifs/Continu

Les Montages Redresseurs monophasés commandés

3-1- Redressement simple alternance commandé par thyristor

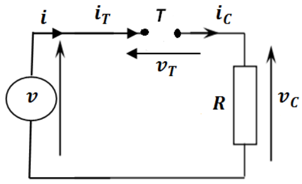
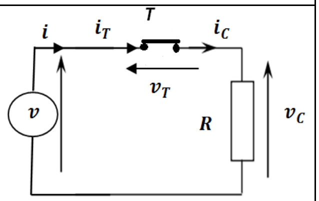
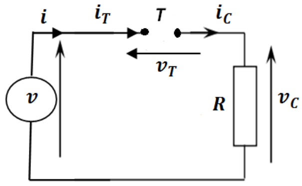
3-1-1-charge résistive

a- Montage

$v = V_M \cdot sin\theta$ avec $\theta = \omega \cdot t$ $V_M = V_{eff} \cdot \sqrt{2}$ $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ $f = \frac{1}{T} = 50Hz \rightarrow T = 20ms$ $T = 2 \cdot \pi$	 *Montage simple alternance commandé Sur Résistive*

b- Principe de fonctionnement

On amorce le thyristor à $\omega \cdot t_1 = \alpha$

• pour $0 < \theta < \alpha$ $v > 0\ et\ i_G = 0$ ⇒T est bloqué ⇒	• $v - v_T - v_C = 0 \Rightarrow v_T = v$ • $v_C = 0$ • $i_C = i = i_T = 0$	
• pour $\alpha < \theta < \pi$ $v > 0\ et\ i_G > 0$ ⇒T est passant ⇒	• $v_T = 0$ • $v_C = v = V_M \cdot sin\theta$ • $i_C = \frac{v_C}{R} = \frac{v}{R} = i = i_T$	
• pour $\pi < \theta < 2 \cdot \pi$ $v < 0\ et\ i_T = 0$ ⇒T est bloqué ⇒	• $v - v_T - v_C = 0 \Rightarrow v_T = v$ • $v_C = 0$ • $i_C = i = i_T = 0$	

D'où v_C et i_C ont la même forme

c- Valeur moyenne de la tension v_C et du courant i_C

$$\langle v_C \rangle = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_{\alpha}^{\pi} v_C \cdot d\theta = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_M \cdot sin\theta \cdot d\theta = \frac{V_M}{2 \cdot \pi} [-cos\theta]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_M}{2 \cdot \pi} (1 + cos\alpha)$$

donc, on variant α de *0* à π, on peut varier la tension moyenne $\langle v_C \rangle$ de v_C de $\frac{V_M}{\pi}$ à *0*

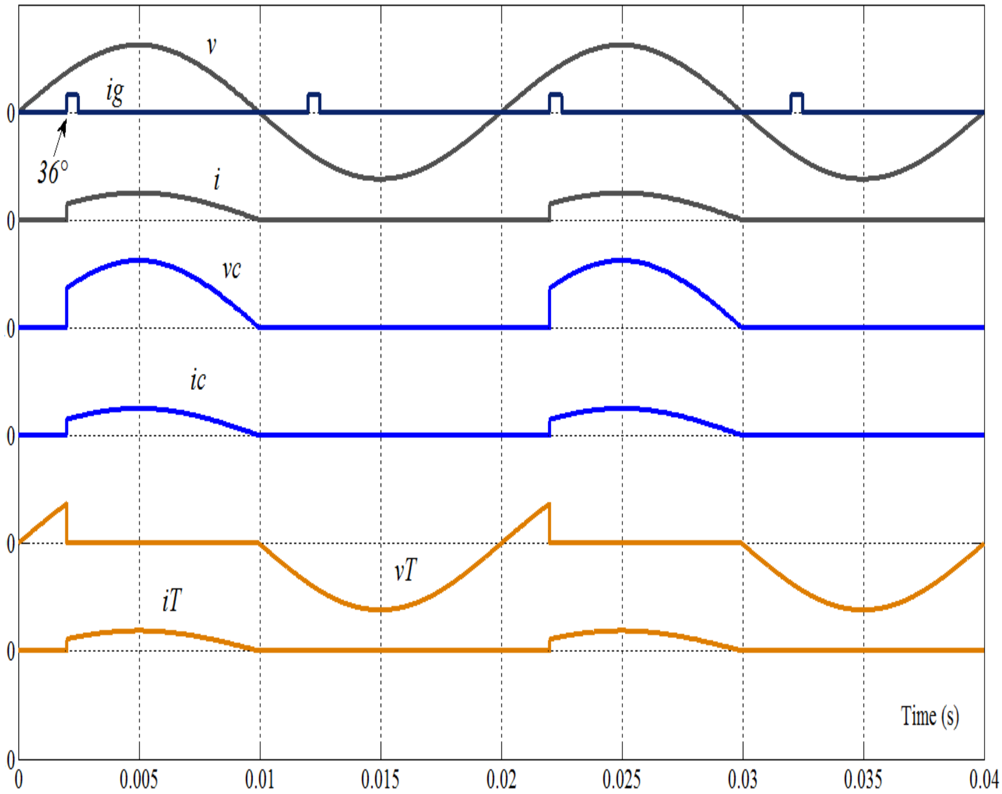
• La valeur moyenne de la tension de sortie est positive et dépend des paramètres de la tension d'entrée et α.

• La tension maximale à supporter par le thyristor en inverse est: $V_{Tmax} = -V_M$

$$\langle i_C \rangle = \frac{\langle v_C \rangle}{R} = \frac{V_M}{2 \cdot \pi \cdot R} (1 + cos\alpha) = \langle i \rangle = \langle i_T \rangle$$

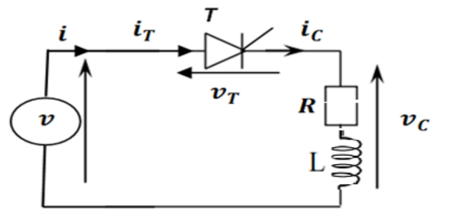
Application numérique :

$V_{eff} = 220V$, $\alpha = 36°$ et $R = 100\Omega \Rightarrow \langle v_C \rangle = \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi}(1 + cos36) = 89.6V$ et $\langle i_C \rangle = \frac{\langle v_C \rangle}{R} = \frac{89.6V}{100} = 0.896A$ et $V_{Dmax} \cong -311V$



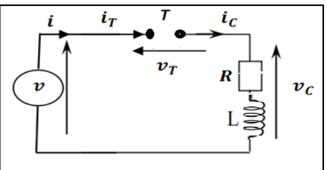
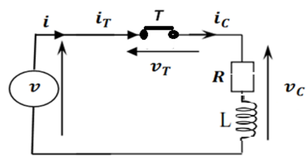
3.1.2- Débit sur une charge mixte résistive inductive

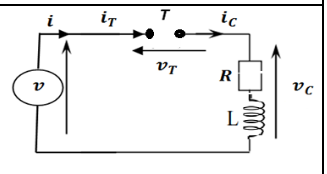
a- Montage

$v = V_M \cdot sin\theta$ avec $\theta = \omega \cdot t$ $V_M = V_{eff} \cdot \sqrt{2}$ $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ $f = \frac{1}{T} = 50Hz \rightarrow T = 20ms$ $T = 2 \cdot \pi$	 *Montage simple alternance commandé sur R-L*

b- Principe de fonctionnement

On amorce le thyristor à $\omega \cdot t_1 = \alpha$

• pour $0 < \theta < \alpha$ $v > 0$ et $i_G = 0$ ⇒T est bloqué ⇒	• $v - v_T - v_C = 0 \Rightarrow v_T = v$ • $v_C = 0$ • $i_C = i = i_T = 0$	
Le thyristor reste en conduction jusqu'à θ_1(l'instant de blocage) où le courant s'annule. l'angle de conduction du thyristor est: $\theta_{cond} = \theta_1 - \alpha$		
• pour $\alpha < \theta < \theta_1$ $v > 0$ et $i_G > 0$ ⇒T est passant ⇒	• $v_T = 0$ • $L \cdot \frac{di_C}{dt} + R \cdot i_C = v_C = v$ La solution générale de i_C est alors : $i_C = K \cdot e^{-\frac{\theta}{\omega.\tau}} + I_{CM} \cdot \sin(\theta - \varphi)$	

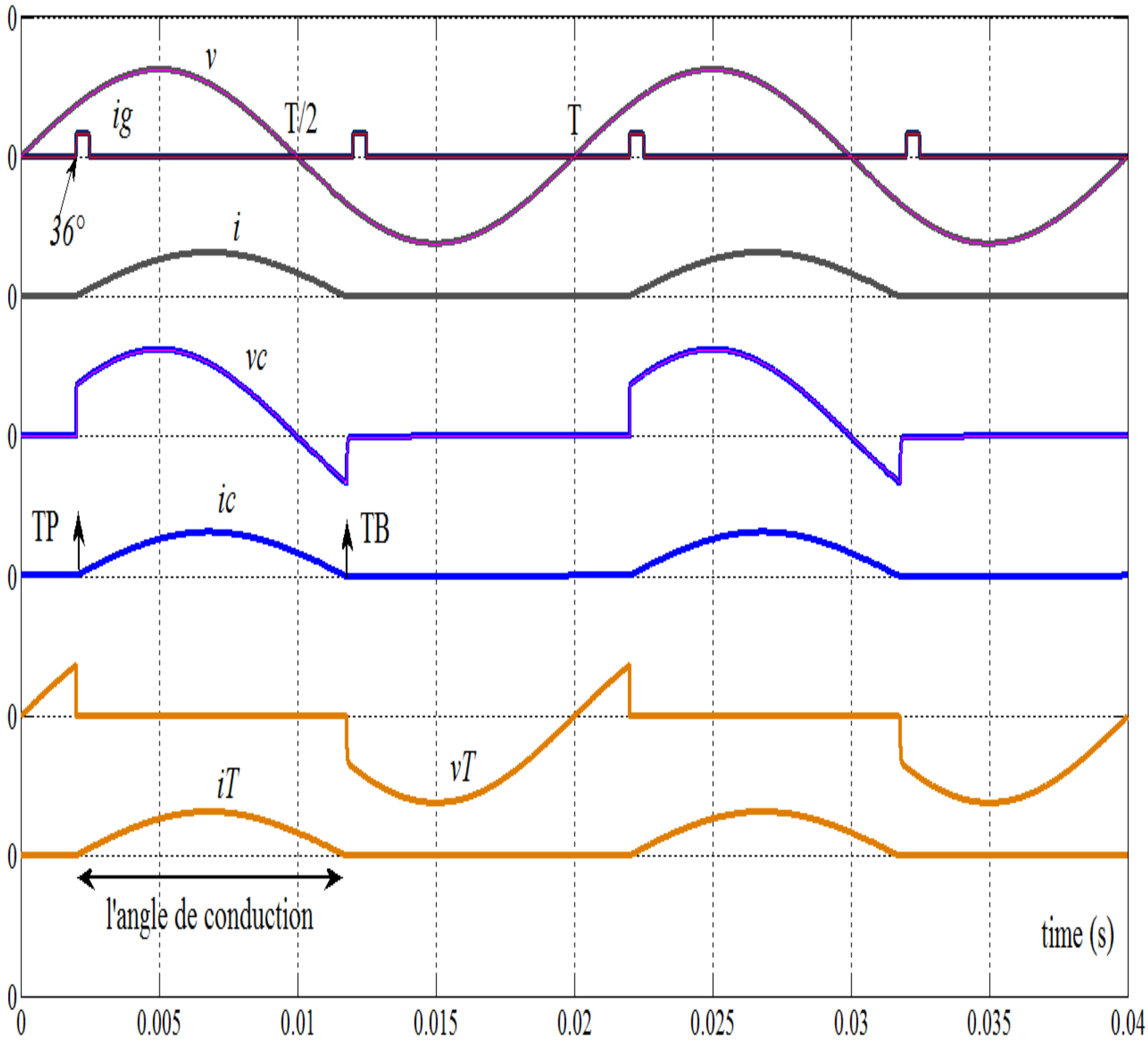
	$\begin{cases} tg\varphi = \dfrac{L\cdot\omega}{R} \\ I_{CM} = \dfrac{V_M}{\sqrt{R^2+(L\cdot\omega)^2}} = \dfrac{V_M}{Z} \end{cases}$ Condition initiale à: $\omega\cdot t_1 = \alpha \Rightarrow i_C(\alpha) = 0 = K\cdot e^{-\frac{\alpha}{\omega.\tau}} + I_{CM}\cdot\sin(\alpha-\varphi) \Rightarrow$ $K = -I_{CM}\cdot\sin(\alpha-\varphi)\cdot e^{\frac{\alpha}{\omega.\tau}}$ Finalement l'expression générale i_C est: $i_C = I_{CM}\cdot\left[\sin(\theta-\varphi)-\sin(\alpha-\varphi)\cdot e^{-\frac{\theta-\alpha}{\tau}}\right]$	
Le thyristor cesse de conduire à $\theta_{ext} = \theta_1 \Rightarrow i_C = 0 \Rightarrow \sin(\theta_1-\varphi)-\sin(\alpha-\varphi)\cdot e^{-\frac{\theta_1-\alpha}{\tau}} = 0$		
• pour $\theta_1 < \theta < 2\cdot\pi$ $v < 0$ et $i_T = 0 \Rightarrow$T est bloqué $\Rightarrow$	• $v - v_T - v_C = 0 \Rightarrow v_T = v$ • $v_C = 0$ • $i_C = i = i_T = 0$	

c- Valeur moyenne de la tension v_C

$$\langle v_C\rangle = \frac{1}{2\cdot\pi}\int_{\alpha}^{\theta_1} v_C\cdot d\theta = \frac{1}{2\cdot\pi}\int_{\alpha}^{\theta_1} V_M\cdot sin\theta\cdot d\theta = \frac{V_M}{2\cdot\pi}[-cos\theta]_{\alpha}^{\theta_1} = \frac{V_M}{2\cdot\pi}(cos\alpha - cos\theta_1)$$

remarque:

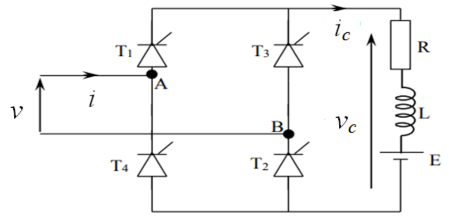
pour $\alpha = 0$ on retrouve l'étude d'un montage de redressement simple alternance sur une charge RL



3-2- Redressement double alternances commandé par thyristor

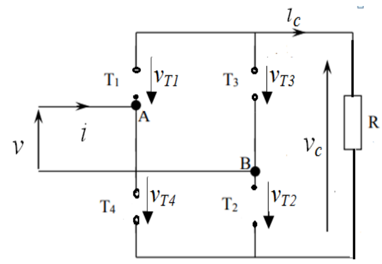
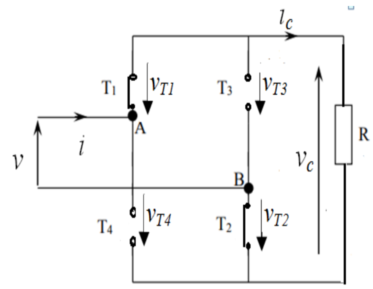
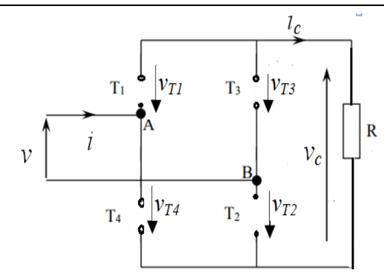
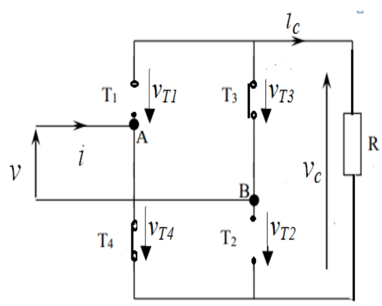
3-2-1-redresseur en pont sur une charge résistive

a- Montage

$v = V_M \cdot sin\theta$ avec $\theta = \omega \cdot t$ $V_M = V_{eff} \cdot \sqrt{2}$ $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ $f = \frac{1}{T} = 50Hz \rightarrow T = 20ms$ $T = 2 \cdot \pi$	 *Montage double alternances*

b- Principe de fonctionnement

On amorce le thyristor à $\omega \cdot t_1 = \alpha$

• Pour $0 < \theta < \alpha$ $v > 0 \; et \; i_G = 0$ ⇒Tous les thyristors sont bloqués ⇒	• $i_C = i = i_{T1} = i_{T2} = i_{T3} = i_{T4} = 0$ • $v_C = 0$ • $v_{T3} = v_{T4}(thyristors\ identiques)$ • $v + v_{T4} + v_C + v_{T3} = 0$ $\Rightarrow v_{T4} = -\frac{v}{2} = -\frac{V_M \cdot sin\theta}{2}$	
• pour $\alpha < \theta < \pi$ $v > 0 \; et \; i_G > 0$ $\Rightarrow \left\{ \begin{matrix} T1\ et\ \ T2\ sont\ passants \\ \text{et T3 et T4 sont bloqués} \end{matrix} \right\} \Rightarrow$	• $v_{T1} = v_{T2} = 0$ • $i_{T3} = i_{T4} = 0$ • $v - v_{T1} - v_C - v_{T2} = 0 \Rightarrow v_C = v$ • $i_C = \frac{v_C}{R} = \frac{v}{R}$ • $i = i_{T1} = i_{T2} = i_C$ • $v - v_{T1} + v_{T3} = 0 \Rightarrow v_{T3} = -v$ • $v_C + v_{T1} + v_{T4} = 0 \Rightarrow v_{T4} = -v_C = -v$	
• Pour $\pi < \theta < \pi + \alpha$ $v < 0 \; et \; i_G = 0$ ⇒Tous les thyristors sont bloqués ⇒	• $i_C = i = i_{T1} = i_{T2} = i_{T3} = i_{T4} = 0$ • $v_C = 0$ • $v_{T3} = v_{T4}(thyristors\ identiques)$ • $v + v_{T4} + v_C + v_{T3} = 0$ $\Rightarrow v_{T4} = -\frac{v}{2} = -\frac{V_M \cdot sin\theta}{2}$	
• pour $\alpha + \pi < \theta < 2 \cdot \pi$ $v < 0 \; et \; i_G > 0$ $\Rightarrow \left\{ \begin{matrix} T1\ et\ \ T2\ sont\ \text{bloqués} \\ \text{et T3 et T4 sont passants} \end{matrix} \right\} \Rightarrow$	• $v_{T3} = v_{T4} = 0$ • $i_{T1} = i_{T2} = 0$ • $i_C = \frac{v_C}{R} = \frac{-v}{R}$ • $i_{T3} = i_{T4} = i_C$ • $i = -i_C$ • $v + v_{T4} + v_C + v_{T3} = 0 \Rightarrow v_C = -v$ • $v - v_{T1} + v_{T3} = 0 \Rightarrow v_{T1} = v_C = v$ • $v_C + v_{T3} + v_{T2} = 0 \Rightarrow v_{T2} = -v_C = -v$	

c- Valeur moyenne de la tension v_C et du courant i_C

$$\langle v_C\rangle = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} v_C\cdot d\theta = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} V_M\cdot sin\theta\cdot d\theta = \frac{V_M}{\pi}[-cos\theta]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_M}{\pi}(1+cos\alpha)$$

$$V_{Ceff}{}^2 = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi}\langle v_c^2\rangle\cdot d\theta = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} V_M^2\cdot(sin\theta)^2\cdot d\theta = \frac{V_M^2}{\pi}\int\frac{(1-cos2\theta)}{2}\cdot d\theta = \frac{V_M^2}{2\cdot\pi}\cdot\left[\theta-\frac{sin2\theta}{2}\right]_{\alpha}^{\pi}$$

$$= \frac{V_M^2}{2\cdot\pi}\cdot\left[(\pi-0)-\left(\alpha-\frac{sin2\alpha}{2}\right)\right] = \frac{V_M^2}{2}\cdot\left[1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{sin2\alpha}{2\cdot\pi}\right]$$

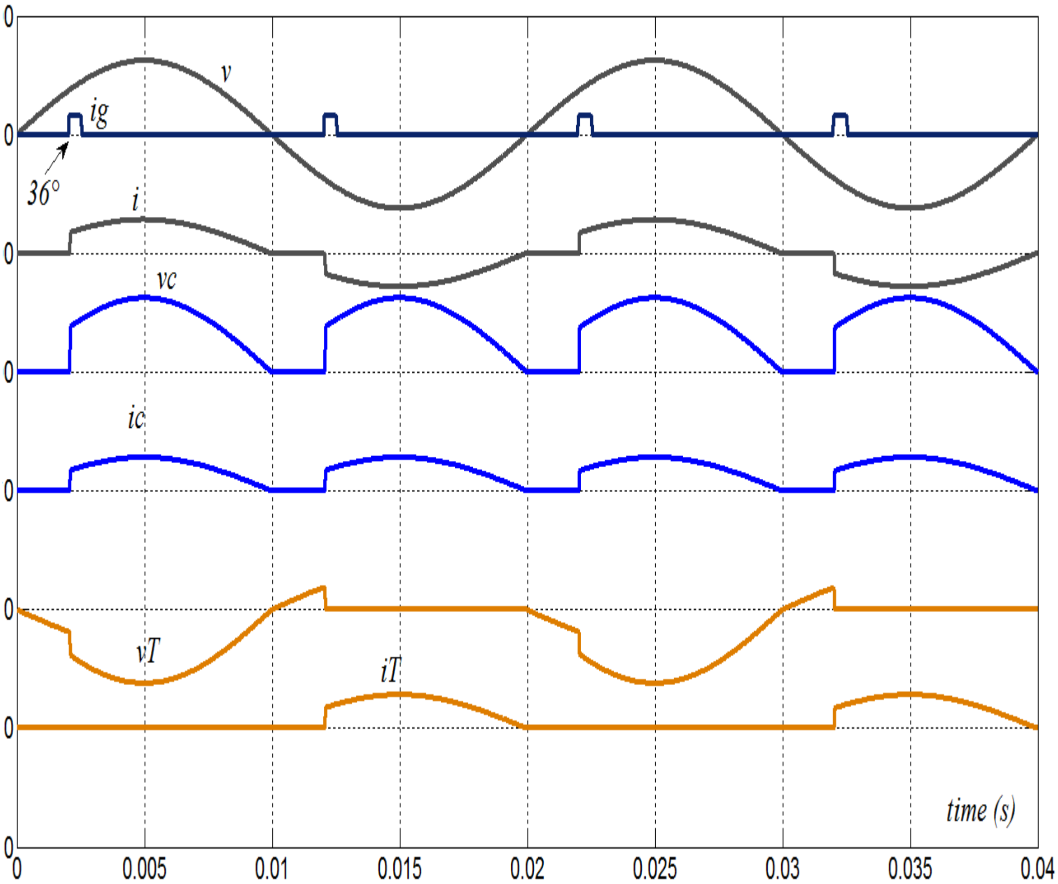
$$\Rightarrow V_{Ceff} = \frac{V_M}{\sqrt{2}}\cdot\sqrt{1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{sin2\alpha}{2\cdot\pi}}$$

$$\langle i_C\rangle = \frac{\langle v_C\rangle}{R} = \frac{V_M}{\pi\cdot R}(1+cos\alpha)$$

$$i_{Ceff} = \frac{V_{Ceff}}{R}$$

$$\langle i_{T1}\rangle = \frac{\langle i_C\rangle}{2} = \frac{V_M}{2.\pi\cdot R}(1+cos\alpha)$$

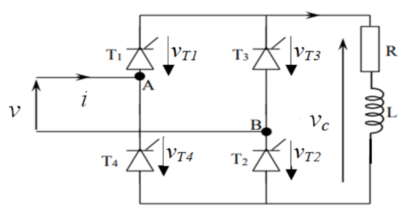
$$\langle i\rangle = 0$$



3-2-2-redresseur en pont sur une charge résistive R-L

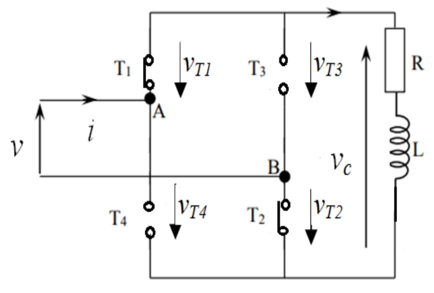
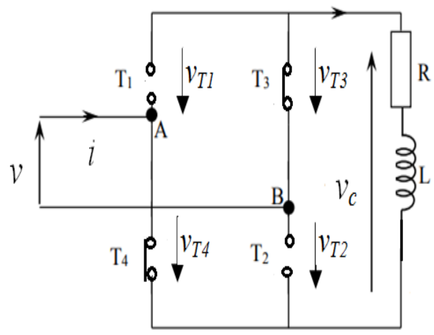
la charge est frottement inductive $L >> R \Rightarrow i_C = I_C$

a- Montage

$v = V_M\cdot sin\theta$ avec $\theta = \omega\cdot t$ $V_M = V_{eff}\cdot\sqrt{2}$ $\omega = 2\cdot\pi\cdot f$ $f = \frac{1}{T} = 50Hz \rightarrow T = 20ms$ $T = 2\cdot\pi$	 *Montage double alternances*

b- Principe de fonctionnement

On amorce le thyristor à $\omega \cdot t_1 = \alpha$

• pour $\alpha < \theta < \pi + \alpha$ $v > 0 \; et \; i_G > 0$ $\Rightarrow \left\{ \begin{matrix} T1 \; et \; T2 \; sont \; passants \\ T3 \; et \; T4 \; sont \; bloqués \end{matrix} \right\} \Rightarrow$	• $v_{T1} = v_{T2} = 0$ • $i_{T3} = i_{T4} = 0$ • $i = i_{T1} = i_{T2} = I_C$ • $v - v_{T1} - v_C - v_{T2} = 0 \Rightarrow v_C = v$ • $v - v_{T1} + v_{T3} = 0 \Rightarrow v_{T3} = -v$ • $v_C + v_{T1} + v_{T4} = 0 \Rightarrow v_{T4} = -v_C = -v$	
• pour $\pi + \alpha < \theta < 2 \cdot \pi + \alpha$ $v > 0 \; et \; i_G > 0$ $\Rightarrow \left\{ \begin{matrix} T1 \; et \; T2 \; sont \; bloqués \\ T3 \; et \; T4 \; sont \; passants \end{matrix} \right\} \Rightarrow$	• $v_{T3} = v_{T4} = 0$ • $i_{T1} = i_{T2} = 0$ • $i = i_{T3} = i_{T4} = I_C$ • $i = -I_C$ • $v + v_{T4} + v_C + v_{T3} = 0 \Rightarrow v_C = -v$ • $v - v_{T1} + v_{T3} = 0 \Rightarrow v_{T1} = v_C = v$ • $v_C + v_{T3} + v_{T2} = 0 \Rightarrow v_{T2} = -v_C = v$	

c- Valeur moyenne de la tension v_C et du courant i_C

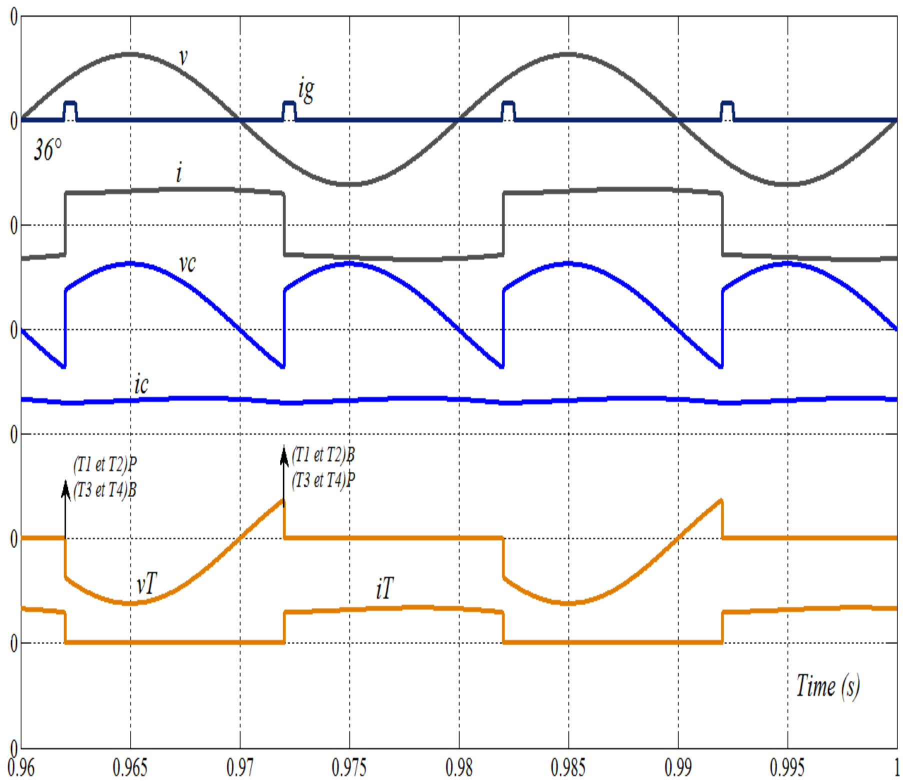
$$\langle v_C \rangle = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} v_C \cdot d\theta = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_M \cdot sin\theta \cdot d\theta = \frac{V_M}{\pi}[-cos\theta]_{\alpha}^{\pi+\alpha} = \frac{V_M}{\pi}(cos\alpha - cos(\pi+\alpha)) = \frac{2 \cdot V_M}{\pi} cos\alpha$$

$$V_{Ceff}{}^2 = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \langle v_c^2 \rangle \cdot d\theta = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_M^2 \cdot (sin\theta)^2 \cdot d\theta = \frac{V_M^2}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \frac{(1-cos2\theta)}{2} \cdot d\theta = \frac{V_M^2}{2\cdot\pi} \cdot \left[\theta - \frac{sin2\theta}{2}\right]_{\alpha}^{\pi+\alpha}$$

$$= \frac{V_M^2}{2\cdot\pi} \cdot \left[\left(\pi+\alpha-\frac{sin2(\pi+\alpha)}{2}\right) - \left(\alpha - \frac{sin2\alpha}{2}\right)\right] = \frac{V_M^2}{2} \Rightarrow V_{Ceff} = \frac{V_M}{\sqrt{2}}$$

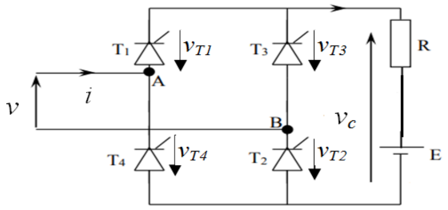
$$\langle i_C \rangle = I_C, \qquad \langle i_T \rangle = \frac{\langle i_C \rangle}{2} = \frac{I_C}{2}$$

$$\langle i \rangle = 0$$



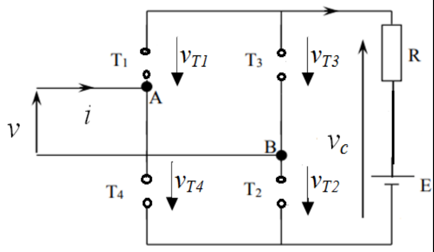
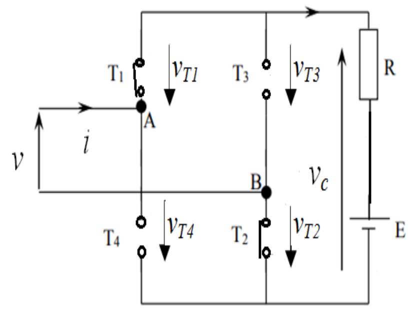
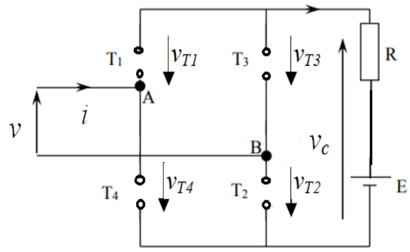
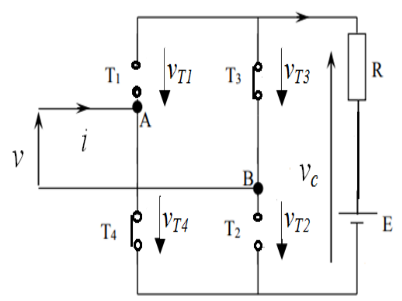
3-2-3-redresseur en pont sur une charge R- E

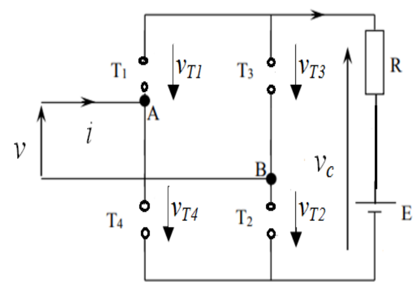
a- Montage

$v = V_M \cdot sin\theta$ avec $\theta = \omega \cdot t$ $V_M = V_{eff} \cdot \sqrt{2}$ $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ $f = \frac{1}{T} = 50Hz \to T = 20ms$ $T = 2 \cdot \pi$	 *Montage double alternances*

b- Principe de fonctionnement

On amorce le thyristor à $\omega \cdot t_1 = \alpha$

• pour $0 < \theta < \theta_1$ $v < E \;\forall\; i_G > 0$ $\Rightarrow \begin{Bmatrix} T1\ et\ \ T2\ sont\ bloqués \\ T3\ et\ \ T4\ sont\ bloqués \end{Bmatrix} \Rightarrow$	• $i_C = i = i_{T1} = i_{T2} = i_{T3} = i_{T4} = 0$ • $v_C = E$ • $v_{T4} = v_{T3}$ (thyristors identiques) • $v + v_{T4} + v_C + v_{T3} = 0$ • $\Rightarrow v_{T4} = \frac{v - v_C}{2} = \frac{v-E}{2}$	
• pour $\theta_1 < \theta < \theta_2$ à $\theta_1 : V_M \cdot sin\theta_1 = E$ $\Rightarrow \theta_1 = arcsin\frac{E}{V_M}$ $\theta_2 = \pi - \theta_1$ $v > E\ et\ i_G > 0$ $\Rightarrow \begin{Bmatrix} T1\ et\ \ T2\ sont\ passants \\ T3\ et\ \ T4\ sont\ bloqués \end{Bmatrix} \Rightarrow$	• $v_{T1} = v_{T2} = 0$ • $i_{T3} = i_{T4} = 0$ • $v - v_{T1} - v_C - v_{T2} = 0$ $\Rightarrow v_C = v = R \cdot i_c + E$ • $i_C = \frac{v-E}{R} = i = i_{T1} = i_{T2}$ • $v_C + v_{T1} + v_{T4} = 0 \Rightarrow v_{T4} = -v_C = -v$	
• pour $\theta_2 < \theta < \pi + \theta_1$ $v < E \;\forall\; i_G > 0$ $\Rightarrow$ $\begin{Bmatrix} T1\ et\ \ T2\ sont\ bloqués \\ T3\ et\ \ T4\ sont\ bloqués \end{Bmatrix}$ $\Rightarrow$	• $i_C = i = i_{T1} = i_{T2} = i_{T3} = i_{T4} = 0$ • $v_C = E$ • $v_{T4} = v_{T3}$ (thyristors identiques) • $v + v_{T4} + v_C + v_{T3} = 0$ • $\Rightarrow v_{T4} = \frac{v - v_C}{2} = \frac{v-E}{2}$	
• pour $\pi + \theta_1 < \theta <$ $2\pi - \theta_1$ $v > E\ et\ i_G > 0$ $\Rightarrow$ $\begin{cases} T1\ et\ \ T2\ sont\ bloqués \\ T3\ et\ \ T4\ sont\ \Rightarrow\ passant \end{cases}$	• $v_{T3} = v_{T4} = 0$ • $i_{T1} = i_{T2} = 0$ • $v + v_{T4} + v_C + v_{T3} = 0$ • $\Rightarrow v_C = -v = R \cdot i_c + E$ • $i_C = \frac{-v-E}{R} = i_{T1} = i_{T2}$ • $i = -i_C$	

• pour $2\pi - \theta_1 < \theta < 2\pi$ $v < E \ \forall \ i_G > 0$ $\Rightarrow$ $\left\{\begin{matrix} T1\ et\ T2\ sont\ bloqués \\ T3\ et\ T4\ sont\ bloqués \end{matrix}\right\}$ $\Rightarrow$	• $i_C = i = i_{T1} = i_{T2} = i_{T3} = i_{T4} = 0$ • $v_C = E$ • $v_{T4} = v_{T3}$ (thyristors identiques) • $v + v_{T4} + v_C + v_{T3} = 0$ $\Rightarrow v_{T4} = \frac{v - v_C}{2} = \frac{v - E}{2}$	

c- Valeur moyenne de la tension v_C et du courant i_C

$$\langle v_C \rangle = \frac{1}{\pi}\int_0^{\theta_1} E \cdot d\theta + \frac{1}{\pi}\int_{\theta_1}^{\theta_2} v_C \cdot d\theta = \frac{1}{\pi}\int_0^{\theta_1} E \cdot d\theta + \frac{1}{\pi}\int_{\theta_1}^{\theta_2} V_M \cdot sin\theta \cdot d\theta = \frac{E}{\pi}[\theta]_0^{\theta_1} + \frac{V_M}{\pi}[-cos\theta]_{\theta_1}^{\theta_2}$$

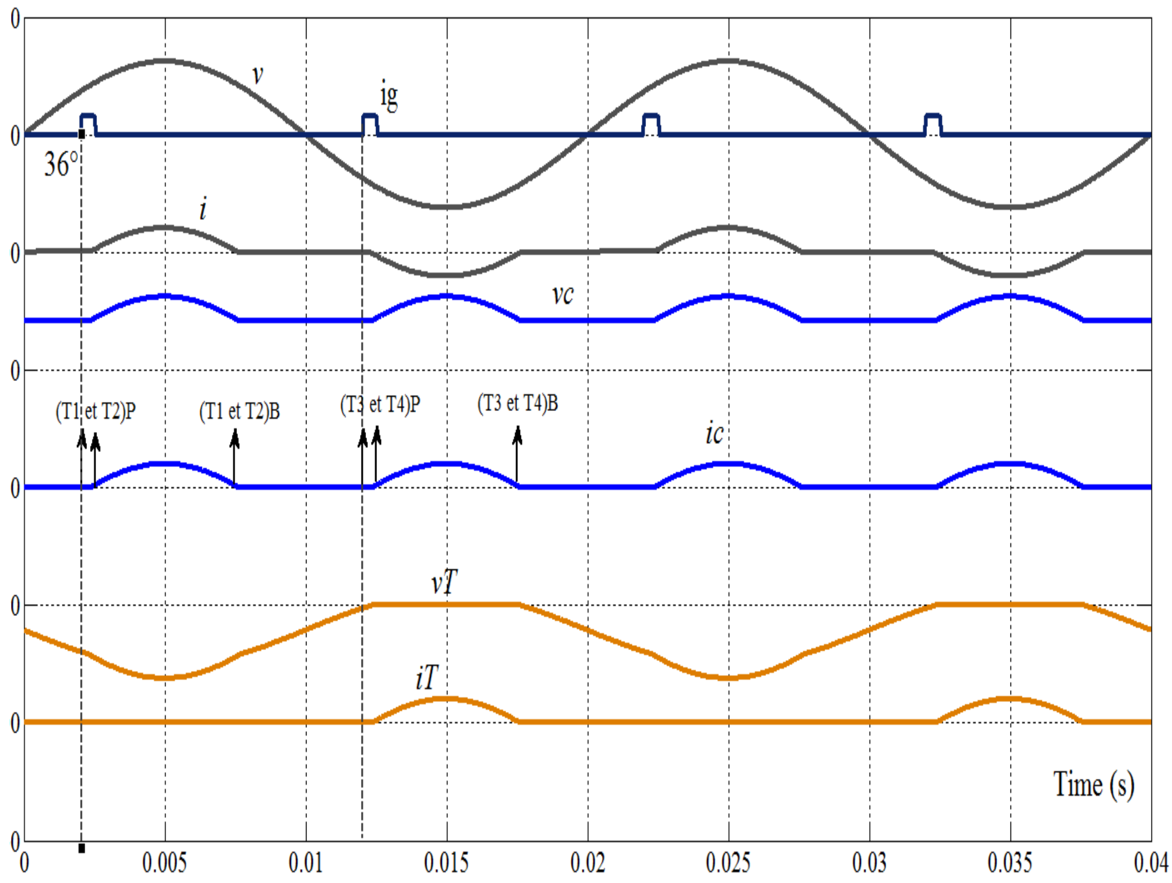
$$= \frac{E}{\pi} \cdot \theta_1 + \frac{V_M}{\pi}(cos\theta_1 - cos(\theta_2))$$

$$v_C = R \cdot i_C + E \Rightarrow \langle v_C \rangle = R \cdot \langle i_C \rangle + E$$

$$\langle i_C \rangle = \frac{\langle v_C \rangle - E}{R}$$

$$\langle i_T \rangle = \frac{\langle i_C \rangle}{2}$$

$$\langle i \rangle = 0$$



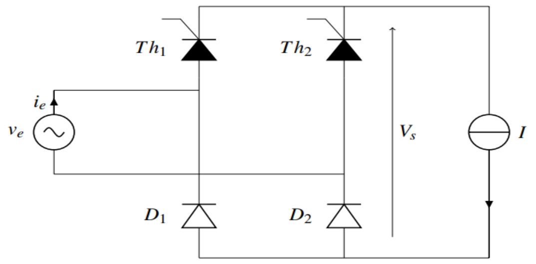
3-3 redresseur en pont mixtes sur une charge fortement inductive

Il est possible de "mixer" les ponts redresseurs à diodes et à thyristors pour obtenir des structures hybrides appelées ponts mixtes. En fonction de la disposition des semi-conducteurs, 2 types se distinguent :

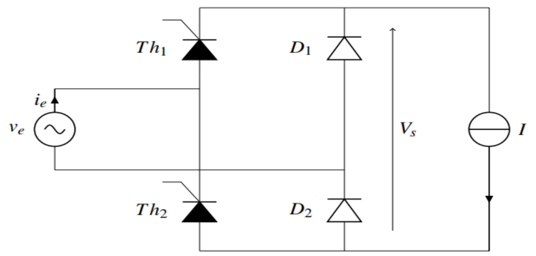
– Pont mixte symétrique

– Pont mixte asymétrique

Ces 2 types sont représentés à la Figure 1.



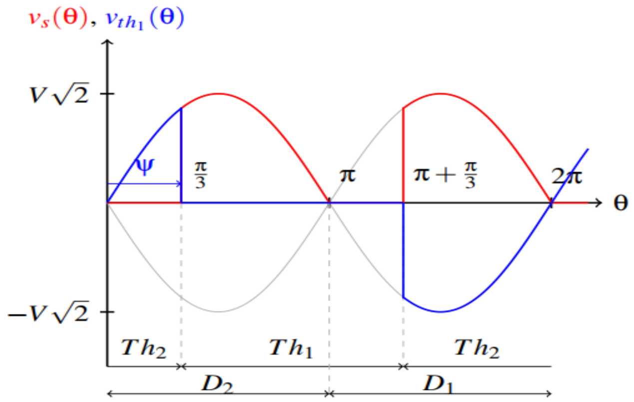
Structure Symétrique



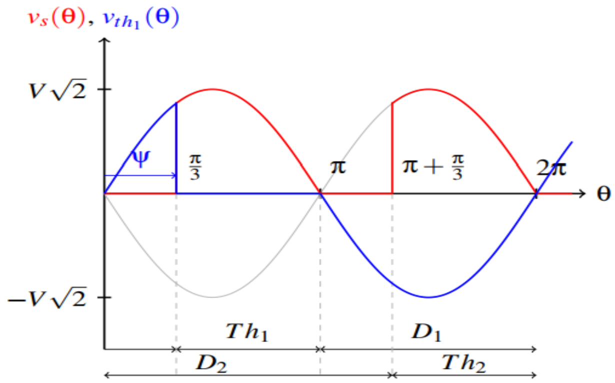
Structure Asymétrique

Figure 1 – PD2 Mixte

Le choix entre ces différentes structures se fera en fonction de l'application visée et du nombre de quadrants envisagés. Bien entendu, le choix d'une structure mixte permet réduire les coûts liés aux semi-conducteurs (un thyristor restant plus élevé qu'une diode (~ d'un facteur 5 à 10)). Compte-tenu de la disposition des semi-conducteurs, la séquence de conduction est différentes pour un pont symétrique et pour un pont asymétrique. Pour autant, cela n'a aucune importance sur la tension de sortie du convertisseur. La Figure 2 donne une idée de la séquence de conduction, de la tension de sortie et de l'allure de la tension aux bornes du thyristor 1 pour les 2 ponts envisagés.



(a) Pont mixte symétrique



(b) Pont mixte Asymétrique

Figure 2 – Séquence de conduction, tensions de sortie et aux bornes du thyristor 1