

Electronique de Puissance (LET52)

Solution du TD N°3: Redressement Monophasé Commandé

Correction N°1

a- Charge résistive R

Principe de fonctionnement

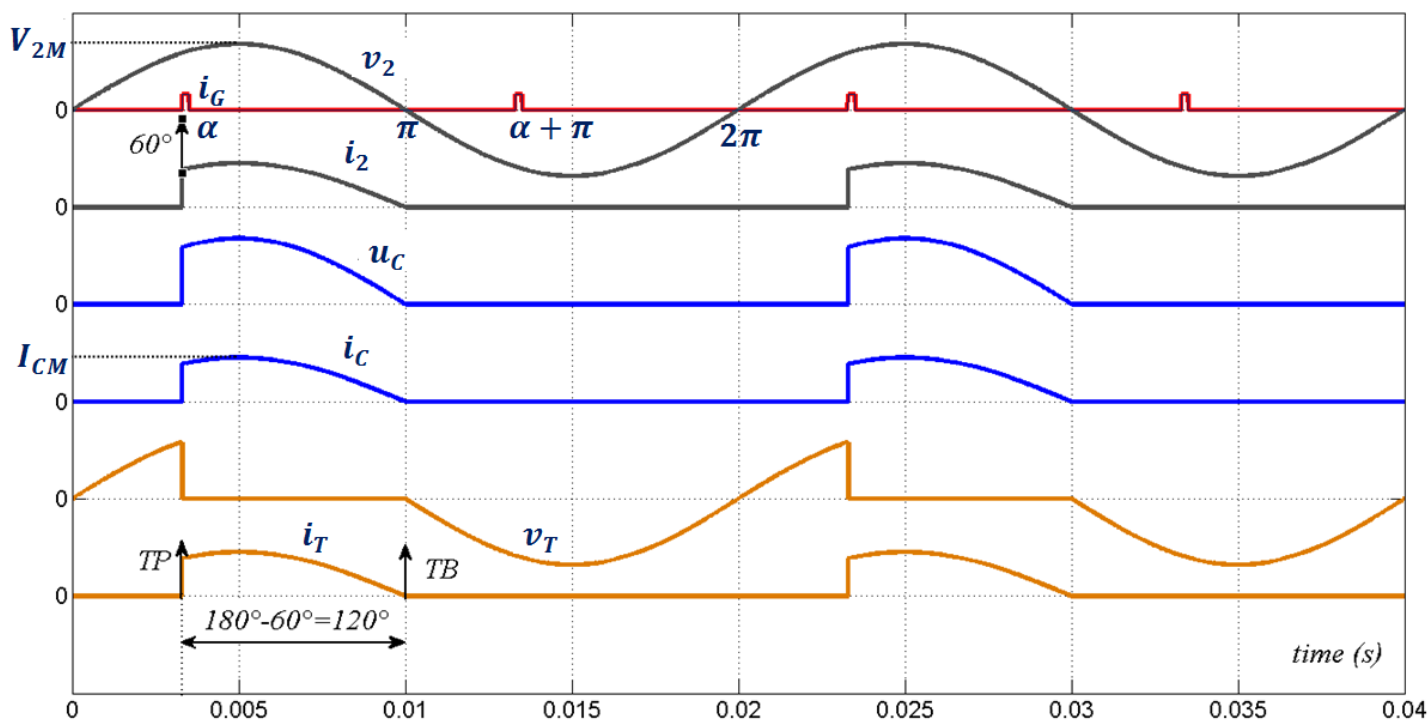
$$v_2 = V_{2M} \sin \theta$$

On amorce le thyristor à $\theta = \alpha$

<ul style="list-style-type: none"> pour $0 < \theta < \alpha$ $v_2 > 0$ et $i_G = 0 \Rightarrow T$ est bloqué \Rightarrow 	<ul style="list-style-type: none"> $i_T = i_2 = i_C = 0$ $u_C = 0$ $v_2 - v_T - u_C = 0 \Rightarrow v_T = v_2$ 	
<ul style="list-style-type: none"> pour $\alpha < \theta < \pi$ $v_2 > 0$ et $i_G > 0 \Rightarrow T$ est passant \Rightarrow 	<ul style="list-style-type: none"> $v_T = 0$ $u_C = v_2$ $i_C = \frac{u_C}{R} = \frac{v_2}{R} = i_2 = i_T$ 	
<ul style="list-style-type: none"> pour $\pi < \theta < 2 \cdot \pi$ $v_2 < 0$ et $i_T = 0 \Rightarrow T$ est bloqué \Rightarrow 	<ul style="list-style-type: none"> $i_T = i_2 = i_C = 0$ $u_C = 0$ $v_2 - v_T - u_C = 0 \Rightarrow v_T = v_2$ 	

a.1- Formes d'ondes

Les formes d'ondes des tensions u_C , v_T et celles des courants i_2 , i_C



a.2- L'angle de conduction du thyristor T est:

$$\theta_{cond} = \pi = 180^\circ - 60^\circ = 120^\circ$$

a.3- La valeur moyenne de u_c est :

$$\langle u_c \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} u_c d\theta = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{2M} \sin \theta d\theta = \frac{V_{2M}}{2\pi} [-\cos \theta]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_{2M}}{2\pi} (1 + \cos \alpha) = \frac{240\sqrt{2}}{2\pi} (1 + \cos 60^\circ) = 81.03V$$

La valeur moyenne de i_c est :

$$\langle i_c \rangle = \frac{\langle u_c \rangle}{R} = \frac{81.03}{15} = 5.4A = \langle i \rangle = \langle i_T \rangle$$

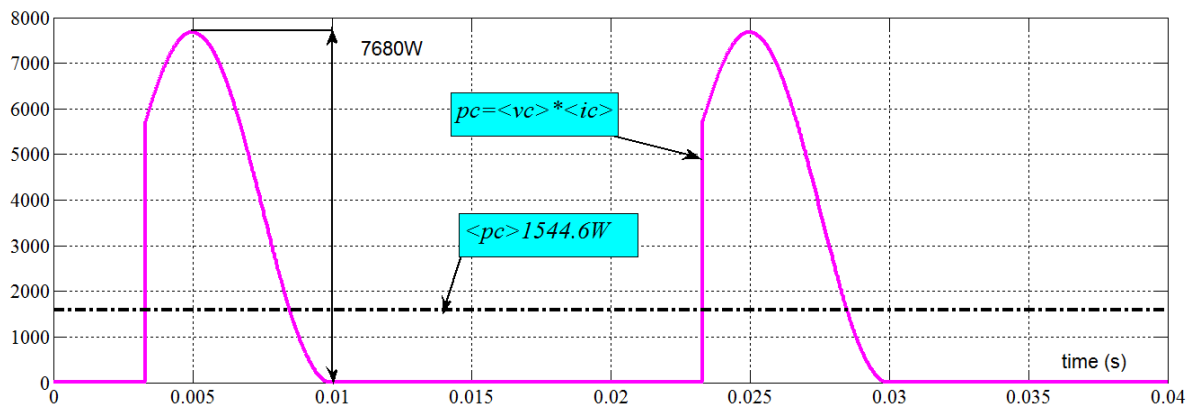
La valeur efficace de u_c est :

$$U_{eff}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} u_c^2 d\theta = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{2M}^2 \sin^2 \theta d\theta = \frac{V_{2M}^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{(1 - \cos 2\theta)}{2} d\theta = \frac{V_{2M}^2}{4\pi} \left[\theta - \frac{\sin 2\theta}{2} \right]_{\alpha}^{\pi}$$

$$= \frac{V_{2M}^2}{4\pi} \left[(\pi - 0) - \left(\alpha - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right] = \frac{V_{2M}^2}{4} \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right]$$

$$U_{eff} = \frac{V_{2M}}{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} = 152.6V$$

a.4- La forme d'onde de la puissance instantanée dans la charge R



la valeur moyenne de La puissance p_c est:

$$\langle P_c \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_{2M} \sin \theta I_{CM} \sin \theta d\theta = \frac{V_{2M} I_{CM}}{4\pi} \left[\theta - \frac{\sin 2\theta}{2} \right]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_{2M} I_{CM}}{4\pi} \left(\pi - \frac{\sin 2\pi}{2} - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)$$

$$= \frac{V_{2M} I_{CM}}{4\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) = \frac{240\sqrt{2} \times 22.63V}{4} \left(1 - \frac{60}{\pi} + \frac{\sin 2 \times 60}{2\pi} \right) = 1545W$$

b- Charge inductive R-L

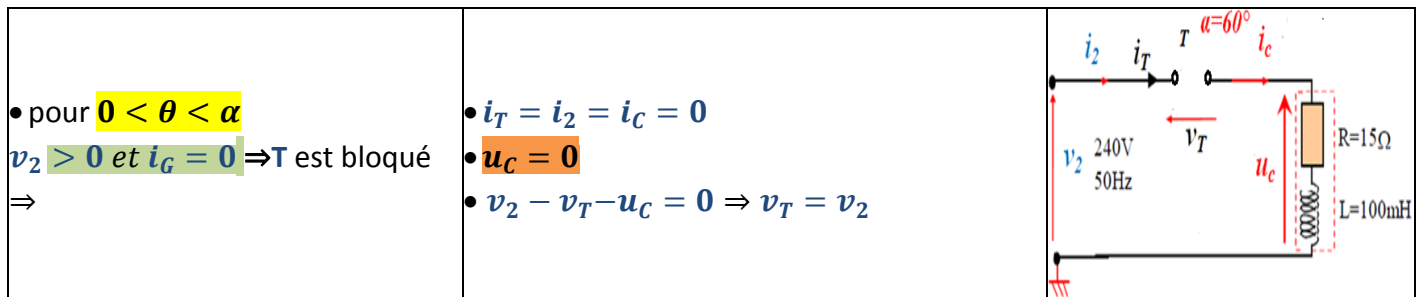
Principe de fonctionnement

Dans le cas d'une charge **R-L**, l'angle de conduction du thyristor T est plus grand que 180° .

Comme l'instant où le courant s'annule est donné par $\theta_{ext} = \theta_1 = 245.52^\circ = 4.285rad =$

13.64ms

On amorce le thyristor à $\theta = \alpha$



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: $\theta_{cond} = \theta_1 - \alpha$

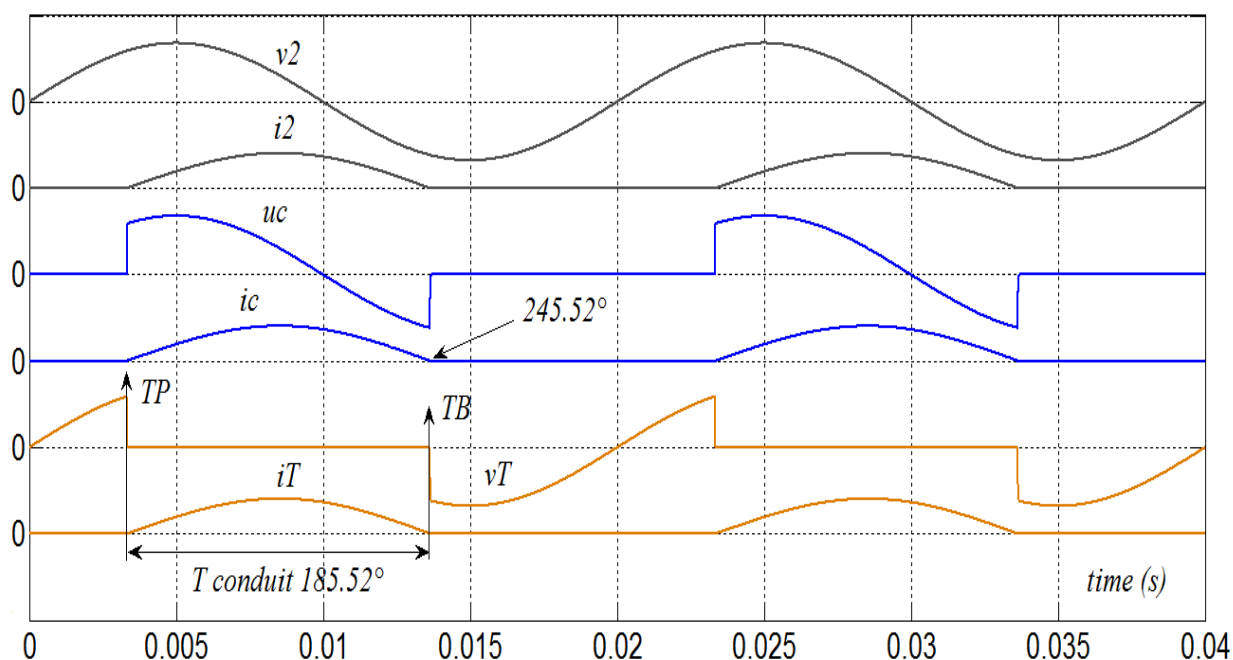
<ul style="list-style-type: none"> • pour $\alpha < \theta < \theta_1$ $v_2 > 0$ et $i_c > 0 \Rightarrow T$ est passant \Rightarrow 	<ul style="list-style-type: none"> • $v_T = 0$ • $i_C = i_2 = i_T$ • $L \cdot \frac{di_C}{dt} + R \cdot i_C = v_C = v_2$ <p>La solution générale de i_C est alors :</p> $i_C = Ke^{-\frac{\theta}{\omega\tau}} + I_{CM}\sin(\theta - \varphi)$ $\begin{cases} tg\varphi = \frac{L\omega}{R} \\ I_{CM} = \frac{V_{2M}}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}} = \frac{V_{2M}}{Z} \end{cases}$ <p>Condition initiale à: $\theta = \alpha \Rightarrow i_C(\alpha) = 0 = Ke^{-\frac{\alpha}{\omega\tau}} + I_{CM}\sin(\alpha - \varphi) \Rightarrow$</p> $K = -I_{CM}\sin(\alpha - \varphi)e^{\frac{\alpha}{\omega\tau}}$ <p>Finalement l'expression générale i_C est:</p> $i_C = I_{CM} \left[\sin(\theta - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi)e^{-\frac{\theta - \alpha}{\tau}} \right]$	
--	---	--

Le thyristor cesse de conduire à $\theta_{ext} = \theta_1 \Rightarrow i_C = 0 \Rightarrow \sin(\theta_1 - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{\theta_1 - \alpha}{\tau}}$

<ul style="list-style-type: none"> • pour $\theta_1 < \theta < 2 \cdot \pi$ $v_2 < 0$ et $i_T = 0 \Rightarrow T$ est bloqué \Rightarrow 	<ul style="list-style-type: none"> • $i_T = i_2 = i_C = 0$ • $u_C = 0$ • $v_2 - v_T - u_C = 0 \Rightarrow v_T = v_2$ 	
--	--	--

Formes d'ondes

b.1- Les formes d'ondes des tensions u_C, v_T et celles des courants i_2, i_C



b.2- L'angle de conduction du thyristor T est:

$$\theta_{cond} = \theta_1 - \alpha = 185.52^\circ$$

b.3- La valeur moyenne de u_c est:

$$\langle u_c \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\theta_1} u_c d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\theta_1} V_{2M} \sin\theta d\theta = \frac{V_{2M}}{2\pi} [-\cos\theta]_{\alpha}^{\theta_1} = \frac{V_{2M}}{2\pi} (\cos\alpha - \cos\theta_1) = 49.39V$$

– v_R la tension aux bornes de la résistance R

– v_L la tension aux bornes de l'inductance L

En valeur moyenne, cela donne :

$$\langle u_c \rangle = \langle v_L \rangle + \langle v_R \rangle$$

Or la valeur moyenne de la tension aux bornes d'une inductance est nulle en régime permanent :

$$\langle v_L \rangle = 0$$

D'où, pour la valeur moyenne du courant de sortie :

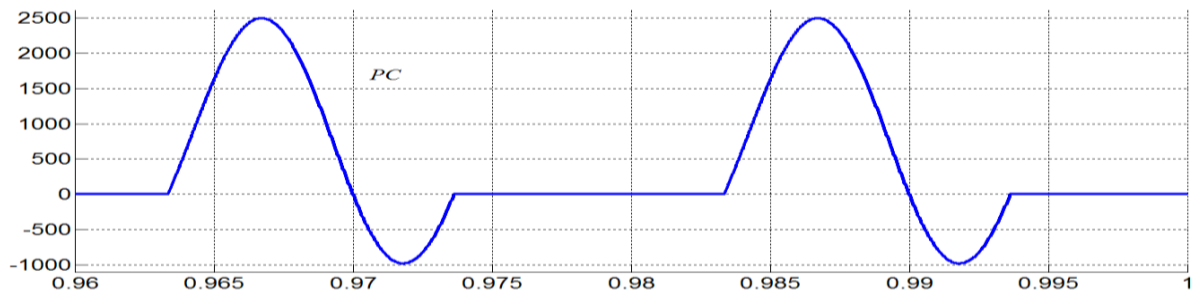
$$\langle i_c \rangle = \frac{\langle u_c \rangle}{R} = \frac{49.39}{15} = 3.293A$$

A tension d'entrée fixe, la valeur moyenne du courant de sortie dépend donc uniquement de la valeur de la résistance R de la charge.

La valeur efficace de u_c est :

$$\begin{aligned} U_{ceff}^2 &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_{\alpha}^{\theta_1} u_c^2 d\theta = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_{\alpha}^{\theta_1} V_{2M}^2 \sin^2\theta d\theta = \frac{V_{2M}^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\theta_1} \frac{(1 - \cos 2\theta)}{2} d\theta = \frac{V_{2M}^2}{4\pi} \left[\theta - \frac{\sin 2\theta}{2} \right]_{\alpha}^{\theta_1} \\ &= \frac{V_{2M}^2}{4\pi} \left[\left(\theta_1 - \frac{\sin 2\theta_1}{2} \right) - \left(\alpha - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right] = \frac{V_{2M}^2}{4\pi} \left[\theta_1 - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\sin 2\theta_1}{2} \right] \\ U_{ceff} &= \frac{V_{2M}}{2\pi} \sqrt{\theta_1 - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\sin 2\theta_1}{2}} = 173.6V \end{aligned}$$

b.4- La forme d'onde de la puissance instantanée dans la charge R



la valeur moyenne de La puissance p_c est:

$$\langle P_c \rangle = 390W$$

Correction N°2

1- Les thyristors sont commandés avec un angle de retard ψ après les instants de commutation naturelle (qui sont les mêmes que pour un PD2 tout thyristor). Les thyristors Th_1 et Th_3 sont donc passants sur l'intervalle $[\psi, \pi + \psi]$ et les thyristors Th_2 et Th_4 sur l'intervalle $[\pi + \psi, 2\pi + \psi]$.

La séquence de conduction des semi-conducteurs ainsi que l'allure de la tension de sortie sont rappelés à la FIGURE 1.

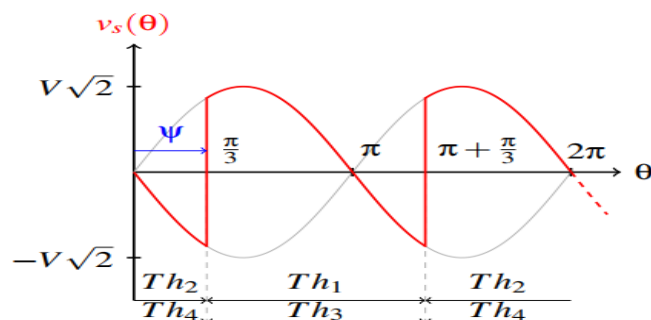


Figure 1 – PD2 tout thyristor - Allure de la tension de sortie pour $\psi = 2\pi/3$ (Conduction continue).

2- l'allure de la tension de sortie (v_s)

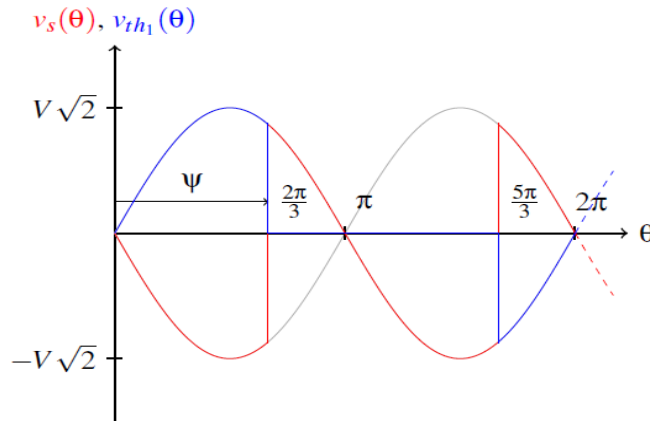


Figure 2 – PD2 tout thyristor - Allure de la tension de sortie pour $\psi = 2\pi/3$ (Conduction continue).

Lorsque les thyristors Th_1 et Th_3 sont passants, la relation suivante est vérifiée pour la tension de sortie :

$$v_s(\theta) = v_e(\theta)$$

A l'inverse, lorsque Th_2 et Th_4 sont passants :

$$v_s(\theta) = -v_e(\theta)$$

3- l'allure de la tension de sortie dans le cas d'une conduction discontinue dans la charge

Dans le cas d'une conduction discontinue dans la charge (annulation du courant dans la charge à un instant t), les thyristors qui devaient être passants se bloquent car le courant les traversant devient inférieur au courant de maintien. Entre cet instant et la commande suivante des thyristors, les 4 semi-conducteurs se trouvent à l'état bloqué. Dans ce cas, le courant dans la charge étant nul, la tension de sortie l'est aussi : il y a donc un palier à zéro pour la tension de sortie.

4- L'allure de la tension $v_{Th1}(\theta)$ est représentée en bleu à la Figure 2.

Lorsque le thyristor 1 est passant (entre ψ et $\pi + \psi$), la tension à ses bornes est nulle. Lorsque le thyristor 1 est bloqué, le thyristor 2 est passant, il suit :

$$v_{Th1}(\theta) = v_e(\theta)$$

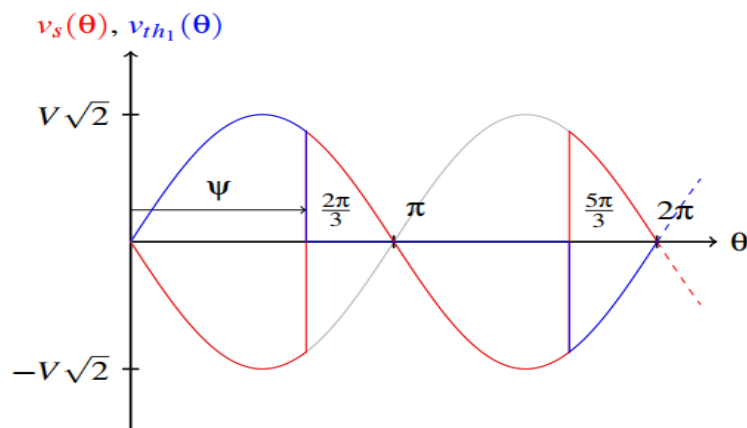


Figure 3 – PD2 tout thyristor - Allure de la tension de sortie et de la tension aux bornes du thyristor 1 pour $\psi = 2\pi/3$ (Conduction continue).

Notons qu'à la différence d'une diode, la tension aux bornes d'un thyristor peut être positive comme le montre l'allure de la tension aux bornes du thyristor 1.

5. Il est possible d'observer que le thyristor doit tenir en tension inverse la valeur maximale de la tension réseau. Il conviendra de tenir compte de ce paramètre pour le choix des composants.

6. Il est possible de calculer la valeur moyenne de la tension de sortie de la manière suivante :

$$\begin{aligned}\langle v_s \rangle &= \frac{2}{2 \cdot \pi} \int_{\psi}^{\pi+\psi} v_e d\theta = \frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\pi+\psi} V\sqrt{2} \sin\theta \cdot d\theta = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} [-\cos\theta]_{\psi}^{\pi+\psi} = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} (\cos\psi - \cos(\pi + \psi)) \\ &= \frac{2V\sqrt{2}}{\pi} \cos\psi\end{aligned}$$

7. En connaissant l'expression de la valeur moyenne de la tension de sortie, il est possible de tracer son évolution en fonction de l'angle de retard à l'amorçage des thyristors (Figure 3) :

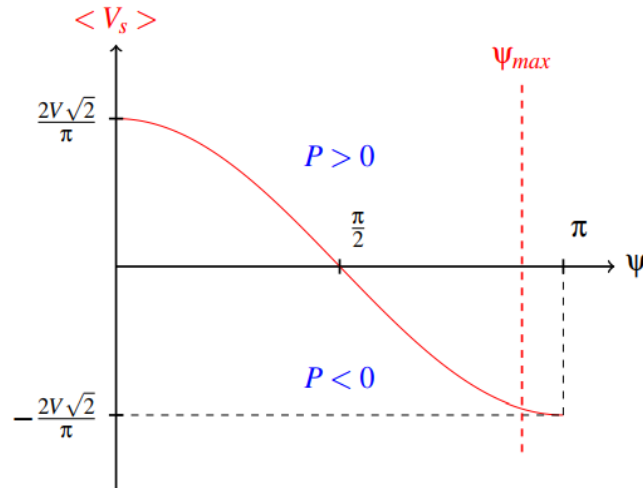


Figure 4 – Évolution de la tension moyenne de sortie $\langle v_s \rangle$ en fonction de l'angle de retard à l'amorçage des thyristors.

En raison des limites technologiques inhérentes aux composants bipolaires, il est impossible de fixer un angle de retard à l'amorçage égal à π . En pratique, un angle de retard à l'amorçage maximal (légèrement inférieur à π) est spécifié pour garantir un blocage correct des diodes (on parlera d'angle de garde).

8. Si nous faisons l'hypothèse d'une charge absorbant un courant constant (charge très inductive), la puissance en sortie du pont redresseur s'exprime de la manière suivante :

$$P = \langle v_s \rangle \cdot I$$

La Figure 3 nous montre que la valeur moyenne de la tension en sortie du redresseur peut être positive ou négative suivant la valeur de l'angle de retard à l'amorçage des thyristors :

- $\langle v_s \rangle > 0$: Dans ce cas, la charge consomme de l'énergie ($P > 0$). Il s'agit du fonctionnement **REDRESSEUR**.
- $\langle v_s \rangle < 0$: Dans ce cas, la charge fournit de l'énergie ($P < 0$). Il s'agit du fonctionnement **ONDULEUR ASSISTÉ**.

Le qualificatif ASSISTÉ est employé par opposition aux onduleurs autonomes à commande MLI. Dans le cas d'un onduleur assisté, celui-ci a besoin de l'assistance du réseau pour fonctionner.

9. Bien entendu, pour que le fonctionnement en onduleur assisté soit possible, il est nécessaire que la charge puisse devenir génératrice d'énergie. Il est donc possible de faire fonctionner ce montage dans 2 quadrants. Le système étant bidirectionnel en tension et unidirectionnel en courant (les thyristors empêchent l'inversion du sens du courant).

Correction N°3

1. Pour déterminer la séquence de conduction des diodes, il suffit de repérer les instants de commutation naturelle. La diode conductrice étant celle qui voit son potentiel de cathode le moins élevé. Pour les thyristors, la séquence de conduction est décalée d'un angle ψ par rapport aux instants de commutation naturelle.

2. La séquence de conduction des semi conducteurs et l'allure de la tension de sortie sont représentées à la Figure 1.

A la différence d'un pont tout thyristor, il peut arriver que 2 semi conducteurs d'un même bras conduisent simultanément, la tension de sortie est alors nulle.

3. La valeur moyenne de la tension de sortie peut alors être exprimée de la façon suivante :

$$\langle v_s \rangle = \frac{2}{2\pi} \int_{\psi}^{\pi} v_s d\theta = \frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\pi} V\sqrt{2} \sin\theta d\theta = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} [-\cos\theta]_{\psi}^{\pi} = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos\psi)$$

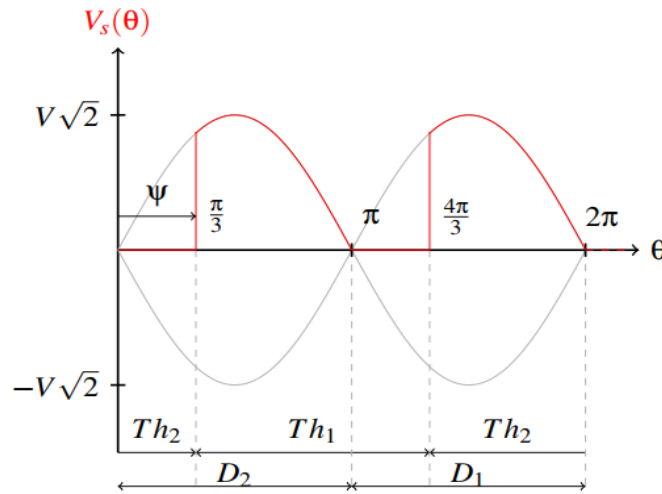


Figure 1 – PD2 Mixte symétrique - Allure de la tension de sortie pour $\psi = \pi/3$ (Conduction continue).

4. Dans cas précis (pont mixte symétrique), la valeur moyenne de la tension de sortie dépendant toujours de la valeur de l'angle de retard à l'amorçage peut uniquement prendre des valeurs positive ($\langle v_s \rangle > 0$). Le moteur ne peut alors fonctionner que dans un seul quadrant, le fonctionnement en onduleur assisté est ici impossible. L'allure de la fonction demandée est représentée à la Figure 2.

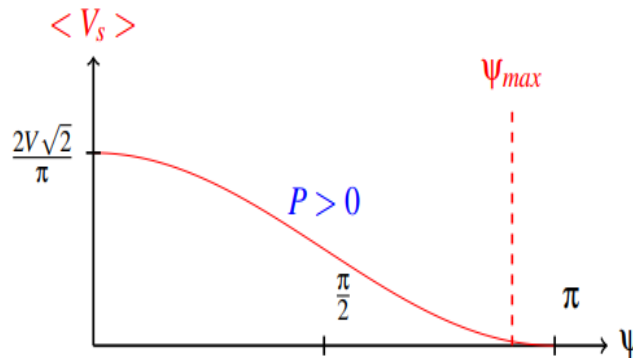


Figure 2 – Évolution de la tension moyenne de sortie ($\langle V_s \rangle$) en fonction de l'angle de retard à l'amorçage des thyristors pour le pont mixte symétrique.

Le choix entre une architecture tout thyristor ou mixte dépendra de l'application et du nombre de quadrants de fonctionnement (1 ou 2) nécessaires.

5. Le courant d'entrée peut être déterminé de la façon suivante :

$$i_e(t) = i_{Th1}(t) - i_{D1}(t)$$

Les courants des semi-conducteurs valent $+I$ à l'état passant et 0 à l'état bloqué.

L'allure du courant d'entrée du convertisseur est représentée à la Figure 3.

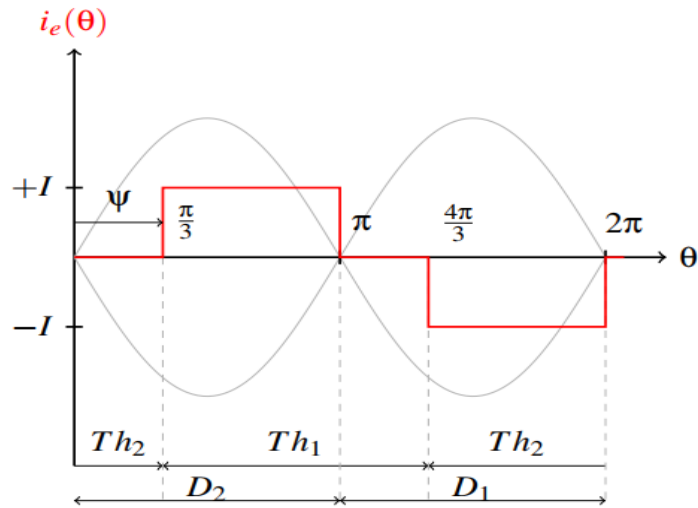


FIGURE 3 – Allure du courant d'entrée du convertisseur

6. Le convertisseur étant considéré sans pertes, nous choisirons d'exprimer la puissance active côté charge et la puissance apparente côté réseau :

$$F_P = \frac{P}{S}$$

Avec :

– Puissance active :

$$P = \langle v_s \rangle I = \frac{V\sqrt{2}I}{\pi} (1 + \cos(\psi))$$

– Puissance apparente :

$$S = V \cdot I_{eff}$$

– Avec I_{eff} la valeur efficace du courant d'entrée :

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\pi} i_e(\theta)^2 d\theta} = I \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi}}$$

D'où :

$$F_P = \frac{P}{S} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{(1 + \cos(\psi))}{\sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi}}}$$

7. Il est donc possible de tracer l'évolution du facteur de puissance en fonction de l'angle de retard à l'amorçage des thyristors (Figure 4). Notons que le fait d'augmenter l'angle de retard à l'amorçage des thyristors dégrade fortement le facteur de puissance du système.

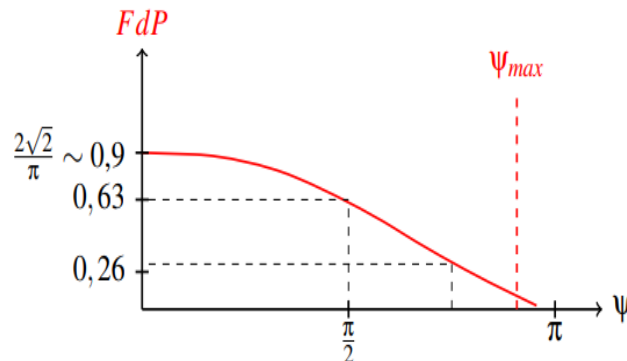


Figure 4 – Évolution du facteur de puissance de l'installation en fonction de l'angle de retard à l'amorçage des thyristors.