

# Electronique de Puissance



BTS Automatique 2e Année

# CHAPITRE 1

## REDRESSEMENT NON COMMANDE

### SOMMAIRE

#### 1. Monophasé

##### 1.1. Schéma du pont PD2

##### 1.2. Fonctionnement sur charge résistive

###### 1.2.1. Etude du fonctionnement

###### 1.2.2. Détermination des grandeurs caractéristiques

##### 1.3. Fonctionnement sur charge R+L+E

###### 1.3.1. Schéma du montage

###### 1.3.2. Etude du fonctionnement

###### 1.3.3. Détermination des grandeurs caractéristiques

##### 1.4. Fonctionnement sur charge R//C

###### 1.4.1. Schéma du montage

###### 1.4.2. Etude du fonctionnement

#### 2. Triphasé

##### 2.1. Montage P3

###### 2.1.1. Schéma

###### 2.1.2. Etude du fonctionnement

###### 2.1.3. Grandeurs caractéristiques

##### 2.2. Montage PD3

###### 2.2.1. Schéma

###### 2.2.2. Etude du fonctionnement (conduction continue)

###### 2.2.3. Grandeurs caractéristiques

#### Exercices

## Electronique de Puissance

Le redressement consiste à transformer un courant alternatif en un courant ayant toujours le même sens. On utilise souvent pour ce dernier le terme *courant continu*, ce qui n'est pas tout à fait exact car il est en général variable, même s'il ne change pas de sens.

Le symbole d'un redresseur est représenté ci-dessous.

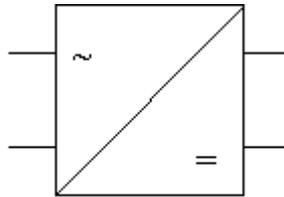


Figure 1

Nous étudierons tout d'abord le redressement d'une tension monophasée, puis celui d'un système de tensions triphasées.

## 1. Monophasé

### 1.1. Schéma du pont PD2

Plusieurs types de montages permettent de faire du redressement monophasé, mais le plus utilisé est le *pont de Graetz* ou *pont parallèle double*.

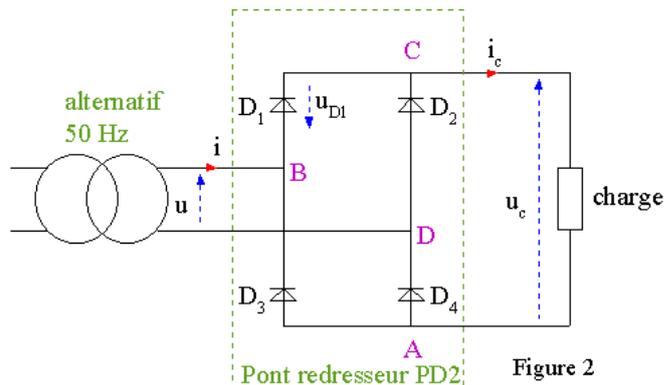


Figure 2

Le pont comporte deux groupes (un groupe à anodes communes et un groupe à cathodes communes, d'où le terme *double*) de deux redresseurs (d'où le chiffre 2) en parallèle. Il est alimenté par une tension alternative, en général fournie par le secondaire d'un transformateur.

Il y a deux grands types de charges :

- grosses puissances (moteurs) : on désire alors que le courant soit le mieux lissé possible et on ajoute éventuellement une bobine de lissage
- petites puissances (alimentations de montages électroniques) : c'est la tension qui doit être bien lissée, car les circuits intégrés nécessitent en général une tension bien précise. Le courant, par contre, varie constamment lorsque les circuits fonctionnent.

Bien que le redressement ne se fasse pas, en général, sur charge purement résistive, il est plus facile d'en comprendre le fonctionnement dans ce cas, c'est pourquoi nous allons l'étudier en premier.

**1.2. Fonctionnement sur charge résistive**

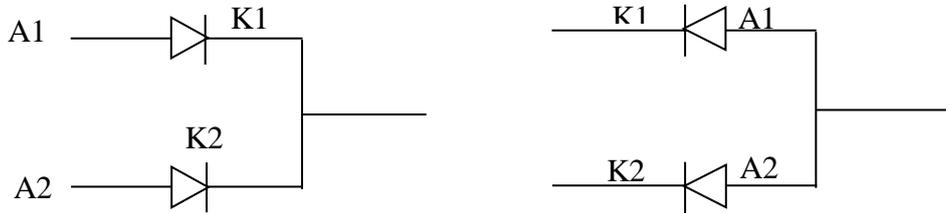
Dans

toute l'étude qui suit, on considérera les diodes comme parfaites, c'est-à-dire qu'on néglige la tension directe à leurs bornes quand elles sont en conduction.

**1.2.1. Etude du fonctionnement**

Lorsque

plusieurs diodes sont en parallèle, une seule est passante à un moment donné (sauf éventuellement au moment des commutations, mais nous considérerons celles-ci comme instantanées). Laquelle ? La règle est la suivante :



*Si plusieurs diodes sont à cathodes communes, celle qui conduit est celle dont l'anode est au potentiel le plus haut.*

**Analyse des oscillogrammes**

*Si plusieurs diodes sont à anodes communes, celle qui conduit est celle dont la cathode est au potentiel le plus bas.*

Nous choisissons l'origine des temps pour pouvoir écrire la tension  $u(t)$  sous forme d'un sinus :

$$u(t) = \hat{U} \cdot \sin(\omega t)$$

- de  $t = 0$  à  $t = T/2$ , on a  $u = v_{BD} > 0$ . L'anode de  $D_1$  est à un potentiel supérieur à celui de l'anode de  $D_2$ , c'est donc  $D_1$  qui conduit. La cathode de  $D_4$  est à un potentiel inférieur à celui de la cathode de  $D_3$ , donc c'est  $D_4$  qui conduit. La loi des mailles donne :  $u_c(t) = u(t)$

-de  $t = T/2$  à  $t = T$ ,  $u$  étant négatif, ce sont  $D_2$  et  $D_3$  qui conduisent et on a :

$$u_c(t) = -u(t)$$

Dans les deux cas, on peut écrire :  $u_c(t) = |u(t)|$

On constate que le courant  $i_c$  dans la charge garde le même sens (son intensité vaut  $u/R$ ). Il est unidirectionnel.

La tension aux bornes d'une diode, par exemple  $u_{D1}$ , est nulle lorsque la diode conduit (la diode a été supposée idéale) et elle est égale à  $-|u_c|$  lorsque la diode est bloquée. La tension inverse maximum que supporte une diode est égale à la valeur crête de  $u(t)$ , il faut s'en souvenir lors du choix des composants.

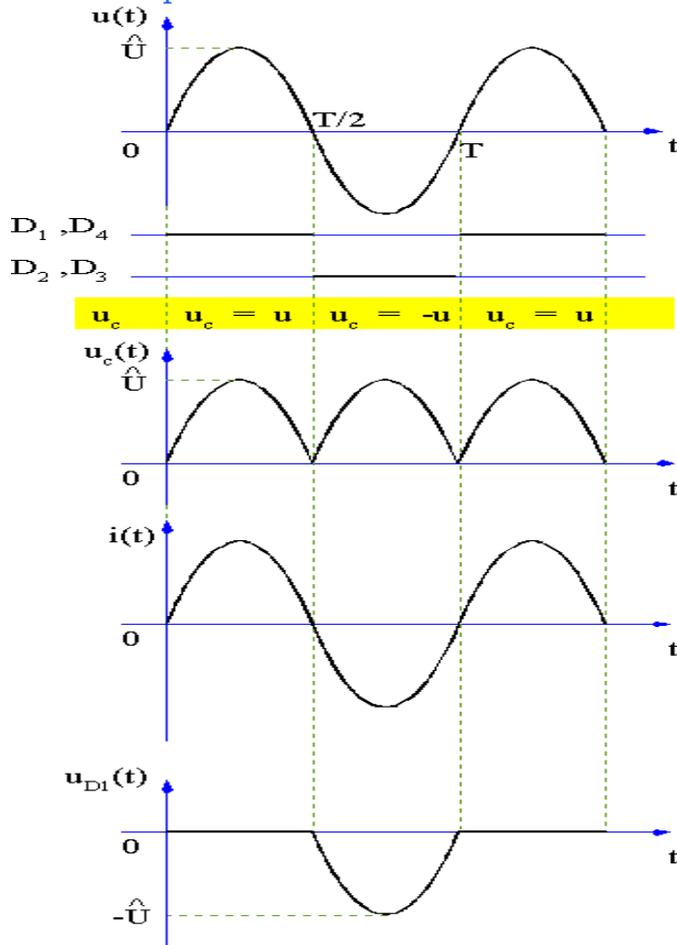


Figure 4

### 1.2.2. Détermination des grandeurs caractéristiques

*Tension redressée moyenne :*

$$T_c = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega}$$

La période  $T_c$  de  $u_c$  est la moitié de celle de  $u$  :

Le calcul de la valeur moyenne  $\langle u_c \rangle$  de  $u_c$  donne alors :

$$\langle u_c \rangle = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} u_c(t) dt = \frac{\omega U \sqrt{2}}{\pi} \int_0^{\pi/\omega} \sin(\omega t) dt$$

$$\text{soit : } \langle u_c \rangle = \frac{2U\sqrt{2}}{\pi} \cong 0,9U$$

**Intensité moyenne dans la charge** Puisque la charge est résistive, on a  $i_c = u_c/R$

$$\langle i_c \rangle = \frac{\langle u_c \rangle}{R}$$

**Intensité efficace en ligne :** Pendant les alternances positives de la tension  $u_c$  l'intensité  $i$  est égale à  $i_c$ , alors qu'elle est égale à  $-i_c$  pendant les alternances négatives. Dans les deux cas,  $i^2$  est égal à  $i_c^2$ . De même  $u_c^2$  est toujours égal à  $u^2$ .

## Electronique de Puissance

Calcul de la valeur efficace I de l'intensité i :

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t).dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_c^2(t).dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u_c^2(t)}{R^2}.dt$$

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u^2(t)}{R^2}.dt = \frac{U^2}{R^2}$$

$$I = \frac{U}{R}$$

d'où l'on déduit :

### **Facteur de puissance**

L'ensemble redresseur + charge forme un récepteur monophasé pour lequel on peut définir une puissance active P et une " puissance " apparente S. Le facteur de puissance k se définit, d'une manière générale, comme le rapport de ces deux puissances:

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

La puissance active P représente la valeur moyenne de la puissance instantanée  $p(t) = u(t).i(t)$  :

$$P = \langle p(t) \rangle = \langle u(t).i(t) \rangle$$

La puissance apparente S est égale, par définition, au produit des valeurs efficaces de la tension et de l'intensité

$$S = U.I$$

Effectuons le calcul de P :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t).i(t).dt = \frac{1}{T} \int_0^T U\sqrt{2}.sin(\omega t). \frac{U\sqrt{2}}{R}.sin(\omega t).dt$$

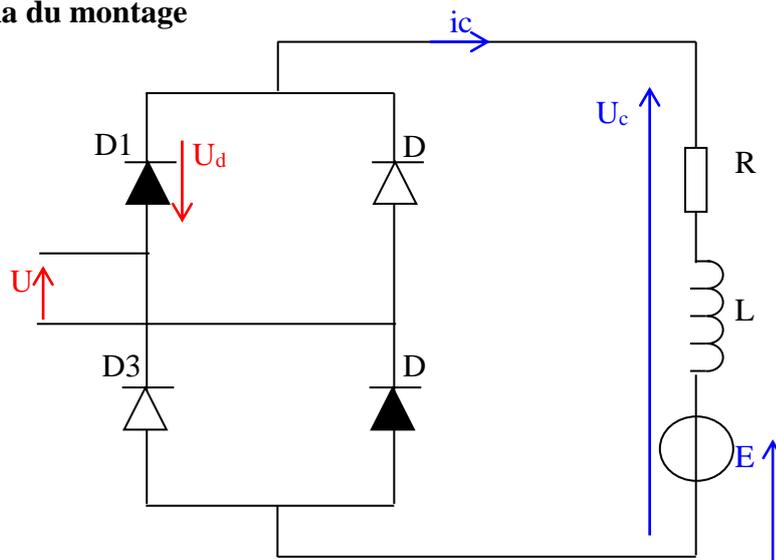
$$P = \frac{2U^2}{R.T} \int_0^T sin^2(\omega t).dt = \frac{U^2}{R.T} \int_0^T [1 - cos(2\omega t)]dt = \frac{U^2}{R} = U.I$$

D'où l'on déduit que le facteur de puissance est égal à 1 :  $k = 1$

Ce qui pouvait se prévoir en regardant la figure 4: u et i sont tous deux sinusoïdaux et ils sont en phase ( $\varphi = 0$ ).

### 1.3. Fonctionnement sur charge R+L+E

#### 1.3.1. Schéma du montage



L'inductance  $L$  est celle de la charge, y compris celle d'une éventuelle bobine de lissage. La résistance  $R$  représente la résistance totale de la charge, y compris celle de la bobine de lissage.

#### 1.3.2. Etude du fonctionnement (voir la figure 6)

Dans cette étude, nous allons considérer le courant dans la charge comme parfaitement lissé par l'inductance  $L$  et donc comme constant. Son intensité est alors égale à sa valeur moyenne.

L'étude de la tension est la même que dans le cas de la charge résistive. L'intensité en ligne  $i$  est égale à  $i_c$  pendant les alternances positives, et à  $-i_c$  pendant les alternances négatives. Elle prend donc une forme carrée. Elle est encore alternative, mais elle contient beaucoup d'harmoniques.

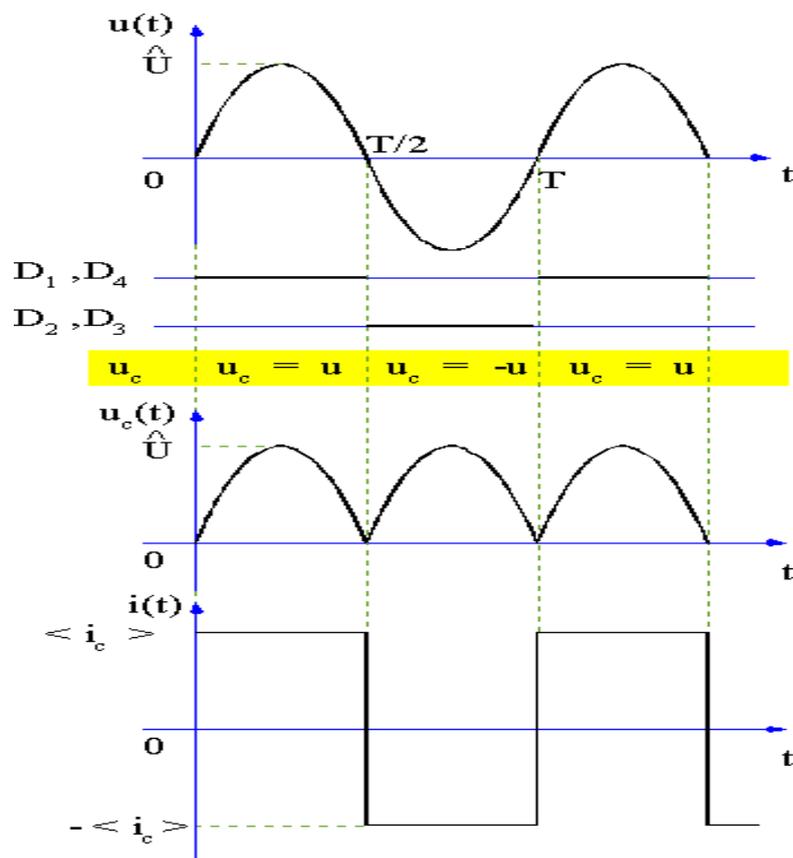


Figure 6

**1.3.3. Détermination des grandeurs caractéristiques**

**Tension moyenne aux bornes de la charge :**

La forme de  $u_c(t)$  est la même que précédemment et le résultat (1) reste valable :

$$\langle u_c \rangle = \frac{2U\sqrt{2}}{\pi} \cong 0,9 \times U$$

**Intensité moyenne dans la charge**

A tout instant, on peut écrire: 
$$u_c(t) = R.i_c(t) + L \frac{di_c(t)}{dt} + E$$

En prenant les valeurs moyennes des deux termes de l'égalité et en se souvenant que la valeur moyenne de la dérivée d'une fonction périodique est nulle, on obtient en régime permanent :

$$\langle i_c \rangle = \frac{\langle u_c \rangle - E}{R}$$

Il faut remarquer que,  $i_c(t)$  ne pouvant devenir négatif à cause des diodes, le terme  $\langle i_c \rangle$  est forcément positif. Ceci signifie que E doit être inférieur à  $\langle u_c \rangle$ , sans quoi on se retrouve en conduction interrompue, ce qui n'est pas notre hypothèse de départ.

**Valeurs efficaces**

L'allure des courbes  $u_c(t)$ ,  $i_c(t)$  et  $i(t)$  nous permet d'écrire:

$$I_c = \langle i_c \rangle$$

$$U_c = U$$

$$I = I_c$$

**Facteur de puissance**

Le calcul de la puissance active P reçue par l'ensemble pont + charge pourrait se faire directement, comme nous avons fait précédemment. Une autre méthode consiste à calculer la puissance active  $P_c$  absorbée par la charge, qui est égale à P puisqu'on néglige toutes les pertes de puissance dans le pont. La puissance  $P_c$  est la valeur moyenne de la puissance instantanée  $p_c(t)$ , égale au produit  $u_c(t).i_c(t)$ , de période T/2 :

$$P_c = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u_c(t).i_c(t).dt = \frac{2 \langle i_c \rangle}{T} \int_0^{T/2} u_c(t).dt = \frac{2U\sqrt{2} \langle i_c \rangle}{\pi}$$

La puissance apparente S est donnée, en fonction de  $\langle i_c \rangle$ , par l'expression :

$$S = U.I = U \langle i_c \rangle$$

$$k = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cong 0,9$$

d'où l'on déduit le facteur de puissance k :

## 1.4. Fonctionnement sur une charge R//C

### 1.4.1. Schéma du montage

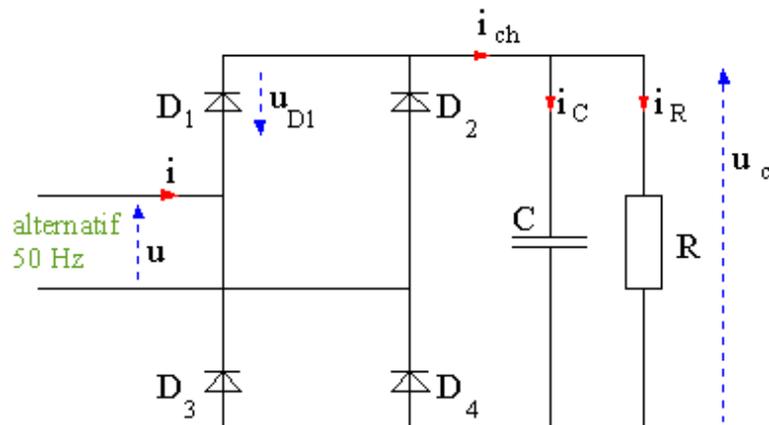


Figure 7

On souhaite obtenir une tension  $u_c(t)$  aussi lisse que possible, on place donc un condensateur de forte valeur en parallèle sur la charge, charge que nous supposons équivalente à une résistance  $R$ .

### 1.4.2. Etude du fonctionnement :

On utilise une tension  $u(t)$  donnée par l'expression :  $u(t) = \hat{U} \cdot \sin \omega t$

Supposons le condensateur déchargé à  $t = 0$ , donc  $u_c(0) = 0$ . Dès que  $u(t)$  devient positif, les diodes  $D_1$  et  $D_4$  se débloquent et  $u_c(t) = u(t)$ , de même que  $i_c(t) = i(t)$ .

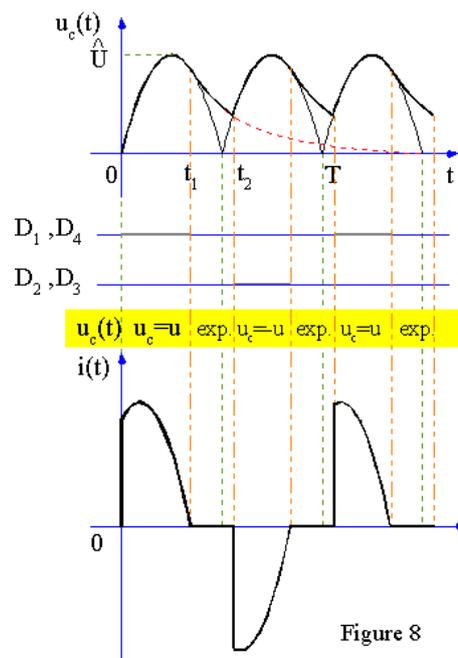


Figure 8

## Electronique de Puissance

On peut écrire, pour tout t :

$$i_{ch}(t) = i_R(t) + i_C(t) = \frac{1}{R}u_c(t) + C \frac{du_c}{dt}(t)$$

$$i(t) = i_{ch}(t) = \frac{\hat{U}}{R} \sin \omega t + C \omega \hat{U} \cos \omega t$$

Lorsque  $u_c(t) = u(t)$ , l'expression de  $i(t)$  peut s'écrire :

Le courant  $i(t)$  passe brusquement de 0 à une valeur importante (en pratique, l'inductance de fuite du transformateur alimentant le pont interdit une variation aussi brusque, et on observe une forme plus arrondie).

Pour  $t > T/4$ , la tension  $u(t)$  décroît (et  $u_c(t)$  aussi) ; l'intensité  $i_C(t)$  devient négative. Si la capacité  $C$  a une valeur assez grande, le terme relatif au condensateur l'emporte sur le premier et l'intensité  $i_{ch}(t)$  s'annule à un instant  $t_1$  (rappelons qu'elle ne peut devenir négative, du fait des diodes). A ce moment, les diodes se bloquent. La charge est alors complètement séparée du point de vue électrique de la source alternative. C'est le condensateur qui fournit la puissance à la charge  $R$ . La décharge de  $C$  se fait de manière exponentielle, avec une asymptote à  $u_c = 0$ .

A l'instant  $t_2$  la tension  $u_c(t)$  devient inférieure à  $-u(t)$ , les diodes  $D_2$  et  $D_3$  se débloquent, on a  $u_c(t) = -u(t)$ , le condensateur se recharge, etc..

On voit qu'en choisissant un condensateur de forte capacité, la tension  $u_c$  reste très proche de la valeur maximum de  $u(t)$ . Les diodes ne sont alors passantes qu'une faible partie du temps.

## 2. Triphasé :

### 2.1. Montage P3

#### 2.1.1. Schéma

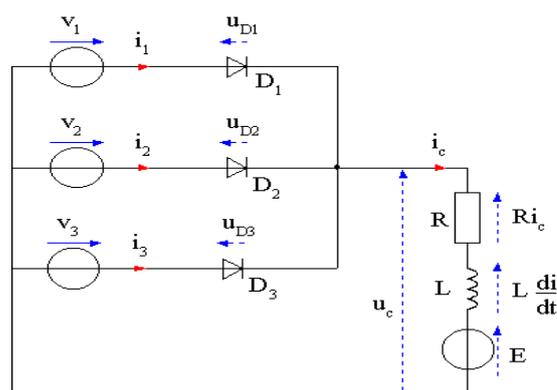


Figure 9

Les enroulements du secondaire du transformateur alimentant le pont sont schématisés par des générateurs de tension (on néglige leur résistance et leur inductance).

On remarque qu'il faut disposer du neutre pour ce montage.

La charge est du type général,  $R, L, E$  en série.

## Electronique de Puissance

### 2.1.2. Etude du fonctionnement

On suppose que le courant  $i_c$  est parfaitement lissé, c'est-à-dire que l'intensité  $i_c(t)$  est constante et donc égale à sa valeur moyenne :  $i_c(t) = \langle i_c \rangle$

En conséquence, il y a toujours une diode passante et par suite  $u_c(t)$  est égal à l'une des trois tensions  $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$  ou  $v_3(t)$ , selon que c'est la diode  $D_1$ ,  $D_2$  ou  $D_3$  qui est passante.

La diode passante est celle dont l'anode est au potentiel le plus élevé, ce qui permet d'écrire :

$$u_c(t) = \text{Max}(v_1(t), v_2(t), v_3(t))$$

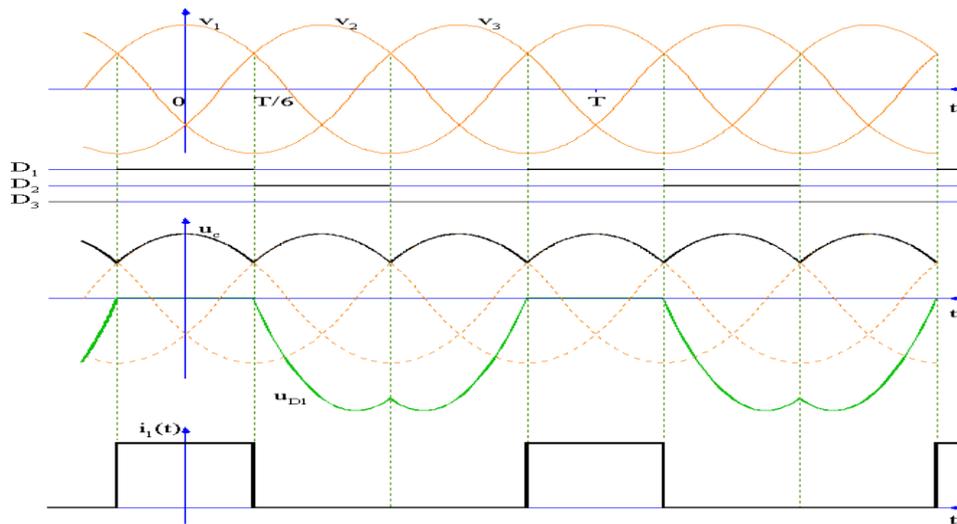


Figure 10

A la figure 10 est représenté le chronogramme de conduction des trois diodes, un trait gras signifiant que la diode est passante. Remarquer que la tension redressée  $u_c(t)$  est périodique, de fréquence triple de celle du secteur triphasé.

- courant en ligne ou dans une diode : quand la diode est passante, l'intensité du courant qui la traverse est égale à  $\langle i_c \rangle$ . La courbe  $i_c(t)$  a également été représentée.

- tension aux bornes d'une diode,  $u_{D1}$  par exemple: On a toujours:  $u_c(t) + u_{D1}(t) - v_1(t) = 0$

d'où l'on tire :  $u_{D1}(t) = v_1(t) - u_c(t)$

- de  $-T/6$  à  $+T/6$   $u_{D1}(t) = 0$  (la diode est passante)

- de  $+T/6$  à  $3T/6$   $u_{D1}(t) = v_1(t) - v_2(t) = u_{12}(t)$

- de  $3T/6$  à  $5T/6$   $u_{D1}(t) = v_1(t) - v_3(t) = u_{13}(t) = -u_{31}(t)$

ce qui donne la courbe représentée à la figure 10.

**Tension moyenne  $\langle u_c \rangle$**

On intègre  $u_c(t)$  sur une période de la tension redressée, par exemple de  $-T/6$  à  $+T/6$  :

$$\langle u_c \rangle = \frac{3}{T} \int_{-T/6}^{+T/6} v_l(t) dt = \frac{3V\sqrt{2}}{T} \int_{-T/6}^{+T/6} \cos(\omega t) dt =$$

$$\langle u_c \rangle = \frac{3V\sqrt{2}}{\omega T} \left[ \sin\left(\frac{\omega T}{6}\right) - \sin\left(-\frac{\omega T}{6}\right) \right] = \frac{3V\sqrt{2}}{2\pi} \cdot 2 \sin\frac{\pi}{3}$$

$$\langle u_c \rangle = \frac{3U\sqrt{2}}{2\pi} \cong 0,675U$$

finalement :

**Courant moyen  $\langle i_c \rangle$**

$$u_c(t) = E + Ri_c(t) + L \frac{di_c}{dt}(t)$$

A tout instant, on a :

En prenant les valeurs moyennes et en remarquant que la valeur moyenne de  $di_c/dt$  est nulle en régime permanent, on arrive à :

$$\langle i_c \rangle = \frac{\langle u_c \rangle - E}{R}$$

**Tension inverse maximum aux bornes des diodes  $U_{DRM}$**

La figure 10 montre que la tension inverse maximum est égale à la valeur crête de la tension composée.

**Courant moyen dans une diode  $\langle i_D \rangle$**

La courbe  $i_1(t)$ , qui représente aussi le courant dans la diode  $D_1$ , permet de constater que

$$\langle i_D \rangle = \frac{\langle i_c \rangle}{3}$$

Le courant en ligne n'est pas alternatif, sa valeur moyenne n'est pas nulle.

**Intensité efficace en ligne**

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i_1^2 dt = \frac{1}{T} \int_{-T/6}^{+T/6} \langle i_c \rangle^2 dt = \frac{\langle i_c \rangle^2}{3}$$

Soit :

$$I = \frac{\langle i_c \rangle}{\sqrt{3}}$$

## Electronique de Puissance

### Facteur de puissance du pont P3

On néglige toutes les pertes de puissance dans les composants du pont, par suite la puissance active  $P$  absorbée par le pont et sa charge est égale à la puissance  $P_c$  reçue par la charge. Comme nous avons supposé le courant parfaitement lissé dans la charge, la puissance  $P_c$  peut se calculer :

$$P_c = \langle u_c i_c \rangle = \langle i_c \rangle \cdot \langle u_c \rangle = \frac{3U\sqrt{2}}{2\pi} \langle i_c \rangle$$

La puissance apparente  $S$  vaut  $S = U \cdot I\sqrt{3} = U \cdot \langle i_c \rangle$

$$k = \frac{P}{S} = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} \cong 0,675$$

D'où l'expression du facteur de puissance  $k$

ce qui n'est pas une très bonne valeur.

## 2.2. Pont PD3

### 2.2.1. Schéma

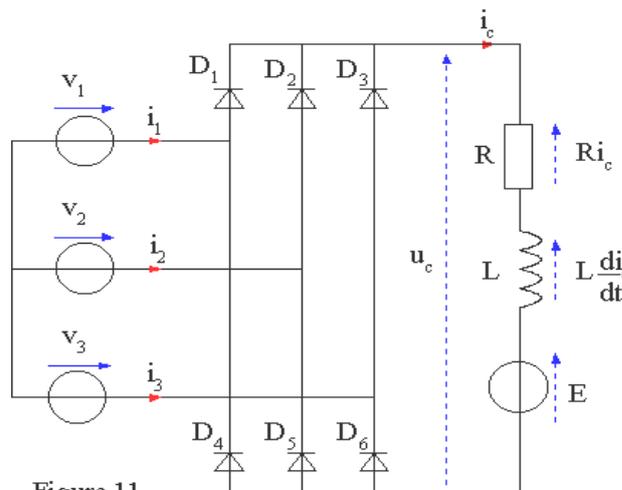


Figure 11

### 2.2.2. Etude du fonctionnement en conduction continue

On suppose le courant  $i_c$  parfaitement lissé, c'est-à-dire  $i_c(t) = \langle i_c \rangle$ . La figure 12 montre les instants de conduction des différentes diodes: dans le groupe des diodes à cathodes communes, celle qui conduit est celle qui correspond à la tension la plus élevée, par exemple  $D_1$  conduit lorsque  $v_1(t)$  est supérieur à  $v_2(t)$  et  $v_3(t)$ . De même, pour les diodes à anodes communes, celle qui conduit est celle qui correspond à la tension la plus basse.  $D_4$  conduit lorsque  $v_1(t)$  est inférieure à  $v_2(t)$  et  $v_3(t)$ .

Pour déterminer  $u_c(t)$ , on applique la loi des mailles, en utilisant la maille parcourue par le courant. Cela permet de connaître à tout moment l'expression de la tension  $u_c(t)$  : par exemple si ce sont  $D_1$  et  $D_6$  qui conduisent, alors

$$u_c(t) = v_1(t) - v_3(t) = u_{13}(t) = -u_{31}(t)$$

## Electronique de Puissance

On peut alors tracer la courbe  $u_c(t)$ . Celle-ci fait intervenir les trois tensions composées ainsi que leurs opposées (tracées en pointillés). On remarque que la fréquence de  $u_c(t)$  est égale à six fois celle du secteur et que l'ondulation de la tension redressée est plus faible qu'avec le pont P3.

Sur la même figure, on a tracé la tension aux bornes de la diode  $D_1$ , qui s'obtient en appliquant la loi des mailles à la maille contenant la charge,  $D_1$  et la diode du groupe à anode communes qui conduit au moment considéré.

Sur la figure 12 ont également été représentées les intensités du courant dans une diode ( $D_1$ ) et du courant en ligne  $i_l(t)$ .

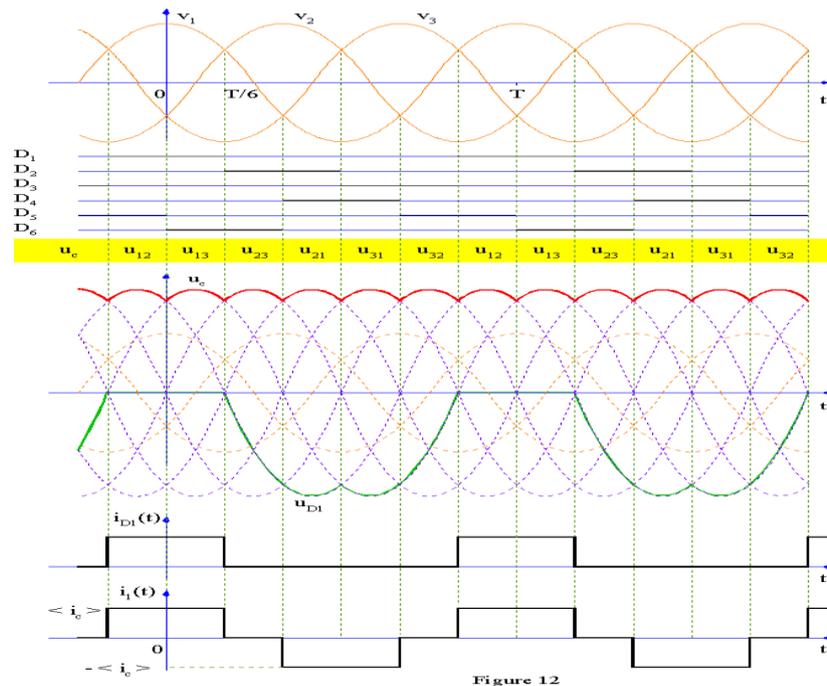


Figure 12

### 2.2.3. Grandeurs caractéristiques

**Tension moyenne  $\langle u_c \rangle$  :**

Il faut intégrer  $u_c(t)$  sur une période, qui vaut  $1/6$  de la période du réseau. Pour simplifier les calculs, on a intérêt à choisir un intervalle où la tension  $u_c(t)$  a une expression simple, par exemple sur l'intervalle  $[T/6, T/3]$  où  $u_c(t)$  est égal à  $u_{23}(t)$ , dont l'équation est

$$u_{23}(t) = U\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$$

Le calcul s'écrit alors

$$\begin{aligned} \langle u_c \rangle &= \frac{6U\sqrt{2}}{T} \int_{T/6}^{T/3} \sin(\omega t) \cdot dt \\ &= \frac{6U\sqrt{2}}{\omega T} (-\cos(\omega T/3) + \cos(\omega T/6)) \end{aligned}$$

$$\langle u_c \rangle = \frac{3U\sqrt{2}}{\pi} \cong 1,35 \times U$$

C'est le double de la tension obtenue avec un pont P3.

Le calcul effectué pour le pont P3. est toujours valable, de même que la relation (13) :

$$\langle i_c \rangle = \frac{\langle u_c \rangle - E}{R}$$

**Intensité efficace en ligne** La forme de  $i_1(t)$ , donnée à la figure 12 permet de calculer I :

$$I^2 = \frac{2}{3} \langle i_c \rangle^2$$

**Facteur de puissance du pont PD3**

La puissance P absorbée par le pont et sa charge est égale à la puissance  $P_c$  reçue par la charge.

$$P = P_c = \langle u_c \rangle \cdot \langle i_c \rangle = \frac{3U\sqrt{2}}{\pi} \langle i_c \rangle$$

$$S = UI\sqrt{3} = U \langle i_c \rangle \sqrt{2}$$

$$k = \frac{3}{\pi} \cong 0,955$$

d'où l'on déduit

## EXERCICES

1. On alimente l'induit d'un moteur à courant continu par un pont PD2 à diodes. L'induit du moteur est caractérisé par une résistance  $R = 0,7 \Omega$ , une inductance  $l = 1 \text{ mH}$ . Il est le siège d'une f.e.m. de valeur efficace  $E = 202 \text{ V}$ . La bobine de lissage a une résistance  $r = 0,3 \Omega$  et une inductance  $L = 50 \text{ mH}$ . Le pont est alimenté sous  $U = 230 \text{ V}$ .

1.1. Calculer les valeurs moyennes de la tension  $u_c$  aux bornes de la charge et de l'intensité  $i_c$  dans la charge.

1.2. Calculer la constante de temps  $\tau$  de la charge. Est-elle supérieure à  $T/2$ ?

2. On veut alimenter un circuit électronique sous une tension  $v_e(t) = 15 \text{ V}$ , en utilisant un transformateur  $230 \text{ V} / 15 \text{ V}$ , un pont PD2, un condensateur et un régulateur intégré 7815. Le circuit électronique absorbe une intensité  $i_e(t)$  pouvant aller jusqu'à  $I_{\text{emax}} = 1 \text{ A}$ . On néglige le courant passant dans la broche " masse " du régulateur 7815 devant les autres courants.

2.1. On ne peut pas négliger la chute de tension dans les diodes, estimée à  $1 \text{ V}$  par diode. Quelle est la valeur maximum de la tension redressée  $u_c(t)$  (à l'entrée du 7815) ?

2.2. Sachant que le régulateur demande une tension d'entrée au moins égale à  $17 \text{ V}$  pour fonctionner correctement, déterminer le  $\Delta u_{\text{cmax}}$ .

2.3. Donner une estimation par excès de la puissance  $P_{\text{reg}}$  dissipée dans le régulateur.

3. On charge deux batteries de f.e.m.  $E_b = 12 \text{ V}$  chacune et de résistance interne  $r_b = 0,06 \Omega$ , placées en série, à l'aide d'un pont P3 alimenté par un réseau  $42 \text{ V}$ . On ajoute une bobine de lissage d'inductance  $L = 0,1 \text{ H}$  et de résistance interne  $r = 1 \Omega$ .

3.1. Calculer  $\langle u_c \rangle$  et  $\langle i_c \rangle$ , en considérant les diodes comme parfaites.

3.2. Quelle est la tension inverse maximum que doivent supporter les diodes?

3.3. Sans négliger la chute de tension  $U_D = 1 \text{ V}$  aux bornes de chaque diode en conduction, recalculer les nouvelles valeurs  $\langle u_{\text{cv}} \rangle$  et  $\langle i_{\text{cv}} \rangle$  de  $\langle u_c \rangle$  et  $\langle i_c \rangle$ .

3.4. Déterminer la puissance  $P_b$  dissipée dans la bobine par effet Joule.

3.5. Quelle est la puissance  $P_D$  dissipée dans une diode?

4. On alimente un pont PD3 à diodes sous une tension  $U = 400 \text{ V}$ . La charge est inductive, de résistance  $R = 1 \Omega$  et d'inductance  $L = 50 \text{ mH}$ ; elle comporte une f.e.m.  $E = 520 \text{ V}$  en opposition au courant.

4.1. Quelle est la constante de temps  $\tau$  de la charge ? Peut-on considérer le courant dans la charge comme bien lissé ?

4.2. Calculer la tension moyenne redressée  $\langle u_c \rangle$ .

4.3. Calculer l'intensité  $\langle i_c \rangle$  du courant dans la charge.

4.4. Quelle est la puissance  $P_c$  reçue par la charge ?

4.5. Quelle est l'intensité efficace en ligne  $I$  ?

4.6. En tenant compte d'une chute de tension directe  $U_D = 1 \text{ V}$  dans chaque diode, quelle est la puissance  $P_p$  dissipée dans le pont ?

## CHAPITRE 2

# REDRESSEMENT COMMANDE MONOPHASE

### SOMMAIRE

1. Quelques notions sur les thyristors

2. Pont PD2 tout thyristor

2.1. Schéma

2.2. Principe de fonctionnement

2.3. Grandeurs caractéristiques

3. Pont PD2 mixte

3.1. Schéma

3.2. Principe de fonctionnement

3.3. Grandeurs caractéristiques

Exercices

## Electronique de Puissance

### 1. Rappels sur le thyristor

Le symbole est donné ci-dessous. Il s'agit d'un composant à trois électrodes: l'anode, la cathode, la gâchette. C'est une diode commandée, qui ne devient passante que lorsqu'on envoie une impulsion de courant dans sa gâchette.

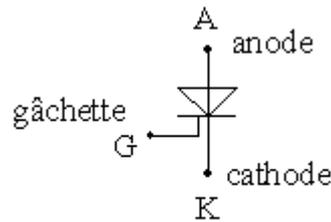


Figure 1

Lorsque la tension  $V_{AK}$  est négative, le thyristor est bloqué, comme une diode.

Lorsque la tension  $V_{AK}$  devient positive, le thyristor reste bloqué, jusqu'à ce qu'on applique une tension  $V_{GK}$  positive, d'où un courant  $I_G$  positif dans la gâchette. A ce moment-là seulement le thyristor s'amorce. Une fois qu'il est amorcé, la gâchette n'intervient plus et on peut supprimer le courant  $I_G$ .

Le thyristor ne se bloquera que lorsque l'intensité  $I_{AK}$  deviendra inférieure au *courant de maintien*  $I_H$  pendant un temps supérieur au *temps de récupération*  $t_q$ . Les valeurs de  $I_H$  et  $t_q$  sont des caractéristiques de chaque thyristor. L'ordre de grandeur de  $t_q$  est de quelques dizaines de microsecondes, celui de  $I_H$  est de moins d'un dixième de l'intensité maximale supportée par le thyristor.

Le thyristor peut aussi devenir passant, sous tension directe, si  $V_{AK}$  devient trop grand, si sa température est trop élevée ou encore si  $V_{AK}$  augmente trop vite. Les notices du constructeur indiquent toutes les valeurs à ne pas dépasser pour éviter ces amorçages parasites.

Lorsque l'on doit commander les composants au blocage (ce qui n'est pas le cas en redressement, car les thyristors se bloquent spontanément), on utilise de préférence des thyristors GTO (*gate turn over*, thyristors se bloquant par une impulsion négative sur la gâchette) ou des IGBT (*insulated gate bipolar transistor* ; transistors bipolaires de puissance à grille isolée).

## 2. Pont PD2 tout thyristor

### 2.1. Schéma

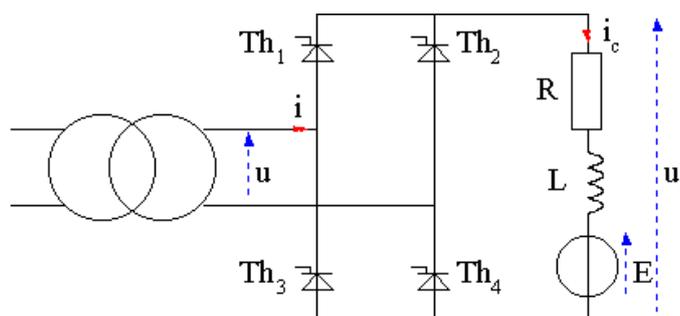
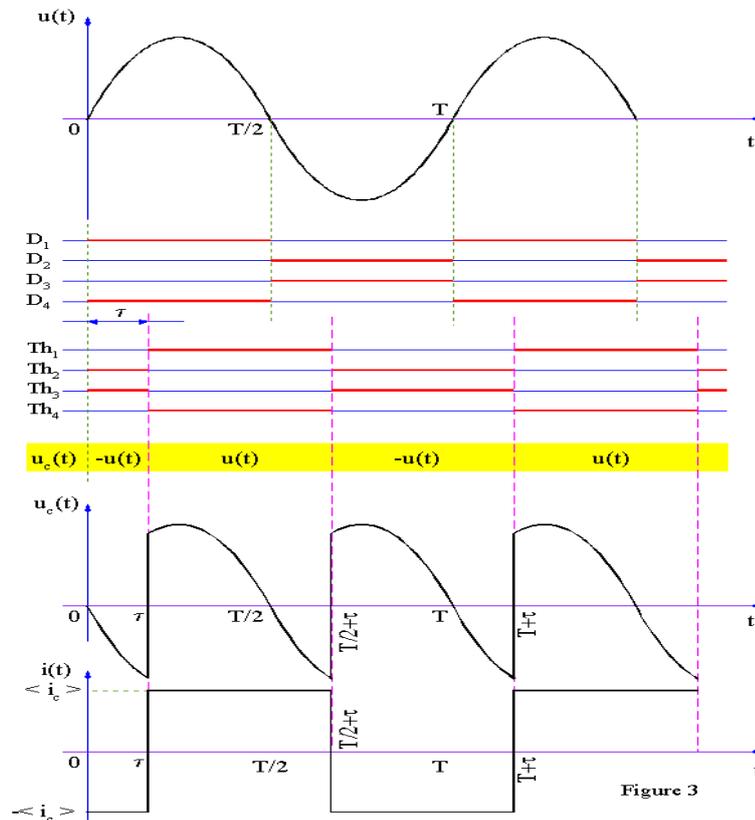


Figure 2

Il est donné à la figure 2. Les commandes des gâchettes ne sont pas représentées sur le schéma. La charge étudiée est du type moteur à courant continu, inductive et contenant une f.e.m.

## 2.2. Principe de fonctionnement

Les thyristors sont amorcés avec un *retard temporel*  $\tau$  par rapport aux instants de commutation naturelle, c'est-à-dire aux instants où des diodes commuteraient spontanément, ici à  $t = 0$ ,  $t = T/2$ ,  $t = T$ . On appelle *angle de retard à l'amorçage*  $\theta$  le retard angulaire correspondant (une période  $T$  de  $u(t)$  correspond à un angle de  $2\pi$  radians) :  $\theta = \omega\tau$



où  $\omega$  est la pulsation de la tension  $u(t)$  alimentant le pont.

L'angle de retard  $\theta$  est compris entre  $0$  et  $\pi/2$  dans le fonctionnement du pont en redresseur. Nous verrons au chapitre suivant que le même pont peut fonctionner avec  $\theta > \pi/2$ , mais en onduleur.

La tension  $u(t)$  est représentée à la figure 3, elle s'écrit sous la forme:  $u(t) = \hat{U} \sin(\omega t)$

Les instants de commutation naturelle sont  $t = k.T/2$ ,  $k$  étant entier. On amorce les thyristors à  $t = k.T/2 + \tau$  ( $Th_1$  et  $Th_4$  :  $k$  pair,  $Th_2$  et  $Th_3$  :  $k$  impair).

Pour simplifier le raisonnement, et les calculs, nous supposons que le courant  $i_c(t)$  dans la charge est parfaitement lissé par la bobine, donc qu'il est constant et égal à sa valeur moyenne :  $i_c(t) = \langle i_c \rangle$

- à  $t = \tau$ , on amorce les thyristors  $Th_1$  et  $Th_4$ . La tension  $u_c(t)$  est alors égale à la tension  $u(t)$ , le courant  $i_c(t)$  à  $\langle i_c \rangle$ . Notre hypothèse  $i_c(t)$  parfaitement lissé implique que ce courant ne s'arrête pas, ce qui signifie que  $Th_1$  et  $Th_4$  ne peuvent pas se bloquer tant qu'on n'amorce pas les deux autres thyristors. La tension  $u_c(t)$  peut ainsi devenir négative.

## Electronique de Puissance

- à  $t = T/2 + \tau$ , on amorce  $Th_2$  et  $Th_3$ , ce qui provoque le blocage de  $Th_1$  et  $Th_4$ . En effet,  $Th_1$  et  $Th_2$  sont à cathode commune et c'est  $Th_2$  dont l'anode est au potentiel le plus haut, c'est donc lui qui conduit et  $Th_1$  se bloque. De même pour les thyristors à anode commune.

## 2.3. Grandeurs caractéristiques

### 2.3.1. Tension moyenne redressée

La période de  $u_c$  est  $T/2$ . La définition de la valeur moyenne s'écrit ici :

$$\langle u_c \rangle = \frac{2}{T} \int_{\alpha}^{\frac{T}{2} + \alpha} u_c(t) dt = \frac{2}{T} \int_{\alpha}^{\frac{T}{2} + \alpha} \hat{U} \cdot \sin(\omega t) dt$$

$$\langle u_c \rangle = \frac{2U\sqrt{2}}{\pi} \cos \theta$$

On voit que cette valeur moyenne dépend de l'angle de retard  $\theta$ , de façon non-linéaire. Elle reste positive tant que  $\theta$  reste inférieur à  $\pi/2$ . Si  $\theta = 0$ , le pont fonctionne comme un pont à diodes.

### 2.3.2. Intensité moyenne dans la charge

$$u_c(t) = E + Ri_c(t) + L \frac{di_c}{dt}(t) \quad \langle i_c \rangle = \frac{\langle u_c \rangle - E}{R}$$

2.3.3. Intensité efficace en ligne D'après la figure 3, il est aisé de voir que :  $I = \langle i_c \rangle$

$$k = \frac{P}{S} = \frac{\langle u_c \rangle \cdot \langle i_c \rangle}{U \cdot I} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \theta \cong 0,9 \cos \theta$$

### 2.3.4. Facteur de puissance

## 3. Pont PD2 mixte

### 3.1. Schéma du pont

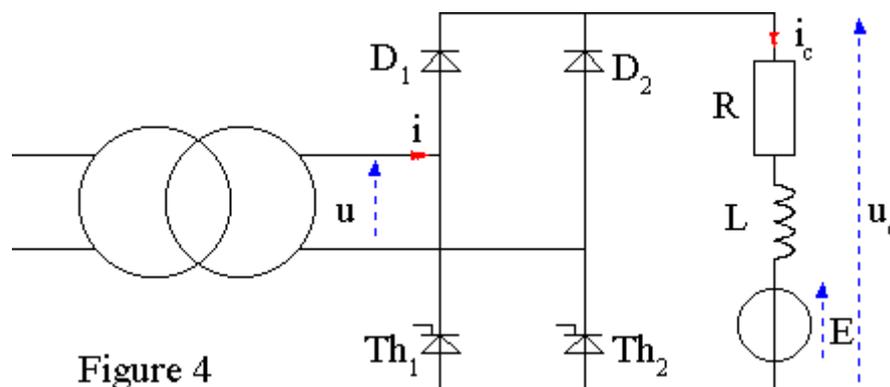


Figure 4

C'est un pont PD2 dans lequel on a remplacé deux diodes d'un groupe par deux thyristors (celles du groupe à anodes communes sur le schéma de la figure 4, mais on peut aussi remplacer les diodes à cathodes communes).

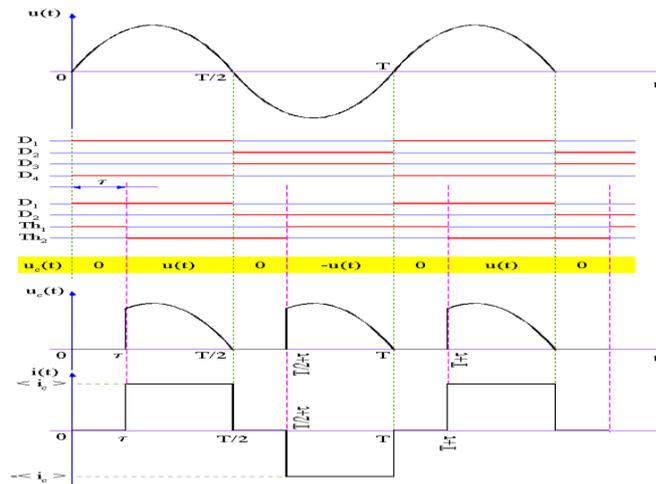
On amorce les thyristors avec un retard temporel  $\tau$  par rapport aux instants où des diodes auraient commuté spontanément (*instants de commutation naturelle*). Cela correspond à un retard angulaire  $\theta$  (rappelons qu'une période  $T$  correspond à un angle de  $2\pi$ ).

### 3.2. Principe de fonctionnement

On considère que l'inductance  $L$  est suffisamment grande pour lisser le courant  $i_c$  de manière parfaite. L'intensité  $i_c(t)$  sera alors à peu près constante.

On choisit l'origine des temps pour pouvoir écrire la tension  $u(t)$  sous forme d'un sinus:

$$u(t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t)$$



On détermine en premier le chronogramme de conduction des quatre diodes d'un pont à diodes. C'est nécessaire, car il nous faut les instants de commutation naturelle, visibles sur ce chronogramme.

Pour les thyristors  $Th_1$  et  $Th_2$ , on trouve l'instant d'amorçage en partant de l'instant de commutation

$$\tau = \frac{\theta}{\omega}$$

naturelle de  $D_3$  et  $D_4$ , et en attendant encore une durée

(le dessin a été tracé pour  $\theta = \pi/6$ , c'est-à-dire  $\tau = 1,67$  ms avec  $f = 50$  Hz).

Le thyristor  $Th_1$  est ainsi amorcé à  $t = \tau$ ,  $Th_2$  à  $t = T/2 + \tau$ . Comme le courant  $i_c$  ne s'annule jamais, il faut qu'il y ait toujours un thyristor passant. Cela signifie que le thyristor  $Th_1$  restera conducteur tant qu'on n'aura pas amorcé  $Th_2$ , c'est-à-dire jusqu'à  $t = T/2 + \tau$ . De même, le thyristor  $Th_2$  restera conducteur jusqu'à  $t = T + \tau$ . On voit que la durée de conduction de chaque thyristor est égale à  $T/2$ , quel que soit le retard à l'amorçage. Le chronogramme de conduction des thyristors est le même que celui des diodes  $D_3$  et  $D_4$ , mais décalé de  $\tau$  vers la droite.

On voit alors apparaître quatre intervalles pour chaque période  $T$ , selon les composants conducteurs (soit, à partir de  $t = \tau$ ):

- $D_1$  et  $Th_2$ : le réseau alimente la charge, *phase de conduction*, on a  $u_c(t) = u(t)$  [écrire une loi des mailles en suivant le trajet du courant];
- $D_2$  et  $Th_2$ : la charge n'est plus alimentée par le réseau, on a *une phase de roue libre*;  $u_c(t) = 0$ ;
- $D_2$  et  $Th_1$ : conduction,  $u_c(t) = -u(t)$ ;
- $D_1$  et  $Th_1$ : roue libre,  $u_c(t) = 0$ ;

## Electronique de Puissance

On peut ensuite tracer la courbe  $u_c(t)$ . On voit que la tension est toujours positive ou nulle.

En ce qui concerne la courbe  $i(t)$ , le courant est nul pendant les phases de roue libre. Lorsque  $D_1$  et  $Th_2$  conduisent, il est égal à  $\langle i_c \rangle$ , et lorsque ce sont  $D_2$  et  $Th_1$  qui conduisent, il est égal à  $-\langle i_c \rangle$ .

### 3.3. Grandeur caractéristique :

**Tension moyenne  $\langle u_c \rangle$**

La période  $T_c$  de  $u_c(t)$  est égale à  $T/2$ .

$$\langle u_c \rangle = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} u_c(t) dt = \frac{2}{T} \int_{\pi}^{3\pi/2} U\sqrt{2} \sin(\omega t) dt = \frac{U\sqrt{2}}{\pi} [-\cos(\omega T / 2) + \cos(\omega \pi)] =$$

$$\langle u_c \rangle = \frac{U\sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos\theta)$$

## EXERCICES

**1.** On alimente un moteur à courant continu à excitation séparée par un pont PD2 tout thyristor, branché sur un réseau monophasé 230 V, 50 Hz.

La résistance de l'induit du moteur est  $R = 1 \Omega$ , sa f.e.m.  $E$  est proportionnelle à sa fréquence de rotation  $n$  :  $E = k.n$  avec  $k = 7,2 \text{ V.s.tr}^{-1}$ .

On néglige les pertes constantes du moteur. On rappelle que dans ce cas, l'intensité  $I$  dans l'induit est proportionnelle au couple utile  $T_u$  :  $I = 2\pi T_u / k$ . Le moteur fonctionne à  $T_u = \text{constante} = 15 \text{ N.m}$ .

En série avec l'induit du moteur, on a placé une bobine de lissage de résistance interne  $r = 0,3 \Omega$  et d'inductance  $L$  suffisamment grande pour que le courant soit bien lissé.

1.1. Faire un schéma électrique de l'ensemble pont + moteur.

1.2. Calculer le retard à l'amorçage  $\theta$  à appliquer au pont pour obtenir les fréquences de rotation suivantes:

$$n_1 = 1500 \text{ tr/min}; n_2 = 1000 \text{ tr/min}; n_3 = 500 \text{ tr/min} \text{ et } n_4 = 0 \text{ (démarrage)}.$$

**2.** Un pont mixte monophasé, dont les thyristors sont à anodes communes, est alimenté par un transformateur 230 V/25 V. La charge est constituée d'une résistance  $R$ , d'une inductance  $L$  et d'un générateur de tension de f.e.m.  $E$  (en opposition), le tout en série. Les valeurs numériques sont les suivantes:

$$- R = 12 \Omega;$$

$$- L = 1 \text{ H};$$

$$- E = 12 \text{ V}.$$

Le retard à l'amorçage est  $\theta = 45^\circ$ .

2.1. Quelle est la valeur moyenne  $\langle u_c \rangle$  de la tension de sortie du pont?

2.2. Calculer l'intensité moyenne  $\langle i_c \rangle$  dans la charge.

2.3. En tenant compte d'une tension  $U_D = 1 \text{ V}$  aux bornes de chaque diode passante et d'une tension  $U_{Th} = 2 \text{ V}$  aux bornes de chaque thyristor passant, donner l'expression de  $u_c(t)$  pour chaque phase du redressement. Déterminer l'expression de la valeur moyenne  $\langle u_c \rangle$ .

2.4. A partir de l'expression de  $\langle u_c \rangle$  trouvée à la question précédente, calculer les valeurs numériques de la tension moyenne et de l'intensité moyenne.

# CHAPITRE 3

## LE HACHEUR

### SOMMAIRE

#### 1. Hacheur série

##### 1.1. Principe de fonctionnement

##### 1.2. Fonctionnement sur charge R L

###### 1.2.1. Etude du fonctionnement

###### 1.2.2. Calcul des valeurs moyennes des tensions et intensités

###### 1.2.3. Calcul de l'intensité $i_c(t)$

###### 1.2.4. Ondulation de courant

##### 1.3. Fonctionnement sur charge R L E

#### 2. Hacheur parallèle

##### 2.1. Schéma du montage

##### 2.2. Etude du fonctionnement

##### 2.3. Calcul des valeurs moyennes des tensions et intensités

#### 3. Hacheur réversible

##### 3.1. Schéma

##### 3.2. Etude du fonctionnement

## Electronique de Puissance

Un hacheur, ou convertisseur continu - continu est un système électronique capable de modifier la valeur moyenne d'un courant continu et d'une tension continue avec un bon rendement.

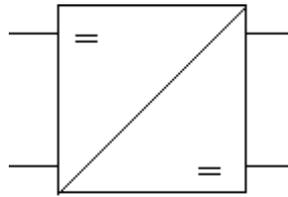


Figure 1

### 1. Hacheur série ou abaisseur de tension

#### 1.1. Principe de fonctionnement

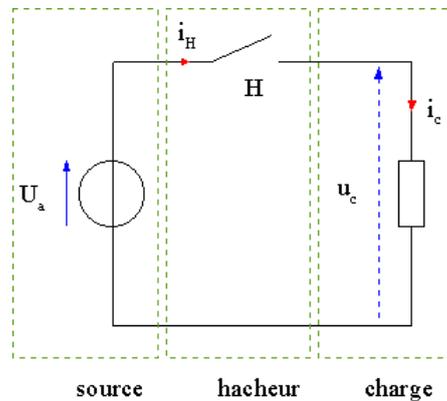


Figure 2

Le hacheur s'intercale entre la source de puissance et la charge. La source doit être un générateur de tension.

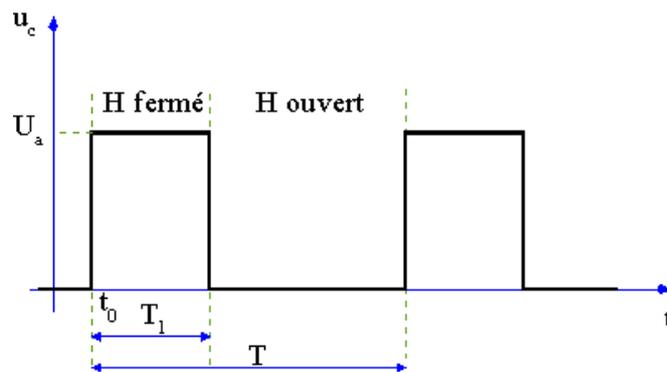


Figure 3

L'interrupteur H est un composant électronique (transistor ou thyristor), que l'on considérera comme parfait dans l'étude qui suit, c'est-à-dire qu'il ne présente aucune différence de tension à ses bornes lorsqu'il est fermé. Il est périodiquement ouvert et fermé, à une fréquence  $f$ .

La figure 3 montre la tension  $u_c$  en fonction du temps: Quand l'interrupteur est fermé on a  $u_c = U_a$  et quand il est ouvert  $u_c = 0$ .

Le rapport cyclique  $\alpha$  est défini comme le rapport de la durée  $T_1$  pendant laquelle H est fermé à la période  $T$ .

$$\alpha = \frac{T_1}{T} \quad 0 < \alpha < 1$$

La valeur moyenne  $\langle u_c \rangle$  de la tension  $u_c(t)$  aux bornes de la charge se calcule sur une période:

$$\langle u_c \rangle = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u_c(t).dt = \alpha U_a$$

## 1.2. Fonctionnement sur charge R L

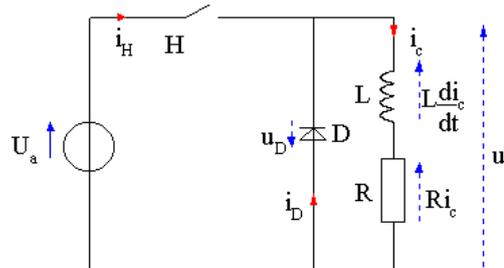


Figure 4

Lorsque la charge est purement résistive, le courant  $i_c$  s'interrompt chaque fois que H s'ouvre. Lorsque la charge est inductive, par contre, l'inductance s'oppose aux variations brusques de courant, et si elle est suffisamment grande, le courant ne s'annule même plus. Lorsque l'inductance de la charge est insuffisante, on ajoute au circuit une *bobine de lissage*. Il faut dans les deux cas compléter le dispositif par une *diode de roue libre*, ce qui mène au schéma de la figure 4.

### 1.2.1. Etude du fonctionnement

L'interrupteur H est fermé de  $t = 0$  à  $t = \alpha T$ , puis ouvert de  $\alpha T$  à  $T$ , etc.

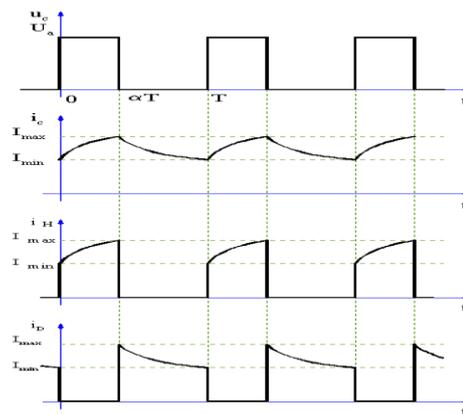


Figure 5

Dans la première phase, le générateur alimente la charge, c'est la *phase de conduction*, la tension  $u_c$  est égale à  $U_a$ . La diode est bloquée, car elle est sous tension inverse. Le courant  $i_c$  augmente.

Quand H est ouvert, le générateur ne débite plus dans la charge. Le courant  $i_c$  ne peut pas s'arrêter immédiatement à cause de la bobine; la diode de roue libre permet sa circulation. L'intensité décroît. En effet, l'énergie qui se dissipe dans la charge, par effet Joule, provient de la bobine où elle avait été stockée sous forme magnétique dans la phase de conduction. Le stock diminuant, le courant diminue aussi, de façon exponentielle.

## Electronique de Puissance

En régime permanent, l'intensité oscille entre une valeur  $I_{\min}$  et une valeur  $I_{\max}$ . Son expression sera calculée plus loin.

### 1.2.2. Calcul des valeurs moyennes des tensions et intensités

$\langle u_c \rangle$ : la courbe  $u_c(t)$  a la même forme que dans le cas d'une charge purement résistive, sa valeur moyenne est la même:

$$\langle u_c \rangle = \alpha U_a$$

-  $\langle i_c \rangle$ : aux bornes de la charge (y compris la bobine de lissage), on a:

$$u_c(t) = L \frac{di_c}{dt}(t) + Ri_c(t)$$

Prenons les valeurs moyennes des deux membres. En régime permanent,  $i_c(t)$  est périodique et la valeur moyenne du terme  $Ldi_c/dt$  est nulle, en effet:

$$\left\langle \frac{di_c}{dt} \right\rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{di_c}{dt}(t).dt = \frac{1}{T} (i_c(T) - i_c(0)) = 0$$

car  $i_c(T) = i_c(0)$ .

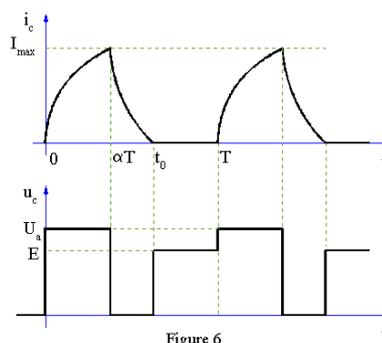
Il reste:  $\langle u_c \rangle = R \langle i_c \rangle$  soit :  $\langle i_c \rangle = \frac{\langle u_c \rangle}{R}$

### 1.3. Fonctionnement sur charge R L E

Tant que le courant n'est pas interrompu, il n'y a aucune différence de fonctionnement par rapport au cas précédent, la relation (1) reste valable, les relations (2) et (3) deviennent:

$$\langle i_c \rangle = \frac{\langle u_c \rangle - E}{R} \quad \langle i_c \rangle = \frac{\langle u_c \rangle - E}{R}$$

Par contre, si l'intensité  $i_c(t)$  s'annule pendant la phase de roue libre (voir figure 6), ce qui est possible ici, à  $t = t_0$  par exemple, alors la tension  $u_c$  devient égale à  $E$ , et non plus à 0 comme précédemment.



On peut remarquer sur la figure que la valeur moyenne de  $u_c$  est plus grande dans ce cas que ce qui est donné par la relation (1), car il y a un petit rectangle, de hauteur  $E$ , qui s'ajoute.

On cherche toujours à éviter la *conduction interrompue* en utilisant une bobine d'inductance suffisante.

## 2. Hacheur parallèle ou élévateur de tension

### 2.1. Schéma du montage

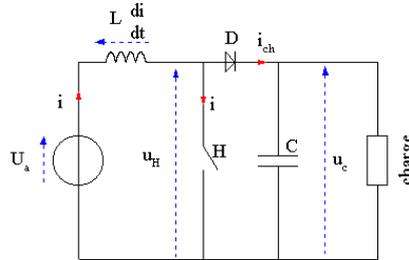


Figure 7

L'interrupteur H est disposé en parallèle sur la charge. Il est ouvert et fermé périodiquement. On ajoute, également en parallèle sur la charge, un condensateur C, de forte capacité, dont le rôle est de lisser la tension  $u_c$  et de fournir la puissance à la charge dans la phase où le générateur ne le fait pas.

### 2.2. Etude du fonctionnement

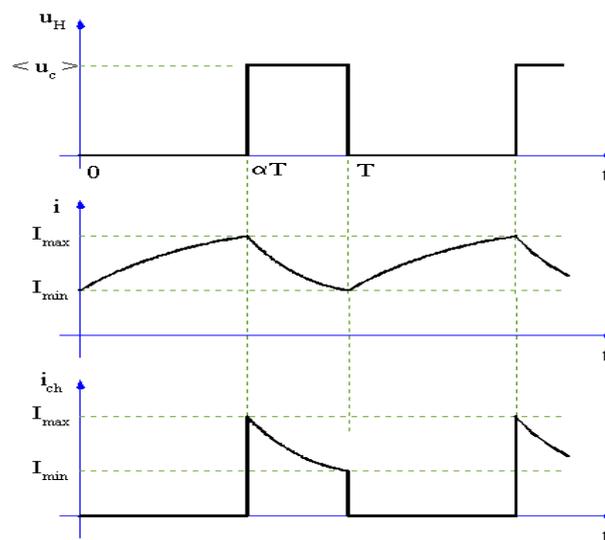


Figure 8

On suppose que la capacité du condensateur est suffisante pour que la tension  $u_c$  varie peu, ce qui permet de la considérer comme constante (mais sans pour autant négliger le courant de charge et de décharge du condensateur).

De  $t = 0$  à  $t = \alpha T$ , H est fermé et relie la bobine directement au générateur. L'intensité  $i$  augmente. La tension  $u_H$  est nulle, ce qui bloque la diode, car  $u_c$  est positif.

De  $t = \alpha T$  à  $t = T$ , H est ouvert,  $i$  décroît. Le courant  $i$  ne peut passer que par la diode et va alimenter la charge et recharger le condensateur. Si l'on néglige la chute de tension dans la diode, on

a  $u_H = u_c = \langle u_c \rangle$  L'intensité  $i(t)$  oscille entre un maximum et un minimum.

### 2.3. Calcul des valeurs moyennes des tensions et intensités

-  $\langle u_c \rangle$ : il faut passer par le calcul de  $\langle u_H \rangle$ . La courbe  $u_H(t)$  permet de voir que

$$\langle u_H \rangle = (1 - \alpha) \langle u_c \rangle$$

$$U_a - L \frac{di}{dt}(t) - u_H(t) = 0$$

Dans la maille générateur - bobine - interrupteur, on a:

d'où l'on déduit, en prenant les valeurs moyennes (régime permanent périodique):  $\langle u_H \rangle = U_a$

$$\langle u_c \rangle = \frac{U_a}{(1 - \alpha)}$$

et par suite:

On remarque que cette valeur moyenne est supérieure à la tension d'alimentation, on a bien un hacheur élévateur de tension.

-  $\langle i \rangle$ : on fait un raisonnement sur les puissances, en disant que la puissance fournie par le générateur est égale à celle reçue par la charge, du fait qu'on néglige toutes les pertes en supposant les composants parfaits.

La puissance moyenne  $P_g$  fournie par le générateur est la moyenne du produit  $U_a \cdot i(t)$ , c'est-à-

dire  $P_g = \langle U_a \cdot i \rangle = U_a \langle i \rangle$

La charge reçoit une puissance  $P_{ch}$

$$P_{ch} = \langle u_c \cdot i_{ch} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T u_c(t) i_{ch}(t) dt = \frac{\langle u_c \rangle}{T} \int_0^T i_{ch}(t) dt = \frac{U_a}{(1 - \alpha)} \langle i_{ch} \rangle$$

(se rappeler que  $u_c(t) = \langle u_c \rangle$ ).

$$\langle i \rangle = \frac{\langle i_{ch} \rangle}{(1 - \alpha)}$$

On en déduit que

Remarque:  $\langle i_{ch} \rangle$  est aussi l'intensité moyenne du courant traversant la charge proprement dite (sans le condensateur), car l'intensité moyenne dans le condensateur est nulle en régime permanent.

### 3. Hacheur réversible (quatre quadrants)

Il s'agit d'un hacheur abaisseur dans lequel le transfert de puissance peut se faire dans les deux sens (la charge peut aussi fonctionner en génératrice) et qui permet de fournir une tension positive ou négative. La tension  $\langle u_c \rangle$  et l'intensité  $\langle i_c \rangle$  peuvent avoir un signe quelconque, le point de fonctionnement peut se trouver n'importe où dans le diagramme ( $\langle u_c \rangle, \langle i_c \rangle$ ), d'où la dénomination quatre quadrants.

## Electronique de Puissance

Cela permet, lorsqu'on alimente un moteur à courant continu, de le faire tourner dans les deux sens et également de le faire fonctionner en génératrice et, par exemple, de récupérer de l'énergie électrique pendant les freinages.

### 3.1. Schéma

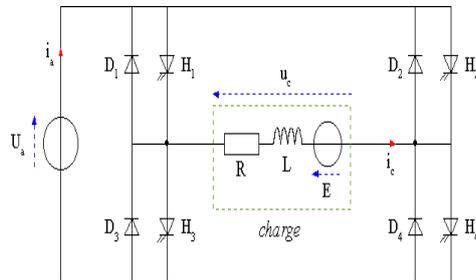


Figure 9

C'est un montage en pont, à quatre interrupteurs. S'il s'agit de thyristors, ceux-ci doivent être munis d'un système de blocage, c'est ce qui est symbolisé sur le schéma par le deuxième trait à côté de la gâchette.

La charge est flottante, elle n'a aucune liaison directe avec un pôle du générateur.

### 3.2. Principe de fonctionnement

Nous faisons l'hypothèse d'un courant ininterrompu.

Pour un fonctionnement dans un quadrant donné, deux des quatre interrupteurs restent toujours bloqués (même si on leur envoie des commandes d'amorçage), les deux autres fonctionnent simultanément et sont ouverts et fermés ensemble et périodiquement.

Etudions le cas où ce sont H<sub>1</sub> et H<sub>4</sub> qui fonctionnent et où E est positif et inférieur à U<sub>a</sub>.

- de  $t = 0$  à  $t = \alpha T$ , les deux commutateurs sont fermés, on a

$$u_c = U_a \text{ et } i_c = i_a > 0$$

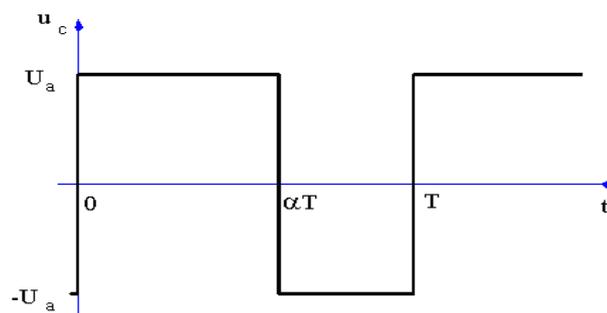


Figure 10

et l'intensité  $i_c(t)$  augmente

- de  $t = \alpha T$  à  $t = T$ , les quatre commutateurs sont ouverts. L'intensité dans la charge reste positive à cause de la bobine de lissage, et le courant passe par les diodes D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> et par le générateur. Dans cette phase, la charge restitue de la puissance au générateur, c'est une phase de récupération (les diodes sont appelées diodes de récupération). On a :

## Electronique de Puissance

$$u_c = -U_a \text{ et } i_c = -i_a$$

$i_c(t)$  est encore positif, mais il diminue. Remarquer que le générateur de tension  $U_a$  doit supporter ce courant remontant.

Si on envoie des ordres de conduction aux commutateurs  $H_2$  et  $H_3$ , ceux-ci restent bloqués, car ils ne peuvent pas être parcourus " à l'envers " par le courant.

La valeur moyenne  $\langle u_c \rangle$  vaut :  $\langle u_c \rangle = (2\alpha - 1)U_a$

$$\langle i_c \rangle = \frac{\langle u_c \rangle - E}{R}$$

et on a encore

# CHAPITRE 4

## ONDULEURS

### SOMMAIRE

1. Onduleur assisté monophasé en pont PD2
2. Onduleur autonome
  - 2.1. Utilisations
  - 2.2. Schéma du montage en pont à 4 commutateurs
  - 2.3. Commande symétrique
    - 2.3.1. Charge résistive
    - 2.3.2. Charge inductive
    - 2.3.3. Valeur efficace
  - 2.4. Commande décalée
  - 2.5. Commande à modulation de largeur d'impulsion

## Electronique de Puissance

Un *onduleur* est un système électronique transformant une énergie électrique continue en une énergie alternative. S'il peut fonctionner seul, sans nécessiter la présence d'un réseau alternatif, il est qualifié d'*onduleur autonome*, dans le cas contraire, on parle d'*onduleur assisté*.

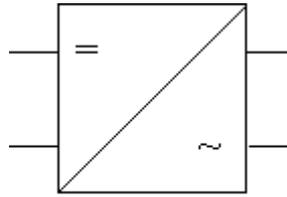


Figure 1

### 1. Onduleur assisté monophasé en pont PD2

L'onduleur assisté ne peut fonctionner que s'il est relié à un réseau alternatif imposant la tension (forme, valeur efficace et fréquence). Il permet de transférer de la puissance à ce réseau. Habituellement, cette puissance est fournie soit par une machine à courant continu fonctionnant en génératrice, soit par redressement d'une autre tension alternative (dont on veut modifier la fréquence par exemple).

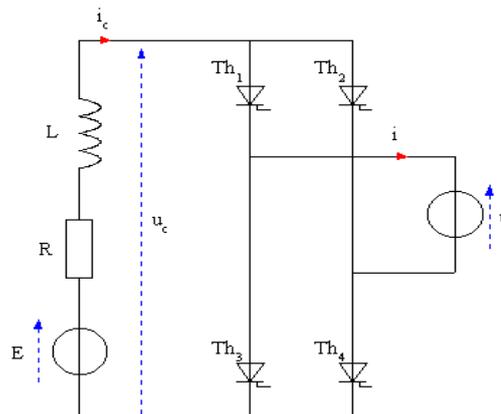


Figure 2

Le schéma du montage est le même que pour le redressement commandé. On a placé la source de puissance à gauche, en utilisant la *convention générateur*, le réseau à droite en convention récepteur. La numérotation des thyristors a changé, Th<sub>1</sub> et Th<sub>2</sub> sont à anode commune, Th<sub>3</sub> et Th<sub>4</sub> à cathode commune. Remarquer que la f.e.m. E est dans le sens du courant i<sub>c</sub>. C'est en effet elle qui fournit la puissance maintenant.

On a représenté le générateur continu par son schéma équivalent le plus général, R+L+E, et on suppose L assez grand pour que le courant i<sub>c</sub> soit parfaitement lissé. Dans ces conditions, le fonctionnement du pont est le même qu'en redressement commandé, mis à part que dans ce cas, *l'angle θ de retard à l'amorçage est supérieur à π/2*.

Les relations trouvées au chapitre précédent restent valables, il faut simplement les adapter aux nouvelles conventions de signe.

$$\langle u_c \rangle = \frac{-2U\sqrt{2}}{\pi} \cos \theta$$

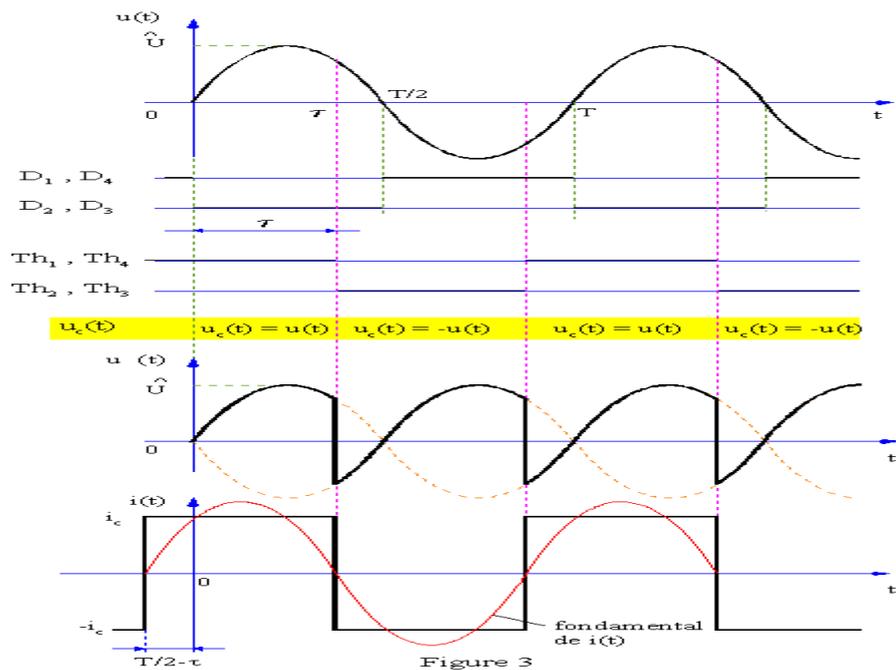
## Electronique de Puissance

Rappelons que  $\cos \theta$  est négatif puisque  $\theta > \pi/2$  et que la valeur de  $U$  est imposée par le réseau. Si  $E$  est constant, le retard à l'amorçage permet de régler le courant  $\langle i_c \rangle$  renvoyé dans le réseau, par l'intermédiaire de  $\langle u_c \rangle$ , comme l'indique la relation suivante :

$$\langle i_c \rangle = \frac{E - \langle u_c \rangle}{R}$$

Il doit être supérieur à  $\langle u_c \rangle$  pour que le système puisse fonctionner, ce qui limite l'intervalle de variation de l'angle  $\theta$ .

$$I = \langle i_c \rangle$$



**Remarque :** Considérons le fondamental de  $i(t)$  (représenté à la figure 3) : on voit qu'il est en avance de  $T/2 - \tau$  sur la tension  $u(t)$ . Cela correspond à une avance angulaire égale à  $\pi - \theta$ , comprise entre 0 et  $\pi/2$ , donc le courant est toujours en avance sur la tension dans ce type d'onduleur.

## 2. Onduleur autonome

### 2.1. Utilisations :

L'onduleur autonome ne nécessite aucun réseau alternatif pour fonctionner. Il transforme la puissance fournie par un générateur continu en une puissance sous forme alternative, de fréquence  $f$  et de tension efficace  $V$  déterminées par le générateur continu et la commande de l'onduleur.

Les utilisations les plus fréquentes sont:

- alimentation électrique en habitat isolé ou itinérant (caravanes,...),
- alimentation de secours pour petits systèmes devant fonctionner en permanence (ordinateurs, centrales d'alarme),
- alimentation de systèmes fonctionnant en haute fréquence (fours à induction),
- alimentation sous tension et fréquence variables de moteurs synchrones ou asynchrones.

## 2.2. Schéma du montage en pont à 4 commutateurs

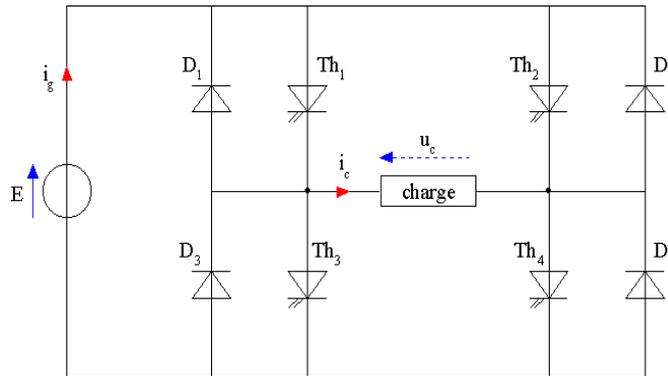


Figure 5

La source de puissance est un générateur continu, qu'on suppose linéaire, et qu'on assimile à un générateur de tension  $E$ .

Le symbole choisi pour les commutateurs est un symbole général, pouvant représenter des transistors ou bien des thyristors avec leurs circuits d'amorçage et d'extinction. Nous raisonnerons sur des thyristors. Il y a trois types de forme pour les signaux de commande des thyristors:

- la commande symétrique
- la commande décalée
- la commande MLI

## 2.3. Commande symétrique

Les thyristors sont commandés deux par deux,  $Th_1$  avec  $Th_4$  et  $Th_2$  avec  $Th_3$ . Quand on amorce deux thyristors, on envoie simultanément un ordre de blocage aux deux autres.

### 2.3.1. Charge résistive

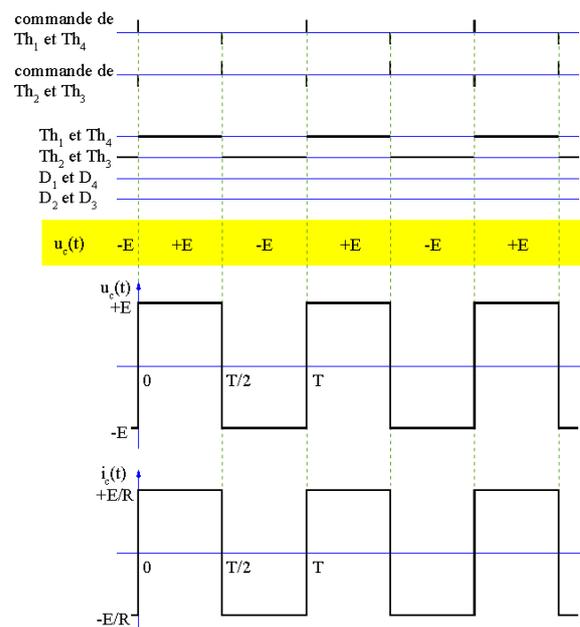


Figure 6

## Electronique de Puissance

La figure 6 montre tout d'abord les commandes des thyristors: un trait vers le haut symbolise une impulsion sur la gâchette, un trait vers le bas un ordre de blocage. Rappelons qu'un ordre de blocage est toujours suivi d'effet : le thyristor se bloque, alors qu'une impulsion sur la gâchette ne provoque l'amorçage du thyristor que s'il est possible (thyristor sous tension directe).

- à  $t = 0$ , on amorce  $Th_1$  et  $Th_4$  en même temps qu'on bloque  $Th_2$  et  $Th_3$ . La tension  $u_c$  est égale à  $+E$ . L'intensité dans la charge est  $i_c = E/R$ .

- à  $t = T/2$ , on bloque  $Th_1$  et  $Th_4$  et amorce  $Th_2$  et  $Th_3$ . La tension  $u_c$  est égale à  $-E$ , l'intensité à  $-E/R$ .

Avec une charge résistive, les diodes ne conduisent jamais.

### 2.3.2. Charge inductive

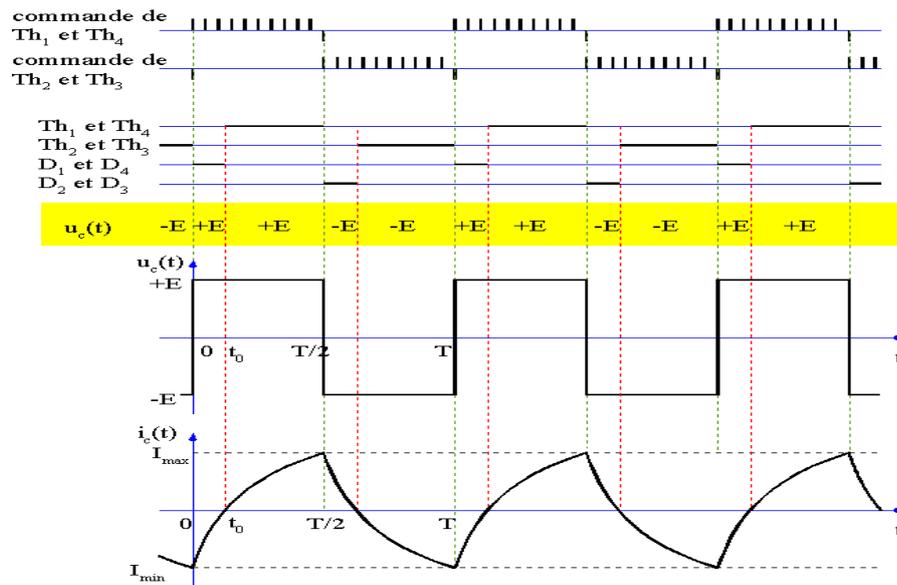


Figure 7

La différence vient de ce que le courant  $i_c(t)$  ne peut varier aussi brusquement qu'auparavant, du fait de l'inductance  $L$ . Au moment où l'on bloque  $Th_1$  et  $Th_3$ , le courant est positif. Après le blocage, il ne peut pas devenir négatif instantanément, et donc les thyristors  $Th_2$  et  $Th_3$  ne peuvent pas devenir passants à ce moment. En conséquence, il faut envoyer des trains d'impulsions sur les gâchettes pour que les thyristors puissent s'amorcer ultérieurement, au moment où le courant  $i_c(t)$  se sera annulé.

à  $t = 0$  on bloque les thyristors  $Th_2$  et  $Th_3$  et on envoie une impulsion sur les gâchettes de  $Th_1$  et  $Th_4$ , qui ne peuvent pas s'amorcer, car le courant n'est pas dans le bon sens. Le courant, négatif, continue à circuler par les diodes  $D_1$  et  $D_4$  et repasse dans le générateur en lui restituant de l'énergie. On a une *phase de récupération*. Les diodes s'appellent d'ailleurs des *diodes de récupération*. Dans la mesure où l'on néglige les chutes de tension dans les diodes, la tension  $u_c(t)$  est égale à  $E$  et l'intensité  $i_c(t)$  augmente exponentiellement (avec une asymptote à  $E/R$ ).

- à  $t = t_0$ , le courant s'annule. A ce moment, les thyristors  $Th_1$  et  $Th_4$  peuvent s'amorcer, à condition que l'on ait continué à envoyer des impulsions sur les gâchettes. Les diodes  $D_1$  et  $D_4$  se bloquent. La tension  $u_c(t)$  reste égale à  $E$  et l'intensité continue d'augmenter suivant la même exponentielle qu'avant.

- à  $t = T/2$ , on bloque  $Th_1$  et  $Th_4$  et on envoie des impulsions sur les gâchettes de  $Th_2$  et  $Th_3$ . Mais le courant  $i_c$  ne pouvant varier brusquement, il reste encore positif un moment.  $Th_2$  et  $Th_3$  ne peuvent s'amorcer, le courant ne pouvant pas les parcourir à l'envers. Le courant passe donc par  $D_2$  et  $D_3$ . La

## Electronique de Puissance

tension  $u_c(t)$  est égale à  $-E$ . Le courant traverse le générateur à l'envers, c'est une phase de récupération. L'intensité diminue exponentiellement (avec une asymptote négative égale à  $-E/R$ ).

Ce n'est qu'à l'instant où  $i_c(t)$  s'annule que les thyristors peuvent enfin devenir passants. La tension  $u_c(t)$  reste égale à  $-E$ . L'intensité continue à diminuer, avec la même équation.

Ensuite le fonctionnement est le même.

### 2.3.3. Valeur efficace de la tension

Dans les deux cas, charge résistive ou inductive, la forme de  $u_c$  est la même, et on a

$$U_c = E$$

## 2.4. Commande décalée

La commande précédente ne permet pas de faire varier la valeur efficace  $U_c$ . Lorsque cela est nécessaire, on a recours à la commande décalée.

Elle consiste à retarder la commande de  $Th_4$  par rapport à celle de  $Th_1$ , et celle de  $Th_3$  par rapport à celle de  $Th_2$ , d'un angle  $\theta$ .

Le fonctionnement est beaucoup plus compliqué, aussi ne l'étudierons-nous pas. Mais le résultat principal est que la valeur efficace  $U_c$  dépend de  $\theta$ :

$$U_c = E \sqrt{1 - \frac{\theta}{\pi}}$$

Elle peut varier de 0 à  $E$ .

## 2.5. Commande à modulation de largeur d'impulsion :

Les formes des tensions et intensités obtenues avec les commandes précédentes sont loin d'être sinusoïdales. Dans certains cas, cela est mal supporté par la charge, ou bien on veut éviter des à-coups, et alors on utilise alors un troisième type de commande : la MLI.

Les thyristors sont commandés par paire, comme pour la commande symétrique, mais la fréquence du cycle de commande est beaucoup plus grande que celle du courant que l'on veut obtenir (10 à 20 fois au minimum). De plus les durées de conduction des deux paires sont différentes et varient en permanence, le rapport cyclique  $\alpha$  n'est pas égal à  $1/2$ , mais varie dans le temps, la tension est pratiquement sinusoïdale.

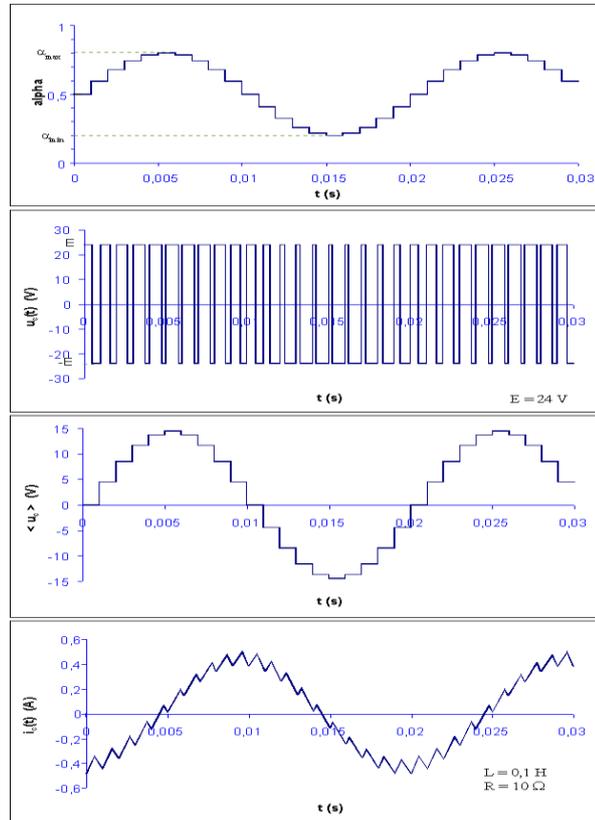
On a pris ci-dessous, l'exemple d'un circuit inductif ( $R = 10 \Omega$ ,  $L = 0,1 \text{ H}$ ;  $E = 24 \text{ V}$ ). La commande des thyristors a une période égale à  $1 \text{ ms}$ . Le rapport cyclique  $\alpha$  est proche d'une sinusoïde de période  $20 \text{ ms}$ . Il varie d'une valeur  $\alpha_{\min} = 0,2$  à  $\alpha_{\max} = 0,8$ . Lorsque  $\alpha = 1/2$ , la valeur moyenne de  $u_c(t)$ , calculée sur une période de  $1 \text{ ms}$ , est égale à 0. Lorsque  $\alpha$  est supérieur à  $1/2$ , la valeur moyenne de  $u_c(t)$  est positive (on a  $\langle u_c \rangle = (2\alpha - 1)E$ ), alors qu'elle est négative si  $\alpha < 1/2$ .

Le courant  $i_c(t)$  est constitué d'une suite d'arcs d'exponentielles (phases de conduction et de récupération), qui lui donnent une forme proche d'une sinusoïde (il y a un déphasage par rapport à la sinusoïde de  $\alpha$  à cause de l'inductance du circuit).

## Electronique de Puissance

Avec cette commande, on peut faire varier la valeur efficace de l'intensité  $i_c$ , en agissant sur les valeurs minimum et maximum de  $\alpha$ .

La commande MLI est la plus utilisée actuellement. C'est elle qui donne la plus grande souplesse d'utilisation, on peut en effet obtenir des fréquences très faibles sans à-coup, régler la valeur efficace de la tension. En triphasé, on peut choisir avec précision la phase des trois tensions et ainsi, lorsqu'on alimente un moteur, contrôler exactement la position du champ magnétique tournant créé par le stator (contrôle vectoriel, voir le chapitre suivant).



EXERCICES

1. Une batterie d'accumulateurs, de f.e.m.  $E=48\text{ V}$  et de résistance interne  $R_b = 0,1\ \Omega$  est reliée au réseau  $230\text{ V}/50\text{ Hz}$  par un pont PD2 tout thyristor, deux inverseurs  $K_1$  et  $K_2$  et une bobine de lissage (de résistance interne  $R_L = 0,1\ \Omega$ ). Elle peut être rechargée ou bien fournir de la puissance au réseau, selon la position des deux interrupteurs.

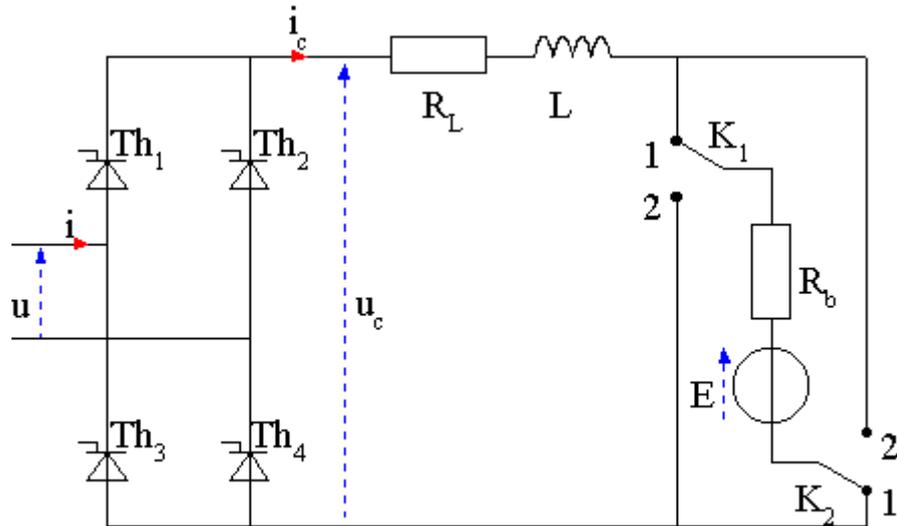


Figure 9

- 1.1. Dans quelle position doivent être les interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  pour la recharge de la batterie ?
- 1.2. Calculer l'angle  $\theta$  de retard à l'amorçage des thyristors et le retard temporel  $\tau$  correspondant pour qu'on ait  $\langle i_c \rangle = 10\text{ A}$ .
- 1.3. Les interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  étant dans l'autre position, calculer  $\theta$  et  $\tau$  pour que  $\langle i_c \rangle = 30\text{ A}$ .
- 1.4. Le montage fonctionnant toujours en onduleur, tracer la courbe  $\langle i_c \rangle = f(\theta)$ .
2. On considère le circuit utilisé au paragraphe 2.5. (commande MLI) et sa commande.
  - 2.1. Quelle est la fréquence  $f$  de la commande de  $\alpha$  ?
  - 2.2. Exprimer la valeur maximum de  $\langle u_c \rangle$  en fonction de  $E$  et  $\alpha_{\max}$ .
  - 2.3. Si l'on considère  $\langle u_c \rangle$  comme sinusoïdal, quelle est sa valeur efficace ?
  - 2.4. Quelle est l'impédance du montage à la fréquence  $f$  ?
  - 2.5. Si l'on considère  $i_c(t)$  comme sinusoïdal, quelle est sa valeur crête ?