

# *Les convertisseurs alternatif/continu*

## *Les montages redresseurs*

### Sommaire

<b>1. Redressement monophasé :</b>	<b>1</b>
1.1. Redressement par diode sur charge résistive	1
1.2. redressement par thyristor sur charge résistive	2
1.3. redressement par thyristor sur charge inductive	4
<b>2. Les ponts de redressement en monophasé :</b>	<b>5</b>
2.1. Pont à diodes sur charge résistive (figure 5.a):	5
2.2. Pont mixte symétrique (figure 6.a) :	6
2.3. Pont tous thyristors (figure 7.a) :	8
2.4. Montage P2 à diodes (figure 8.a) :	10
<b>3. Redressement d'une source triphasé :</b>	<b>13</b>
3.1. Redresseur à diodes simple (P3) :	13
3.2. Redresseur simple à thyristors (P3) :	22
3.3. Pont tous thyristors (Pont Graëtz) :	25
3.4. Le pont mixte symétrique :	29
3.5. Les montages à commutation série (pont S3) :	31
<b>4. Déclenchement du thyristor :</b>	<b>34</b>
<b>5. Exemple de commande des thyristors ( en "arccosinus"):</b>	<b>37</b>

Les redresseurs permettent de convertir une alimentation alternative en continue. La tension et la puissance de sortie peuvent être contrôlées par les composants de puissance utilisés (Thyristors).

### **1. Redressement monophasé :**

L'entrée est une tension alternative monophasée. Les circuits avec des diodes fournissent des tensions continues constantes, ceux avec les thyristors ou autre composant commandé donnent des tensions continues de valeurs moyennes variables.

#### **1.1. Redressement par diode sur charge résistive**

La tension d'alimentation est :

$$v = v_m \sin(\omega t)$$

pour  $0 < \omega t < \pi$  : D est conductrice

$$v_c = v, \quad i_c = \frac{v_c}{R}$$

ic et vc ont la même forme.

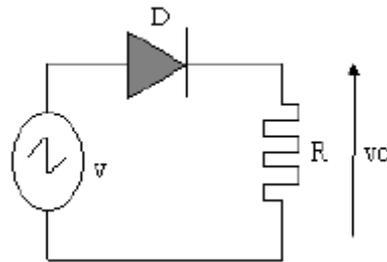


Figure 1.a

• pour  $\pi < \omega t < 2\pi$  : D bloqué à  $\omega t = \pi$ , car le courant s'annule  
donc :  $v_c = 0$  et  $i_c = 0$

La valeur moyenne de la tension  $v_c$  est :

$$v_c = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} v.d(\omega t)$$

$$v_c = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \cdot \sin(\omega t).d(\omega t)$$

$$v_c = \frac{V_m}{\pi} \quad \text{et} \quad I_c = \frac{I_m}{\pi} \quad \text{avec} \quad I = \frac{V_m}{R}$$

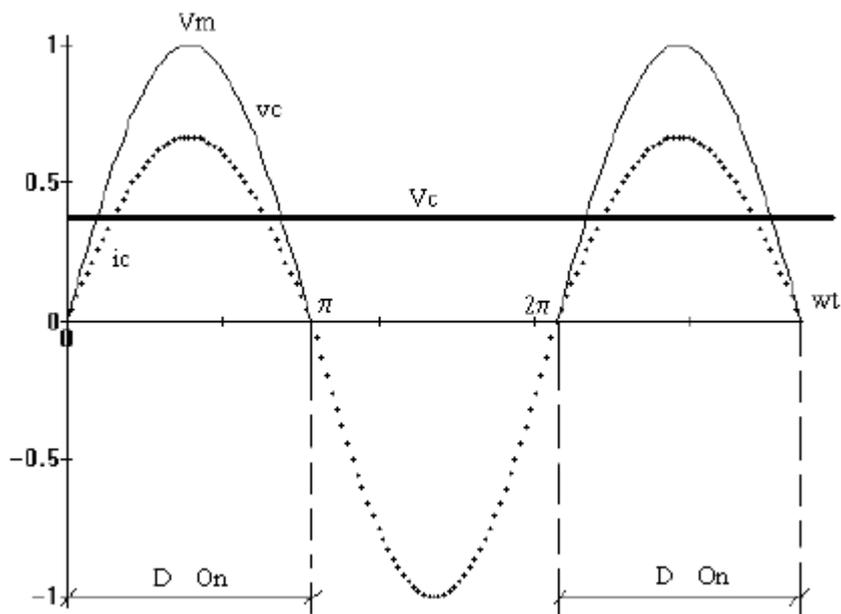


Figure 1.b

## 1.2. redressement par thyristor sur charge résistive

On amorce le thyristor à  $\omega t = \psi$  :

donc conduction du thyristor jusqu'à  $\pi$  où le courant s'annule (charge résistive).  
 L'amorçage suivant s'effectue à  $2\pi + \psi$ .

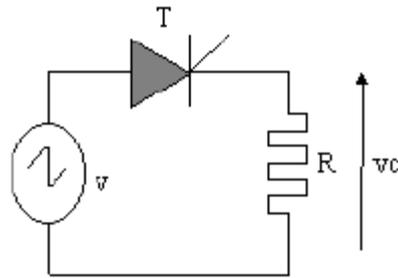


Figure 2.a

$$v_c = \frac{1}{2\pi} \int_{\psi}^{\pi} V_m \cdot \sin(\omega t) \cdot d(\omega t)$$

$$v_c = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \psi)$$

pour  $\psi = 0 \Rightarrow v_c = \frac{V_m}{\pi}$

pour  $\psi = \pi \Rightarrow v_c = 0$

Donc, en variant  $\psi$  de 0 à  $\pi$ , on peut varier la tension de sortie  $v_c$  de  $V_m/\pi$  à 0.

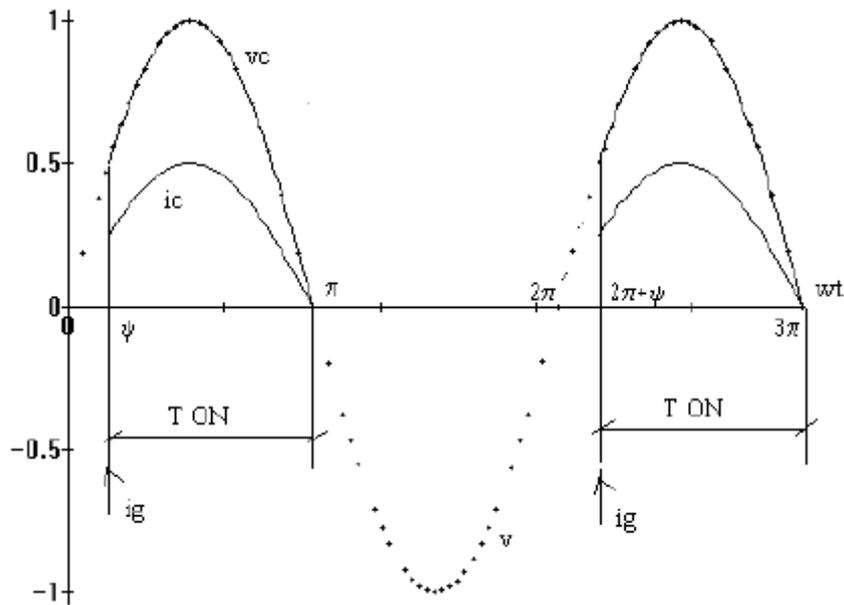


Figure 2.b

### 1.3. redressement par thyristor sur charge inductive

On amorce le thyristor à  $\omega t = \psi$  :

Donc conduction du thyristor jusqu'à  $\theta$  (instant de blocage) où le courant s'annule.

Donc sur une période  $2\pi$ , la conduction est de  $\psi$  à  $\theta$ , avec :

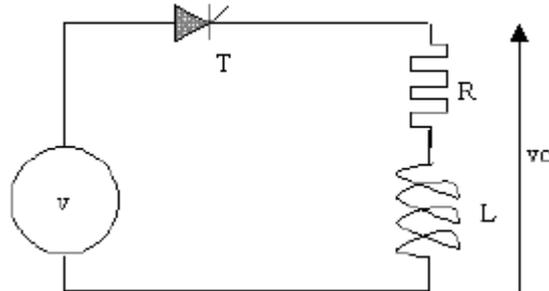


Figure 3.a

$$v_c = v = V_m \sin \omega t$$

$$i_c(t) = \frac{V_m}{|Z|} \left\{ \sin \varphi \cdot e^{-\frac{R}{L}t} + \sin(\omega t - \varphi) \right\}$$

$$\dot{\text{à}} \omega t = \theta, i_c(t) = 0, \quad t = \frac{\theta}{\omega}$$

$$\Rightarrow 0 = \frac{V_m}{|Z|} \left\{ \sin \varphi \cdot e^{-\frac{R}{L} \frac{\theta}{\omega}} + \sin(\theta - \varphi) \right\}$$

d'où l'angle  $\theta$

On présente les courbes de  $v_c$  et de  $i_c$  dans la figure 3.b.

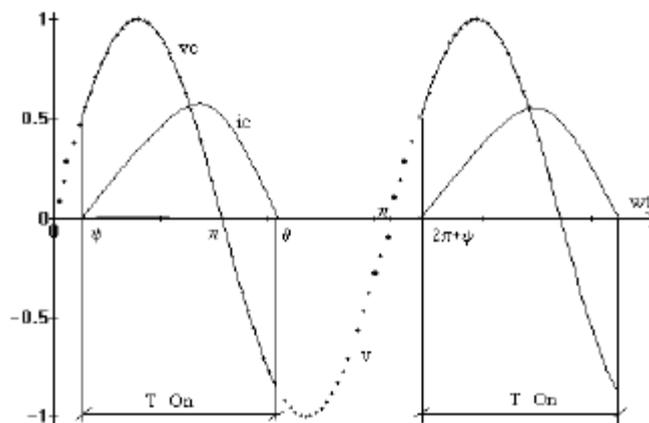


Figure 3.b

## 2. Les ponts de redressement en monophasé :

On peut les représenter par le schéma global de la figure 4 où nous remplaçons les interrupteurs statiques par des interrupteurs mécaniques. Trois cas pratiques existent :

1. Tous les interrupteurs sont des diodes.
2. Tous les interrupteurs sont des thyristors.
3. Pont mixte symétrique ( $k1$  et  $k3$  sont des thyristors /  $k2$  et  $k4$  sont des diodes).

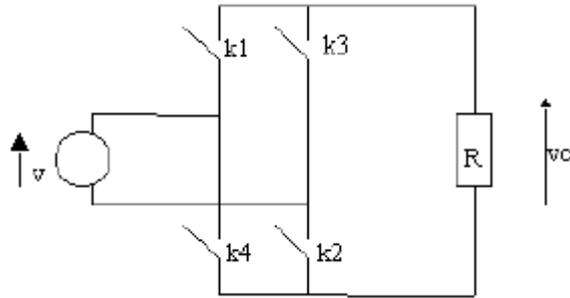


Figure 4

### 2.1. Pont à diodes sur charge résistive (figure 5.a):

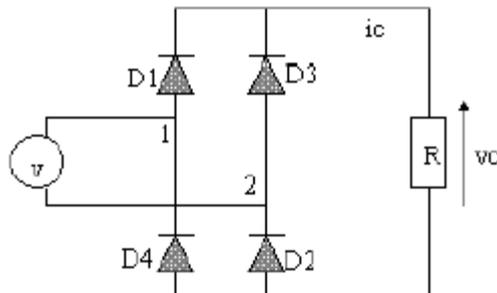


Figure 5.a

De  $0$  à  $\pi$  : (voir figure 5.b)  $D1$  et  $D2$  sont conductrices car la polarité de la borne 1 est positive et de 2 est négative, d'où  $v_c = v$

de  $\pi$  à  $2\pi$  : La polarité de la borne 1 devient négative et la polarité de la borne 2 devient positive, donc  $D3$  et  $D4$  conduisent et  $D1$  et  $D2$  se bloquent, d'où  $v_c = -v$

On remarque que le taux d'ondulation s'améliore : le nombre d'alternance par période = 2 par rapport à 1 dans le cas d'un redressement par une diode, donc:

- La tension est plus proche du continu
- Pas de problème de discontinuité dans le cas des charges inductives (le courant est

toujours  $\geq 0$  continu)

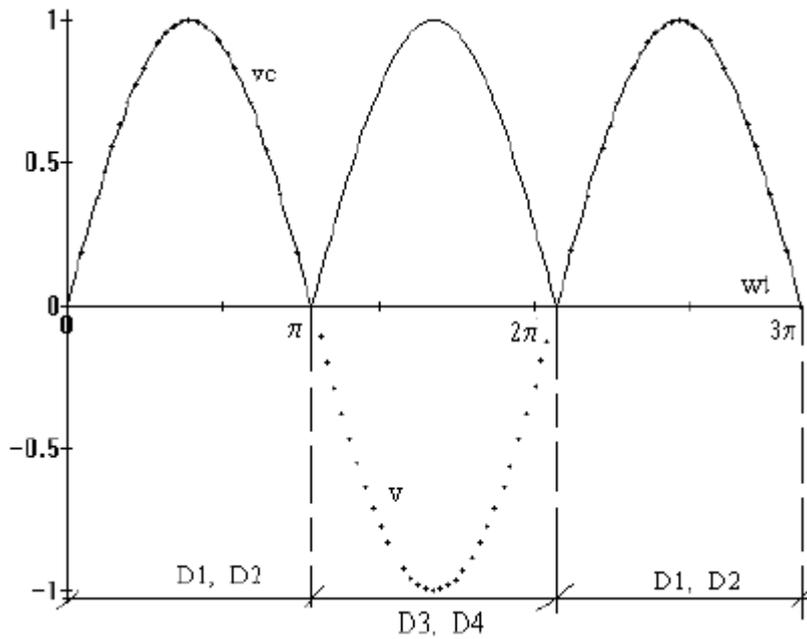


Figure 5.b

## 2.2. Pont mixte symétrique (figure 6.a) :

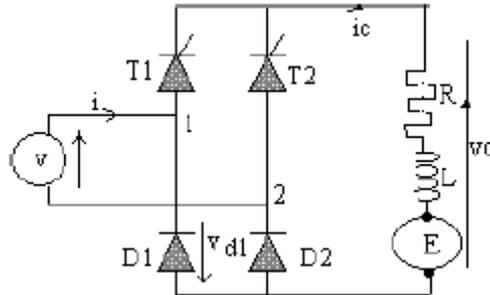


Figure 6.a

Ce pont est utilisé pour le contrôle de vitesse des machines à courant continu.

- Les thyristors T1 et T2 sont déclenchés respectivement à  $\psi$  et  $\pi + \psi$ .
- D1 conduit à  $\pi$  et à  $2\pi$  car la polarité de la borne 1 est négative, D2 conduit à 0 et à  $2\pi$ . car la polarité de la borne 2 est négative

Les séquences d'amorçage sont (voir figure 6.b):

De 0 à  $\psi$  : D2 et T2 conducteurs (fonctionnement en roue libre)

d'où :  $i = 0$ ,

$$i_{T1} = i_{D1} = i_C$$

De  $\psi$  à  $\pi$  : D2 et T1 conducteurs

$$i = i_C$$

$$v_C = v$$

De  $\pi$  à  $\pi+\psi$  : D1 et T1 conducteurs (fonctionnement en roue libre)

$$i = 0$$

$$v_C = 0$$

De  $\pi+\psi$  à  $2\pi$  : D1 et T2 conducteurs

$$i = -i_C$$

$$v_C = -v$$

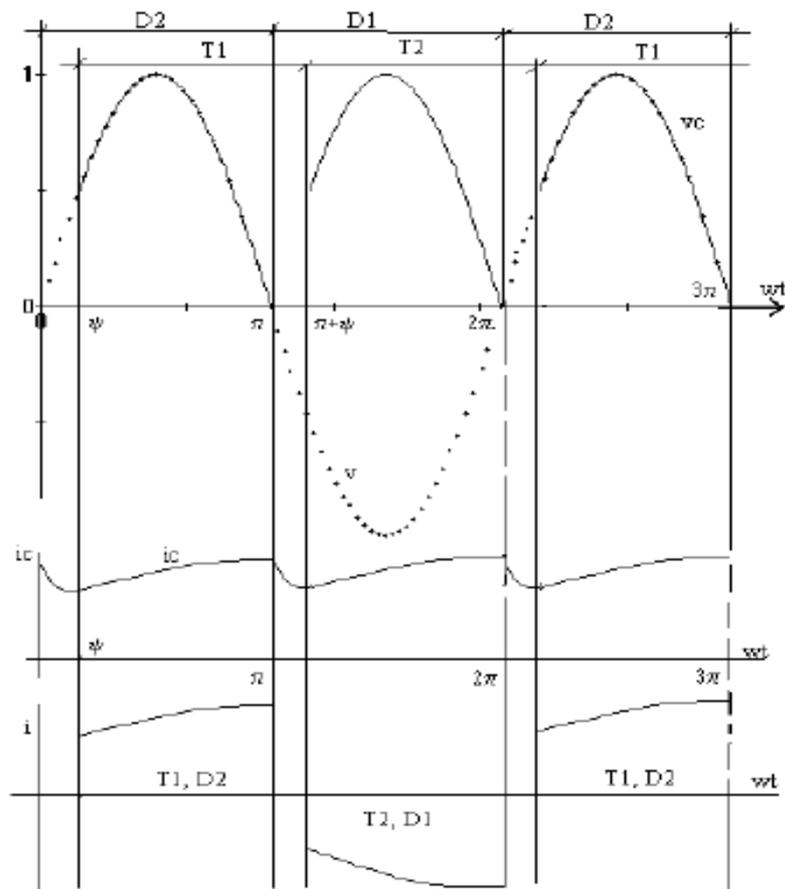


Figure 6.b

**Valeur moyenne de  $v_C$  :**

$$V_c = \frac{2}{2\pi} \int_{\psi}^{\pi} V_m \cdot \sin \omega t \cdot d(\omega t)$$

$$V_c = -\frac{V_m}{\pi} (\cos \omega t) \Big|_{\psi}^{\pi} = -\frac{V_m}{\pi} (-1 - \cos \psi)$$

$$V_c = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \psi)$$

Donc, pour  $\psi$  variant de 0 à  $\pi$ ,  $V_c$  varie de  $V_m/\pi$  à zéro.

Note : à  $\omega t = \pi$ ,  $v=0$  et tend de devenir négative, d'où  $v_{D1} > 0$  et  $v_{D2} < 0$  donc D1 est «ON» et D2 est « OFF ».

### 2.3. Pont tous thyristors (figure 7.a) :

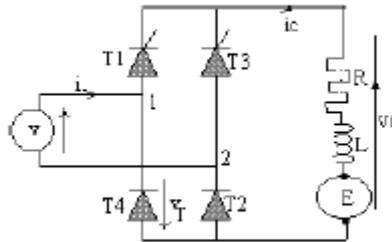


Figure 7.a

Ce montage est utilisé pour alimenter les machines à courant continu (DC). Il permet la récupération de l'énergie électrique en cas de fonctionnement de la machine en mode génératrice. C'est à dire le transfert de l'énergie s'effectue de la machine vers le réseau.

- Figure 7.b donne les courbes  $i_C(t)$  et  $v_C(t)$  pour  $\psi = 30$  deg.
- Figure 7.c donne les mêmes courbes pour  $\psi = 120$  deg.

Dans les 2 cas :

$$V_c = 2 \cdot \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{\psi}^{\pi+\psi} V_m \cdot \sin \omega t \cdot d(\omega t) \right]$$

$$V_c = \frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\pi+\psi} V_m \cdot \sin \omega t \cdot d(\omega t)$$

$$V_c = \frac{2V_m}{\pi} (\cos \psi)$$

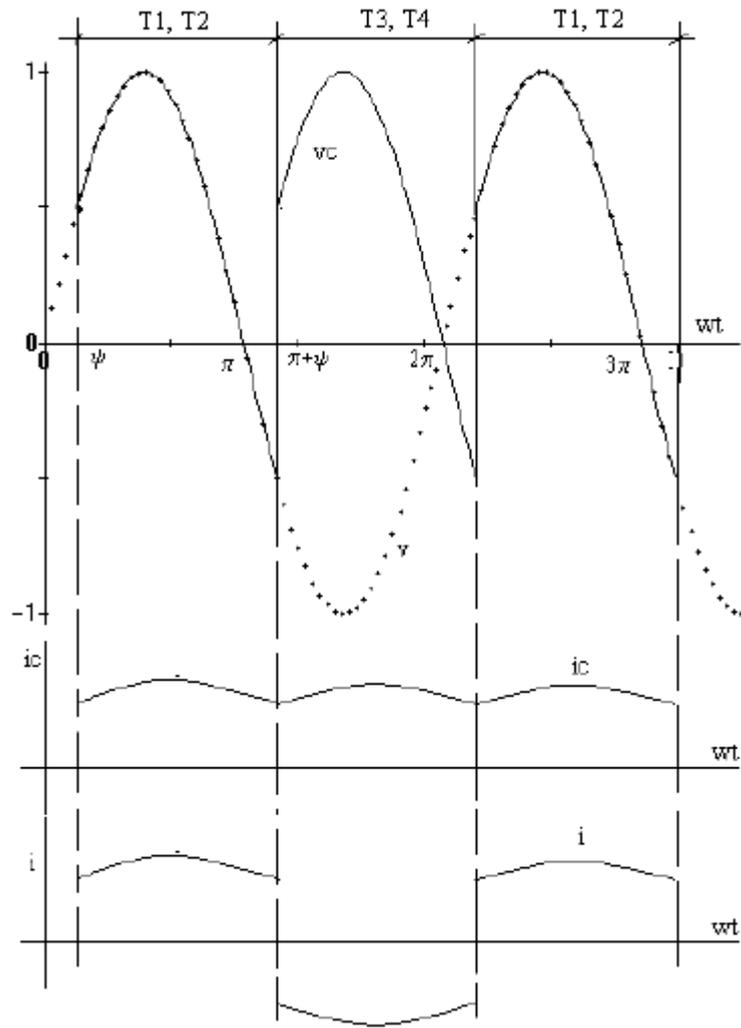


figure 7.  $\psi = \pi/6$

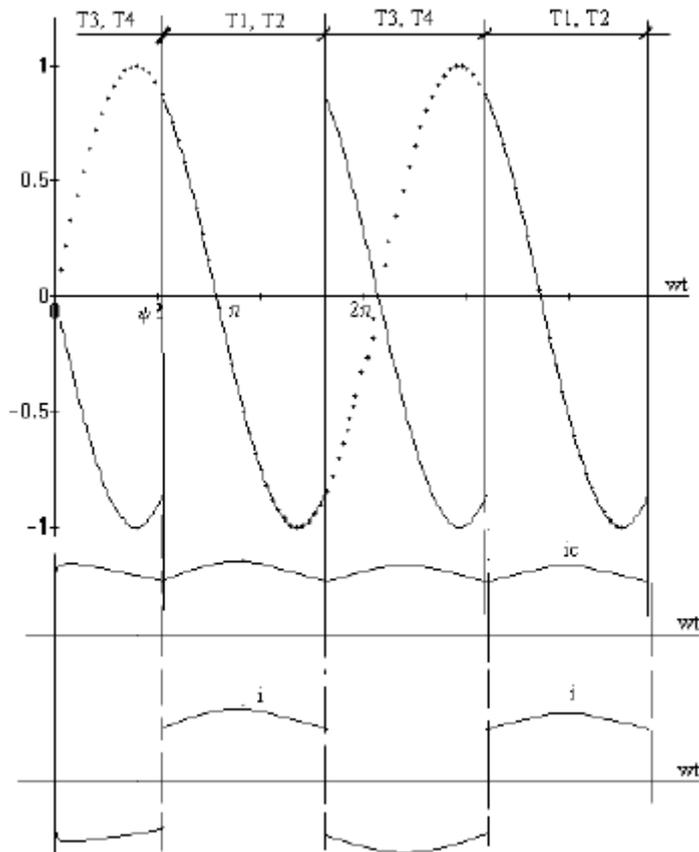


figure 7.c  $\psi=2\pi/3$

Nous remarquons que :

- pour  $0 < \psi < \pi/2$  :  $v_C$  est positive
- pour  $\pi/2 < \psi < \pi$  :  $v_C$  est négative

Le courant moyen à la sortie du redresseur  $I_c$  est toujours positif, donc si  $V_c < 0$  on obtient une puissance  $V_c I_c < 0$ , ce qui veut dire que la puissance passe de la machine à la source : Inversion de l'opération.

Ce mode est utilisé pour la récupération. Dans ce cas, il faut inverser la f.c.e.m.  $E$  de la machine en inversant le courant d'excitation  $I_{ex}$  de telle sorte que la machine se comporte comme une génératrice.

Donc pour  $\psi > \pi/2$ , la tension de sortie  $V_c$  devient négative. On appelle le convertisseur dans ce cas par « **Onduleur non autonome** » car la fréquence de sortie de l'onduleur est fixée par le réseau.

#### 2.4. Montage P2 à diodes (figure 8.a) :

L'alimentation du convertisseur n'est pas directe mais par un transformateur

monophasé à point milieu au secondaire.

$v_1$  et  $v_2$  sont 2 tensions égales déphasées de  $\pi$ . On les redresse avec les diodes D1 et D2 :

$$v_1 = V_m \sin \omega t$$

$$v_2 = -v_1 = -V_m \sin \omega t$$

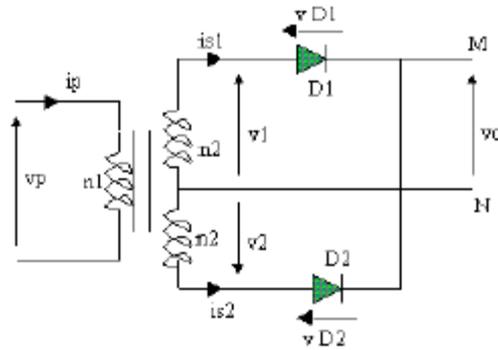


Figure 8.a

**(a) Pour  $0 \leq \omega t \leq \pi$  (voir figure 8.b):**

$$v_1 > 0 \text{ et } v_2 < 0 ,$$

donc D1 conduit et D2 bloquée,

$$\text{d'où : } v_C = v_1, \text{ et } v_{D1} = 0$$

$$v_{D2} = v_2 - v_1 = -2 V_m \sin \omega t$$

$$i_{S1} = i_C , \text{ et } i_{S2} = 0.$$

**(a) Pour  $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$  :**

$$v_1 < 0 \text{ et } v_2 > 0 ,$$

donc D2 conduit et D1 bloquée,

$$\text{d'où : } v_C = v_2, \text{ et } v_{D2} = 0$$

$$v_{D1} = v_1 - v_2 = -2 V_m \sin \omega t$$

$$i_{S2} = i_C , \text{ et } i_{S1} = 0.$$

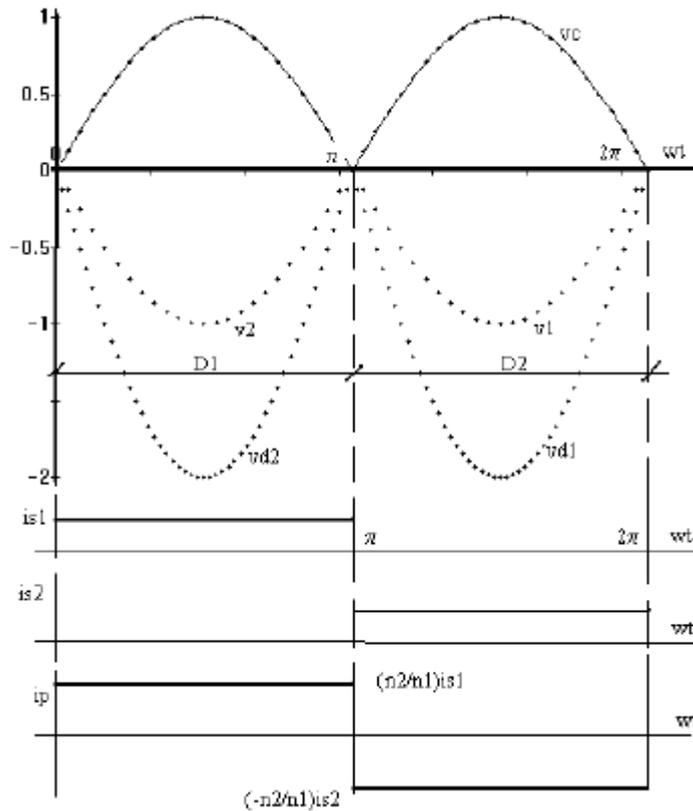


figure 8.b

**(c) Calcul de la valeur moyenne de vC (Vc):**

$$V_c = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t)$$

$$V_c = -\frac{V_m}{\pi} [\cos \omega t]_0^{\pi} = -\frac{V_m}{\pi} (-1-1) \Rightarrow V_c = \frac{2V_m}{\pi}$$

**(d) Facteur d'ondulation :**

$$K_0 = \frac{V_c \max - V_c \min}{2.V_c} \Rightarrow K_0 = \frac{V_m - 0}{4 \cdot \frac{2V_m}{\pi}} \Rightarrow K_0 = \frac{\pi}{4}$$

Si le montage débite un courant continu iC peu ondulé (constant) = Ic, donc chaque diode assure le passage de iC pendant  $\pi$  (voir les courbes de la figure 8).

Au primaire, nous avons :  $n_1 \cdot i_p = n_2 \cdot i_{s1} - n_2 \cdot i_{s2}$

- si D1 conductrice et D2 bloquée, donc :  $i_p = (n_2/n_1) \cdot i_{s1} = a \cdot i_{s1}$
- si D1 bloquée et D2 conductrice, donc :  $i_p = -(n_2/n_1) \cdot i_{s2} = -a \cdot i_{s2}$

où  $a = n_2/n_1$  est le rapport de transformation du transformateur.

Donc,  $i_p$  courant alternatif non sinusoïdal.

**(e.1) Courants dans les diodes (exemple : diode D1) :**

$$i_{\max} = I_c$$

$$i_{\text{moy}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_c \cdot d(\omega t) = \frac{I_c}{2\pi} [\omega t]_0^{\pi} = \frac{I_c}{2}$$

$$i_{D1} = i_{D2} \Rightarrow I_{D1}(\text{eff}) = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i_{D1}^2 \cdot d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_c^2 \cdot d(\omega t)} = \frac{I_c}{\sqrt{2}}$$

### (e.2) Courant et facteur de puissance secondaire :

- Courant secondaire :  $i_{s1} = i_{D1} = I_c / \sqrt{2}$
- Puissance de la charge :  $P_c = V_c \cdot I_c = (2 \cdot V_m / \pi) / I_c$
- Puissance apparente secondaire :  $S = 2 \cdot V \cdot I_s = 2 \cdot (V_m / \sqrt{2}) \cdot (I_c / \sqrt{2}) = V_m \cdot I_c$

$$\text{Facteur de puissance : } f_s = \frac{P_c}{S} = \frac{2 \frac{V_m \cdot I_c}{\pi}}{V_m \cdot I_c} = \frac{2}{\pi} = 0.636$$

### (e.3) Courant et facteur de puissance primaire :

- Courant efficace primaire  $I_p = (n_2/n_1) \cdot I_c$ , Tension efficace primaire

$$V_p = (n_1/n_2) \cdot V$$

V est la tension efficace secondaire

- Facteur de puissance primaire

$$f_p = \frac{P_c}{S_p} = \frac{V_c \cdot I_c}{V_p \cdot I_p} = \frac{2 \frac{V_m \cdot I_c}{\pi}}{V \cdot I_c} = \frac{2 \frac{V_m \cdot I_c}{\pi}}{\frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot I_c} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0.9003$$

$S_p$  est la puissance apparente au primaire.

## 3. Redressement d'une source triphasé :

Pour des puissances plus élevées (quelques kW ou plus), on utilise du redressement sur des sources triphasées. Dans ce cas les tensions sont mieux redressées.

### 3.1. Redresseur à diodes simple (P3) :

C'est un circuit simple composé de 3 diodes et d'une charge. On va analyser le fonctionnement sur une charge résistive (figure 9).

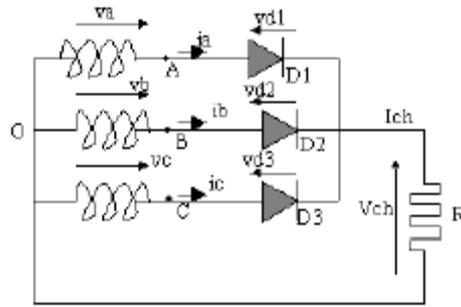


Figure 9.a

Nous avons une source triphasée, les tensions d'alimentation sont :

$$v_a = V_m \sin \omega t$$

$$v_b = V_m \sin (\omega t - 2\pi/3)$$

$$v_c = V_m \sin (\omega t - 4\pi/3)$$

- De  $0$  à  $\pi/6$  :  $v_c > v_a$  et  $v_c > v_b$ , donc D3 est conductrice, D1 et D2 sont bloquées.
- De  $\pi/6$  à  $5\pi/6$  :  $v_a > v_b$  et  $v_a > v_c$ , donc D1 est conductrice, D2 et D3 sont bloquées.
- De  $5\pi/6$  à  $3\pi/2$  :  $v_b > v_a$  et  $v_b > v_c$ , donc D2 est conductrice, D1 et D3 sont bloquées.
- De  $3\pi/2$  à  $2\pi + \pi/6$  :  $v_c > v_a$  et  $v_c > v_b$ , donc D3 est conductrice, D1 et D2 sont bloquées.

Et la séquence se répète pour la période suivante.

Donc, nous avons à partir de  $\theta = \pi/6$  qu'on appelle **l'angle d'amorçage naturel**, la séquence d'amorçage suivante : D1, D2, D3, D1, ..etc.

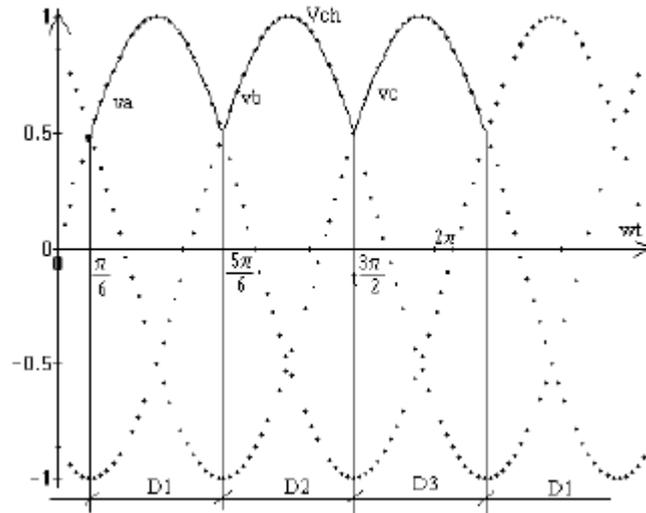


Figure 9.b

Sur une période ( $\pi/6$  à  $2\pi + \pi/6$ ), nous avons des intervalles de conduction de  $2\pi/3$ .

A titre d'exemple : pendant la conduction de D1 :

$$v_{D1} = 0,$$

$$v_{D2} = (v_b - v_a) < 0,$$

$$v_{D3} = (v_c - v_a) < 0,$$

**(a) tension redressée :**

$v_C$  est la tension redressée instantanée figure 9.b. Elle est composée de 3 morceaux de sinusöide sur une période équivalent au nombre de phases  $q=3$ .

La valeur moyenne de  $v_C$  est :

$$V_{ch} = 3 \cdot \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} v_a \cdot d(wt) \right], \quad V_{ch} = 3 \cdot \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} V_m \cdot \sin wt \cdot d(wt) \right]$$

$$V_{ch} = \frac{3}{2\pi} V_m \cdot \left[ -\cos wt \right]_{\pi/6}^{5\pi/6}, \quad V_{ch} = -\frac{3}{2\pi} V_m \cdot \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$V_{ch} = -\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m$$

$$\text{mais } V_m = \sqrt{2} V$$

$$\text{d'où } V_{ch} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} V$$

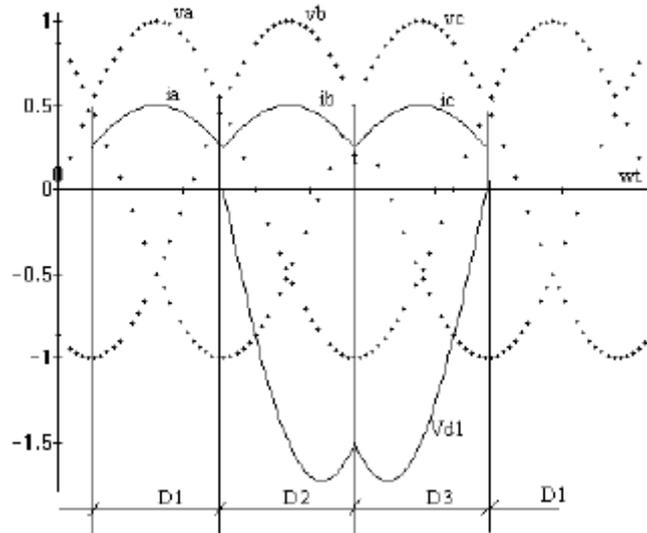


Figure 9.c

**(b) Courant redressé (figure 9.c):**

Valeur moyenne :

$$I_c = \frac{V_c}{R} = \frac{V \cdot 3\sqrt{6}}{R \cdot 2\pi}$$

**(c) Courant dans une phase (exemple: phase A) :**

de  $\pi/6$  à  $5\pi/6$  : D1 est conductrice d'où  $i_a = v_a/R$

de  $5\pi/6$  à  $2\pi + \pi/6$  : D1 est bloquée d'où  $i_a = 0$

**(d) Tension inverse aux bornes d'une diode (exemple D1 : vD1) :**

Voir figure 9.c .

- de  $\pi/6$  à  $5\pi/6$ : D1 est conductrice,  $v_{D1} = 0$ .
- de  $5\pi/6$  à  $3\pi/2$ : D2 est conductrice,  $v_{D1} = v_a - v_b$  ( maille OASBO )..
- de  $3\pi/2$  à  $2\pi + \pi/6$ : D3 est conductrice,  $v_{D1} = v_a - v_c$  ( maille OASCO )..

On remarque que la valeur maximale de la tension aux bornes d'une diode est :

$$v_{D1} (\max) = \sqrt{3} \cdot V_m$$

**(e) Courants et facteur de puissance au primaire :**

La forme et la valeur d'un courant primaire dépend du type de connexion des phases primaires du transformateur; deux cas se présentent :

- Primaire en triangle,
- Primaire en étoile sans neutre.

**(e.1) Relation des Ampères-tours dans le transformateur triphasé :**

On suppose les enroulements réalisés dans le même sens pour les trois noyau (figure 10)  
 Si les A.T secondaires de chaque noyau n'ont pas une somme nulle, la valeur moyenne de cette somme ne peut être compensée.

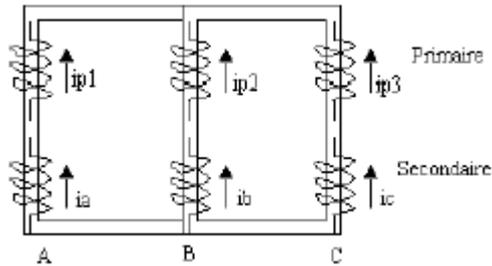


Figure 10

• **Enroulements primaires couplés en triangle (figure 11):**

On peut écrire, la compensation des A.T. sur chaque noyau (comme en monophasé)  
 est :

$$n1.ip1 = n2.ia, n1.ip2 = n2.ib, n1.ip3 = n2.ic,$$

Les courants en ligne sont :

$$jp1 = ip1 - ip2, jp2 = ip2 - ip3, jp3 = ip3 - ip1$$

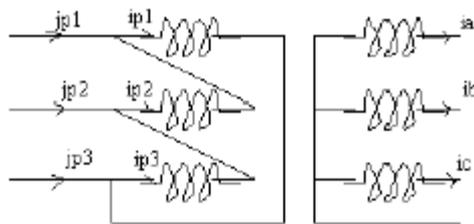


Figure 11

• **Enroulements primaires couplés en étoile sans neutre (figure 12):**

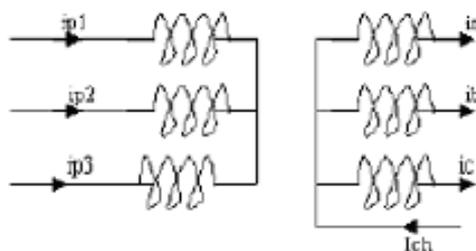


Figure 12

Les 3 courants primaires ont forcément une somme nulle (pas de composant homo polaire)  $i_{p0}$  :

$$i_{p0} = 1/3 (i_{p1} + i_{p2} + i_{p3}) = 0$$

Au secondaire les A.T. ont une composante homo polaire (car le couplage primaire ne s'oppose pas à la compensation des A.T. alternatifs par noyau) :

$$ATH0 \text{ (secondaire)} = 1/3 (n2.i_a + n2.i_b + n2.i_c)$$

Celle-ci ne peut être compensée par les A.T. primaires. Ainsi pour le noyau A :

$$n1.i_{p1} = n2.i_a - 1/3 (n2.i_a + n2.i_b + n2.i_c)$$

$$\Rightarrow n1.i_{p1} = 2/3 n2.i_a - 1/3 (n2.i_b + n2.i_c)$$

• **Application au redresseur P3 (figure 13):**

$n2.i_a = n2.I_c$  pendant le tiers de période où D1 conduit,

$n2.i_a = 0$  pendant le reste de la période.

Donc :

Si D1 conductrice :  $n1.i_{p1} = 2/3 n2.i_a = 2/3 n2.I_c$

Si D2 conductrice :  $n1.i_{p1} = -1/3 n2.i_b = -1/3 n2.I_c$

Si D3 conductrice :  $n1.i_{p1} = -1/3 n2.i_c = -1/3 n2.I_c$

D'où les courbes de la figure 13.

**Courant efficace primaire:**

$$I_p = \frac{\sqrt{2} n2 I_c}{3 n1}$$

**Facteur de puissance primaire:**

$$f_p = \frac{V_c I_c}{3 V_p I_p}$$

$$f_p = \frac{\frac{3 V_m \sqrt{3} I_c}{\pi c}}{3 \frac{n1 V_m \sqrt{2} n2 I_c}{n2 \sqrt{2} 3 n1}}$$

$$f_p = 0.827$$

**Si le primaire est en triangle :**

Les courants en ligne :  $J_p = \frac{n2}{n1} I_c \sqrt{\frac{2}{3}}$

Le facteur de puissance en ligne :  $f_L = \frac{V_c I_c}{\sqrt{3} V_p I_p} \quad f_L = f_p = 0.827$

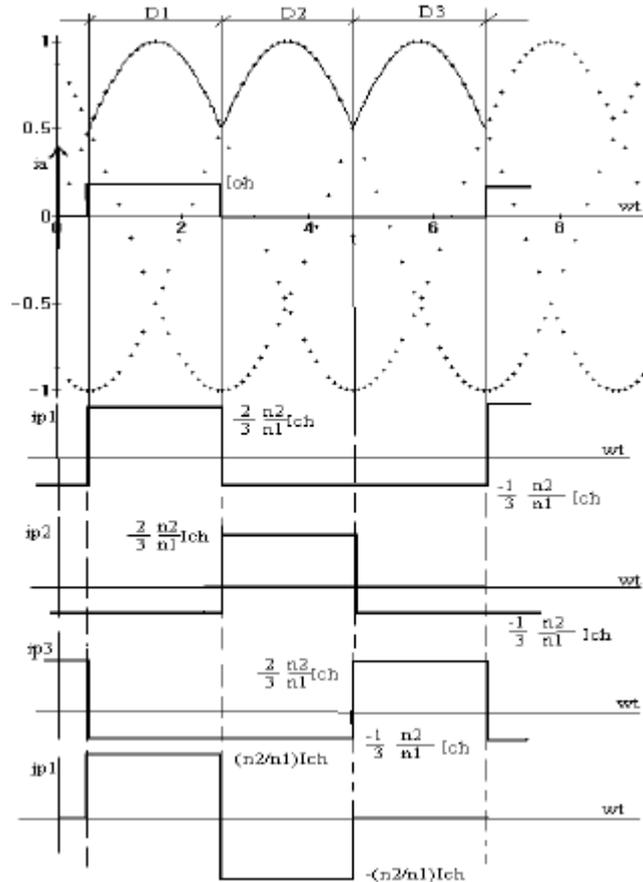


figure 13

**(f) Chute de tension en fonctionnement normal :**

Les impédances des éléments du montage redresseur et celle de son réseau d'alimentation provoquant la réduction de la tension redressée moyenne  $U_c$  au fur et à mesure que le courant continu  $I_c$  augmente.

La chute de tension totale est obtenue en additionnant :

- la chute due aux réactances du transformateur (empiétement)  $\Delta 1 U_c$
- la chute due aux résistances du transformateur  $\Delta 2 U_c$
- la chute due aux diodes ( ou due aux autres composants)  $\Delta 3 U_c$

$$\Delta U_c = \Delta 1 U_c + \Delta 2 U_c + \Delta 3 U_c$$

$$\text{et } U_c = U_{c0} - \Delta U_c$$

où  $U_{c0}$  est la tension de sortie à vide

**(f.1) Chute de tension due à empiétement ( $\Delta 1 U_c$ ) - figure 14:**

Lorsqu'une diode entre en conduction, elle débite simultanément de celle-ci et de celle qui va se bloquer. Cet empiétement des intervalles passants entraîne une

diminution  $\Delta U_c$  de la tension redressée moyenne. Exemple : L'empiétement des diodes D1 et D2 dans le montage redresseur triphasé simple P3 .

Quand D1 est seule conductrice

$i_a = I_c = \text{Constant}$ .

à  $t = \pi/2$  :  $v_2$  devient plus grand que  $v_1$ , donc D2 devient passant, et débit simultanément de D1 et D2 jusqu'à ce que  $i_a$  passe de  $I_c$  à zéro et  $i_b$  passe de zéro à  $I_c$ .

Pendant le débit simultané de D1 et D2, on a :

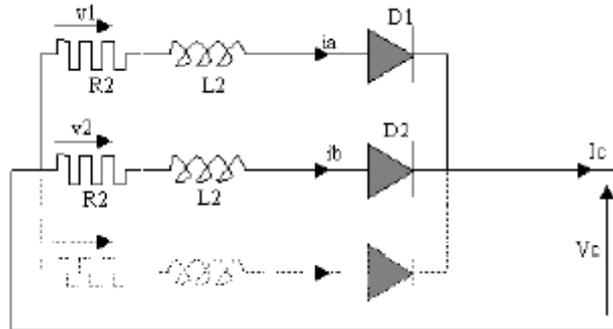


figure 14

$$u_c = v_1 - L_2 \frac{di_a}{dt} = v_2 - L_2 \frac{di_b}{dt}$$

Puisque  $i_a + i_b = I_c = \text{Const}$ .

$$\Rightarrow \frac{di_a}{dt} + \frac{di_b}{dt} = 0 \Rightarrow u_c = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

$$\Rightarrow \frac{v_1 + v_2}{2} = v_2 - L_2 \frac{di_b}{dt} \Rightarrow \frac{di_b}{dt} = \frac{v_2 - v_1}{2L_2}$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{Vm}{2L_2} [\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \sin(\omega t)]$$

$$\frac{di_b}{dt} = -\frac{Vm}{L_2} \cdot \sin(\frac{\pi}{3}) \cdot \cos(\omega t - \frac{\pi}{3})$$

$$\Rightarrow i_b = -\frac{Vm}{L_2 \omega} \cdot \sin(\frac{\pi}{3}) \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{3}) + Cte$$

Pour  $\omega t = 5\pi/6$  :  $i_b = 0$ , d'où on déduit le constant de l'équation précédente (Cte).

Finalement :

$$i_b = -\frac{Vm}{L_2 \omega} \cdot \sin(\frac{\pi}{3}) \cdot [1 - \sin(\omega t - \frac{\pi}{3})]$$

Pour obtenir la valeur de l'angle  $\alpha$  d'empiétement, on note que lorsque

$\omega t = 5\pi/6 + \alpha$  :  $i_b$  atteint la valeur  $I_c$ ,

donc :

$$1 - \cos \alpha = \frac{L_2 \omega I_c}{V_m \cdot \sin \frac{\pi}{3}}$$

**Chute de tension moyenne :**

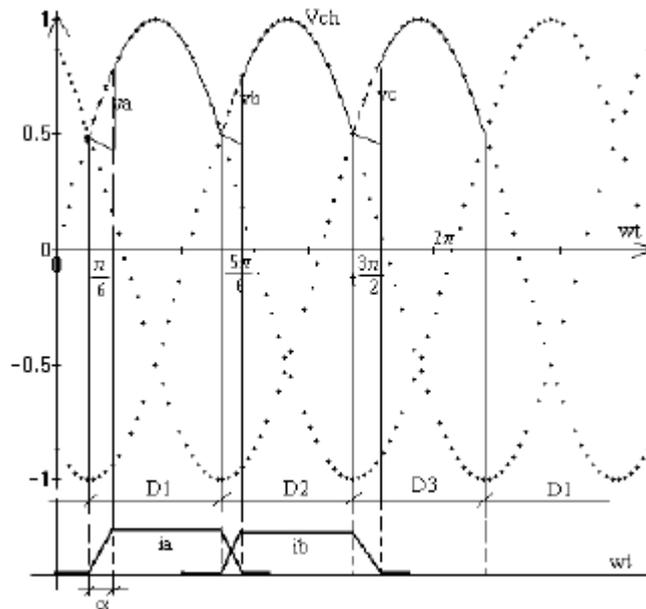
$$\Delta_1 U_c = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} (v_2 - \frac{v_1 + v_2}{2}) \cdot d\omega t$$

$$\Delta_1 U_c = \frac{3}{2\pi} V_m \cdot \sin \frac{\pi}{3} (1 - \cos \alpha)$$

$$\Delta_1 U_c = \frac{3}{2\pi} L_2 \omega I_c$$

En général pour q phases :

$$\Delta_1 U_c = \frac{q}{2\pi} L_2 \omega I_c$$



**(f.2) Chute de tension due aux résistances ( $\Delta_2 U_c$ ):**

La diminution de la tension redressée due aux résistances  $\Delta_2 U_c$  peut se déduire de l'expression des pertes Joule :  $P_j = R_c I_c^2$ , où  $R_c$  est la résistance totale du montage ramenée du côté continu :

$$\Delta_2 U_c = R_c I_c = \frac{P_j}{I_c}$$

$$P_j = q_2 r_2 I_s^2 + q_1 r_1 I_p^2 + q_1 r_1' J_p^2$$

$q_2$  et  $q_1$  : nombre de phases au secondaire et au primaire,

$r_2$ ,  $r_1$  et  $r_1'$  : Résistance par phase du secondaire, du primaire et du réseau amont,

$I_s$ ,  $I_p$  et  $J_p$  : Intensités efficaces correspondantes.

**(f.3) Chute de tension due aux diodes  $\Delta 3U_c$  :**

C'est la chute de tension directe pour un courant  $I_c$ . Elle est lue sur les fiches caractéristiques des diodes utilisés et fournis par le fabricant.

**3.2. Redresseur simple à thyristors (P3) :**

**(a) Charge résistive R :**

C'est un circuit simple composé de 3 thyristors et d'une charge. On va analyser le fonctionnement sur une charge résistive (figure 15).

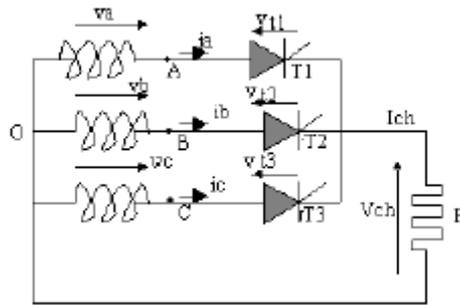


figure 15.a

Nous avons une source triphasée, les tensions d'alimentation sont :

$$v_a = V_m \sin \omega t$$

$$v_b = V_m \sin (\omega t - 2\pi/3)$$

$$v_c = V_m \sin (\omega t - 4\pi/3)$$

Si l'angle d'amorçage est  $\psi$  à partir de  $\theta = \pi/6$  qu'on appelle **l'angle d'amorçage naturel**, la séquence d'amorçage est la suivante : T1, T2, T3, T1, ..etc.

2 Cas se présentent :

1.  $\psi \leq \pi/6$  : conduction continu

2.  $\psi > \pi/6$  : conduction discontinu

**Exemple 1 : pour  $\psi = \pi/6$  , Conduction continue - figure (15.b)**

à  $\pi/6 + \psi$  On amorce T1 : donc T1 est conducteur,

à  $5\pi/6 + \psi$  On amorce T2 : donc T2 est conducteur,

à  $3\pi/2 + \psi$  On amorce T3 : donc T3 est conducteur,

Et la séquence se répète pour la période suivante.

Si on amorce Les thyristors dans la séquence : T1 à  $\pi/6$ , T2 à  $5\pi/6$ , T3 à  $3\pi/2$

c.a.d pour  $\psi = 0$ , le convertisseur se comporte comme le redresseur à diodes.

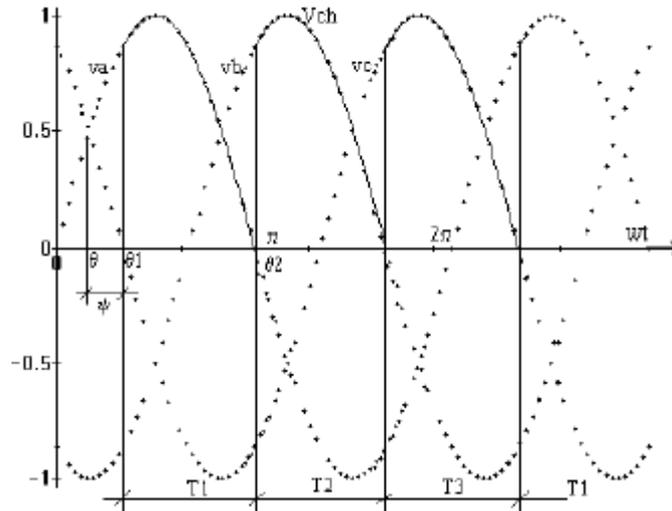


figure 15.b

**Exemple 2 :** pour  $\psi = \pi/3$  , Conduction discontinue - figure (15.c)

à  $\pi/6 + \psi$  On amorce T1 : donc T1 est conducteur,

mais à  $t = \pi$  : le courant dans le thyristor  $i_{T1} = v_0/R = v_a/R$  s'annule, donc T1 se bloque.

à  $5\pi/6 + \psi$  On amorce T2 : donc T2 est conducteur,

mais à  $t = 3\pi/2 + \pi/6 + \psi$  : le courant dans le thyristor  $i_{T2} = v_0/R = v_b/R$  s'annule, donc T2 se bloque

à  $3\pi/2 + \pi/\psi$  On amorce T3 : donc T2 est conducteur,

mais à  $t = 2\pi + \pi/3$  : le courant dans le thyristor  $i_{T3} = v_0/R = v_c/R$  s'annule, donc T3 se bloque

Et la séquence se répète pour la période suivante.

**Tension aux bornes d'un thyristor:**

A titre d'exemple : pendant la conduction de T1 :

$$v_{T1} = 0,$$

$$v_{T2} = (v_b - v_a) < 0,$$

$$v_{T3} = (v_c - v_a) < 0,$$

**Tension redressée de sortie Vc :**

$v_C$  est la tension redressée instantanée figures 15.b et 15.c. Elle est composée de 3 morceaux de sinusoïde sur une période équivalente au nombre de phases  $q=3$ .

Les morceaux de sinusoïdes sont symétriques, donc on peut calculer la valeur moyenne d'un morceau de sinusoïde, puis multiplier par 3.

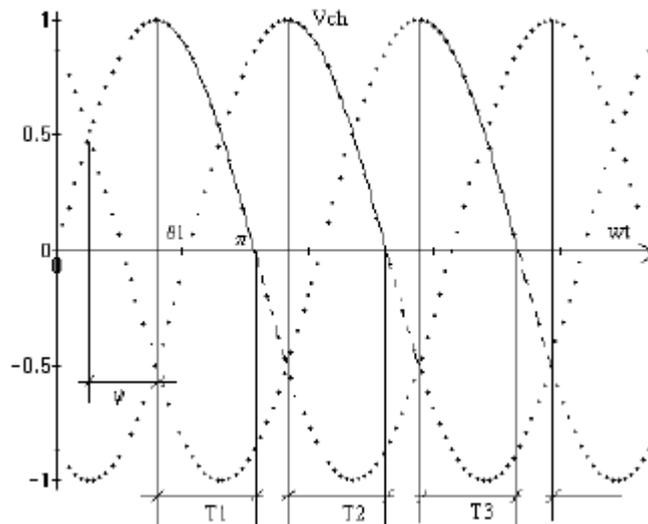


figure 15.c

Si T1 conduit à  $\theta_1$ , l'extinction dépend du type de conduction :

Si la conduction est continue le blocage de T1 est à

$$\theta_2 \leq \pi,$$

Si la conduction est discontinue le blocage de T1 est à

$$\theta_2 = \pi,$$

donc la valeur moyenne de vC est :

$$\text{Pour } \theta_2 \leq \pi \Rightarrow V_{ch} = 3 \cdot \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} v_a d(\omega t) \right]$$

$$\text{Pour } \theta_2 > \pi \Rightarrow V_{ch} = 3 \cdot \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{\theta_1}^{\pi} v_a d(\omega t) \right]$$

$$\text{pour } \theta_1 = \frac{\pi}{6} \text{ (c.a.d } \Psi = 0): V_{ch} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m$$

$$\text{pour } \theta_1 = \pi \text{ (c.a.d } \Psi = \frac{5\pi}{6}): V_{ch} = 0$$

Donc variation de la tension de sortie est de :

$$V_{ch} = 0 \text{ à } V_{ch} = (3\sqrt{3}/2\pi) \cdot V_m$$

Limites de l'angle d'amorçage :  $0 \leq \psi \leq 5\pi/6$

A noter finalement que le montage à diodes est un cas spécial du montage à thyristors avec  $\psi = 0$ .

(b) Charge inductive R+L :

Si on a une charge à forte inductance tel que le courant de sortie  $i_{ch}$  peut être considéré continu. Donc, on est en conduction continue. Les courbes de  $v_{ch}$  et de  $i_{ch}$

sont représentés dans la figure 16

pour  $\psi = \pi / 3$  :

$$V_{ch} = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} - \psi}^{\frac{\pi}{6} + \psi} v_a d(\omega t)$$

$$\text{avec } v_{a,b,c} = V_m \sin(\omega t),$$

$$\text{On obtient: } V_c = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos \Psi$$

$$\text{Pour } \psi = 0 \Rightarrow V_{ch} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m, \text{ Pour } \psi = \frac{\pi}{2} \Rightarrow V_{ch} = 0, \text{ Pour } \psi = \pi \Rightarrow V_{ch} = -\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m$$

Si la machine est une machine à courant continu, 2 modes sont possibles :

1. Fonctionnement en moteur pour  $0 < \psi < \pi/2$
2. Fonctionnement en génératrice (récupération d'énergie) pour  $\pi/2 < \psi < \pi$ .

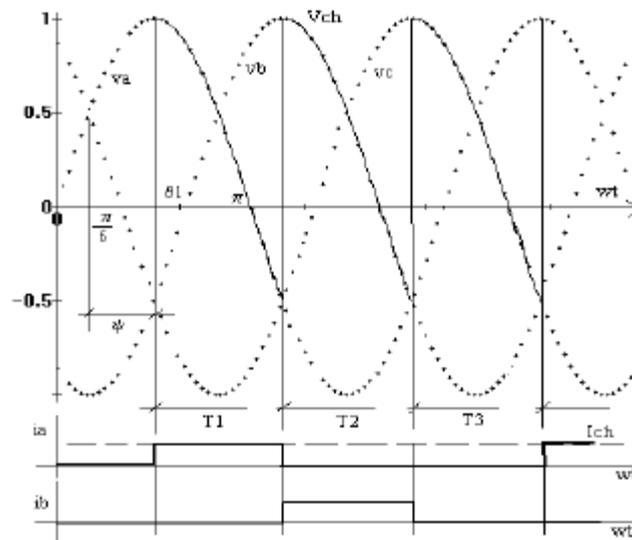


figure 16

### 3.3. Pont tous thyristors (Pont Graëtz) :

Ce pont est composé de 6 thyristors (figure 17.a). Les thyristors T1, T2 et T3 sont amorcés pendant l'alternance positive des tensions  $v_a$ ,  $v_b$  et  $v_c$ . Les thyristors T1', T2' et T3' sont amorcés pendant l'alternance négative. La référence des angles d'amorçage est toujours l'angle d'amorçage naturel.

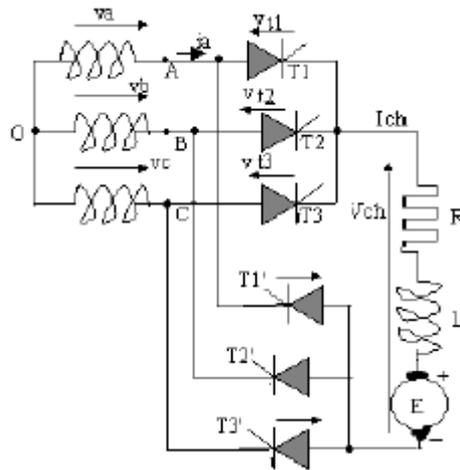


figure 17.a

On considère que la charge est un moteur à courant continu avec un courant continu absorbé constant :

$$i_{CH} = I_{CH} = \text{Constant}$$

A noter que le pont toutes diodes est un cas spécial du pont tout thyristors avec  $\psi = 0$ .

Dans le cas général, nous avons;

**pour l'alternance positive :**

$$\theta_1 = \psi + \pi/6$$

$$\theta_2 = \psi + \pi/6 + 2\pi/3$$

$$\theta_3 = \psi + \pi/6 + 4\pi/3 = \theta_2 + 2\pi/3$$

**pour l'alternance négative :**

$$\theta_1' = \psi + \pi/2$$

$$\theta_2' = \psi + \pi/2 + 2\pi/3$$

$$\theta_3' = \psi + \pi/2 + 4\pi/3 = \theta_2' + 2\pi/3$$

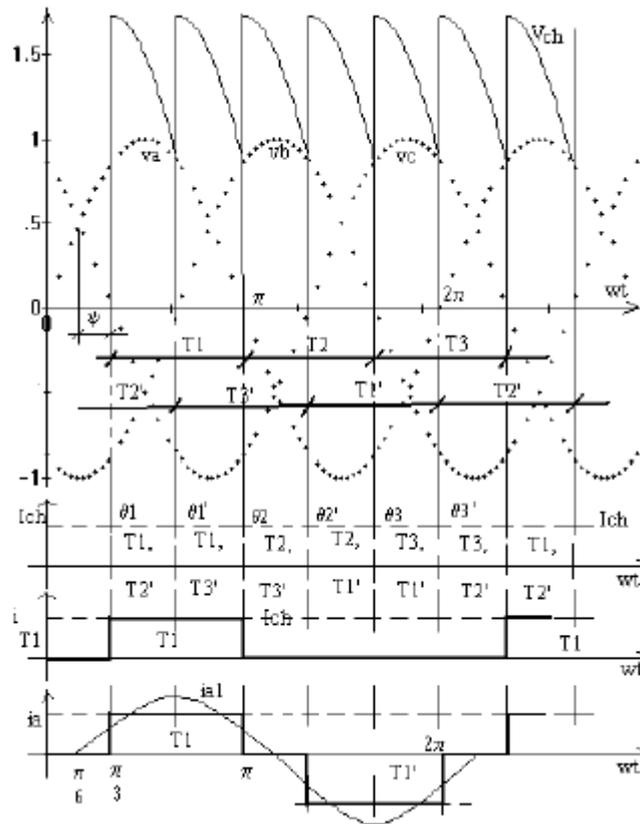


Figure 17.b

### Séquences d'amorçage :

$\theta_1$  à  $\theta_1'$  : T1 avec T2',  $v_{CH} = v_a - v_b$

$\theta_1'$  à  $\theta_2$  : T1 avec T3',  $v_{CH} = v_a - v_c$

$\theta_2$  à  $\theta_2'$  : T2 avec T3',  $v_{CH} = v_b - v_c$

$\theta_2'$  à  $\theta_3$  : T2 avec T1',  $v_{CH} = v_b - v_a$

$\theta_3$  à  $\theta_3'$  : T3 avec T1',  $v_{CH} = v_c - v_a$

$\theta_3'$  à  $\theta_4$  : T3 avec T2',  $v_{CH} = v_c - v_b$

et le processus se répète, et chaque thyristor conduit pendant  $2\pi/3$ .

de  $\theta_1$  à  $\theta_4$ , nous avons une période et nous remarquons que  $v_{ch}$  est composée de 6 arches identiques =  $2 \cdot q$  ( $q$  est le nombre de phase). Donc, la tension redressée moyenne est :

$$V_{ch} = \frac{6}{2\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_4} v_{ch} d(\omega t) = \frac{6}{2\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_4} (v_a - v_b) d(\omega t)$$

$$V_{ch} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos \psi$$

A noter que :

- pour  $\psi < \pi/2$  :  $V_{ch} > 0$

- pour  $\psi = \pi/2$  :  $V_{ch} = 0$
  - pour  $\psi > \pi/2$  :  $V_{ch} < 0$ , dans ce cas, la puissance  $P_c = V_{ch} I_{ch}$  est inférieure à zéro.
- Donc la puissance est transmise du moteur au réseau. C'est le processus de régénération et le convertisseur fonctionne comme **un onduleur non autonome**.

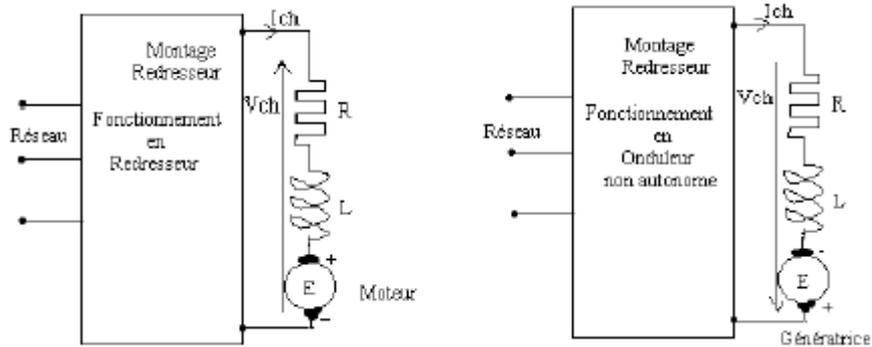


figure 17.c

Représentation des courants instantanés (figure 17.b) :

- $i_{ch}$  est le courant dans la charge,
- $i_{T1}$  est le courant dans le thyristor T1,
- $i_a$  est le courant dans la phase 'a' : Ce courant passe pendant la conduction de T1 ou T1'. Le fondamental de  $i_a$  est représenté en pointillé ( $i_{a1}$ ).
- Le déphasage entre  $v_a$  et  $i_{a1}$  est  $\pi/6$ , ce qui représente le facteur de puissance secondaire.

**Calcul du facteur de puissance (exemple :  $\psi = \pi/6$ ) :**

Donc ,  $\theta_1 = \pi/3$ ,  $\theta_2 = \pi/3 + 2\pi/3 = \pi$

Puissance active  $P = V_{ch} \cdot I_{ch}$

Puissance apparente  $S = 3V \cdot I_a$  ( $V$  et  $I_a$  sont la tension et le courant secondaires efficaces).

Facteur de puissance :  $f.d.p = P/S$ .

$$I_a = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{ch}^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{\pi} I_{ch}^2 \frac{2\pi}{3}} = I_{ch} \sqrt{\frac{2}{3}}$$

$$V_{ch} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V \sqrt{2} \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{9\sqrt{2}}{2\pi} V$$

$$PF = \frac{\frac{9\sqrt{2}}{2\pi} V I_{ch}}{3 V I_{ch} \sqrt{\frac{2}{3}}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \approx \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Donc le déphasage est  $\varphi = \pi/6$  entre  $v_a$  et le fondamental de  $i_a$ .

### 3.4. Le pont mixte symétrique :

C'est un pont composé de 3 thyristors et de 3 diodes (figure 18.a).

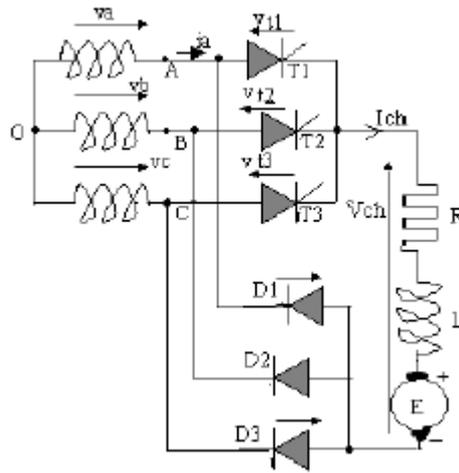


figure 118.a

Figure 18.b représente la courbe de la tension  $v_C$  pour  $\psi = \pi/2$ .

Dans le cas général, nous avons;

pour l'alternance positive (thyristors):

$$\theta_1 = \psi + \pi/6$$

$$\theta_2 = \psi + \pi/6 + 2\pi/3$$

$$\theta_3 = \psi + \pi/6 + 4\pi/3 = \theta_2 + 2\pi/3$$

pour l'alternance négative (diodes):

$$\theta_1' = \pi/2$$

$$\theta_2' = \pi/2 + 2\pi/3$$

$$\theta_3' = \pi/2 + 4\pi/3 = 2\pi/3$$

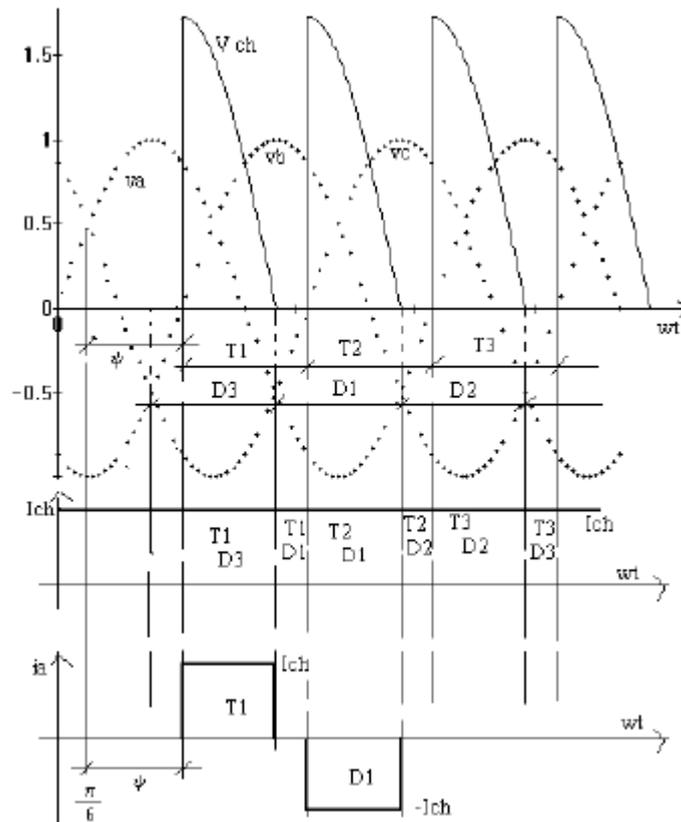


figure 18.b

Séquences d'amorçage :

$\theta_1$  à  $7\pi/6$  : T1 avec D3,  $v_{ch} = v_a - v_b$

$7\pi/6$  à  $\theta_2$  : T1 avec D1, Fonctionnement de la charge en roue libre et  $v_{ch} = 0$

$\theta_2$  à  $\theta_2'$  : T2 avec D1,  $v_{ch} = v_b - v_a$

$\theta_2'$  à  $\theta_3$  : T2 avec D2 (Roue libre),  $v_{ch} = 0$

et le processus se répète, où chaque thyristor ou diode conduit pendant  $2\pi/3$ .

On remarque que sur une période, nous avons 3 arches identiques, d'où :

$$V_{ch} = \frac{3}{2\pi} \int_{\psi+\pi/6}^{7\pi/6} v_{ch} d(\omega t) \quad V_{ch} = \frac{3}{2\pi} \int_{\psi+\pi/6}^{7\pi/6} (v_a - v_c) d(\omega t)$$

$$v_a - v_c = V_m \sin(\omega t) - V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

$$V_{ch} = \frac{3V_m}{2\pi} \int_{\psi+\pi/6}^{\frac{7\pi}{6}} [\frac{3}{2} \sin(\omega t) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\omega t)] d(\omega t)$$

$$(1) \int_{\psi+\pi/6}^{\frac{7\pi}{6}} [\frac{3}{2} \sin(\omega t)] d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}}{4} + \frac{3\sqrt{3}}{4} \cos \psi - \frac{3}{4} \sin \psi$$

$$(2) \int_{\psi+\pi/6}^{\frac{7\pi}{6}} [-\frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\omega t)] d(\omega t) = \frac{\sqrt{3}}{4} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \psi + \frac{3}{4} \sin \psi$$

$$\text{donc } V_{ch} = \frac{3V_m}{2\pi} [\sqrt{3}(1 + \cos \psi)] = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m (1 + \cos \psi)$$

On remarque que  $V_{ch}$  est positive quelque soit  $\psi$ .

$$\text{pour } \psi = 0 \Rightarrow V_{ch} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m$$

$$\text{pour } \psi = \pi \Rightarrow V_{ch} = 0$$

Figure 19 représente la variation de la tension de sortie aux bornes de la charge  $V_{ch}$  pour le pont mixte et pour le pont tous thyristors.

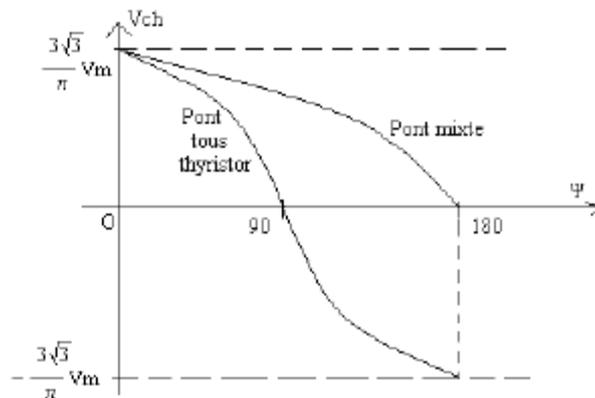


figure 19

### 3.5. Les montages à commutation série (pont S3) :

Ce montage redresse les trois tensions engendrées dans des enroulements en triangle (figure 20). C'est le cas des transformateurs à secondaire en triangle.

D1, D2 et D3 conduisent dès que les 3 tensions  $v_1$ ,  $v_2$  et  $v_3$  deviennent successivement positives (intervalle de conduction =  $2\pi/3$ ).

D1', D2' et D3' conduisent dès que les 3 tensions  $v_1$ ,  $v_2$  et  $v_3$  deviennent successivement négatives (intervalle de conduction =  $2\pi/3$ ).

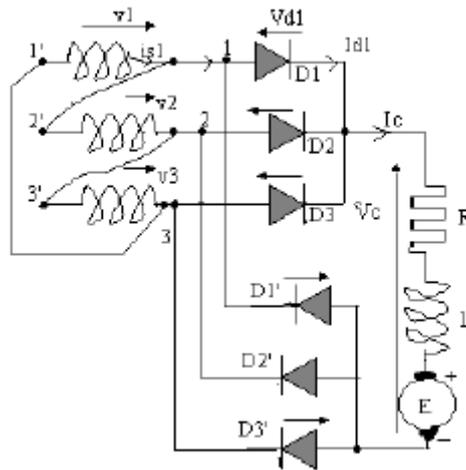


figure 20

- Pour  $0 < \omega t < \pi/3$  : D1 et D2' sont en conduction, d'où :  $v_c = (-v_2)$
- Pour  $\pi/3 < \omega t < 2\pi/3$  : D1 et D3' sont en conduction, d'où :  $v_c = (v_1)$
- Pour  $2\pi/3 < \omega t < \pi$  : D2 et D3' sont en conduction, d'où :  $v_c = (-v_3) = v_1 + v_2$
- Pour  $\pi < \omega t < 4\pi/3$  : D2 et D1' sont en conduction, d'où :  $v_c = (v_2)$
- Pour  $4\pi/3 < \omega t < 5\pi/3$  : D3 et D1' sont en conduction, d'où :  $v_c = (-v_1)$
- Pour  $5\pi/3 < \omega t < 2\pi$  : D3 et D2' sont en conduction, d'où :  $v_c = (v_3)$

**Calcul de la tension moyenne de sortie  $V_c$  (figure 21.a):**

$$V_c = 6 \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} v_1 d(\omega t) \Rightarrow V_c = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_m \sin(\omega t) d(\omega t)$$

$$V_c = \frac{3}{\pi} V_m [\cos(\omega t)]_{\pi/3}^{2\pi/3} \Rightarrow V_c = -\frac{3}{\pi} V_m \left[ -\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \Rightarrow V_c = \frac{3V_m \sqrt{3}}{\pi}$$

**Tension aux bornes d'une diode (exemple D1 :  $V_{d1}$ ) - Figure 21.b :**

- De 0 à  $2\pi/3$  : D1 est conductrice, donc  $v_{D1} = 0$
- De  $2\pi/3$  à  $4\pi/3$  : D2 est conductrice, donc  $v_{D1} = -v_2$
- De  $4\pi/3$  à  $2\pi$  : D3 est conductrice, donc  $v_{D1} = v_1$

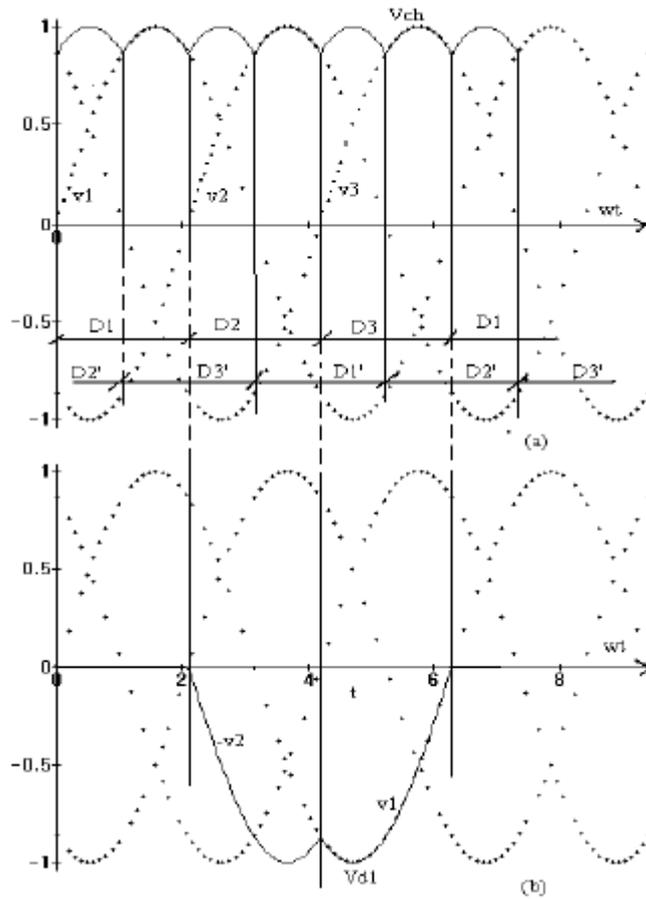


figure 21

### Calcul de courants secondaires :

•

Pour  $0 < wt < \pi/3$  : D1 et D2' sont en conduction, d'où :  $i_{s1} = (1/3).I_c$  (voir **figure 22**)

□  $I_c$  est divisé en 2 branches; branche 2-2'-1 d'une résistance R et branche 2-3'-3-1'-1 d'une résistance 2R.

□ Donc, dans la branche 2-2'-1, nous avons  $(2/3).I_c$ , d'où  $i_{s2} = (-2/3).I_c$

□ et dans la branche 2-3'-3-1'-1, nous avons  $(1/3).I_c$  : d'où  $i_{s1} = (1/3).I_c$  et  $i_{s3} = (1/3).I_c$

• Pour  $\pi/3 < wt < 2\pi/3$  : D1 et D3' sont en conduction, d'où :  $i_{s1} = (2/3).I_c$

• Pour  $2\pi/3 < wt < \pi$  : D2 et D3' sont en conduction, d'où :  $i_{s1} = (1/3).I_c$

• Pour  $\pi < wt < 4\pi/3$  : D2 et D1' sont en conduction, d'où :  $i_{s1} = (-1/3).I_c$

• Pour  $4\pi/3 < wt < 5\pi/3$  : D3 et D1' sont en conduction, d'où :  $i_{s1} = (-2/3).I_c$

• Pour  $5\pi/3 < wt < 2\pi$  : D3 et D1' sont en conduction, d'où :  $i_{s1} = (-1/3).I_c$

On obtient un courant secondaire alternatif non sinusoïdal (figure 23)

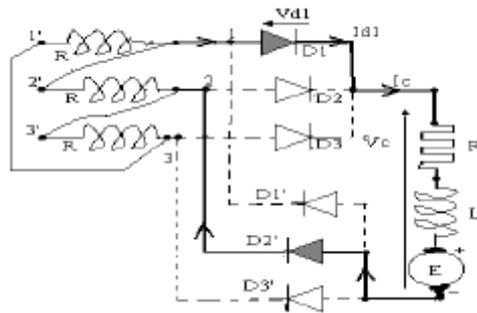


figure 22

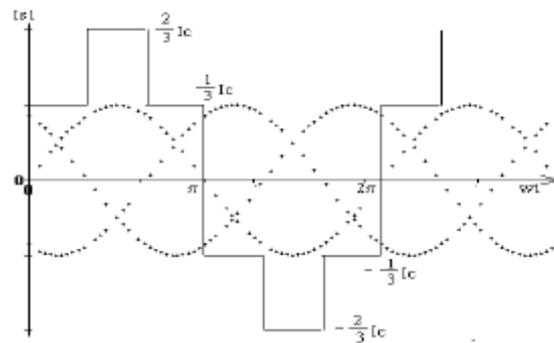


figure 23

#### 4. Déclenchement du thyristor :

L'angle d'amorçage est commandé par un signal de contrôle tel que le convertisseur statique fournisse les sorties correspondantes aux performances demandées.

Le déclenchement du thyristor, lorsque la tension d'entrée est sinusoïdale, se fait avec un décalage par rapport au passage par zéro de cette tension pour le redresseur monophasé.

Pour le redresseur triphasé le déclenchement se fait par rapport au passage par l'angle d'amorçage naturel.

La maîtrise de ce retard nécessite la présence d'un circuit de synchronisation et de déclenchement. L'angle de décalage peut être tel que sa valeur soit proportionnelle à une tension de commande  $E_c$ . Un autre dispositif permet d'obtenir une tension moyenne de sortie de redresseur proportionnelle à  $E_c$  (figure 24).

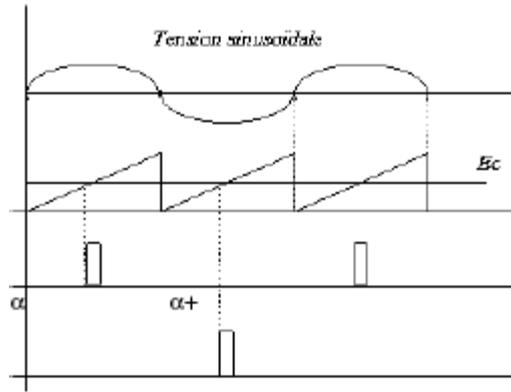


Figure 24

Le signal en dents de scie est généré à partir de la tension de réseau et sa valeur est comparée à une tension de commande  $E_c$  que l'on peut faire varier par un potentiomètre. La comparaison des deux signaux permet de générer les impulsions qui servent à déclencher le ou les thyristors (figure 25).

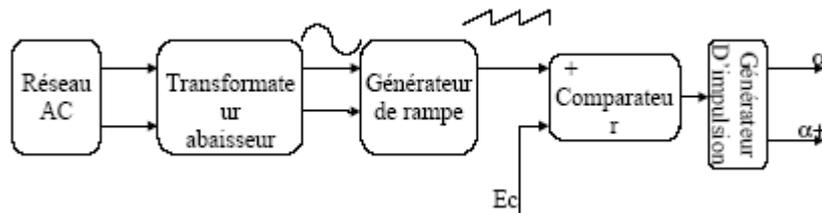


figure 25

Le signal en dent de scie peut être remplacé par un signal en cosinus (utilisation d'un déphaseur) par rapport au signal d'entrée. Dans ce cas, on compare la tension de commande  $E_c$  avec ce signal et on ajoute un monostable pour générer les impulsions (Figure 26).

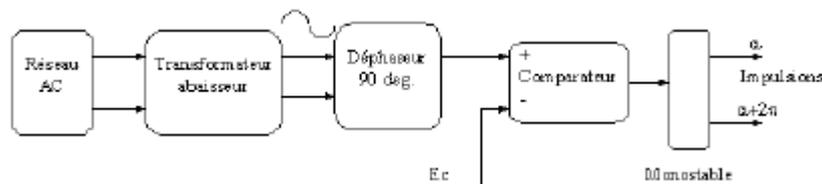


Figure 26

Dans le cas d'un redresseur commandé, la tension moyenne vaut  $V_o = V_c \cos \alpha$ .  $V_c$  est la tension moyenne en cas de redresseur à diodes. La tension source s'écrit :  $v = V_{max} \sin \omega t$

La tension déphasé s'écrit :

$v_{90} = V_{max} \cos \omega t$  L'intersection de  $E_c$  et de  $v_{90}$  donne  $\cos \alpha = E_c / V_{max}$  Figure 27

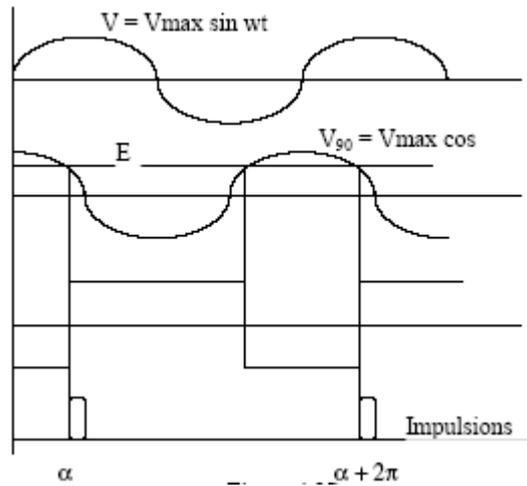


Figure 27

Les impulsions ne sont pas assez suffisantes dès fois pour déclencher des thyristors. De plus, la gâchette et la cathode du thyristor sont à des potentiels plus élevées. Le circuit de commande doit être isolé du circuit de puissance. Donc, on utilise un transformateur d'impulsion et d'isolation ou une isolation optique pour séparer les deux circuits de commande et de puissance. Figure 28 donne un montage amplificateur d'impulsion. Le transistor en montage Darlington est utilisé pour amplifier l'impulsion du courant.

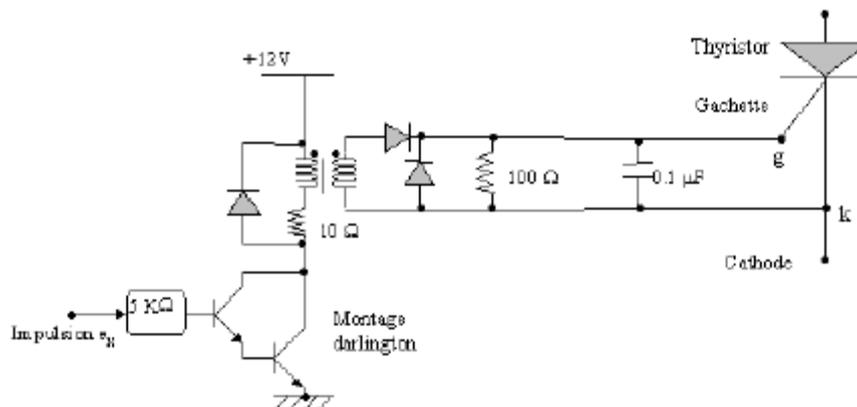


Figure 28

Si l'impulsion à l'entrée du montage Darlington est large, il peut saturer le transformateur. Dans ce cas, on échantillonne les impulsions à des élevées (10- 30 kHz) en utilisant un compteur (Timer, ex : 555), comme dans la figure 29. De plus, les impulsions modulées réduisent les pertes dans le thyristor. Voir les signaux dans la figure 30

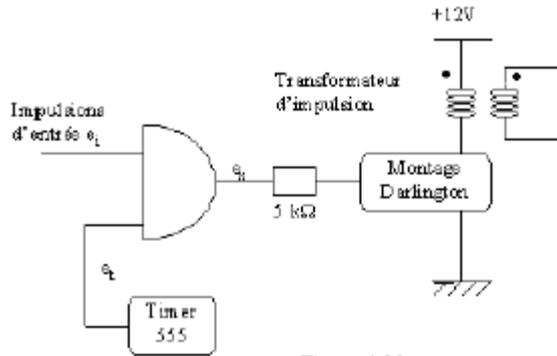


figure 29

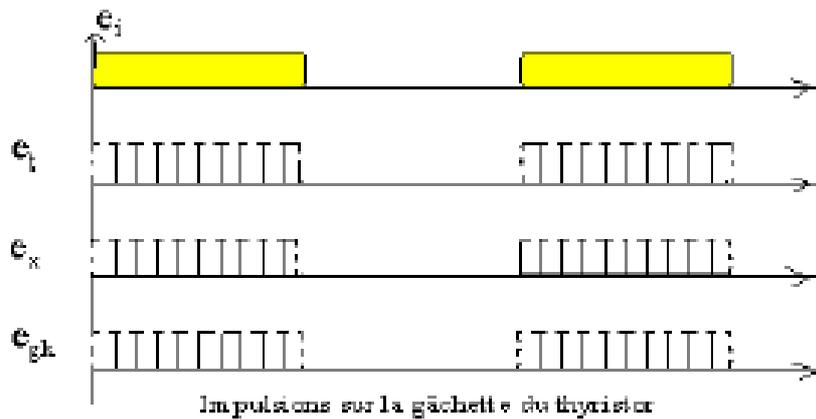


figure 30

### 5. Exemple de commande des thyristors ( en "arccosinus"):

Les impulsions sur la gâchette sont synchronisées sur la tension du réseau d'alimentation. On obtient dans ce cas l'angle d'amorçage :  $\alpha = \text{Arc cos } U_c / V_m$ , où  $U_c$  est la tension de référence et  $V_m$  est la valeur maximale de la tension d'alimentation.

Donc, la tension de sortie  $U_{ch}$  est une fonction linéaire de  $U_c$  de commande.

Le schéma de commande d'un montage à un thyristor est présenté dans la figure 31, où:

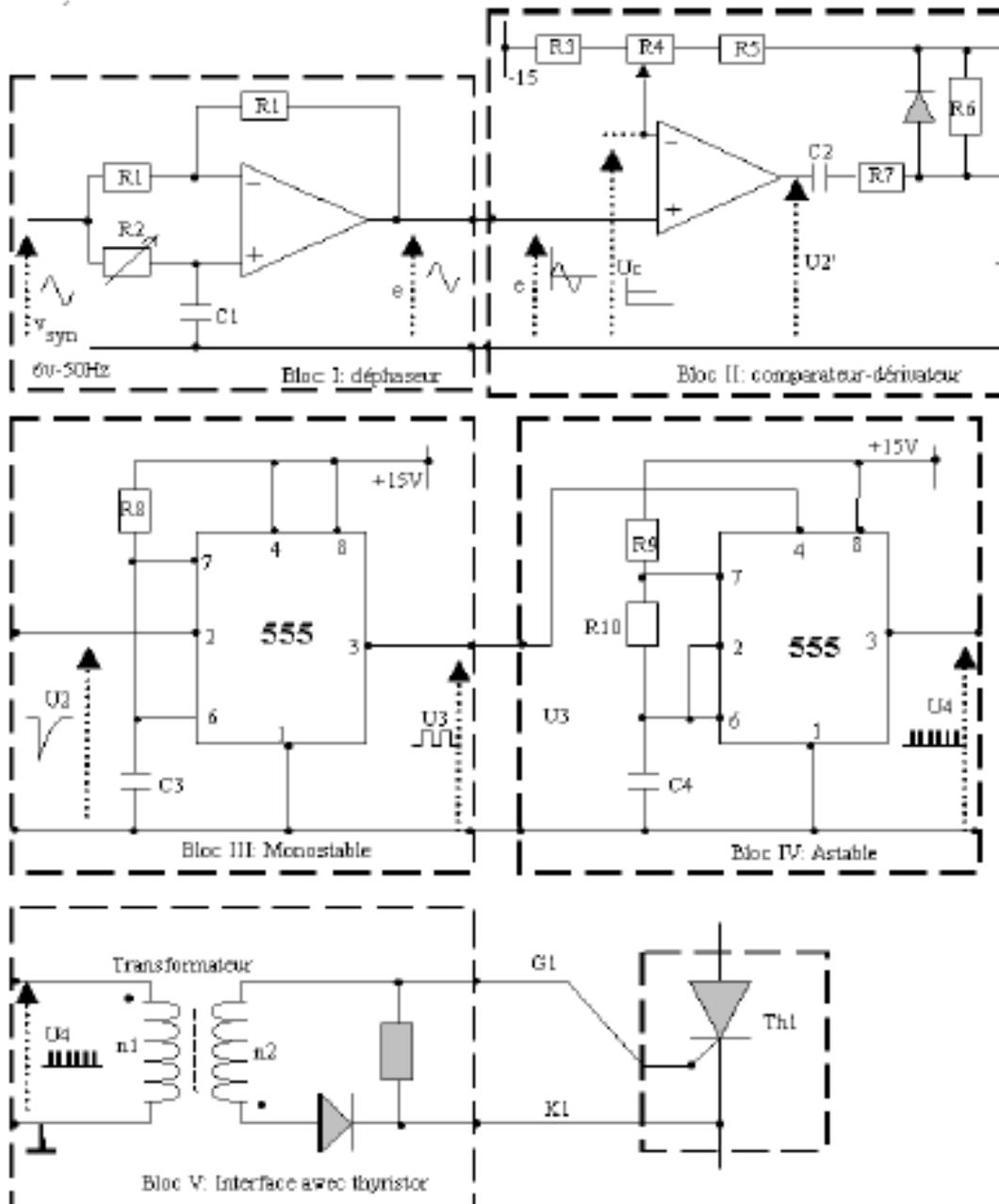


figure 31

**Bloc I** : représente un déphaseur  $\pi/2$

**Bloc II** : représente un comparateur et dérivateur

**Bloc III** : représente un Monostable

**Bloc IV** : représente un Astable

**Bloc V** : représente l'interface de sortie pour commander la gâchette du thyristor. Il permet l'amplification et l'isolement galvanique des circuits de commande et de puissance. La sortie

est formée de trains d'impulsions à fréquence supérieure à 20 kHz assurant le déclenchement du ou des thyristors.

Pour un montage P3, on aura trois systèmes de commande identiques où on synchronise le thyristor Th1 sur la phase 1, le thyristor Th2 sur la phase 2 et le thyristor Th3 sur la phase 3.

**Pour un montage PD2**, on passe par un inverseur à amplificateur opérationnel après le bloc I pour obtenir une tension déphasée de  $\pi$ . Puis on double les blocs II, III IV et V pour commander les couples des thyristors.

A noter qu'il existe des montages de commande à circuit intégré TCA780 ...785 pour commander les ponts PD2 (figure 32).

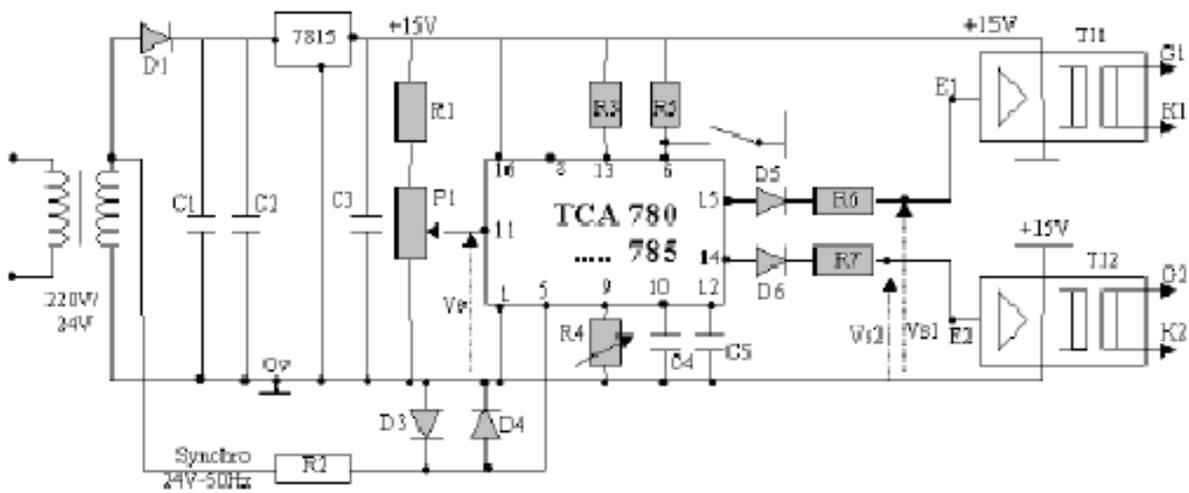


Figure 32