

4. Redressement commandé (Thyristors)

On nomme « redresseur commandé » un montage redresseur dont une partie des diodes a été remplacée par un ensemble équivalent de transistors.

4.1 Montages tout thyristors

Nous nous intéressons dans ce paragraphe aux montages redresseurs ne comprenant que des thyristors. Seul sera abordé dans ce cours le principe de fonctionnement permettant d'obtenir l'allure de la tension redressée et de calculer la valeur moyenne de la tension redressée.

4.1.1 Allure de la tension redressée : exemple du montage P3

Les hypothèses pour l'étude sont les suivantes :

- Thyristors supposés idéaux → pas de chute de tension aux bornes lorsqu'ils sont fermés ; commutation instantanée ;
- Source supposée parfaite → impédance de source nulle ;
- Charge fortement inductive → courant débité $i_d(t)$ constant égal à I_d .

Nous allons étudier le principe de fonctionnement d'un montage P3 dont les Thyristors sont commandés à la fermeture avec un retard angulaire α (temps de retard $= \frac{\alpha}{\omega} = \Delta t$) sur l'amorçage naturel (cas des diodes). Cette étude pourra être appliquée facilement à un montage PD3 ou autre.

La figure 3-14 décrit le montage P3 tout thyristors.

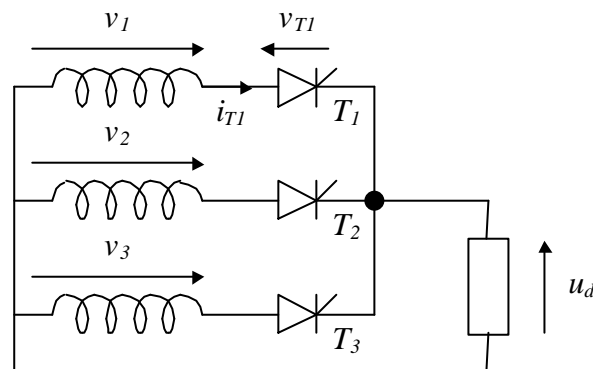


Figure 3-14. Montage P3 tout thyristor.

La figure 3-15 donne les différentes phases de fonctionnement.

- Avant l'instant t_0 on suppose que le thyristor T_3 conduit. On a donc :

$$u_d(t) = v_3(t)$$

- Après t_0 , $v_1(t)$ devient supérieure à $v_2(t)$ et $v_3(t)$; T_1 est polarisé en direct ; il est donc susceptible d'être enclenché par un signal de commande. Tant que T_1 ne reçoit pas d'impulsion de commande, T_3 reste conducteur et :

$$u_d(t) = v_3(t) ; i_{T1} = 0 ; v_{T1}(t) = u_{13}(t)$$

- La commande de la fermeture de T_1 arrive à l'instant $t_1 = t_0 + \Delta t$. Le thyristor T_1 est alors polarisé sous tension directe positive si $u_{13} > 0$. Cette condition impose $\Delta t = t_1 - t_0 < \frac{T}{2}$ ou $\alpha < p$. Pour

$\alpha > \beta$, il n'est plus possible d'amorcer les thyristors car la différence de potentiel à leur borne devient négative.

- si $\alpha < \beta$: T_1 s'enclenche : $u_d(t) = v_1(t)$; $v_{T1} = 0$ et T_3 se trouve polarisé en inverse ($v_{T3} = u_{31} < 0$) et se bloque ; d'où $i_{T1} = I_d$.
- T_1 reste enclenché tant que T_2 n'est pas commandé, soit jusqu'à l'instant $t_2 = t_1 + \frac{T}{q}$ ($q=3$ dans le cas du montage P3) si l'on admet (c'est le cas en pratique) que les signaux de commande des thyristors se succèdent avec le même décalage $\frac{T}{q}$ que les instants d'amorçage naturel (pour les diodes).
- pour $t > t_2$, on a : $u_d = v_2$; $v_{T1} = u_{12}$; $i_{T1} = 0$

D'où les courbes de $u_d(t)$, $v_{T1}(t)$ et $i_{T1}(t)$ établies à la figure 3-15. On note que pour les montages parallèles simples (Pq), de même que pour les montages à diodes, la tension $u_d(t)$ est formée de $p=q$ portions de sinusoides.

Fig 3-16 cours manuscrit p33

Figure 3-15. Fonctionnement du montage P3 tout thyristor.

4.1.2 Valeur moyenne de la tension redressée. Fonctionnement en redresseur ou onduleur autonome

La tension redressée $u_d(t)$ est composée de p portions de sinusoides par périodes T des tensions alternatives de la source.

La valeur moyenne peut donc être calculée entre t_1 et t_2 :

$$U_{di0\alpha} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} U_{dM} \cos \omega t dt = \frac{P}{P} \cdot U_{dM} \cdot \sin \frac{P}{P} \cdot \cos \alpha = U_{di0} \cdot \cos \alpha$$

avec:
$$U_{di0} = \frac{P}{p} U_{dM} \sin \frac{P}{p} \quad (\text{redresseur à diodes}).$$

On a représenté graphiquement l'évolution de U_{di0a} en fonction de l'angle a sur la figure 3-16.

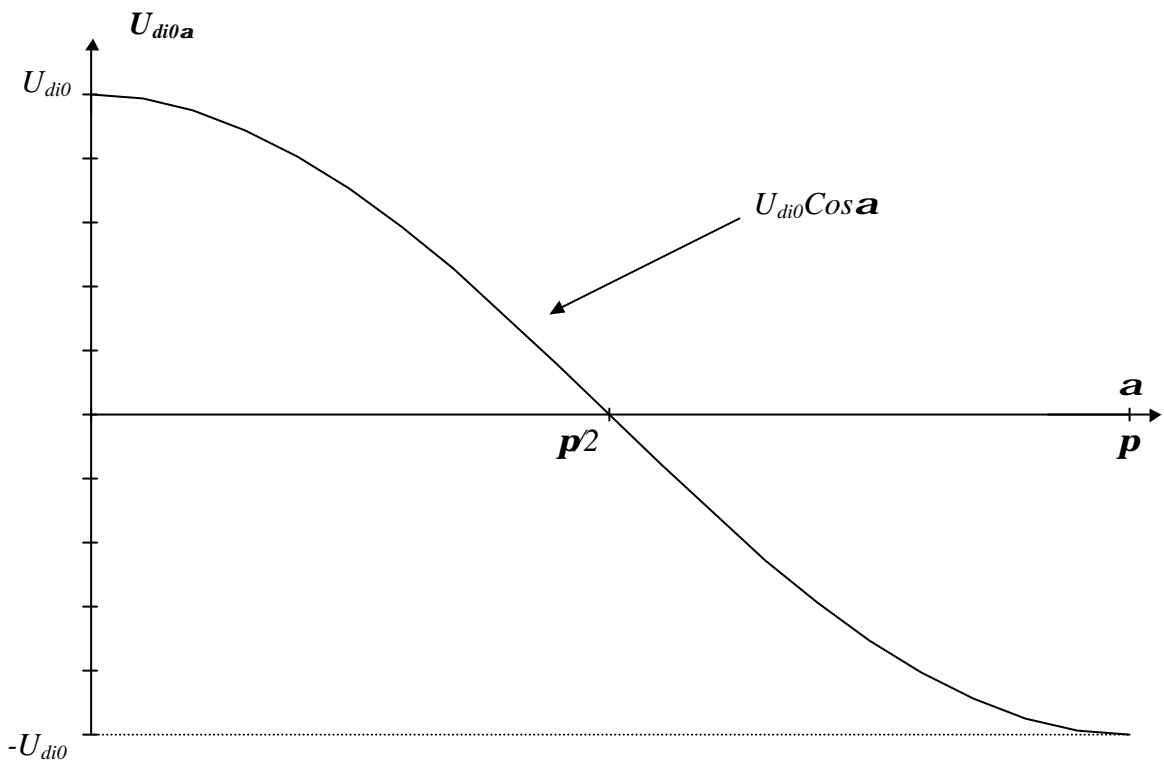


Figure 3-16. Montage P3 tout thyristor. Tension moyenne redressée.

On en déduit les deux types de fonctionnement d'un tel montage :

- pour $0 \leq a < \frac{P}{2}$: U_{di0a} est positive et la puissance active fournie par le dispositif redresseur à la charge dans laquelle circule un courant continu I_d vaut : $P = U_{di0a} \cdot I_d > 0$. La charge absorbe donc de l'énergie.

Le montage fonctionne alors en redresseur à tension de sortie U_{di0a} réglable grâce à l'angle de retard à l'amorçage a .

- pour $\frac{P}{2} < a < p$: U_{di0a} est négative, donc : $P < 0$.

Le montage ne peut fonctionner, dans ces conditions, que s'il est connecté, côté continu (charge), sur un dispositif susceptible de lui fournir de l'énergie, soit par exemple : génératrice courant continu, pont redresseur, batterie d'accumulateurs.

On a alors un fonctionnement en onduleur non autonome.

C'est un onduleur car l'énergie passe de la source continue au réseau alternatif connecté au transformateur ; il est non autonome car la valeur efficace et la fréquence des tensions alternatives sont fixées par le réseau alternatif.

Nous citons quelques exemples d'utilisation en fonctionnement en onduleur non autonome :

- **batterie d'accumulateurs : figure 3-17.**

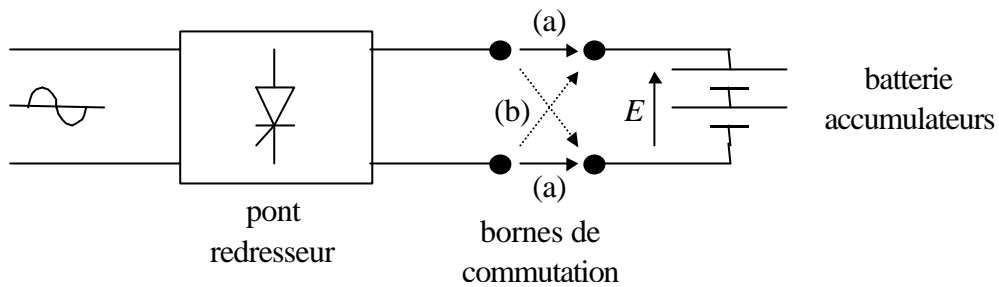


Figure 3-17. Redresseur en pont connecté à une batterie d'accumulateurs.

Le redresseur, lorsque $a < \frac{P}{2}$, fournit de l'énergie à la batterie (bornes en position (a)). Lorsque la batterie est chargée, elle peut fournir de l'énergie au réseau (après inversion des bornes, position (b)) pour apporter un complément d'énergie.

- **Interconnexion entre deux réseaux : figure 3-18.**

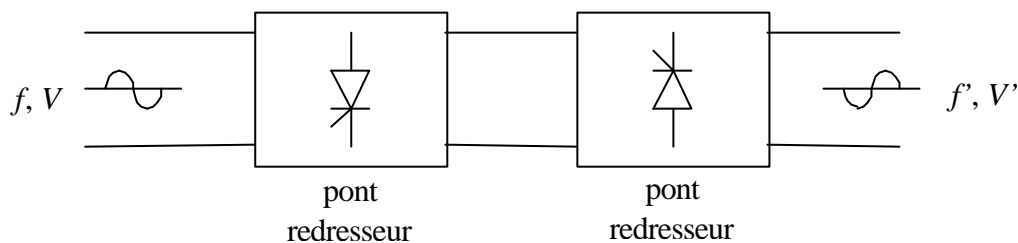


Figure 3-18. Interconnexion entre deux réseaux.

Deux réseaux de fréquence f et f' et de valeur efficaces V et V' pouvant être différentes, sont connectés entre eux à l'aide de 2 ponts redresseurs, l'un et l'autre pouvant fonctionner en redresseur ou onduleur non autonome alternativement. Cette configuration permet de relier entre eux deux réseaux indépendants (exemple : liaison sous-marine France-Angleterre).

- **Machine à courant continu : figure 3-19.**

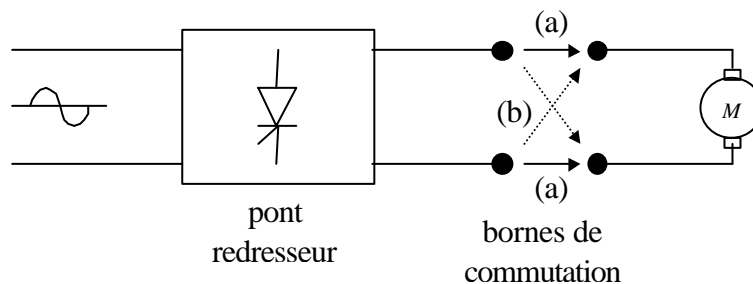


Figure 3-19. Machine à courant continu fonctionnant alternativement en moteur et en génératrice.

Lorsque les bornes sont en position (a), la machine fonctionne en moteur. En position (b), avec $\alpha > \frac{\pi}{2}$, la machine fonctionne en génératrice. On peut assurer ainsi le freinage du moteur par récupération d'énergie.

4.2 Montages mixtes en pont

Un pont mixte est formé pour moitié avec des thyristors et pour moitié avec des diodes.

Comparé au pont classique tout thyristors, il a comme avantage de demeurer commandé tout en étant plus robuste, plus économique, (diodes plus robustes, commande plus simple car moins de thyristors) avec un meilleur rendement et un meilleur facteur de puissance (la chute de tension est supérieure à l'état *on* pour les thyristors).

Il a l'inconvénient de ne pas fonctionner en onduleur.

4.2.1 Fonctionnement. Exemple: montage monophasé PD2

Le pont mixte monophasé considéré est décrit à la figure 3-20. On considère une charge fortement inductive, soit un courant $i_d(t)$ considéré comme constant et égal à I_d .

- T_1 est amorcé à $\Delta t = \frac{\alpha}{\omega}$ lorsque la tension $v(t) = v_1(t) - v_2(t)$ est positive. Le potentiel en B étant inférieur au potentiel en A, D_2 conduit.

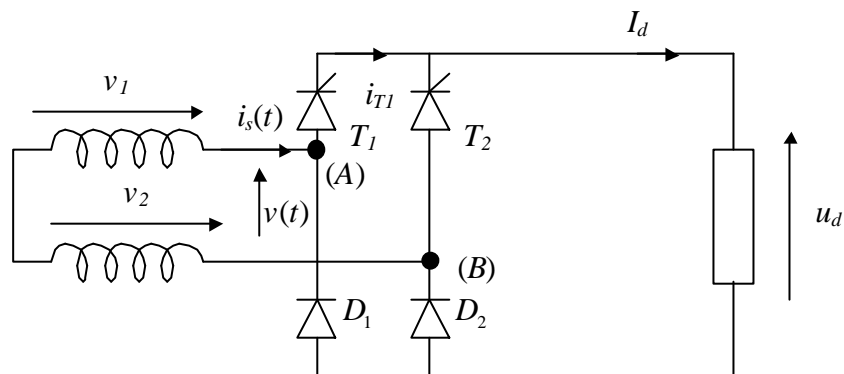


Figure 3-20. Pont PD2 mixte.

Le système demeure dans cet état tant que $v(t) > 0$. On a donc :

$$u_d(t) = v(t) = V_M \cdot \sin \omega t ; i_s(t) = I_d$$

- Dès que $t > \frac{T}{2}$, $v(t)$ devient négatif. La diode D_2 se bloque et la diode D_1 devient passante. Le thyristor T_2 est susceptible de conduire car il se trouve polarisé en direct, mais il ne conduit pas tant qu'il n'a pas été enclenché, soit jusqu'au temps $t_1 = \frac{T}{2} + \frac{\alpha}{\omega} = \frac{T}{2} + \Delta t$. Donc T_1 continue à conduire le courant I_d . La charge est donc court-circuitée par T_1 et D_1 . On dit que D_1 fonctionne en « diode de roue libre ».

On a :

$$u_d = 0 ; i_s = 0 ; i_d(t) = I_d$$

Remarque : dans cette phase, la charge est court-circuitée par D_1 et T_1 . La circulation du courant I_d est assurée par l'inductance de la charge dont l'impédance est considérée comme très grande ($L\omega \gg R$)

devant la résistance R totale de la maille constituée par T_1 , D_1 et la charge (résistance du thyristor, de la diode et de la charge).

- Au temps $t_1 = \frac{T}{2} + \Delta t$ correspondant à l'angle $\mathbf{a} + \mathbf{p}$, une impulsion est envoyée sur la gâchette de T_2 qui se met à conduire. T_1 se bloque.
- ...

L'allure des courants et tensions $v(t)$, $u_d(t)$, $i_{T1}(t)$ et $i_s(t)$ est donnée sur la figure 3-21.

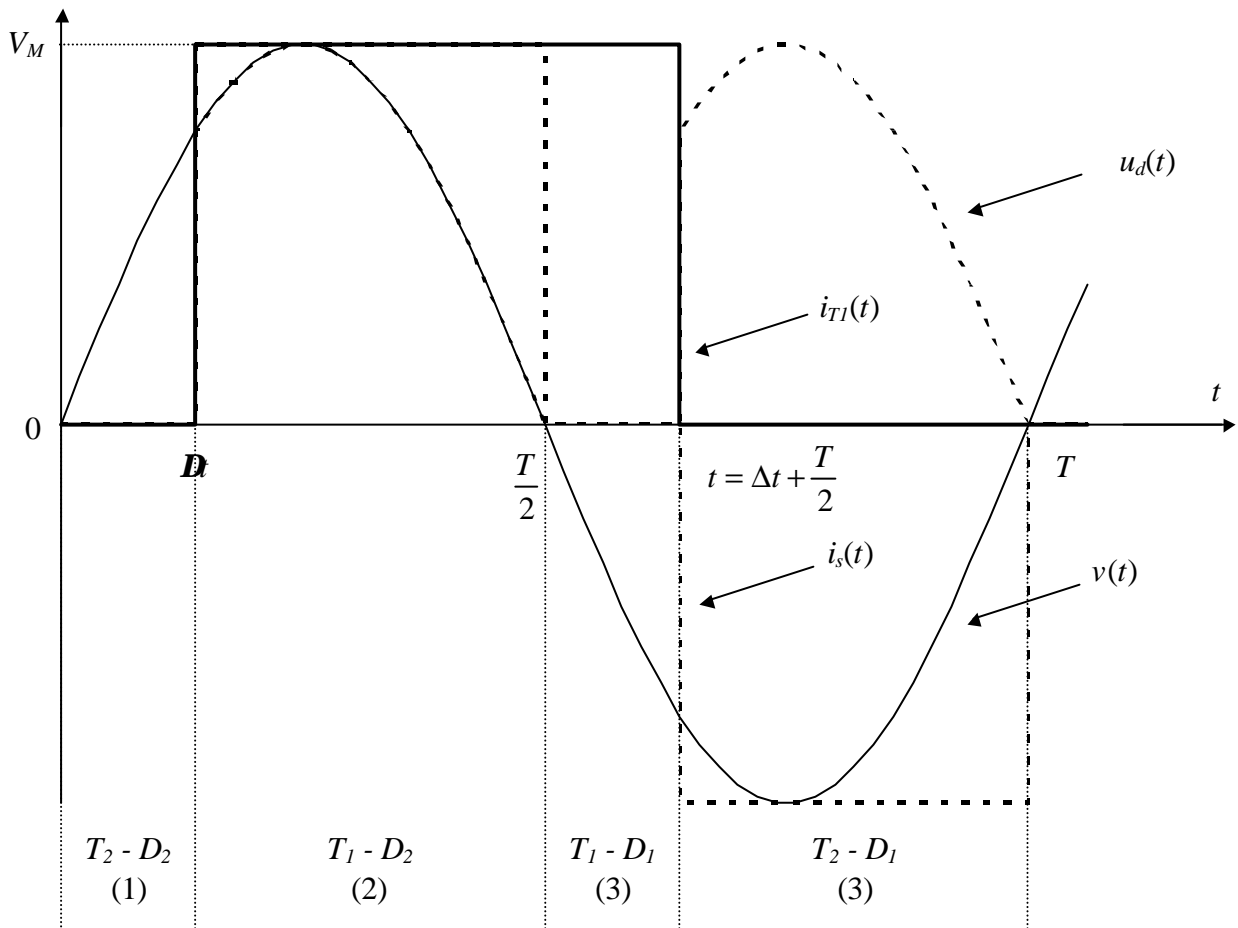


Figure 3-21. Fonctionnement du pont PD2 mixte. Les phases (1) et (3) sont appelées « phases de roue libre ».

4.2.2 Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge

PD2 :

$$U'_{di0a} = \frac{1}{T/2} \int_{\Delta t}^{T/2} V_M \cdot \sin \omega t dt = \frac{V_M}{\mathbf{p}} (1 + \cos \mathbf{a})$$

Dans le cas général on a :

$$U'_{di0a} = U_{di0} \frac{1 + \cos \mathbf{a}}{2}$$

avec :

$$U_{di0} = U_{dM} \frac{\sin \frac{\mathbf{p}}{q}}{\mathbf{p}/q}$$

Il s'avère ainsi possible, comme pour le pont tout thyristors, de régler la valeur de la tension moyenne redressée U'_{di0a} en agissant sur l'angle de retard à l'amorçage a .

Cependant, à la différence du pont tout thyristors, cette tension ne peut devenir négative comme le montre la figure 3-22 qui donne U'_{di0a} en fonction de a .

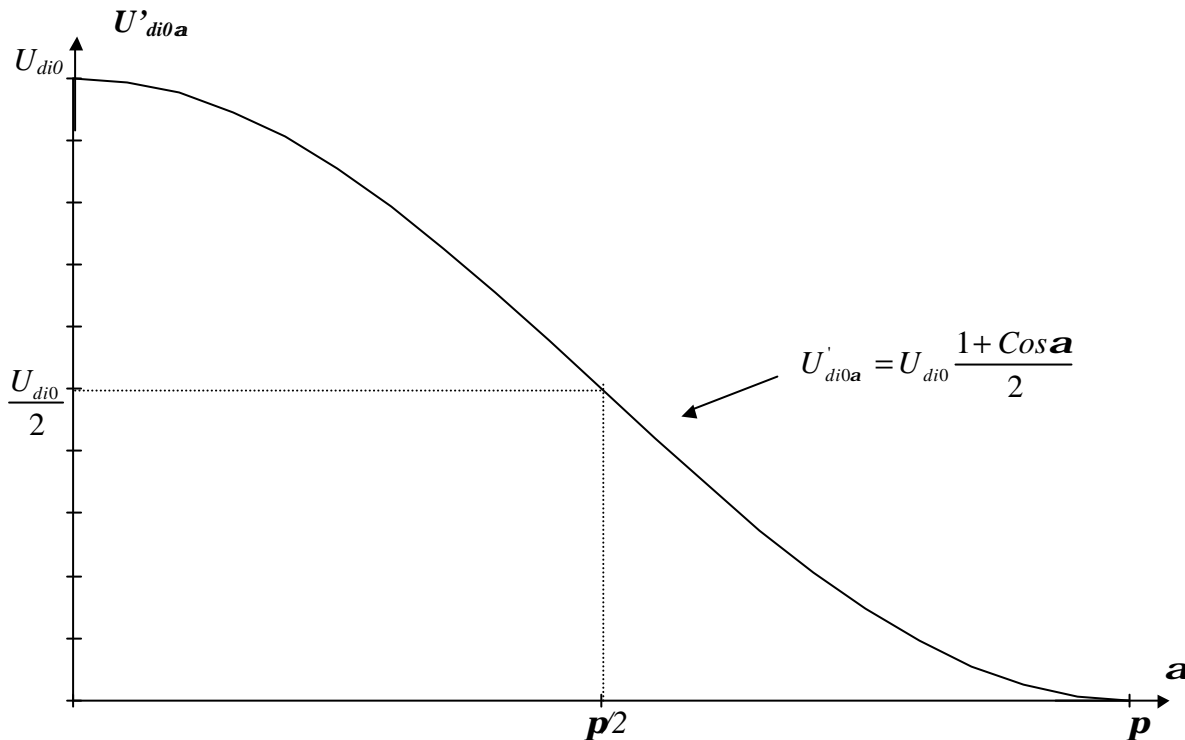


Figure 3-22. Montage PD2 mixte. Tension moyenne redressée.

En conséquence, le pont mixte ne peut fonctionner en onduleur non autonome (le pont mixte est non réversible).

4.2.3 Courant au secondaire du transformateur

Le graphe du courant au secondaire du transformateur est donné sur la figure 3-21.

- Valeur moyenne :

$$I'_{sia0} = 0$$

- Valeur efficace :

$$I'_{siaeff} = I_d \sqrt{\frac{p-a}{p}}$$

4.3 Exemple d'application des redresseurs commandés: alimentation des moteurs à courant continu

Nous considérons le cas simple d'une alimentation par un pont monophasé mixte PD2 (figure 3-23).

Sur la figure 3-23, les deux diodes D_1 et D_2 sont disposées en série contrairement au montage de la figure 3-20. Cela permet d'obtenir une phase de roue libre avec les diodes seulement, sachant qu'au démarrage du moteur (premières périodes de fonctionnement), le courant $i_d(t)$ sera faible, et peut donc être insuffisant pour maintenir les thyristors passants en phase de roue libre (problème du courant de maintien, voir chapitre 2).

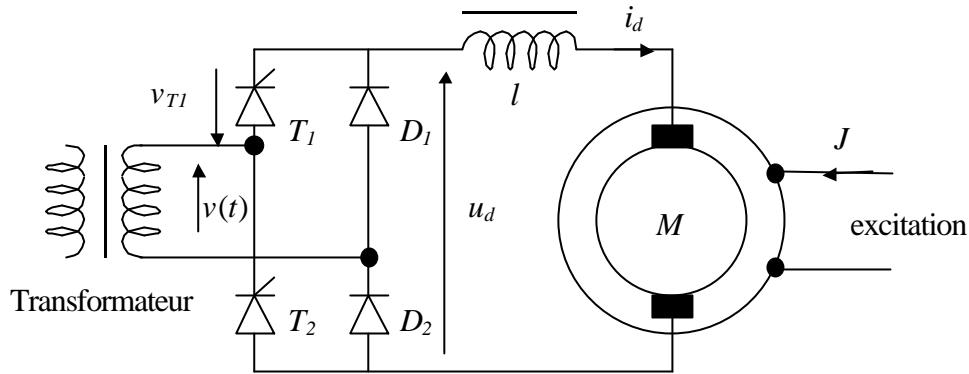


Figure 3-23. Moteur à courant continu alimenté par un pont redresseur mixte PD2. L'inductance l sert à lisser le courant $i_d(t)$.

On distingue deux types de fonctionnements :

- **Fonctionnement à courant interrompu pour les fortes valeurs de l'angle de retard α (pour une charge donnée).**

En modélisant la charge par un circuit R, L, E série et en nommant $Q = \frac{L\omega}{R}$ le facteur de qualité de la charge, on aura un fonctionnement interrompu, pour α donné, si Q est suffisamment faible.

La tension et le courant redressés $u_d(t)$ et $i_d(t)$ sont donnés à la figure 3-24 pour un fonctionnement à courant interrompu.

- Pour $t_0 < t < \Delta t$, le courant $i_d(t)$ est nul, donc :

$$u_d(t) = E \quad \text{aucun interrupteur ne conduit.}$$

A $t = \Delta t$, une impulsion de courant positive est envoyée sur la gâchette de T_1 qui s'enclenche car :

$$v_{T1}(t) = v(t) - u_d(t) > 0 \quad D_2 \text{ et } T_1 \text{ se mettent à conduire}$$

- Pour $\Delta t < t < \frac{T}{2}$, D_2 et T_1 conduisent.

On a donc :

$$u_d(t) = Ri_d(t) + L \frac{di_d}{dt} + E$$

- A $t = \frac{T}{2}$, $v(t)$ devient négatif, donc D_1 se met à conduire et T_1 se bloque. D_2 continue à conduire car T_2 n'est pas commandé. Cette phase de roue libre dure tant que $i_d(t) > 0$. On a :

$$L \frac{di_d}{dt} + E + Ri_d(t) = 0$$

Lorsque le courant $i_d(t)$ s'annule, les diodes cessent de conduire. La charge n'est plus alimentée et :

$$u_d(t) = E.$$

- A $t = \frac{T}{2} + \Delta t$, le thyristor T_2 est commandé ...

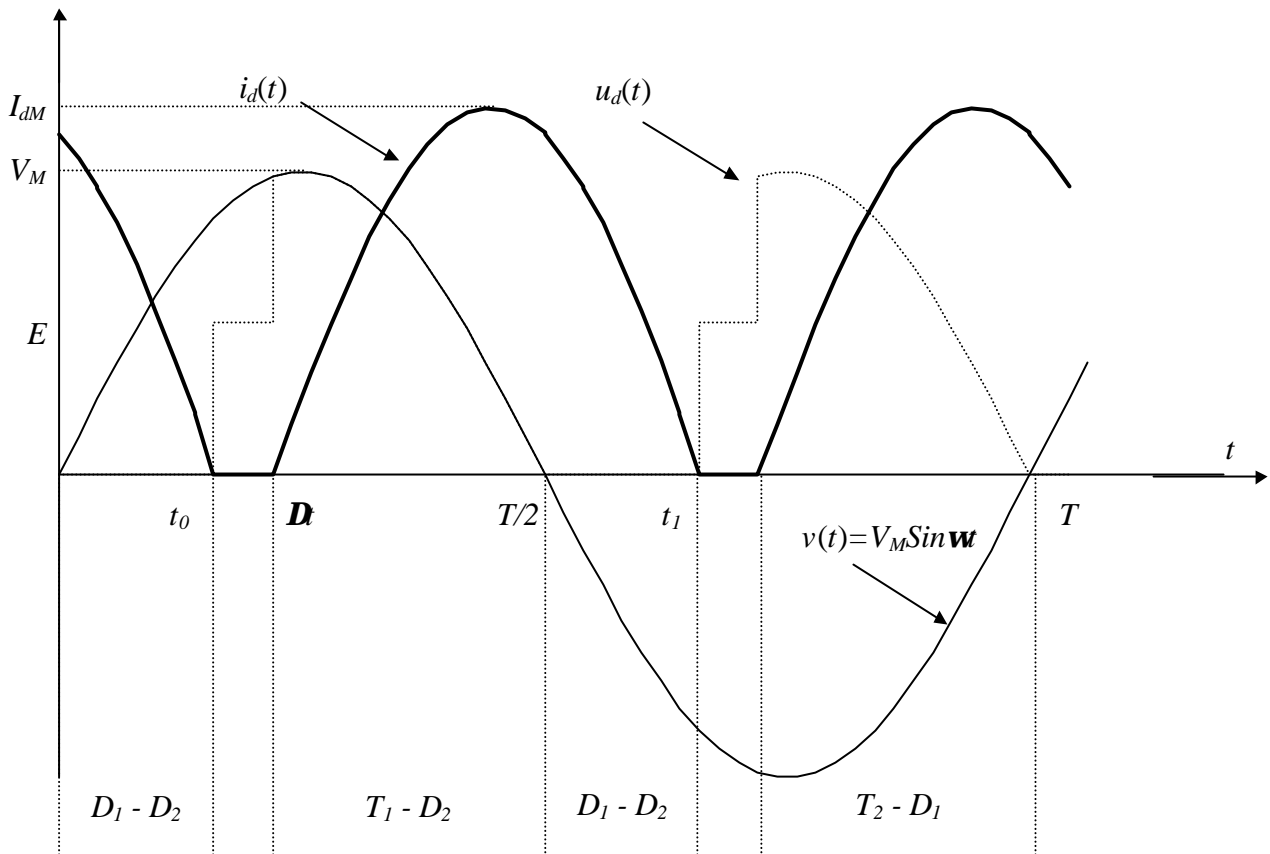


Figure 3-24. Fonctionnement à courant interrompu lors de l'alimentation d'un moteur à courant continu par un pont PD2 mixte.

- **Fonctionnement à courant ininterrompu pour les faibles valeurs de α (pour une charge donnée).**

Le fonctionnement est le même que pour le §4.2.

Les deux diodes D_1 et D_2 servent à conduire le courant $i_d(t)$ durant la phase de roue libre.

L'expression de la valeur moyenne de la tension redressée $u_d(t)$ s'écrit :

$$U'_{di0\alpha} = U_{di0} \frac{1 + \cos \alpha}{2} = E + R I_d$$

si I_d est la valeur moyenne de $i_d(t)$ et R la résistance de la maille (moteur + diodes).

La vitesse de rotation du moteur $\Omega = \frac{E}{K\Phi}$ est donc réglée par action sur l'angle de retard α .

Remarques :

- La valeur moyenne I_d du courant redressé $i_d(t)$ donnera la valeur moyenne du moment du couple moteur :

$$M = K\Phi I_d$$

- On pourra régler la vitesse du moteur en réglant l'angle de retard α en fonction de l'écart entre un signal de référence et une tension continue issue d'une dynamo tachymétrique placée sur l'arbre du moteur (voir figure 3-25).

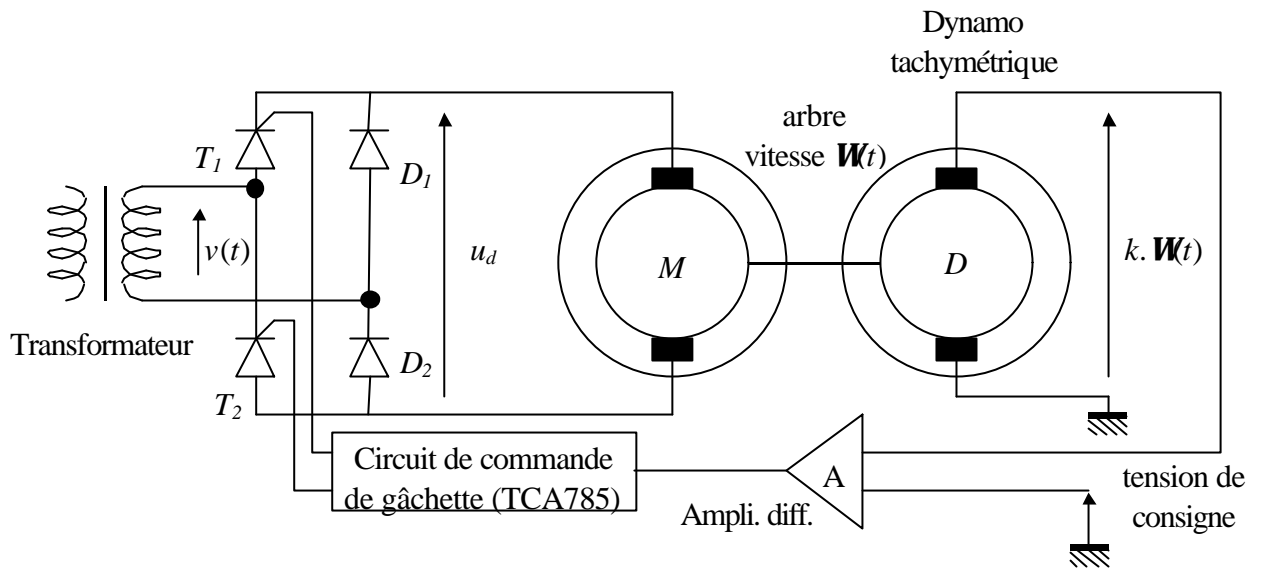


Figure 3-25. Régulation en vitesse d'un moteur à courant continu.