

# CHAP I. Rappels sur les moteurs électriques en vue de leur commande et sur les convertisseurs statiques

## 1. Eléments d'un entraînement électrique

Dans la pratique, les entraînements électriques sont variés (traction électrique routière, ferroviaire, robotique, industrie...). Les constituants d'un entraînement électrique peuvent être résumés dans la figure 1.

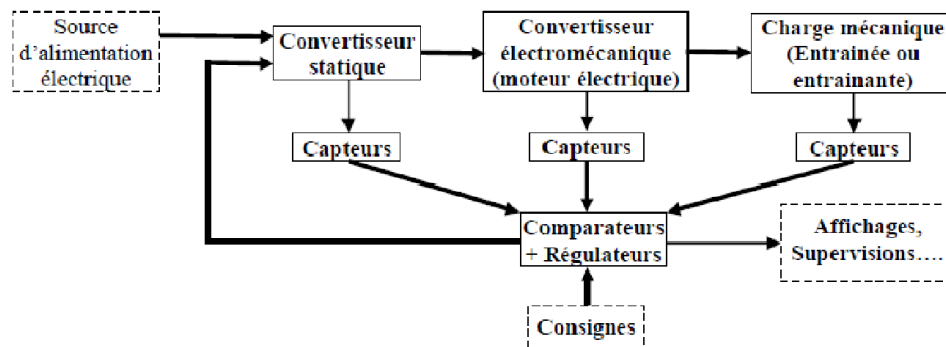


Figure 1. Schéma général d'un entraînement électrique

Dans un entraînement électrique, on distingue: La machine électrique (MCC, MS, MAS, ...), le convertisseur statique (redresseur commandé ou semi-commandé, hacheur, onduleur, ...), les Capteurs (Ils captent l'information sous forme d'une grandeur physique quelconque et la transforment en grandeur électrique mesurable: capteurs de vitesse, de position, de courant...) et les correcteurs qui permettent de commander la machine par action sur les signaux d'allumage du convertisseur statique.

## 2. Fonctionnement d'un entraînement électrique

Le moteur électrique peut fonctionner dans les quatre quadrants du système d'axes (couple, vitesse) ayant pour axe des abscisses le couple et pour axe des ordonnées la vitesse, ces quatre quadrants sont:

Quadrant 1 : marche en moteur dans le sens direct.

pour le mcc:  $U > 0$  et  $I > 0$ , ce qui donne:  $P = U.I > 0$ .

Quadrant 2 : marche en freinage ou générateur (récupération) dans le sens direct.

pour le mcc:  $U > 0$  et  $I < 0$ , ce qui donne:  $P = U.I < 0$ .

Quadrant 3 : marche en moteur dans le sens inverse.

pour le mcc:  $U < 0$  et  $I < 0$ , ce qui donne:  $P = U.I > 0$ .

Quadrant 4 : marche en récupération dans le sens inverse.

pour le mcc:  $U < 0$  et  $I > 0$ , ce qui donne:  $P = U.I < 0$ .

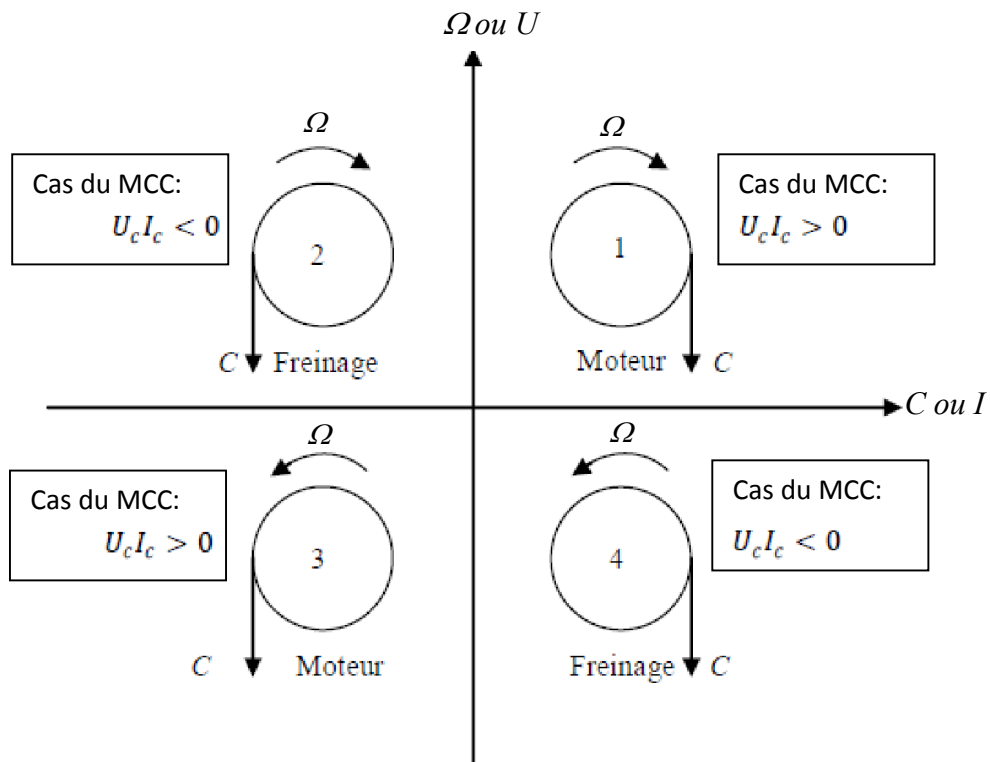


Figure 2. Quadrant de fonctionnement d'un moteur électrique

### 3. Rappels sur les convertisseurs statiques

#### 3.1. Redresseurs

Dans la pratique, les structures les plus utilisées sont celles en ponts. On distingue les ponts redresseurs monophasés et les ponts redresseurs triphasés.

##### a. Redresseurs monophasés en ponts

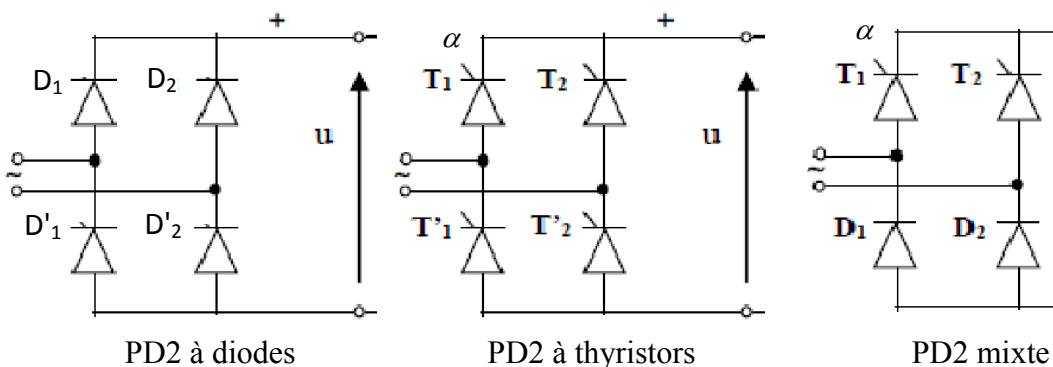


Figure 4. Redresseurs PD2

Valeur moyenne de la tension redressée:

**PD2 à diodes:**  $U_{moy} = \frac{V\sqrt{2}}{\pi}$  avec  $V = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$  : valeur efficace de la tension d'entrée.  $U_{moy}$  est fixe, elle n'est pas commandable.

**PD2 à thyristors:**  $U_{moy} = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} \cos(\alpha)$  avec  $V = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$  et  $\alpha$  : angle de retard à l'amorçage des thyristors. Pour  $\alpha$  variant entre  $-\pi$  et  $\pi$ ,  $\cos(\alpha)$  varie entre -1 et 1 et  $U_{moy}$  est commandable entre  $U_{moy} = -\frac{V\sqrt{2}}{\pi}$  et  $U_{moy} = +\frac{V\sqrt{2}}{\pi}$ . **Ce convertisseur est réversible en tension.**

**PD2 mixte:**  $U_{moy} = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} \left( \frac{1 + \cos(\alpha)}{2} \right)$  avec  $V = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$  et  $\alpha$  : angle de retard à l'amorçage des thyristors. Pour  $\alpha$  variant entre  $-\pi$  et  $\pi$ ,  $\cos(\alpha)$  varie entre -1 et 1 et  $U_{moy}$  est commandable entre  $U_{moy} = 0$  et  $U_{moy} = +\frac{V\sqrt{2}}{\pi}$ . **Ce convertisseur n'est pas réversible en tension.**

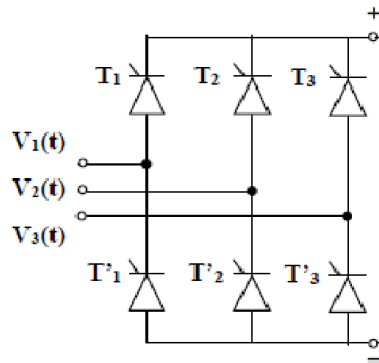
### a. Redresseurs triphasés en ponts

Le redresseur en pont triphasé le plus utilisé est le PD3 à thyristors (06 thyristors) dont la valeur moyenne de la tension de sortie est:

$$U_{moy} = \frac{3V\sqrt{6}}{\pi} \cos(\alpha).$$

Pour  $\alpha$  variant entre  $-\pi$  et  $\pi$ ,  $\cos(\alpha)$  varie entre -1 et 1 et  $U_{moy}$  est commandable entre

$U_{moy} = -\frac{3V\sqrt{6}}{\pi}$  et  $U_{moy} = \frac{3V\sqrt{6}}{\pi}$ . **Ce convertisseur est réversible en tension (la tension de sortie peut être positive et peut aussi être négative).**



**Figure 5.** Redresseur PD3 à thyristors

### Remarques:

**R1/** En pratique  $\alpha$  ne peut pas prendre des valeurs supérieures à  $150^\circ$  (Butée onduleur).

**R2/** En remplaçant les thyristors  $T'_1$ ,  $T'_2$  et  $T'_3$  par des diodes, nous obtenons le PD3 mixte dont la valeur moyenne de la tension de sortie est donnée par:

$$U_{moy} = \frac{3V\sqrt{6}}{\pi} \left( \frac{1 + \cos(\alpha)}{2} \right)$$

Pour  $\alpha$  variant entre  $-\pi$  et  $\pi$ ,  $\cos(\alpha)$  varie entre -1 et 1 et  $U_{moy}$  est commandable entre

$U_{moy} = 0$  et  $U_{moy} = +\frac{3V\sqrt{6}}{\pi}$ . **Ce convertisseur n'est pas réversible en tension.**

**R3/** En remplaçant chaque thyristor par une diode, nous obtenons le PD3 à diodes dont la valeur moyenne de la tension de sortie est donnée par:

$U_{moy} = \frac{3V\sqrt{6}}{\pi}$  : Ce convertisseur (PD3 à diodes) n'est pas commandable (On ne peut pas régler sa tension de sortie).

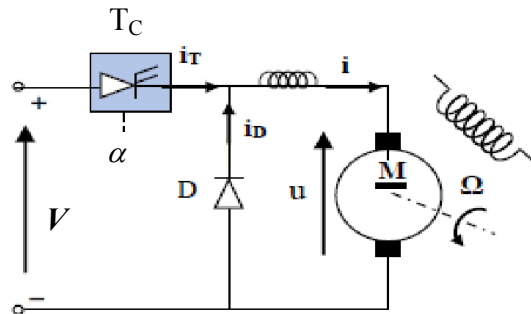
**R4/** Les redresseurs ne sont pas réversibles en courant (le courant ne peut pas passer du côté continu vers le côté alternatif).

## 2.2. Hacheurs

Les plus connus sont:

- Le hacheur série.
- Le hacheur parallèle.
- Le hacheur en demi-pont (combinaison de deux hacheurs série parallèle).
- Le hacheur en pont (qui peut aussi être vu comme étant la combinaison de quatre hacheurs série parallèle).

### A/ Hacheur série

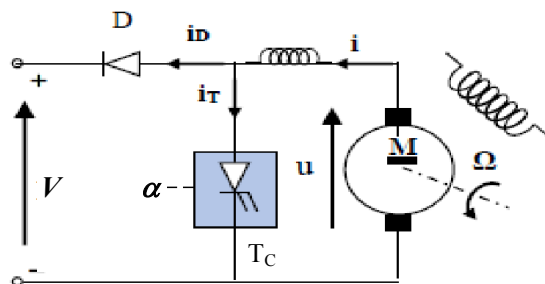


**Figure 6.** Hacheur série alimentant l'induit d'un mcc

Valeur moyenne de la tension de sortie:  $U_{moy} = \alpha V$ , ( $U_{moy} < V$ : abaisseur de tension).

Ce convertisseur est non réversible ni en courant ni en tension. Il permet de faire tourner le moteur dans un seul sens de rotation et ne permet pas de freinage par récupération.

### B/ Hacheur parallèle

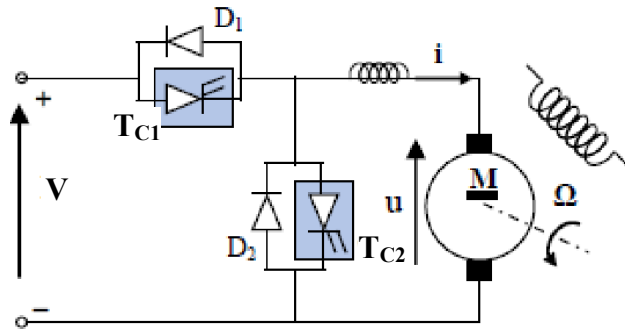


**Figure 7.** Hacheur parallèle alimenté par l'induit d'un mcc

Valeur moyenne de la tension de sortie:  $V = \frac{u}{1-\alpha}$ , ( $u > V$ : élévateur de tension). Ce

convertisseur est aussi non réversible ni en courant ni en tension. Il permet seulement le freinage du moteur par récupération lorsque le moteur est entrain de tourner dans un seul sens de rotation.

### B/ Hacheur en demi-pont (réversible en courant)



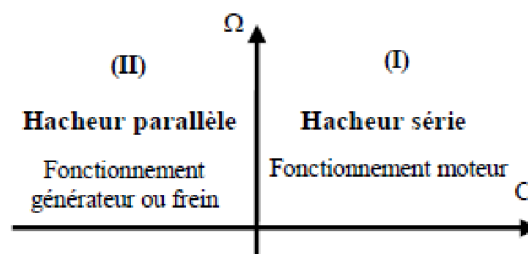
**Figure 8.** Hacheur parallèle alimenté par l'induit d'un mcc

Ce convertisseur est réalisé du hacheur série dévolteur ( $T_{c1}$ ,  $D_2$ ) et le hacheur parallèle survolteur ( $T_{c2}$ ,  $D_1$ ). Sachant que l'induit du mcc est réversible en courant, pour assurer le fonctionnement de ce convertisseur, il faut aussi que la source  $V$  soit réversible en courant (Batterie d'accumulateur), (Figure 8).

**Fonctionnement moteur :**  $T_{c2}$  toujours ouvert et  $T_{c1}$  fermé entre 0 et  $\alpha T$ , alors c'est le hacheur série ( $T_{c1}$ ,  $D_2$ ) qui travaille et alimente l'induit.

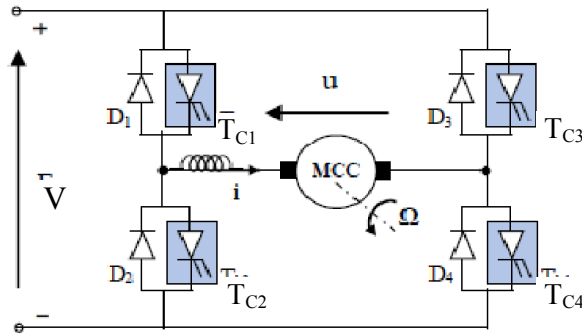
**Fonctionnement en freinage par récupération :**  $T_{c1}$  toujours ouvert et  $T_{c2}$  fermé entre 0 et  $\alpha T$ , alors c'est le hacheur série ( $T_{c2}$ ,  $D_1$ ) qui travaille et alimente la batterie  $V$  qui se charge. Remarquons que le fonctionnement freinage est généralement de courte durée (temps de freinage).

**Remarque:** Ce hacheur n'est pas réversible en tension, alors il ne permet pas d'inverser le sens de rotation (Figure 9).



**Figure 9.** Les deux Quadrants de fonctionnement du mcc à l'aide du hacheur en demi-pont

### B/ Hacheur en pont (hacheur quatre quadrants: réversible en courant)



**Figure 10.** Hacheur en pont alimentant l'induit d'un mcc

Ce variateur est réversible en tension et en courant (il peut inverser la tension  $u$  et le courant  $i$  à condition d'avoir une source  $V$  réversible en courant) et permet un fonctionnement du mcc dans les quatre quadrants, (Figure 10).

**Quadrant (1) :**  $T_{C4}$  est fermé en permanence ( $0 \rightarrow T$ ),  $T_{C1}$  hache la tension (fermé entre  $0$  et  $\alpha T$ :  $\alpha$  rapport cyclique et  $T$  période). C'est la diode  $D_2$  qui assure la roue libre (entre  $\alpha T$  et  $T$ ).

**Quadrant (2) :**  $D_4$  est fermée en permanence ( $0 \rightarrow T$ ) et  $T_{C2}$  hache la tension ( $0 \rightarrow \alpha T$ ). La diode  $D_1$  conduit lorsque  $T_{C2}$  est bloquée ( $\alpha T \rightarrow T$ ).

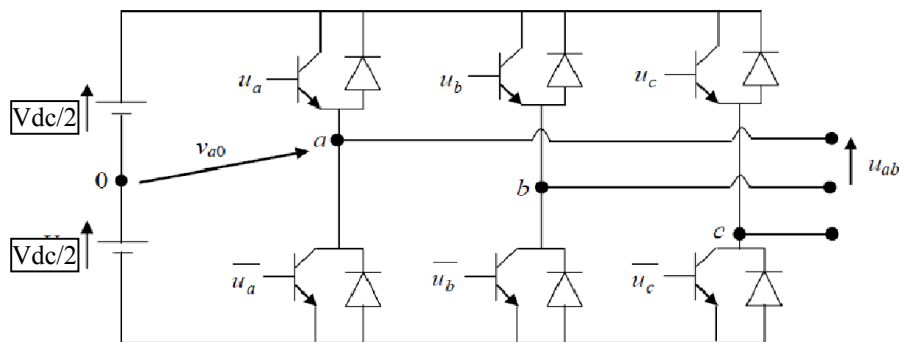
**Quadrant (3) :**  $T_{C3}$  est fermé en permanence ( $0 \rightarrow T$ ),  $T_{C2}$  hache la tension ( $0 \rightarrow \alpha T$ ). La diode  $D_1$  assure la roue libre ( $\alpha T \rightarrow T$ ).

**Quadrant (4) :**  $D_2$  est fermée en permanence ( $0 \rightarrow T$ ) et  $T_{C4}$  hache la tension ( $0 \rightarrow \alpha T$ ). La diode  $D1$  conduit lorsque  $T_{C2}$  est bloquée ( $\alpha T \rightarrow T$ ).

**Remarque:** Avec l'avènement des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), les hacheurs en demi-pont et en pont sont les plus utilisés pour la commande du mcc.

### 2.3. Onduleurs de tension

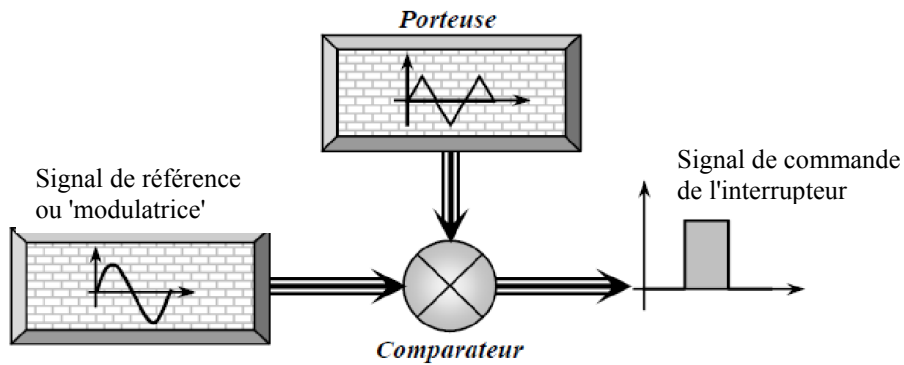
Ce convertisseur est très utilisé pour l'alimentation des



**Figure 11.** Onduleur de tension triphasé à transistors

Dans un même bras, les signaux de commande du demi-bras haut et du demi-bras bas sont complémentaires:  $(\overline{u_a} = 1 - u_a)$ .

**Commande en MLI (modulation de largeurs d'impulsion) triangulo-sinusoidale:** Le principe de la MLI triangulo-sinusoidale consiste à comparer une référence sinusoïdale (modulatrice) à une porteuse triangulaire de haute fréquence (Figure 12).

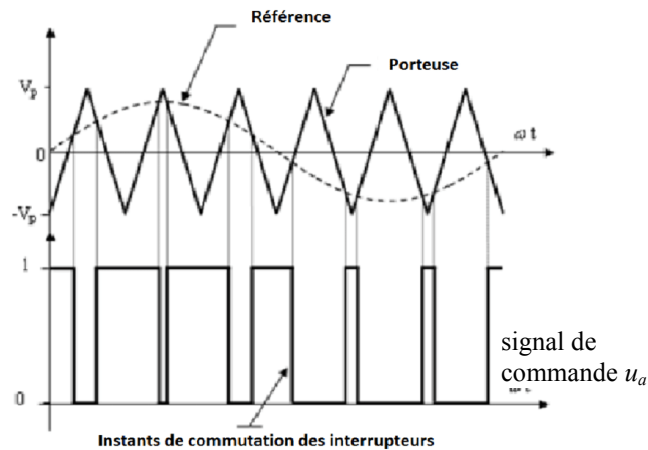


**Figure 12.** Principe de la MLI triangulo-sinusoidale

On définit les deux paramètres suivants de la MLI:

- L'indice de modulation  $M = f_{Porteuse}/f_{Référence}$ .
- Le coefficient de réglage en tension  $r = \text{Amplitude}_{Référence}/\text{Amplitude}_{Porteuse}$ .

Dans l'exemple de la figure 13,  $M = 6$  et  $r = 0.9$ .



**Figure 13.** Signal de commande MLI

**Remarques:**

1/ Comme  $\overline{u_a} = 1 - u_a$ , la tension  $v_{a0}$  a la forme suivante: 
$$v_{a0} = \begin{cases} v_{dc}/2 & \text{si } u_a = 1 \\ -v_{dc}/2 & \text{si } u_a = -1 \end{cases}$$

2/ Les signaux de commande des bras **b** et **c** sont obtenus en comparant respectivement deux références déphasées de  $2\pi/3$  en arrière et en avant par rapport à la phase **a**.

3/ Pour un tel convertisseur, il est plus judicieux d'utiliser une charge en triangle ou bien en étoile sans fil neutre car la tension entre-phases et la tension aux bornes d'une charge montée en étoile sans fil neutre contiennent moins d'harmoniques que la tension  $v_{a0}$ . En effet la suppression du fil neutre fait disparaître les harmoniques multiples de 3 qui font partie de la composante homopolaire.

4/ Pour obtenir un onduleur monophasé en pont, il suffit de supprimer un bras (supprimer le bras **c** par exemple et brancher la charge monophasée entre les points **a** et **b**). Bien entendu, les références des deux bras sont déphasées l'une par rapport à l'autre d'un angle égal à  $\pi$ .

**Rq:** On peut aussi commander cet onduleur en MLI en procédant avec d'autres manières.