

# Chapitre 1

## Onduleur de Tension Monophasé (Hacheur Quatre Quadrant)

### 1.1 Introduction

La commande de la Machine à Courant Continu (MCC) avec un seul respectivement deux sens de rotation nécessite l'utilisation d'un Hacheur Série respectivement un Hacheur Quatre Quadrant. Dans ce chapitre on étudiera l'Hacheur Quatre Quadrant (H4Q) alors que l'Hacheur Série sera vue en TD. L'Hacheur Quatre Quadrant étant aussi un Onduleur Monophasé, on parlera donc de l'Onduleur car ceci permettra de relier ce chapitre au chapitre sur l'onduleur triphasé.

### 1.2 Définition de l'Onduleur Monophasé

L'Onduleur de tension Monophasé permet de générer une tension monophasé d'amplitude et de fréquence variable. Son principe de fonctionnement est basé sur la construction de la tension alternative à partir de trois niveaux de tension ( $+E$ ,  $0$ ,  $-E$ ). A ce convertisseur on adjoint un filtre ( $L, C$ ) pour filtrer les harmoniques de hautes fréquences.

### 1.3 Topologie de l'Onduleur

La construction de l'onduleur de tension monophasé et celui triphasé est basé sur les deux choses suivantes : La Cellule de Commutation et le Bras d'Onduleur.

#### 1.3.1 Cellule de Commutation

Les onduleurs sont conçus à base de cellules de commutation; laquelle dépend du type d'onduleur (tension ou courant). Dans le cas d'un onduleur de tension, cette cellule est réalisée par une mise en parallèle d'un transistor de puissance et une diode de puissance en anti-parallèle. La configuration de cette cellule permet de bloquer la tension positive, alors que le courant peut circuler dans les deux sens; voir la figure. Les transistors de puissance utilisés sont : L'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) et le Mosfet de puissance (Field Effect Transistor).



Figure 1-1: Cellule de commutation en tension.



(a) IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). (b) Mosfet de puissance (Field Effect Transistor).

Figure 1-2: Transistor de puissance.

### 1.3.2 Bras d'Onduleur de Tension

Un bras d'onduleur de tension est réalisé par la mise en série vertical de deux cellules de commutation de tension. Dans un bras d'onduleur de tension une condition importante pour le bon fonctionnement doit être respectée; En effet les deux cellules de commutation (Transistor) d'un bras doivent être complémentaires, lorsqu'une cellule (transistor) est passante l'autre est bloquée. Le transistor de puissance se comporte comme un interrupteur *ideal* (switch). Dans la figure (b) la diode n'est pas représentée car on ne s'intéresse qu'à la tension.

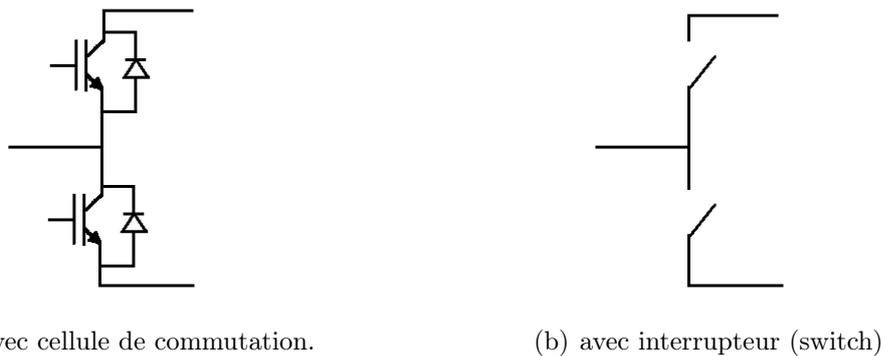


Figure 1-3: Bras d'onduleur de tension.

### 1.3.3 Onduleur de Tension Monophasé et Triphasé

Les onduleurs de tension monophasé respectivement triphasé, sont obtenus par la mise en parallèle de deux bras d'onduleur respectivement de trois bras d'onduleur. Voir les deux figures

ci-dessous.

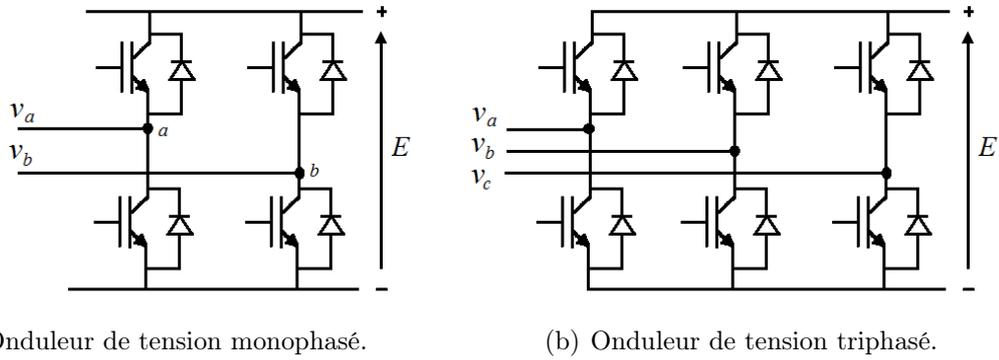


Figure 1-4: Onduleurs de tension.

## 1.4 Etude de l'Onduleur monophasé (H4Q)

L'onduleur monophasé est reproduit ci-dessous avec des interrupteurs (Switchs). Les quatre transistors de puissance sont notés  $Tr$  dans l'ordre indiqué sur la figure. L'onduleur génère une tension carrée entre les points  $a$  et  $b$ , cette dernière tension est filtrée grâce au filtre  $(L, C)$  pour obtenir la tension moyenne notée  $V_0$ . La tension moyenne  $V_0$ , qui nous intéresse ici, est celle qui est appliquée aux bornes de la charge. Cette dernière charge peut être résistive ou inductive.

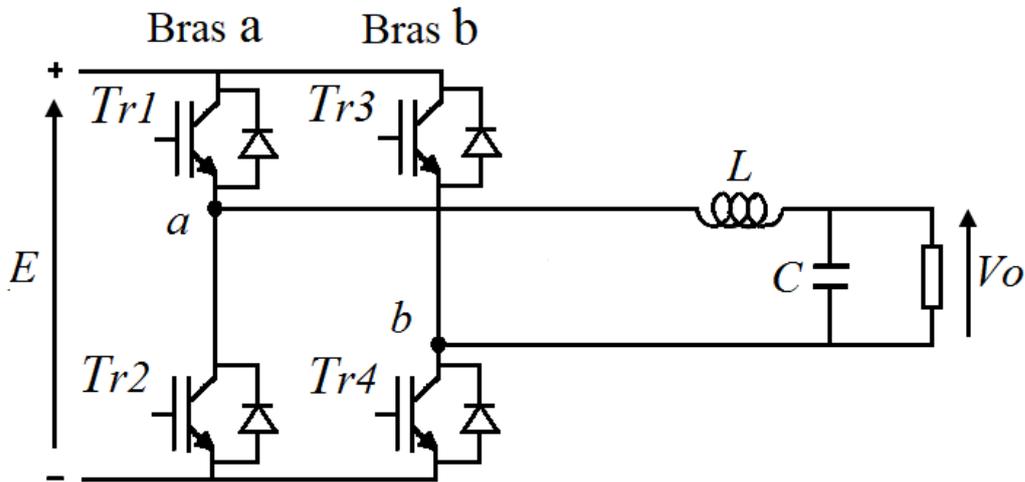


Figure 1-5: Onduleur monophasé avec filtre  $(L, C)$  et charge.

### 1.4.1 Tension entre les nodes $a$ et $b$

En respectant la condition de bon fonctionnement pour chacun des deux bras, l'onduleur monophasé (H4Q) peut générer entre les nodes  $a$  et  $b$  les quatre différentes tensions  $(+E, -E, 0^+, 0^-)$

telles que données par le tableau 1.1. Dans ce tableau, la deuxième colonne montre les transistors à l'état *on*, la troisième colonne donne la tension entre les nodes *a* et *b*. La dernière colonne donne le vecteur d'état correspondant et où les deux indices indiquent l'état *on* or *off* du premier transistor de chacun des deux bras ( $T_{r1}$ ) and ( $T_{r3}$ ).

Table 1.1: The four possible states and corresponding voltage values.

State	Transistors On	$v_{ab}$	State vector
1	$T_{r1}, T_{r3}$	$0^+$	$V_{11}$
2	$T_{r2}, T_{r3}$	$-E$	$V_{01}$
3	$T_{r1}, T_{r4}$	$+E$	$V_{10}$
4	$T_{r2}, T_{r4}$	$0^-$	$V_{00}$

## 1.4.2 Modélisation

L'objectif de cette section est de montrer comment générer une tension moyenne de forme sinusoïdale ou de forme continue quelconque. Pour réaliser cette objectif on considère d'abord les points suivants :

1) On considère une certaine période de temps  $T = 1/f$ .

2) Cette période est subdivisée en trois durées de temps notés  $T_1, T_2$  et  $T_0$ ; on fait correspondre la durée de temps  $T_1$  à la tension ( $+E$ ), la durée de temps  $T_2$  à la tension ( $-E$ ) et enfin la durée de temps  $T_0$  est partagée à égalité entre les deux tensions ( $0^+$ ) et ( $0^-$ ). Les trois durées de temps notés  $T_1, T_2$  et  $T_0$  peuvent prendre leurs valeurs dans l'intervalle  $[0, T]$  tel que :

$$T = T_1 + T_2 + T_0 \quad \text{where : } \begin{cases} 0 \leq T_1 < T \\ 0 \leq T_2 < T \\ 0 \leq T_0 < T \end{cases} \quad (1.1)$$

A ces durées de temps, on fait correspondre les rapports cycliques suivants et ce en divisant par la période  $T$  :

$$1 = d_1 + d_2 + d_0 \quad \text{where : } \begin{cases} 0 \leq d_1 < 1 \\ 0 \leq d_2 < 1 \\ 0 \leq d_0 < 1 \end{cases} \quad (1.2)$$

### 1.4.2.1 Construction de la tension $V_{ab}$

En utilisant les quatre tensions élémentaires ( $+E$ ), ( $-E$ ),  $0^+$  et  $0^-$  on peut construire la tension périodique de période  $T$  telle que donnée par la figure ci-dessous. Dans cette figure, les vecteurs d'états permettant de générer les différentes tensions élémentaires sont indiqués. Cette tension étant périodique, selon l'analyse de Fourier on peut alors la décomposer en sa valeur moyenne plus une somme infinie de termes harmoniques. Les termes harmoniques sont filtrés par un filtre ( $L, C$ ), et en sortie du filtre on aura donc la tension moyenne.

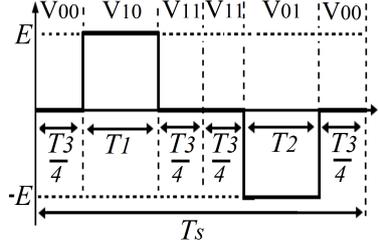


Figure 1-6: Tension construite à partir des tensions élémentaires.

### 1.4.2.2 Tension moyenne $V_0$

D'après l'analyse de fourier la tension  $V_{ab}$  peut être décomposée selon la relation suivante :

$$V_{ab}(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)\}$$

$$\text{where : } \begin{cases} a_0(t) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V_{ab}(t) dt \\ a_n(t) = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V_{ab}(t) \cos(n\omega t) dt \\ b_n(t) = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V_{ab}(t) \sin(n\omega t) dt \end{cases} \quad (1.3)$$

La tension moyenne  $v_o(t)$  qui nous intéresse ici correspond au terme  $a_0$ , elle est donc donnée par :

$$v_o(t) = \frac{1}{T} \left\{ \int_{T_0/4}^{T_0/4+T_1} E dt - \int_{3T_0/4+T_1}^{T-T_0/4} E dt \right\} = E (T_1 - T_2) / T = E (d_1 - d_2) \quad (1.4)$$

En introduisant maintenant une nouvelle variable noté  $d$  est définie par la différence entre  $d_1 \in [0, 1]$  et  $d_2 \in [0, 1]$ , la tension moyenne  $v_o$  que génère l'onduleur monophasé (H4Q) sera donc donnée par :

$$\begin{aligned} d &= (d_1 - d_2) \Rightarrow d \in [-1, 1] \\ v_o(t) &= E d \Rightarrow v_o(t) \in [-E, E] \end{aligned} \quad (1.5)$$

Ceci veut dire que la tension moyenne  $v_o$  que l'on peut générer en utilisant ce convertisseur peut être de signe positive ou négative avec un maximum égale à la tension d'alimentation du convertisseur  $E$ .

### 1.4.2.3 Rapports cycliques pour les deux bras

Dans l'équation précédente (1.5), les rapports cycliques  $(d_1, d_2)$  ne sont pas les rapports à appliquer aux deux bras de l'onduleurs pour générer la tension moyenne  $v_o(t)$ . Les deux rapports cycliques avec lesquels il faut attaquer les deux bras sont  $d_a$  et  $d_b$  et ils sont définis comme suit :

$$\begin{cases} d_a = T_a / T \\ d_b = T_b / T \end{cases} \quad (1.6)$$

Où  $T_a$  correspond au laps de temps durant lequel le premier transistor  $T_{r1}$  du premier bras  $a$  est à l'état  $On$ , de même  $T_b$  correspond au laps de temps durant lequel le premier transistor  $T_{r3}$  du deuxième bras  $b$  est à l'état  $On$ . A partir de la figure 1-6 et en considérant cette dernière

définition, il est clair que ces deux rapports cycliques sont obtenus tels que :

$$\begin{cases} T_a = T_1 + T_0/2 \\ T_b = T_2 + T_0/2 \end{cases} \quad (1.7)$$

En remplaçant  $T_0$  par  $T_0 = T - T_1 - T_2$  on trouve :

$$\begin{cases} T_a = [T + T_1 - T_2]/2 \\ T_b = [T - (T_1 - T_2)]/2 \end{cases} \quad (1.8)$$

Donc les rapports cycliques  $d_a$  et  $d_b$  sont donnés par :

$$\begin{cases} d_a = \frac{1}{2T}[T + T_1 - T_2] = \frac{1}{2}[1 + d_1 - d_2] = \frac{1}{2}[1 + d] \\ d_b = \frac{1}{2T}[T - (T_1 - T_2)] = \frac{1}{2}[1 - (d_1 - d_2)] = \frac{1}{2}[1 - d] \end{cases} \quad (1.9)$$

#### 1.4.2.4 Modèle final de l'onduleur Mono (H4Q)

A partir des équations 1.5 et 1.9 le modèle final de notre onduleur monophasé (H4Q) est donné par :

$$\begin{cases} d \in [-1, 1] \\ V_0 = E d \in [-E, E] \\ d_a = \frac{1}{2}[1 + d] \\ d_b = \frac{1}{2}[1 - d] \end{cases} \quad (1.10)$$

Ceci veut dire que l'on appliquant une entrée  $d \in [-1, 1]$  la sortie de notre convertisseur est  $V_0 = E d \in [-E, E]$  et les rapports cycliques à appliquer aux deux bras de notre onduleur sont calculés par  $d_a = \frac{1}{2}[1 + d]$  et  $d_b = \frac{1}{2}[1 - d]$ . Autrement dit, on peut tracer le schéma de notre onduleur monophasé (H4Q) comme suit :

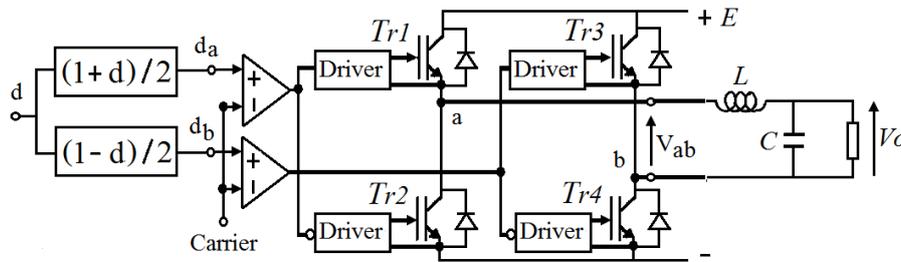


Figure 1-7: Schéma complet de l'onduleur Mono (H4Q).

#### 1.4.2.5 Simulation

Pour une tension d'alimentation  $E = 24Volt$ , on applique trois différentes formes pour le signal d'entrée  $d$  et on relève les signaux  $d_a$ ,  $d_b$  et la tension moyenne aux bornes de la charge  $V_0$  :

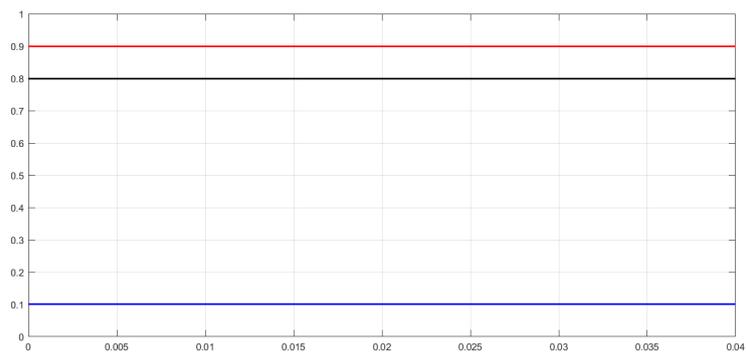


Figure 1-8:  $d_a$  et  $d_b$  pour  $d = 0.8$  constant.

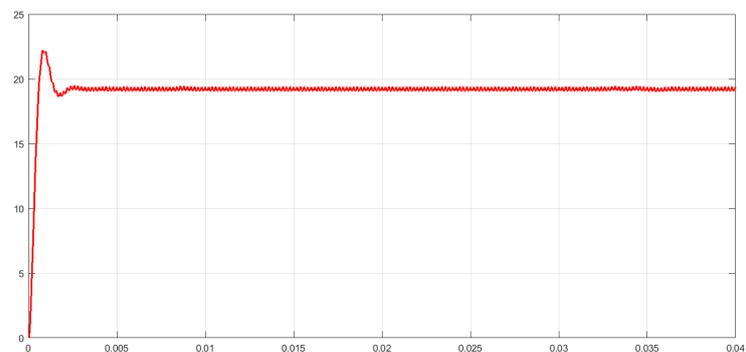


Figure 1-9:  $V_0$  pour  $d = 0.8$  constant.

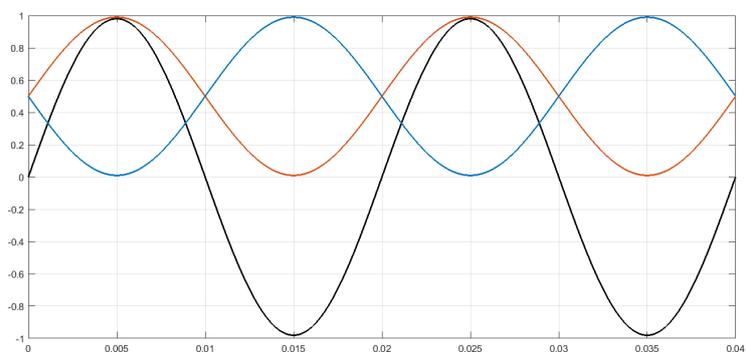


Figure 1-10:  $d_a$  et  $d_b$  pour  $d$  sinusoïdale.

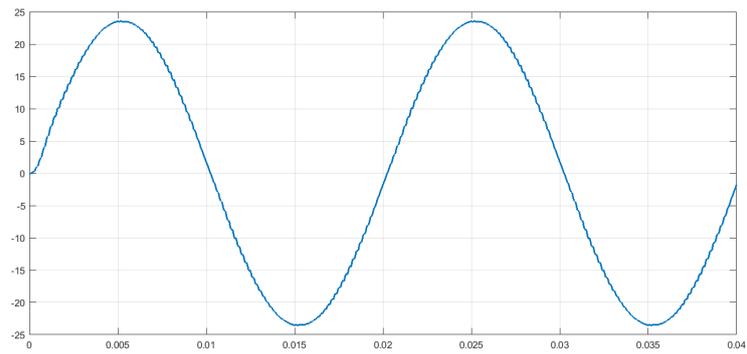


Figure 1-11:  $V_0$  pour  $d$  sinusoïdale.

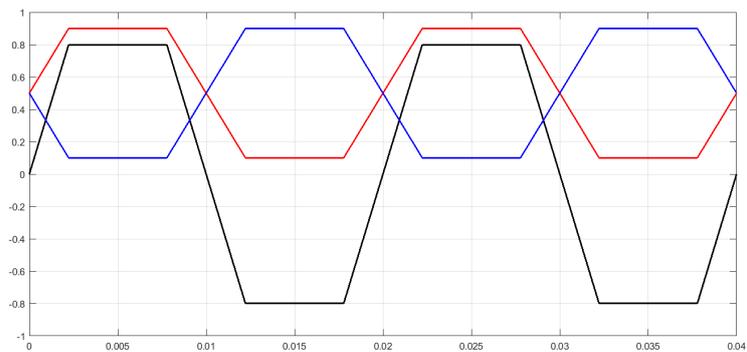


Figure 1-12:  $d_a$  et  $d_b$  pour  $d$  trapèzoïdale.



Figure 1-13:  $V_0$  pour  $d$  trapèzoïdale.

# Chapitre 2

## Onduleur de tension triphasé

### 2.1 Introduction

La commande des machines triphasées impose la variation de la fréquence et de l'amplitude de la tension d'alimentation triphasée des machines triphasées. Pour obtenir cette variation on utilise le convertisseur de puissance dit "onduleur triphasé". A ce convertisseur on adjoint un filtre  $L, C$  pour filtrer les harmoniques de hautes fréquences.

### 2.2 Transformations usuelles

Dans l'étude des machines triphasés et l'onduleur, on fait appel à des transformations permettant le passage d'un repère de coordonnées à un autre. On rappelle ici ces transformations.

#### 2.2.1 Transformée de Concordia

La transformée de Concordia où bien  $(\alpha, \beta, 0)$ , est la transformée qui permet de passer du repère fixe  $(a, b, c)$  au repère fixe  $(\alpha, \beta, 0)$ . Elle permet de ramener un système sinusoïdale triphasé équilibré (tension, courant, flux,  $\dots$ ) en un système diphasé sinusoïdale. Elle est donnée par la matrice orthogonale  $C^T = C^{-1}$  suivante :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

#### 2.2.2 Transformée de rotation

La transformer de rotation permet de réaliser une rotation selon un angle  $\theta$ . C'est la matrice de rotation  $R(\theta)$  suivante :

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

### 2.2.3 Transformée de Park

La transformée de Park où bien  $(d, q, o)$  (direct-quadrature-zero), permet de passer du repère fixe  $(a, b, c)$  au repère mobile  $(d, q, o)$ . Elle ramène un système sinusoïdale triphasé équilibré (tension, courant, flux,  $\dots$ ) en un système diphasé continu. Elle est donnée par la matrice orthogonale  $P^T = C^T R(\theta)^T = P^{-1}$  suivante :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

## 2.3 Space Vector Modulation SVPWM

Le rôle de l'onduleur est de générer, à partir d'une tension continu, une tension triphasée équilibrée modulable en amplitude et en fréquence. Pour générer cette tension, on utilise la MLI vectorielle (SVPWM). On cherche donc à déterminer les trois entrées de commande  $d_a$ ,  $d_b$  et  $d_c$  de telle manière à moduler le signal triphasé en amplitude et en fréquence. Ces trois entrées ne sont autres que les rapports cycliques appliqués aux trois bras de l'onduleur.

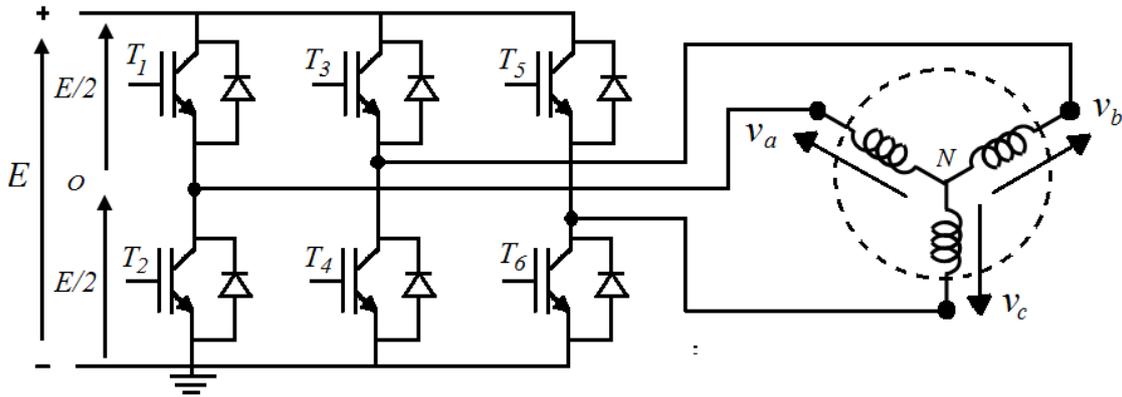


Figure 2-1: Onduleur de tension couplé au stator d'une machine triphasée.

Les tensions de phases  $(v_{an}, v_{bn}, v_{cn})$  aux bornes de la charge triphasée (ex : moteur) peuvent être déterminées en fonction des tensions  $(v_{ao}, v_{bo}, v_{co})$  par la transformation (2.6) où le point  $o$  est une référence fictive. Les valeurs de ces dernières tensions dépendent de la l'état des transistors (*fermé, ouvert*). Pour déterminer la transformation reliant les tensions  $(v_{ao}, v_{bo}, v_{co})$  aux tensions  $(v_{an}, v_{bn}, v_{cn})$  on considère les relations vectorielles suivantes :

$$\begin{cases} v_{an} = v_{ao} - v_{n0} \\ v_{bn} = v_{bo} - v_{n0} \\ v_{cn} = v_{co} - v_{n0} \\ 0 = v_{an} + v_{bn} + v_{cn} \end{cases} \quad \text{Tension triphasée équilibrée} \quad (2.4)$$

$$\Rightarrow v_{ao} + v_{bo} + v_{co} - 3 v_{n0} = 0 \quad \Rightarrow \quad v_{n0} = \frac{1}{3} [v_{ao} + v_{bo} + v_{co}] \quad (2.5)$$

En remplaçant (2.5) dans (2.4) on trouve la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

En considérant donc que pour un bras d'onduleur un seul transistor est fermé à la fois, et en utilisant la transformation précédente on peut déterminer le tableau suivant :

State	Transistors fermés	$v_{an}$	$v_{bn}$	$v_{cn}$	Space vector
0	$T_2, T_4, T_6$	0	0	0	$V_{000}$
1	$T_1, T_4, T_6$	$\frac{2}{3} E$	$-\frac{1}{3} E$	$-\frac{1}{3} E$	$V_{100}$
2	$T_1, T_3, T_6$	$\frac{1}{3} E$	$\frac{1}{3} E$	$-\frac{2}{3} E$	$V_{110}$
3	$T_2, T_3, T_6$	$-\frac{1}{3} E$	$\frac{2}{3} E$	$-\frac{1}{3} E$	$V_{010}$
4	$T_2, T_3, T_5$	$-\frac{2}{3} E$	$\frac{1}{3} E$	$\frac{1}{3} E$	$V_{011}$
5	$T_2, T_4, T_5$	$-\frac{1}{3} E$	$-\frac{1}{3} E$	$\frac{2}{3} E$	$V_{001}$
6	$T_1, T_4, T_5$	$\frac{1}{3} E$	$-\frac{2}{3} E$	$\frac{1}{3} E$	$V_{101}$
7	$T_1, T_3, T_5$	0	0	0	$V_{111}$

Table 2.1: Les 8 états possibles et les vecteurs correspondant.

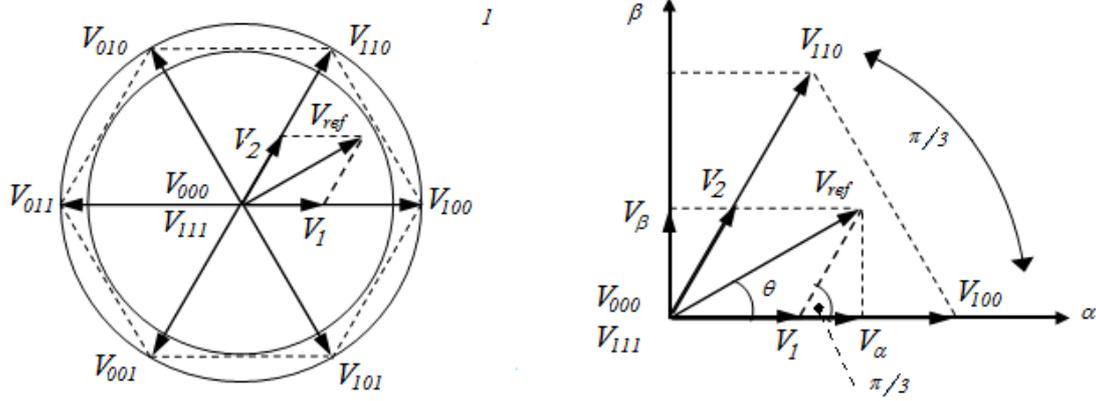
En appliquant la transformation de Concordia, les coordonnées polaires des vecteurs précédents sont données dans le tableau 2.2. Les six vecteurs non nuls et ayant le même module ( $U = \sqrt{\frac{2}{3}} E$ ) découpent le plan  $(\alpha, \beta)$  en six secteurs tel que tracer sur la Figure 2-2.

State	Space vector	axe $\alpha$	axe $\beta$
0	$V_{000}$	0	0
1	$V_{100}$	$U$	0
2	$V_{110}$	$\frac{1}{2} U$	$\frac{\sqrt{3}}{2} U$
3	$V_{010}$	$-\frac{1}{2} U$	$\frac{\sqrt{3}}{2} U$
4	$V_{011}$	$-U$	0
5	$V_{001}$	$-\frac{1}{2} U$	$-\frac{\sqrt{3}}{2} U$
6	$V_{101}$	$\frac{1}{2} U$	$-\frac{\sqrt{3}}{2} U$
7	$V_{111}$	0	0

Table 2.2: Les 8 vecteurs dans le repère  $\alpha, \beta$ .

A partir du premier secteur, on cherche les projections de la tension de référence  $V_{ref}$  sur les deux vecteurs du secteur  $V_{100}$  et  $V_{110}$ . On réalise d'abord la projection de la tension  $V_{ref}$  selon les axes  $(\alpha, \beta)$  et on trouve :

$$\begin{cases} V_\alpha = \cos(\theta) V_{ref} \\ V_\beta = \sin(\theta) V_{ref} \end{cases} \quad (2.7)$$



(a) Secteurs formés par les six vecteurs non nuls. (b) Agrandissement du premier secteur.

Figure 2-2: Les vecteurs générés par l'onduleur et la tension de référence (repère  $\alpha, \beta$ ).

D'autre par la projection du vecteur  $V_2$  selon les axes  $\alpha$  et  $\beta$  donne :

$$\begin{cases} V_\alpha - V_1 = \cos(\frac{\pi}{3}) V_2 \\ V_\beta = \cos(\frac{\pi}{6}) V_2 \end{cases} \quad (2.8)$$

En remplaçant  $V_\beta$  par sa valeur dans la deuxième équation et sachant que  $\cos(\frac{\pi}{6}) = \sqrt{3}/2$ , on détermine l'équation de  $V_2$  comme suit :

$$V_2 = [1/\cos(\frac{\pi}{6})] V_\beta = [2/\sqrt{3}] \sin(\theta) V_{ref} \quad (2.9)$$

Dans ce cas  $V_1$  sera donnée par :

$$\begin{cases} V_1 = V_\alpha - \cos(\frac{\pi}{3}) V_2 \\ V_1 = \cos(\theta) V_{ref} - [2/\sqrt{3}] \cos(\frac{\pi}{3}) \sin(\theta) V_{ref} \\ V_1 = [2/\sqrt{3}] \{ [\sqrt{3}/2] \cos(\theta) - \cos(\frac{\pi}{3}) \sin(\theta) \} V_{ref} \end{cases} \quad (2.10)$$

Sachant que  $\sin(\frac{\pi}{3}) = \sqrt{3}/2$  on a :

$$V_1 = [2/\sqrt{3}] \left\{ \sin(\frac{\pi}{3}) \cos(\theta) - \cos(\frac{\pi}{3}) \sin(\theta) \right\} V_{ref} \quad (2.11)$$

En utilisant la relation trigonométrique  $\sin(\alpha - \beta) = \sin(\alpha) \cos(\beta) - \cos(\alpha) \sin(\beta)$ ; on trouve finalement pour  $V_1$  :

$$V_1 = [2/\sqrt{3}] \sin(\frac{\pi}{3} - \theta) V_{ref} \quad (2.12)$$

Finalement la projection de la tension  $V_{ref}$  sur les deux vecteurs  $V_{100}$  et  $V_{110}$  du premier secteur est exprimé par les tensions  $V_1$  et  $V_2$  comme suit :

$$\begin{cases} V_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\frac{\pi}{3} - \theta) V_{ref} \\ V_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\theta) V_{ref} \end{cases} \quad (2.13)$$

Pour obtenir la projection de la tension  $V_{ref}$  dans les cinq autres secteurs il suffit de ramener cette tension dans le premier secteur. Ceci peut être obtenu en remplaçant, dans l'accolade précédente, l'angle  $\theta$  par  $(\theta - (i - 1) \frac{\pi}{3})$  où  $i = 2 \dots 6$

### 2.3.1 Construction de $V_{ref}$

Le but recherché étant la construction de la tension  $V_{ref}$  à partir des tensions générées par l'onduleur. A partir des projections réalisées ci-haut, on peut générer la tension  $V_{ref}$  dans chacun des six secteurs en utilisant les deux tensions du secteur et les deux tensions nulles. En considérant toujours le premier secteur, on peut écrire :

$$V_{ref} T = V_{100} t_1 + V_{110} t_2 + (V_{000} \text{ ou } V_{111}) t_0 \quad (2.14)$$

Cette relation sous entend que l'on applique la tension  $V_{100}$  pendant un laps de temps  $t_1$ ,  $V_{110}$  pendant un laps de temps  $t_2$  et enfin  $V_{000}$  où bien  $V_{111}$  pendant un laps de temps  $t_0$ ; telle que  $T = t_1 + t_2 + t_0$ . D'autre par, les deux tensions  $V_1, V_2$  peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{cases} V_1 = V_{100} \frac{t_1}{T} \\ V_2 = V_{110} \frac{t_2}{T} \end{cases} \quad (2.15)$$

Par comparaison entre ces deux dernières équations, on peut tirer les trois rapports cycliques ( $d_1 = \frac{t_1}{T}$ ,  $d_2 = \frac{t_2}{T}$ ,  $d_0 = \frac{t_0}{T}$ ) dans le premier secteur.

$$\begin{cases} d_1 = \frac{2}{\sqrt{2}} \frac{V_{ref}}{E} \sin(\frac{\pi}{3} - \theta) \\ d_2 = \frac{2}{\sqrt{2}} \frac{V_{ref}}{E} \sin(\theta) \\ d_0 = 1 - d_1 - d_2 \end{cases} \quad (2.16)$$

Comme précisé ci-haut, les trois rapports cycliques ( $d_1, d_2, d_0$ ) dans les cinq autres secteurs sont obtenus en remplaçant l'angle  $\theta$  par  $(\theta - (i - 1) \frac{\pi}{3})$  où  $i = 2 \dots 6$ .

Le module de la tension de référence dans le plan  $(\alpha, \beta)$  est donné par :  $V_{ref} = \sqrt{3} V_{eff}$  où  $V_{eff}$  est la tension efficace du signal triphasé dans le plan  $(a, b, c)$ . Dans ce cas les rapports cycliques précédent sont comme suit :

$$\begin{cases} d_1 = \frac{2}{\sqrt{2}} \sqrt{3} \frac{V_{eff}}{E} \sin(\frac{\pi}{3} - \theta) \\ d_2 = \frac{2}{\sqrt{2}} \sqrt{3} \frac{V_{eff}}{E} \sin(\theta) \\ d_0 = 1 - d_1 - d_2 \end{cases} \quad (2.17)$$

### 2.3.2 Tension Efficace Maximale

Les six tensions non nulles générées par l'onduleur dans le plan  $(\alpha, \beta)$  forment un hexagone régulier. De l'étude de hexagone on a les relations suivantes où  $a, R, r$  sont respectivement la longueur d'un côté de l'hexagone et les rayons du cercle extérieur et intérieur :

$$\begin{cases} r = \frac{1}{2} a \sqrt{3} \\ R = a = U \end{cases} \implies V_{effmax} = \frac{1}{2} U = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} E \quad (2.18)$$

### 2.3.3 Alternating Zero Vectors SVPWM

Les trois rapports cycliques ( $d_1, d_2, d_0$ ) permettent de générer, dans chaque secteur, la tension  $V_{ref}$  donnée dans le repère  $(\alpha, \beta)$ ; mais ils ne constituent pas les rapports cycliques qu'il faut appliquer au trois bras de l'onduleur. En effet, les rapports cycliques ( $d_a, d_b, d_c$ ) correspondant aux trois bras de l'onduleur de tension sont obtenus en fonctions des rapports cycliques ( $d_1, d_2, d_0$ ) tout en prenant en considération le fonctionnement de l'onduleur.

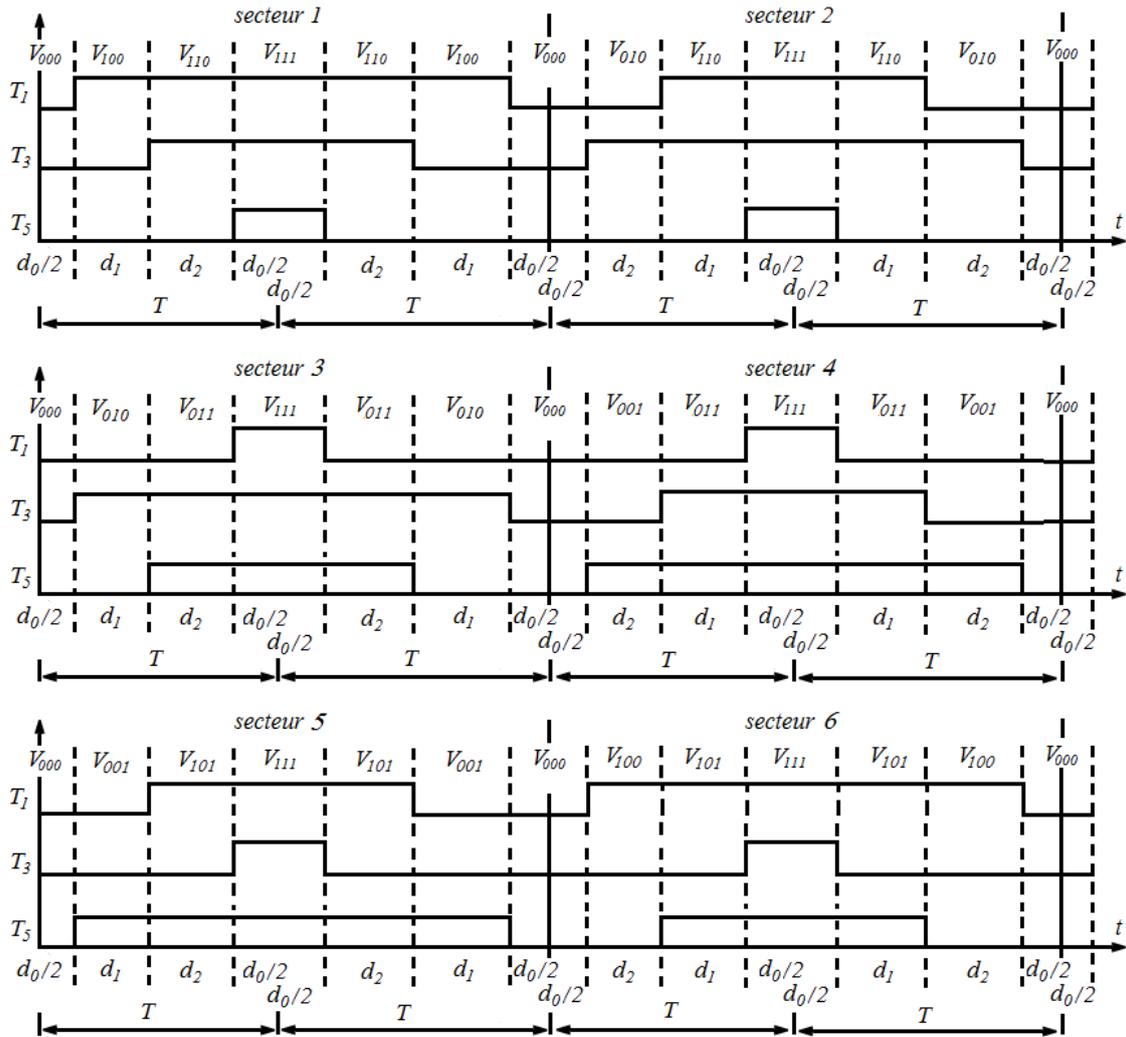
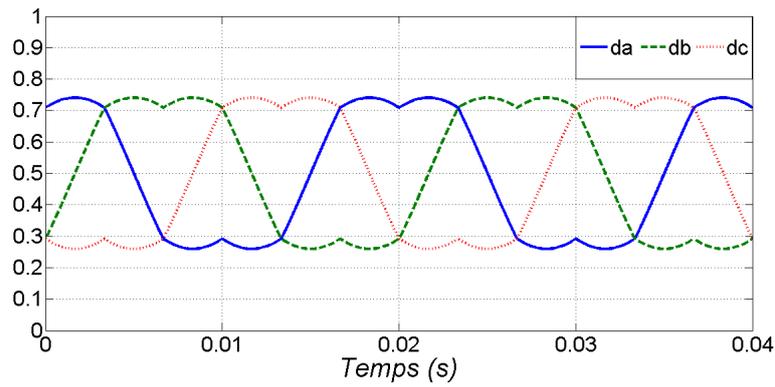


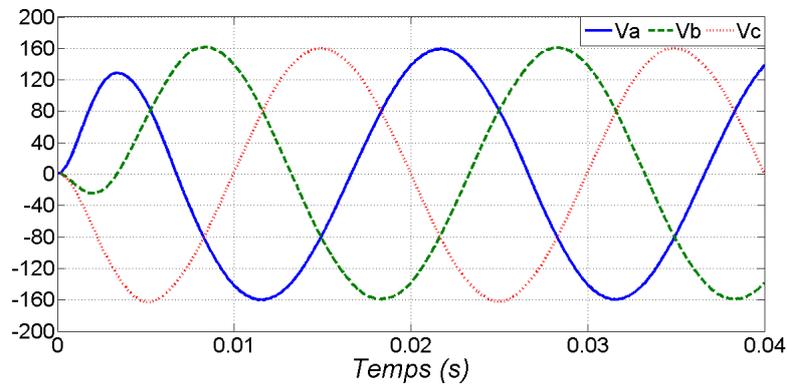
Figure 2-3: Alternating Zero SVM.

### 2.3.4 Simulation

Les figurent suivantes montrent les résultats de simulation de l'onduleur triphasé. La tension de référence est  $V_{ref} = 110V$  efficace et  $f = 50Hz$ . La figure *a* montre les trois rapports cycliques  $d_a, d_b, d_c$  appliqués aux trois bras de l'onduleur, alors que la figure *b* montre les trois tensions de phase  $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  générées par l'onduleur.



(a) Rapports cycliques pour les trois bras.



(b) Tensions de phase correspondantes.

Figure 2-4: Alternating Zero SVM avec une référence  $V_{ref} = 110V$  efficace et  $f = 50Hz$ .

THIS PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

# Chapitre 3

## Machine à Courant Continu

### 3.1 Introduction

La commande des machines électriques est un domaine multidisciplinaire; il nécessite la connaissance des machines électriques, de l'électronique de puissance et de l'automatique de commande. Généralement, l'objectif étant de réaliser l'asservissement de la vitesse de rotation ou du couple en fonctionnement moteur ou bien la régulation de la tension générée en fonctionnement génératrice. En effet, les machines électriques sont des convertisseurs électromécaniques permettant la conversion bidirectionnelle de l'énergie entre une installation électrique et un dispositif mécanique. On a donc les deux types de fonctionnement suivants :

- Moteur: l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique.
  1. Vitesse variable : ascenseur, monte-charge, ...
  2. Vitesse constance : convoyeur ...
  3. Couple constant : broyeur ...
- Génératrice: l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique.
  1. Eolienne
  2. Groupe électrogène

Les machines électriques classiques, ou base, se déclinent en les trois types suivants :

1. Machine à courant continu MCC.
2. Machine synchrone triphasée MS.
3. Machine asynchrone triphasée MAS.

Dans ce chapitre on s'intéresse à la machine à courant continu *MCC*.

### 3.2 Rappel de notions de magnétisme

La construction des machines électriques (*MCC*, *MS*, *MAS*) et leur fonctionnement (*moteur*, *génératrice*) sont basés sur les lois de l'électromagnétisme. En effet, pour comprendre de

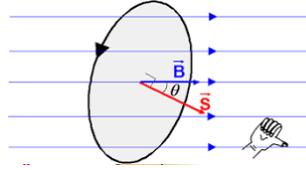


Figure 3-1: Flux magnétique à travers une surface orientée.

manière simple le fonctionnement et la construction de base de ces machines, il suffit de considérer un cadre en fil conducteur (forme très simple) constitué de  $N$  spires et de voir les phénomènes électromagnétiques dont il est le siège. Ces phénomènes électromagnétiques sont décrits par les lois simplifiées suivantes.

### 3.2.1 Flux magnétique

Le flux magnétique  $\phi$  (*Weber: Wb ou Volt second: Vs*) est généré par une induction magnétique  $B$  (*Tesla*) à travers une surface orientée  $S$  ( $m^2$ ) encerclée par un fil conducteur, voir Figure.3-1. Il est donné par le produit scalaire :  $\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B S \cos(\theta)$ . L'induction magnétique  $B$  est générée par un aimant permanent ou bien un électro-aimant. Pratiquement, la variation du flux magnétique se réalise par variation de l'induction  $B$  ou bien par la variation de la position  $\theta$ . Remarquer que le flux  $\phi$  dépend du nombre  $N$  de spires constituant le cadre en fil conducteur tel que :

$$\phi_T = N B S \cos(\theta) \quad (3.1)$$

*Remarque.* Si l'induction est générée par un électro-aimant, *i.e* enroulement de fil conducteur autour d'un noyau ferromagnétique et parcouru par un courant  $i$ , alors l'induction  $B$  est proportionnelle au courant  $i$  tant que le matériau ferromagnétique n'atteint pas la saturation.

$$B = f(i) = k_f i \quad (3.2)$$

### 3.2.2 Loi de Faraday Lenz

La variation temporelle du flux magnétique  $\phi$  à travers un cadre en fil conducteur engendre aux bornes de ce dernier une force électromotrice *f.e.m* induite  $e$  (*Volt*), voir Figure.3-2. La tension *f.e.m* induite est donnée par la loi de Faraday Lenz :  $e = -\frac{d\phi}{dt}$ . Si le cadre contient  $N$  spires; alors  $e = -\frac{d\phi_T}{dt} = -N\frac{d\phi}{dt}$ . Noter ici que si le cadre tourne à une vitesse angulaire  $\omega$ , alors la tension *f.e.m*  $e$  est de forme sinusoïdale telle que :

$$e = -\frac{d\phi_T}{dt} = -N\frac{d\phi}{dt} = N B S \omega \sin(\theta) \quad (3.3)$$

### 3.2.3 Force de Laplace

Un cadre en fil conducteur traversé par un courant d'intensité  $i$  (*Ampère*) et baignant dans un champ d'induction magnétique  $B$  est le siège d'une force mécanique  $F$  (*Newton*) sur chacun de ces côtés, voir Figure.3-4. Cette force est perpendiculaire au plan formé par le courant et

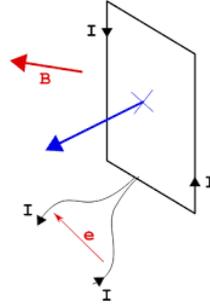
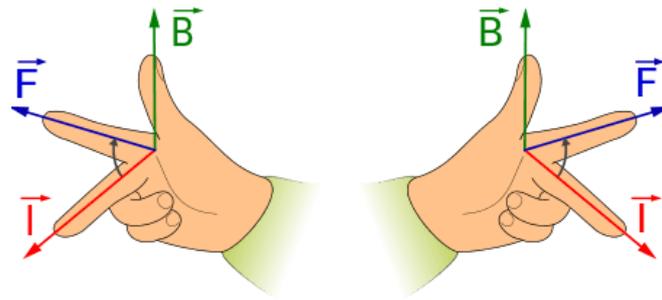


Figure 3-2: Loi de Faraday Lenz.

l'induction et dépend de l'angle  $\theta$  entre le vecteur induction et le vecteur normale à la surface du cadre. Cette force est donnée par le produit vectoriel :  $F = l \vec{i} \wedge \vec{B} = l i B \sin(\theta)$ ; où  $l$  étant la longueur en  $m^2$  du côté sur lequel s'exerce la force. L'orientation des trois grandeurs est déterminée par la règle des trois doigts, Figure.3-3, de la main droite (Moteur) ou main gauche (génératrice). Si le cadre contient  $N$  spires, alors la force est multipliée par  $N$ .



(a) Règle de la main droite. (b) Règle de la main gauche.

Figure 3-3: Règle de la main droite et gauche.

### 3.2.4 Couple de rotation

Sur les côtés du cadre dans la Figure.3-4 s'exercent quatre forces. Les deux forces  $F_1$  et  $F_3$  ne peuvent pas générer de rotation car elles sont en parallèle avec l'axe de rotation; par contre les deux forces  $F_2$  et  $F_4$  génèrent un couple de rotation. Ce couple est donné par l'équation 3.4 où  $S$  est la surface encerclée par le cadre et  $\phi$  le flux qui la traverse. Noter ici que le couple  $M$  est de forme sinusoidale et par conséquent introduit une oscillation du cadre.

$$\begin{aligned}
 M &= 2 |F| b/2 = b F \\
 M &= b [a i B \sin(\theta)] \\
 M &= [b a] B i \sin(\theta) \\
 M &= [S B] i \sin(\theta) \\
 M &= \phi i \sin(\theta)
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

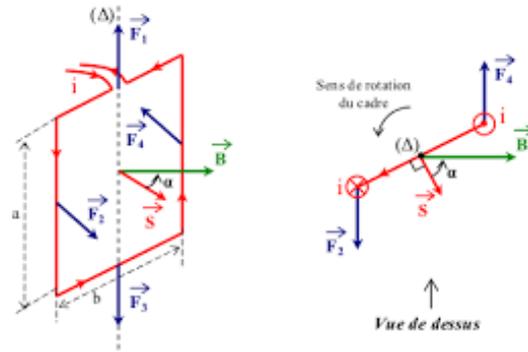


Figure 3-4: Forces de Laplace sur un cadre.

### 3.3 Construction de la *MCC*

#### 3.3.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement et la construction de la machine à courant continu correspond presque parfaitement aux relations sur le magnétisme décrites ci-dessus. En effet, quand un cadre en fil conducteur parcouru par un courant est placé dans un champ d'induction magnétique il expérimente un couple de forces de Laplace; ce couple génère une rotation autour de l'axe du cadre. Si le sens de circulation du courant est inversé, le sens de rotation est inversé. Ceci correspond au fonctionnement moteur. Si par contre on expose le cadre en fil conducteur à un champ d'induction magnétique et on le fait tourner autour de son axe, on voit apparaître selon la loi de Faraday une tension *f.e.m* aux bornes du cadre. C'est le fonctionnement génératrice. Cette description correspond à la machine à courant continu la plus basique.

#### 3.3.2 Construction

La machine à courant continu est construite en se basant sur le principe décrit ci-haut, voir Figure.3-5. En effet, la source d'induction magnétique correspond au *Stator (Inducteur)*, le cadre en fil conducteur tournant autour de son axe correspond au *Rotor (Induit)*. Un troisième élément purement mécanique est adjoint au circuit *rotorique*, cet élément appelé *système balais-collecteur* est très important pour le bon fonctionnement de cette machine.

##### 3.3.2.1 Inducteur (*Stator*)

L'inducteur appelé aussi circuit d'excitation est réalisé en utilisant un électro-aimant : enroulement monté sur un noyau ferromagnétique et parcouru par un courant continu dit d'excitation, voir Figure.3-6. Il constitue la partie fixe de la machine : le *stator*. Son unique rôle est de créer le champ d'induction magnétique  $B$  statorique (*champ inducteur*). Le courant d'excitation noté  $i_f$  (*Field, Champ*) ou bien  $i_{ex}$  (*excitation*) est de très faible valeur, *i.e* la puissance consommée est négligeable.

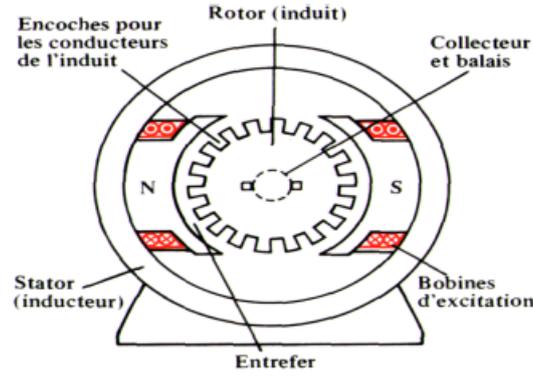


Figure 3-5: Éléments constitutifs de la MCC.

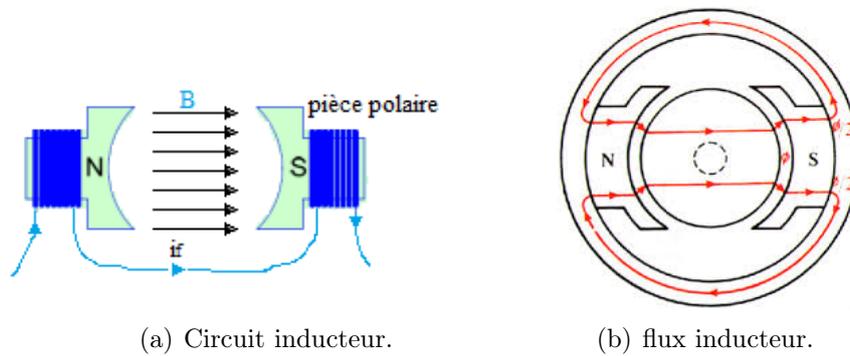


Figure 3-6: Circuit inducteur et flux inducteur dans la MCC.

### 3.3.2.2 Induit (*Rotor*)

L'induit appelé aussi circuit de puissance est réalisé par insertion d'un ensemble de cadres en fils conducteurs dans des encoches taillées sur la surface externe d'un cylindre, voir Figure.3-5. Les extrémités des ces cadres sont reliées (*soudées*) aux lames du collecteur, l'ensemble des cadres constitue le bobinage rotorique, voir Figure.3-7. Il est à noter qu'il existe deux manières de réaliser cette liaison; on parle alors de deux types d'enroulements. L'enroulement dit Ondulé (Figure.3-8) et l'enroulement dit Imbriqué (Figure.3-9); le premier est destiné à la grande tension alors que le deuxième est destiné aux forts courants. Le fonctionnement de la machine ne change pas en fonction du type d'enroulement.

### 3.3.2.3 Système *Balais-Collecteur*

Le collecteur est une bague solidaire au rotor, sur laquelle sont disposés un ensemble de lames en cuivre. A ces lames sont reliées les extrémités des cadres du bobinage de l'induit. Les balais, ou *charbons*, sont solidaire au stator et frottent sur les lames du collecteur en rotation, voir Figure.3-10. Le système balais-collecteur permet en mode moteur d'inverser la polarité du courant traversant chaque enroulement au moins une fois par tour de rotation, ou bien le redressement de la tension *f.e.m* générée en mode génératrice; ce qui constitue un redresseur mécanique.

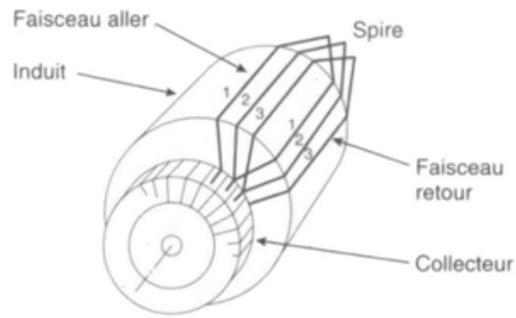


Figure 3-7: Rotor et collecteur de la MCC.

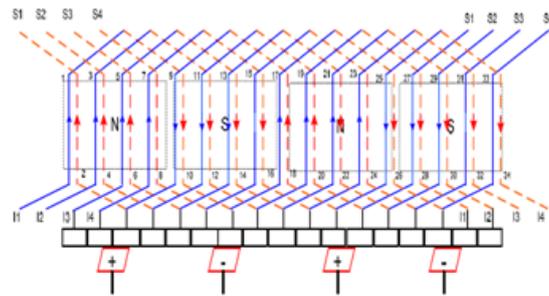


Figure 3-8: Enroulement rotorique Ondule.

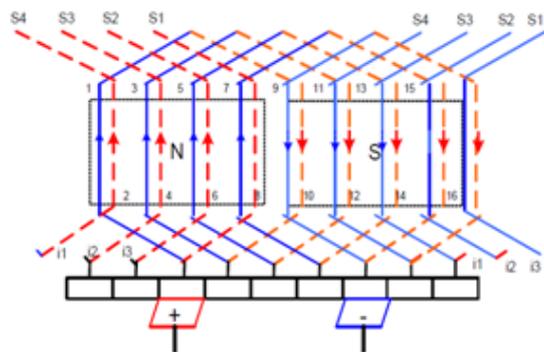


Figure 3-9: Enroulement rotorique Imbriqué.

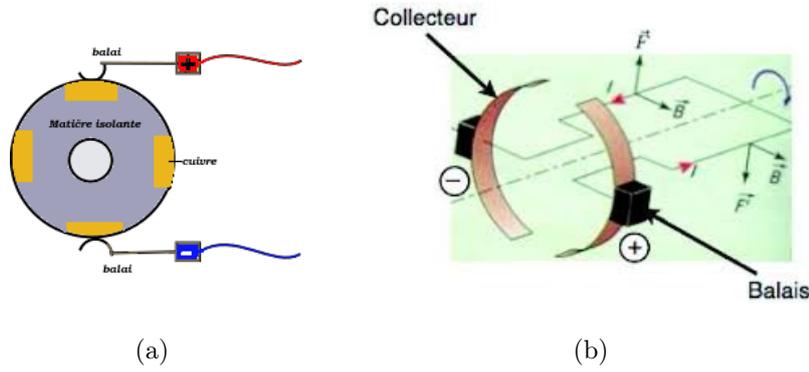


Figure 3-10: Système balais-collecteur.

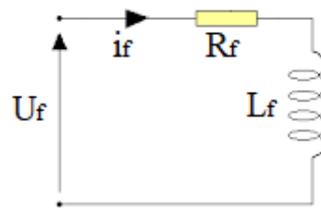


Figure 3-11: Circuit équivalent statorique.

## 3.4 Circuit équivalent

### 3.4.1 Circuit équivalent statorique

Comme expliqué auparavant, le circuit statorique a pour unique rôle de générer le champ d'induction  $B$ , de ce fait il est appelé aussi circuit d'excitation. Le circuit équivalent du circuit statorique consiste en l'inductance statorique  $L_f$  en série avec la résistance statorique  $R_f$ ; lesquelles sont parcourus par le courant d'excitation  $i_f$ , voir Figure.3-11. La variation du courant d'excitation  $i_f$  permet de varier linéairement le champ d'induction  $B$ , voir l'équation (3.2). L'équation électrique du circuit statorique est donnée par l'équation (3.5).

$$u_f = R_f i_f + L_f \frac{d i_f}{dt} \quad (3.5)$$

### 3.4.2 Circuit équivalent rotorique

Toute la puissance mise en jeu dans la machine  $MCC$  est dans le circuit rotorique; en effet la conversion de l'énergie électrique vers l'énergie mécanique et vice-versa se déroule dans le rotor. L'énergie électrique dépend de la tension induite  $E_{f.e.m}$  et du courant d'induit  $i_a$ ; alors que l'énergie mécanique dépend du couple électromoteur  $C_{e.m}$  et de la vitesse de rotation du rotor  $w$  en  $rd/s$ . Cette puissance est noté  $P_{e.m}$  :  $P_{e.m} = E_{f.e.m} i_a = C_{e.m} \omega$ . Le circuit équivalent du

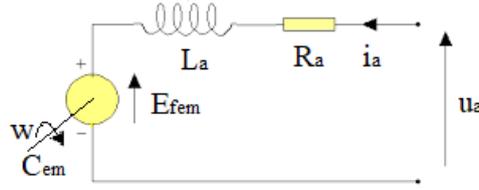


Figure 3-12: Circuit équivalent rotorique.

rotor possède donc deux parties, voir Figure.3-12. La partie électrique contient la résistance rotorique  $R_a$  en série avec l'inductance rotorique  $L_a$  et la tension induite  $E_{f.e.m}$ ; elle donne l'équation électrique (3.6). La partie mécanique est représentée par l'axe de rotation du rotor en indiquant la vitesse  $\omega$ ; elle donne l'équation mécanique (3.7).

$$u_a = R_a i_a + L_a \frac{d i_a}{dt} + E_{f.e.m} \quad (3.6)$$

$$J \frac{d \omega}{dt} = C_{e.m} - f \omega - C_r \quad (3.7)$$

Où  $J$ ,  $f$  et  $C_r$  sont respectivement le moment d'inertie des parties tournantes, le coefficient de frottement visqueux et le couple de charge. Il reste à déterminer les relations pour la tension induite  $E_{f.e.m}$  et le couple électromoteur  $C_{e.m}$  pour compléter les équations 3.6 et 3.7.

*Remarque.* Il est à noter que les paramètres de l'équation statorique ( $R_f, L_f$ ), les paramètres de l'équation rotorique ( $R_a, L_a$ ) et ceux de l'équation mécanique ( $J, f$ ) ne sont pas fournis par le constructeur de la machine; mais doivent être identifiés par l'utilisateur.

### 3.4.2.1 Tension induite $E_{f.e.m}$

En considère le fonctionnement génératrice, *i.e* le stator est parcouru par un courant d'excitation  $i_f$ , alors que le rotor est entraîné (on fait tourner le rotor autour de son axe de rotation) à une vitesse de rotation  $\omega$ . Le rotor étant constitué d'un ensemble de cadres, si le pas (la distance angulaire mécanique entre deux cadres) est noté  $\delta$  alors le flux traversant le cadre  $n$  est donné par :

$$\begin{aligned} \phi_n(t) &= N \overrightarrow{B(i_f)} \overrightarrow{S_n} \\ \phi_n(t) &= N B(i_f) S \cos(\theta - n \delta) \\ \phi_n(t) &= [N B(i_f) S] \cos(\omega t - n \delta) \\ \phi_n(t) &= \phi_T(i_f) \cos(\omega t - n \delta) \end{aligned} \quad (3.8)$$

D'après la loi de Faraday-Lenz, la *f.e.m* induite aux bornes du cadre  $n$  est donc donnée par :

$$\begin{aligned} e_n(t) &= - \frac{d \phi_n(t)}{dt} \\ e_n(t) &= - \phi_T(i_f) \frac{d \cos(\omega t - n \delta)}{dt} \\ e_n(t) &= + \phi_T(i_f) \omega \sin(\omega t - n \delta) \end{aligned} \quad (3.9)$$

L'équation 3.9 montre que les tensions induites  $e_n(t)$  dans les différents cadres ont une forme sinusoïdale, elles sont déphasées l'une par rapport à l'autre d'un angle  $\delta$ . Elles ont la même amplitude égale à  $\phi_T(i_f) \omega$  qui dépend linéairement du courant d'excitation  $i_f$  et de la vitesse de rotation  $\omega$  et ayant la même fréquence que la fréquence de rotation  $\omega$ . Ces différentes tensions

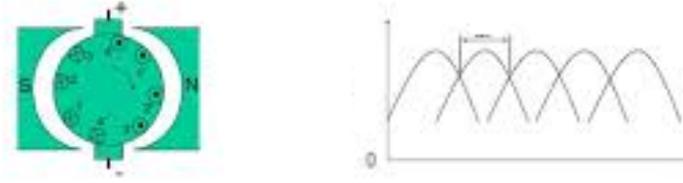


Figure 3-13:  $e_n(t)$  et  $f.e.m$  induite total.

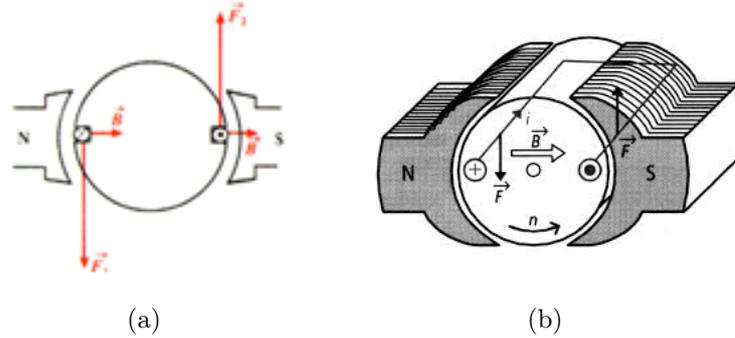


Figure 3-14: Couple  $M_n(t)$ .

sinusoïdales sont reliées au collecteur qui tourne avec le rotor, les balais placés judicieusement (une position bien particulière) n'aperçoivent qu'une infime partie de la  $n^{ime}$  tension  $e_n(t)$  correspondant au pas mécanique  $\delta$ , *i.e* la bosse maximale de la tension  $e_n(t)$  voir figure3-13. C'est pour cette raison que le système balais-collecteur est considéré comme un redresseur mécanique. On obtient donc la relation 3.10.

$$\begin{aligned} E_{f.e.m} &= K_e \phi_T(i_f) \omega \\ K_e &= \frac{P}{2 \pi a} N \end{aligned} \quad (3.10)$$

Tel que :

- $P$  : Nombre de paire de pôles.
- $a$  : Nombre de paires de voies d'enroulement (Imbriqué / Ondulé).
- $N$  : Nombre de conducteurs.
- $\omega$  : Vitesse de rotation en rd/s.
- $\phi_T(i_f)$  : Flux maximal dans la machine.

### 3.4.2.2 Couple électromoteur $C_{e.m}$

Comme expliquer dans la section 3.2.4, les forces de Laplace (Figure3-14) qui s'exercent sur les deux cotés de chaque cadre  $n$ , parmi les cadres qui forment l'enroulement rotorique, et ayant  $N$  spires gènère un couple  $M_n(t)$  de forme sinusoïdale donné par :

$$\begin{aligned}
 M_n(t) &= N 2 |\vec{F}| r/2 \\
 M_n(t) &= N r [L i_a B(i_f) \sin(\theta - n \delta)] \\
 M_n(t) &= N [r L] B(i_f) i_a \sin(\theta - n \delta) \\
 M_n(t) &= N S B(i_f) i_a \sin(\theta - n \delta) \\
 M_n(t) &= [N S B(i_f)] i_a \sin(\theta - n \delta) \\
 M_n(t) &= \phi_T(i_f) i_a \sin(\theta - n \delta)
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Où  $r$  et  $L$  sont respectivement le diamètre et la hauteur du cylindre rotorique,  $i_a$  le courant d'induit et  $N$  le nombre de fils conducteurs par cadre. Par l'effet du système balais-collecteur, le courant d'induit  $i_a$  change de sens dans chacun des cadres au moins une fois par demi rotation, ceci à pour effet de redresser le couple  $M_n(t)$ . On a alors un couple strictement positif (toujours dans le même sens de rotation) :

$$M_n(t) = \phi_T(i_f) i_a |\sin(\theta - n \delta)| \tag{3.12}$$

Du fait que l'enroulement rotorique est constitué d'un ensemble de cadre distant d'un pas (angle mécanique)  $\delta$ ; le couple moteur total noté  $C_{e.m}$  et résultant de la somme de l'ensemble des couples élémentaire  $M_n(t)$  est donc donné par :

$$C_{e.m} = K_m \phi_T(i_f) i_a \tag{3.13}$$

### 3.4.2.3 Puissance Convertit dans la MCC

Comme expliquer auparavant, la puissance électromagnétique  $P_{e.m}$  mise en jeu dans la machine est celle qui est convertit; *i.e*  $P_{e.m} = P_e = P_m$ . La puissance électrique  $P_e = E_{f.e.m} i_a$  est convertit en puissance mécanique  $P_m = C_{e.m} \omega$  et vice-versa tel que :

$$\begin{aligned}
 P_{e.m} &= P_e = P_m \\
 E_{f.e.m} i_a &= C_{e.m} \omega \\
 K_e \phi_T(i_f) \omega i_a &= K_m \phi_T(i_f) i_a \omega
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Ceci implique donc que :

$$K_e = K_m = K \tag{3.15}$$

## 3.5 Différents types de machines MCC

Le type d'une machine à courant continu dépend de son mode d'excitation. On cite ici les trois types suivants :

### 3.5.1 Excitation séparée ou *indépendante*

L'induit et l'inducteur sont séparés électriquement, voir Figure3-15. En fonctionnement moteur deux alimentations sont nécessaires. C'est le type le plus intéressant car, à flux constant ( $i_f$  constant) et mieux encore à flux nominal ( $i_f = i_{f,n}$ ), il permet l'obtention d'un modèle linéaire et donc facile à commander. Le modèle est linéaire par rapport à  $E_{f.e.m}$  et  $C_{e.m}$  tel que :

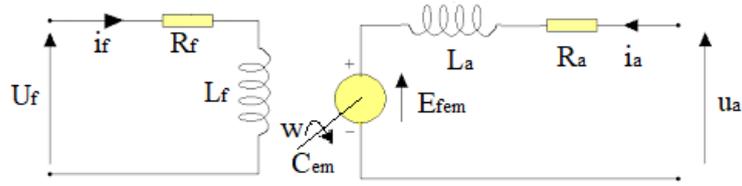


Figure 3-15: *MCC* à excitation indépendante.

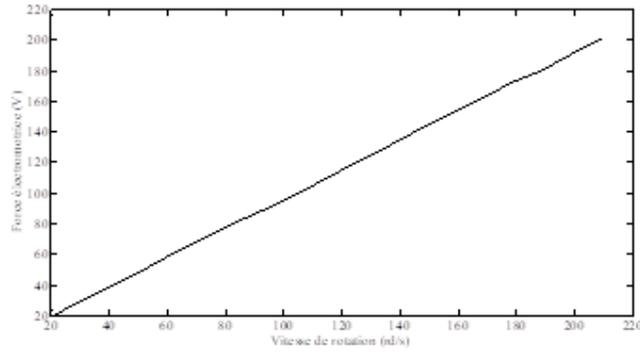


Figure 3-16: Essai en génératrice à vide : identification de  $K_a$ .

$$\begin{aligned}
 E_{f.e.m} &= K \phi \omega = k_a i_f \omega \\
 C_{e.m} &= K \phi i_a = k_a i_f i_a \\
 i_f &: \text{Constant}
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

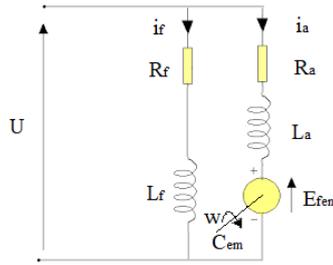
Si on travail à flux nominal, *i.e*  $i_f = i_{f.n}$  on a :

$$\begin{aligned}
 E_{f.e.m} &= K \phi_n \omega = k_a i_{f.n} \omega = K_a \omega \\
 C_{e.m} &= K \phi_n i_a = k_a i_{f.n} i_a = K_a i_a \\
 \text{Tel que : } K_a &= k_a i_{f.n}
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$

*Remarque.* Pour déterminer (identifier) la valeur de  $K_a$  ou  $k_a$  on réalise un essai à vide, en fonctionnement gnératrice, et on trace la courbe de la tension d'induit à vide  $u_a = E_{f.e.m}$  en fonction de la vitesse  $\omega$  en gardant le courant d'excitation  $i_f$  ou  $i_{f.n}$  constant. Pour plusieurs valeurs de  $\omega$  et de  $E_{f.e.m}$  la courbe  $E_{f.e.m} = f(\omega)$  est donnée par la figure3-16. Le coefficient de proportionnalité  $K_a$  entre la tension à vide  $E_{f.e.m}$  et la vitesse  $\omega$  correspond à la tangente.

Caractéristiques :

- Il fournit un couple important à faible vitesse (machines-outils, levage).
- En marche, il ne faut jamais couper l'excitation d'un moteur à excitation indépendante. Le moteur s'emballe !
- Grande plage de régulation de vitesse.
- Grande plage de régulation de couple.


 Figure 3-17: *MCC* à excitation parallèle.

### 3.5.2 Excitation parallèle ou *shunt*

L'induit et l'inducteur sont en parallèle, cela permet de n'utiliser qu'une seule alimentation en mode moteur, voir Figure3-17. En fonctionnement génératrice, l'inducteur est alimenté par l'induit. Le modèle de la machine n'est plus linéaire, car il est impossible de fixer le flux (*i.e*  $i_f$ ) indépendamment du courant rotorique  $i_a$ . On a :

$$\begin{aligned}
 E_{f.e.m} &= K \phi_T(i_f) \omega = k_a i_f \omega \\
 C_{e.m} &= K \phi_T(i_f) i_a = k_a i_f i_a \\
 \text{Tel que en mode moteur : } I &= i_a + i_f \\
 \text{En mode génératrice : } I &= i_a - i_f
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

Caractéristiques :

- Le moteur à excitation shunt est utilisé en outillage électroportatif.
- Couple limité.
- Pas de risque d'emballement.

### 3.5.3 Excitation série

L'induit et l'inducteur sont en série, cela permet de n'utiliser qu'une seule alimentation en mode moteur, voir Figure.3-18. Le modèle de la machine n'est plus linéaire, car il est impossible de fixer le flux (*i.e*  $i_f$ ) indépendamment du courant rotorique  $i_a$ . On a :

$$\begin{aligned}
 E_{f.e.m} &= K \phi_T(i_f) \omega = k_a i_f \omega = k_a i_a \omega \\
 C_{e.m} &= K \phi_T(i_f) i_a = k_a i_f i_a = k_a i_a^2 \\
 \text{Tel que : } i_f &= i_a
 \end{aligned}
 \tag{3.19}$$

Caractéristiques :

- Couple de démarrage important car fonction de  $i_a^2$ .
- Le moteur série fonctionne aussi en courant alternatif (*moteur universel*). Le couple reste de même sens quel que soit le signe de  $i_a$ .
- Ce moteur doit toujours avoir une charge, car à vide il s'emballe !.

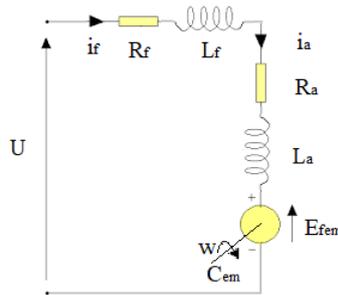


Figure 3-18: *MCC* à excitation série.

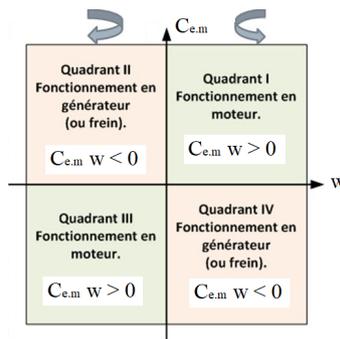


Figure 3-19: Quadrants de fonctionnement.

- Faible stabilité en vitesse.
- Courant d'excitation élevé.

### 3.5.4 Excitation composée *Compound*

Dans ce cas une partie de l'inducteur est raccordé en série avec l'induit et l'autre en parallèle. Ce moteur réunit les avantages des deux types de moteur : le fort couple à basse vitesse du moteur série et l'absence d'emballement (survitesse) du moteur shunt. Caractéristiques :

- Un couple de démarrage important.
- Une instabilité en vitesse.

## 3.6 Quadrant de fonctionnement

Les machines électrique et la machine *MCC* en particulier peuvent avoir un ou plusieurs quadrants de fonctionnement. Ces quadrants correspondent au transfert d'énergie : électrique  $\rightleftharpoons$  mécanique. Ils correspondent au plan découpé en quatre par l'axe vitesse de rotation et l'axe couple moteur, voir Figure.3-19. En ne parle ci-après que du fonctionnement moteur.

### 3.6.1 Un seul quadrant de fonctionnement

On associe dans ce cas un hacheur série (*Buck*), voir TD N° 1, à la machine à courant continu. Pour une excitation séparé l'hacheur est placé coté induit; alors que l'inducteur est alimenté par une tension entre les bornes  $F1 - F2$  donc  $i_f > 0$ , ou bien  $F2 - F1$  donc  $i_f < 0$ . On a alors le fonctionnement moteur dans le quadrant I ou III; mais pas les deux. Application :

- Perceuse électrique à variateur.
- Aspirateur.
- Ventilation.

### 3.6.2 Deux quadrant de fonctionnement

On associe dans ce cas un hacheur deux quadrant, *i.e* un bras d'onduleur voir TD N° 1, à la machine à courant continu. Pour une excitation séparé le bras d'onduleurs est placé coté induit; alors que l'inducteur est alimenté par une tension entre les bornes  $F1 - F2$  donc  $i_f > 0$ , ou bien  $F2 - F1$  donc  $i_f < 0$ . On a alors le fonctionnement moteur/génératrice correspondant aux quadrants I et IV; ou bien III et II. Remarque que le fonctionnement génératrice est en récupération seulement; *i.e* le vrai fonctionnement est le fonctionnement moteur. Application :

- Visseuse-dévisseuse électrique.
- Lève-vitre électrique.
- Enrouleur-dérouleur de store.
- Portail électrique.

### 3.6.3 Quatre quadrant de fonctionnement

On associe dans ce cas un hacheur quatre quadrant, *i.e* deux bras d'onduleur voir chapitre 1, à la machine à courant continu. Pour une excitation séparé le hacheur quatre quadrant est placé coté induit; alors que l'inducteur est alimenté par une tension entre les bornes  $F1 - F2$  donc  $i_f > 0$ . On a alors le fonctionnement moteur/génératrice correspondant aux quatre quadrants (I, IV) et (III, II). Remarque que le fonctionnement génératrice est en récupération seulement; *i.e* le vrai fonctionnement est le fonctionnement moteur. Application :

- Traction.
- Robotique.
- Machines-outils.