

III.1 INTRODUCTION

Le moteur à courant continu (MCC) est une machine tournante qui exploite le fait qu'un conducteur placé perpendiculairement à un champ magnétique et parcouru par un courant se déplace en fauchant le champ magnétique: il est donc capable transformant l'énergie électrique qu'ils reçoivent en énergie mécanique.

Comme l'ensemble des actionneurs électriques appelés aussi machines tournantes, la machine à courant continu est composée d'une partie fixe appelé stator (statique) ou inducteur, et d'une partie mobile tournante appelée rotor (rotation) ou induit, séparées par un entrefer (espace mécanique composé d'air). L'alimentation électrique sous forme d'une tension et courant continu doit être fournie à l'induit (Figure 3.2). Etant donné que l'induit est en mouvement de rotation, il est nécessaire de disposer d'un système appelé balais-collecteur (appelé aussi collecteur mécanique ou redresseur mécanique) permettant son alimentation.

Dans une machine DC (MCC), l'inducteur est le stator, la partie fixe de la machine. Il crée une induction magnétique dans l'espace à partir d'un bobinage (bobines excitatrices) parcouru par un courant d'excitation continu ou à partir d'aimants permanent. Les caractéristiques électrique et mécanique de la machine sont liées à l'amplitude du flux inducteur, l'induction magnétique devra être la plus élevée possible, de l'ordre de Tesla dans les machines de grande taille. Un circuit magnétique permet de créer facilement une induction importante avec peu de conducteurs et de courant. L'induit est la partie tournante de la MCC, son rotor. C'est le lieu de conversion électromécanique. Il est constitué d'un circuit magnétique encoché où sont placés des conducteurs axiaux parcourus par un courant. Le circuit magnétique du rotor est feuilleté (afin de limiter les courants de Foucault) puisque l'induction magnétique fixe créée l'inducteur, donne une induction magnétique variable dès que l'induit tourne. L'alimentation des conducteurs mobiles de l'induit se fait à travers des contacts glissants dans un organe appelé collecteur.

III.2 CONSTITUTION DU MOTEUR A COURANT CONTINU

III.2.1 L'inducteur

Il se compose de trois parties :

➤ La carcasse

Elle assure à la fois des fonctions magnétiques et mécaniques. Elle est généralement en acier moulé ou coulé, quelque fois en fonte. On utilise le plus souvent la forme circulaire cuirassée.

➤ Les pôles inducteurs

Sont constitués par un assemblage de tôles en acier au silicium d'une épaisseur isolées entre elle par une oxydation naturelle.

➤ Les bobines

Sont réalisées avec du fil de cuivre isolé (vernis isolant) qui est enroulé autour du noyau polaire de telle sorte à réaliser un électro-aimant

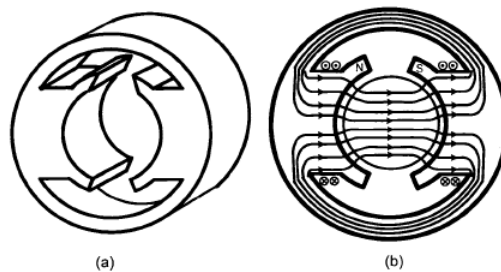


Figure 3.1 : Carcasse en fer du stator avec bobinage créant des lignes de champ

III.2.2 L'induit

Celui-ci est feuilleté et il a la forme d'un tambour dans lequel sont pratiquées des encoches. Les tôles, en acier au silicium sont isolées entre elles par oxydation ou au vernis. Elles sont montées sur l'arbre de la machine. Dans les encoches sont placés des conducteurs actifs. En résumé, l'induit complète le circuit magnétique et supporte les enroulements induits. Entre l'inducteur et l'induit existe ce que l'on appelle un entrefer, que l'on essaie de diminuer le plus possible pour éviter les pertes magnétiques [3].

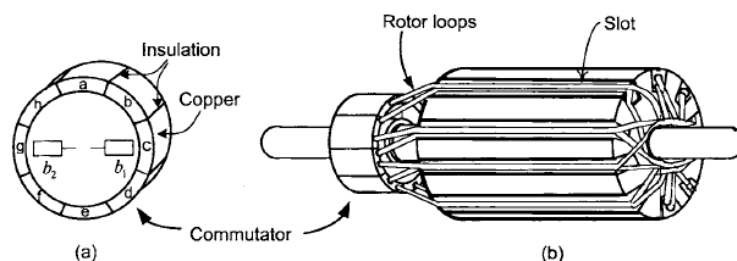


Figure 3.2 : L'induit et collecteur du rotor (commutateur)

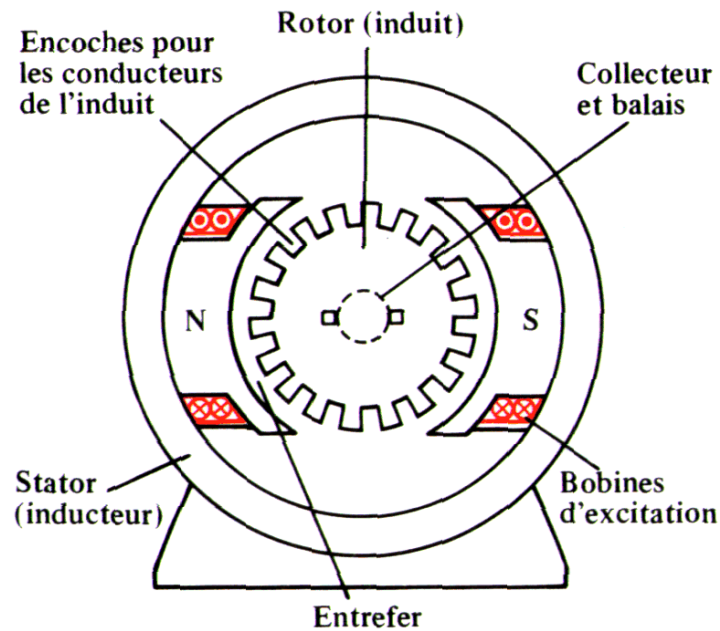


Figure 3.3 : composition d'un moteur à courant continu

III.3 DIFFERENTS TYPES D'EXCITATIONS DU MOTEUR A COURANT CONTINU

Il existe plusieurs méthodes pour alimenter l'inducteur du moteur, chacune d'entre elles conduisant à des caractéristiques de fonctionnement différentes

III.3.1 Moteur à excitation séparée

Le circuit inducteur n'est pas connecté au circuit induit, on a :

$$U = K\Phi(I_a)\Omega + R_a I_a \quad (3.1)$$

Soit:

$$\Omega = \frac{U - R_a I_a}{K\Phi(I_a)} \quad (3.2)$$

La caractéristique $\Omega(I_a)$ est décroissante, comme il est présenté dans la Figure 3.4.

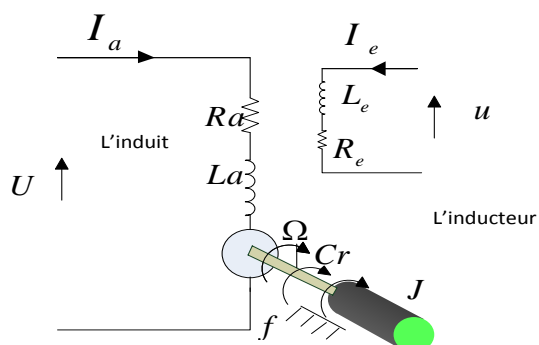


Figure 3.4 : Moteur à excitation séparée

Dans le cas où la chute résistive est négligeable, il est possible de conclure que quelle que soit la charge (quel que soit I_a), on peut considérer que la vitesse de fonctionnement est quasiment constante.

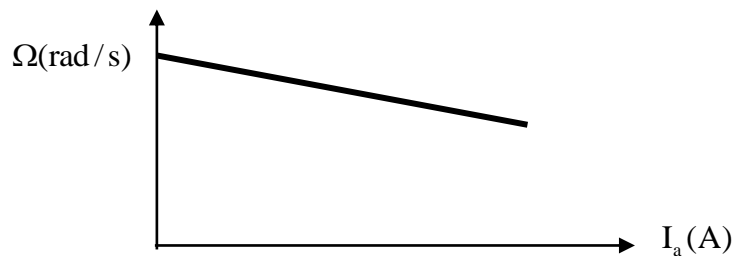


Figure 3.5 : Caractéristique $\Omega = f(I_a)$

Comme le moment du couple de pertes dépend essentiellement de la vitesse et que celle-ci varie peu, on peut considérer que ce moment est constant quel que soit.

III.3.2 Moteur à excitation shunt

Le moteur est câblé suivant la Figure 3.6.

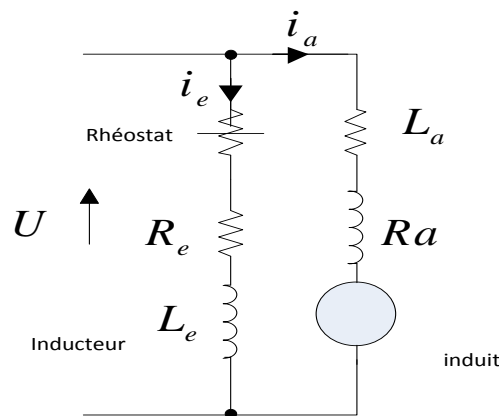


Figure 3.6 : moteur a excitation shunt.

Si on néglige la chute de tension dans l'induit, on a :

$$\Omega = \frac{U}{K\Phi} \quad (3.3)$$

Si on cherche à réduire la vitesse, on ne peut pas réduire la tension, car en même temps, on réduirait le flux. En fait, il faut ajouter en série avec l'inducteur un rhéostat, qui permet de Contrôler le courant I_e indépendamment de la tension U .

III.3.3 Moteur à excitation série

Dans ce cas, l'inducteur et l'induit sont connectés en série.

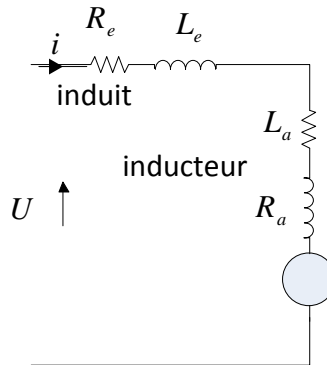


Figure 3.7 : Moteur à excitation série.

L'ordre de grandeur du courant d'induit étant important, le circuit magnétique constitué par le stator, le rotor et l'entrefer risque de se saturer.

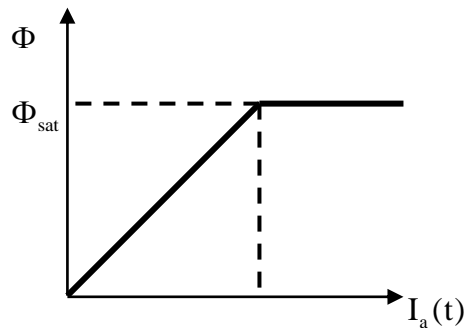


Figure 3.8 : caractéristique $\Phi = f(I_a)$

En régime linéaire :

$$\Phi = L_a I_a \quad (3.4)$$

Si on considère que la machine n'est pas saturée et que le flux est proportionnel au courant

Donc l'équation devient :

$$\Omega = \frac{U - R_a I_a}{K' I_a} \quad (3.5)$$

Tel que :

$$K' = K L_a \quad (3.6)$$

Donc, en traçant cet fonction lorsqu'on n'est pas dans le coude de saturation et en

prolongeant dans cette zone on obtient [2]:

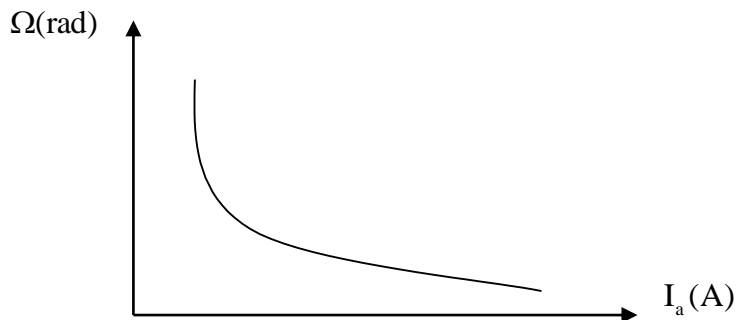


Figure 3.9 : caractéristique. $\Omega = f(I_a)$

III.4 ETUDE DU MOTEUR A COURANT CONTINU A EXCITATION SEPARÉE

Le rotor tournant confère une inertie propre (J), et son implantation sur paliers implique des frottements mécaniques (f). Le schéma traditionnel pour un moteur à courant continu est donc celui de la Figure 3.10.

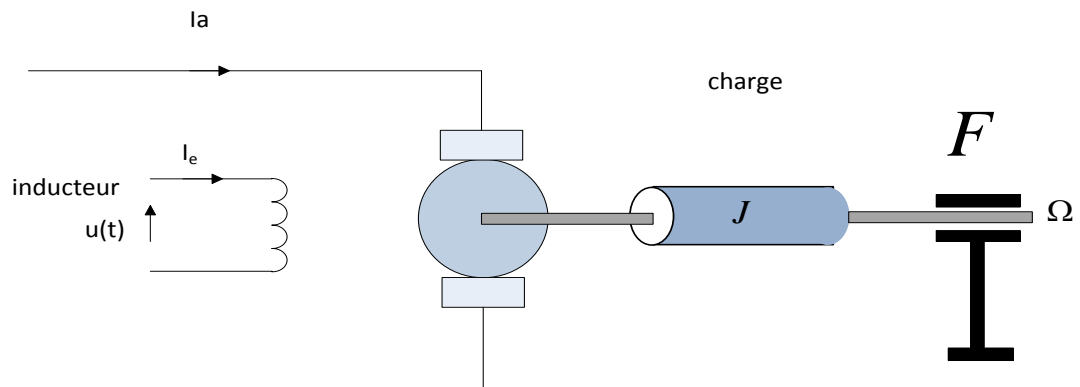


Figure 3.10 : Schéma de principe du moteur à courant continu.

Le schéma électrique équivalent de l'induit est donné sur la Figure 3.11.

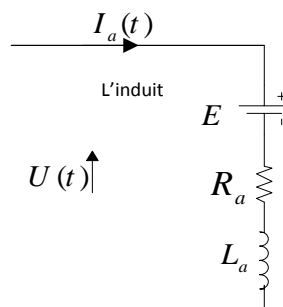


Figure 3.11 : Schéma électrique équivalent de l'induit du moteur à courant continu.

E : représente la force électromotrice.

L_a : représente la self équivalente de l'enroulement d'induit.

R_a : représente la résistance équivalente de l'induit. Le schéma électrique équivalent de l'inducteur est donné sur la Figure 3.12.

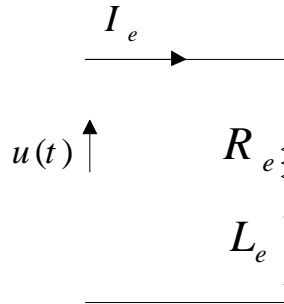


Figure 3.12 : Schéma électrique équivalent de l'inducteur du moteur à courant continu.

L_e : représente la self équivalente de l'enroulement inducteur.

R_e : représente la résistance équivalente de l'inducteur (résistance des fils du bobinage).

Les équations régissant le fonctionnement du moteur de la Figure 3.8 et Figure 3.9 sont les suivantes.

Domaine temporel

$$U(t) = E(t) + R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a}{dt}$$

$$E(t) = K\Phi(t)\Omega(t)$$

$$M(t) = K\Phi(t)I_e(t)$$

$$\Phi(t) = L_e I_e(t)$$

$$u(t) = L_e \frac{dI_e}{dt} + R_e I_e(t)$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M(t) - f\Omega(t) - Cr$$

Où :

M : est le moment du moteur.

K : est une constante générale liée à la machine tournante.

Φ : représente le flux inducteur (Weber).

Cr : est le couple résistant.

Domaine de Laplace

$$U(p) = E(p) + R_a I_a(p) + L_a p I_a(p) \quad (3.7)$$

$$E(p) = K\Phi(p)\Omega(p) \quad (3.8)$$

$$M(p) = K\Phi(p)I_e(p) \quad (3.9)$$

$$\Phi(p) = L_e I_e(p) \quad (3.10)$$

$$u(p) = L_e p I_e(p) + R_e I_e(p) \quad (3.11)$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M(t) - f\Omega(t) - Cr \quad (3.12)$$

III.5 STRATEGIE DE COMMANDE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

III.5.1 Commande par l'inducteur

Ce mode correspond évidemment au cas d'un inducteur bobiné dans le quelle courant pour a varier, entraînant un flux variable. Le courant d'induit est maintenu constant à l'aide d'une source extérieure que l'on peut représenter par une source de courant I_0 .

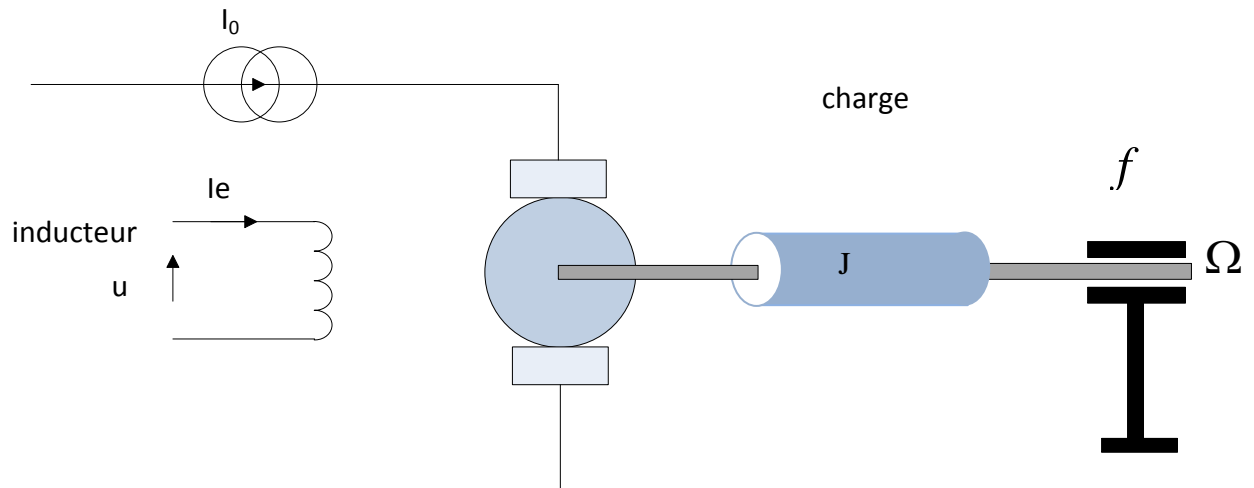


Figure 3.13 : Commande par l'inducteur.

Dans cette configuration, on a :

$$\Phi(t) = L_e I_e(t) \quad (3.13)$$

Avec [$L_e = \text{Cte}$] si l'on considère le circuit magnétique inducteur non saturé, et donc:

$$M(t) = K L_e I_e(t) I_0 \quad (3.14)$$

Soit en simplifiant :

$$M(t) = k I_e(t) \quad (3.15)$$

Avec:

$$K' = K L_e I_0 \quad (3.16)$$

En considérant les équations (3.11), (3.12) et (3.15), le diagramme fonctionnel du moteur est alors

Celui de la Figure 3.11.

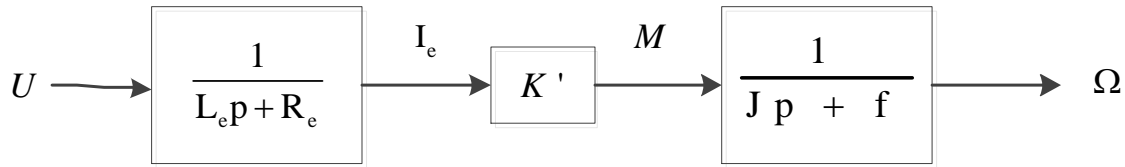


Figure 3.14 : Diagramme fonctionnel de la commande par l'inducteur.

Remarque: les éléments électriques et mécaniques interviennent sous des constantes de temps séparées, il n'y a pas de réaction d'induit à considérer puisque le courant d'induit est maintenu constant quelle que soit la vitesse [2].

I.5.2 Commande par l'induit :

Dans ce cas le flux inducteur est maintenu constant, par l'utilisation soit d'un aimant permanent pour la création directe du flux, soit d'une source de courant régulée.

$$I_e(t) = C^{te} \Rightarrow \Phi(t) = C^{te} = \Phi_0 \quad (3.17)$$

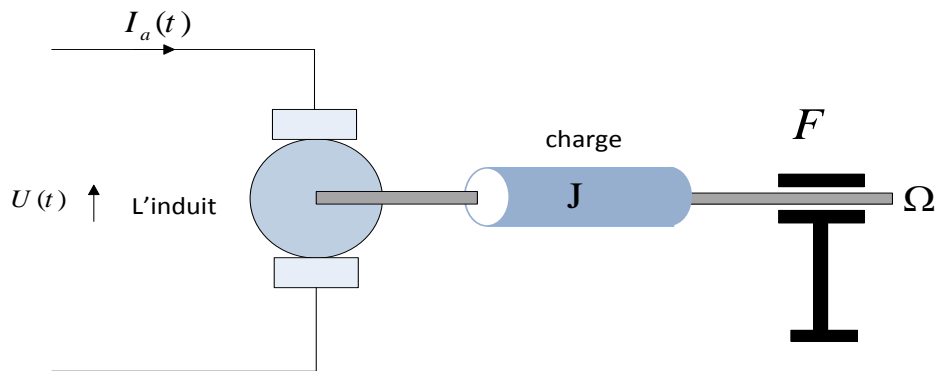


Figure 3.15 : Commande par l'induit.

On a:

$$M(t) = K\Phi(t)I_a(t) \quad (3.18)$$

Avec :

$$\Phi(t) = \Phi_0 \quad (3.19)$$

Donc on peut écrire :

$$M(t) = K_T I_a(t) \quad (3.20)$$

Avec :

$$K_T = K \cdot \Phi_0 \quad (3.21)$$

La tension induite $e_m(t)$, appelée force électromotrice (FEM), dans l'optique de l'exploitation en générateur est proportionnelle à la vitesse angulaire $\Omega(t)$ et au flux d'inducteur $\Phi(t)$:

$$E(t) = K \cdot \Phi(t) \cdot \Omega(t) \quad (3.22)$$

Pour les excitations à flux constant :

$$K_T = K_E = K' = K \cdot \Phi_0 \quad (3.23)$$

A l'aide des relations (3.7), (I.8), (3.12), (3.20) et (3.22) on peut construire le diagramme fonctionnel du moteur de la figure 3.16.

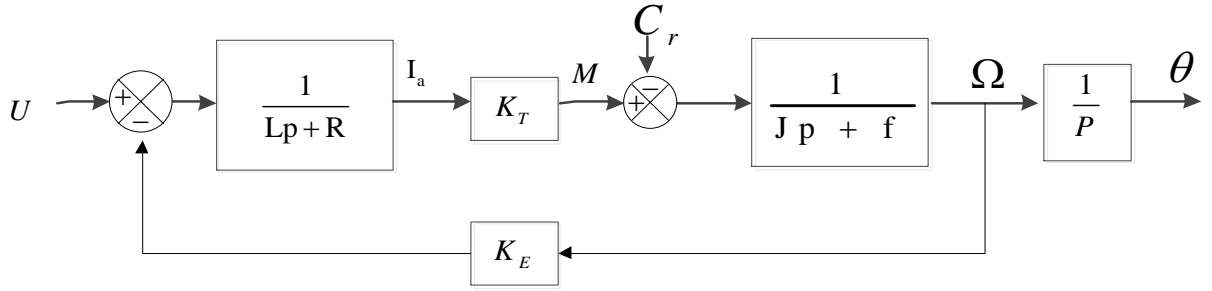


Figure 3.16 : Diagramme fonctionnel de la commande par l'induit.

III.6 Modèle d'état du moteur

A partir de (3.7), (3.8), (3.12), (3.18), et (3.20) on trouve l'équation d'état suivant :

$$\begin{pmatrix} \frac{dI_a}{dt} \\ \frac{d\Omega}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-R_a}{L_a} & \frac{-K'}{L_a} \\ \frac{K'}{J} & \frac{-f}{J} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ \Omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \end{pmatrix} U + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{-1}{J} \end{pmatrix} C_r \quad (3.24)$$

III.6.1 Simulations

Les simulations sont une étape importante car elles permettent de justifier les équations posées précédemment.

Pour procéder à la simulation nous avons utilisé un moteur caractérisé par :

➤ Résistance d'induit $R_a = 19.3 \, \Omega$.

- Inductance $L_a = 0.892 \text{ H}$.
- Coefficient de frottement $f = 0.002 \text{ Nm/ (rad/s)}$.
- Inertie $J = 0.07 \text{ Kg m}^2$
- $P = 0.2 \text{ kW}$
- Couple résistant $C_r = 0.95 \text{ Nm}$
- Tension d'alimentation $U = 220 \text{ v}$
- Coefficient de couple $K_b = 1 \text{ v/ (rad/s)}$.

On fait appliquer une perturbation (couple résistant) après 0.5s les réponses de la vitesse et du courant sont présentées dans la Figure 3.17.

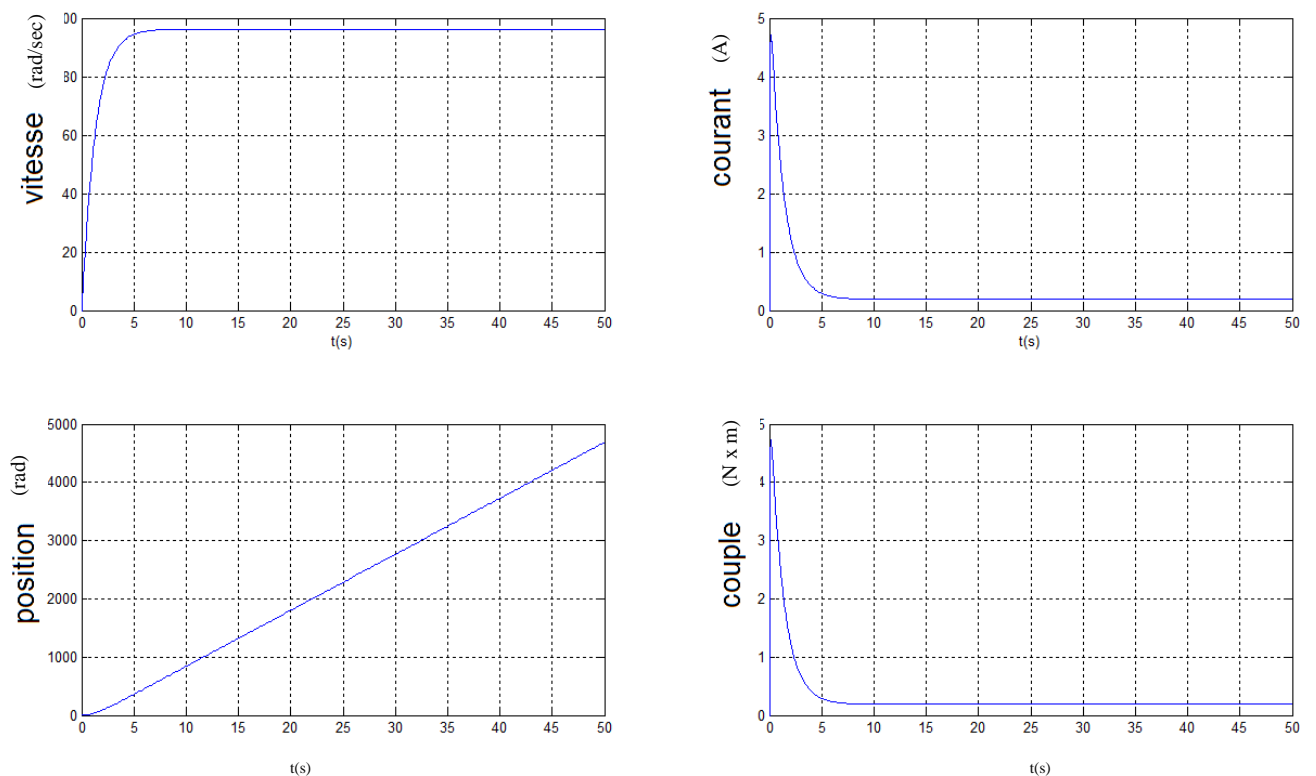


Figure 3.17 : simulation du moteur DC (sans charge).

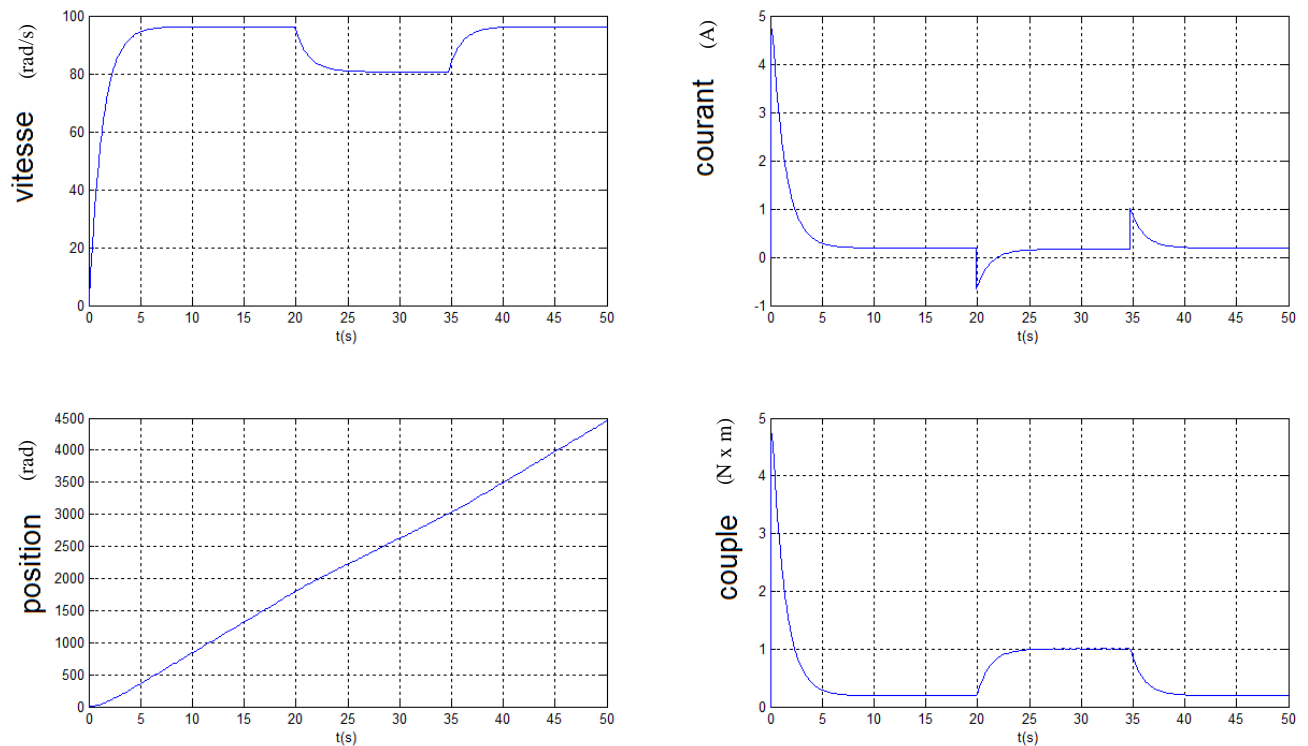


Figure 3.18 : simulation du moteur DC (avec charge).

1.6.2 Interprétations

Nous avons opté pour une stratégie de commande par l'induit avec une tension d'excitation constante. Les figures ci-dessus représentent les variations du courant d'induit, la vitesse de rotation, le couple développé par le moteur et la position angulaire. D'après ces résultats :

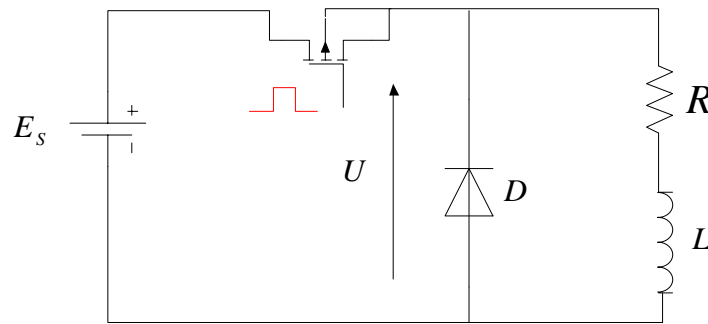
- La vitesse atteint une valeur proportionnelle à la tension appliquée sur l'induit mais lorsqu'on applique une charge additionnelle la vitesse est diminuée.
- La position angulaire est l'intégrale de la vitesse donc elle augmente avec la vitesse, lorsque la vitesse est fixée la courbe de position angulaire prend une ligne de pente constante.

III.7 Modélisation des hacheurs :

Les hacheurs sont des convertisseurs continu-continu, ayant pour fonction initiale la variation de la valeur moyenne de tension. Nombreuses sont les applications pour la commande des moteurs à courant continu et les alimentations à découpage.

III.7.1 Hacheur série

On l'appelle aussi dévolteur, il est représenté par la Figure 3.19 :

**Figure 3.19 : Hacheur série.**

Son nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur à amorçage et à blocage commandés (transistor bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et un interrupteur à blocage et amorçage spontanés (diode). La valeur moyenne de sa tension de sortie est [2]:

$$U = (S_1 - S_2)E_s \quad (3.25)$$

$$\overline{U} = \alpha \cdot E_s \quad (3.26)$$

Tel que α c'est le rapport cyclique du hacheur.

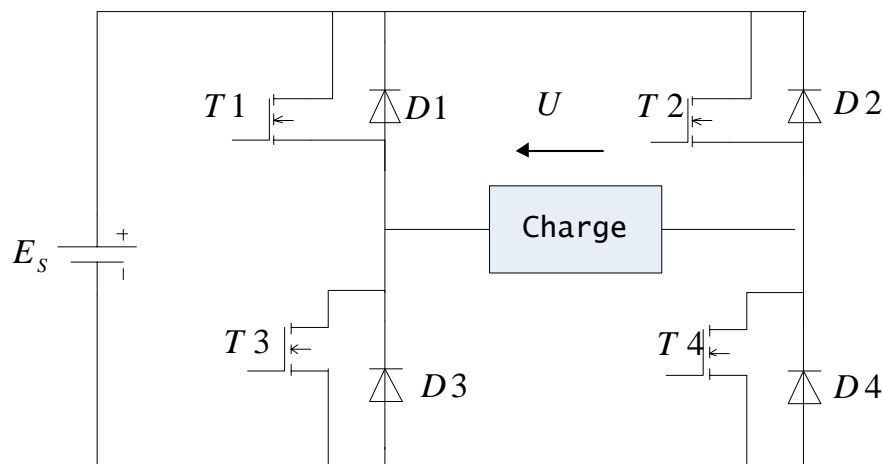
Et son modèle pour être représenté par l'équation suivant :

$$U = S \cdot E_s \quad (3.27)$$

Tel que S c'est l'état logique de l'interruption T .

III.7.2 Hacheur à quatre quadrants (en pont)

Le hacheur en pont est représenté par la Figure 3.20

**Figure 3.20 : Schémas de principe du hacheur à quatre quadrants.**

Le choix d'un hacheur réversible en courant et en tension permet le fonctionnement dans les quatre quadrants du plan couple/vitesse avec récupération d'énergie dans les phases Décélération. Il permet aussi de contrôler la tension de sortie par la modification du rapport cyclique α suivant l'équation suivante [3]:

$$\bar{U} = (2\alpha - 1)E_s \quad (3.28)$$

Le modèle du hacheur en pont est donné par l'équation suivante :

$$U = (S_1 - S_2)E_s \quad (3.29)$$

Tel que S_1 c'est l'état logique des interruptions T_1 et T_4 et S_2 c'est l'état logique des Interruptions T_2 et T_3 .

III.8 COMMANDE PAR MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION (MLI)

Un signal MLI consiste tout simplement à un signal contenant des impulsions à intervalles réguliers obtenus par la comparaison entre un signal de découpage (porteuse), qui est en générale triangulaire ou dent de scie et le signal de référence (V_r). Ces impulsions ont toutes la même période. Pour une même période, la durée de l'impulsion peut être plus ou moins longue. Ce qui a pour effet de modifier la valeur moyenne du signal envoyé. On peut voir que la valeur moyenne du signal peut être contrôlée en variant uniquement la valeur de V_r . Le but de contrôler la valeur moyenne du signal est de pouvoir l'utiliser pour faire varier la vitesse du moteur à courant continu.

III.8.1 Commande MLI du hacheur série

III.8.1.1 Cas d'une porteuse triangulaire unipolaire

L'équation de la porteuse V_p est donné par :

$$V_p(t) = \begin{cases} 2V_{pm}(t/T_p) & t < T_p/2 \\ -2V_{pm}(t/T_p) & T_p/2 < t < T_p \end{cases} \quad (3.30)$$

T_p : étant la période de porteuse.

V_p : la valeur maximale de la porteuse.

L'algorithme de commande utilisé est :

$$\text{Si} \quad \begin{matrix} V_r > V_p \\ V_r < V_p \end{matrix} \quad \begin{matrix} S = 1 \\ S = 0 \end{matrix} \quad (3.31)$$

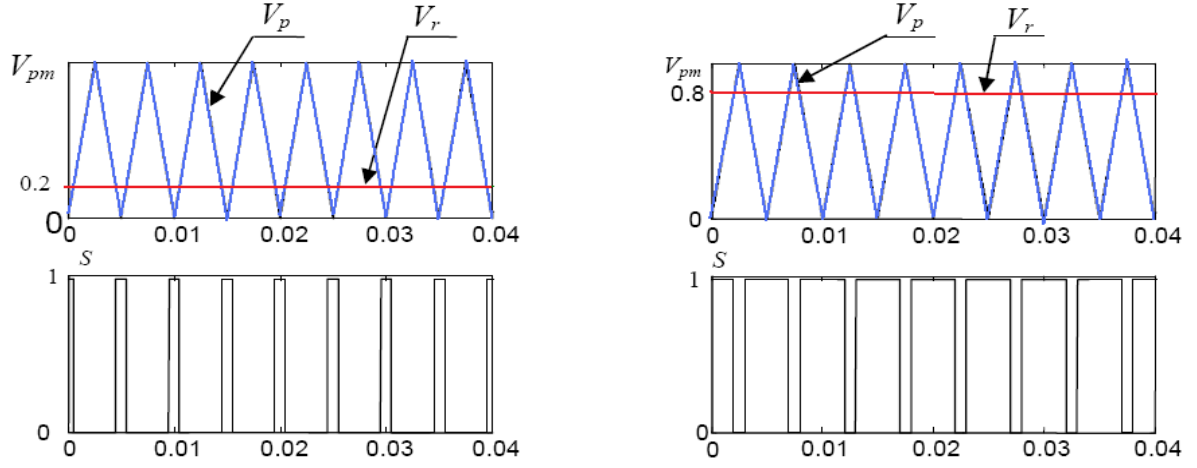


Figure 3.21 : Génération des signaux de commande avec une porteuse triangulaire unipolaire.

III.8.1.2 Cas d'une porteuse en dent de scie unipolaire

L'équation de la porteuse $V_p(t)$ dans ce cas est

$$V_p = V_{pm}(t/T_p) \quad (3.32)$$

Avec :

$$0 < t < T_p$$

Le même algorithme de commande de l'équation (3.27) est utilisé.

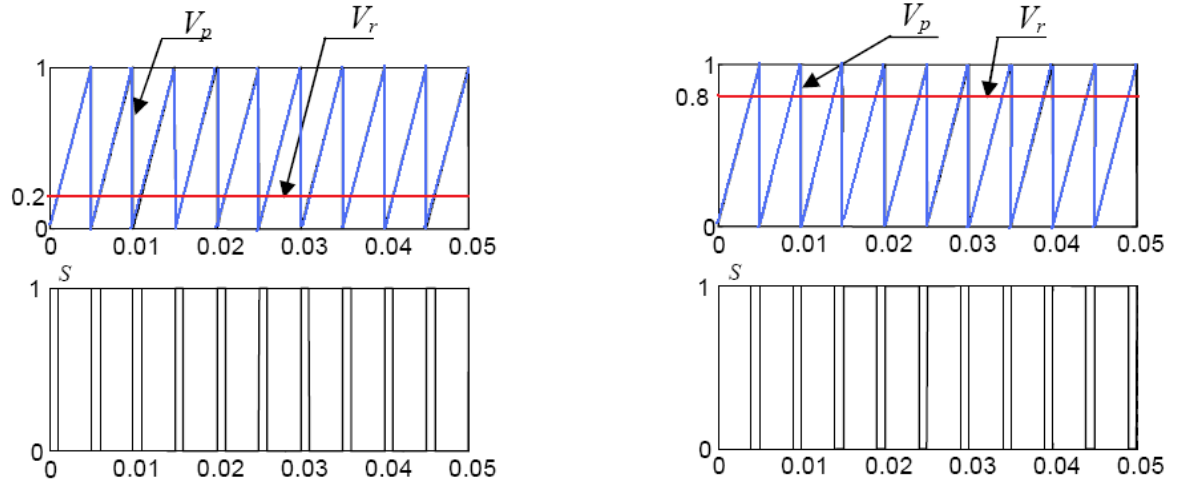


Figure 3.22 : Génération des signaux de commande avec une porteuse en dent.

III.8.2 Commande MLI du hacheur à quatre quadrants

1.8.2.1 Cas d'une porteuse triangulaire bipolaire

L'équation de la porteuse $V_p(t)$ est :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_p = 4V_{pm}(t/T_p) - V_{pm} & t < T_p/2 \\ V_p = -4V_{pm}(t/T_p) - V_{pm} & T_p/2 < t < T_p \end{cases} \quad (3.33)$$

L'algorithme de commande utilisé est

Si $V_r > V_p$ $S_1=1$ $S_2=0$
 $V_r < V_{pm}$ $S_1=0$ $S_2=1$

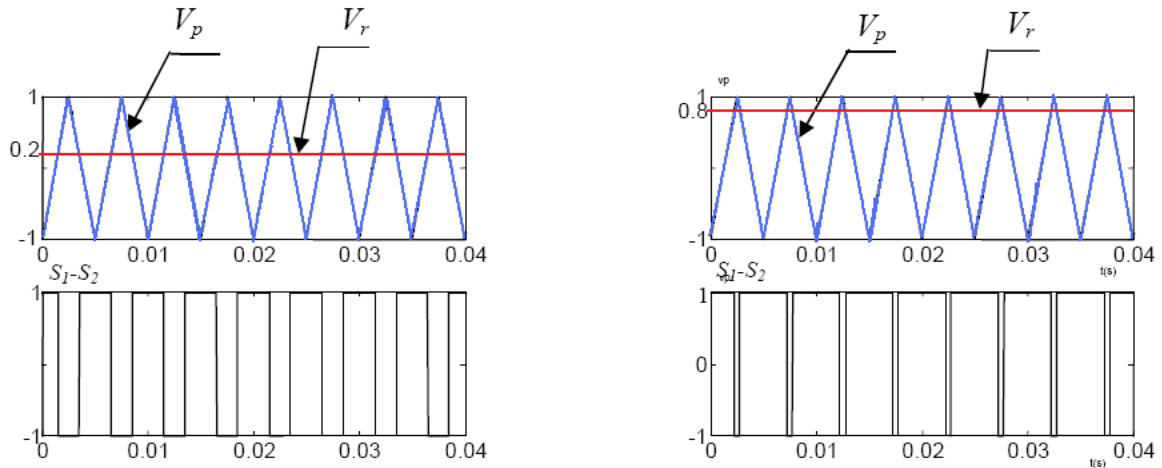


Figure 3.23 : Génération des signaux de commande avec une porteuse triangulaire bipolaire.

III.8.2.2 Cas d'une porteuse en dent de scie bipolaire

L'équation de la porteuse $V_p(t)$ est :

$$V_p = 2V_{pm}(t/T_p) - V_{pm} \quad (3.34)$$

Avec : $0 < t < T_p$

L'algorithme de commande adapte est le suivant :

$$\text{Si } \begin{cases} V_r > V_p & S_1 = 1 & S_2 = 0 \\ V_r < V_p & S_2 = 0 & S_1 = 1 \end{cases} \quad (3.35)$$

III.9 ETUDE DE L'ASSOCIATION MOTEUR A COURANT CONTINU-HACHEUR

III.9.1 Moteur à courant continu alimenté par un hacheur série

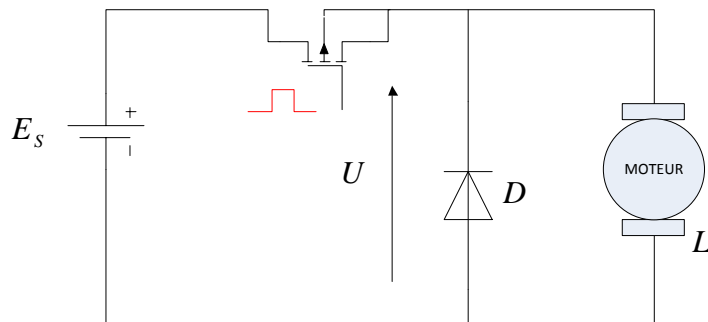


Figure 3.24 : Association hacheur série-moteur à courant continu.

Le hacheur série est souvent employé pour commander un moteur à courant continu, dans un seul quadrant du plan couple-vitesse.

On rappelle que la vitesse d'un tel moteur est proportionnelle à la tension d'alimentation.

Finalement la f.é.m. du moteur et donc la vitesse peuvent être réglé grâce au rapport cyclique par la relation (3.22) [3].

La figure suivante décrit le comportement du moteur lorsqu'il est alimenté sous une tension correspondant à une tension de référence V_r varier entre 0,2V et 0.8V. La procédure de démarrage est donc d'utiliser le hacheur avec une valeur de rapport cyclique très faible au départ (0.2V), et de l'augmenter après 0.02s secondes à (0.8V).

La forme du courant et de la vitesse est représentée par la Figure I.25

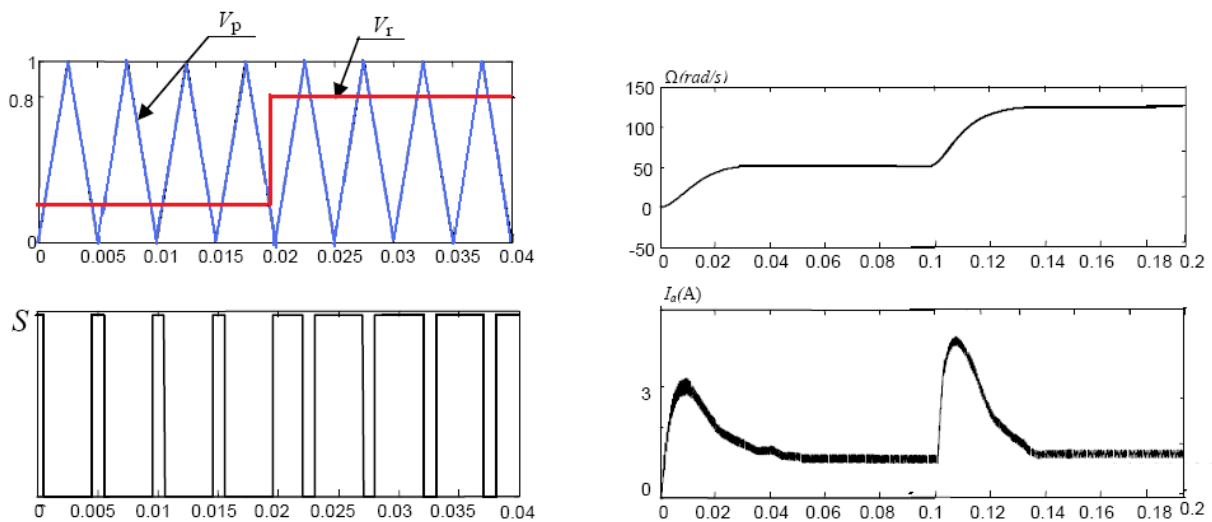


Figure 3.25 : Commande de moteur à courant continu par un hacheur série.

III.9.1.1 Interprétations

- Au démarrage, le courant induit est très grande il est simplement limité par la valeur de la résistance de l'enroulement induit qui est très faible. Pour démarrer correctement le moteur, on doit l'alimenter sous une tension plus faible, et donc commander l'interrupteur de puissance du hacheur avec un signal à rapport cyclique plus faible.
- La tension moyenne de sortie est toujours positive.
- Il y'a qu'un seul sens de rotation. Pour un hacheur série.

III.9.2 Moteur avec hacheur à quatre quadrants

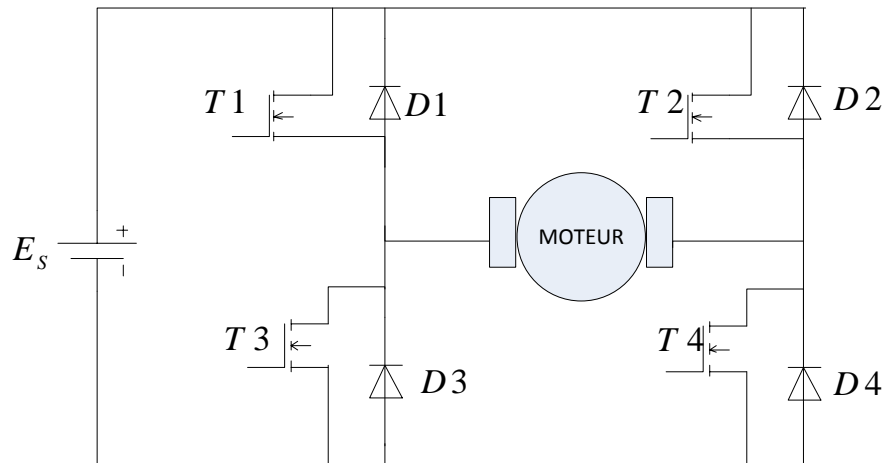


Figure 3.26 : Association hacheur quatre quadrants - moteur à courant continu.

III.9.2.1 Stratégie de commande

La commande de puissance utilise un pont en H constitué de quatre transistors T_1 , T_2 , T_3 et T_4 . En marche avant Les transistors T_2 et T_3 sont bloqués, T_1 et T_4 sont passantes.

En marche arrière, Les transistors T_1 et T_4 sont bloqués, T_2 et T_3 sont passantes. Ceci entraîne le moteur à tourner dans un sens comme dans l'autre. Lorsque l'on arrête le moteur, et qu'il continu à tourner avec l'inertie, il se comporte comme une génératrice [4] .

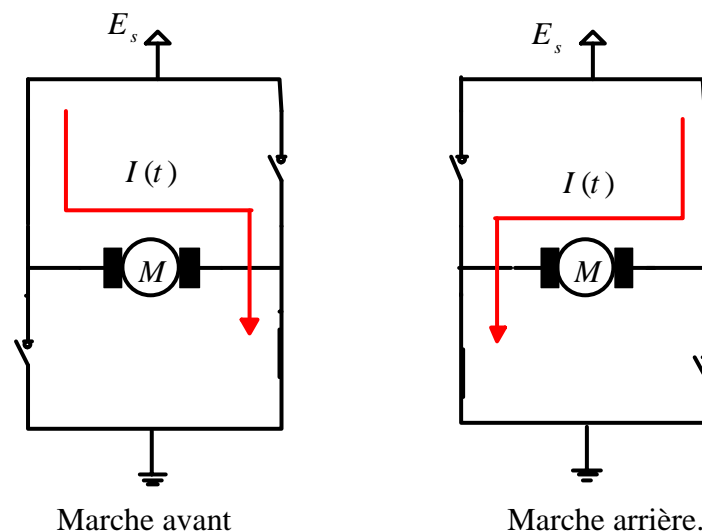


Figure 3.27 : Fonctionnement quatre quadrants avec moteur à courant Continu.

Les formes du courant et de la vitesse sont représentées par la Figure 3.28

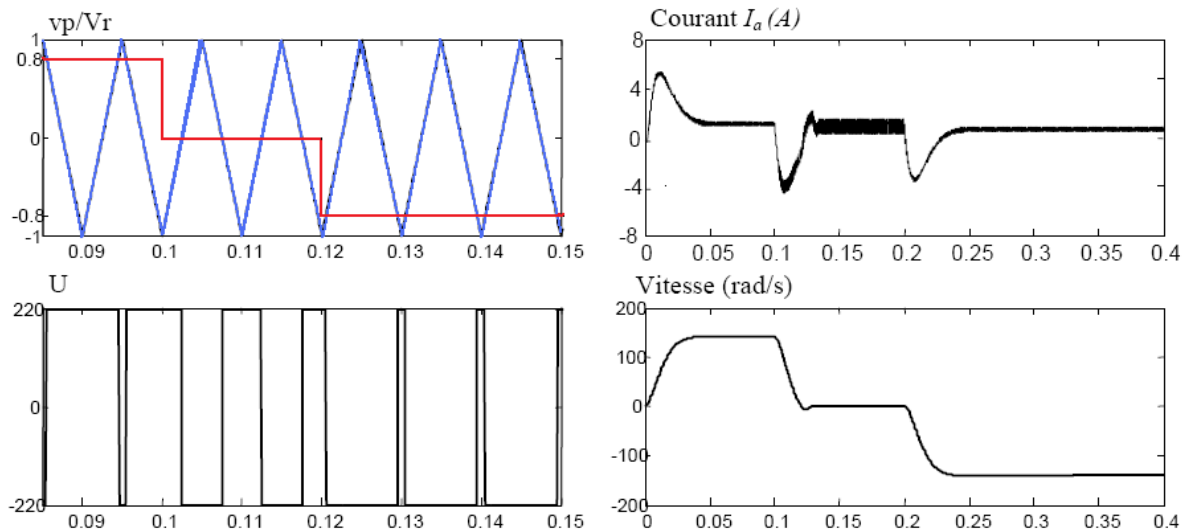


Figure 3.28 : Commande du moteur à courant continu par un hacheur à quatre quadrants.

III.9.2.2 Interprétations

- La tension appliquée à l'induit peut prendre les valeurs $+E_s$ ou $-E_s$ ce qui permet, suivant la valeur de tension de référence de donner une valeur moyenne de tension de sortie positive ou négative.
- Le courant d'induit présente des oscillations à haute fréquence.
- Pour $V_r=1$ et $V_r=0$ le moteur à plein régime (dans les deux sens de rotation).
- Pour $V_r=0.5$ le moteur étant à l'état de freinage.

III.10 CODEUR OPTIQUE INCREMENTALE (CAPTEUR):

Pour mesurer la position ou la vitesse actuelles du moteur, un capteur actif de type codeur optique est utilisé dans beaucoup d'applications industrielles. Selon la Figure 3.29, le disque du capteur contient des encoches (N fenêtres), pour faire passer un faisceau lumineux à partir d'une source de lumière. Une photodiode permet alors de détecter et de générer ainsi un signal sous forme de trains d'impulsions à la sortie du conditionneur électronique. On remarque que chaque incrément du compteur représente l'addition d'un angle de $2\pi / N = 15^\circ$. Pour savoir le sens de rotation du moteur, on met deux capteurs qui génèrent deux signaux avec un déphasage de 90° ou -90° , lorsque le détecteur 2 génère un front montant en voire si le 1^{er} détecteur est à l'état bas donc c'est le sens avant, sinon c'est le sens arrière, Figure 3.30

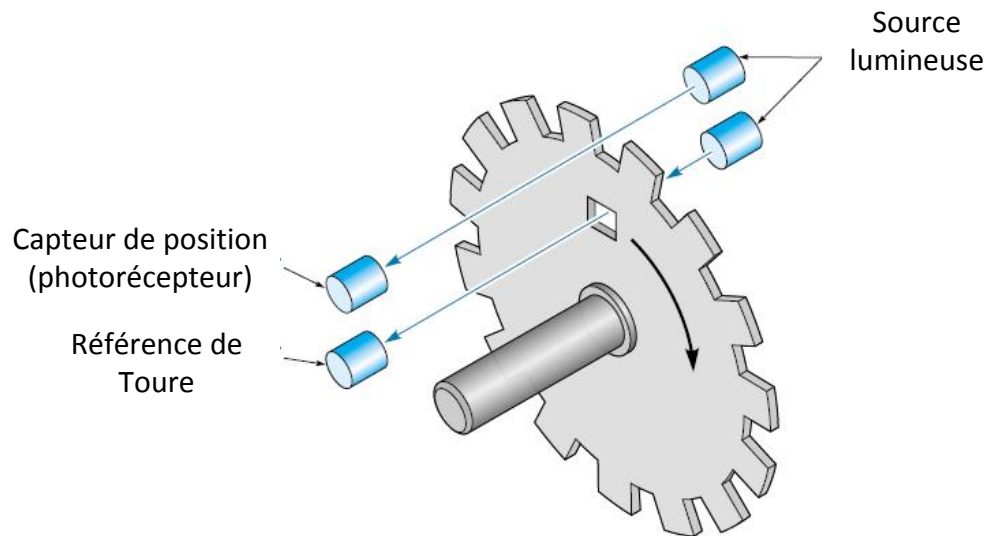


Figure 3 .29 : Codeur optique incrémentale.

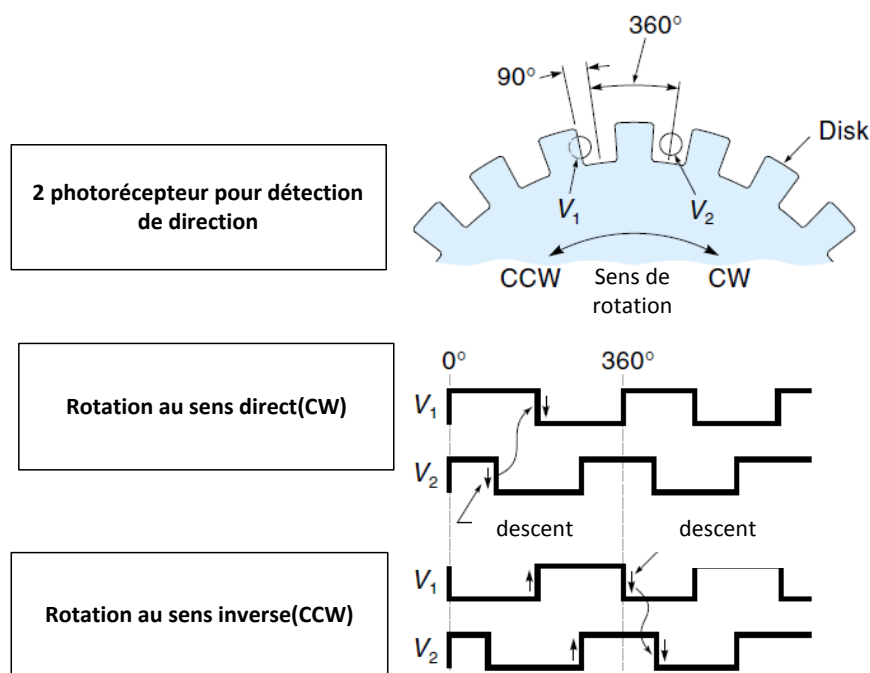


Figure 3 .30 : Détection de position et direction par le codeur optique

III.11 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présentés le moteur à courant continu, ainsi la modélisation de l'association hacheur-moteur à courant continu et la codeur optique. L'utilisation des hacheurs est indispensable pour faire varier la vitesse de rotation et la position angulaire d'un moteur à courant continu à excitation séparée en boucle ouverte. Dans le chapitre qui suit, nous évoquerons les stratégies de régulation de vitesse et position d'un moteur à courant continu en boucle fermée.