

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique**

CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et techniques

Filière: génie électrique

Spécialité : contrôle et diagnostic des
systèmes électriques

Thème

**Etude et simulation de moteur pas à pas à
aimant permanent**

Soutenu le 27 Juin 2009

Présenté par :

ABDELAOUI Abdelhak
TLIBA Ahmed
ZINE Boubaker

Rédigé par:

Mr. LABBI Yacine

Remerciement

Au terme de ce modeste travail, nous commençons avant tout chose, par remercier ALLAH LE TOUT PUISSANT pour son aide et de nous avoir doté de beaucoup de force physique et morale et du courage nécessaire pour l'élaboration de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement notre encadreur en l'occurrence M^{er} LABBI Yacine, de nous avoir assisté, suivi, conseillé, aidé et encouragé durant toute l'année sans lâche qui nous permis d'accomplir cette étude ainsi durant les études universitaires, sans oublier de remercier tous nos enseignants pour l'enseignement qu'il nous ont donné durant notre cycle universitaire surtout le membre de jury d'avoir juger notre travail.

Nous adressons aussi un grand merci à tous ceux qui ont aidé de près ou de loin surtout M^{elle} TLIBA Zohra Ingénieur d'état en informatique pour ces aides et à toute la promotion 2009 option CDSE.

Liste des figures

Fig. I.1. Eléments intercalés entre le moteur et son alimentation.....	3
Fig. I.2. Machine à réluctance variable MRV.....	5
Fig. I.3. Machine à aimant permanent MP	6
Fig. II.1. Schéma équivalent d'un moteur pas à pas à réluctance variable.....	13
Fig. II.2. Pas dentaire τ_{dr} et pas des plots τ_{dr}	14
Fig. II.3. Positionnement du moteur pas à pas à réluctance variable.....	15
Fig. II.4. Structure d'un moteur à aimant permanent.....	17
Fig. II.5. Les opérations d'un moteur pas à pas à aimant permanent.....	18
Fig. II.6. Schéma électrique d'un moteur pas à pas à aimant permanent.....	18
Fig. II.7a. Mode monophasé.....	20
Fig. II.7b. Mode biphasé.....	21
Fig. II.7c. Mode demi pas.....	21
Fig. II.8a. La commande électrique du MP bipolaire (Pont de 4 transistors par phase).....	22
Fig. II.8b. Alimentation symétrique du MP bipolaire.....	22
Fig. II.9. Schéma simplifié d'un moteur à aimant permanent unipolaire.....	22
Fig. II.10. Mode de commande schématisé pour les deux moteurs (Unipolaire et bipolaire).24	
Fig. II.11a. construction du rotor du moteur pas à pas hybride MH.....	26
Fig. II.11b. Positionnement du moteur pas à pas hybride MH.....	26
Fig. III.1. Schéma équivalent d'une phase du moteur.....	31
Fig. III.2. Caractéristique statique.....	34
Fig. III.3. Domaine de fonctionnement d'un moteur pas à pas.....	35
Fig. III.4. courants théoriques en alimentation bipolaire des principaux modes.....	37

Fig. III.5. Schéma de simulation du moteur dans le référentiel β - α	38
Fig. III.6. Schéma de simulation du moteur dans le référentiel d-q.....	38
Fig. III.7. Résultats de la simulation du MPP dans le référentiel (α - β)à vide pour $f=10\text{HZ}$ et en charge.....	39
Fig. III.8. Résultats de la simulation du MPP dans le référentiel (d-q)à vide pour $f=10\text{HZ}$ et en charge.....	44

Nomenclature

R : Résistance d'une phase statorique.

L : Inductance d'une phase statorique.

N_r : Nombre des dents rotorique.

K : Coefficient du couple électromotrice.

F : Coefficient de frottement visqueux.

C_r : Couple de charge.

C_e : Couple électromagnétique.

C_{rs} : Coefficient de frottement.

Ω : Vitesse de rotation du rotor.

J : Inertie des masses tournantes.

θ : Angle de position.

I_α, I_β : Intensité de courant dans les phase α et β .

U_α, U_β : La tension aux borne des phase α et β .

α, β : Axes correspondants au référentiel fixe par rapport au stator.

d, q : Axes correspondants au référentiel fixe par rapport au champ tournant.

N_{pt} : Nombre des pas total.

N_{ps} : plots au stator.

f_m : La fréquence.

ANNEXE -B-

Paramètre de moteur pas à pas à aimant permanent

$$\mathbf{R} = 4.2 \, \Omega$$

$$\mathbf{L} = 4.2 \, \text{mH}$$

$$\mathbf{Nr} = 4$$

$$\mathbf{K} = 1\text{Nm/A}$$

$$\mathbf{Pas} = 1.8^\circ$$

$$\mathbf{V} = 4.2 \, \text{v}$$

$$\mathbf{J} = 0.00001 \, \text{Kg.m}^2$$

ANNEXE -A-

On reprend les équations (3.11) et (3.12)

$$U_{\alpha} = RI_{\alpha} + L \frac{dI_{\alpha}}{dt} - K\Omega \sin(Nr.\theta)$$

$$U_{\beta} = RI_{\beta} + L \frac{dI_{\beta}}{dt} + K\Omega \cos(Nr.\theta)$$

On va exprimer les tension et les courant dans le repère d-q tournant lié au rotor:

$$M = \begin{bmatrix} \cos Nr.\theta & \sin Nr.\theta \\ -\sin Nr.\theta & \cos Nr.\theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos Nr.\theta & \sin Nr.\theta \\ -\sin Nr.\theta & \cos Nr.\theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_{\alpha} \\ U_{\beta} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos Nr.\theta & \sin Nr.\theta \\ -\sin Nr.\theta & \cos Nr.\theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix}$$

On écrit les équation (3.11) et (3.12) sous forme matriciel et en la multiplie par la matrice M on obtient :

$$[M] \times \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \times [M] \times \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \left([M] \times \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \right) + [M] \times \begin{bmatrix} -K\Omega \sin Nr.\theta \\ K\Omega \cos Nr.\theta \end{bmatrix}$$

En développant le terme $\frac{d}{dt} \left([M] \times \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \right)$, il vient :

$$\frac{d}{dt} [M] \times \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \times [M] = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \frac{d}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} [M] \quad \text{or}$$

$$\frac{d}{dt} [M] = N_r \begin{bmatrix} \sin Nr.\theta & -\cos Nr.\theta \\ \cos Nr.\theta & \sin Nr.\theta \end{bmatrix} \text{ et } \frac{d\theta}{dt} = \Omega \text{ il vient que :}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \times \Omega N_r \times \begin{bmatrix} \sin N_r \theta & -\cos N_r \theta \\ \cos N_r \theta & \sin N_r \theta \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \Omega N \times \begin{bmatrix} -I_q \\ I_d \end{bmatrix}$$

En développant aussi le terme

$$[M] \times \begin{bmatrix} -K\Omega \sin N_r \theta \\ K\Omega \cos N_r \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K\Omega \sin(N_r \theta) \cdot \cos(N_r \theta) + K\Omega \sin(N_r \theta) \cdot \cos(N_r \theta) \\ K\Omega \cos^2(N_r \theta) + K\Omega \sin^2(N_r \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ K\Omega \end{bmatrix}$$

Puis en remplace termes dans l'équation on obtient :

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \times \Omega N_r \times \begin{bmatrix} -I_q \\ I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K\Omega \end{bmatrix}$$

En la développant on obtient les équation (3.11) et (3.12) ci-dessus.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Moteur électrique pour robotique DONOD 2^{eme} édition EEA.
- [2] Moteur Pas a Pas – Marcel Jouhandou in «De la grandeur ».
- [3] Amar Bourki « Etude statique et dynamique d'un moteur pas à pas » Mémoire dirigé par A bdelhadi et Bellala promotion 1998.
- [4] S. Barkati, « Commande robuste par retour d' état d'une machine synchrone », Thèse de Magister, ENP 1997.
- [5] T. Charbonnier « Etude d'un moteur à réluctance hybride à aimant statoriques multiples » .Thèse de Docteur ingénieur. I.N.P.L. Nancy-octobre 1981.
- [6] A. J. Fossard, « Commande à structure variable , systèmes de régulation,Collaboration automatique ».Editions Masson,1996
- [7] W. Gao,J. C. Hung, « Variable structure control ystem »,IEEE Trans.Idust.Applic.Vol.40,N°.1,pp45-55,1993.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

Chapitre I : Généralités sur les moteurs pas à pas.

I.1. Introduction	01
I.2. Définition	01
I.3. Historique sur la machine	02
I.4. Configuration de base	02
I.5. Le couple	03
I.6. Précision de moteur pas a pas.....	04
I.7. Principe de fonctionnement de base.....	04
I.8. Paramètres caractéristiques.....	04
I.9. Propriétés et applications	05
I.10. Avantages	07
I.11. Inconvénients	07
I.12. Application	07
I.13. Conclusion.....	08

Chapitre II : Etude théorique sur les types des moteurs pas à pas

II.1. Introduction.	10
II.2. Définition	10
II.3. Types des moteurs pas à pas	11
II.3.1. Machine à réluctance variable MRV	11
II.3.1.1. Définition et configuration de base	11
II.3.1.2. Principe de fonctionnement	12
II.3.1.3. Technologie	14
II.3.1.4. Avantages et inconvénients	15
II.3.2. Machine à aimant permanent (MP) (Rotor actif)	16
II.3.2.1. Configuration de base	16
II.3.2.2. Principe de fonctionnement	16
II.3.2.3. Types de MP	18
II.3.2.4. Avantages et inconvénients	21
II.3.3. Machines hybrides MH	23
II.3.3.1. Configuration de base	23
II.3.3.2. Principe de fonctionnement	24
II.3.3.3. Avantages et inconvénients	24
II.3.3.4. Comparaison entre les trois types de moteurs pas à pas	26
II.4. Conclusion	26

Chapitre III : Modélisation de moteur pas à pas à aimant permanent

III.1.Introduction	28
III.2.Modélisation du moteur pas a pas a aimant permanent.....	29
III.2.1.Equation des tensions	29
III.3.Transformation de Park	31
III.3.1.Transformation de Park applique au moteur pas a pas a aimant permanent.....	31
III.3.2.Equation de couple	32
III.4.Domaine de fonctionnement du moteur pas a pas	33
III.4.1.Comportement statique	33
III.5.Comportement dynamique	34
III.6.Caractéristique couple vitesse	35
III.7.Modes de séquençement du moteur pas à pas.....	36
III.8.Schéma de simulation.....	37
III.9.Résultats de simulation.....	39
III.9.1.Simulation de moteur pas à pas pour $f = 10\text{Hz}$ (R : α - β).....	39
III.9.2.Simulation de moteur pas à pas pour $f = 10\text{Hz}$ (R :d-q)... ..	43
III.10.Conclusion.....	48

CONCLUSION GENERALE

Annexe a

Annexe b

Référence bibliographique

INTRODUCTION GENERALE

Un moteur pas à pas transforme des impulsions de commande en une rotation de "n" pas du rotor : il permet donc un positionnement précis sans boucle d'asservissement. De nombreuses applications industrielles utilisent les moteurs pas à pas : en robotique (servomécanisme), en micro-informatique (lecteurs de disquettes, disque dur ...), dans les imprimantes et tables traçantes, dans le domaine médical : pousse seringue (le moteur pas à pas permet un débit régulier pour la perfusion).

Fois et depuis les chercheurs se sont intéressés au développement et à l'exploitation des qualités de ce moteurs.

En janvier 1957 « *Thomas, A.G et Fleischaver, F.J* » publiaient un article intitulé « *The power stepping motor a new actuator* » qui traitait l'utilisation du moteur pas à pas à réluctance variable multi-stacks dans les applications modernes tel que les machines à commande numérique.

C'est à partir de 1970 et jusqu'à nos jours que le moteur pas à pas a connu une révolution, surtout dans l'industrie des ordinateurs et avec le développement de la théorie des semi-conducteurs il était possible de commander le moteur à l'aide des microprocesseurs, ce qui a rendu son intégration dans différents systèmes à commande numérique.

L'objectif de notre travail consiste à la modélisation et la simulation du moteur pas à pas à aimant permanent et leur l'étude théorique.

Le premier chapitre présente les généralités sur les moteurs pas à pas et leurs notions de bases.

Dans le second chapitre, nous présenterons les différentes structures du moteur pas à pas et leur principe de fonctionnement.

Il sera exposé dans le troisième chapitre, le modèle mathématique du moteur pas à pas à aimant permanent et la simulation en boucle ouverte.

Enfin, ce travail sera clôturé par une conclusion générale

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES MOTEURS

PAS A PAS

1.1. INTRODUCTION :

Le moteur pas à pas (MPP) est un actionneur électrique qui met en application un principe simple de « champ tournant » afin de mettre en mouvement synchrone un rotor mobile en rotation.[1]

L'essor du contrôle électronique, fondé sur l'électronique de puissance, muni de commandes électroniques plus performantes, ont rendu possible un pilotage efficace du moteur pas à pas. C'est pourquoi, son champ d'application s'est vu renforcé durant les 10 à 15 dernières années. [1]

1.2. DEFINITION :

Le moteur pas à pas est un convertisseur électromécanique qui assure la transformation d'un signal électrique impulsionnel en un déplacement mécanique (angulaire ou linéaire). Sa structure de base se présente sous la forme de deux pièces séparées mécaniquement, le Stator et le Rotor. L'interaction électromagnétique entre ces deux parties assure la rotation.

Dans cette première partie de l'étude nous présenterons les une vision général sur le moteur pas à pas puis nous présenterons les principales caractéristiques des différents types des moteurs pas à pas et le principe de fonctionnement dans une étude théorique .

1.3. HISTORIQUE SUR LA MACHINE :

Les premiers moteur pas à pas à réluctance variable ont été utilisé par la marine de la guerre britannique dans les années 1920 pour déplacer les indicateurs de direction des lance-torpilles et de canons. [1]

En 1927 " Mc clelland ,W " publia un article intitulé (The application of electricity in warsships) dont lune de ces paties faisait la description d'un moteur pas à pas à reluctance variable à trois phases et qui tourait à l'aide d'un mécanisme rotatif manuel.

Dans l'années 1930, l'ingenieur marius laret a découvert un type particulier de moteur pas à pas à aiment, connu maintenant sous le nom de moteur lavet, qui permis le développement de ce dispositif dans le domaine de l'horlogerie grâce à sa miniaturisation et à son faible cout, il équipe aujourd'hui presque toute les montre à aiguilles .

En 1957 << Thomes , A.G et fleis chaver F.J >> publiaient un article intitulé (The power stepping motor a new actuator) qui traitait l'utilisation du moteur pas à pas à reluctance variable multi-sticks dans les application moderne (Machine a commande numérique) .

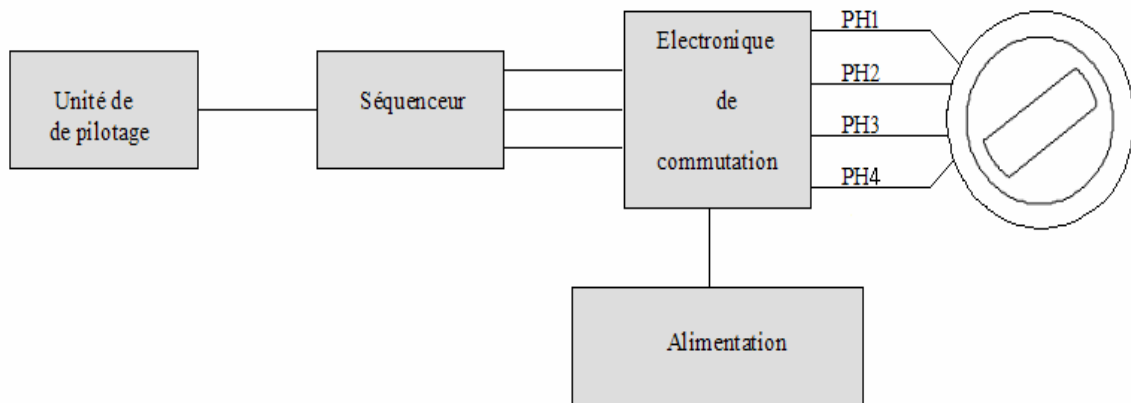
L'avènement de l'électronique numérique dans les années 1960 jusqu'à nos jours qui a permis le développement de MPP surtout dans l'industrie des ordinateurs et avec le développement de la théorie des semi-conducteurs il est possible de commander le moteur à l'aide des microprocesseurs , ce qui a rendu son intégration dans les différents systèmes à commande numérique. [1]

1.4. CONFIGURATION DE BASE:

Entre le moteur et son alimentation, sont intercalés trois éléments essentiels. Figure (1.1).

- Une unité de pilotage, qui élabore les impulsions de commande.
- Un séquenceur, qui dirige les impulsions vers les voies électroniques de commutation.
- Une électronique de commutation, qui à partir d'une alimentation, dirige les tensions vers les enroulements appropriés du moteur.

Une impulsion électrique est introduite dans le séquenceur en système des tensions de pilotage, qui agissent sur l'électronique de commutation, de manière à alimenter les différentes bobines du stator.



Figure(1.1): Eléments intercalés entre le moteur et son alimentation

Le courant qui en résulte engendre un champ magnétique de direction précise. L'impulsion suivante fait changer (commute le système de tension) la position du champ statorique d'un pas. La succession des impulsions, à une fréquence donnée, impose un champ statorique tournant « pas à pas ». [3]

1.5. LE COUPLE:

Le mouvement discret du champ d'entrefer est suivi par le rotor soumis au couple synchronisant.

La nature du couple découle :

- Soit l'interaction champ (courant) du stator fer du rotor, lorsque ce dernier présente une structure dentée passive Figure (1.2).
- Soit d'interaction champ (courant) du stator, champ (aimant du rotor, lorsque le rotor comporte un aimant) Figure (1.3).

1.6. PRECISION DES MOTEURS PAS A PAS :

Pour expliquer la précision de ces moteurs on prend l'exemple d'entraînement linéaire d'un moteur pas à pas qui exécute [20pas / tour] et qui est couplé à une vis sans fin ayant cinq filets par centimètre. [1]

Aussi, ce moteur doit tourner avec [100 pas] pour faire un déplacement d'un centimètre ce qui rend possible d'ajuster la position d'une machine outil ou d'un traceur (x, y) avec une précision d'un dixième de millimètre correspondante à un pas. Alors, cette principale qualité des moteurs pas à pas, obtenue sans asservissement dans les systèmes de commande, lui offre le nom du pilote, quand il s'agit de la robotique ou du traitement de l'informatique, sans concurrence.

1.7. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE BASE:

Le principe de fonctionnement du moteur pas à pas est basé sur le mouvement discret du champ magnétique, suivi par celui du rotor, qui lors des déplacements est soumis au couple électromagnétique synchronisant. Ainsi :

- Une seule commutation provoque un seul pas, quelque soit la durée d'impulsion.
- Le déplacement angulaire du rotor correspond à un pas, ne dépend ni de l'amplitude, ni de la durée de l'impulsion.
- L'arrêt sur une position dépend d'une impulsion ou d'un train d'impulsions, donc les erreurs de positionnement ne sont pas cumulatives.

1.8. PARAMETRES CARACTERISTIQUES:

L'examen rapide et très élémentaire des machines pas à pas, ou toutes les inerties (électriques et mécaniques) ont été négligées, permet néanmoins de tirer un certain nombre de conclusions générales.

- Le pas angulaire mécanique :

$$\alpha_m = \frac{2\pi}{N_{pt}} (rad) = \frac{360}{N_{pt}} (^\circ) \quad (1.1)$$

- La vitesse de rotation mécanique se calcule comme :

$$\Omega = f_m \alpha_m = f_m \frac{2\pi}{N_{pt}} \quad (1.2)$$

1.9. PROPRIETES ET APPLICATIONS:

Le moteur pas à pas a été conçu de deux démarches logiques très différentes :

- D'une part, on a cherché un moteur capable de développer un couple important à faible vitesse, voir même à l'arrêt.
- D'autre part, on a étudié un dispositif capable de transmettre les informations de caractère électronique à distance.

En assurant les fonctions de régulation :

- De commande.
- D'affichage.
- De positionnement.

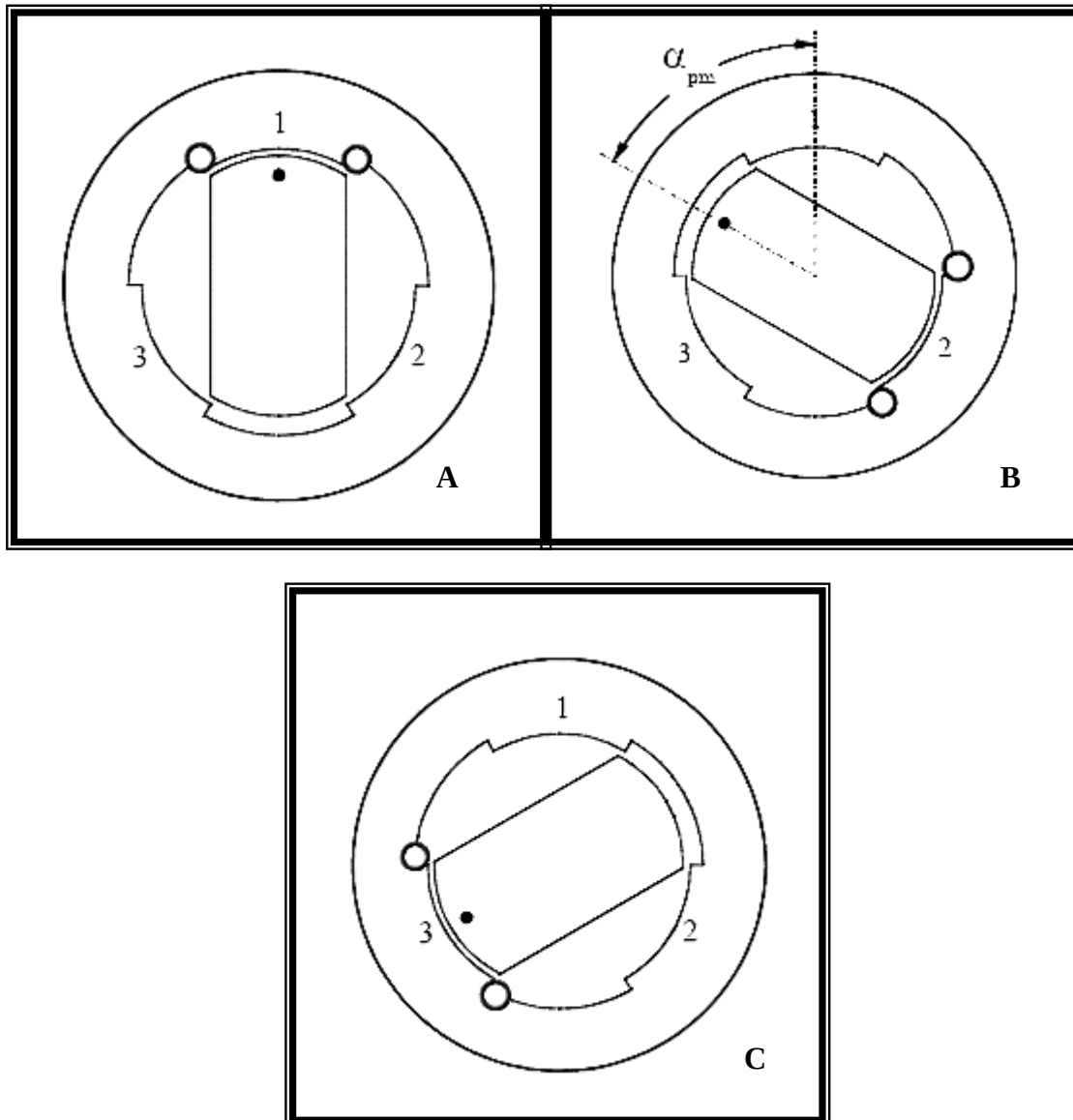


Figure (1.2): Machine à réluctance variable MRV

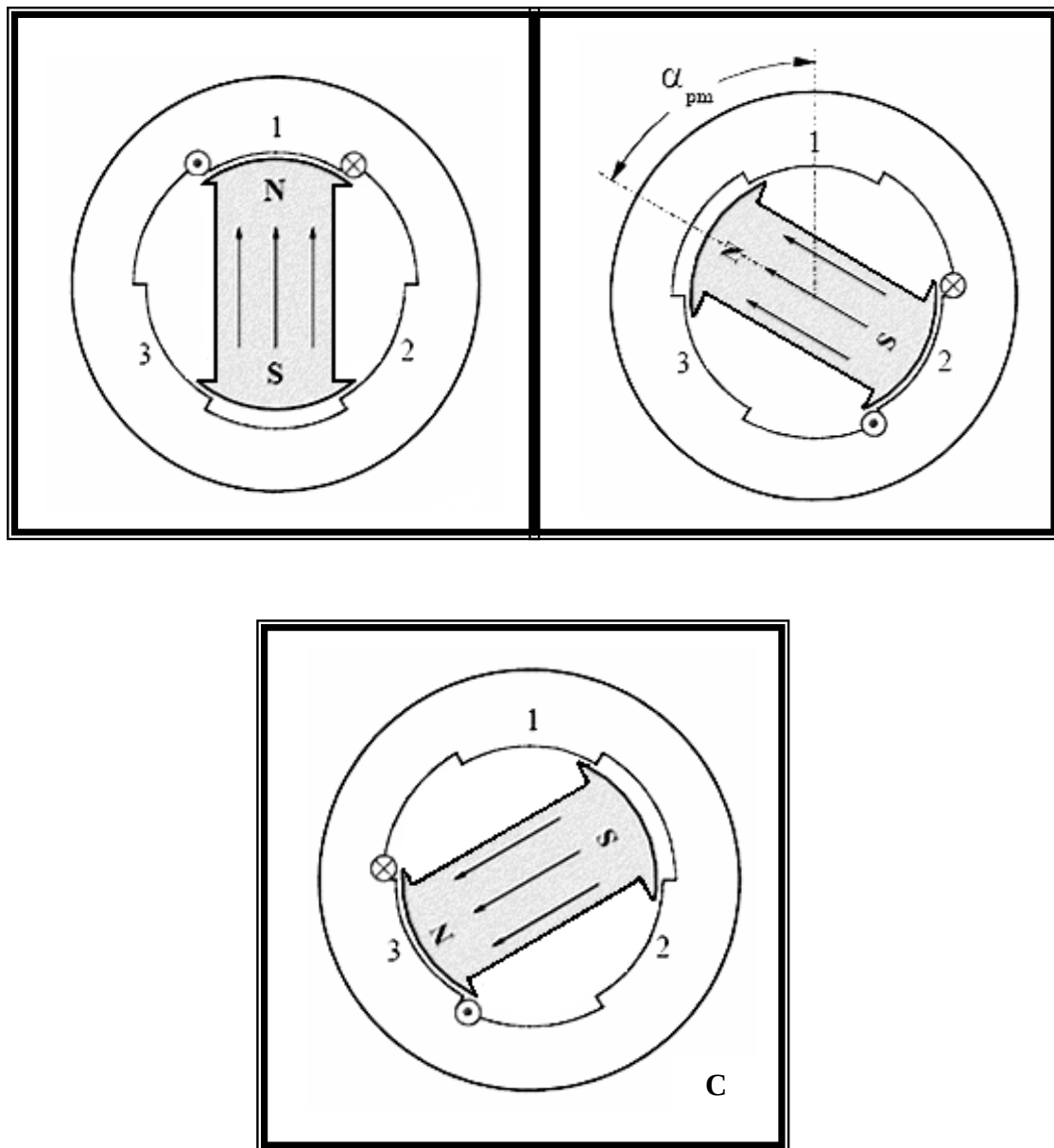


Figure (1.3) :Machine à aimant permanent MP

Le moteur pas à pas devient actuellement, le principal élément intermédiaire entre les dispositifs de traitement d'informations et le monde électrotechnique extérieur, par ailleurs, ses capacités à contrôler la position et la vitesse, par le simple pilotage de la fréquence, assurant à ce convertisseur des applications comme :

- La traction des robots mobiles.

- Le fonctionnement plus ou moins en moteur couple de grande puissance.
- L'amortissement plus ou moins mobile des charges suspendues sur des paliers magnétiques.

1.10. AVANTAGES :

Le moteur pas à pas constitue une solution simple et bon marché pour les commandes en position. Il est parfaitement adapté à une commande par un signal numérique. Par rapport aux moteur à courant continu avec ou sans balais, l'avantage déterminant est que l'asservissement de la position n'est pas nécessaire. [2]

1.11. INCONVENIENTS :

Le rendement du moteur pas à pas est en général déplorable. Dans certaines conditions, il y a un risque de perte de pas. Pour les modes commande élémentaires, les vibration et les bruits acoustiques sont importants. Pour s'approcher d'une qualité de fonctionnement comparable à celle obtenue par un moteur à courant continu avec ou sans balais, il faut utiliser une commande plus complexe ou un asservissement, mais les avantages de la simplicité et du faible coût disparaissent alors. [2]

1.12. APPLICATION :

Le moteur pas à pas est utilisé de longue date en holographie (moteurs et pendules). Les structures monophasées utilisées dans ce domaine sont un peu particulières. De façon générale, les moteurs pas à pas sont particulièrement indiqués pour obtenir un positionnement précis : antenne satellite, télescope, table XY. . . . l'informatique fait largement appel aux moteurs pas à pas : imprimantes, scanner, etc. Les distributeurs automatiques, les lecteurs de cartes, les photocopieurs, emploient également cette technologie. Quelques accessoires automobiles utilisent aussi des moteurs pas à pas. [2]

1.13. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons essayé de présenter quelques notes sur le moteur pas à pas.

Nous avons commenée par une définition puis nous citons les différent type de ces moteurs avec un schéma explicatif pour attirer les novice lecteur sur le principe de ce type des moteurs, afin de lister une historique sur le developpement de ce principe et les avantage et inconvinion.

Nous alons présent certion domaine d'application existaites de le moteur pas à pas.

CHAPITRE II

ETUDE THEORIQUE SUR LES TYPES DES MOTEURS PAS A PAS

2.1 INTRODUCTION :

Les moteurs pas à pas sont des moteurs spéciaux utilisés pour commander avec une grande précision le déplacement et la position d'un objet. Comme leur nom l'indique. Ces moteurs tournent par incrément discret. Chaque incrément de rotation est provoqué par une impulsion de courant fournie à l'un des enroulements du stator .

Les moteurs pas à pas ne sont pas vraiment des moteurs à courants alternatifs mais ce sont de moteurs synchrones alimentés par des courants discontinus. On présente le principe des trois types de moteurs pas à pas .

2.2 DEFINITION:

Le moteur pas à pas est un convertisseur électromécanique, assurant un déplacement discret, appelé « pas ».

L'application d'une ou de plusieurs impulsions de commande provoque le déplacement d'un nombre équivalent de pas.

Lorsque la fréquence des impulsions suffisamment élevée, devient fixe, le moteur se déplace à une vitesse pratiquement constante .Le déplacement discret du moteur pas à pas peu

sensible au caractère du signal de pilotage fait de ce dispositif ; l'organe le plus simple de conversion d'information numérique en action mécanique précise.

Du point de vue électrotechnique, le moteur classique ressemble à la machine synchrone, dont le stator (le plus souvent à pôles saillants) porte les enroulements de pilotage, et un rotor soit muni d'un aimant permanent (structure dite polarisée ou active) soit constitué par une pièce ferromagnétique dentée (structure dite réluctance ou passive). [3]

2.3 TYPES DES MOTEURS PAS A PAS :

Selon la nature du rotor, on distingue trois types de moteurs pas à pas :

- MPP à réluctance variable (rotor passif) MRV.
- MPP à aimant permanent (rotor actif) MP.
- MPP hybride (rotor ferromagnétique polarisé) MH. [7]

2.3.1 Machine à réluctance variable MRV:

2.3.1.1 Définition et configuration de base:

Le rotor en matériau magnétiquement perméable, dispose à sa périphérie des dents dont le nombre est différent du nombre de pôles du stator, de telle sorte que lorsqu'un de ces derniers émet un champ magnétique, il attire la dent de rotor la plus proche par le simple jeu de la loi du flux maximal (réluctance minimale).

Une des machines pas à pas à réluctance variable la plus ancienne utilisée à partir de 1920 dans la marine pour transmettre des signaux entre le pont et la salle des machines est représentée par la Figure (2.1).

La machine qui possède 6 plots au stator ($N_{ps} = 6$) et 4 dents au rotor ($N_{dr} = 4$) se positionne toujours de manière à minimiser la réluctance offerte au passage du flux magnétique crée par les F.m.m = $N_{ps} * I$.

Soit à chaque commutation ;deux dents du rotor se mettent en face des deux plots du stator, portant les voies d'enroulement actuellement alimentées comme montre la Figure (2.1).

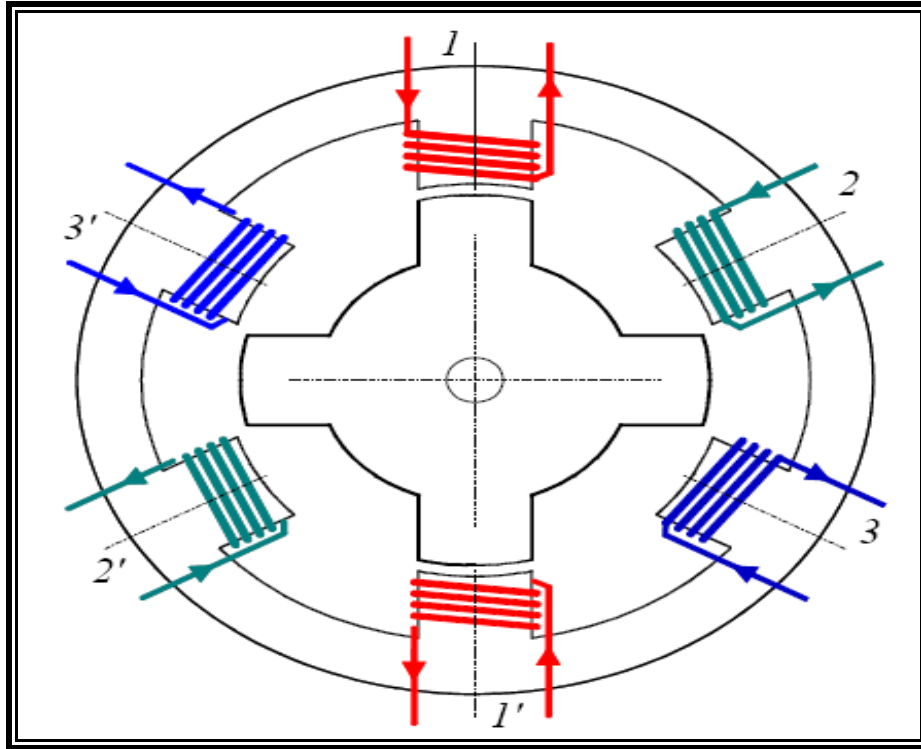


Figure (2.1): Schéma équivalent d'un moteur pas à pas à réluctance variable.

2.3.1.2 Principe de fonctionnement :

Le rotor effectue trois (03) pas par cycle de commutation grâce à l'alimentation indépendante de trois phases comportant chacune de deux voies d'enroulements branchées en séries Figure(2.2) D'où :

$N_{pc} = m = 3$ commutation par cycle

A chaque commutation correspond un pas angulaire électrique :

$$\alpha_{pe} = \frac{360}{3} = 120^\circ \text{ (Electrique).} \quad (2.1)$$

Où le pas angulaire mécanique :

$$\alpha_{pm} = \frac{\alpha_{pe}}{N_{dr}} = \frac{120}{4} = 30^\circ \text{ (Mécanique)} \quad (2.2)$$

D'où le nombre de pas par tour :

$$N_{pt} = \frac{2\pi}{\alpha_{pm}} = \frac{360}{30} = 12 \text{ Pas /tour.} \quad (2.3)$$

Soit d'une façon générale d'après notre exemple Figure (2.2).

$N_{pc} = m = 3$ Pas par cycle.

D'où le nombre de pas par tour :

$$N_{pt} = N_{pc} \times N_{dr} \quad (2.4)$$

Le pas angulaire mécanique se calcule comme suit :

$$\alpha_{pm} = \frac{2\pi}{N_{pc} \times N_{dr}} \quad (2.5)$$

Pour déterminer la structure de la machine permettant d'obtenir le nombre de pas désiré, il convient de choisir N_{ps} et N_{dr} de telle sorte que la réluctance offerte au passage du flux magnétique varie avec la rotation.

Le pas angulaire mécanique peut aussi s'exprimer de la manière suivante :

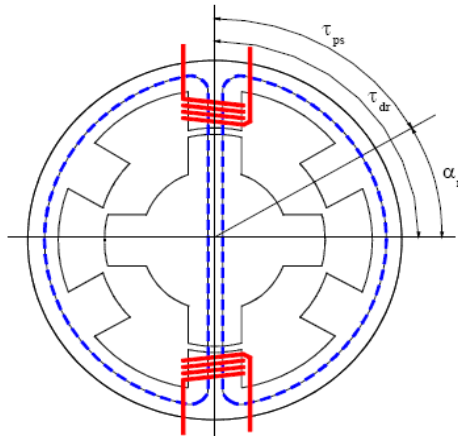
$$\alpha_{pm} = \tau_{dr} - \tau_s \quad (2.6)$$

D'où $\tau_{dr} = \frac{2\pi}{N_{dr}}$ (pas dentaire). Voir Figure (2.2).

$\tau_s = \frac{2\pi}{N_{ps}}$ (Pas des plots).

Donc on a :

$$\begin{cases} \alpha_{pm} = \frac{2\pi(N_{ps} - N_{dr})}{N_{ps} \times N_{dr}} \\ N_{pt} = \frac{2\pi}{\alpha_{pm}} = \frac{N_{ps} \times N_{dr}}{(N_{ps} - N_{dr})} \\ N_{pc} = \frac{N_{ps}}{N_{ps} \times N_{dr}} \end{cases} \quad (2.7)$$



Figure(2.2): Pas dentaire τ_{dr} et pas des plots τ_s

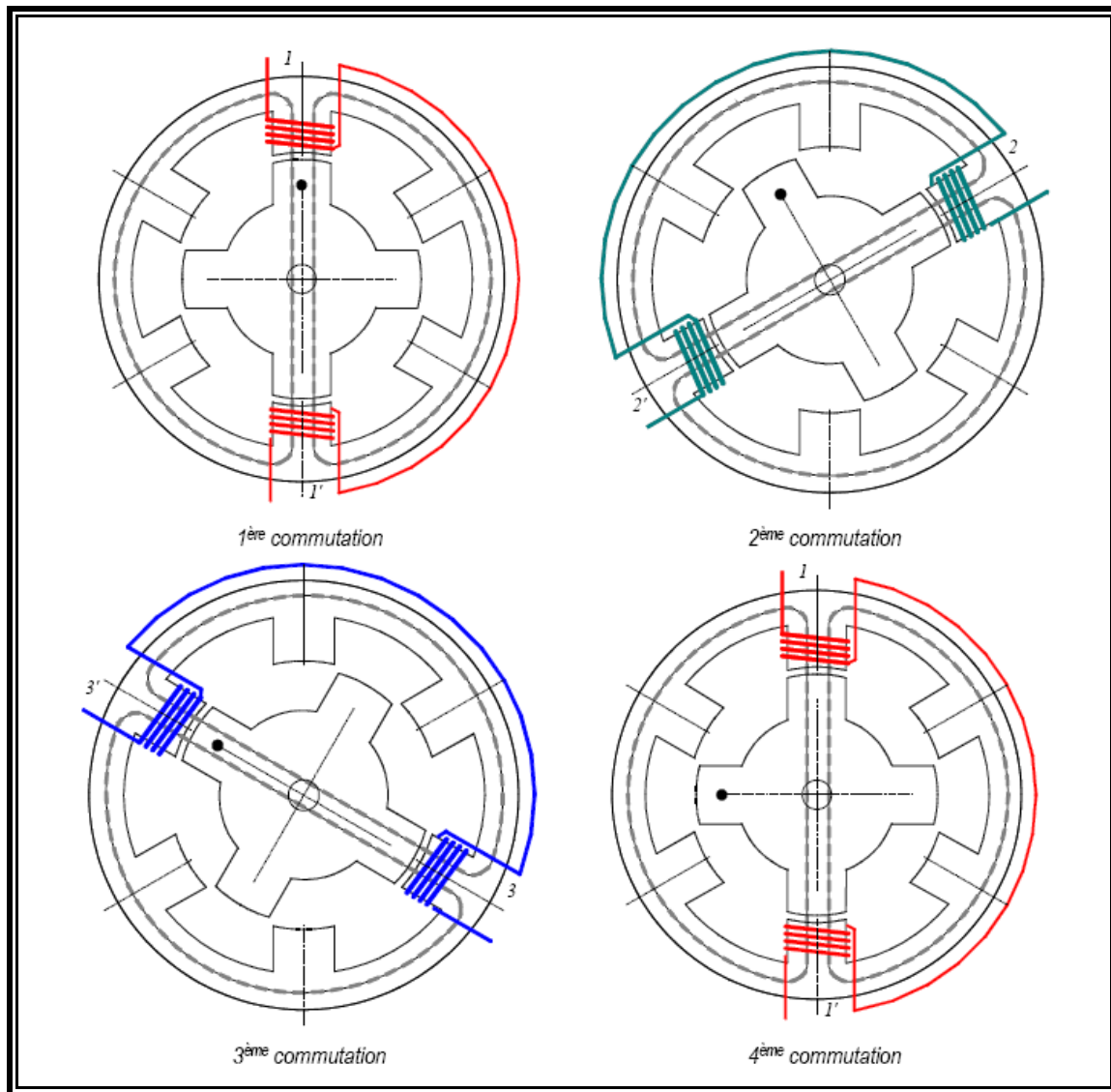


Figure (2.3): Positionnement du moteur pas à pas à réluctance variable

2.3.1.3. Technologie:

a) MRV A CIRCUIT MAGNETIQUE SIMPLE (SINGLE STOCK) :

Le circuit magnétique du stator et du rotor est assemblé à partir des tôles magnétiques de haute perméabilité (fer-silicium ou même fer-cobalte).

Certaines machines, destinées au positionnement ou à une rotation très lente, peuvent avoir un rotor et/ ou stator en fer massif.

On peut actuellement distinguer 3 géométries de base, à savoir :

- MRV à plots statoriques non dentés.
- MRV à plots statoriques dentés.

- MRV à plots statoriques dentés décalés.

b) MRV A CIRCUIT MAGNETIQUE MULTIPLE:

Pour augmenter le couple des machines à réluctances tout en gardant une faible fréquence mécanique de fonctionnement (quelques dizaines de pas par secondes), on propose des constructions à circuit magnétique multiple qui se présentent sous deux formes essentielles :

- Un empilage de plusieurs machines à circuit simple (simple stock) identique, couplées mécaniquement sur un seul arbre.
- Une machine à stator unique, possédant plusieurs rotors magnifiquement indépendants mais couplés mécaniquement sur un seul arbre.

Dans toutes ces machines, le rotor et le stator ont le même nombre de dents.

Remarque:

Le sens du courant dans les bobines statoriques n'est pas important dans les MRV.

2.3.1.4 Avantages et inconvénients:

a) Avantages:

- Construction assez facile.
- Nombre de pas par tour important.
- Le sens de rotation ne dépend pas du sens du courant dans les bobines d'alimentation.
- Permet d'atteindre des fréquences élevées.
- Il est généralement plus stable que la variante polarisée.

b) Inconvénients:

- Malgré que le couple soit proportionnel au carré du courant, ce dernier est assez faible.
- Il n'a pas un couple de maintien.
- Il ne mémorise pas la position en absence du courant.
- Sa puissance utile est faible ce qui entraîne une diminution du rendement.

2.3.2 Machine à aimant permanent (MP) (Rotor actif) :

2.3.2.1 Configuration de base:

Le stator du moteur à aimant permanent des enroulements d'excitation soit concentrés autour des plots, soit repartis dans les encoches.

Le rotor étant un aimant permanent, il se place naturellement lors de chaque commutation au voisinage de l'axe du flux d'excitation (rotor chargé).

Le MP peut être excité par un stator à structure saillante, Figure (2.4.a) ; ou à structure lisse, Figure (2.4.b) et munie d'un rotor actif bipolaire.

2.3.2.2 Principe de fonctionnement:

Le fonctionnement du moteur pas à pas à aimant permanent est basé sur l'application de la règle du flux maximal, illustré par la Figure (2.5). Lorsque l'enroulement α est alimenté, le rotor se positionne de telle sorte que le flux à travers l'enroulement α soit maximal. Si on alimente l'enroulement β , le rotor tourne de $\pm 90^\circ$ suivant le sens du courant dans cet enroulement. Ainsi, la position du rotor dépend de l'enroulement alimenté et du sens du courant qui le parcourt.

La rotation dans le sens horaire peut être obtenu par la séquence d'excitation :

(1), (2), (1'), (2').

Le sens contraire (trigonométrique) est obtenu par la séquence d'excitation :

(1), (2'), (1'), (2).

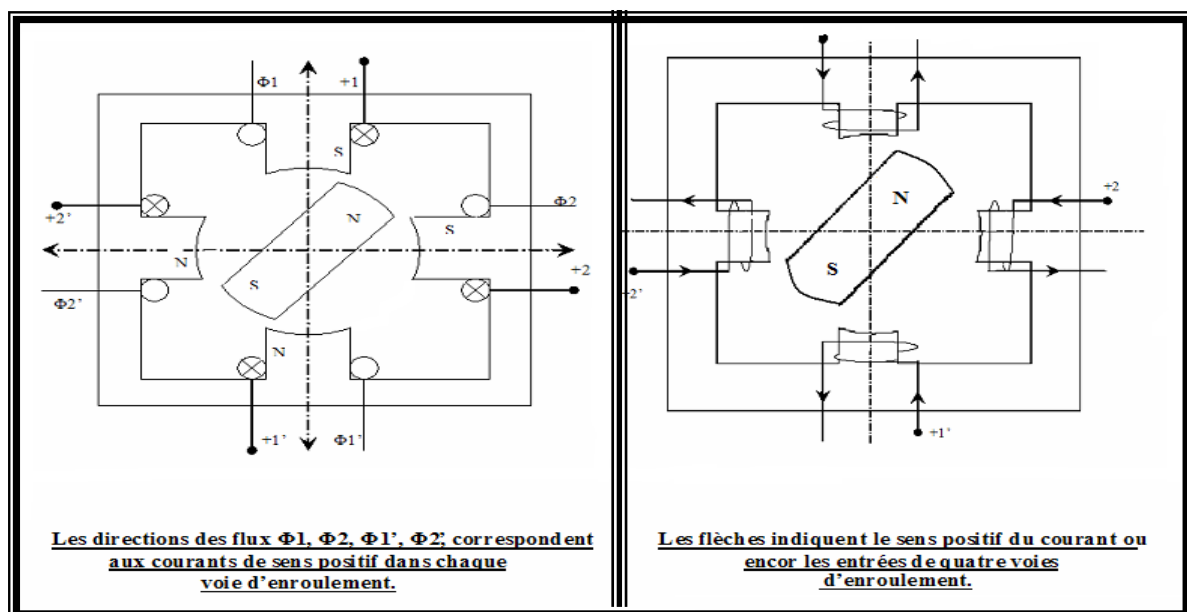


Figure (2.4) : Structure d'un moteur à aimant permanent

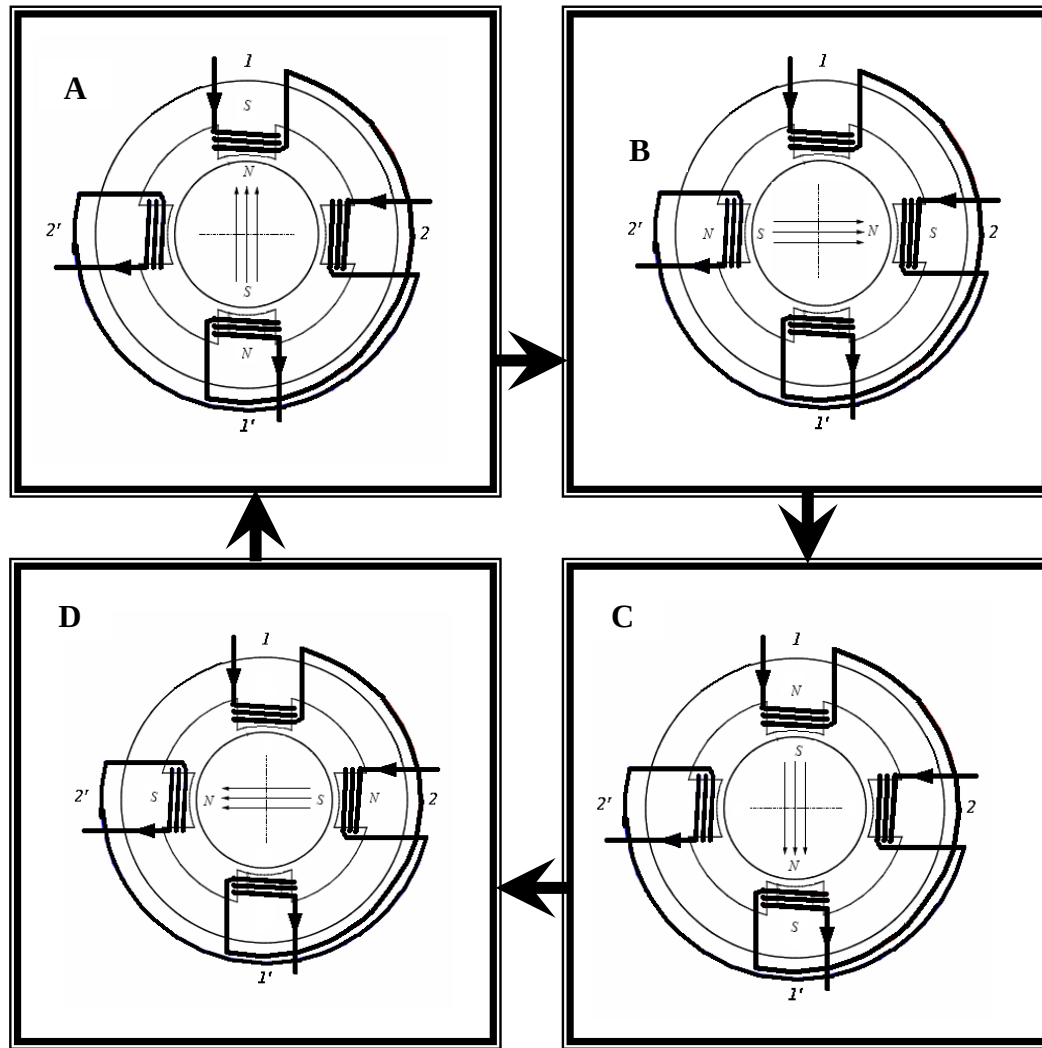


Figure (2.5) : Les opérations d'un moteur pas à pas à aimant permanent

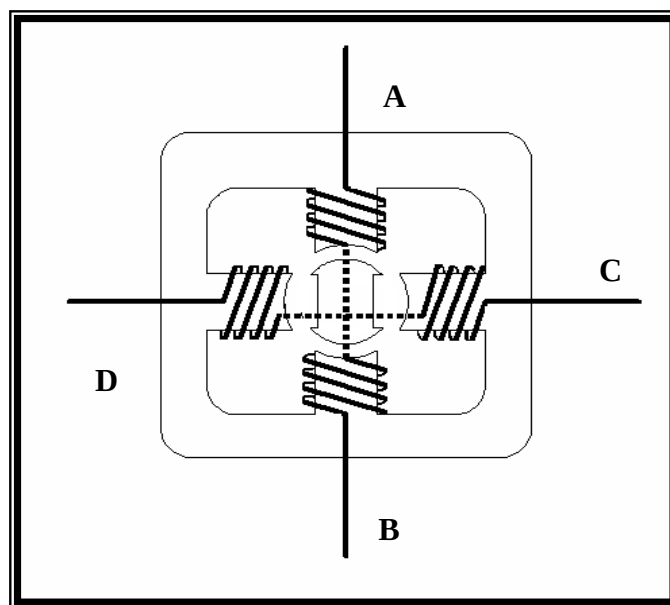


Figure (2.6) : Schéma électrique d'un moteur pas à pas à aimant permanent

2.3.2.3 Types de MP :

Les moteurs pas à pas à aimant permanent, se subdivisent en deux types principaux :

- Les moteurs bipolaires.
- Les moteurs unipolaires.

a) moteurs bipolaires :

Le schéma électrique simplifié d'un moteur bipolaire est donné en Figure (2.6) leur angle de rotation par pas est ici de 90° . La constitution de ce type de moteur est la suivante:

Un aimant permanent est solidaire de l'axe du moteur et sa rotation s'effectue entre les différents pôles du stator supportant les enroulements. Ces derniers devront être alimentés par un courant changeant de sens à chaque pas effectué, selon les trois séquences suivantes :

1) mode « monophasé » :

La première séquence ne réclame que l'alimentation d'un seul enroulement à chaque pas. Le couple développé par le moteur n'est pas très important. Le schéma de la Figure (2.7.a) montre la chronologie à respecter : **AB, CD, BA, DC** puis **AB**, etc...

2) mode « biphasé » :

La seconde séquence est obtenue par l'alimentation simultanée des deux phases. C'est le procédé le plus courant et c'est celui qui donne le couple maximal. On se reportera en Figure (2.7.b) afin de comprendre ce type de commande.

3) mode « demi pas » :

Cette troisième séquence est représentée en Figure (2.7.c). Là, le moteur est commandé en biphasé, puis en monophasé, puis en biphasé, etc.

On arrive ainsi à doubler le nombre de pas de moteur et à augmenter sa précision.

Malheureusement, le couple est évidemment irrégulier. La commande électrique de ce type de moteur est plus complexe si on veut la réaliser à l'aide de transistor.

En effet, le courant devient inversé, un pont de quatre transistors par phase doit être utilisé, comme illustré sur Figure (2.8.a). On peut également n'utiliser que deux transistors, mais dans ce cas, une alimentation symétrique sera nécessaire Figure (2.8.b).

b) moteurs unipolaires :

Pour les applications peu couteuses on souhaite en général simplifier l'alimentation qui doit être unipolaire, c'est-à-dire ne nécessitant un seul sens du courant.

Le schéma théorique d'un moteur unipolaire est donné en Figure (2.9). On peut considérer que ce type de moteur est identique au moteur bipolaire, avec une petite différence :

afin d'inverser le sens du courant.

Les enroulements sont réalisés à l'aide de deux fils dont l'une des extrémités est reliée à la masse (ou au plus de l'alimentation). Il suffit alors d'alimenter les enroulements à tour de rôle afin d'obtenir la rotation de l'axe du moteur, et selon la même séquence vue pour le MRV.

Un moteur unipolaire présentera, à dimensions équivalentes, un couple moins important qu'un moteur bipolaire. La commande d'un moteur pas à pas unipolaire, ne nécessitera que quatre transistors NPN qui seront commandés à tour de rôle. Par exemple, à l'aide de portes logiques.

Le dessin de la Figure (2.10) représente les modes des commandes schématisés par les deux types principaux de moteurs à aimant permanent.

Signalons enfin, que ces moteurs (unipolaire et bipolaire) ne peuvent présenter des vitesses de rotation très élevées. Cette limitation est en grande partie dû à la tension induite par le rotor dans le stator et produisant une force contre-électromotrice. Si l'on désire des vitesses supérieures, il conviendra d'utiliser les moteurs MRV, dont le rotor en fer doux non magnétique, et qui n'induit donc pas de tension dans le stator.

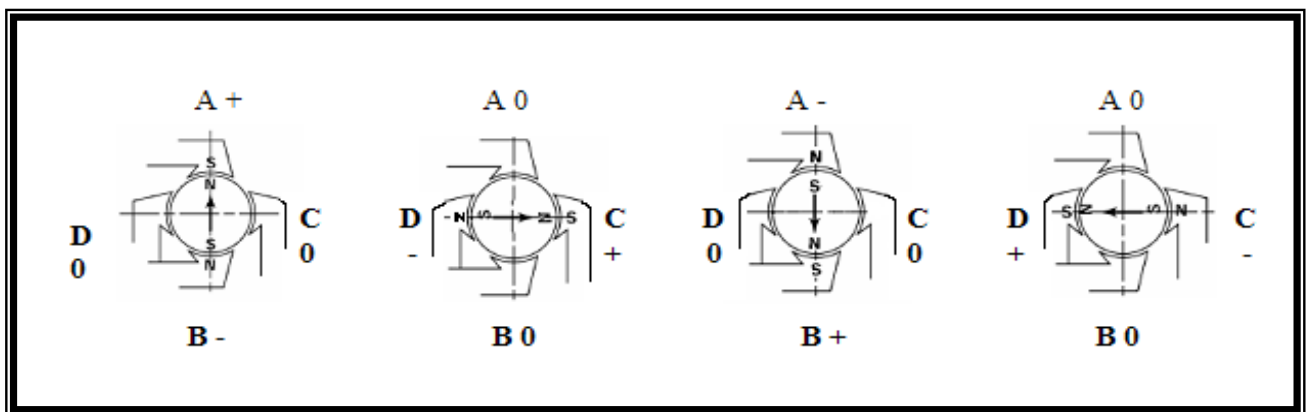


Figure (2.7.a): Mode monophasé.

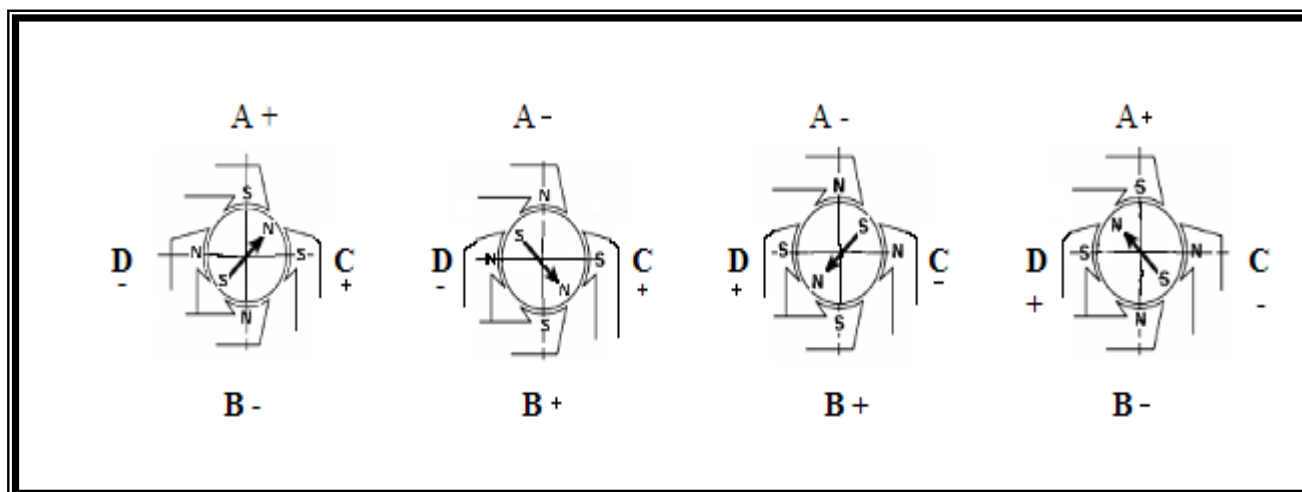


Figure (2.7.b): Mode biphase .

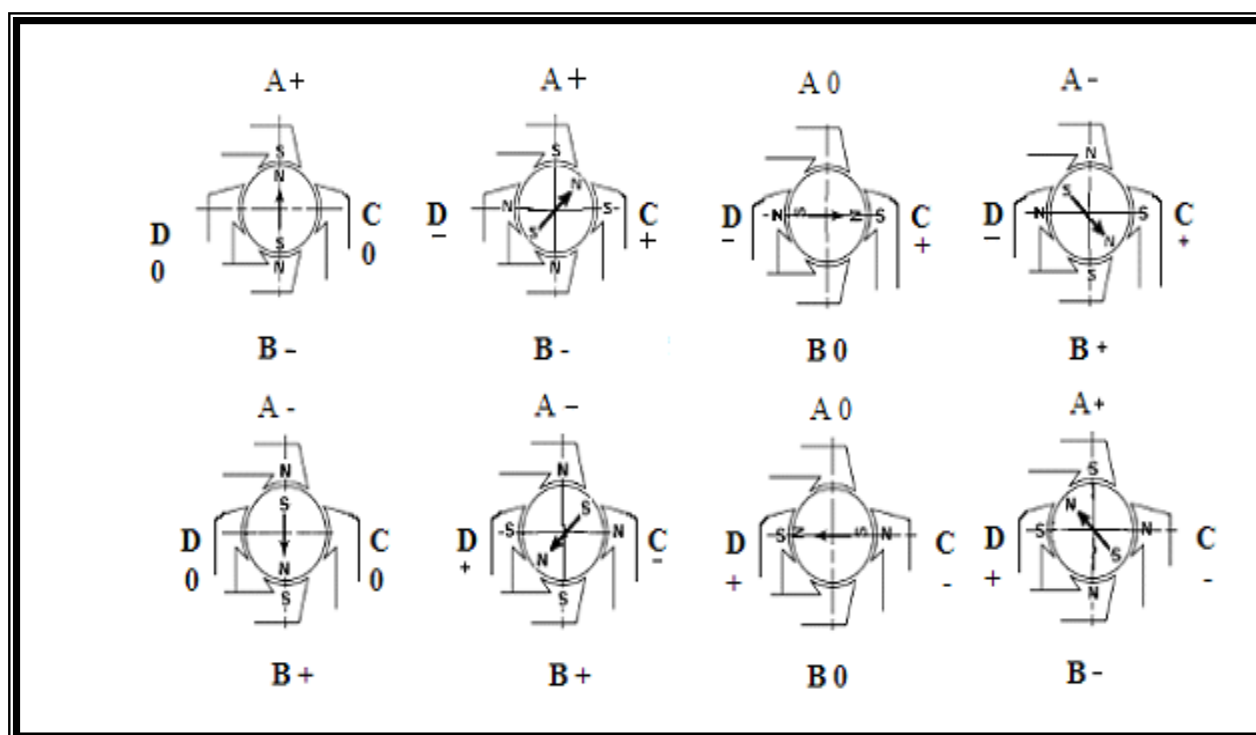


Figure (2.7.c): Mode demi pas.

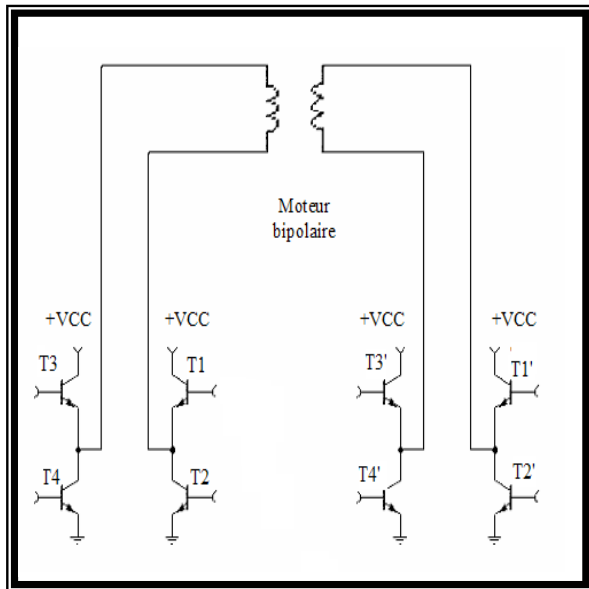


Figure (2.8.a) : La commande électrique symétrique du MP bipolaire
(Pont de 4 transistors par phase).

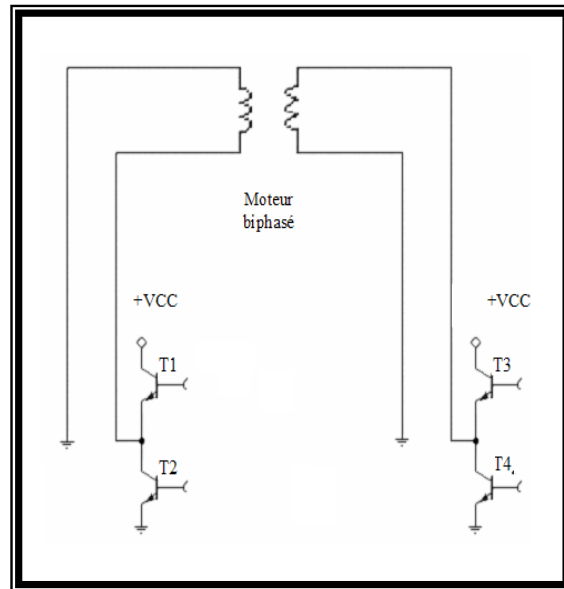


Figure (2.8.b) : Alimentation du MP bipolaire.

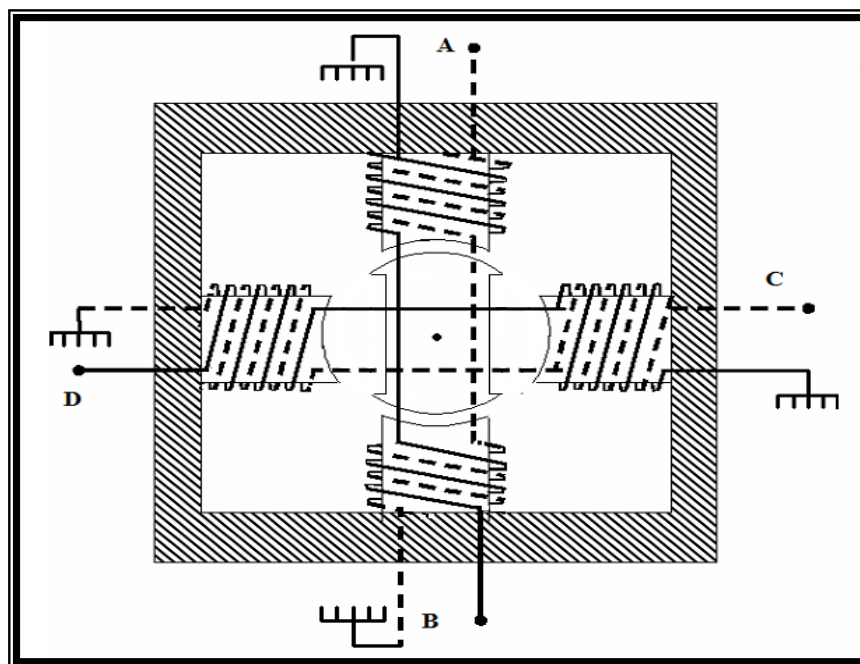


Figure (2.9) : Schéma simplifié d'un moteur à aimant permanent unipolaire

2.3.2.4 Avantages et inconvénients :

1) Avantages :

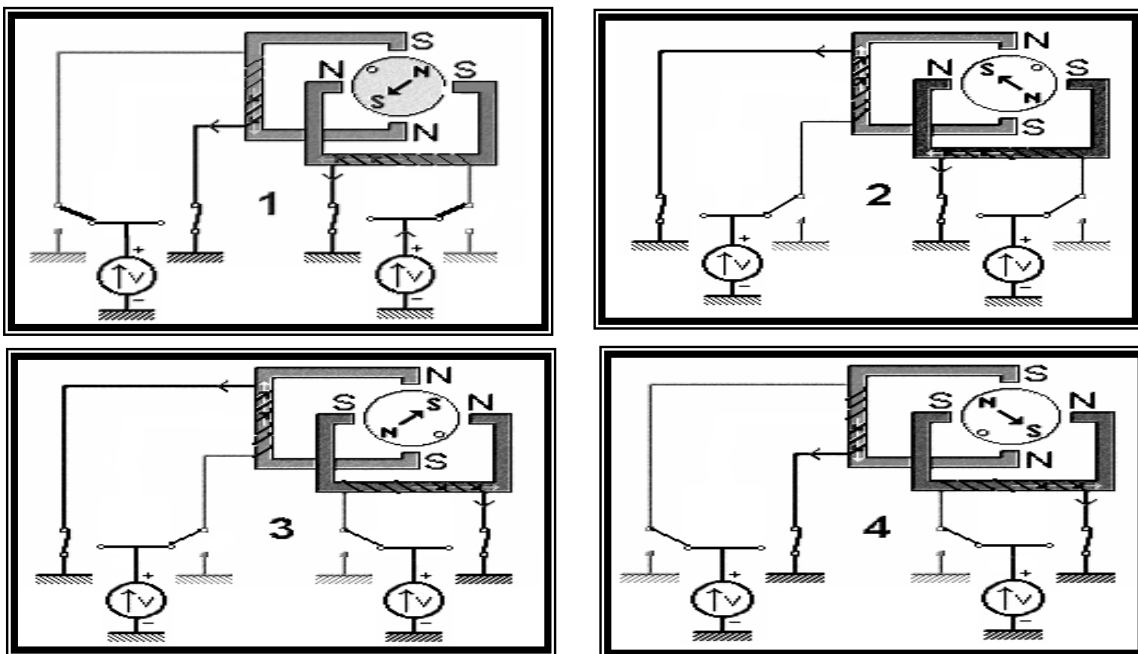
Les MP sont caractérisés par :

- Une construction simple.

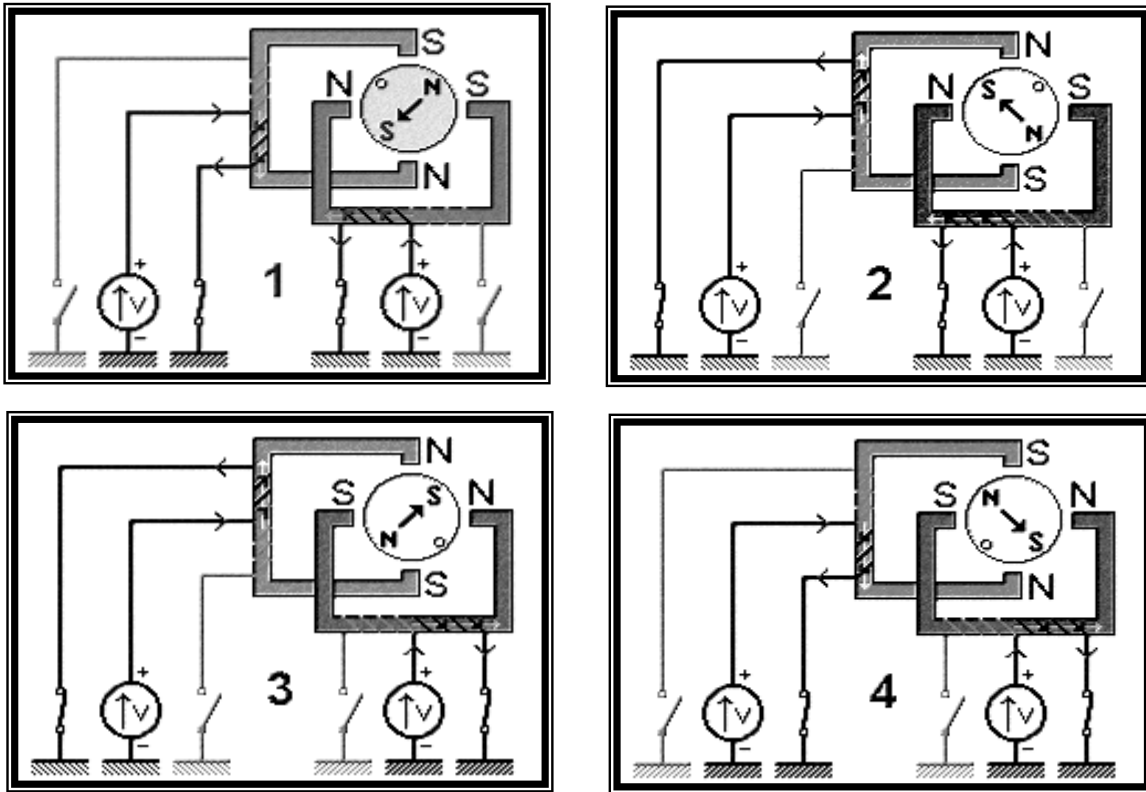
- Un couple moteur élevé, dû à la puissance des pôles aimantés.
- Un rendement élevé, grâce à une tension induite de mouvement important.
- En générale, une plus grande inertie propre, ce qui leur donne une plus grande insensibilité aux inerties extérieures.
- Il possède un couple de maintien non négligeable (environ 10% du couple statique), ce qui leur confère une certaine immobilité, même en cas des chocs et de vibration, sans qu'il soit nécessaire de les alimenter.
- Un amortissement interne des oscillations importantes.

2) Inconvénients :

- Le nombre de pas par tour est petit, généralement entre 4 et 24 à cause de la difficulté de loger les aimants du rotor.
- Des fréquences de commutation faibles.
- L'alimentation du stator change avec le temps.
- Le sens de rotation dépend de l'ordre d'alimentation des phases et du sens du courant dans les bobines d'alimentation.



a) Moteur à aimant permanent bipolaire



b) Moteur à aimant permanent unipolaire

Figure (2.10) : Mode de commande schématisé pour les deux moteurs
(Unipolaire et bipolaire)

2.3.3 Machines hybrides MH :

Les moteurs pas à pas hybrides sont réalisés par la combinaison des principes du MRV et de MP.

2.3.3.1 Configuration de base:

Le MH comporte un stator en fer feuilleté à plots saillants, et deux couronnes rotoriques dentées, géométriquement identiques en matériaux ferromagnétiques, réunies par un aimant permanent cylindrique Figure (2.11.a).

Vu du stator, le rotor présente autant des pôles magnétiques actifs qu'il possède des dents. Les dents sur une des couronnes sont décalées par rapport aux dents de l'autre de $\frac{1}{2}\tau_{dr}$ (pas dentaire) comme le montre la Figure (2.11.b), l'ensemble rotorique présente:

$$2p = 2N_{dr} = 2 \times 10 = 20 \text{ Pôles.} \quad (2.8)$$

Avec : N_{dr} nombre des dents sur une seule couronne.

Les pôles (dents) rotoriques sont décalés par rapport aux deux plots adjacents du stator d'un quart de pas ($\frac{1}{4}\tau_{dr}$).

2.3.3.2 Principe de fonctionnement :

L'alimentation de l'enroulement déphasé selon la Figure(2.11.b) et selon le cyclogramme (1), (2), (1'), (2') permet la rotation du moteur dans le sens horaire.

Pour le branchement de la phase (1), les plots I et V, forment les pôles SUD, tandis que les plots III et VII, forment les pôles NORD, compte tenu de l'alimentation des dents rotoriques, la machine se fonctionne comme le montre la Figure (2.11.b).

En commutant la tension de la phase (1), la phase (2), on confère aux plots II et VI la polarité SUD et aux plots IV et VIII, la polarité NORD, ce qui provoque le déplacement du rotor d'un quart de tour de pas dentaire.

La rotation complète du vecteur du champ de 2π radian électrique, s'obtient après commutation (2'), où les plots II et VI deviennent NORD et les plots IV et VIII deviennent SUD.

Le cycle de commutation correspond ici à un pas dentaire, d'où $N_{pc} = 4$. Dans les conditions où le couple de la réluctance variable (interaction courant-fer) est annulé, le pas angulaire géométrique de MH est identique à celui de MP et se calcule comme suit :

$$\alpha_{pm} = \frac{360}{(N_{pc} \times N_{dr})}; D' où : N_{pt} = N_{pc} \times N_{dr} \quad (2.9)$$

2.3.3.3 Avantages et inconvénients :

1) Avantages :

- Un nombre de pas /tour est très grand, jusqu'à 400 pas / tour. Soit un angle de rotation de 0.9° .
- Un couple moteur élevé, dû à l'alimentation du rotor et la proportionnalité du courant.
- Un bon rendement.
- Il présente une stabilité dynamique naturelle.
- Le rotor a une inertie importante, ce qui lui permet de faire des accélérations rapides.
- Il possède un couple de maintien en absence du courant de détente.

- une mémoire de position.

2) Inconvénients :

- L'alimentation du stator change dans le temps.

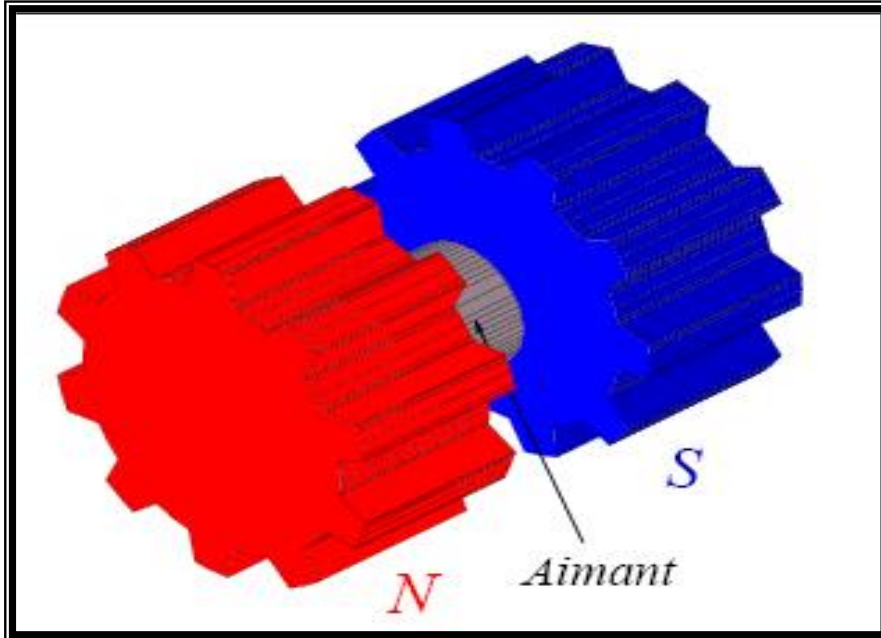


Figure (2.11.a) : construction du rotor du moteur pas à pas hybride MH

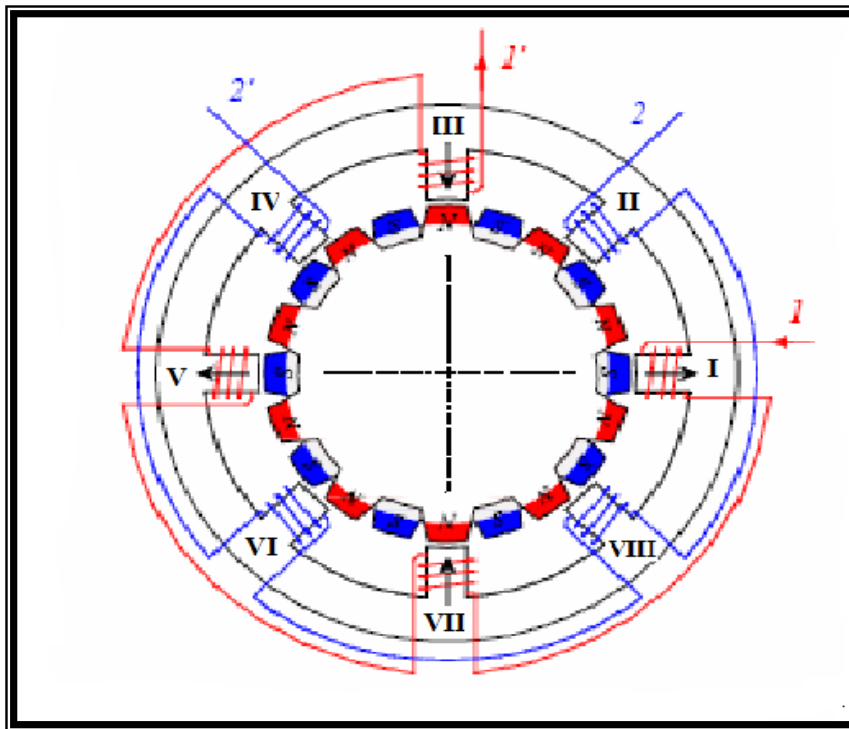


Figure (2.11.b): Positionnement du moteur pas à pas hybride MH

2.3.4 Comparaison entre les trois types de moteurs pas à pas :

Le Tableau (2.1) donne une comparaison entre les divers types de moteurs pas à pas.

Types des moteurs pas à pas	Moteur à réluctance variable	Moteur à aimant permanent	Moteur hybride
Résolution (N ^{bre} de pas par tour)	Bonne	Moyenne	Elevée
Couple moteur	Faible	Elevé	Elevé
Sens de rotation	Dépend : ➤ De l'ordre d'alimentation des phases.	Dépend : ➤ De l'ordre d'alimentation des phases. ➤ Du sens du courant dans les bobines.	Dépend : ➤ De l'ordre d'alimentation des phases. ➤ Du sens du courant dans les bobines.
Fréquence de travail	Grande	Faible	Grande
Puissance	Quelque Watts	Quelques dizaines de Watts	Quelque KWatts

Tableau (2.1) : Comparaison entre les divers types des moteurs pas à pas

2.4 CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons présenté les trois grandes familles du moteur pas à pas. Ces moteurs sont simples à réaliser et peuvent présenter une faible inertie, Ce qui nous permet d'avoir une accélération importante. Les moteurs à réluctance variable sont beaucoup moins utilisés actuellement, car ils nécessitent un usinage très précis ; par conséquent leur prix est élevé par contre ils présentent l'avantage d'avoir un nombre de pas par tour important.

CHAPITRE III

MODELISATION DU MOTEUR PAS A PAS A AIMANT PERMANENT

3.1 INTRODUCTION:

Pour étudier le comportement de systèmes complexes, par exemple pour savoir si un actionneur déterminé va répondre de façon satisfaisante à un cahier des charges donné, il faut soit essayer soit simuler.

Les essais ne sont possibles que si l'on dispose du matériel adéquat, ils sont en général coûteux et souvent risqués. On préfère si cela est possible prévoir le comportement par simulation.

Cet outil d'investigation peut également aider à la mise en oeuvre de nouvelles commandes, et d'en tester l'efficacité avant de les appliquer sur le système réel.

Toute simulation travaille sur un modèle. Il apparaît donc impératif de connaître au mieux les équations de l'ensemble, pour le simuler correctement, et les données.

Dans ce chapitre ,il sera présenté la modélisation et la simulation du moteur pas à pas à aimant permanent qui dérive de la machine synchrone à aimant permanent, et régis par les même équations.

Avant d'aborder les équations générales, nous effectuons des hypothèses simplificatrices

- ✓ On néglige la variation de réluctance liée à la rotation.
- ✓ Force contre électromotrice sinusoïdale.
- ✓ Nous négligeons la saturation des dents
- ✓ Pas de fuite
- ✓ Entrefer très faible

✓ Pas de couplage entre les phases suppose les aimants parfaits, les inductances mutuelles sont alors nulles

3.2 MODELISATION DU MOTEUR PAS A PAS A AIMANT PERMANENT:

3.2.1 EQUATION DES TENSIONS :

Les expressions des tensions U_α et U_β aux bornes des deux phases α et β respectivement, sont :

$$\begin{aligned} U_\alpha &= R_\alpha I_\alpha + \frac{d\phi_\alpha}{dt} \\ U_\beta &= R_\beta I_\beta + \frac{d\phi_\beta}{dt} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Avec :

R_α, R_β : résistances des phases α et β .

ϕ_α, ϕ_β : flux associés aux phases α et β .

Le flux de chaque phase i peut se représenter par la somme des termes correspondant au flux propre ϕ_{ii} , aux flux mutuels entre phases ϕ_{ij} et aux flux mutuels entre phases et aimant ϕ_{im} .

$$\begin{aligned} \phi_\beta &= \phi_{\beta\beta} + \phi_{\beta\alpha} + \phi_{\beta m} \\ \phi_\alpha &= \phi_{\alpha\alpha} + \phi_{\alpha\beta} + \phi_{\alpha m} \end{aligned} \quad (3.2)$$

En définissant les inductances propres $L_{\alpha\alpha}$ et $L_{\beta\beta}$, des deux phases α et β respectivement,

$$L_{\alpha\alpha} = \frac{\phi_{\alpha\alpha}}{I_\alpha} \text{ et } L_{\beta\beta} = \frac{\phi_{\beta\beta}}{I_\beta}$$

nous pouvons écrire :

$$\frac{d\phi_{\alpha\alpha}}{dt} = L_{\alpha\alpha} \frac{dI_\alpha}{dt} \quad (3.3)$$

$$\frac{d\phi_{\beta\beta}}{dt} = L_{\beta\beta} \frac{dI_\beta}{dt} \quad (3.4)$$

Le flux mutuel phase- aimant peut être décrit par une fonction sinusoïdale de la position θ :

$$\phi_{\alpha m} = \phi_0 \cos(Nr.\theta) \quad (3.5)$$

$$\phi_{\beta m} = \phi_0 \sin(Nr.\theta) \quad (3.6)$$

ϕ :flux mutuel maximal produit par l'aimant

Nr : nombre de dents rotorique

θ : angle de position mécanique .

$$\frac{d\phi_{\alpha m}}{dt} = K\Omega \sin(Nr.\theta) \quad (3.7)$$

$$\frac{d\phi_{\beta m}}{dt} = K\Omega \cos(Nr.\theta) \quad (3.8)$$

Avec :

$K = P\phi_0$:constante de couple

$\Omega = \frac{d\theta}{dt}$:vitesse mécanique de rotation

Si on considère les phases du moteur en Quadrature, le flux mutuels entre les deux phases peuvent être négligés. On a : $\phi_{\alpha\beta} = \phi_{\beta\alpha} = 0$

La variation du flux total dans chaque phase s'écrit alors, en reprenant (3.2) :

$$\frac{d\phi_{\alpha}}{dt} = L_{\alpha\alpha} \frac{dI_{\alpha}}{dt} - K\Omega \sin(Nr.\theta) \quad (3.9)$$

$$\frac{d\phi_{\beta}}{dt} = L_{\beta\beta} \frac{dI_{\beta}}{dt} + K\Omega \cos(Nr.\theta) \quad (3.10)$$

En posant $R_{\alpha} = R_{\beta} = R$ et $L_{\alpha\alpha} = L_{\beta\beta} = L$ les relation de (3.1) deviennent alors :

$$U_{\alpha} = RI_{\alpha} + L \frac{dI_{\alpha}}{dt} - K\Omega \sin(Nr.\theta) \quad (3.11)$$

$$U_{\beta} = RI_{\beta} + L \frac{dI_{\beta}}{dt} + K\Omega \cos(Nr.\theta) \quad (3.12)$$

avec :

$$U_{m\alpha} = -K\Omega \sin(Nr.\theta) \quad (3.13)$$

$$U_{m\beta} = K\Omega \cos(Nr.\theta) \quad (3.14)$$

$U_{m\beta}$ et $U_{m\alpha}$ représentent les tensions induites de mouvement dans les deux phases α et β . Le modèle mathématique des phases, donnée par les relations (3.11) et (3.12), permet de schématiser chacune d'elles par le circuit électrique de la figure(3.1)

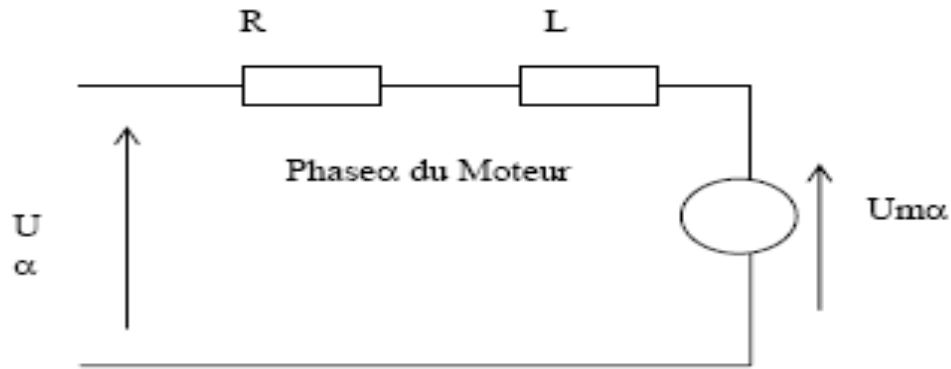


Figure 3.1 Schéma équivalent d'une phase du moteur

3.3 TRANSFORMATION DE PARK :

La transformation de Park a pour but de traiter une large gamma de machines de façon unifiée en les ramenant à un modèle unique dit machine primitive ou machine de Kron. Cette conversion appelée souvent transformation des deux axes, fait correspondre aux enroulement de la machine originale, des enroulement équivalents du point de vue électriques et magnétique disposés selon les axes d et q. Cette transformation a pour objectif de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de la rotation.

3.3.1 TRANSFORMATION DE PARK APPLIQUE AU MOTEUR PAS A PAS A AIMANT PERMANENT:

On désire transformer les enroulements de la machine en des enroulement orthogonaux équivalent selon les axes d et q dénommés :

- ✓ Direct selon (d)
- ✓ Transversal selon (q)

Selon Park, on utilise la matrice de transformation pour les courants et les tensions définie par :

$$M = \begin{vmatrix} \cos Nr.\theta & \sin Nr.\theta \\ -\sin Nr.\theta & \cos Nr.\theta \end{vmatrix} \quad (3.15)$$

$$M^{-1} = \begin{vmatrix} \cos Nr.\theta & -\sin Nr.\theta \\ \sin Nr.\theta & \cos Nr.\theta \end{vmatrix} \quad (3.16)$$

on peut exprimer les courants et les tensions dans le repère d-q tournant lié au rotor :

$$\begin{aligned} U_{\alpha\beta} &= M^{-1}U_{dq} & U_{dq} &= M.U_{\alpha\beta} \\ i_{\alpha\beta} &= M^{-1}i_{dq} & i_{dq} &= M.i_{\alpha\beta} \end{aligned}$$

et le modèle de l'équation (3.11) et (3.12) voir la transformation dans l'annexe (A). d'où les équations s'exprime sous la forme suivante :

$$L \frac{dI_d}{dt} = U_d - RI_d + NrL\Omega I_q \quad (3.17)$$

$$L \frac{dI_q}{dt} = U_q - RI_q - NrL\Omega I_d - K\Omega \quad (3.18)$$

3.3.2 EQUATION DE COUPLE

Le couple développé par un moteur à aimant permanent est donné par :

$$C_e = \phi_{am} (-I_\alpha \sin \theta_e + I_\beta \sin \theta_e) + M \{ (I_\beta^2 - I_\alpha^2) \sin 2\theta_e + 2I_\alpha I_\beta \cos 2\theta_e \} \quad (3.19)$$

avec:

ϕ_{am} : le flux crée par l'aimant dans les bobines

$I_\alpha I_\beta$: l'angle électrique de la machine

θ_e : l'angle électrique de la machine

M : le coeffecient d'inductance mutuelle entre les deux phases.

La relation précédente montre que le couple développé est le résultat de deux effets. L'un, proportionnel à ϕ_{am} , est du à la présence de l'aimant : l'autre est engendré par l'effet de la variation de l'entrefer entre le rotor et le stator. Ce deuxième effet est généralement considéré comme négligeable devant celui de l'aimant, ce qui simplifie l'expression du couple:

$$Ce = \phi_{am}(-I_{\alpha} \sin \theta_e + I_{\beta} \cos \theta_e) \quad (3.20)$$

Le couple dynamique développe par le moteur est essentiellement dû à la variation du flux envoyé par l'aimant au travers des deux phases .

$$Ce = I_{\alpha} \frac{d\phi_{\alpha}}{d\theta} + I_{\beta} \frac{d\phi_{\beta}}{d\theta} \quad (3.21)$$

$$Ce = -K(I_{\alpha} \sin(Nr.\theta) - I_{\beta} \cos(Nr.\theta)) \quad (3.22)$$

3.4 DOMAINE DE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR PAS A PAS:

3.4.1 COMPORTEMENT STATIQUE:

Soit un moteur à aimant à deux phases α et β , alimenté selon une configuration qui fait correspondre, pour un couple de charge nul, une position d'équilibre θ_1 (figure 3.2) .La variation du couple statique , comme pour les autres structures de moteurs pas a pas , est sinusoïdale en fonction de la position.

L' application d'un couple résistant Cr permet d'écrire :

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = C - Cr \quad (3.23)$$

avec J , le moment d' inertie de l' ensemble des parties tournantes du rotor.

L'équilibre défini par la condition $C = Cr$, fait apparaître deux positions d'équilibres représentées par les points M et M' . Seul le point M correspond à un équilibre stable à la position

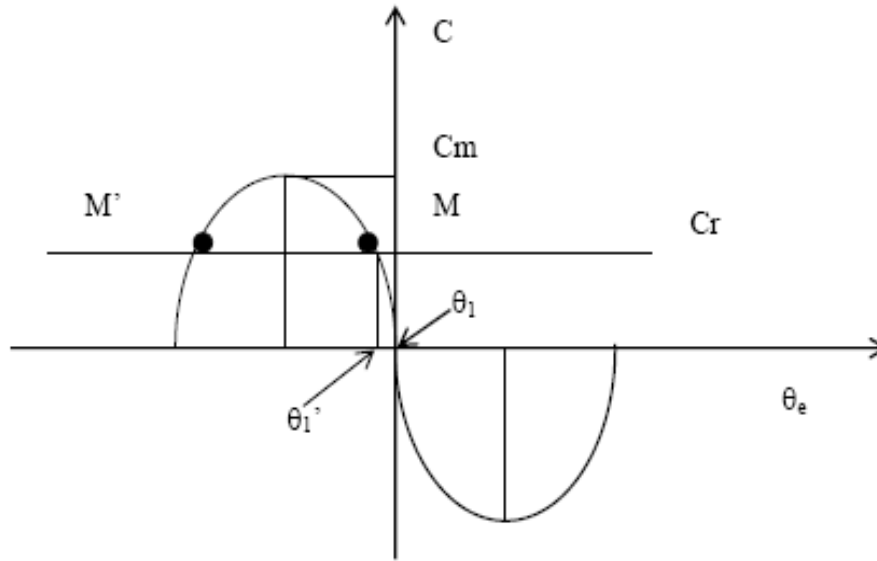


Figure 3.2 Caractéristique statique

La présence du couple de charge Cr entraîne un écart de position statique défini par :

$$\Delta\theta = \theta_1' - \theta_1 = -\arcsin\left(\frac{Cr}{C}\right)$$

où C_m est le couple de maintien qui correspond au couple de charge maximal applicable au rotor, sans provoquer sa rotation.

3.5 COMPORTEMENT DYNAMIQUE:

En appliquant le principe fondamental de la dynamique on obtient:

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_e + F\omega + Crs \cdot \text{sign}(\omega) + Cr \quad (3.24)$$

avec:

F : coefficient de frottement visqueux

Cr : couple de charge

Crs : coefficient de frottement sec

$$J \frac{d\Omega}{dt} = KI_q - Cr \quad (3.25)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \Omega \quad (3.26)$$

3.6 CARACTERISTIQUE COUPLE VITESSE:

Les performances dynamique du moteur sont définies par des courbes qui caractérisent l'évolution du couple en fonction de la fréquence de commande (figure 3.3).

On distingue quatre zones de fonctionnement.

Zone 1 : c'est la zone d'arrêt-démarrage du moteur, elle est délimitée par la fréquence limite de démarrage (F_{dm}) au dessus de laquelle le moteur ne pourra plus démarrer.

Zone 2 : pour accéder à cette zone, dite de survitesse ou d'entraînement, le moteur devra effectuer une accélération à partir de la zone d'arrêt-démarrage. L'arrêt d'un moteur fonctionnant dans la zone de survitesse doit se faire par une décélération progressive, jusqu'à une fréquence inférieure à F_{dm} .

Lors du fonctionnement dans la zone d'arrêt-démarrage, des instabilités, dites de basses fréquences (zone3), peuvent entraîner une perte de synchronisme. Ceci est dû essentiellement au phénomène de résonance qui se produit lorsque la durée du pas est voisine de la pseudopériode des oscillations.

Dans la zone 4, un phénomène d'oscillations de la vitesse instantanée du moteur autour de la vitesse de synchrone peut également conduire à une perte de synchronisme.

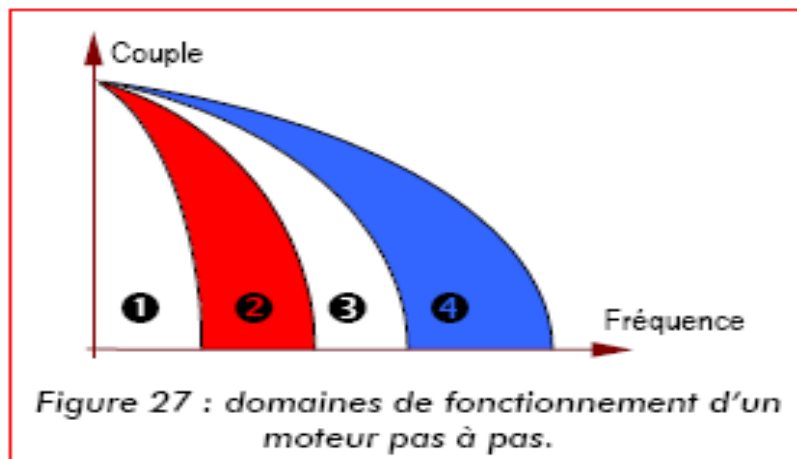


Figure 3.3: *Domaine de fonctionnement d'un moteur pas à pas*

3.7 MODES DE SEQUENCEMENT DU MOTEUR PAS A PAS:

Les caractéristiques de sortie d'un moteur pas à pas sont étroitement liées à la manière d'alimenter les différents enroulements. Ces modes d'alimentation, imposés par le séquence ment des différentes impulsions de commande, dépendent du type de moteur ainsi que de la nature du bobinage des différentes phases.

Les modes de séquencement les plus répandus pour les moteurs diphasés sont :

- **Mode 1** : à un instant donné, une seule phase du moteur est alimentée.
- **Mode2** : les deux phases sont alimentées en même temps. Ce mode de séquencement fait apparaître des positions d'équilibre intermédiaires. Le couple développé est de racine de deux plus grand que celui disponible avec mode 1.
- **Mode3** : il correspond à une utilisation alternative des deux premiers modes. Son avantage est de doubler le nombre de positions d'équilibre (demi pas) mais les couples sont différents pour les déplacements élémentaires.
- **Mode4** : il répond au problème de déséquilibre du couple du mode 3. Lorsque l'on alimente une seule phase, le courant est régulé à une valeur de racine de deux fois plus grande que celle normalement utilisée pour le mode 1. Ceci permet pour tous les déplacements élémentaire.
- **Mode5** : ce mode utilise le principe de modulation des courants de phase pour augmenter le nombre de déplacements élémentaires appelés micros-pas. La modulation peut se faire selon une loi sinusoïdale.

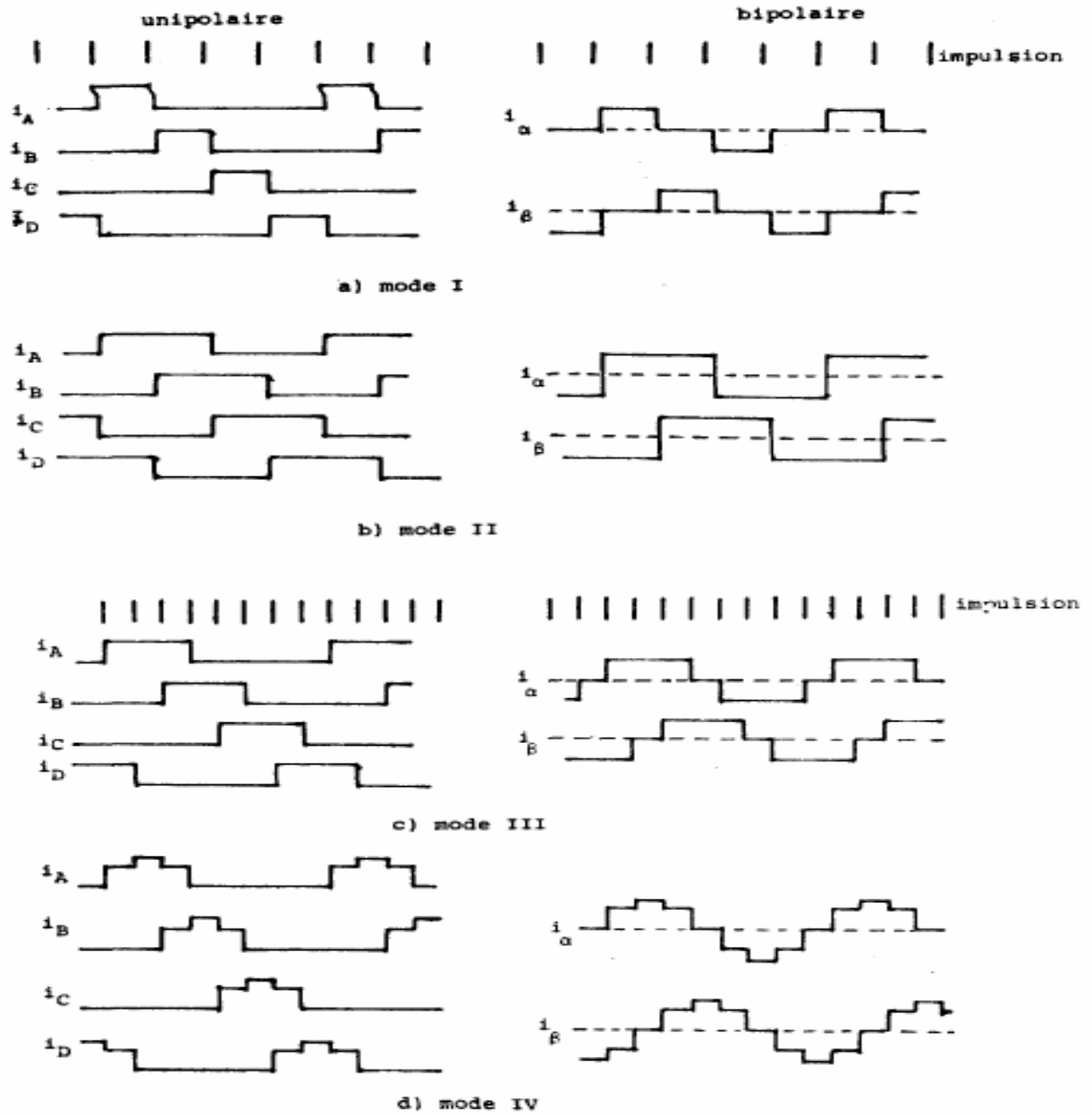
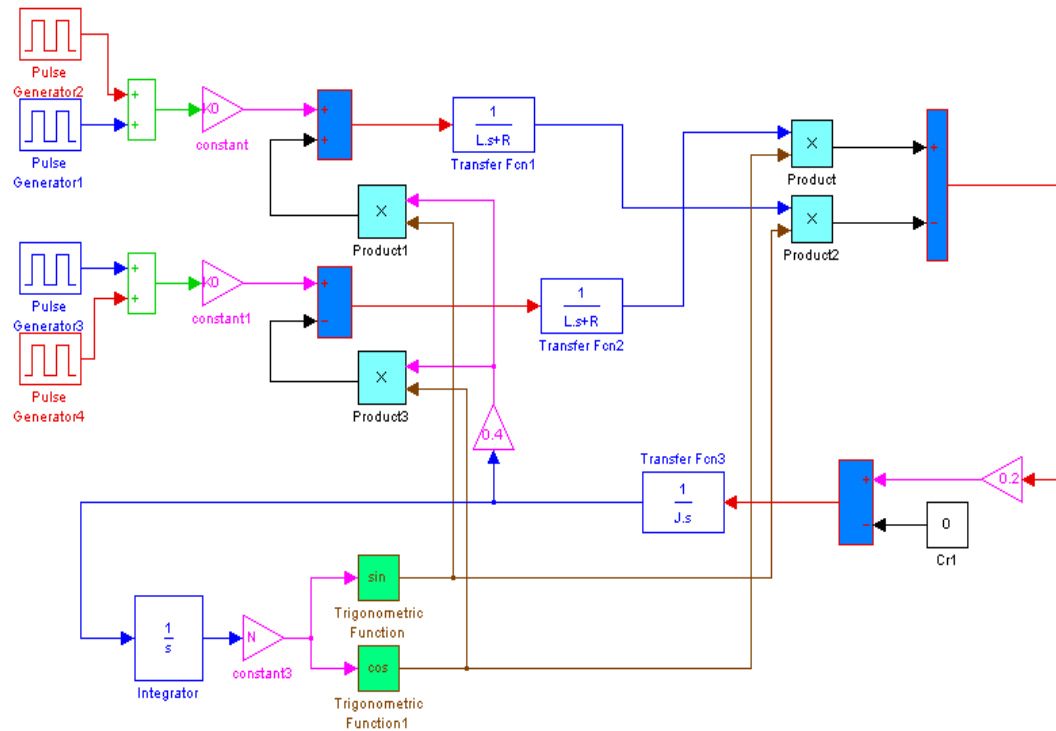


Figure 3.4: courants théoriques en alimentation bipolaire des principaux modes.

3.8 SCHEMA DE SIMULATIONS:

La simulation a été effectuée par le logiciel simulink sous MATLAB. Il y a deux schéma bloc ,la figure(3.5)schéma bloc de moteur dans le référentiel α - β , et la figure (3.6) schéma bloc de moteur dans le référentiel d-q.



Figure(3.5) schéma de simulation du moteur dans le référentiel β - α

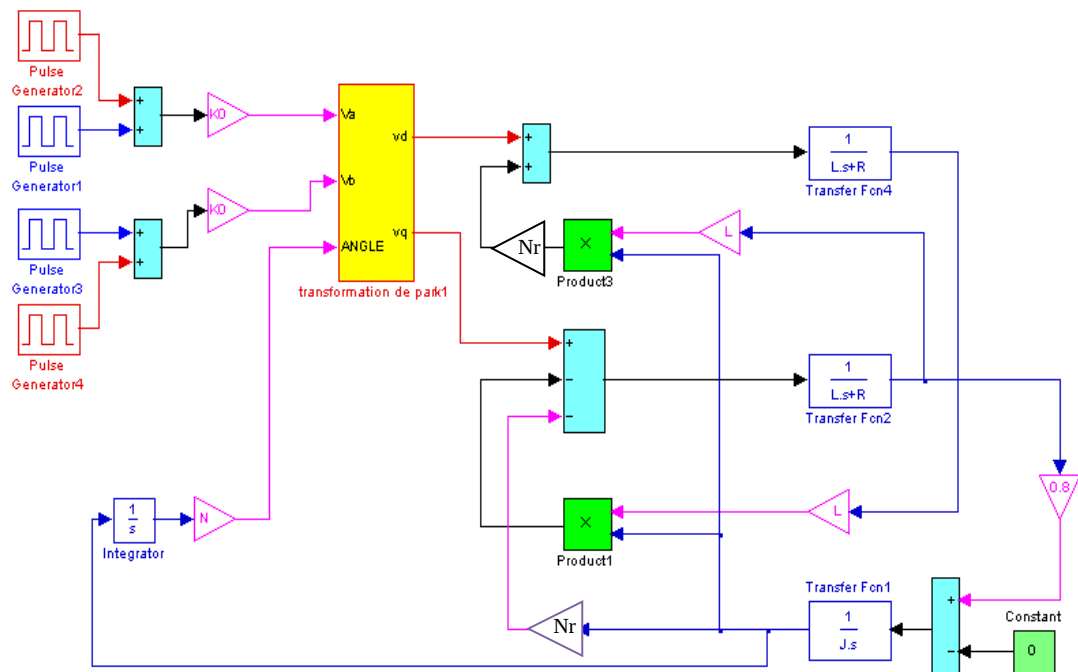


Figure (3.6) schéma de simulation du moteur dans le référentiel (d-q)

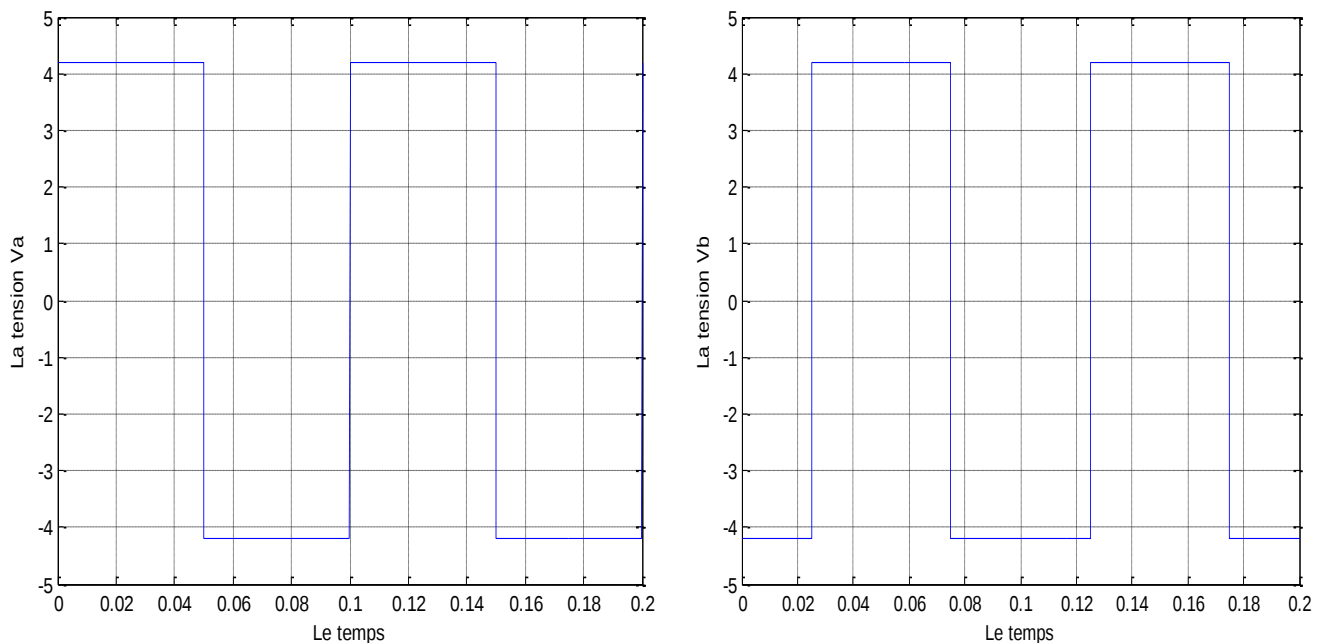
3.9 RESULTATS DE SIMULATION :

Les paramètres de moteur pas à pas utilisés en simulation sont donnés en annexe B. Ce modèle néglige la variation de la réluctance liée à la rotation, et inclus le couple de détente dans le couple résistant, le moteur est alimenté sous une tension en mode deux de 4.2v . les courbes de la figure(3.5) ,et (3.6) représentent la simulation du moteur pas à pas à aimant permanent dans les deux référentiels à vide et en charge.

L'examen des caractéristiques dynamiques montre qu'elles sont parfaitement identiques, ceci nous permet de conclure que la simulation effectuée par le logiciel « MATLAB » est validée.

3.9.1 SIMULATION DE MOTEUR PAS A PAS POUR F=10Hz:

Les résultats de la simulation sont rassemblés dans la figure (3.5)



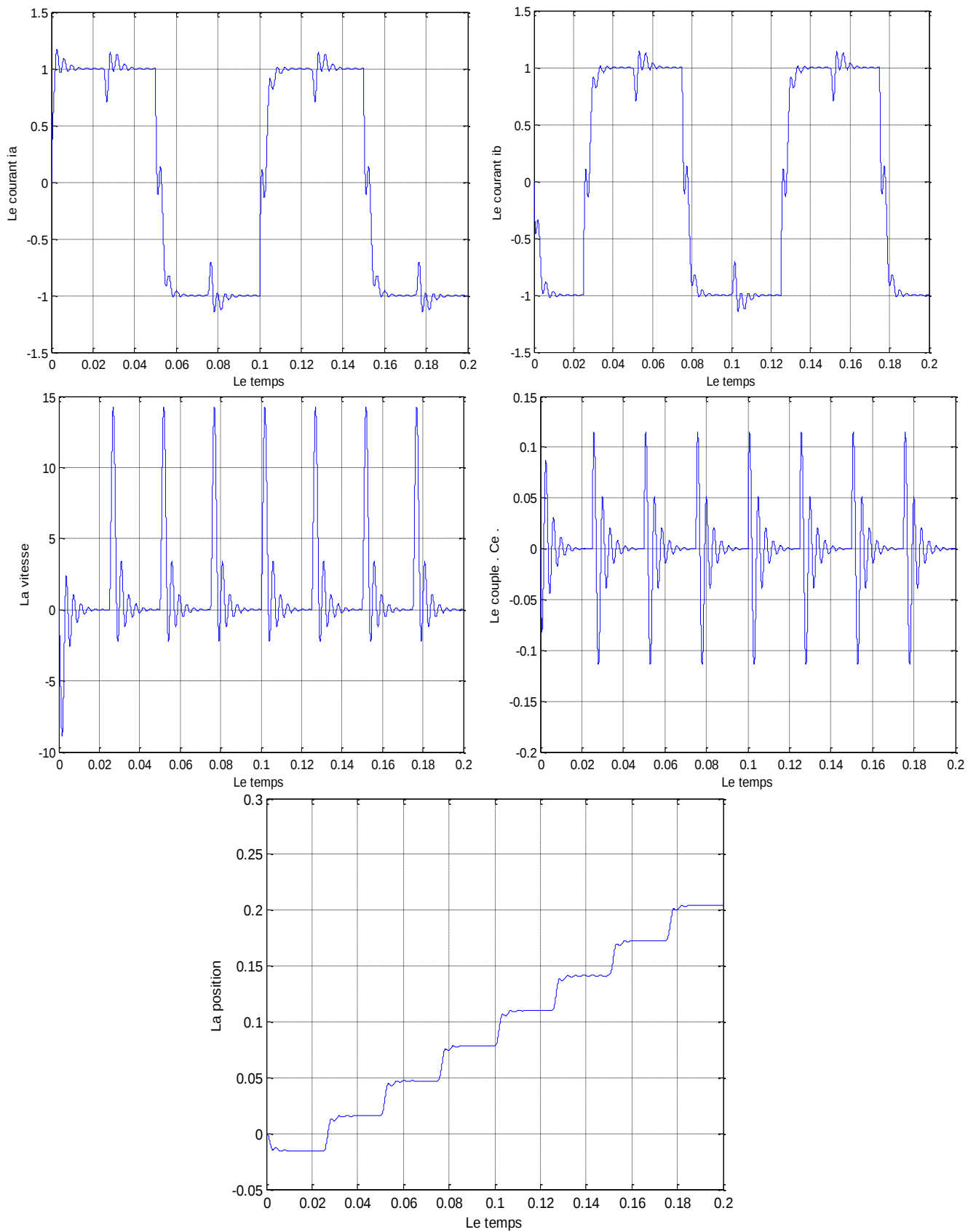
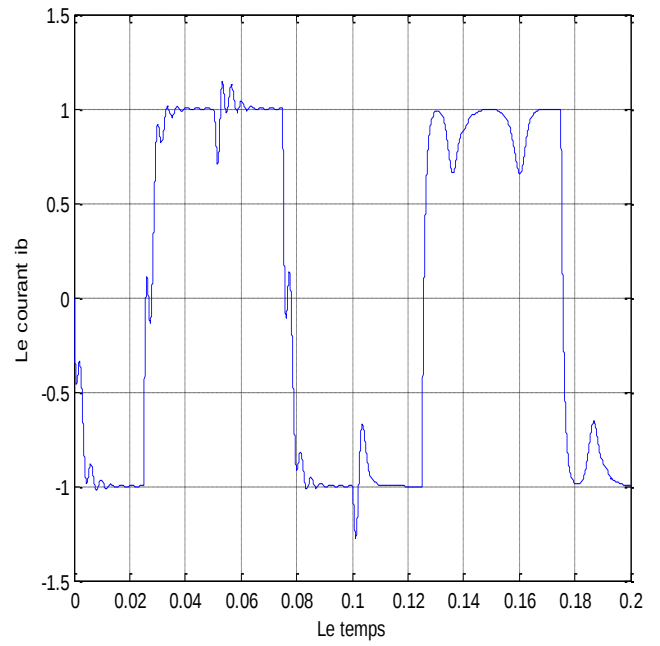
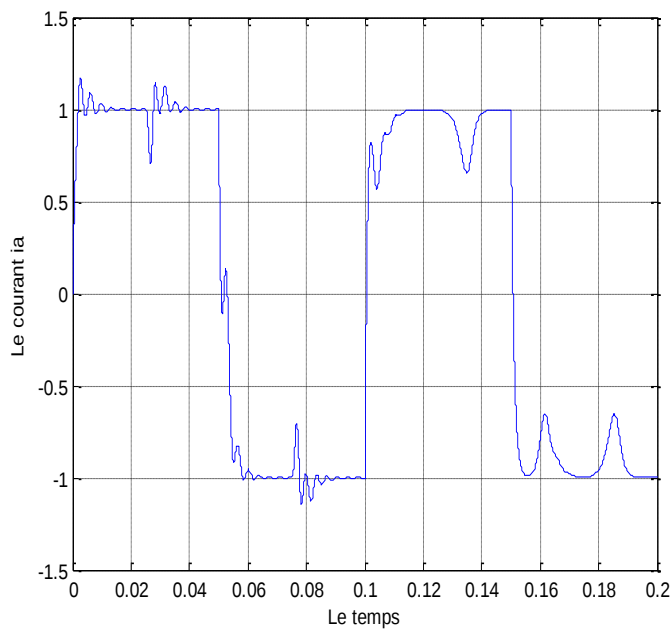
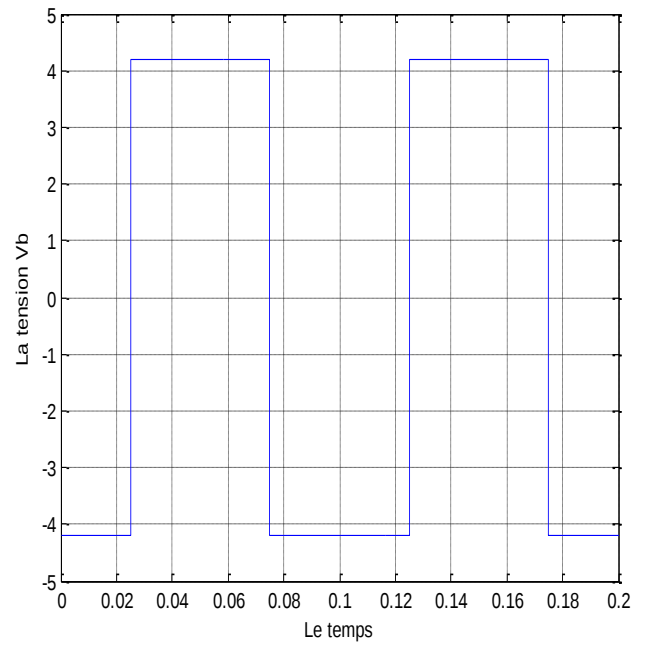
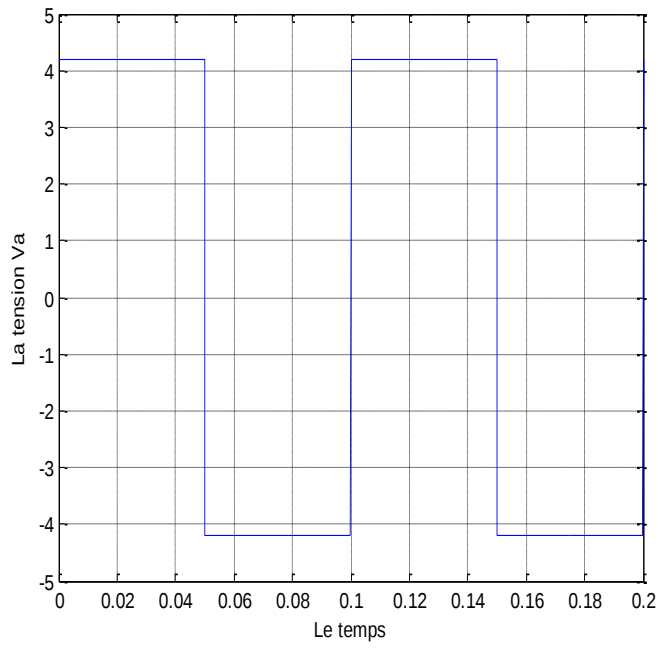


Figure (3.5a) :Résultats de la simulation du MPP dans le référentiel $(\alpha-\beta)$ à vide pour $f=10\text{Hz}$



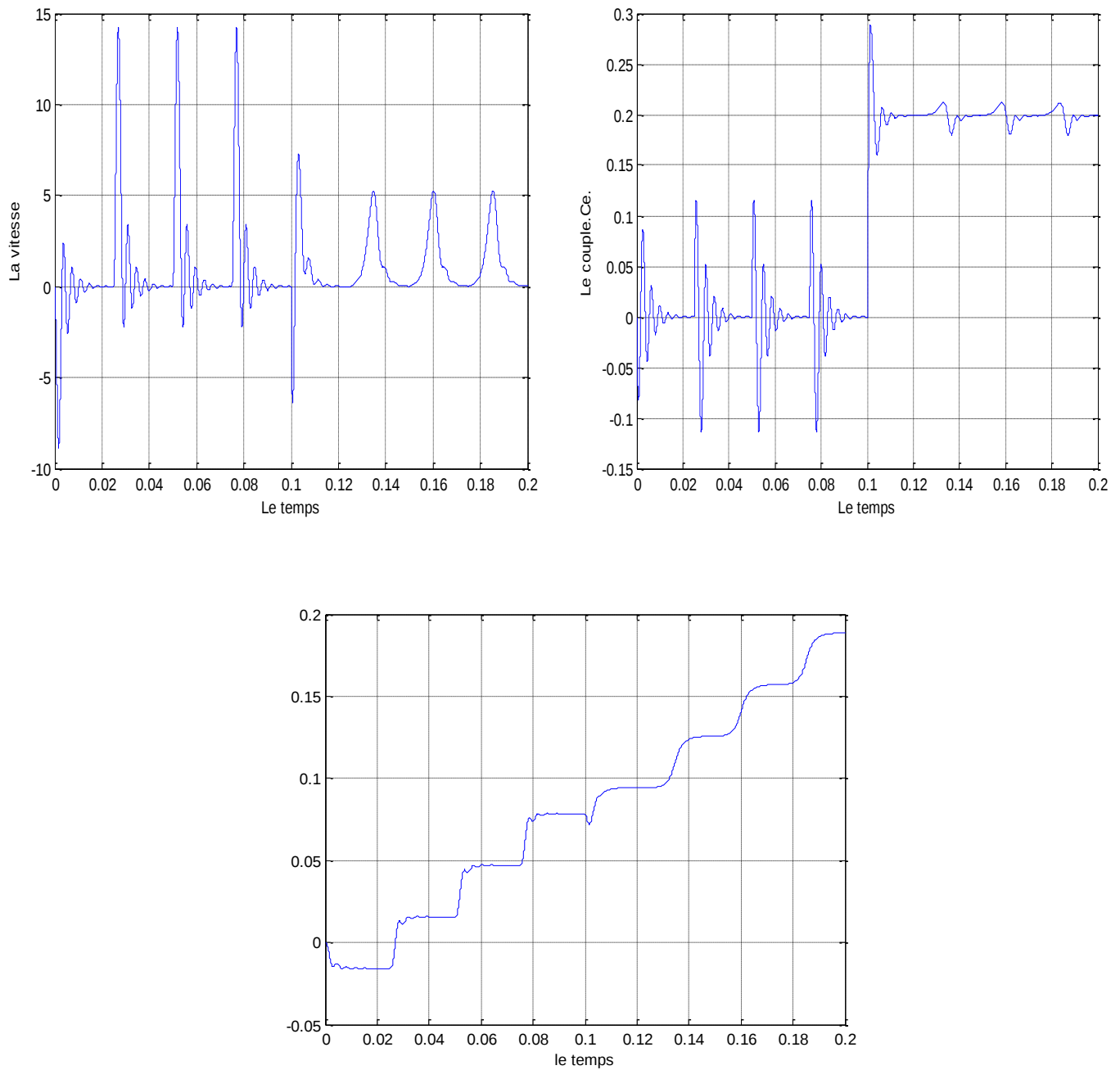
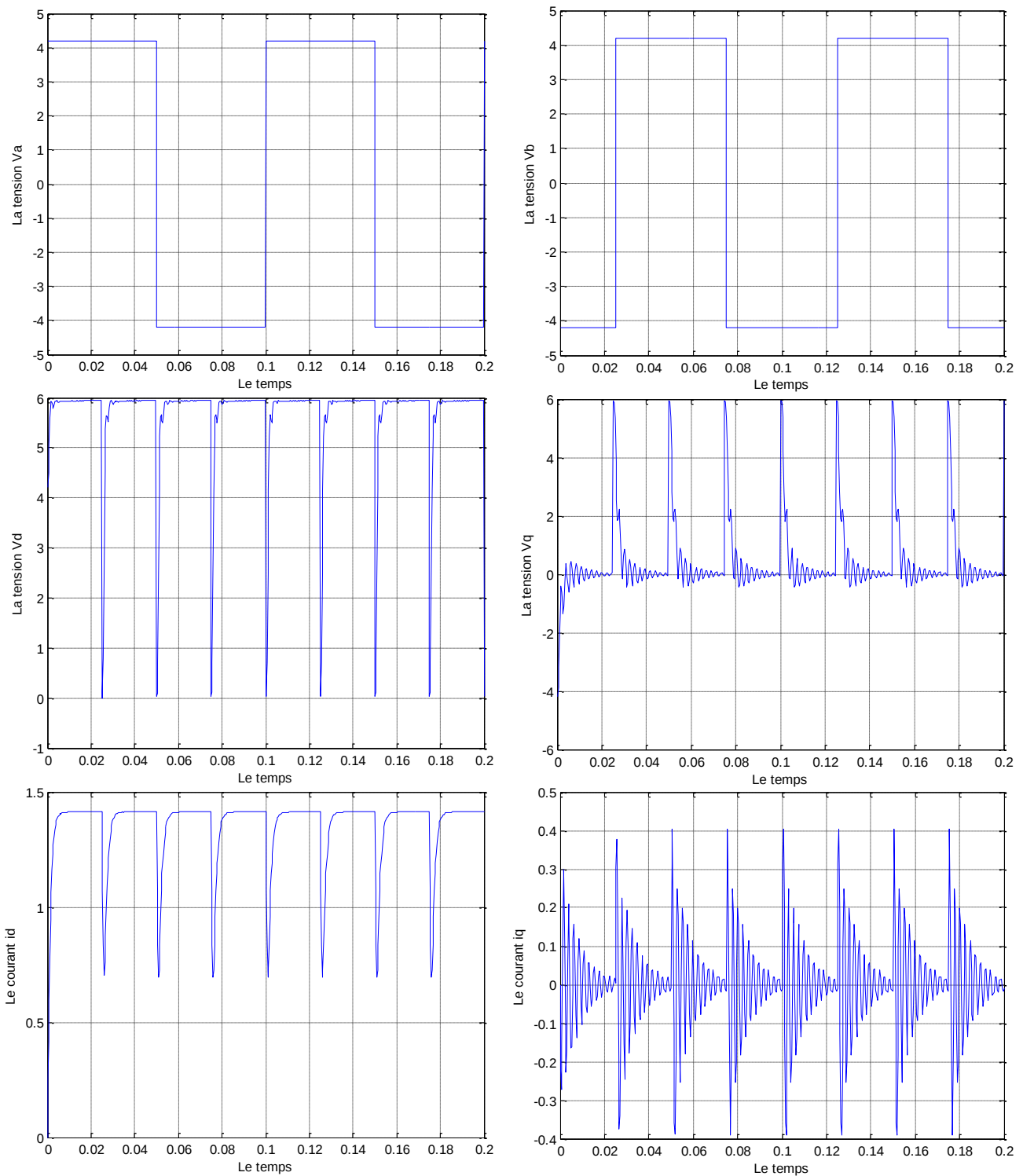


Figure (3.5b) :Résultats de la simulation du MPP dans le référentiel (α - β) en charge pour $f=10\text{Hz}$ pour ($t=0.1\text{s}$)

3.9.2 SIMULATION DE MOTEUR PAS A PAS POUR $F=10\text{Hz}$:

Les résultats de la simulation sont rassemblés dans la figure (3.6)



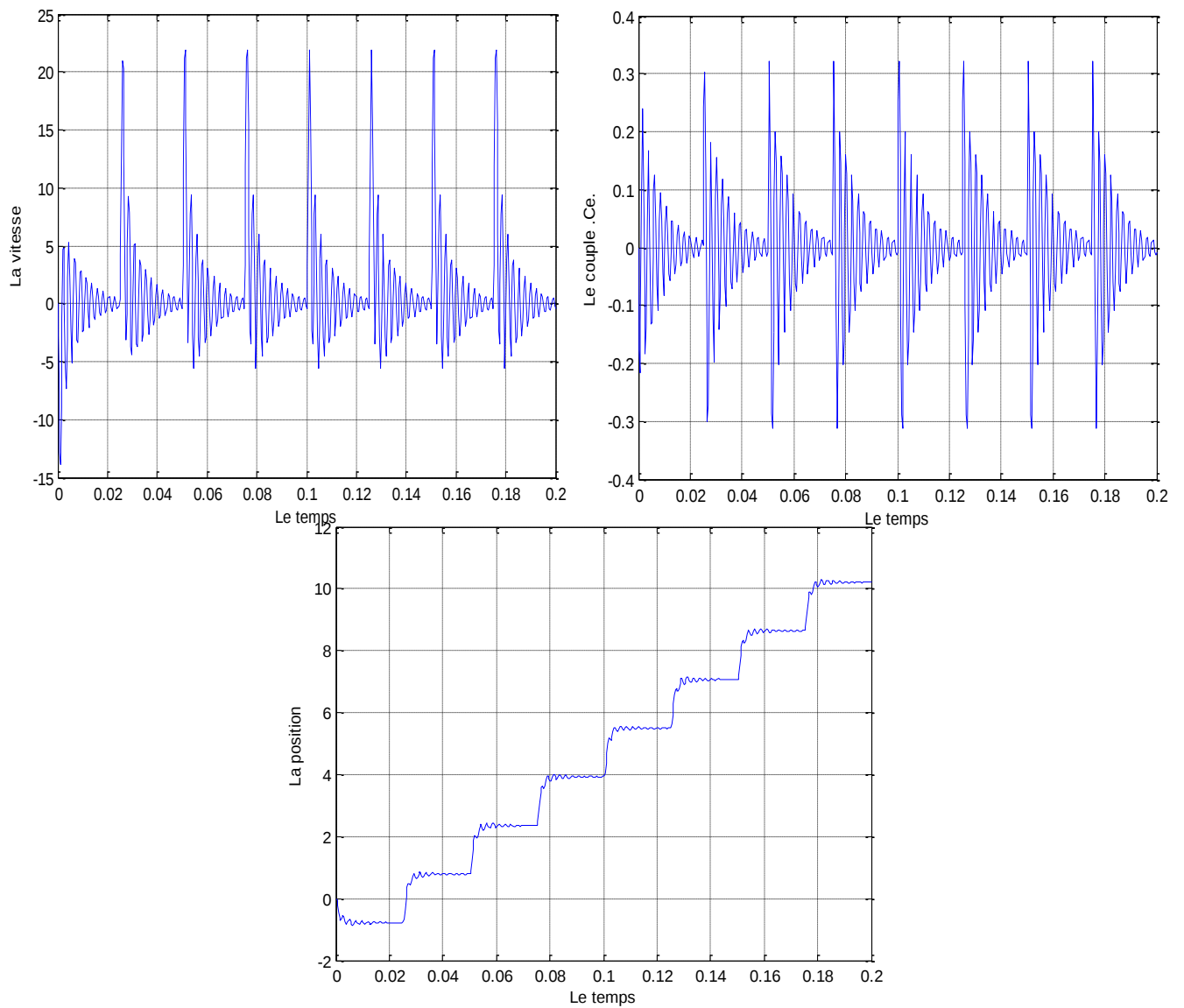
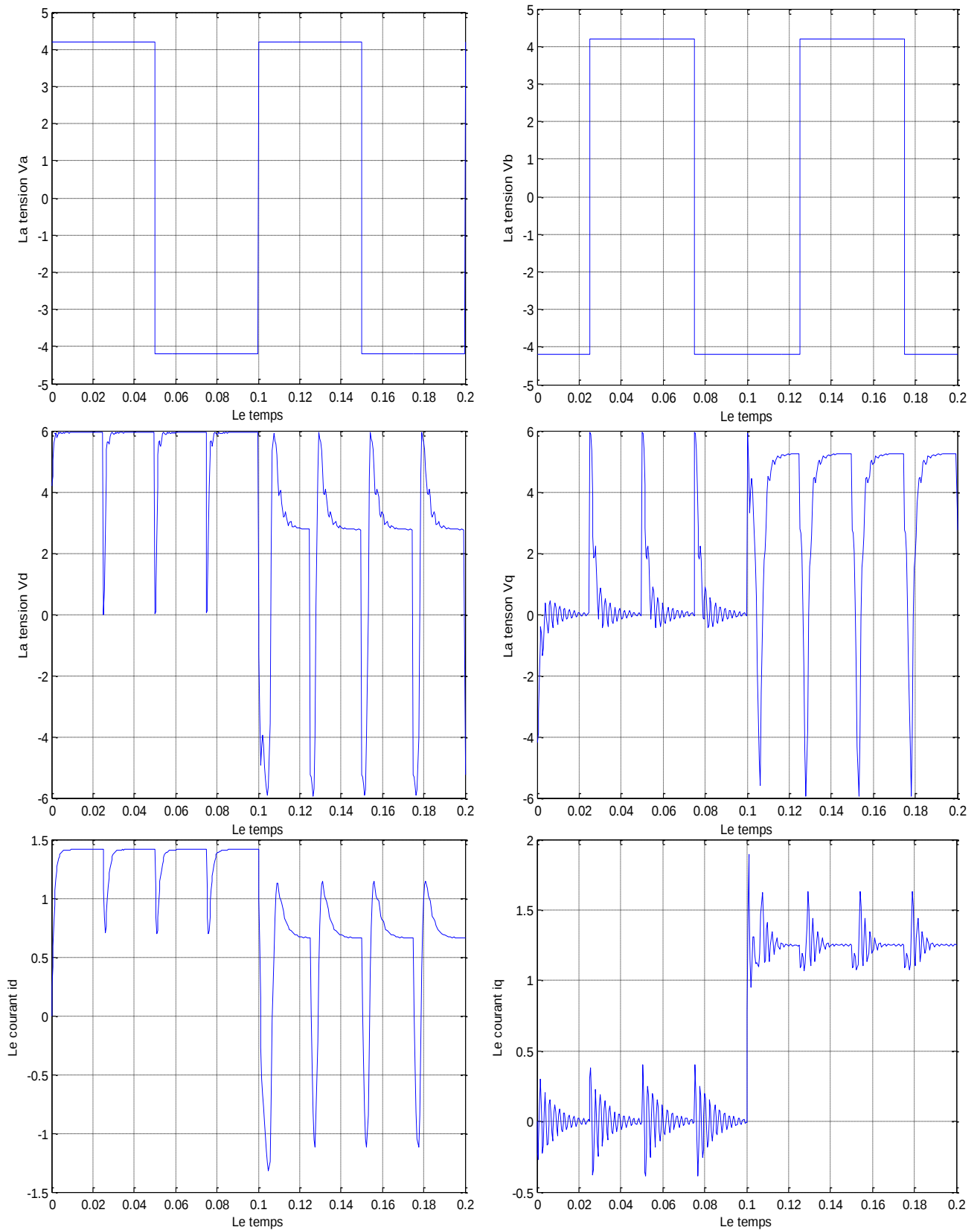
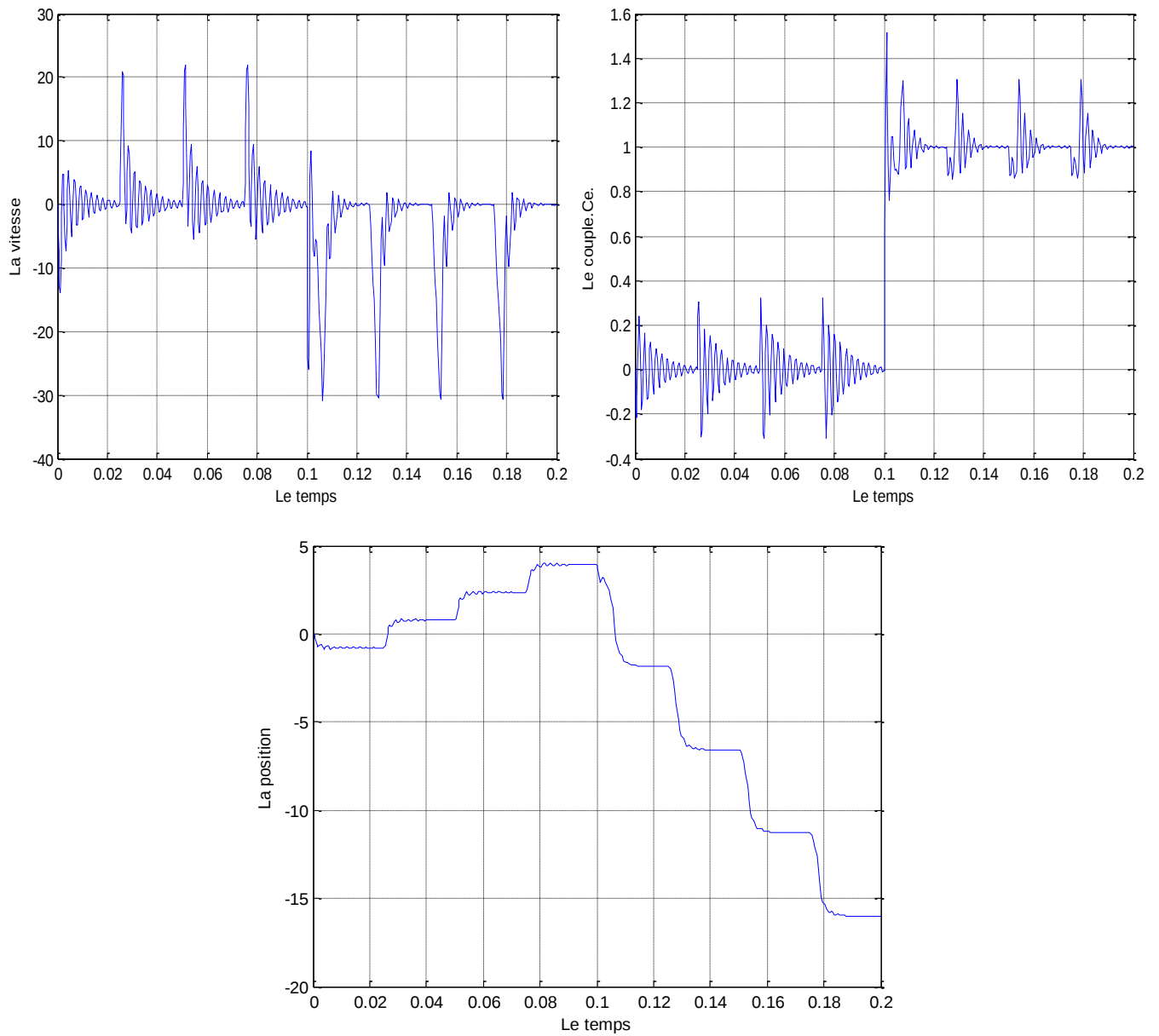
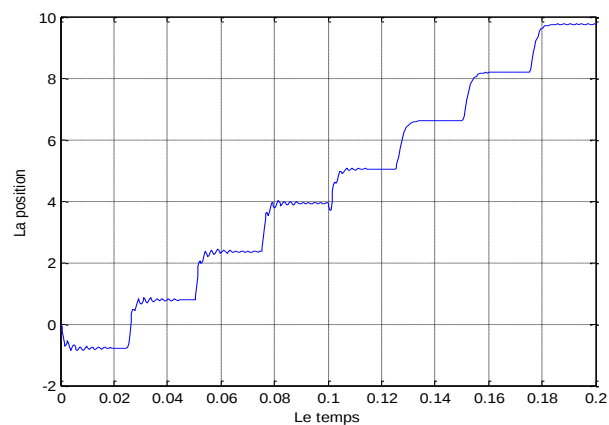
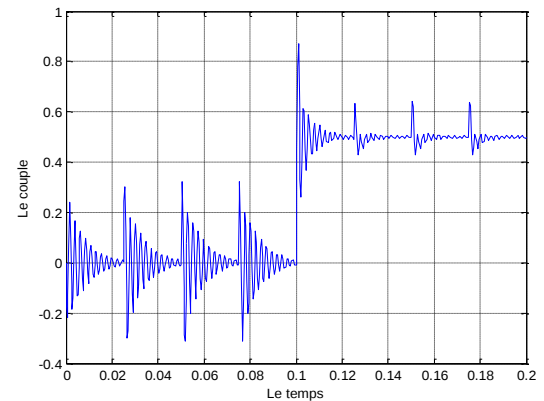
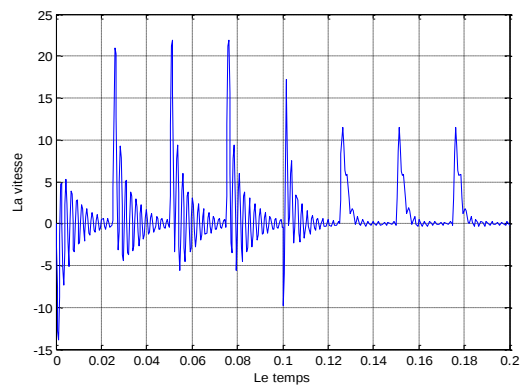
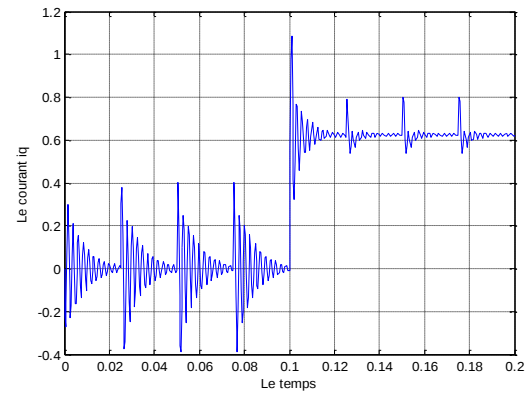
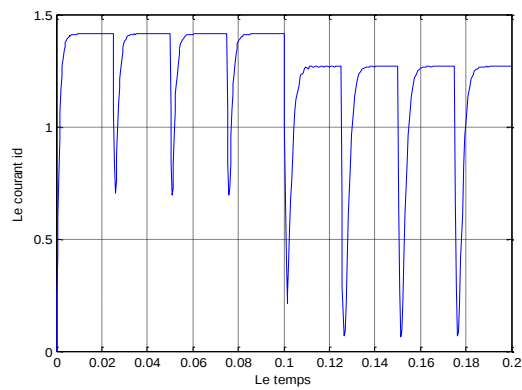
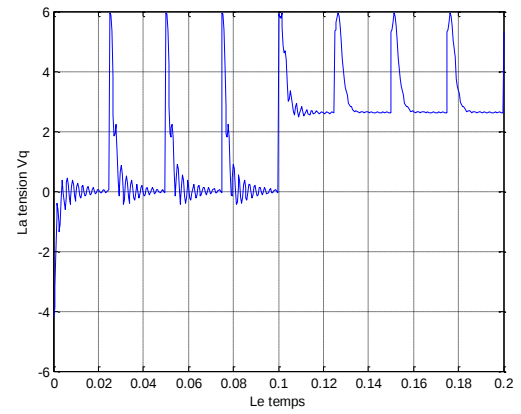
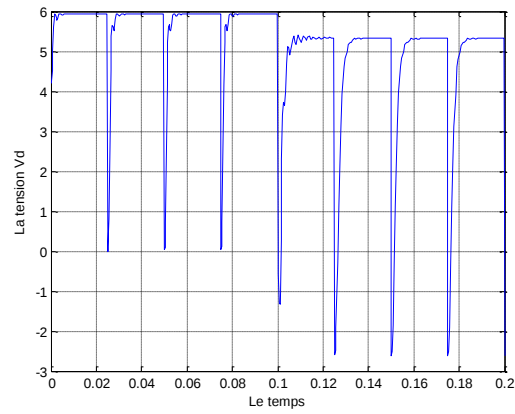


Figure (3.6a): Résultats de la simulation du MPP dans le référentiel (d-q) à vide pour $f=10\text{Hz}$





**Figure (3.6b): Résultats de la simulation du MPP dans le référentiel (d-q) en charge
($t=0.1s$) pour $f=10Hz$**



Résultats de la simulation dans le référentiel (d-q) en charge pour $f=10\text{Hz}$ ($C_r = 0.5$)

3.10 CONCLUSION :

Dans cette partie nous avons présenté le modèle mathématique du moteur pas à pas à aimant permanent , et la simulation pour voir le comportement du moteur qui est une phase primordiale pour l'observation et l'analyse des différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques d'une part et d'autre part pour l'élaboration des lois de commande.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous avons présenté une étude détaillée et modélisation et la simulation du moteur pas à pas à aimant permanent qui dérive de la machine synchrone à aimant permanent, et régit par les mêmes équations.

Le premier chapitre présente les généralités sur les moteurs pas à pas et leurs notions de bases.

Dans le second chapitre, nous présenterons les différentes structures du moteur pas à pas et leur principe de fonctionnement.

Il sera exposé dans le troisième chapitre, le modèle mathématique du moteur pas à pas à aimant permanent et la simulation en boucle ouverte.

Les résultats obtenus montrent clairement que les performances sont obtenues dans les différents modes de marche, à vide ou en charge.

Les perspectives qu'on peut envisager comme suite à ce travail se traduisent par :
L'application d'autres techniques de commande, logique floue et réseaux neurone, commande par la nouvelle génération des microprocesseurs, du fait que les moteurs pas à pas sont bien adaptés à la commande numérique.