

I.1. INTRODUCTION :

Pendant plusieurs années, l'industrie a utilisé le moteur à courant continu (DC) offrant le principal avantage d'être facilement commandable grâce au découplage naturel du flux et du couple. Cependant la présence du système balais collecteur a toujours été un grand inconvénient du moteur parmi d'autres qui limitant de plus en plus son utilisation.

Grâce aux progrès de l'électronique de puissance et l'informatique, le moteur synchrone à aimants permanents a pu s'imposer dans les systèmes d'entraînement. L'apparition d'aimants performants et le développement des composants de l'électronique de puissance ont poussé un bon nombre de chercheurs et industriels à lancer des investigations dans le domaine des associations convertisseurs et machine électrique utilisant le moteur synchrone à aimants permanents.

Dans ce chapitre, on commence d'abord par un rappel théorique sur les éléments essentiels des matériaux magnétiques utilisés dans l'excitation de certaines structures de machines synchrones. La deuxième partie de ce chapitre donne de manière très explicite le modèle mathématique (équations électriques et mécaniques) de la MSAP, dans son référentiel triphasé, puis nous réduirons l'ordre du système par une transformation dite de Park, cette transformation modélise la MSAP dans un nouveau référentiel biphasé. [1] [2].

Nous avons mise au point par simulation numérique en utilisant une simulation MATLAB à l'aide du logiciel MATLAB-SIMULINK.

I.2. GÉNÉRALITÉS SUR LES MACHINES SYNCHRONES À AIMANTS PERMANENTS:

I.2.1. Aimants permanents:

a. Définition:

La définition de l'aimant permanent peut se formuler de la manière suivante :

«Un aimant permanent est un matériau ferromagnétique qui possède une aimantation rigide susceptible de créer un champ magnétique extérieur et de maintenir en permanence une force magnétique» [1] [2].

b. Caractéristiques générales des aimants permanents :

Le choix des aimants permanents est essentiel puisqu'ils interviennent avec importance dans le couple massique de la machine synchrone à aimants permanents.

Les matériaux utilisés pour leurs propriétés magnétiques se classent en deux grandes familles en fonction de la largeur de leurs cycles d'hystérésis (figure I-1) à savoir : les matériaux

magnétiques durs (figure I-1.a) qu'on appelle aussi aimants permanents et les matériaux magnétiques doux (figure I-1.b) qui ne manifestent de propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation extérieure [1] [3].

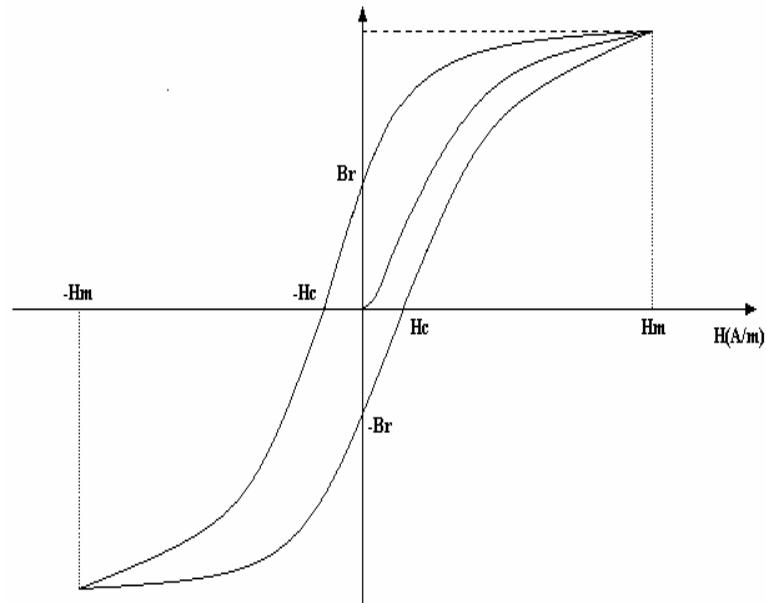


Figure (I-1) : Cycle d'hystérésis

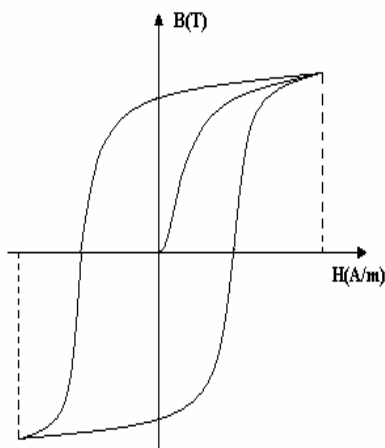


Figure (I-1.a) Matériaux magnétiques dur

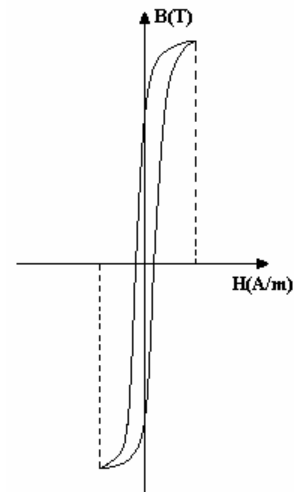


Figure (I-1.b) Matériaux magnétique doux

Les matériaux durs se caractérisent par un cycle d'hystérésis relativement large et sont capables de conserver une aimantation résiduelle même lorsqu'ils sont plongés dans des milieux hostiles .C'est pourquoi on les appelle aimants permanents.

L'état de fonctionnement d'un aimant se situe par la courbe de désaimantation dans le

deuxième quadrant du plan B-H de son cycle d'hystérésis [1] (figure I-2) Cette courbe est caractérisée par :

- ✓ L'induction rémanente B_r , c'est-à-dire l'induction résiduelle en circuit fermé, C'est une indication de la puissance potentielle de l'aimant.
- ✓ Le champ coercitif de l'induction H_{cb} qui est le champ démagnétisant annulant l'induction résiduelle, plus sa valeur est élevée et plus l'aimant est stable.
- ✓ Le produit d'énergie volumique $(BH)_{max}$ (figure I-3.a) et (figure I-3.b)
- ✓ Les valeurs H_m et B_m du point de fonctionnement optimal M correspondant à $(BH)_{max}$

En plus de ces propriétés magnétiques, il est indispensable de connaître le point de curie qui représente la température au-delà de laquelle l'aimant perd ces propriétés magnétiques. Il est indispensable de connaître aussi les propriétés mécaniques et physico-chimiques, le prix, la perméabilité réversible, ainsi que la caractéristique magnétique.

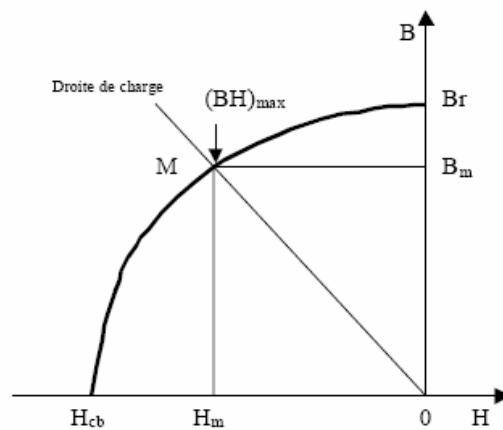


Figure (I-2) Courbe désaimantation

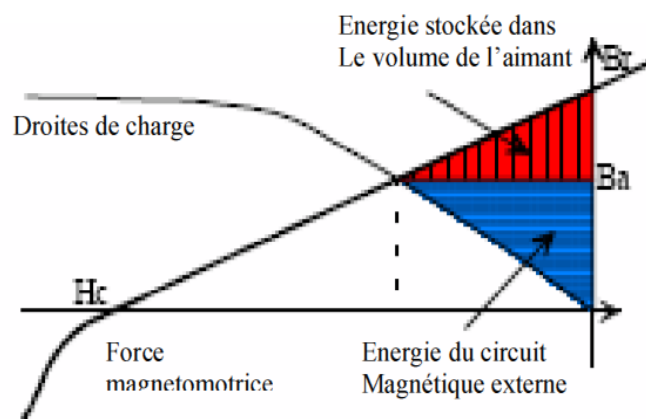


Figure (I-3.a) Energie magnétique volumique fournie par les aimants permanents dans l'espace [1].

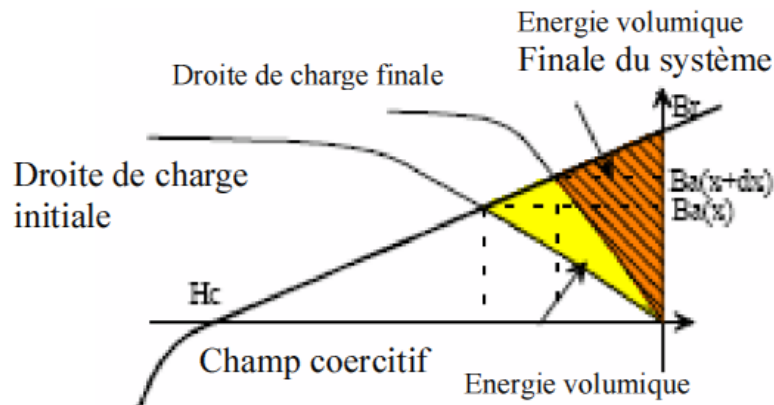


Figure (I-3.b) Energie convertie dans un système à aimants [1].

I.2.2. Matériaux des aimants permanents :

Un aimant permanent est un matériau ferromagnétique ayant la propriété de posséder une aimantation pratiquement constante en l'absence d'un champ démagnétisant relativement important. Cette aimantation provient des dipôles magnétiques, contenus dans ce matériau constitués d'ensembles de moments orbitaux et de spin d'électrons. Les matériaux pour aimants permanents les plus utilisés dans les machines électriques sont classés en trois catégories [3], [4].

a. Les ferrites :

Ce sont des composés d'oxyde de fer, de baryum et de strontium. Ils sont obtenus par frittage et peuvent être isotropes ou anisotropes. Ces aimants possèdent des performances modestes mais ils se sont imposés dans de très nombreuses applications en raison de leur faible prix de revient et d'une rigidité magnétique élevée. En raison de leurs faibles valeurs d'aimantation rémanente (environ 0.4), les ferrites sont utilisées plutôt dans des machines à aimants de faible puissance à faible coût.

Pour atteindre des couples massiques plus élevés, les structures de machines plus complexes à concentration de flux pourraient être envisagées.

b. Les Alnicos :

Les aimants d'Alnico sont composés d'Aluminium, de Nickel et de Cobalt. Ils se caractérisent par un champ rémanent très élevé, mais un champ coercitif très faible ce qui rend difficile leur utilisation dans les machines électriques. Toutefois, ils présentent une haute stabilité sous des températures extrêmes. Ils maintiennent leurs caractéristiques magnétiques entre 250°C et 450°C.

Ce genre d'aimants est utilisé principalement pour les appareils de mesure et systèmes de détection à travers des champs magnétiques.

c. Les terres rares :

Ce sont des matériaux très abondants dans la nature. Ils sont les meilleurs matériaux pour aimants performants. Etant caractérisés par un champ coercitif supérieur à celui des ferrites et une densité d'énergie très importante, ils sont recommandés pour les structures de machines électriques de puissances moyennes de très hautes performances. Les samarium-cobalt autorisent une température de fonctionnement élevée (jusqu'à 350), mais ils sont très coûteux en raison notamment de la présence du cobalt dans leur composition.

Les Nd-Fe-B ont des performances supérieures aux SmCo et sont beaucoup moins coûteux, mais leur tenue en température est moins bonne (jusqu'à 160° [3], [4].)

Matériaux	Br en Tesla	Hc en m/kA	T° de Curie en °C	Remarque diverses
Ferrites	0.2 à 0.4	200	300	Les moins chers
Alnico	1.2	50	750 à 850	Se démagnétisent trop facilement
Samarium Cobalt	0.5	800	700 à 800	Prix élevé à cause du cobalt
Néodyme fer bore	1.3	1500	310	Prix en baisse (brevets), sujet à l'oxydation

Tab.I.1 Tableau récapitulatif des caractéristiques des aimants [3]

La figure (I.4) présente la caractéristique (BH) de certains types d'aimants

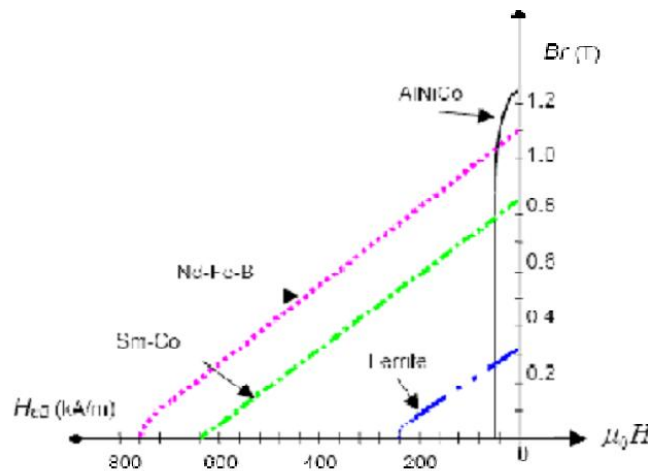


Figure (I-4) : Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants

En fonction de l'application, on choisit la nature des aimants utilisés dans les machines électriques pour des applications à haute température, les aimants Samarium Cobalt sont utilisés dans les machines à puissances élevées, compte tenu du volume d'aimants utilisé et le coût associé, on préfère employer les aimants (Nd-Fe-B) [3]. Au-delà des avantages des aimants permanents, nous avons estimé important de signaler quelques difficultés et inconvénients propres à leur manipulation le placement des aimants sur le rotor est sujet à des difficultés dues aux forces d'attraction-répulsion de ces derniers entre-eux et avec le noyau ferromagnétique...(rotor) Les matériaux composés de terre rare sont inflammables et l'extinction ne doit pas se faire, s'ils prennent feu, avec de l'eau.

-Une cassure des aimants entraîne un rejet brutal et violent des parties brisées pouvant blesser l'opérateur et entraîner quelques dégâts pour le matériel.

-Un simple mouvement manuel du rotor suffit à engendrer une f.é.m aux bornes des plaques du stator, laquelle pourrait être néfaste pour l'opérateur.

I.2.3. Différents types de rotor :

Selon leur inducteurs, on distingue principalement deux types de machines synchrones à aimants permanents, celles à pôles lisses et celles dites à pôles saillants. Parmi ces deux catégories, un grand nombre de configuration est envisageable, et ce en agissant sur le sens

de l'aimantation, les formes géométriques des aimants et leur disposition au niveau de l'entrefer [3].

a. Structure sans pièces polaires « Spp »

Dans cette structure, les aimants sont généralement disposés sur la périphérie du rotor. Celui-ci est un matériau ferromagnétique pour assurer la canalisation du flux. Le champ inducteur au niveau de l'entrefer n'est dû alors qu'au seul aimant voisin. L'entrefer magnétique peut être considéré comme quasi-constant en fonction de la position du rotor et les inductances propres et mutuelles sont indépendantes de la position du rotor. La machine est à structure magnétique du type pôles lisses [4].

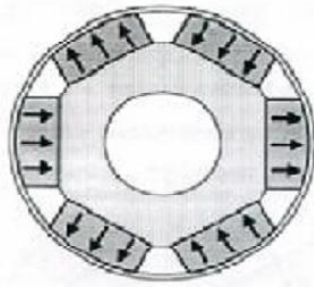


Figure (I.5) : Aimants plans convexes

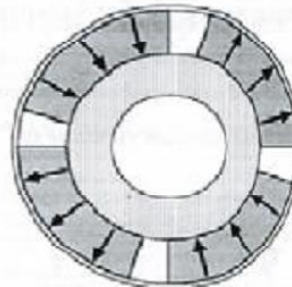


Figure (I.6) : Aimants périphériques en surface

La simplicité de réalisation de ces structures les rend particulièrement avantageuses :

Pour des actionneurs performants à faible coût

- La machine adoptant ce type de structure présente [4]. Une réaction d'induit réduite.
- L'effet de saillance peut-être négligé par le fait que la perméabilité des aimants avoisine celle de l'air.
- L'inductance de l'induit est indépendante de la position.

b. Structure avec pièces polaires « App » dite aussi à aimantation tangentielle :

La saillance permet d'augmenter le couple maximal et d'améliorer les performances de la machine tout en réduisant le volume des aimants. L'inductance de l'enroulement statorique est variable avec la position du rotor. La valeur de l'inductance suivant l'axe polaire est inférieure à celle suivant l'axe interpolaire à cause de la réluctance qui est plus importante

suivant l'axe longitudinal. On peut distinguer deux types de machines avec pièces polaires [4].

b.1. Structure avec pièces polaires et concentration de flux :

Les rotors à concentration de flux utilisent l'aimantation tangentielle d'aimants, généralement parallélépipédiques disposés entre les pièces polaires contre un arbre amagnétique. Ces derniers réalisent une concentration de flux à condition que le nombre de pôles soit suffisamment élevé, ce qui permet d'augmenter le module du champ de l'entrefer de façon significative.

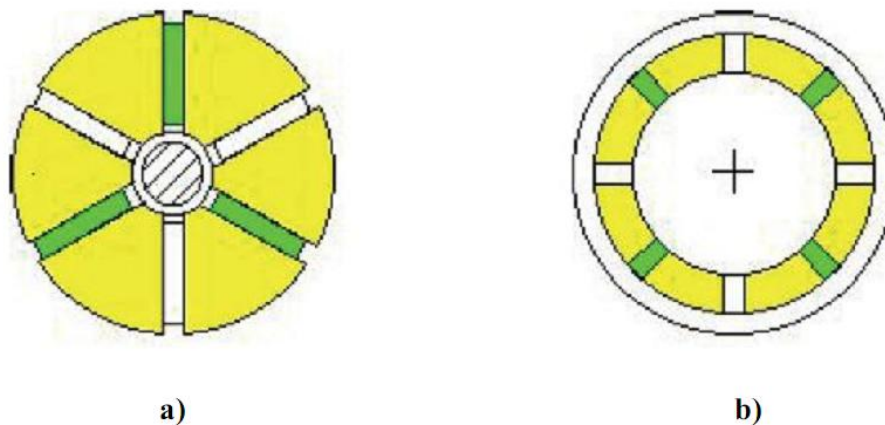


Figure (I.7) : Rotors à concentration de flux

Les figures (I.7.a) et figures (I.7.b) présentent deux rotors à concentration de flux

Les aimants sont rectangulaires et à aimantation parallèle. Le flux créé par ces aimants est canalisé par les pièces polaires qui dirigent le champ utile, ce qui permet d'avoir une machine de dimensions réduites. Cette configuration est utilisée sur les machines de forte puissance à forme d'onde sinusoïdale, qui nécessite une puissance volumique élevée. De plus, l'insertion des pièces polaires confère à ce type de structure une saillance magnétique du rotor, ce qui engendre un couple de réluctance non négligeable et exploitable pour augmenter le couple massique. En outre, on peut agir sur la forme de l'induction dans l'entrefer en jouant sur le profil des pièces polaire.

b.2. Structure avec pièces polaires sans concentration de flux :

Les aimants généralement à aimantation radiale sont placés sous des pièces polaires afin de diminuer l'entrefer magnétique en vue d'améliorer les performances de la machine. Ces aimants peuvent être de forme parallélépipédique à aimantation parallèle ou en forme de tuile aimantée radialement [4].

I.3. MACHINES SYNCHRONES A AIMANTS PERMANENTS (MSAP) :**I.3.1. Structure de la (MSAP) :**

Le moteur synchrone est constitué de deux parties, une partie mobile ou rotor constituant l'inducteur, et une partie fixe ou stator portant des enroulements constituant l'induit. La mince zone localisée entre ces deux éléments est appelée entrefer. Le stator d'une machine synchrone triphasée est constitué de trois enroulements identiques décalés de 120° dans l'espace, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe. Ce dernier est feuilleté afin de réduire les courants de Foucault et de limiter les pertes dans le fer. Il est généralement construit en tôle à base d'alliage fer-silicium qui permet l'obtention d'une induction élevée [3]. Au rotor, (les enroulements parcourus par un courant continu) dans le cas de la machine à rotor bobiné (sont remplacés par des aimants permanents alternant pôles nord et pôles sud. Le flux inducteur balaye les enroulements statoriques et y induit des forces électromotrices) f.é.m alternative. L'interaction des champs statorique et rotorique donne naissance à un couple sur l'arbre du moteur et entraîne le moteur à vitesse de rotation synchrone. La figure suivante, présente une machine synchrone à aimants en surface.



Figure (I.8) : photographie de moteur à aimants en géométries cylindriques.

I.3.2. Avantages et inconvénients des MSAP :**a) Avantages :**

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines : à courant continu, synchrone à excitation électrique et asynchrone [4] [5]. Parmi ces avantages, on peut citer :

-Meilleures caractéristiques thermiques, la localisation des pertes joules et des pertes fer au stator simplifie le refroidissement de la machine et précision de sa commande. Puissances massique et volumique importantes. Un rendement et facteur de puissance élevé.

- Aucun courant d'excitation (30 % de pertes en moins).

- Robustesse incontestée par rapport au moteur à courant continu. Augmentation de la constante thermique et de la fiabilité, à cause de l'absence de contacts bague balais dans ces machines.

-Une capacité à fonctionner à haute vitesse.

b) Inconvénients :

Dans le moteur synchrone à aimants permanents le commutateur mécanique du moteur à courant continu est remplacé par un commutateur électronique, ce qui a pour effet de rendre le contrôle de ce moteur plus complexe et coûteux que celui d'un moteur à courant continu.

-Un désavantage du moteur synchrone est la présence de pulsations de couple. Selon la méthode de commutation utilisée, le moteur synchrone est plus ou moins sujet à ce phénomène. La commutation sinusoïdale d'un contrôleur complexe et de capteur de courant sophistiqué) coûteux. (La commutation trapézoïdale, permet d'utiliser un contrôleur et des capteurs de courant plus simples et moins coûteux) exemple : capteur à effet hall) mais implique la présence de fortes pulsations de couple. La présence d'aimants permanents majore le prix des moteurs synchrones, notamment dans le cas de l'utilisation d'aimants de type terre rare. Ces aimants présentent de très grandes qualités (champs coercitif, tenue en chaleur, etc (par rapport aux aimants « ferrites » mais ont un prix aussi beaucoup plus élevé :

-Le contrôle basé sur une commutation électronique augmente la complexité et donc le prix du contrôleur et du variateur. A cela s'ajoute le coût des capteurs supplémentaires nécessaires à la boucle du courant.

-Risque de désaimantation) irréversible : (limite de température maximale, courant maximum, défluxage impossible dans les machines à courant continu, possible dans les machines synchrones par contrôle de l'angle d'autopilotage .Pertes par courants de Foucault dans les aimants le flux inducteurs de la machines à aimant est difficile à régler de ce fait.

– la commande du moteur est effectuée par action extérieur en particulier dans le cas d'inducteur à pôles saillant [5] [4].

I.3.3. Principe de L'autopilotage :

Un moteur synchrone fonctionnant en mode non autopiloté est fortement instable. Parce que la dynamique des parties mécaniques est beaucoup plus lente que celle des parties électriques, une variation trop rapide des courants de l'induit donc du champ statorique, ne permet pas au champ rotorique de s'accrocher. D'autre part, pour une alimentation donnée (amplitude de la tension et du courant), il existe une charge limite au-delà de laquelle la machine ne peut continuer à fournir le couple nécessaire [3].

Une première manière de faire varier la vitesse d'un moteur synchrone est de l'alimenter par des courants de fréquence variable. Cela est assuré par un convertisseur statique de fréquence variable. Dans ce cas, il est indispensable de contrôler non seulement en amplitude mais aussi en fréquence ou en phase, les caractéristiques d'alimentation. La machine synchrone excitée de manière indépendante entraîne un capteur de position qui permet: La détection de la position relative rotor/stator, c'est-à-dire, la position du champ inducteur par rapport au champ induit-La délivrance de signaux à une fréquence synchronisée avec la fréquence de rotation de la machine. Ces signaux sont mise en forme, amplifiés et isolés par l'intermédiaire de transformateur d'impulsions et envoyés sur les gâchettes de la machine synchrone. On dit que la machine est « autopilotée ». L'alimentation et l'autopilotage des machines synchrones ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche dans le but d'obtenir un couple uniforme et constant dans une grande gamme de vitesses, et d'établir une commande par microprocesseur simple pour concurrencer les moteurs à courant continu.

I.3.4. Domaine d'application :

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance, allant de centaines de Watts (servomoteur) à plusieurs méga Watts (système de propulsion des navires), dans des applications aussi diverse que le positionnement, la synchronisation l'entraînement à vitesse variable, et la traction.....etc.

-il fonctionne comme compensateur synchrone.

-il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges, et grâce au développement de l'électronique de puissance, l'association machine à aimants convertisseur de puissance a trouvé de nombreuses applications dans les domaines très divers tels que la robotique.

-la technologie de l'espace et dans d'autres applications plus particulières (domestique...) [5].

I.4. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES :

La machine synchrone à aimants permanents est un système complexe, dont la modélisation obéit aux hypothèses simplificatrices suivantes:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme, et d'encoche négligeable.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable.
- On admet que la fmm créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale [2].

I.5. MODELISATION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS :

Les machines synchrones en général, sont alimentées au stator par des enroulements triphasés et au rotor par une tension continue. Alimentée à fréquence constante, sa vitesse est synchrone avec le champ tournant et ne dépend que de la fréquence de l'alimentation et du nombre de pôles de la machine.

Au rotor, la bobine d'excitation peut être remplacée par des aimants permanents. Ce type de machine possède un bon rendement puisque les pertes Joule sont localisées au stator. En outre, la compacité du rotor conduit à un bon rapport couple inertie, autorisant des accélérations élevées. La réalisation du rotor à aimants permanents conduit à deux variantes technologiques selon la disposition des aimants. On distingue ainsi: Les machines à aimants superficiels: les aimants sont montés sur la surface du rotor offrant un entrefer homogène. Le moteur est appelé à rotor lisse et les inductances ne dépendent pas de la position du rotor.

-Les machines à aimants permanents enterrés: les aimants sont montés à l'intérieur de la masse rotorique et l'entrefer sera variable à cause de l'effet de la saillance. Dans ce cas, les inductances dépendent fortement de la position du rotor.

De plus, le diamètre du rotor du premier type est moins important que celui du deuxième ce qui réduit considérablement son inertie en lui offrant la priorité dans l'entraînement des charges rapides, et possèdent une robustesse mécanique élevée qui leur permet de travailler à des vitesses importantes. Le comportement magnétique de ces machines est similaire aux machines à rotor bobiné et possèdent des valeurs différentes pour les inductances directes et en quadrature [2],[4].

I.5.1. Mise en équation de la machine synchrone :

Pour établir des relations simples entre les tensions d'alimentation du moteur et ces courants nous considérons le modèle de la machine synchrone idéal suivant:

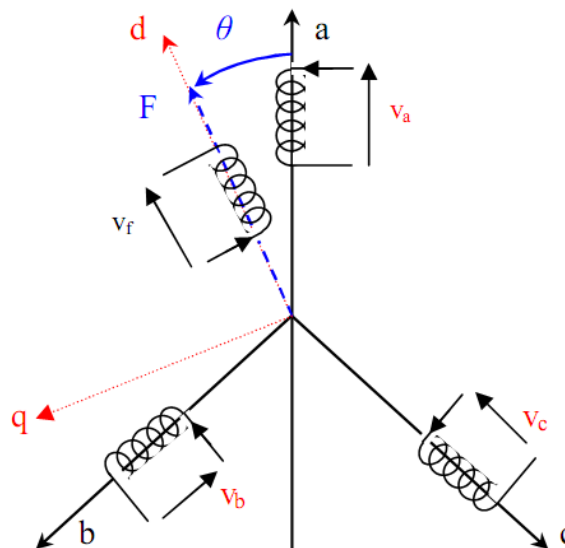


Figure (I.9): Schéma de la machine synchrone

I.5.1.1 Equations électriques:

Les équations électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad (\text{I. 1})$$

Avec :

R_s : La résistance par phase statorique.

$[V_a \ V_b \ V_c]^T$: Les tensions des phases statorique.

$[i_a \ i_b \ i_c]^T$: Les courants des phases statorique.

$[\Phi_a \ \Phi_b \ \Phi_c]^T$: Les flux totaux à travers les bobines statorique.

I.5.1.2 Equations magnétiques :

Les relations entre flux et courants s'écrivent sous forme matricielle comme suit :

$$[\Phi_a] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sf}][I_f] \quad (I.2)$$

On désigne par :

$[L_{ss}]$: Matrice d'inductances statorique .Elle contient des termes constants que nous regroupons dans $[L_{so}]$ et des termes variables dépendant de Θ , que nous regroupons dans $[L_{s2}(\Theta)]$:

$$[L_{ss}] = [L_{so}] + [L_{s2}]$$

Avec:

$$[L_{so}] = \begin{bmatrix} L_{so} & M_{so} & M_{so} \\ M_{so} & L_{so} & M_{so} \\ M_{so} & M_{so} & L_{so} \end{bmatrix},$$

$$[L_{s2}] = L_{s2} \begin{bmatrix} \cos(2\Theta) & \cos 2\left(\Theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos 2\left(\Theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos 2\left(\Theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos 2\left(\Theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\Theta) \\ \cos 2\left(\Theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\Theta) & \cos 2\left(\Theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

M_{so} : inductance mutuelle entre deux phases statorique.

L_{so} : inductance propre d'une phase statorique.

Θ : caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator.

$$[M_{sf}] = M_f \begin{bmatrix} \cos \Theta \\ \cos\left(\Theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\Theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

I.5.2 Transformation de Park

Pour éliminer Θ de la matrice $[L_{s2}]$; et afin que les algorithmes de commande traitent des grandeurs électriques continues, les enroulements statorique (a, b, c) sont remplacés par deux enroulements (d, q) en quadrature, figure (I.10) .Ce passage est obtenu par la transformation de Park.

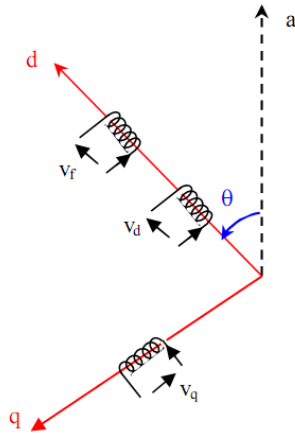


Figure (I.10) : Schéma de la machine synchrone dans le référentiel (d,q).

La matrice de passage notée $P(\theta)$:

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Et la matrice $P^{-1}(\theta)$ est donnée par :

$$P^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix}$$

I.5.3 Modèle de la MSAP dans le référentiel de Park

La transformation de Park ramène les équations statorique (I.1) dans un référentiel lié au rotor. Donc la machine équivalente est identique à une machine à courant continu ayant l'enroulement f comme inducteur et ayant deux induits en quadrature [2].

Le passage du système triphasé au système biphasé se fait en utilisant les relations suivantes :

$$\begin{aligned} [V_d \quad V_q \quad V_o] &= P(\theta) [v_a \quad v_b \quad v_c] \\ [I_d \quad I_q \quad I_o] &= P(\theta) [i_a \quad i_b \quad i_c] \\ [\Phi_d \quad \Phi_q \quad \Phi_o] &= P(\theta) [\phi_a \quad \phi_b \quad \phi_c] \end{aligned}$$

Alors, le modèle de la machine après la transformation de Park est :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d S & -P\omega L_q & 0 \\ P\omega L_d & R_s + L_q S & 0 \\ 0 & 0 & R_f + l_f S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ p\omega \Phi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (I.3)$$

Ainsi pour la MSAP, le modèle est le suivant :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d S & -P\omega L_q \\ P\omega L_d & R_s + L_q S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ p\omega \Phi_f \end{bmatrix} \quad (I.4)$$

Avec la même procédure de calcul pour les équations magnétiques et faisant usage du calcul matriciel précédent et en supposant que le système est équilibré, on aura :

$$\begin{aligned} \Phi_d &= L_d I_d + \Phi_f \\ \Phi_q &= L_q I_q \end{aligned} \quad (I.5)$$

Φ_f : représente le flux des aimants à travers le circuit équivalent direct.

I.5.4 Equations mécaniques :

L'équation mécanique développée par la machine est donnée par la relation suivante :

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (I.6)$$

Avec : f , J , C_r et Ω définissant respectivement le coefficient d'amortissement, le moment d'inertie du rotor, le couple de charge et la vitesse mécanique de rotation.

Le couple électromagnétique C_e est produit par l'interaction entre les pôles formés par les aimants au rotor et les pôles engendrés par les FMMs dans l'entrefer générées par les courants statorique. Il est exprimé par :

$$C_e = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) I_d I_q + \Phi_f I_q] \quad (I.7)$$

I.5.5. Mise sous forme d'équation d'état:

Considérons les tensions (V_d, V_q) , et le flux d'excitation (Φ_f) comme grandeurs de commande, les courants statorique (I_d, I_q) comme variables d'état et le couple C_r comme perturbation. A partir des équations (I.4), (I.7), on peut écrire le système d'équations comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & P\omega \frac{L_q}{L_d} \\ -P\omega \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{P\omega}{L_q} \end{bmatrix} [\Phi_f] \quad (I.8)$$

Ces dernières équations constituent la base du schéma bloc de la MSAP figure (I.11)

I.5.6. Schéma bloc de la MSAP :

On peut représenter la MSAP par un bloc diagramme illustré par la figure (I-11).

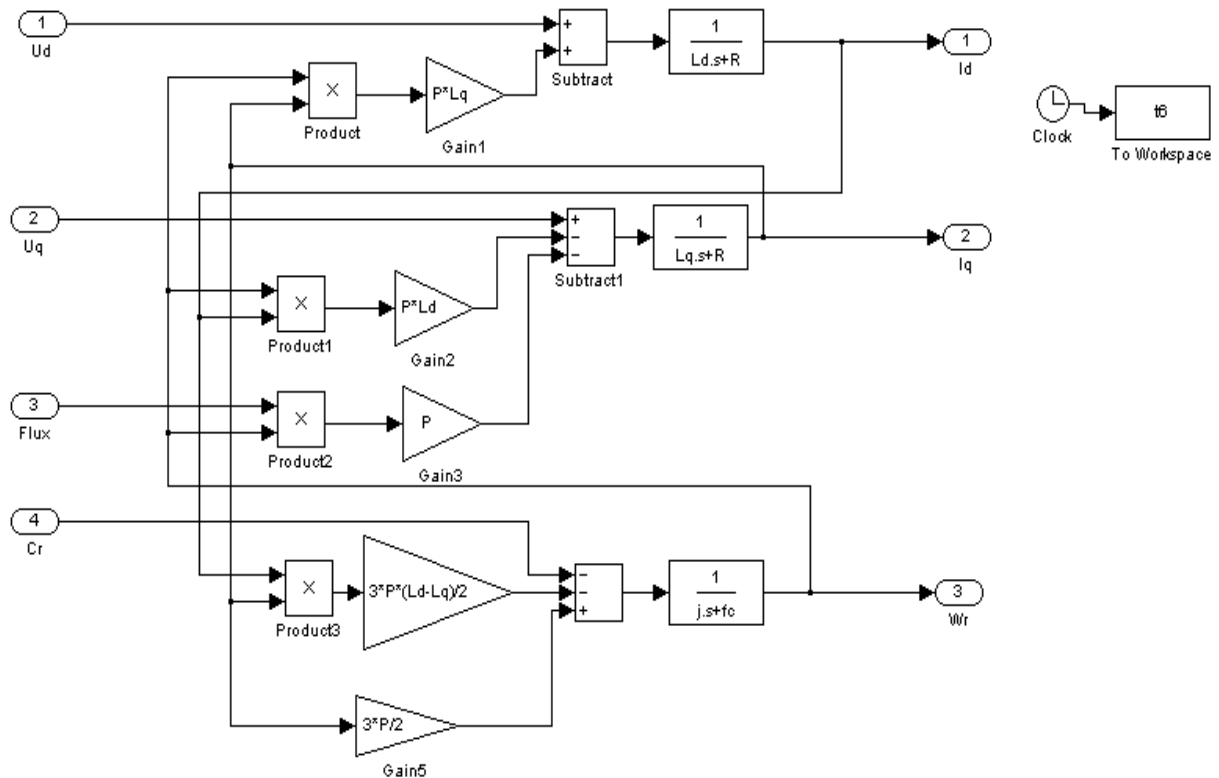


Figure (I.11) : Schéma bloc du modèle de la MSAP dans le repère d ,q

Remarque :

On remarque que le Schéma bloc est composé de plusieurs blocs non linéaires illustrant la relation qui existe entre les entrées (commandes), les états et les sorties. Les trois types de non-linéarités $\omega_r i_q$, $\omega_r i_d$ et $i_d i_q$, sont représentées par les trois blocs de multiplication. De plus, les dynamiques du système sont représentées par trois fonctions de transfert. Deux fonctions de transfert donnant la dynamique rapide (courants) et une fonction de transfert qui définit la dynamique lente (vitesse) [1].

I.6. SIMULATION DU MODELE DE LA MSAP :

Les paramètres de la machine utilisés sont indiqués dans l'annexe. Nous avons présenté sur les figures (I-12.a), (I-12.b) la vitesse ω (rad/s), le couple électromagnétique, la tension statorique V_a et le courant statorique de la phase (a) et ses deux composantes d'axe directe i_d et en quadrature i_q , de la MSAP alimentée par une source de tension triphasée.

La figure (I-12.a) présente les résultats de la simulation de la MSAP pour un fonctionnement à vide.

Nous remarquons que la vitesse de rotation se stabilise à la valeur de (480) rad/sec au bout d'un temps d'environ (0.35s), qui est un temps de réponse assez élevé pour certaines applications (dynamique lente).

Le couple électromagnétique présente une allure identique à celle du courant d'axe 'q' du fait de la linéarité existante entre ces deux grandeurs. Sa valeur de crête est de (32N.m) et se stabilise à une valeur de (0 N.m), qui compense les pertes par frottement (couple à vide).

La machine fait appel à un fort courant de démarrage (environ 60A), puis s'atténue jusqu'à la valeur de (-60A) au régime permanent.

La figure (I-12.b) montre l'évolution des grandeurs précédentes avec l'application d'un échelon du couple résistant ($C_r=5\text{N.m}$) à l'instant ($t=1\text{s}$), nous remarquons une diminution de la vitesse de rotation suivie d'une augmentation du couple électromagnétique à une valeur compensant la charge appliquée. Suivi d'un appel supplémentaire du courant illustré par une augmentation du courant i_d .

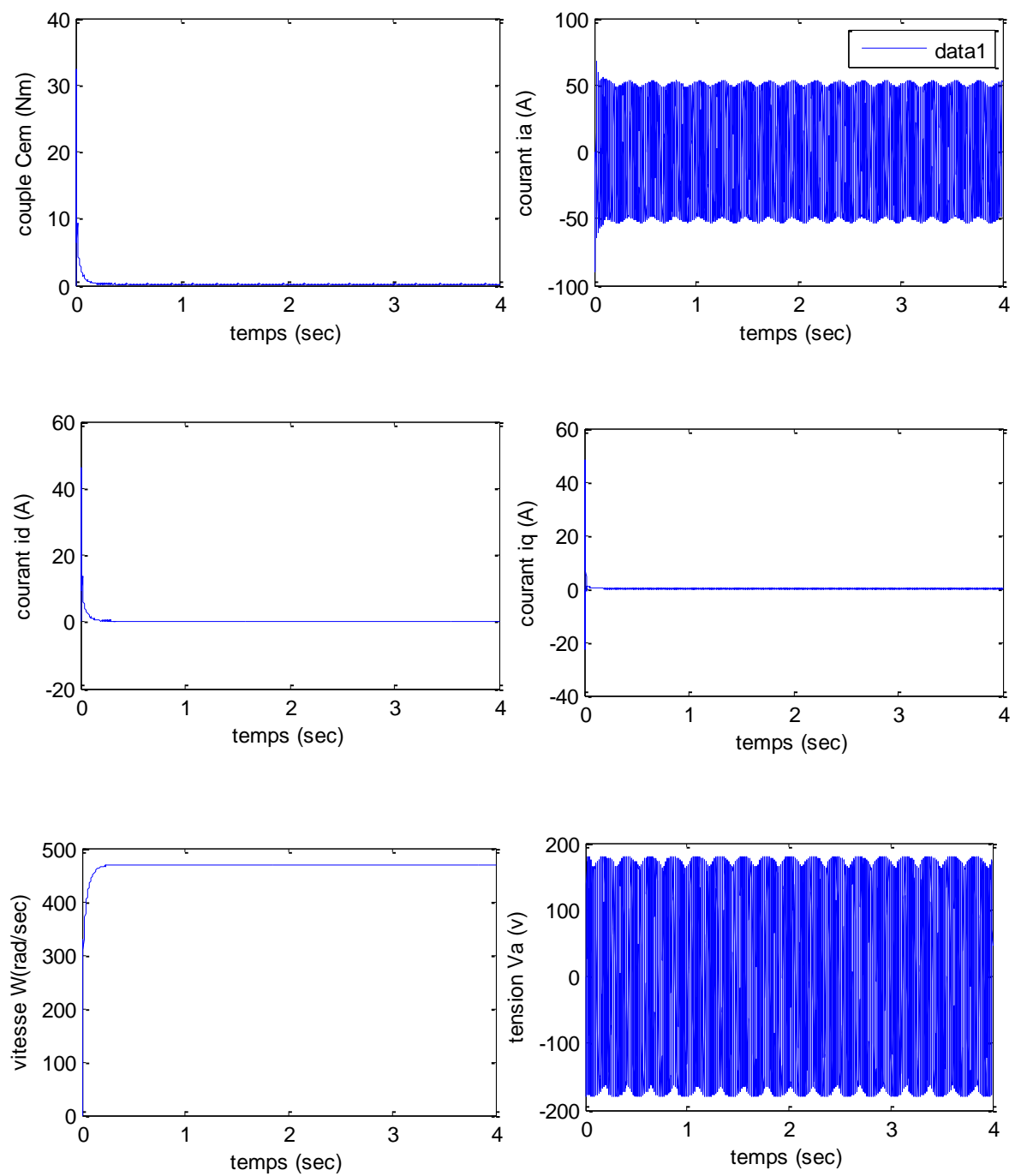
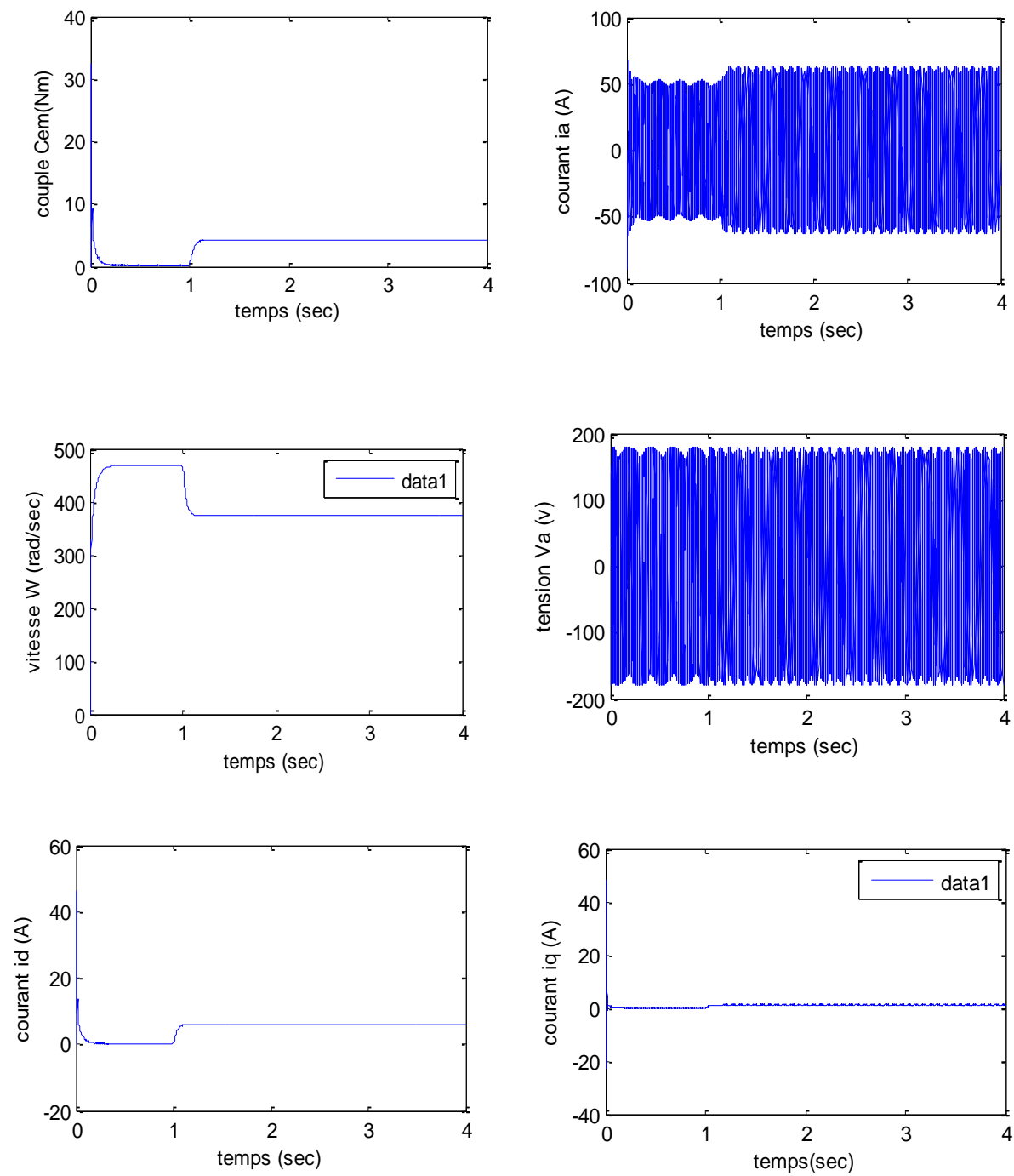


Figure (I-12.a) Caractéristiques dynamiques de la MSAP à vide.



Figure(I.12.b) : Caractéristiques dynamique de la MSAP en charge.

I.7. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons modélisé la machine synchrone à aimants permanents avec un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et en utilisant le modèle de Park. Le modèle devient plus simple et les non linéarités sont réduits.

Les résultats obtenus après simulation numérique sous MATLAB nous permis d'analyser le comportement dynamique de la MSAP à vide et en charge.

Dans le prochain chapitre on va présenter la modélisation de bloc convertisseur statique. En vue la simulation de tout l'ensemble MSAP – convertisseur.