

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERY de TIZI-OUZOU
Faculté du Génie Electrique et d'Informatique
Département d'électrotechnique



Mémoire de fin d'études

*En vue d'obtention du Diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique*
Option : Réseaux électriques

Thème

**Modélisation et simulation d'une
machine synchrone**

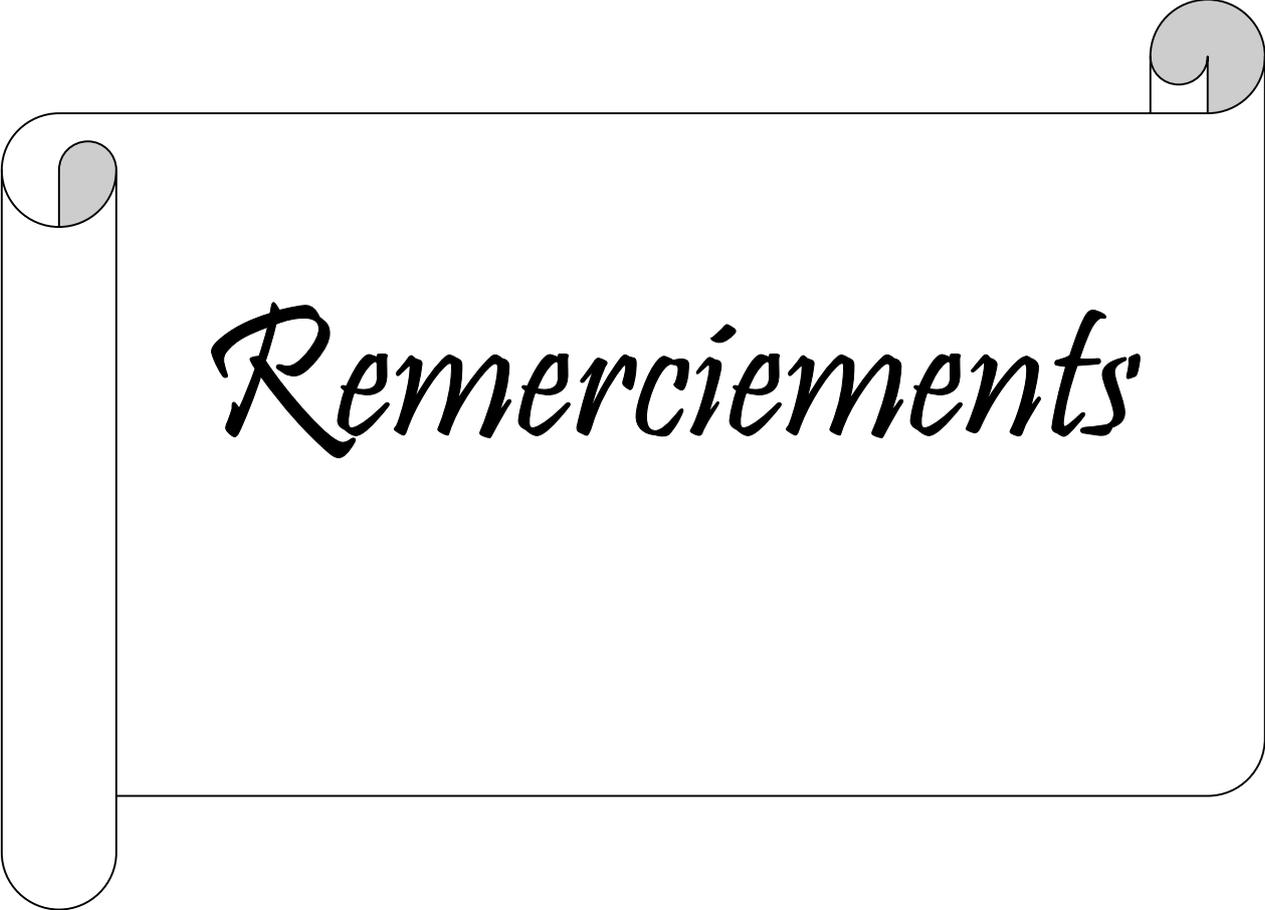
Proposé et dirigé par :

Mr: ZAOUIA Mustapha

Etudié par :

Melle: KHETTAB FETTA

Promotion 2008



Remerciements

Remerciements

Je remercie le bon dieu de m'avoir aidé à terminer ce travail.

Je remercie vivement mon promoteur M^r M .zaouia pour son encadrement.

Que les membres de jury trouvent ici ma profonde reconnaissance pour l'honneur qu'ils me font pour juger mon travail, sans oublier mes respects les plus distingués à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation durant mon cursus universitaire.

Tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail qu'ils trouvent ici ma gratitude.



Dédicaces

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

La plus merveilleuse des mères qui ma tant encouragé et soutenu pendant toutes mes études je la remercie énormément pour sa patience, son sacrifice et son amour.

Mes frères et sœurs Achour, Mouloud et Fatima

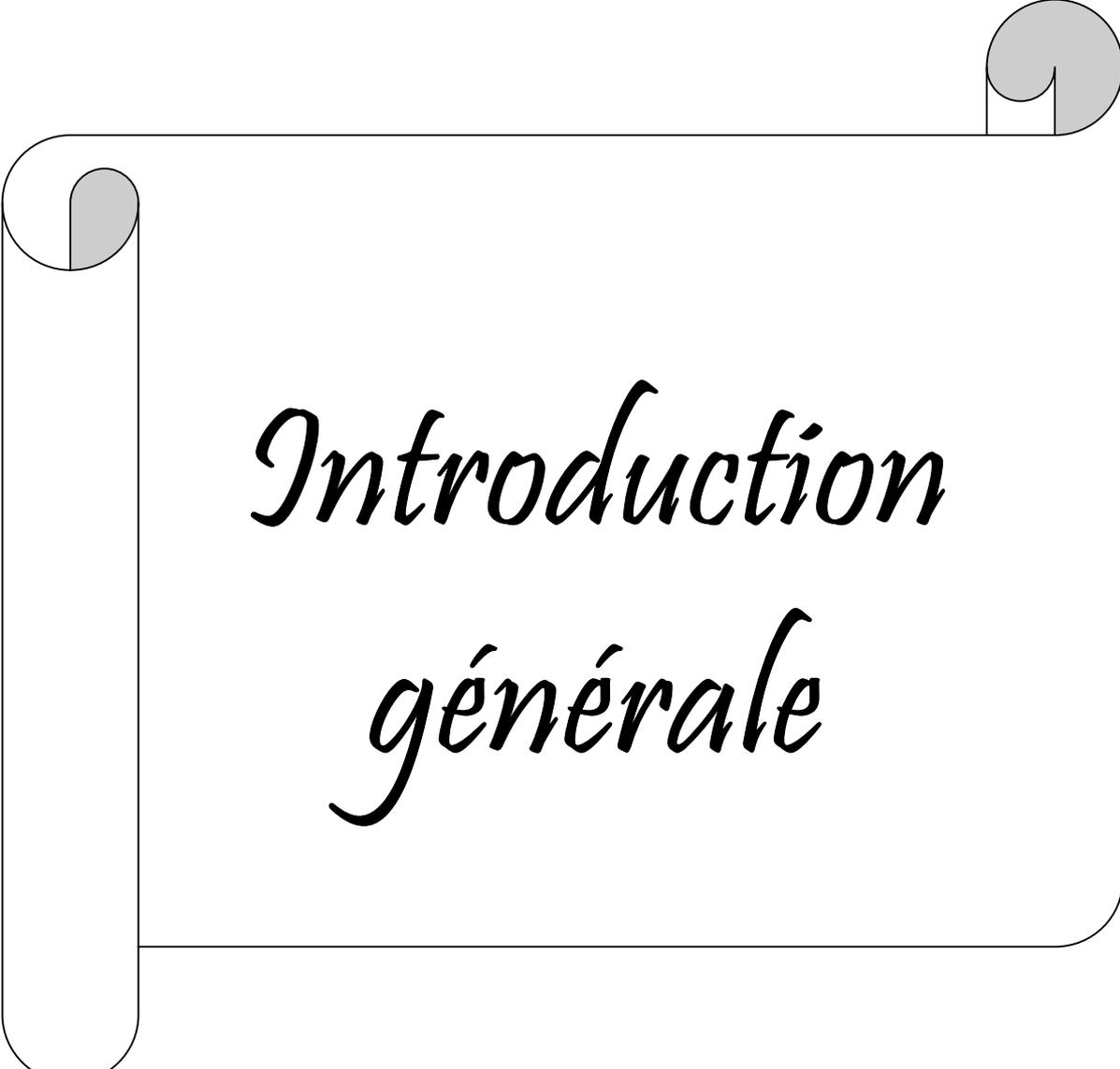
Mes amis (es) et à tous ceux qui me sont chers

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités de la machine synchrone	
I-1-Introduction	3
I-2- constitution de la machine	3
I-2-1-Principe de fonctionnement	5
I-2-2-Expression des puissances active et réactive	8
I-2-3 couple , couple synchronisant, stabilité.....	9
I-2-4- Limites de fonctionnement	11
I-3-Fonctionnement en moteur synchrone	12
I-3-1-Demarrage des moteurs synchrones	15
I-4-Différents types de machines synchrones	15
I-5-Avantages et inconvénients de la machine synchrone	16
I-6-Domaine d'application de la machine synchrone	16
I-7- Conclusion	17
Chapitre II : Modélisation de la machine synchrone	
II-1-Introduction	18
II-1-1-Le modèle simplifié	18
II-2- Représentation de la machine synchrone	18
II-2-1-Hypothèses	19
II-3-Expression des flux induits par l'inducteur sur les enroulements statoriques	19
II-4- Expression des flux induits sur les enroulements statoriques	20
II-5-Expression des tensions des enroulements statoriques	21
II-6-Expression du couple	22
II-7-Equation mécanique	23
II-8- Modèle de la machine	23
II-9-Stratégie de commande	24
II-9-1-Machine à fem sinusoïdales	24
II-9-1-1 Détermination de la forme des courants	25
II-9-2- Machine à fem trapézoïdales	26
II-9-2-1-Principe de construction	26
II-10 –Générateur de courant	27
II-10-1-Générateur de courant à partir d'un onduleur de tension	27
II-11-Modèle de l'onduleur	27
II-12-Régulateurs	30
II-13-Conclusion	30
Chapitre III : Simulation de la machine synchrone	
III-1-I introduction	31
III-2-Schéma bloc de la machine synchrone	31
III-3-Modèle de l'onduleur	32
III-4-Modèle du correcteur utilisé	32
III-4-1-Correcteur par hystérésis	32
III-5-Générateur de consigne	33
III-5-1-Générateur de consignes triphasées sinusoïdales	33
III-5-2-Générateur de consigne triphasée en créneaux	33

SOMMAIRE

III-6-Schéma bloc de simulation de l'ensemble convertisseur- machine synchrone	34
III-6-1- Alimentation en courant sinusoïdaux	34
III-6-2-Alimentation en courants créneaux	34
Interprétation des résultats dans le cas d'une alimentation en sinusoïdale	37
Interprétation des résultats dans le cas d'une alimentation en créneaux	40
Conclusion	41
Conclusion générale	42



*Introduction
générale*

Introduction générale

L'utilisation des machines électriques est en pleine expansion grâce aux performances qu'elles offrent. Cette évolution est liée aux progrès réalisés dans de nombreux domaines. Les matériaux ont donné naissance à des composants de plus en plus performants (aimants permanents, semi conducteurs de puissance, circuit intégrés...). Ces composants ont permis à leur tour de créer des ensembles convertisseur- machine de plus en plus évolués (précision et rapidité de fonctionnement via les convertisseurs et les calculateurs de la dernière génération).

Aujourd'hui, de nombreux systèmes utilisent des machines électriques pour assurer une conversion électromécanique réglable (position, vitesse ou couple variable via la modulation de source électriques) Les gammes puissance sont très variées (mW au MW) et les applications sont très diverses (électroménager, robotique, traction...).

Les machines électriques à courant continu ont été les premières à être utilisées dans le domaine des entraînements à vitesse variable. L'avantage de la machine électrique à courant continu consiste dans le découplage naturel entre le couple et le flux. Cette caractéristique permet d'avoir des valeurs maximales du couple à tout instant. Toute fois, la présence d'un collecteur mécanique (système- ballais-collecteur), constitue une limitation des variations du courant par rapport au temps, donc limitation de puissance et de vitesse de rotation.

De plus, dans ces moteurs, les pertes sont concentrées au rotor. La dissipation thermique, est par conséquent difficile à assurer.

La plus part de ces inconvénients peuvent être évités grâce à l'utilisation des machines à courant alternatif, plus précisément les machines synchrones à aimant permanent au rotor pour créer le champs inducteur, permettant ainsi de supprimer les contacts glissants nécessaires au rotor bobiné. Les caractéristiques de ces aimants et les différentes structures rotorique permettent d'obtenir des moteurs performants de point de vue du couple et la puissance massique.

Mais parallèlement aux différents avantages qu'offre l'utilisation de la machine synchrone à aimant permanent, elle présente un inconvénient majeur relatif à l'optimisation de son comportement vibratoire. En effet cette machine est très sensible aux harmoniques de tension introduite par les convertisseurs statiques.

Pour réduire et voir annuler ces ondulations, les recherches se sont orientées dans deux directions principales :

-La première consiste à modifier les structures des machines la seconde, à l'aide des convertisseurs statiques, vise à substituer aux alimentations fixes, des alimentations contrôlées en amplitude et en fréquence, dans le but de constituer des groupes à vitesse variable souple et diversifiée.

Notre travail s'est fixé à l'étude théorique et la mise au point par simulation numérique de la machine synchrone à aimant permanent.

Ce travail est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre nous avons exposé les généralités sur la machine synchrone, le deuxième chapitre est consacré à la présentation et la modélisation de la machine synchrone ainsi que sa stratégie de commande appliquée et une présentation de l'onduleur utilisé.

Le dernier chapitre est consacré à la simulation et à l'étude comparative entre la machine synchrone à fem sinusoïdale alimenté en courants sinusoïdaux et la machine synchrone à fem sinusoïdale alimentée en courants créneaux.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités de la machine synchrone

I-1- Introduction

Les machines électriques tournantes sont des dispositifs électromécaniques destinés à transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique (alternateur) ou inversement, c'est-à-dire transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique (moteur).

Moteur synchrone et alternateur constituent en fait deux appellations différentes de la même machine, machine synchrone [1].

Le schéma ci-dessous représente un ensemble turbine- machine synchrone

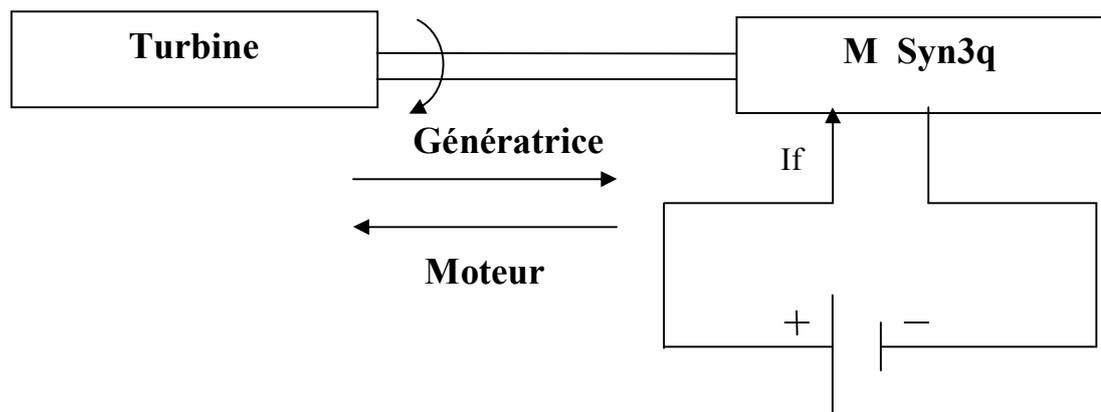


Figure I-1 - schéma d'un ensemble turbine- machine synchrone

I-2- constitution de la machine synchrone

Elle est généralement constituée d'un stator, d'un rotor, d'un entrefer d'un arbre.

- Stator : Feuilleté, pourvue d'encoches dont les quelles sont distribués les conducteurs d'un bobinage triphasé. Le stator est le siège du courant induit par la variation du flux du rotor d'où son nom induit [1].
- Le rotor : Le rotor est l inducteur de la machine synchrone portant p paires de pôles alternés nord et sud, entraîné par la source d'énergie mécanique. Un bobinage parcourue par un courant continu I_f assure la magnétisation de la roue polaire.

Le transfert de la roue d'excitation au bobinage rotoriques se fait par un système de deux bagues et deux balais.

On distingue deux types de rotors :

- Rotor à pole saillants conçu pour les machines à faible vitesse périphérique, cette structure correspond au nombre de paire de pôles élevés mais pouvant aussi appliqué lorsque $p = 2$ [2].

- Rotor à pole lisses ou à entrefer constant conçu pour les machines à grande vitesse périphérique cette structure correspond aux machines bipolaire ou quadripolaire ($p = 1, p = 2$).

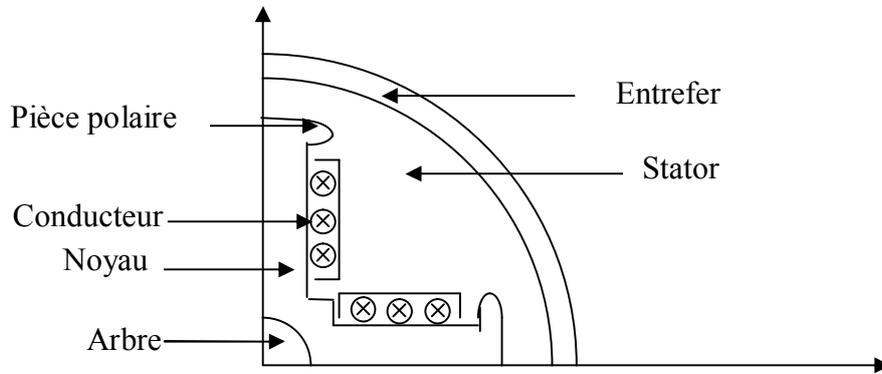


Figure I-2 –rotor d'une machine synchrone à pole saillants.

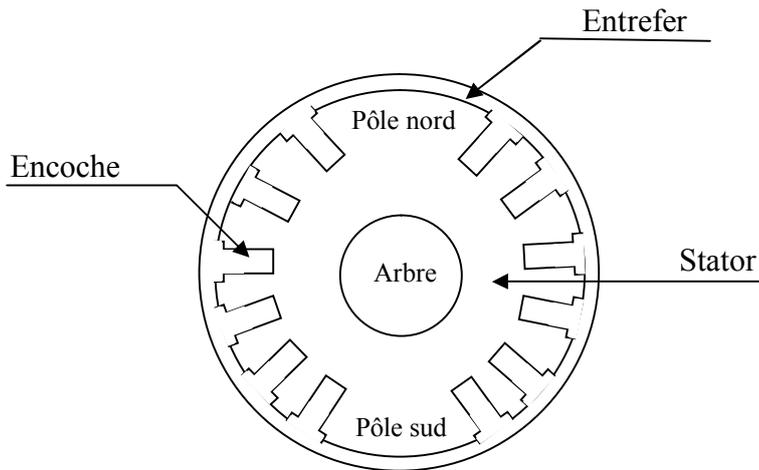


Figure I -3- rotor d'une machine synchrone à pôles lisses

- L'entrefer : C'est l'espace séparant le rotor du stator, il est supposé constant dans une machine à pole lisse et variant dans une machine à pole saillants, il permet de canaliser les lignes de champ magnétique.
- Arbre: C'est un organe de transmission du mouvement de rotation les paliers soutiennent le rotor et assurent sa libre rotation.

I-2-1 Principe de fonctionnement

Les machines synchrones peuvent fonctionner en générateurs et sont alors appelées alternateurs, en moteurs (moteurs synchrone).

Le passage d'un fonctionnement à l'autre est continu et n'entraîne aucune modification de principe ou de technologie.

a) Création des forces électromotrices

Le rotor est entraîné mécaniquement par un moteur à la vitesse angulaire constante (vitesse de synchronisme).

Le courant continu circulant dans l'enroulement rotoriques engendre dans l'entrefer un champ magnétique tournant.

Ce rotor tourne à l'intérieur d'un stator; lorsque le champ passe devant une bobine, il induit des courants à l'intérieur de celle-ci.

Pour chaque bobine ce courant induit crée une différence de potentiel qui est une tension délivrée par l'alternateur de pulsation $\omega = p\Omega$.

p : Nombre de paire de pôles de la machine

Ω : La vitesse de rotation

Par la répartition du flux inducteur dans l'entrefer et par la réaction du bobinage de l'induit on essaie de rendre cette f.e.m sinusoïdale.

Les enroulements de phase 2 et 3 du stator sont en retard par rapport à la phase 1

de $\frac{2\pi}{3p}$, $\frac{4\pi}{3p}$ successivement.

On obtient donc un système triphasé équilibré de f.e.m : [1].

$$e_1 = E_{\max} \cos \omega t$$

$$e_2 = E_{\max} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$e_3 = E_{\max} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

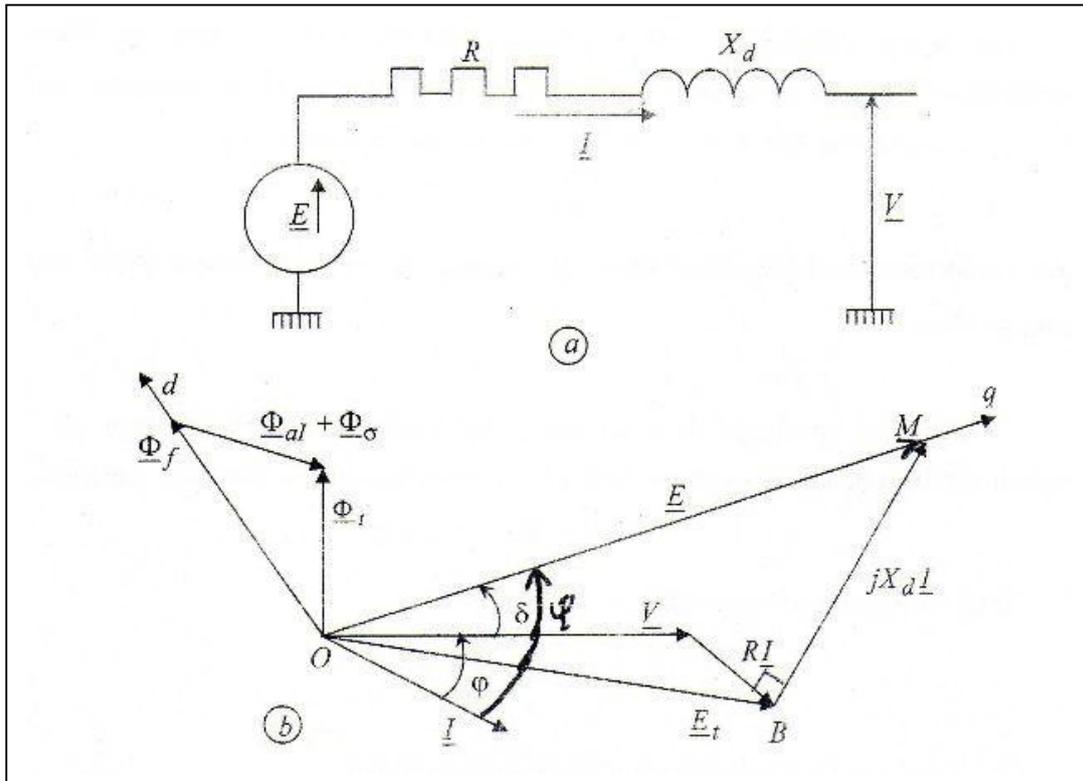


Figure I-4- schéma équivalent (a) et diagramme vectoriel (b) de la machine synchrone à entrefer constant, non saturée

b) Réaction d'induit définition et causes

Quand un courant I parcourt l'enroulement d'induit, comme nous venons de le voir, le flux utile n'est plus engendré uniquement par la f.m.m. de l'inducteur. A l'action de celui-ci vient en effet se superposer l'action de la f.m.m. de l'induit et le flux utile est dû à l'action simultanée de ces deux f.m.m. c'est ce phénomène qu'on désigne sous le nom de réaction magnétique d'induit.

Dans un alternateur triphasé les pôles réels de l'inducteur et les pôles fictifs d'induits en nombre égal tournent donc à la même vitesse. Les pôles réels et fictifs occupent une position relative immuable.

La réaction d'induit dépend du déphasage propre au récepteur (l'angle ψ) comme on le voit sur la figure (I-4-b).

L'effet de la f.m.m. d'induit que nous représenterons par les pôles fictifs dépendra évidemment de la position relative de ces pôles fictifs et les pôles réels. Nous la déterminons dans différents cas.

- Si $\psi = 0$ (charge purement résistive) : les pôles fictifs sont régulièrement intercalés entre les pôles réels figure (I-5-a) ; on dit que la réaction magnétique d'induit est transversale.
- Si $\psi = + \frac{\pi}{2}$ (charge purement inductive, le courant est en quadrature arrière par rapport au f.é.m. correspondante) : les pôles fictifs tendent à démagnétiser les pôles réels ; on dit que la réaction magnétique de l'induit est longitudinale démagnétisante (fig.I-5-b).
- Si $\psi = - \frac{\pi}{2}$ (charge purement capacitive, le courant est en quadrature avant par rapport au f.é.m. correspondante) : les pôles fictifs se superposent aux pôles réels de même nom ; on dit que la réaction magnétique d'induit est longitudinale magnétisante figure (I-5-c) [2].

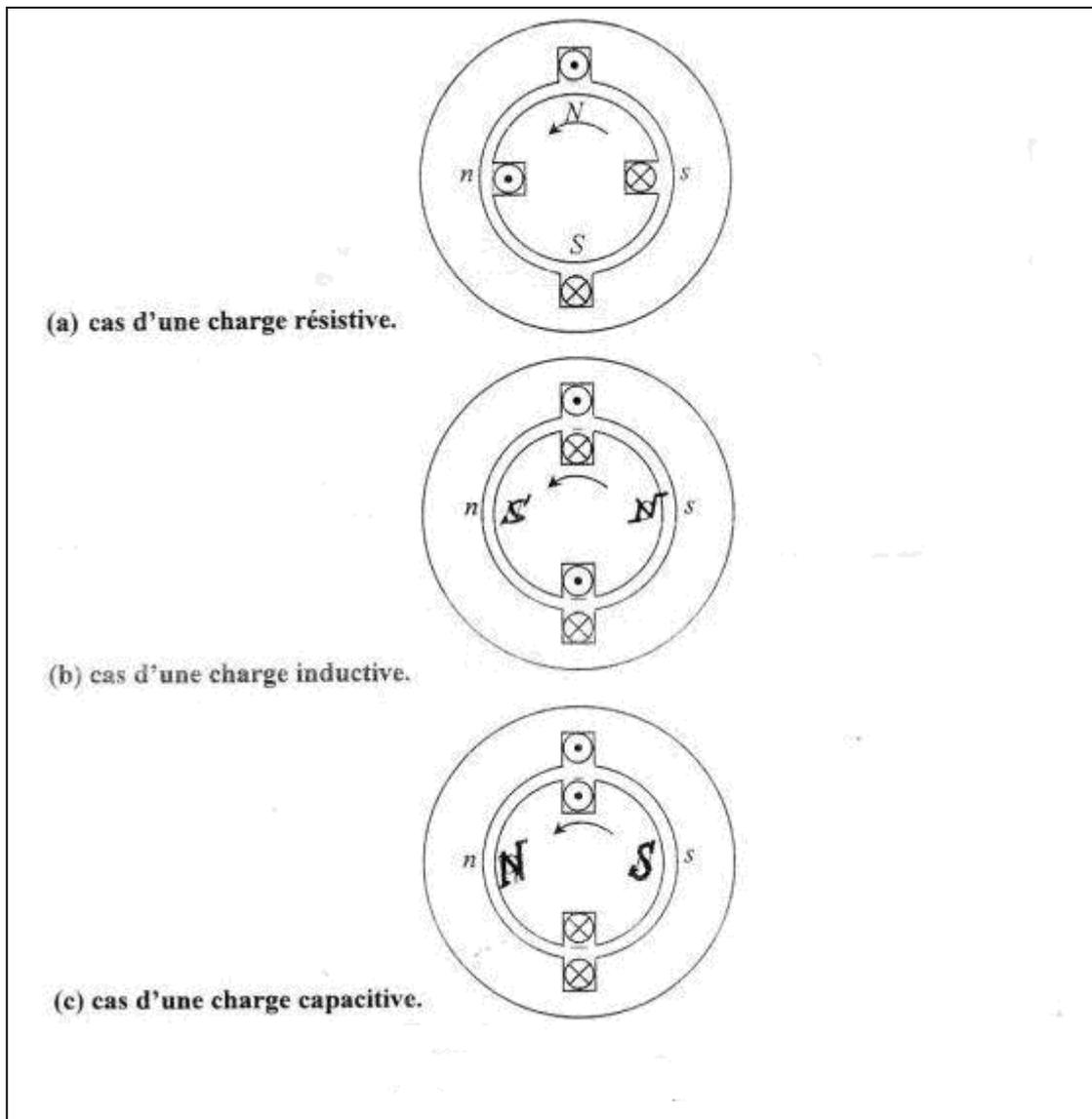


Figure I-5- Réaction d'induit

I-2-2 - Expression des puissances active et réactive [9] :

Dans ce qui suit nous allons négliger la résistance R qui est toujours faible devant X_d .

Le schéma monophasé équivalent est, alors, celui de la figure (I-6-a) et le diagramme vectoriel, correspondant à l'équation :

$$\underline{E} = \underline{V} + jX_d \underline{I} \tag{I-1}$$

avec la réactance synchrone X_d considérée comme constante, est tracée en OAM figure.(I-6-b) dans l'hypothèse où \underline{I} présente par rapport à \underline{V} un retard de phase φ . On retrouve l'angle interne $\delta = (\underline{OA}, \underline{OM})$.

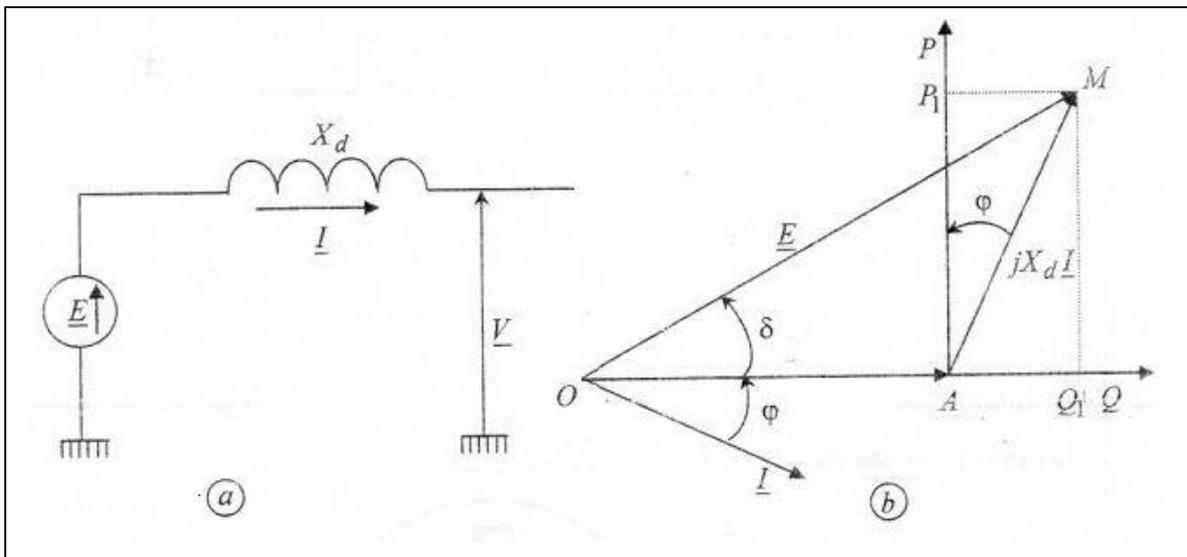


Figure I-6- schéma monophasé équivalent simplifié (a) et diagramme de fonctionnement (b) avec mesure des puissances active et réactive d'un alternateur

Dans ces conditions, l'alternateur fournit au circuit extérieur triphasé une puissance active

$$P = 3VI \cos \varphi \tag{I-2}$$

et une puissance réactive

$$Q = 3VI \sin \varphi \tag{I-3}$$

On a :

$$\left. \begin{aligned} AP_1 &= X_d I \cos \varphi \\ AP_1 &= E \sin \delta \end{aligned} \right\} \Rightarrow I \cos \varphi = \frac{E \sin \delta}{X_d}$$

D'où alors :

$$P = \frac{3VE}{X_d} \sin \delta \tag{I-4}$$

De la même manière on obtient :

$$\left. \begin{aligned} AQ_1 &= X_d I \sin \varphi \\ AQ_1 &= E \cos \varphi - V \end{aligned} \right\} \Rightarrow I \sin \varphi = \frac{E \cos \delta - V}{X_d}$$

D'où :

$$Q = \frac{3EV}{X_d} \cos \delta - \frac{3V^2}{X_d} \quad (\text{I-5})$$

I-2-3 Couple, couple synchronisant, stabilité

Les pertes étant négligées, le couple électromagnétique résistant C_e s'obtient en divisant la puissance active, donné par la relation (I-4), par la vitesse de rotation $\frac{\omega}{p}$ constante :

$$C_e = \frac{3pEV}{\omega X_d} \sin \delta \quad (\text{I-6})$$

D'après la figure (I-6-b) l'angle δ est l'angle entre la tension du réseau \underline{V} , référence synchrone tournant à la vitesse ω , et la f.é.m. \underline{E} portée par l'axe \overline{Oq} , donc liée à la position angulaire du rotor figure (I-6).

L'expression (I-6) montre que le couple électromagnétique, et donc la puissance, n'ont une valeur moyenne non nulle que si δ ne varie pas de façon monotone. Il en résulte que la machine ne peut échanger de la puissance avec le réseau qu'à la vitesse $\frac{\omega}{p}$ d'où le nom de machine synchrone.

C_e est donc, en régime permanent, fonction non de la vitesse mais de l'angle δ figure (I-7)

Le point de fonctionnement s'établit à l'intersection de la courbe C_e , et de l'horizontale C_m . C_m étant le couple moteur indépendant de δ .

Des deux points d'intersection A et B , seul A est stable, puisqu'en ce point une tendance à l'accélération, c'est-à-dire une augmentation de δ , conduit à un excès de C_e sur C_m , c'est-à-dire un effet ralentisseur provoquant le retour à l'état d'équilibre initial.

La stabilité correspond donc à la condition :

$$\frac{dC_e}{d\delta} > 0$$

La quantité $C_s = \frac{dC_e}{d\delta}$

S'appelle couple synchronisant ayant pour valeur : $\frac{3pEV}{\omega X_d} \cdot \cos \delta$

Et la limite de stabilité correspond à $\delta = \frac{\pi}{2}$

L'augmentation de la puissance active, I_f constant, conduit à une augmentation de δ donc une diminution du couple synchronisant. Une augmentation ultérieure de la puissance mécanique ne peut plus être compensée par une augmentation de la puissance électrique et la machine accélère ; on dit alors qu'elle « décrochera » ou s'emballe.

Le même résultat serait obtenu si l'on diminuait le courant d'excitation, à la puissance mécanique constante [2].

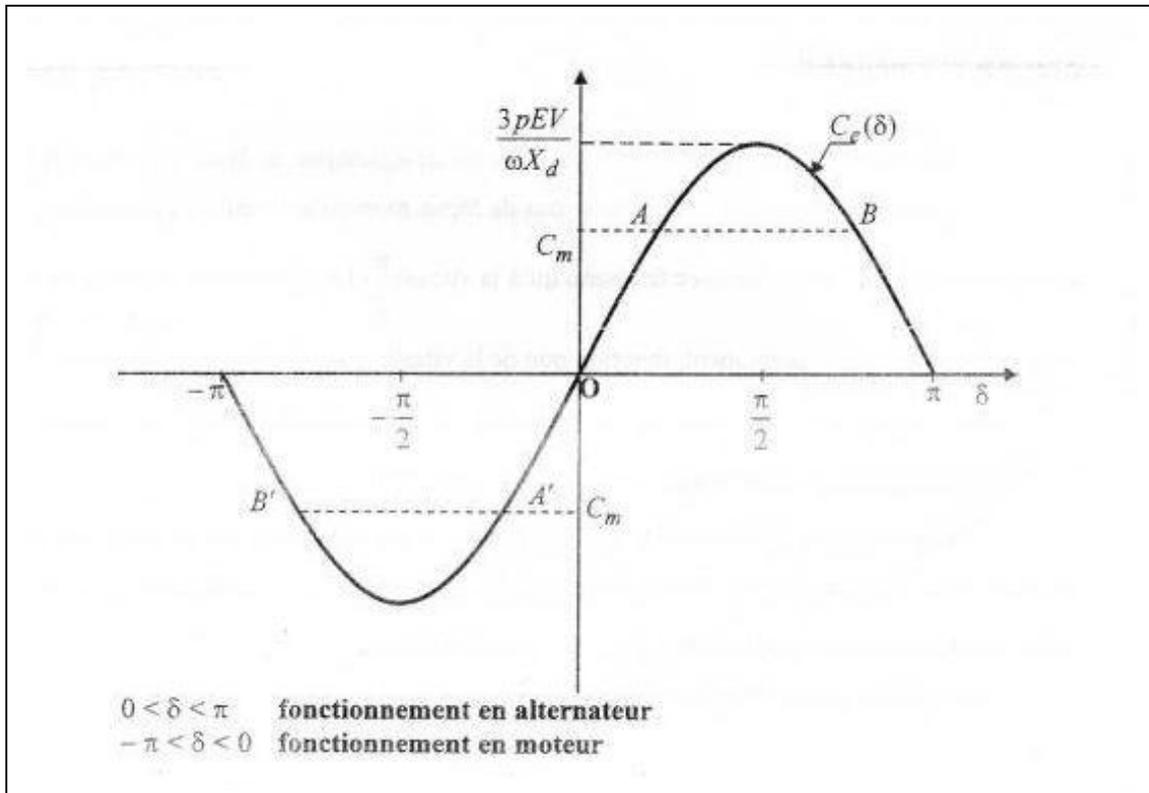


Figure I-7- courbe du couple en fonction de l'angle interne, d'une machine à entrefer constant.

I-2-4- Limites de fonctionnement

Le fonctionnement nominal d'un alternateur est caractérisé par [9] :

- la tension nominale $U_n = V_n \sqrt{3}$.
- le courant nominal $I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n}$
- le facteur de puissance nominal $\cos \varphi_n$

Le diagramme correspondant au régime nominal est tracé sur la figure (I-8).

A ce régime correspond la valeur nominale E_n de la f.é.m. interne donc du courant d'excitation en charge I_{fn} .

L'alternateur est dimensionné de telle sorte que l'échauffement toléré est atteint ou, Près de l'être, lorsque $I = I_n$ et $I_f = I_{fn}$. On ne peut pas dépasser ces valeurs de façon durable.

Le domaine des fonctionnements possibles est donc limité par les courbes suivantes :

I- le cercle de centre O et de rayon OM correspondant à $I_f = I_{fn}$,

II- le cercle de centre A et de rayon AM correspondant à $I = I_n$,

III- l'horizontale menée de M , qui caractérise la puissance active nominale,

IV- la verticale, menée de O , correspondant à $\delta = \frac{\pi}{2}$, limite de stabilité naturelle. Cette

limite est appelée naturelle parce qu'elle correspond au cas où la tension d'excitation est maintenue constante.

La présence d'un régulateur de tension permet de reculer cette limite, donc autorise des fonctionnements correspondants à $\delta > \frac{\pi}{2}$.

Les points de fonctionnement possibles se situent alors à l'intérieur du contour $OLMNRO$ figure (I-8) [2].

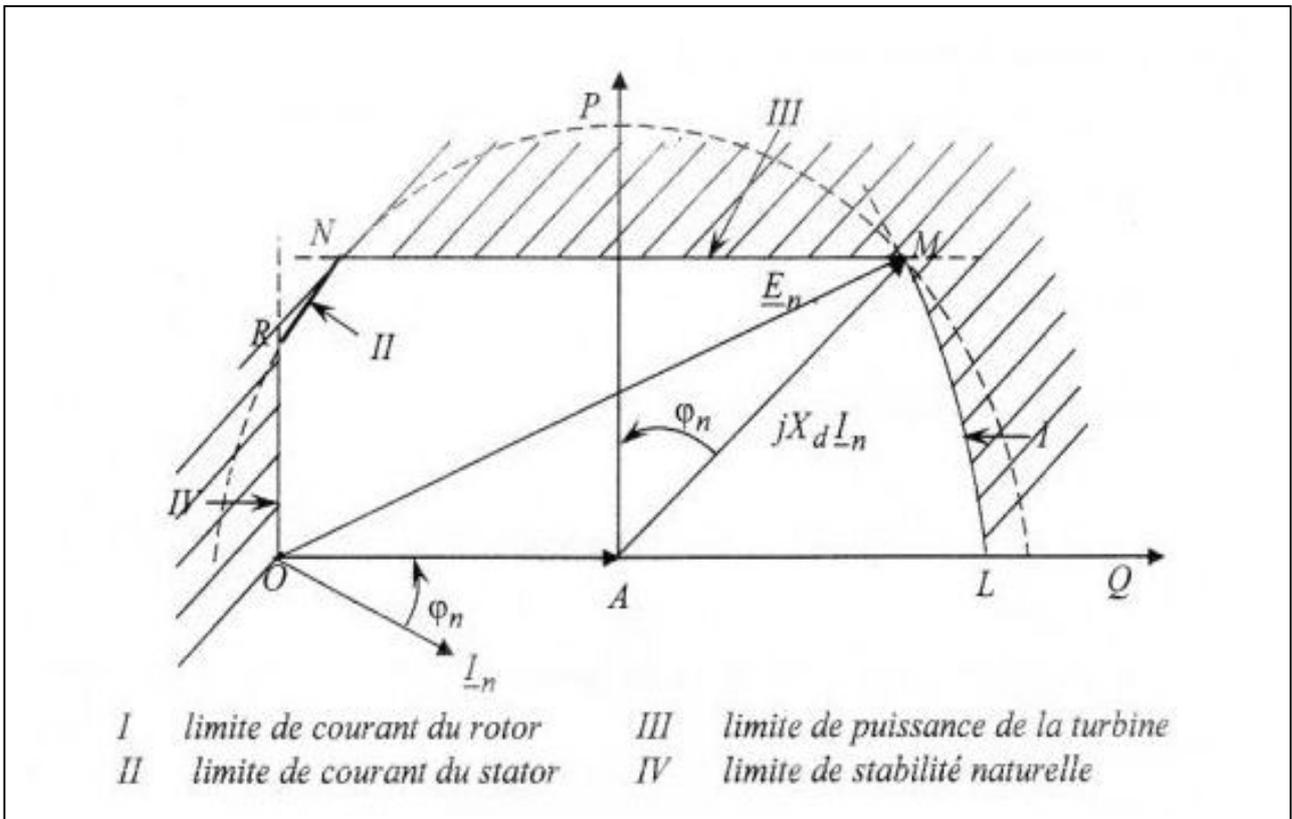


Figure I-8-limite de fonctionnement d'un alternateur à entrefer constant, non saturé

I-3- Fonctionnement en moteur synchrone

Comme toute machine électrique synchrone est réversible : si l'on alimente l'induit par un système de courants triphasés en énergie et l'inducteur par un courant continu, on peut transformer l'énergie électrique en énergie mécanique à condition qu'entre la pulsation ω des courants et la vitesse angulaire de rotation Ω soit respectée la relation de

$$\text{synchronisme } \Omega = \frac{\omega}{p}.$$

Afin de simplifier l'étude nous adoptons le même modèle simplifié annoncé auparavant et nous conservons les mêmes conventions de signes relatives au fonctionnement en générateur.

L'équation de fonctionnement est toujours (I-1), et les figures (I-9-a et I-9-b) représentent respectivement le schéma monophasé équivalent simplifié et le diagramme de fonctionnement d'un moteur synchrone. On voit que le fonctionnement moteur se caractérise

par le fait que $|\varphi| > \frac{\pi}{2}$, ce qui est conforme à la relation (I-2) ou encore par le fait que $\delta < 0$, ce qui est conforme à (I-4).

La façon la plus commode et la plus courante d'analyser le fonctionnement d'un moteur synchrone consiste à supposer la tension d'alimentation, la fréquence et le couple résistant constants, et à examiner les conséquences d'une action sur le courant d'excitation I_f .

Sur le diagramme vectoriel figure (I-10), la tension V prise comme origine des phases correspond à une longueur constante OA par ailleurs le point M se déplace sur une horizontale (puissance active constante). La position de M sur cette horizontale est fixée par la longueur OM , égale à la f.é.m. E , donc proportionnelle au courant d'excitation I_f . Par ailleurs, la longueur $AM = X_d I$ est proportionnelle au courant d'induit I .

Donc, lorsque à puissance active constante, on donne à I_f une valeur élevée (point M_1) puis qu'on le fait décroître, I commence à décroître (de M_1 à M_2). En M_2 , I passe par un minimum, le facteur de puissance ($\cos \varphi$) est alors égal à -1. En suite I croît (point M_L). On ne peut décroître I_f au-delà de la valeur correspondant au point M_L car alors la puissance électrique devient inférieure à la puissance mécanique, le moteur décrochera et s'arrête (fig. I-7).

On voit que la limite de stabilité correspond à $\delta = -\frac{\pi}{2}$, de même que pour l'alternateur elle correspond à $\delta = +\frac{\pi}{2}$.

Les raisonnements de stabilité sont faits sur la figure (I-7) dont on voit que le fonctionnement en moteur correspondant à $C_e < 0$ ou $-\pi < \delta < 0$. A un couple mécanique $C_e (< 0)$ correspondant deux points de fonctionnement possibles A' et B' , seul A' , correspondant à $|\delta| < \frac{\pi}{2}$, est stable : si δ vient à diminuer légèrement (c'est-à-dire si $|\delta|$ augmente), cela signifie que le moteur a tendance à ralentir.

Mais alors C_e devient inférieur à C'_m donc, en valeur absolue, le couple moteur $|C_e|$ devient supérieur au couple résistant $|C'_m|$, ce qui tend à ramener le fonctionnement en A' [2].

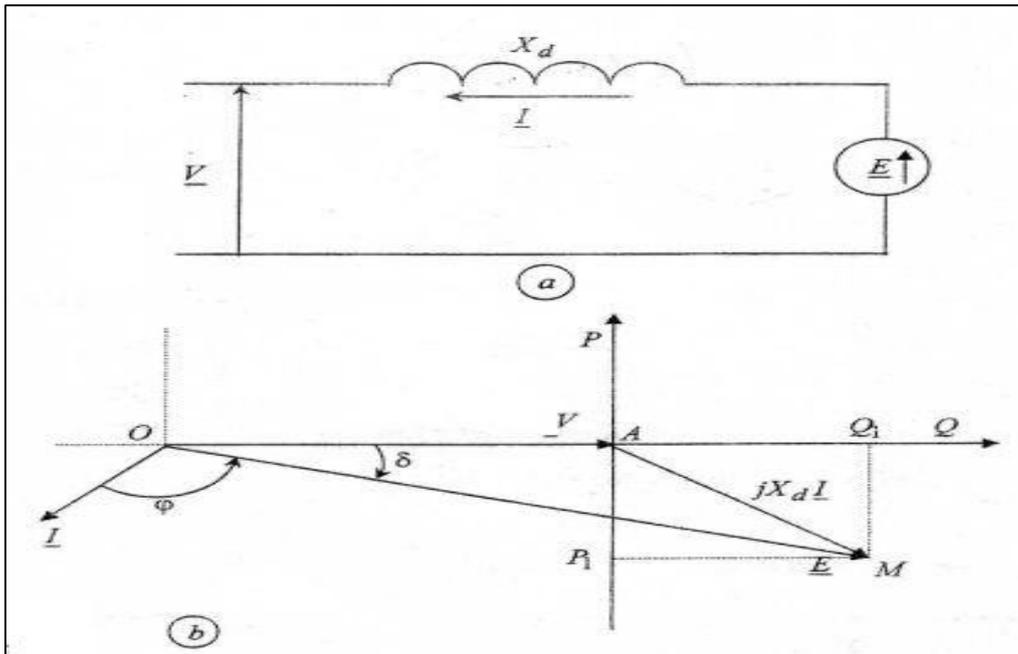


Figure I-9-Schéma monophasé équivalent simplifié (à) et diagramme de fonctionnement (b) d'un moteur synchrone

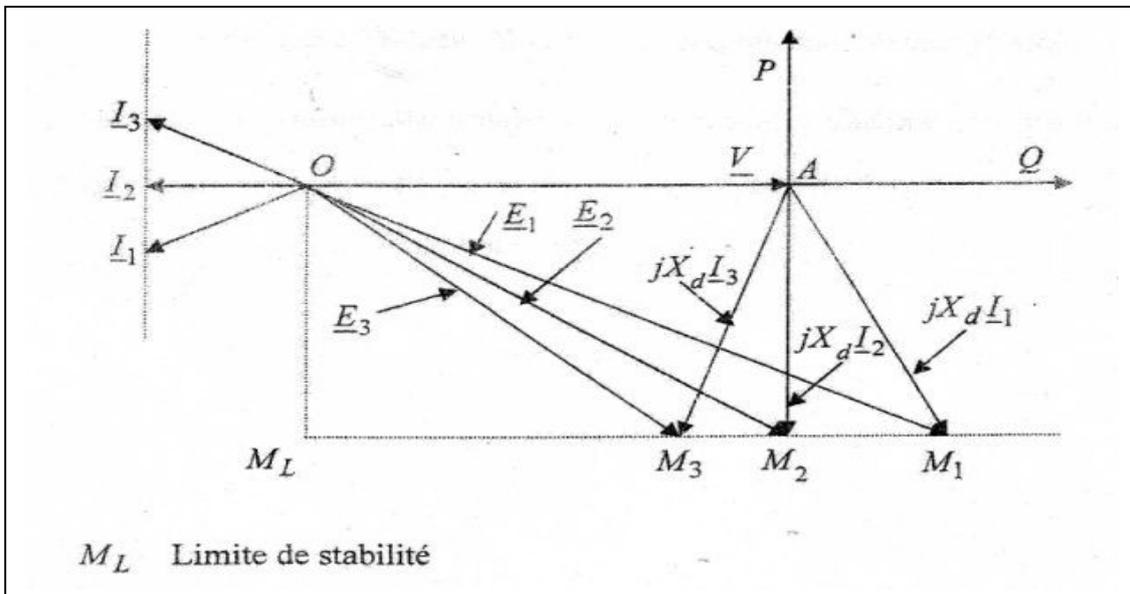


Figure I-10 - Différents régimes d'un moteur synchrone, à puissance active donnée

I-3-1 Démarrage des moteurs synchrones

L'expression (I-6) montre que le moteur synchrone ne peut fournir de couple qu'à vitesse synchrone $\Omega = \frac{\omega}{p}$. A toute autre vitesse, la valeur moyenne du couple est nulle, car δ est alors fonction monotone du temps.

Pour démarrer un moteur synchrone il faut :

- soit l'entraîner par un moteur auxiliaire de faible puissance. Le couple mécanique doit être très faible au cours du démarrage ;
- soit lui permettre de se comporter comme un moteur asynchrone, en le munissant d'enroulement amortisseurs ;
- soit l'alimenter à fréquence variable, au moyen d'un ensemble redresseur-onduleur [2].

I-4-Différents types de machines synchrones

Suivant leur type et mode de fonctionnement, les machines sont classées en trois catégories :

a) Machines synchrones à rotor bobiné

Ce sont des machines dont l'excitation est fournie par une excitatrice à courant continu associée à un redresseur tournant, pour éliminer tout contact glissant. Le rotor dans ce type de machine est soit à pôles lisses soit à pôles saillants :

- ❖ **Rotor à pôles saillants** : ce type de construction n'autorise pas de grandes vitesses de rotation. Forte puissance mais faible vitesse $n < 1500$ tr/min. Production d'énergie de 60 à 400 Hz dans les centrales hydrauliques, groupes électrogènes.
- ❖ **Rotor à pôles lisses** : ce mode de construction qui assure une grande robustesse mécanique est systématiquement adopté pour les alternateurs de fortes puissances dont la fréquence de rotation est élevée (3000 et 1500 tr/min). Production d'énergie dans les centrales nucléaires.

b) Machines synchrones à aimant permanent

L'aimant permanent est un matériau ferromagnétique qui a la propriété de conserver une très grande aimantation rémanente, et qui se désaimante difficilement lorsqu'il a été aimanté.

L'utilisation des aimants permanents dans la machine synchrones présente un avantage considérable. L'excitation fournie par l'aimant permanent nous évite le contact glissant entre balais et collecteurs. Elle nous permet de réduire les pertes par effet joule dans les enroulements rotoriques. De plus, ces machines fonctionnent avec moins de bruit.

L'inconvénient de ces machines provient de l'absence de possibilité de réglage du flux d'excitation.

c) Machine synchrones à réluctance variable

Ce sont des machines robustes, sans contact glissant, qui peuvent prendre des utilisations diverses. Ces machines possèdent en général un double système de denture, l'un au rotor, l'autre au stator, dont le déplacement relatif modifie la configuration du champ magnétique produit par un ou plusieurs bobinages [1].

I-5-Avantages et inconvénients de la machine synchrone :

Comme tout appareil électrique, la machine synchrone présente des avantages comme elle présente des inconvénients

a)Avantages de la machine synchrone

- Un excellent rendement.
- Vitesse de rotation constante, indépendante de la tension d'alimentation et de la charge entraînée
- Fonctionnement réversible en moteur ou en alternateur, avec un bon facteur de puissances

b) Inconvénients de la machine synchrone

Dans le cas d'une surcharge brusque ou d'une chute de tension importante du réseau, la machine peut décrocher ce qui nécessite l'utilisation d'un dispositif de sécurité.

Pour assurer son excitation, la machine doit être munie d'un générateur de courant continu ce qui encombre le dispositif et le rend plus cher.

Elle ne peut démarrer qu'à très faible charge, en exigeant soit un moteur auxiliaire de lancement, soit le démarrage en asynchrone avec un réducteur de tension de démarrage.

III-6- Domaine d'application des machines synchrone

La quasi-totalité des générateurs de courant alternatif sont des alternateurs. Leurs puissance apparentes sont comprises entre quelques centaines de VA et plus de 1600MVA. L'alternateur transforme en énergie électrique l'énergie mécanique qui lui est fournie par la machine qui l'entraîne. Il est conçu pour produire des tensions et des courants sinusoïdaux.

Il constitue le support principal dans la production d'énergie électrique. Le moteur synchrone effectue la conversion énergétique inverse, il transforme l'énergie électrique en

énergie mécanique. Il est utilisé pour l'entraînement des engins de grandes puissances comme les navires et les trains à grandes vitesses (TGV de la deuxième génération).

Le moteur équipé également certains dispositifs dont la vitesse de rotation doit être rigoureusement constante (horloges synchrones,...).

Dans plus en plus d'applications et à tous les niveaux de puissance, le moteur synchrone, équipé d'un convertisseur électronique adéquat, remplace le moteur synchrone autopiloté ou moteur à courant continu sans balais[3].

Conclusion

La machine synchrone possède un large spectre d'utilisation soit en production d'énergie électrique (alternateur), soit en production de l'énergie mécanique (moteur), comme elle peut fonctionner en compensateur synchrone (amélioration du $\cos \varphi$).

Dans ce chapitre, nous avons présenté les généralités sur la machine synchrone et montré les différents régimes d'un moteur synchrone à puissance active donnée et les limites de fonctionnement.

Le développement d'un algorithme de commande nécessite la connaissance du modèle de la machine ce qui fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre II

*Modélisation de la
machine synchrone*

II-1- Introduction

La modélisation est une étape imposante de l'étude des systèmes commandés. Pour commander un système donné il faut disposer de son modèle afin de l'étudier et de le simuler. Dès lors que les résultats de simulation sont très satisfaisants on applique les lois de commande proposées en simulation sur le système réel. La modélisation est obtenue à partir des équations physiques qui décrivent le comportement du système.

Ces équations sont dans le cas continu des équations différentielles et dans le cas discret des équations de récurrences.

Dans ce chapitre nous développons les modèles mathématiques de la machine utilisée pour la commande ainsi que l'alimentation de la machine à partir d'un onduleur de tension. Dans la littérature il existe différents modèles de la machine synchrone, cependant, selon les phénomènes transitoires à prendre en considération, on peut distinguer deux niveaux à savoir :

Le modèle complet.

Le modèle simplifié.

II-1-1-Le modèle simplifié

Le modèle simplifié de la machine synchrone est une approximation du modèle complet, il s'obtient en négligeant certaines dynamiques rapide, il s'agit d'un modèle qui ne tient compte que des dynamiques du champ et du rotor, c'est un modèle d'ordre trois dont les variables telles que : la tension à la sortie, la vitesse angulaire et la puissance électrique, sont toutes les composantes physiques mesurables, c'est un modèle simple [4].

II-2-Représentation de la machine synchrone

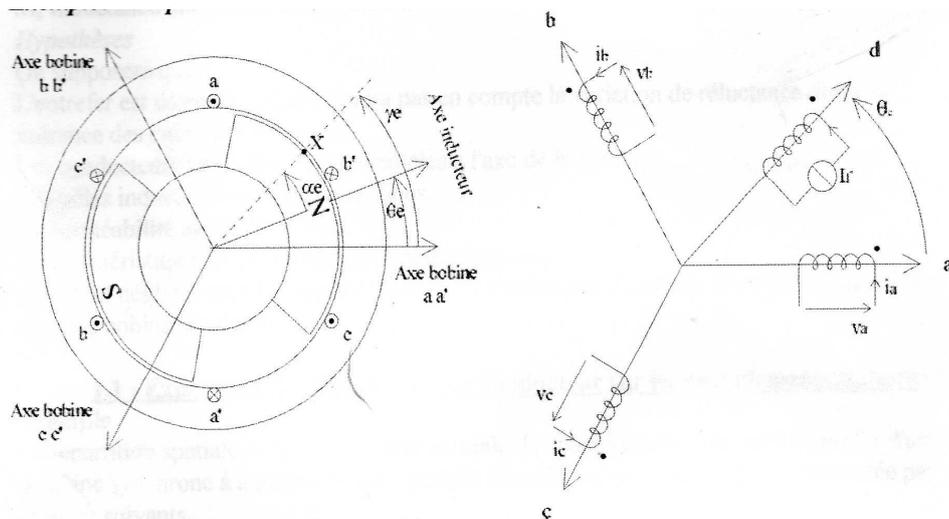


Figure II-1-Représentation schématique et symbolique de la machine synchrone

- l'enroulement induit est symboliquement constitué d'une spire diamétrale représentant un bobinage équivalent.
- l'excitation est assurée par des aimants déposés à la périphérie d'un cylindre ferromagnétique.

II-2-1-Hypothèses

On supposera que :

- L'entrefer est constant (on ne prendra pas en compte la variation de réluctance due à la présence des encoches du stator).
- Les conducteurs statoriques sont parallèles à l'axe de la machine.
- Les pôles inducteurs ne sont pas inclinés.
- La perméabilité du fer est infinie.
- La caractéristique du circuit magnétique est linéaire.
- L'on peut négliger tout les courants induits (il n'existe pas de circuits amortisseurs).

II-3- Expression des flux induits par l'inducteur sur les enroulements statoriques

La répartition spatiale de la composante normale du champ d'induction dans l'entrefer d'une machine synchrone à aimants peut être représentée par les graphes suivants :

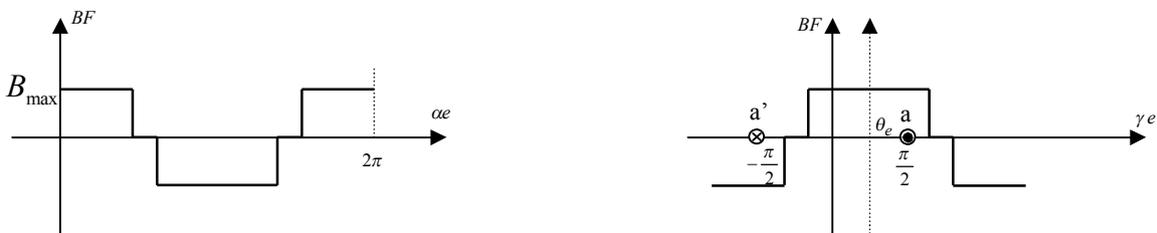


Figure II-2- Représentation du champ d'induction magnétique dans l'entrefer

On en déduit que le flux induit dans une spire diamétrale aa' au cours de la rotation est donné par le graphe suivant la **figure (II-3)** :

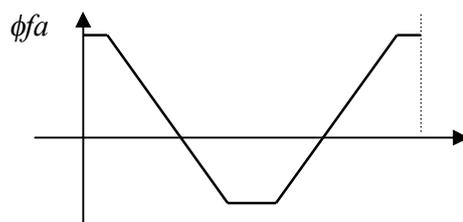


Figure II-3 - flux induit dans une spire diamétrale aa'

Dans le cas général :

Les flux induits par l'inducteur dans les trois phases statoriques a, b, c s'écriront :

$$\Phi_{fa} = \Phi_{\max} \cdot f(\theta_e) \quad (\text{II-1})$$

$$\Phi_{fb} = \Phi_{\max} \cdot f\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II-2})$$

$$\Phi_{fc} = \Phi_{\max} \cdot f\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II-3})$$

Dans le cas particulier d'une répartition spatiale sinusoïdale du champ B_f .

$$\Phi_{fa} = \Phi_{\max} \cdot \cos(\theta_e) \quad (\text{II-4})$$

$$\Phi_{fb} = \Phi_{\max} \cdot \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II-5})$$

$$\Phi_{fc} = \Phi_{\max} \cdot \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II-6})$$

II-4-Expression des flux induits sur les enroulements statoriques

Pour la phase aa' le flux totalisé Φ_a représente la somme de quatre termes

Flux propre de a sur a : $\Phi_{aa} = L_S \cdot i_a$.

Flux mutuel de b sur a : $\Phi_{ba} = M_S \cdot i_b$.

Flux mutuel de c sur a : $\Phi_{ca} = M_S \cdot i_c$.

Flux mutuel de l'inducteur sur a : Φ_{fa} .

Avec :

L_S Inductance propre d'un enroulement statorique.

M_S Inductance mutuelle d'un enroulement statorique

i_a , i_b , i_c Sont les courants qui circulent dans les phases de la machine

$$\Phi_a = \Phi_{aa} + \Phi_{ba} + \Phi_{ca} + \Phi_{fa} = L_S \cdot i_a + M_S (i_b + i_c) + \Phi_{fa} \quad (\text{II-7})$$

En supposant le neutre non relié. ($i_b + i_c = -i_a$), cette dernière relation s'écrit :

$$\Phi_a = (L_S - M_S) \cdot i_a + \Phi_{fa} = L_C \cdot i_a + \Phi_{fa} \quad (\text{II-8})$$

L_C est l'inductance cyclique d'un enroulement statorique, $L_C = L_S - M_S$.

Remarque : Le terme $L_C \cdot i_a$ représente le flux induit dans la phase a par le champ tournant créé par les trois courants i_a, i_b, i_c .

II-5-Expression des tensions des enroulements statoriques

En convention récepteur la tension sur la phase a s'écrit :

$$v_a = R.i_a + \frac{d\Phi_a}{dt} = R.i_a + L_S \cdot \frac{di_a}{dt} + M_S \cdot \frac{di_b}{dt} + M_S \cdot \frac{di_c}{dt} + \frac{d\Phi_{fa}}{dt} \quad (\text{II-9})$$

En supposant que le neutre soit non relié, l'équation précédente devient :

$$v_a = R.i_a + L_C \cdot \frac{di_a}{dt} + \frac{d\Phi_{fa}}{dt} \quad (\text{II-10})$$

Avec

$$e_a = v_a (i_a = 0) = \frac{d\Phi_{fa}}{dt} = \frac{d\Phi_{fa}}{d\theta_e} \cdot \frac{d\theta_e}{dt} = p \cdot \Omega \cdot \frac{d\Phi_{fa}}{d\theta_e} \quad (\text{II-11})$$

La tension sur la phase a s'écrit :

$$v_a = R.i_a + L_C \cdot \frac{di_a}{dt} + p \cdot \Omega \cdot \frac{d\Phi_{fa}}{d\theta_e} = R.i_a + L_C \cdot \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (\text{II-12})$$

La tension de la phase b s'écrit :

$$v_b = R.i_b + L_S \cdot \frac{di_b}{dt} + M_S \cdot \frac{di_a}{dt} + M_S \cdot \frac{di_c}{dt} + \frac{d\Phi_{fb}}{dt} \quad (\text{II-13})$$

En supposant le neutre non relié, $i_c + i_a = -i_b$

$$v_b = R.i_b + L_S \cdot \frac{di_b}{dt} - M_S \cdot \frac{di_b}{dt} + \frac{d\Phi_{fb}}{dt}$$

$$v_b = R.i_b + (L_S - M_S) \cdot \frac{di_b}{dt} + \frac{d\Phi_{fb}}{dt}$$

$$v_b = R.i_b + L_C \cdot \frac{di_b}{dt} + \frac{d\Phi_{fb}}{dt}$$

$$L_C = L_S - M_S$$

Avec

$$e_b = v_b (i_b = 0) = \frac{d\Phi_{fb}}{dt} = \frac{d\Phi_{fb}}{d\theta_e} \cdot \frac{d\theta_e}{dt} = p \cdot \Omega \cdot \frac{d\Phi_{fb}}{d\theta_e} \quad (\text{II-14})$$

La tension de la phase b s'écrit :

$$v_b = R.i_b + L_C \cdot \frac{di_b}{dt} + p \cdot \Omega \cdot \frac{d\Phi_{fb}}{d\theta_e} = R.i_b + L_C \cdot \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (\text{II-15})$$

La tension sur la phase c s'écrit :

$$v_c = R.i_c + \frac{d\Phi_{fc}}{dt} = R.i_c + L_S \frac{di_c}{dt} + M_S \frac{di_b}{dt} + M_S \frac{di_a}{dt} + \frac{d\Phi_{fc}}{dt} \quad (\text{II-16})$$

Le neutre non relié :

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

C'est à dire $i_a + i_b = -i_c$

L'équation (II-16) devient :

$$v_c = R.i_c + L_S \frac{di_c}{dt} - M_S \frac{di_c}{dt} + \frac{d\Phi_{fc}}{dt} \quad (\text{II-17})$$

$$v_c = R.i_c + (L_S - M_S) \frac{di_c}{dt} + \frac{d\Phi_{fc}}{dt} \quad (\text{II-18})$$

$$v_c = R.i_c + L_C \frac{di_c}{dt} + \frac{d\Phi_{fc}}{dt} \quad (\text{II-19})$$

$$e_c = v_c (i_c = 0) = \frac{d\Phi_{fc}}{dt} = \frac{d\Phi_{fc}}{d\theta_e} \frac{d\theta_e}{dt} = p.\Omega \frac{d\Phi_{fc}}{dt} \quad (\text{II-20})$$

$$v_c = R.i_c + L_C \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (\text{II-21})$$

II-6-Expression du couple

La puissance électromagnétique instantanée s'écrit :

$$p_e = e_a.i_a + e_b.i_b + e_c.i_c \quad (\text{II-22})$$

D'où le couple électromagnétique

$$c_e = \frac{p_e}{\Omega} = \frac{e_a.i_a + e_b.i_b + e_c.i_c}{\Omega} \quad (\text{II-23})$$

Ω : Vitesse angulaire de rotation du rotor

$$\Omega = \frac{d\theta_m}{dt} = \frac{1}{p} \cdot \frac{d\theta_e}{dt} \quad (\text{II-24})$$

p : Nombre de paires de pôles

θ_e : Angle électrique

En remplaçant les fem par leurs expressions en fonction des flux, on obtient :

$$c_e = p \left[i_a \cdot \frac{d\Phi_{fa}}{d\theta_e} + i_b \cdot \frac{d\Phi_{fb}}{d\theta_e} + i_c \cdot \frac{d\Phi_{fc}}{d\theta_e} \right] \quad (\text{II-25})$$

II-7-Equation mécanique

L'équation fondamentale de la dynamique s'écrit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = c_e - c_r = J \frac{d\theta_m^2}{dt^2} = \frac{J}{P} \frac{d^2\theta_e}{dt^2} \tag{II-26}$$

Avec J : l'inertie total du système
 c_r : Couple résistant
 c_e : Couple électromagnétique

II-8-Modèle de la machine

Il est établi à partir des équations suivantes

$$v_a = R i_a + L_C \cdot \frac{di_a}{dt} + P \cdot \Omega \cdot \frac{d\Phi_{fa}}{d\theta_e} = R i_a + L_C \cdot \frac{di_a}{dt} + e_a \tag{II-27}$$

$$v_b = R i_b + L_C \cdot \frac{di_b}{dt} + P \cdot \Omega \cdot \frac{d\Phi_{fb}}{d\theta_e} = R i_b + L_C \cdot \frac{di_b}{dt} + e_b \tag{II-28}$$

$$v_c = R i_c + L_C \cdot \frac{di_c}{dt} + P \cdot \Omega \cdot \frac{d\Phi_{fc}}{d\theta_e} = R i_c + L_C \cdot \frac{di_c}{dt} + e_c \tag{II-29}$$

$$c_e = p \left[i_a \cdot \frac{d\Phi_{fa}}{d\theta_e} + i_b \cdot \frac{d\Phi_{fb}}{d\theta_e} + i_c \cdot \frac{d\Phi_{fc}}{d\theta_e} \right]$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = c_e - c_r = J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{J}{P} \frac{d^2\theta_e}{dt^2}$$

Le modèle de la machine utilisée est représenté sur la figure ci-dessous :

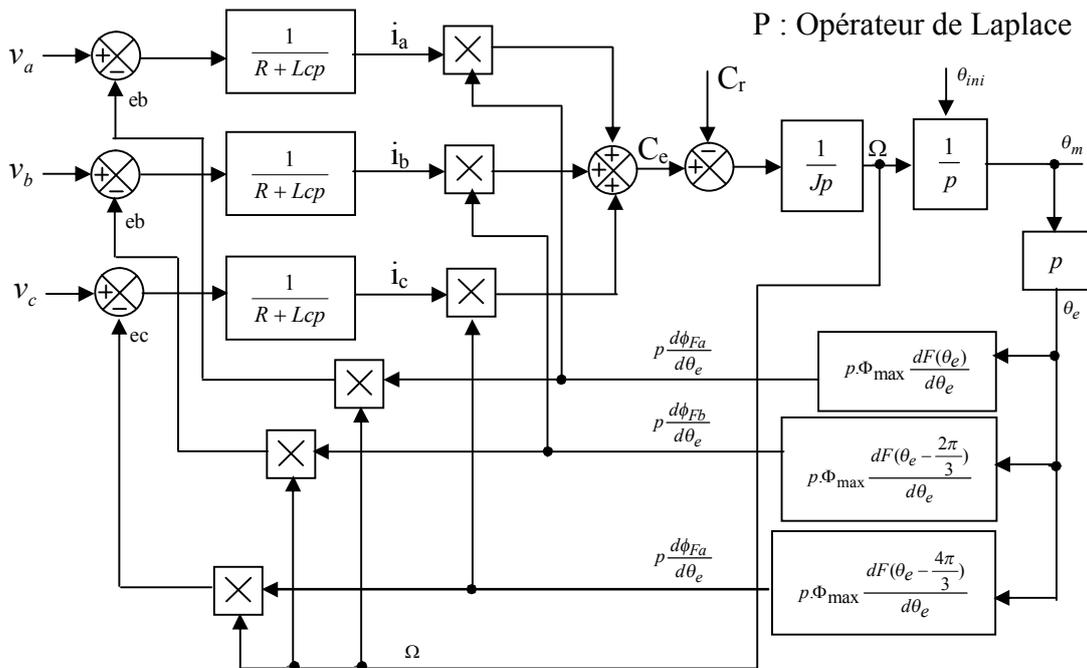


Figure II- 4- schéma du modèle de la machine synchrone

II-9- Stratégie de commande

Nous allons chercher quelles sont les conditions pour que la machine puisse développer un couple de valeur moyenne non nulle et si possible exempt d'ondulation.

L'expression du couple instantané $c_e = p \left[i_a \frac{d\Phi_{fa}}{d\theta_e} + i_b \frac{d\Phi_{fb}}{d\theta_e} + i_c \frac{d\Phi_{fc}}{d\theta_e} \right]$ montre qu'une

solution évidente consiste à injecter dans les trois enroulements des courants i_a, i_b, i_c dont la forme dépendra de l'expression des flux inducteurs induits dans les trois phases.

Nous allons envisager deux types de machine.

Machine à fem sinusoïdales

Machine à fem trapézoïdales

II-9-1-Machine à fem sinusoïdale

Expression des flux induits par l'inducteur sur les enroulements statoriques.

Dans le cas d'une répartition spatiale sinusoïdale de fmm, la composante normale du champ dans l'entrefer en un point X s'écrit :

$$B_f = B_{\max}(I_f) \cdot \cos(\theta_e - \gamma_e) \quad (\text{II-30})$$

Les flux induits par l'inducteur sur les trois enroulements sont calculés en sommant les flux sur les différentes spires. On obtient :

$$\Phi_{fa} = \Phi_{\max} \cdot \cos(\theta_e) \quad (\text{II-31})$$

$$\Phi_{fb} = \Phi_{\max} \cdot \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II-32})$$

$$\Phi_{fc} = \Phi_{\max} \cdot \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II-33})$$

On déduit l'expression des fem induites :

$$e_a = E_{\max} \cdot \cos\left(\theta_e + \frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{II-34})$$

$$e_b = E_{\max} \cdot \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{II-35})$$

$$e_c = E_{\max} \cdot \cos\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3} + \frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{II-36})$$

Avec $E_{\max} = p \cdot \Omega \cdot \Phi_{\max}$

A vitesse constante : $\theta_e = p.\Omega.t + \text{constante} = \omega.t$ (en choisissant une origine des temps telle que $\theta_e = 0$ à $t = 0$), les fem sont des fonctions sinusoïdales du temps.

II-9-1-1-Détermination de la forme des courants

On peut vérifier à partir de l'expression suivante

$$C_e = p.\Phi_{\max} \cdot \left[i_a \cdot \cos\left(\theta_e + \frac{\pi}{2}\right) + i_b \cdot \cos\left(\theta_e + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \cos\left(\theta_e + \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (\text{II-37})$$

Qu'en injectant des courants de la forme :

$$i_a = I_{\max} \cdot \cos\left(\theta_e + \frac{\pi}{2} - \Psi\right) \quad (\text{II-38})$$

$$i_b = I_{\max} \cdot \cos\left(\theta_e + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3} - \Psi\right) \quad (\text{II-39})$$

$$i_c = I_{\max} \cdot \cos\left(\theta_e + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3} - \Psi\right) \quad (\text{II-40})$$

On obtient un couple instantané exempt d'ondulation donné par l'expression :

$$c_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Phi_{\max} \cdot I_{\max} \cdot \cos(\Psi) \quad (\text{II-41})$$

Les grandeurs de réglage du couple sont :

- Le flux inducteur (machines à inducteur bobiné).
- L'amplitude des courants injectés.
- L'angle Ψ représente le déphasage entre la fem et le courant en régime permanent.

L'élaboration des courants instantanés demande la connaissance de la position angulaire stator- rotor.

Dans le cas d'une machine à aimants permanents un schéma de principe de la commande en couple est donné par la figure suivante.

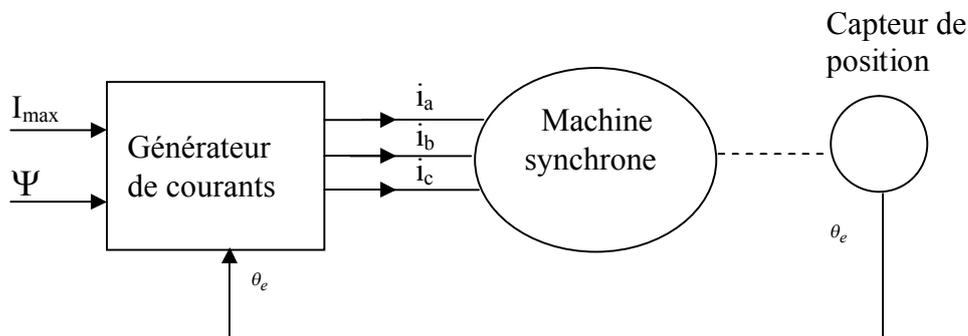


Figure II -5-Schéma de principe de la commande en couple

II-9-2 Machines à f.e.m trapézoïdales

Dans le cas d'une machine à f.e.m trapézoïdale, il est nécessaire d'injecter des courants en créneaux.

II-9-2-1- Principe de construction

Considérons une phase constituée de deux bobines diamétrales décalées dans l'espace électrique d'un angle θ_b et un inducteur à aimant supposé d'arc polaire θ_a

On supposera que les aimants possèdent une aimantation radiale et créent dans l'entrefer une composante normale de champ notée B_f en forme de créneaux de largeur θ_a

Les courbes idéalisées sont données sur la figure suivante :

La machine possède deux autres phases permettant de créer un système triphasé non représenté sur la figure suivante.

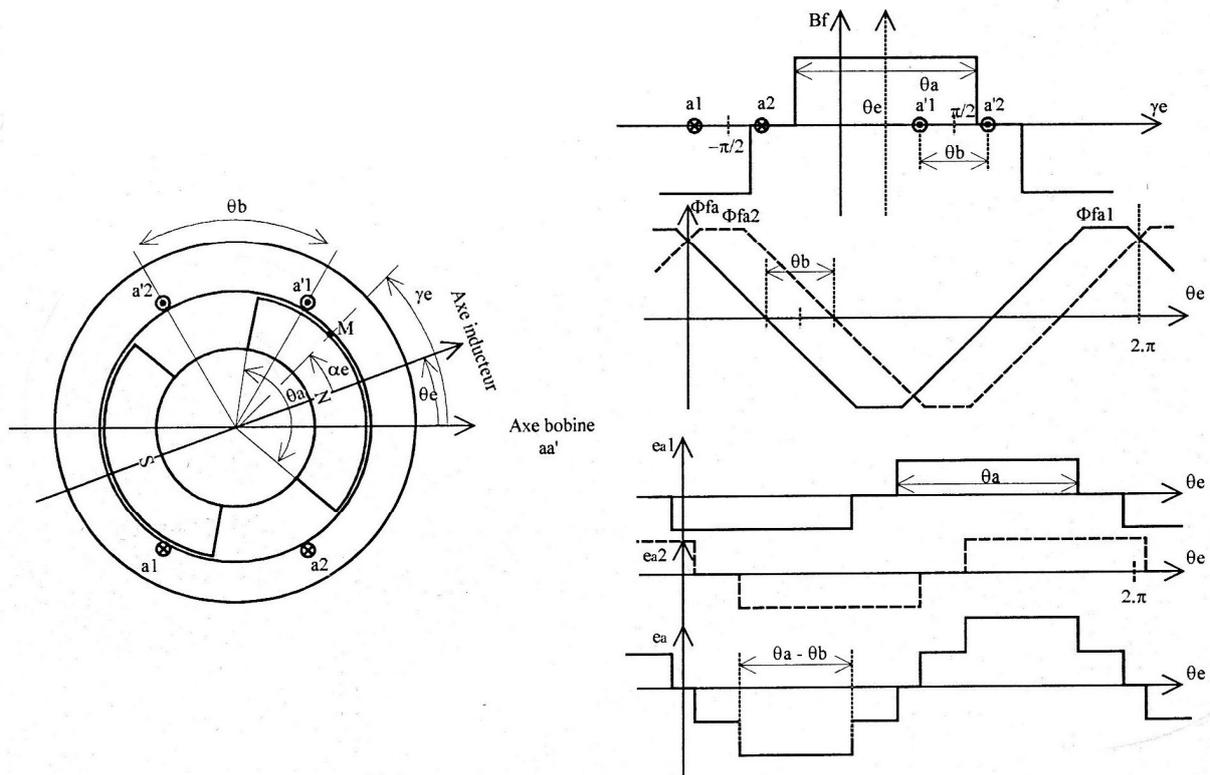


Figure II-6- courbes du flux et de l'induction magnétique dans une bobine

A vitesse constante, la f.e.m induite dans les deux bobines en série présente un palier de largeur angulaire $\theta_a - \theta_b$.

La multiplication du nombre de bobines dans l'intervalle θ_b permet de se rapprocher de la forme trapézoïdale.

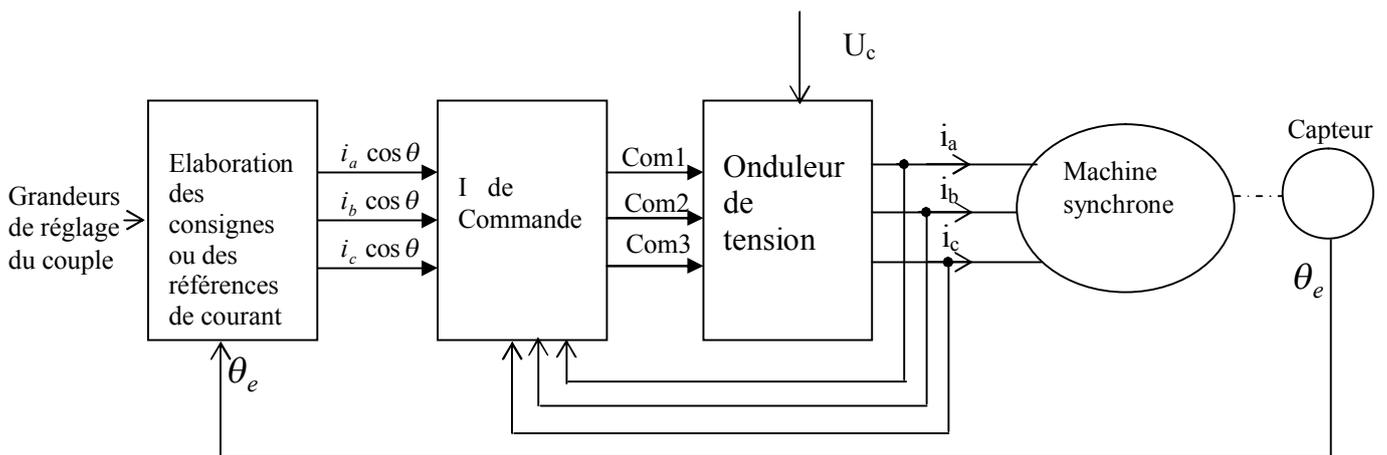
En pratique les machines sont construites pour que les f.e.m présentent des paliers de largeur angulaire $\theta_a - \theta_b = \frac{2\pi}{3}$.

II-10-Générateur de courant

Pour des machines de forte puissance, on utilise en général un commutateur constitué de thyristors fonctionnant en commutation naturelle.

II-10-1-Générateur de courant à partir d'un onduleur de tension

Il est possible d'injecter dans les trois phases de la machine des courants dont la composante basse fréquence suit une référence fonction sinusoïdale de la position angulaire.



FigureII-7- Schéma d'élaboration des références ou des courants de consignes

Ce type de contrôle permet d'imposer la fréquence des commutations mais demande une modélisation de l'ensemble machine convertisseur afin de déterminer le correcteur permettant de répondre au cahier de charge [5].

II-11- Modèle de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique, assurant la conversion de l'énergie entre deux dipôles ; le générateur fonctionnant en continu et un récepteur fonctionnant en alternatif.

Il est constitué de six transistor ($T_1, \dots, T_3, T_1', \dots, T_3'$) shuntés en antiparallèle par des diodes de récupération ($D_1, \dots, D_3, D_1', \dots, D_3'$) il est le constituant principale de la plus part des variateurs de vitesse des machines à courant alternatif.[6].

Dans notre cas, on utilise un onduleur triphasé représenté par le schéma de la figure suivante

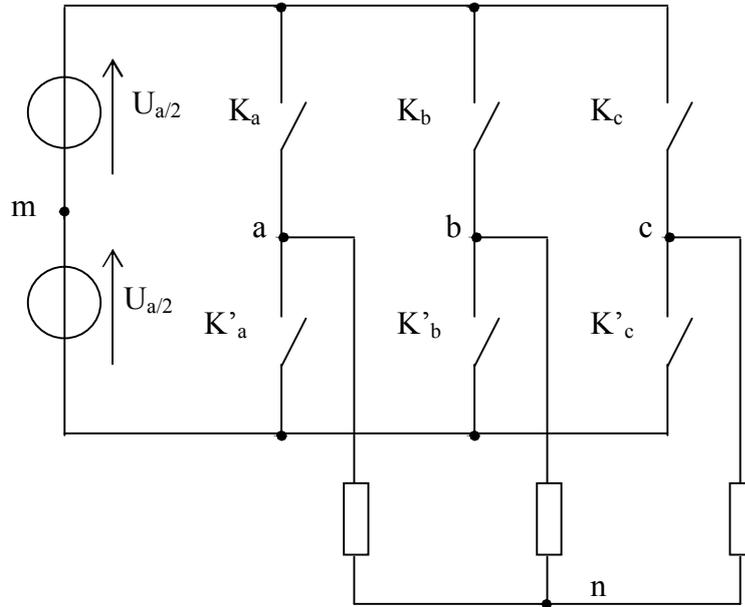


Figure II-8- schéma d'un onduleur triphasé

Il est à noter que sur un bras d'onduleur les fonctions de connexion vérifient la relation arithmétique $f_{cj} + f_{c'j} = 1$ de façon à ne pas mettre en court-circuit la source de tension U_0 et ne pas mettre en circuit ouvert une source de courant.

On en déduit l'expression des tensions par rapport au point milieu fictif m.

$$v_{an} = (f_{ca} - f_{ca'}) \cdot \frac{U_0}{2} = (2f_{ca} - 1) \cdot \frac{U_0}{2} \quad (\text{II-42})$$

$$v_{bn} = (f_{cb} - f_{cb'}) \cdot \frac{U_0}{2} = (2f_{cb} - 1) \cdot \frac{U_0}{2} \quad (\text{II-43})$$

$$v_{cn} = (f_{cc} - f_{cc'}) \cdot \frac{U_0}{2} = (2f_{cc} - 1) \cdot \frac{U_0}{2} \quad (\text{II-44})$$

La charge étant supposée équilibrée deux cas sont à considérer :

En l'absence d'une composante homopolaire de tension, la somme des tensions simples est nulle, ce qui permet d'écrire :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0 \quad \Rightarrow \quad v_{mn} = -\frac{1}{3}(v_{an} + v_{bn} + v_{cn}) = \frac{U_0}{2} - (f_{ca} + f_{cb} + f_{cc}) \frac{U_0}{2}$$

Donc

$$v_{an} = (+2f_{ca} - f_{cb} - f_{cc}) \cdot \frac{U_0}{3} \quad (\text{II-45})$$

$$v_{bn} = (-f_{ca} + 2f_{cb} - f_{cc}) \cdot \frac{U_0}{3} \quad (\text{II-46})$$

$$v_{cn} = (-f_{ca} - f_{cb} + 2f_{cc}) \cdot \frac{U_0}{3} \quad (\text{II-47})$$

En présence d'une composante homopolaire E_h de tension, due à la présence d'harmonique de rang multiple de trois dans les fem, la somme des tensions simples s'écrit (cas des machines à fem trapézoïdales).

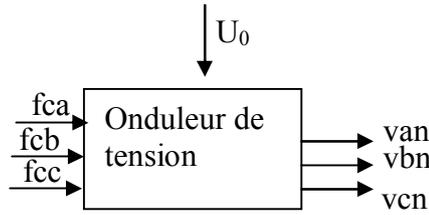


Figure II-9-schéma synoptique d'un onduleur de tension.

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 3 \cdot E_h \quad \Rightarrow \quad v_{mn} = E_h - \frac{1}{3}(v_{an} + v_{bn} + v_{cn})$$

donc

$$v_{an} = (+2f_{ca} - f_{cb} - f_{cc}) \cdot \frac{U_0}{3} + E_h \quad (\text{II-48})$$

$$v_{bn} = (-f_{ca} + 2f_{cb} - f_{cc}) \cdot \frac{U_0}{3} + E_h \quad (\text{II-49})$$

$$v_{cn} = (-f_{ca} - f_{cb} + 2f_{cc}) \cdot \frac{U_0}{3} + E_h \quad (\text{II-50})$$

En simulation, il sera plus simple d'ajouter la composante homopolaire sur le modèle de la machine plutôt que sur l'onduleur

II-12- Régulateurs

La compensation est l'addition d'un bloc appelé compensateur ou correcteur dans la fonction de transfert du système afin de satisfaire les spécifications désirées ou imposées dans le cahier de charge.

On distingue :

a)-Correcteur PI

Correcteur PI (compensateur intégrateur) l'ajout de ce compensateur améliore l'erreur stationnaire d'un degré, car il augmente le type du système par 1, donnant aussi des réponses caractérisées par un faible dépassement mais avec un temps de réponse plus long.

Donc ce correcteur influe directement sur les performances statiques du système c'est-à-dire sur l'erreur stationnaire.

b) Correcteur PD

Correcteur PD (compensateur différentiateur) l'ajout de compensateur améliore le temps de réponse, diminue l'amplitude du dépassement maximal.

Il agit directement donc sur les performances dynamiques, n'a aucune influence sur les performances statiques lorsque l'erreur stationnaire est constante [7].

c) Correcteur par hystérésis

C est un correcteur de couple a pour fonction de maintenir le couple dans les limites

$$|(ce)_{ref} - ce| \leq \Delta ce$$

Avec

$(ce)_{ref}$: La consigne de couple

Δce La bande d'hystérésis du correcteur

Cependant une différence avec le contrôle du flux est tel que le couple peut être positif ou négatif selon la rotation de la machine [8].

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté et modélisé la machine synchrone, en élaborant les équations électriques et mécaniques régissant son fonctionnement.

Nous avons abordé les différentes machines à savoir la machine à f.e.m sinusoïdale et la machine à f.e.m trapézoïdale.

Le chapitre suivant fera l'objet de l'étude et la simulation d'un moteur synchrone.

Chapitre III

Simulation de la machine synchrone

III-1-Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons la simulation d'une machine synchrone à aimant permanent à pôles lisses à f e m sinusoïdale alimentée dans un premier temps par des courants sinusoïdaux , puis par des courants créneaux, dans les deux cas nous déduirons principalement le couple électromagnétique et la vitesse. La machine est supposée être non saturée et à rotor lisse, l'aimant est de perméabilité très proche de l'air. Nous procéderons ensuite à une étude comparative pour les deux types d'alimentation pour déterminer celle qui répondra le mieux au bon fonctionnement de la machine.

III-2-Schéma bloc de la machine synchrone

La figure ci-dessous présente le schéma bloc de la machine synchrone à pôles lisse à force électromotrice sinusoïdale triphasée :

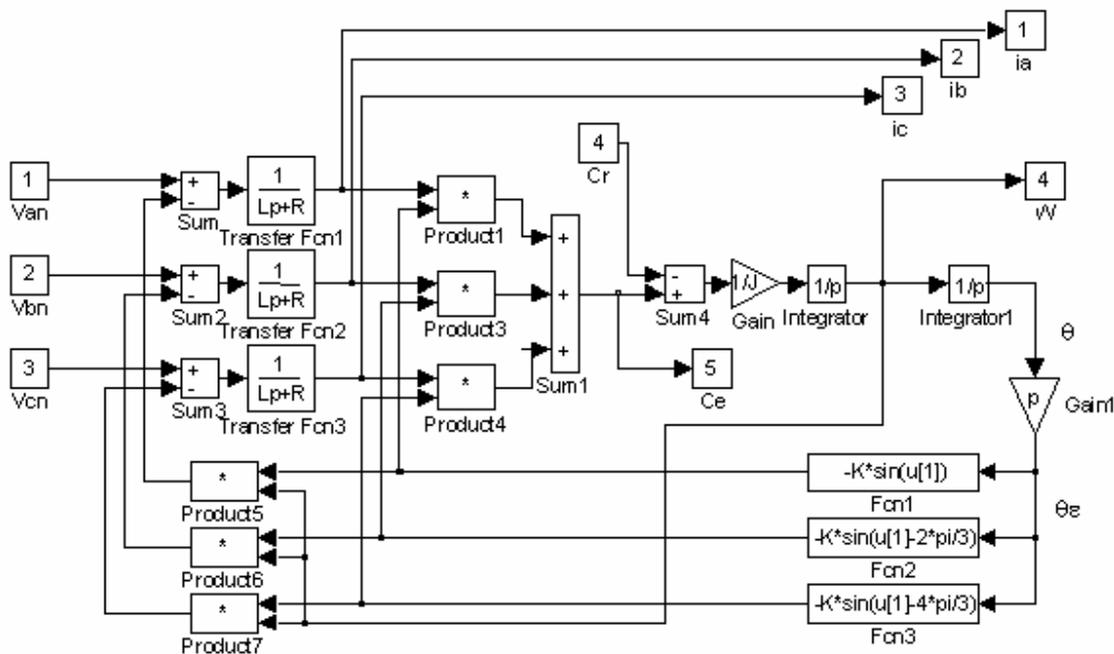


Figure III-1-schéma d'une machine synchrone à pôles lisses à f e m sinusoïdale

Paramètres

R : Résistance d'un enroulement.

L : Inductance cyclique.

K : constante de $E_{MAX} / \Omega = p \cdot \Phi_{MAX}$

P : Nombre de paire de pôles

J : Moment d'inertie

III-3- Modèle de l'onduleur

La figure, ci-dessous représente le schéma bloc de simulation de l'onduleur utilisé :

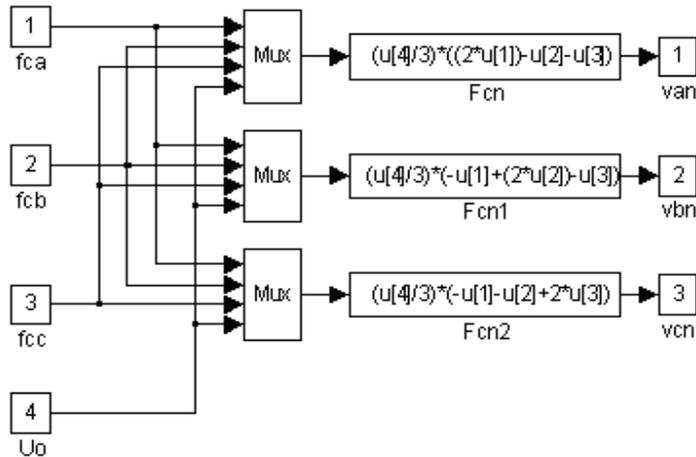


Figure III -2- schéma bloc de simulation de l'onduleur utilisé

III -4-Modèle du correcteur utilisé

III-4-1 Correcteur par hystérésis

C est un correcteur de couple a pour fonction de maintenir le couple dans les limites

$$|(ce)_{ref} - ce| \leq \Delta ce$$

Avec

$(ce)_{ref}$: La consigne de couple

Δce la bande d'hystérésis du correcteur

Cependant une différence avec le contrôle du flux est tel que le couple peut être positif ou négatif selon la rotation de la machine.

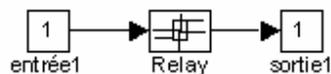


Figure III-3- schéma d'un correcteur par hystérésis

III-5- Générateur de consigne

III-5 -1- générateur de consignes triphasés sinusoïdales

La figure ci-dessous montre le schéma bloc de simulation du générateur de consignes triphasée sinusoïdale

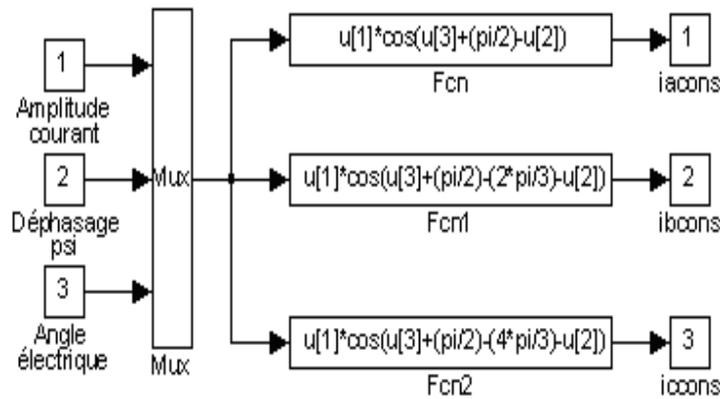


Figure III-4- schéma d'un générateur de consigne triphasé sinusoïdale

III-5-2 Générateur de consigne triphasé en créneaux

La figure ci-dessous montre le schéma bloc de simulation du générateur de consigne triphasé en créneaux

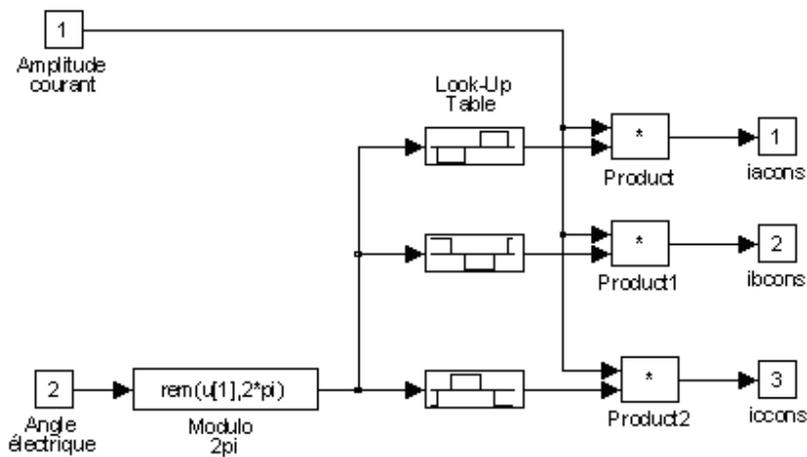


Figure III-5- schéma d'un générateur de consigne triphasé en créneaux

III-6-Schéma bloc de simulation de l'ensemble convertisseur -machine synchrone

III-6-1- Alimentation en courants sinusoïdaux

La figure ci-dessous montre le schéma bloc de simulation de l'ensemble convertisseur-machine synchrone alimentée en courants sinusoïdaux :

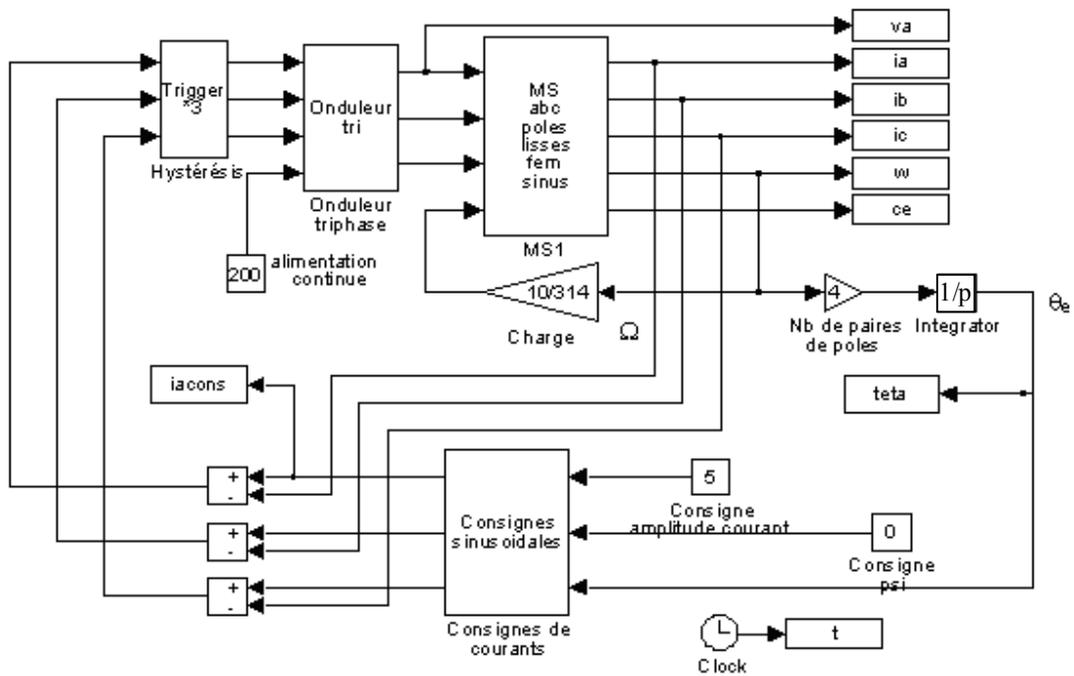
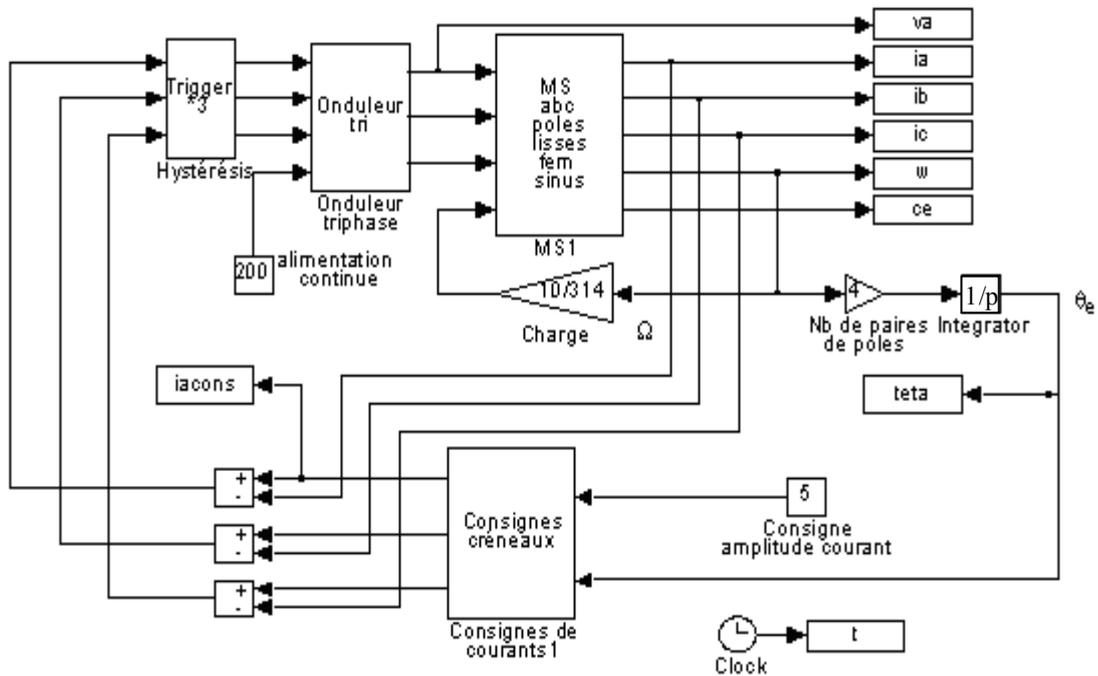


Figure III-6- schéma de simulation de l'ensemble convertisseur-machine synchrone alimentée en courants sinusoïdaux

III-6-2-Alimentation en courants créneaux

La figure ci-dessous présente le schéma bloc de simulation de l'ensemble convertisseur-machine synchrone alimentée en courants créneaux :



FigureIII-7-schéma de simulation de l'ensemble convertisseur-machine synchrone alimentée en courants créneaux

Résultats et discussions

Après simulation en utilisant les paramètres de la machine synchrone :

$p = 4$; $R = 4\Omega$; $L = 2,5 \cdot 10^{-3} H$; $K = 0,2v / rd / s$; $J = 0,09 \cdot 10^{-3} kg m^2$, nous avons obtenus les résultats suivants :

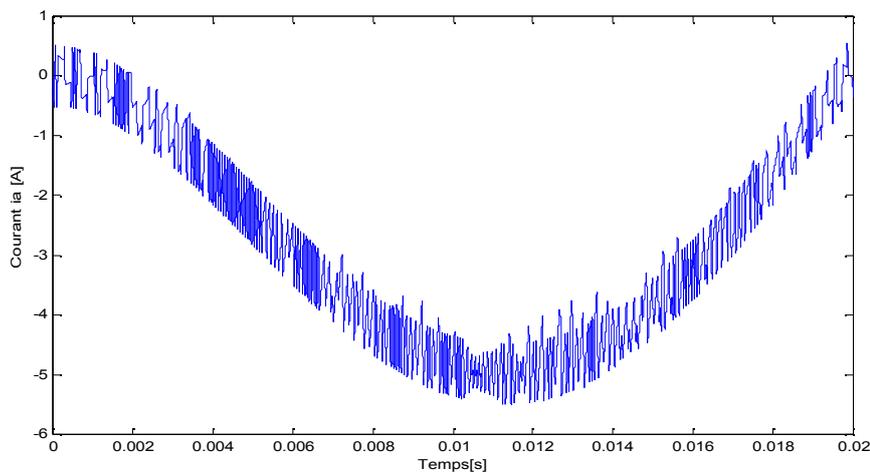


Fig.III-8- courant ia en fonction du temps

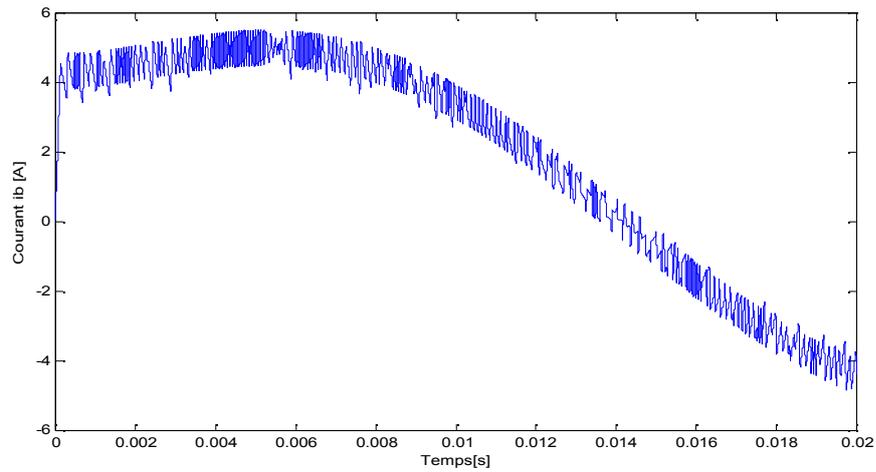


Fig.III-9- courant i_b en fonction du temps

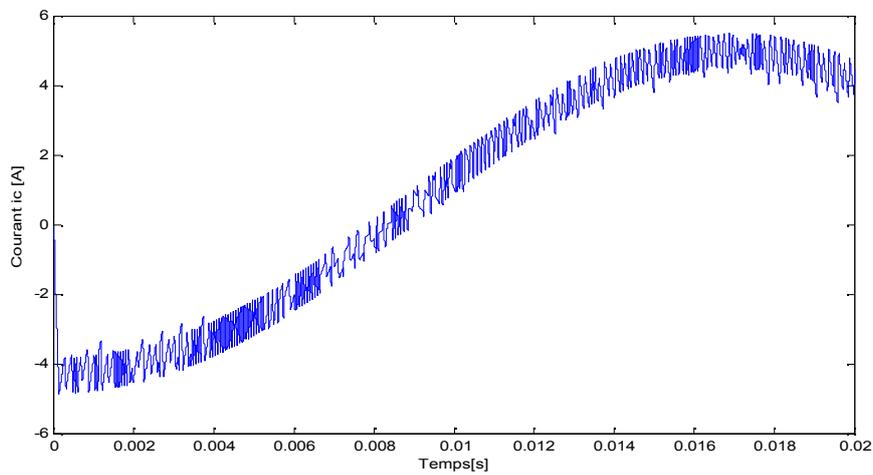


Fig.III-10 -courant i_c en fonction du temps

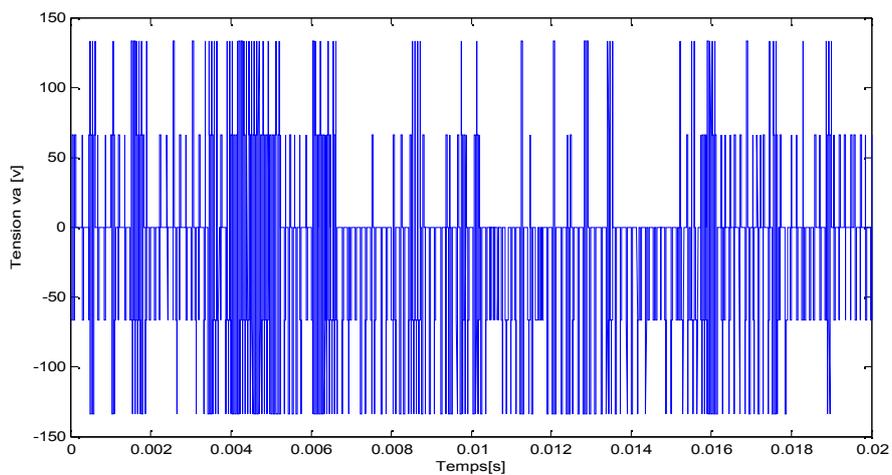
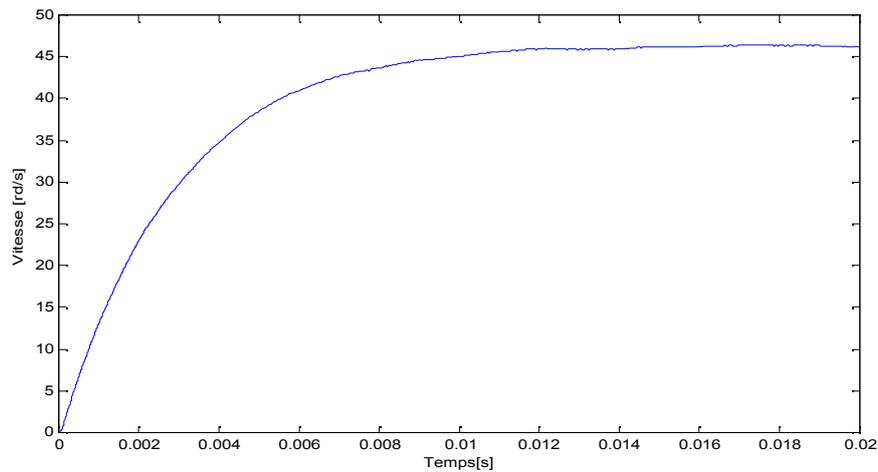
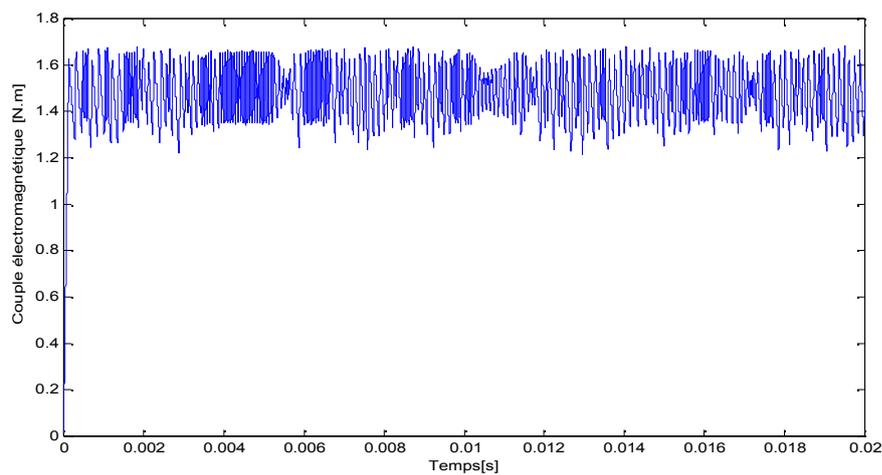


Fig.III-11- tension v_a en fonction du temps

**Fig.III-12- vitesse w en fonction du temps****Fig.III-13-couple électromagnétique en fonction du temps****Interprétation des résultats dans le cas d'une alimentation en sinusoïdale**

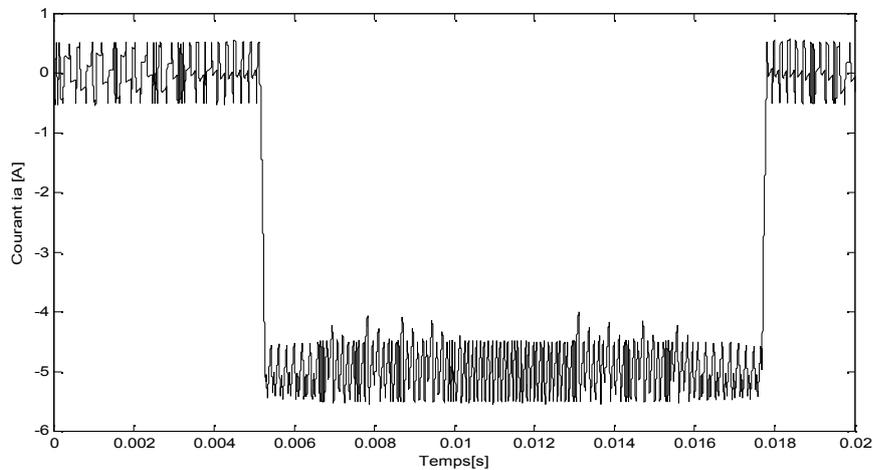
Les résultats de simulation obtenus montrent que les courants des phases a, b, c décalés de $\frac{2\pi}{3}$

l'une par rapport à l'autre de la machine synchrone à fem sinusoïdale alimentée dans un premier temps par des courants sinusoïdaux, puis par des courants créneaux.

-Machine synchrone à fem sinusoïdale alimentée par des courants sinusoïdaux

A l'instant initial $t=0$ s la courbe du courant i_a démarre de la valeur nulle, au bout de 0,01s atteint la valeur qui est de -5A, puis reprend la valeur initial à l'instant 0,02s, la valeur du courant i_b est proche de zéro, après un temps très court elle se stabilise à une valeur proche de 5A qui est la valeur de consigne, puis elle chute vers -4A tant dis que la valeur du courant de la phase c est très proches de zéro à l'instant $t=0$ s, après un temps très court elle se stabilise à une valeur proche de -4A puis elle augmente pour atteindre la valeur de 5A qui est la valeur de consigne. A l'instant initial la tension v_a est proche de 135V, à $t = 0,05$ s décroît vers la valeur proche de -135V pendant un temps considérable

A $t=0$ s la vitesse $\omega(t)$ est nulle puis elle augmente linéairement en fonction du temps pour atteindre la valeur limite qui est de 46 rd/S au bout de 0,012s à partir de ce point la courbe $\omega(t)$ reste constante au cours du temps c'est la zone de saturation. La figure (III-13) représente le couple électromagnétique qui est constant (au découpage près) ne présente pas d'ondulation, il est parfaitement lissé.

-Machine synchrone à fem sinusoïdale alimentée en courants créneaux**Fig .III-14- courant ia en fonction du temps**

-

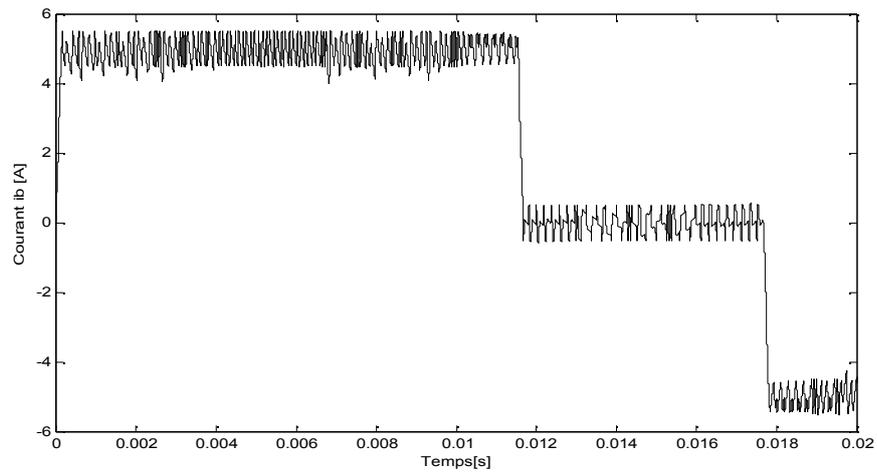


Fig.III-15- courant i_b en fonction du temps

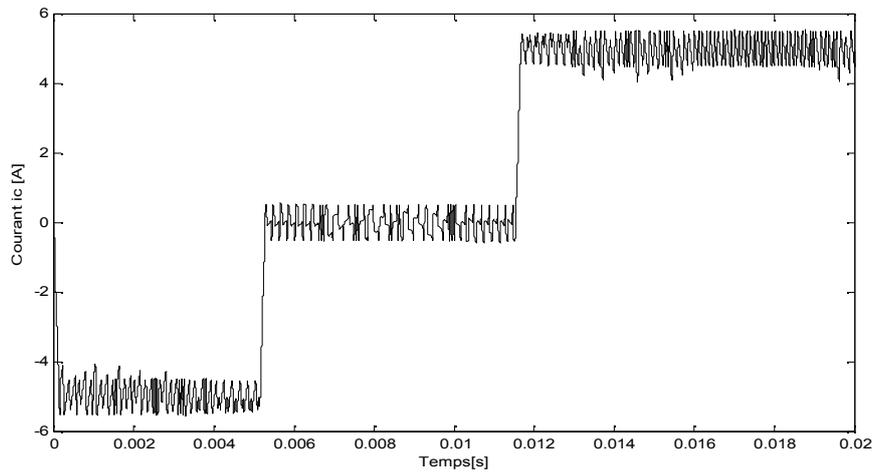


Fig.III- 16-courant i_c en fonction du temps

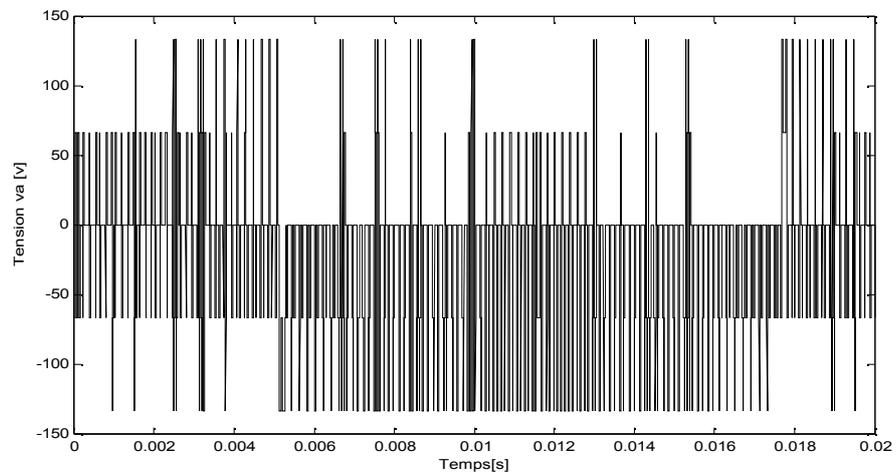


Fig.III-17-tension v_a en fonction du temps

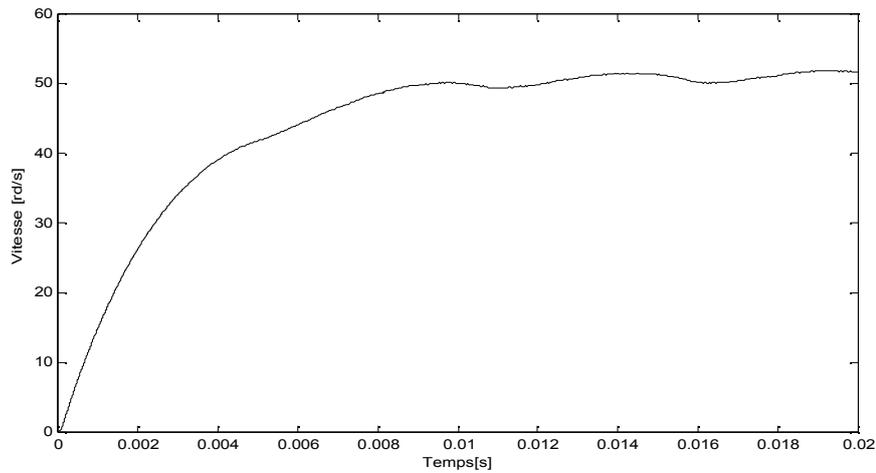


Fig.III-18- vitesse w en fonction du temps

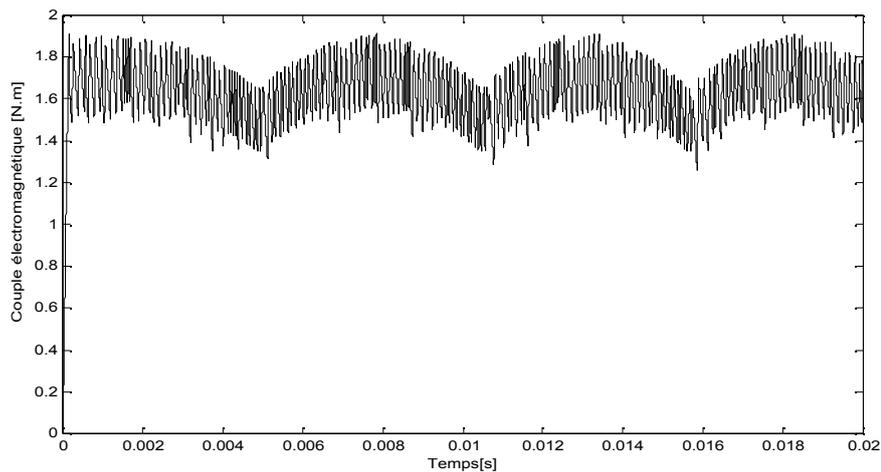


Fig.III-19- couple électromagnétique en fonction du temps

Interprétation des résultats obtenus dans le cas d'une alimentation en créneaux

A l'instant initial la valeur du courant de la phase a est nulle, chute brusquement et prend la valeur de $-5A$ pendant un temps considérable, à $t = 0,018s$ reprend sa valeur nulle.

Le courant i_b est proche de zéro pendant un temps très court prend la valeur qui est proche de $5A$ qui est la valeur de consigne, décroît et s'annule pendant un intervalle de temps, à l'instant $0,018s$ prend la valeur proche de $-5A$.

Le courant de la phase c est proche de zéro, pendant un temps très court prend la valeur proche de -5A puis s'annule brusquement pendant un intervalle de temps, puis prend la valeur de 5A qui et la valeur de consigne pendant un temps considérable.

La variation de la tension va présente des ondulations sa valeur initial est proche de 135V puis elle décroît vers la valeur qui est de -135V pendant un temps considérable.

A l'instant initial la vitesse $\omega(t)$ est nulle puis elle augmente linéairement avec le temps à $t=0,04s$ la courbe croit en présentant des ondulations pour atteindre la valeur proche de 51rd/s tant dis que le couple électromagnétique présente des ondulations dont l'amplitude est fonction du déphasage du fondamental du courant par rapport à la fem.

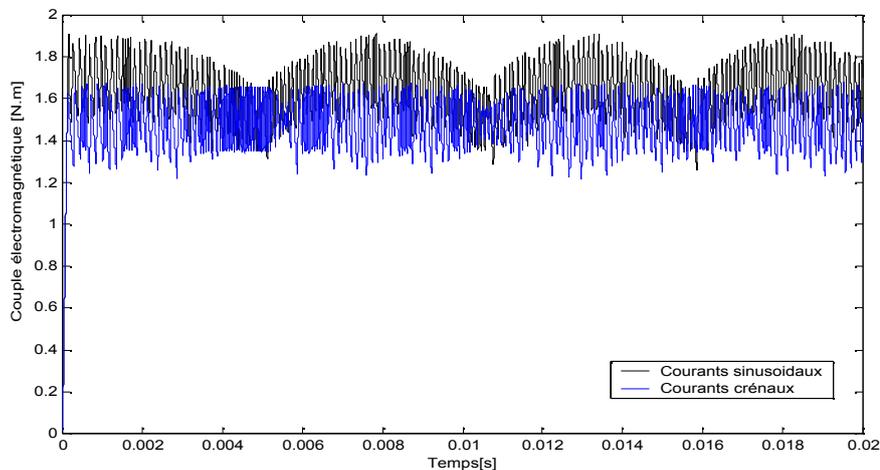


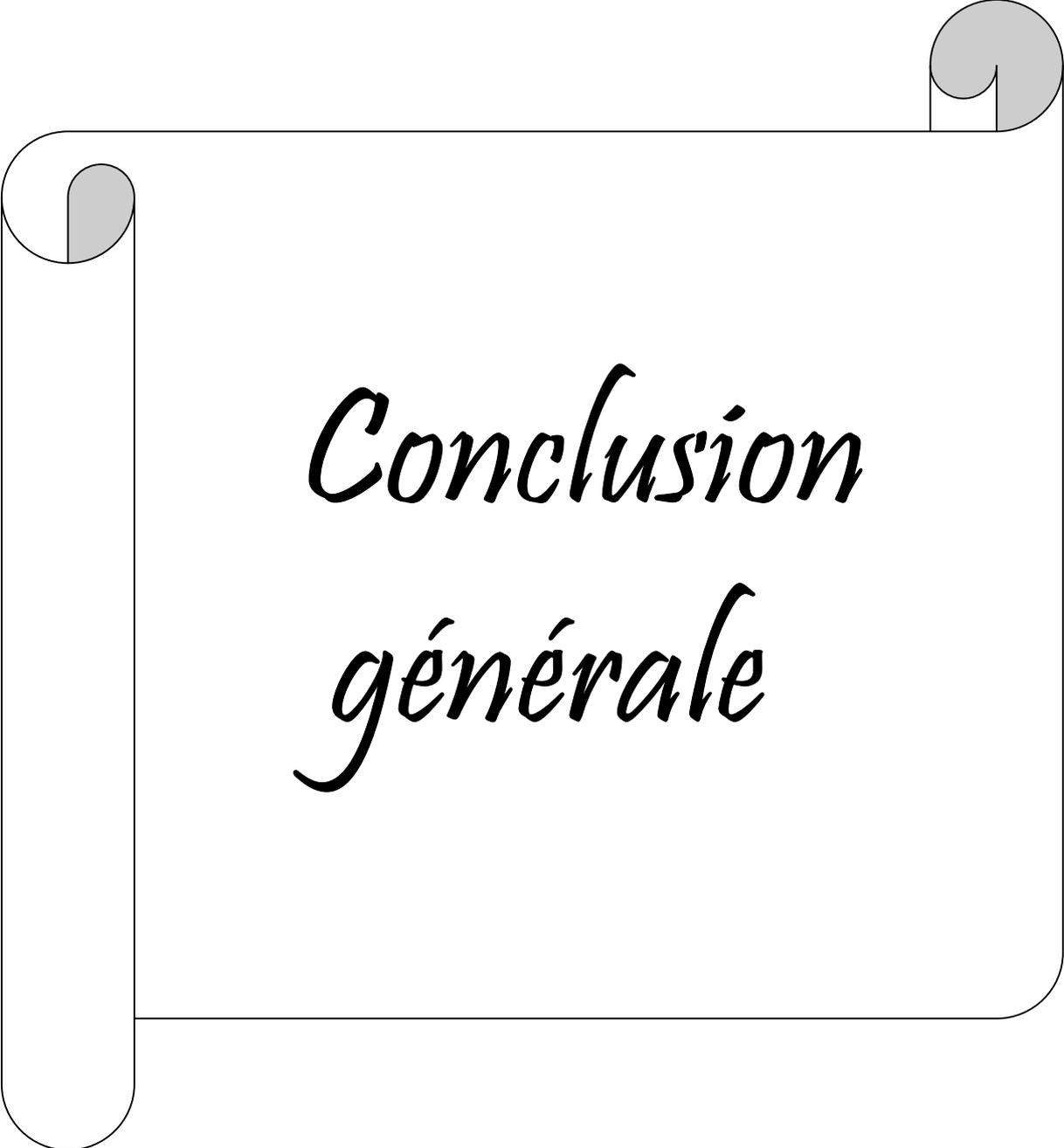
Fig.III-20-superposition des couples électromagnétiques

D'après la courbe de la figure (III-20) nous remarquons que la valeur du couple électromagnétique résultant des courants créneaux présente des ondulations autour de la valeur du couple électromagnétique résultant par des courants sinusoïdaux qui est parfaitement lissé.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté dans la première partie les bloc de simulation en suite nous avons examiné par simulation numérique l'influence du courant injecté sur les différentes grandeurs.

D'après les différentes courbes nous remarquons que l'alimentation de la machine synchrone à fem sinusoïdales par des courants créneaux présente des ondulations tant dis que l'alimentation de la machine synchrone à fem sinusoïdale par des courants sinusoïdaux, nous a donné des résultats satisfaisants cette dernière répondra le mieux au bon fonctionnement de la machine synchrone.



*Conclusion
générale*

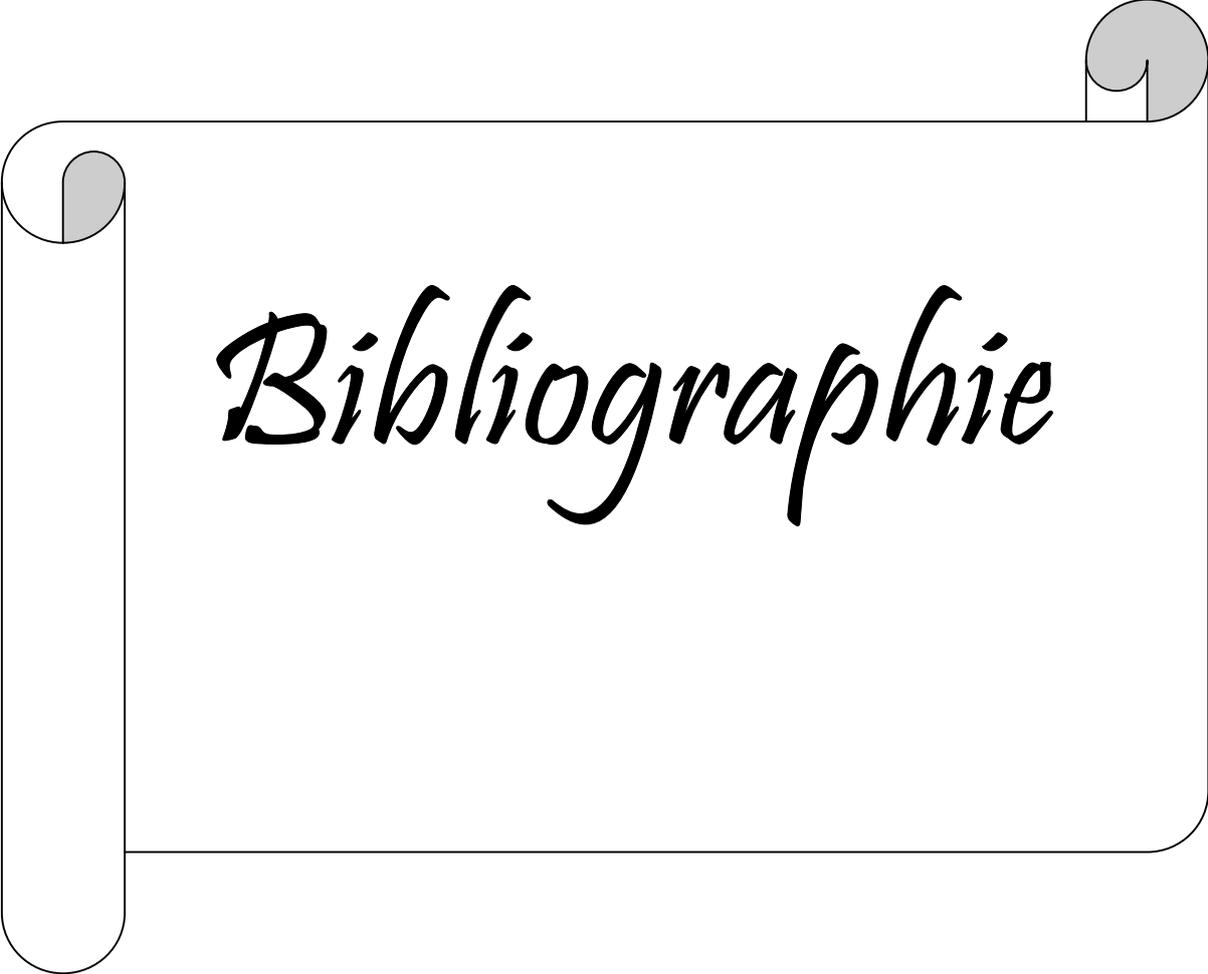
Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte principalement sur la modélisation de la machine synchrone alimentée par des courants sinusoïdaux puis par des courants créneaux.

Dans un premier temps nous avons exposé les différentes généralités relatives à la machine synchrone, nous avons mis en évidence le large spectre d'utilisation qu'elle présente, soit en production d'énergie électrique (alternateur) soit en production d'énergie mécanique (moteur) comme elle peut fonctionner en compensateur synchrone (amélioration du $\cos\varphi$) et montré les différents régimes d'un moteur synchrone à puissance active donnée.

En suite nous avons présenté et modélisé la machine synchrone, en élaborant les équations électriques et mécaniques régissant son fonctionnement puis nous avons abordé la machine synchrone à fem sinusoïdale et la machine synchrone à fem trapézoïdale.

En fin, nous avons examiné par simulation numérique l'influence du courant injecté sur les différentes grandeurs, d'après les résultats obtenus, nous avons vu que l'alimentation de la machine synchrone à fem sinusoïdale par des courants créneaux présente des ondulations qui sont dues aux harmoniques, tant dit que l'alimentation de la machine synchrone à fem sinusoïdale par des courants sinusoïdaux nous a donné des résultats satisfaisants, cette dernière répondra le mieux au bon fonctionnement de la machine.



Bibliographie

Bibliographie :

- [1] S. Si Tayeb, M. Benferhat et S.Lamara Mahamed, «Dimensionnement des saillances rotoriques d'une machine synchrone à pole saillants avec la méthode des éléments finis», Mémoire d'ingénieur UMMTO 2003.
- [2] M.Farhi, I. Zabchi, «Etude de la machine synchrone autopilotée alimentée par un commutateur de courant à commutation assistée», Mémoire d'ingénieur UMMTO 2002.
- [3] N. Ait Saadi, M.Hanifi, «Détermination expérimentale des paramètres inductifs d'une machine synchrone à pôles saillants », Mémoire de fin d'étude D.E.U.A.UMMTO 2006.
- [4] G. Séguier, «La compensation alternative continue» deuxième édition, Paris 1992.
- [5] A. Cuniere, G. Feld, « Variation de vitesse des machines synchrones» Lycée Pierre de Coubertin Chaussée de Paris 77100 Meaux, ENS de Cachan 61av. du Président Wilson 94235 Cachan.
- [6] A. Arab, S.Bakdi, «commande de la machine synchrone à reluctance variable par des régulateur PI avec prise en compte des contraintes de limitation» Mémoire d'ingénieur UMMTO 2007.
- [7] Dr N. Benamrouche, S Osmani systèmes asservis linéaires.
- [8] M. Med Salah, «Etude comparative des performances d'un DTC et d'un FOC d'une machine synchrone à aimants permanents» Thèse Magister en Electrotechnique.