

**République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
La Recherche scientifique**



**Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de**

LICENCE ACADEMIQUE

**Domaine : Sciences et de la Technologie
Filière : Génie Électrique
Spécialité: Contrôle et Diagnostic des Systèmes Électriques**

Thème

**Modélisation d'un moteur
asynchrone triphasée**

Dirigé par:
ALLAL ABDRAHIME

Réalisé par:
DADDA OUSSAMA
HAMIDATOU CHOUAIB
HENKA HOCINE

Soutenu 03-04 Juin 2014



DEDICACES

Je dédie ce travail à :

- ★ *Mes très chers grands pères.*
- ★ *Mes très chers parents, surtout ma mère qui était la source inépuisable de tendresse et qui m'a offert le soutien morale afin de réussir mes études.*
- ★ *Mes frères et sœurs.*
- ★ *A tout ma famille.*
- ★ *Mes oncles chacun par son nom.*
- ★ *Mes amis.*
- ★ *A toute la promotion 2014.*

** DADDA OUSSAMA **



DEDICACES

Je dédie ce travail à :

- ★ *Mes très chers grands pères.*
- ★ *Mes très chers parents, surtout ma mère qui était la source inépuisable de tendresse et qui m'a offert le soutien morale afin de réussir mes études.*
- ★ *Mes frères et sœurs.*
- ★ *A tout ma famille.*
- ★ *Mes oncles chacun par son nom.*
- ★ *Mes amis.*
- ★ *A toute la promotion 2014.*

** HAMIDATOU CHOVAIB **



DEDICACES

Je dédie ce travail à :

- ★ *Mes très chers grands pères.*
- ★ *Mes très chers parents, surtout ma mère qui était la source inépuisable de tendresse et qui m'a offert le soutien morale afin de réussir mes études.*
- ★ *Mes frères et sœurs.*
- ★ *A tout ma famille.*
- ★ *Mes oncles chacun par son nom.*
- ★ *Mes amis.*
- ★ *A toute la promotion 2014.*

★ HENKA HOCINE ★

REMERCIEMENTS

*En premier lieu, nous tenons à remercier «DIEU» qui
m'a aidé pour que ce modeste travail soit achevé.*

*J'adresse mes plus vifs remerciements à toutes
les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin
à l'élaboration de ce modeste mémoire*

*Je remercie mon encadreur ALLAL ABDRAHIM
pour leur conseil et directive*

*un grand remerciement aussi à tous les enseignants qui ont
contribué à notre formation à l'institut d'électrotechnique.*

*Nous remercions vivement nos familles Dadda et Hamidatou et Henka
pour leur aide matérielle et morale durant toute
la période de préparation..*

DADDA OUSSAMA
HAMIDATOU CHOUAIB
HENKA HOCINE



SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	(01)
------------------------------------	-------------

CHAPITRE I

I.1 INTRODUCTION	(03)
I-2 CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE	(04)
I-2-1 STATOR	(05)
I-2-2 ROTOR	(05)
I-3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	(07)
I-4 GLISSEMENT	(07)
I-5 VITESSE DE SYNCHRONISME	(08)
I-6 SCHEMA EQUIVALENT SIMPLIFIE DE LA M.A.S	(08)
I-7 LA PUISSANCE	(09)
I-8 COUPLE ELECTROMAGNETIQUE	(13)
I-9 CARACTERISTIQUE MECANIQUE	(14)
I-10 CONCLUSION	(15)

CHAPITRE II

II-1 INTRODUCTION	(16)
II-2 MODELE DE LA M.A.S TRIPHASE	(17)
II-2-1 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES	(18)
II-2-2 EQUATIONS GENERALES DE LA M.A.S TRIPHASEE	(18)

II-2-2-1 EQUATIONS ELECTRIQUES	(18)
II-2-2-1 EQUATIONS MAGNETIQUES	(19)
II-2-2-1 EQUATIONS MECANIQUE	(20)
II-2-3 TRANSFORMATION DE PARK	(21)
II-2-3-1 MODELE DU M.A.S DANS REPERE DE PARK	(22)
II-2-3-2 EQUATIONS DES TENSIONS	(22)
II-3 CONCLUSION	(25)

CHAPITRE III

III-1 PROGRAMMATION	(26)
III-2 SIMULINK	(27)
III-3 RESULTATS DE SIMULATION	(28)
III-3-1 MOTEUR MARCHE A VIDE	(28)
III-3-1-1 COUPLE ELECTROMAGNETIQUE EN FONCTION DU TEMPS	(28)
III-3-1-2 VITESSE EN FONCTION DU TEMPS	(28)
III-3-1-3 LE COUPLE EN FONCTION DE LA VITESSE	(29)
III-3-1-4 LE COURANT DE PHASE STATORIQUE	(29)
III-3-2 MOTEUR AVEC LA MISE EN CHARGE	(30)
III-3-2-1 COUPLE ELECTROMAGNETIQUE EN FONCTION DE TEMPS	(30)
III-3-2-2 VITESSE EN FONCTION DU TEMPS	(30)
III-3-2-3 LE COUPLE EN FONCTION DE LA VITESSE	(31)
III-3-2-4 LE COURANT DE PHASE STATORIQUE	(31)
III-4 CONCLUSION	(32)
CONCLUSION GENERALE	(33)

Introduction Générale

Généralités

Les moteurs électriques sont de nos jours, à l'exception des dispositifs d'éclairage, les récepteurs les plus nombreux dans les industries. Leur fonction, de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, leur donne une importance économique toute particulière qui fait qu'aucun concepteur d'installation ou de machine, aucun installateur et aucun exploitant ne peut les ignorer.

Parmi tous les types de moteurs existants, les moteurs asynchrones triphasés notamment les moteurs à cage sont les plus utilisés dans l'industrie et au-delà d'une certaine puissance dans la plupart des applications. De plus, bien que leur commande par des équipements à contacteurs soit parfaitement adaptée pour un grand nombre d'applications, l'emploi de matériels électroniques en constante progression élargit leur champ d'application. C'est le cas pour contrôler le démarrage et l'arrêt avec les démarreurs - ralentisseurs progressifs, comme lorsqu'un réglage précis de la vitesse est également nécessaire avec les variateurs - régulateurs de vitesse.

Toutefois, les moteurs asynchrones à bagues sont utilisés pour certaines applications de forte puissance dans l'industrie et les moteurs asynchrones monophasés restent adaptés pour des applications de puissances limitées.

L'utilisation des moteurs asynchrones dit à induction associés à des convertisseurs se généralise dans les applications nécessitant de fortes performances, notamment en couple dynamique (au démarrage ou aux changements de régime), et en précision et plage de vitesse.

Objectifs

L'objectif principal de ce mémoire est la présentation des divers types de moteurs électriques et de leur principe de fonctionnement, détaille plus particulièrement la technique et les particularités d'emploi des moteurs asynchrones.

Présentation du mémoire

Ce mémoire est structuré en quatre principaux chapitres comme suit :

- *Le premier chapitre présentera une Généralités sur les moteurs asynchrones triphasés, et étudie la constitution et les différents types de moteurs asynchrones et Principe de fonctionnement, Schéma équivalent simplifié de la machine*
- *Le deuxième chapitre présentera les modélisations des machines électriques est primordiale aussi bien pour le concepteur que pour l'automaticien. Au niveau de la conception, l'utilisateur aura recours aux équations de maxwell afin d'analyser finement le comportement des machines électriques. Un modèle basé sur les équations de circuit est en général suffisant pour faire la synthèse de la commande. La simplicité de la formulation algébrique conduit à des temps de simulations courts. En outre, la précision de la modélisation est acceptable.*
- *Le troisième chapitre sera d'après les différents résultats obtenus par notre simulation dans un repère lié au champ tournant, on peut conclure que l'approche de notre modèle est très pertinente, puisque notre simulation est parfaitement fidèle à la réalité physique des différents moteurs. Le courant statorique présente une caractéristique d'une bouteille, le couple a été soumis à des ondulations en régime transitoire. La caractéristique mécanique (couple en fonction de la vitesse) montre clairement : un couple résistant nul pour une vitesse proche de synchronisme.*

Chapitre I

Généralités Sur Les Moteur Asynchrone Triphasé

I.1 INTRODUCTION.

I-2 CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE.

I-3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.

I-4 GLISSEMENT.

I-5 VITESSE DE SYNCHRONISME.

I-6 SCHEMA EQUIVALENT SIMPLIFIE DE LA MAS.

I-7 LA PUISSANCE.

I-8 COUPLE ELECTROMAGNETIQUE.

I-9 CARACTERISTIQUE MECANIQUE.

I-10 CONCLUSION.

I.1 Introduction :

Un moteur asynchrone est une machine dont la rotation de l'arbre est différente de la vitesse de rotation du champ tournant.

Le moteur à courant alternatif pour laquelle la vitesse de moteur qui nous intéresse dans ce chapitre est plus précisément un moteur à induction.

Il existe en effet théoriquement d'autres types de moteurs asynchrones, une moteur à induction est une moteur asynchrone dont le circuit magnétique est associé à deux ou plus de deux circuit électriques se déplaçant l'un par rapport à l'autre et dans lequel l'énergie est transférée de la partie fixe à la partie mobile, ou inversement, par induction électromagnétique.

Cependant, la seule moteur asynchrone qui ait une importance pratique est la moteur à induction.

I-2- Constitution d'un moteur asynchrone [1] :

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil.

Dans ce chapitre, nous allons considérer le cas d'une machine asynchrone à cage d'écureuil le sujet du mémoire. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit.

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la Figure (I-1).

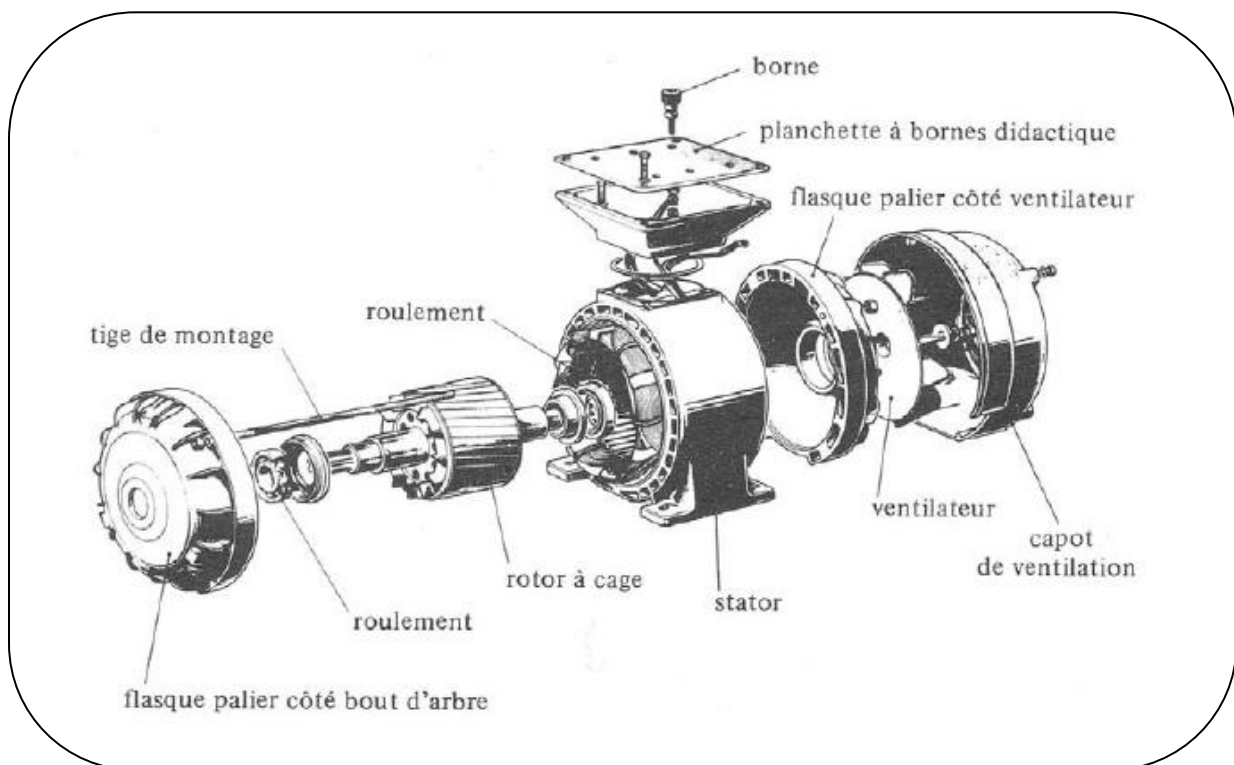


Figure (I.1) Moteur asynchrone (à induction)

I.2.1.Stator [2]:

Les différents types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor ; dans tous les cas le stator reste, au moins dans son principe, le même. Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine .



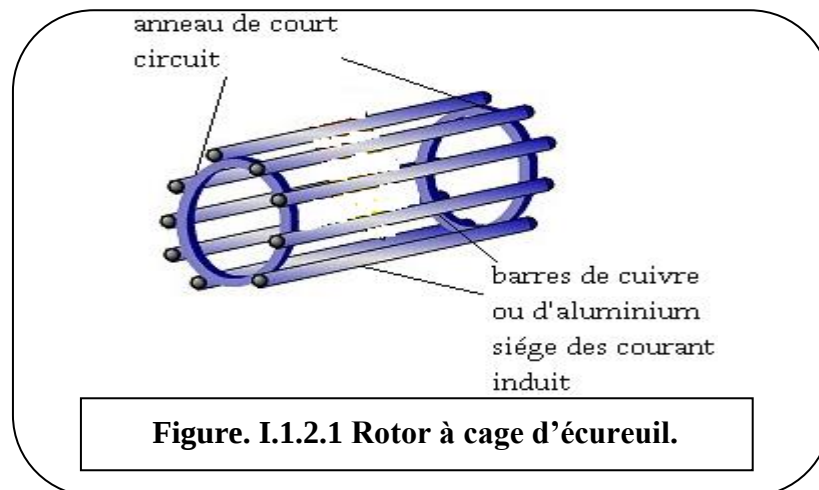
Figure.I.1.1 Stator d'un moteur asynchrone.

I.2.2.Rotor:

Il n'est lié électriquement à aucune source d'énergie, ni continu, ni alternative, ce qui simplifie sa construction. Le courant dans ses enroulements est uniquement induit par le champ tournant statorique, l'enroulement rotorique est encore appelé induit. Les différents types des moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor. On distingue deux types de rotor :

- **Rotor à cage (rotor à cage d'écureuil) :**

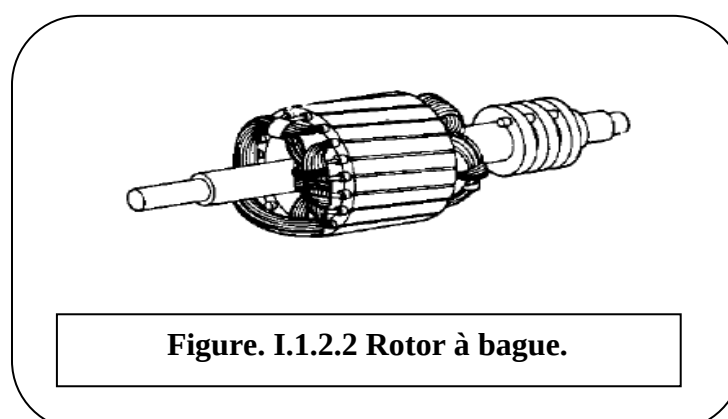
Il est constitué de barres conductrices très souvent en aluminium. Les extrémités de ces barres sont réunies par deux couronnes également conductrices. On dit que le rotor est en court-circuit. (Figure. I.1.2.1)



- **Rotor à bague ou rotor bobiné :**

Le rotor est constitué par un enroulement identique à celui de stator, en pratique, toujours triphasé à couplage en étoile. Les extrémités des enroulements rotoriques sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des balais en carbone. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaires (résistances, électronique de puissance...), qui permettent le réglage de la caractéristique couple/vitesse.

Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux (il assurer de meilleures conditions au démarrage). (Figure. I.1.2.2)



I-3-Principe de fonctionnement [3],[7]:

Le principe de fonctionnement du moteur asynchrone est basé sur l'induction des courants dans le bobinage du rotor par un champ tournant dans l'entrefer. Ce champ tournant va créer un couple moteur qui s'exerce sur les conducteurs des courants induits, Il provoque ainsi le démarrage et la rotation du rotor dans le même sens que le champ tournant.

On appelle glissement la grandeur g .s'exprime en % :

$$g = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (I.1)$$

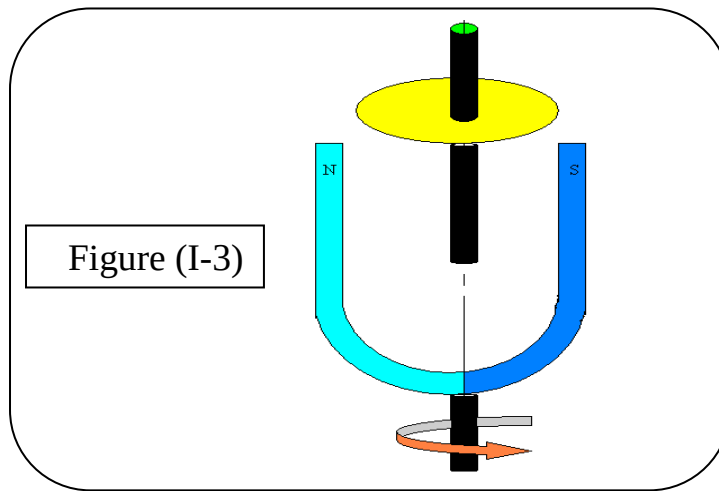
ω_r : Pulsation rotorique.

ω_s : Pulsation statorique.

ω : Pulsation mécanique du rotor.

Dans une machine asynchrone, la condition de fréquence, $\omega_s = \omega_r + \omega$ est constamment satisfaite.

Quand la pulsation mécanique ω est égale à la pulsation du champ tournant ω_s , le phénomène d'induction électromagnétique disparaît.



I-4-Glissement [4]:

La vitesse de synchronisme est la vitesse de rotation du champ tournant :

$$n_s \text{ (tr/s)} = \frac{f \text{ (Hz)}}{p} \quad (I.2)$$

$$\Omega_s \text{ (rad/s)} = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p} \quad (I.3)$$

Le glissement mesure l'écart relatif entre la vitesse de rotation de la machine et la vitesse de synchronisme :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (I.4)$$

Et $g = n_s (1 - g)$ (I.5)

n_s : Vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant en $(Tr \cdot S^{-1})$.

n : Vitesse de rotation du rotor en $(Tr \cdot S^{-1})$.

I-5-Vitesse de synchronisme :

La vitesse de synchronisme des moteurs asynchrones triphasés est proportionnelle à la fréquence du courant d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles constituant le stator.

Par exemple :

$$N_s = 60 \frac{f}{p}$$

Avec :

- N_s : vitesse de synchronisme en tr/min,
- f : fréquence en Hz,
- p : nombre de paires de pôles.

I - 6 - Schéma équivalent simplifié de la machine :

On peut considérer la machine asynchrone comme un transformateur à champ tournant.

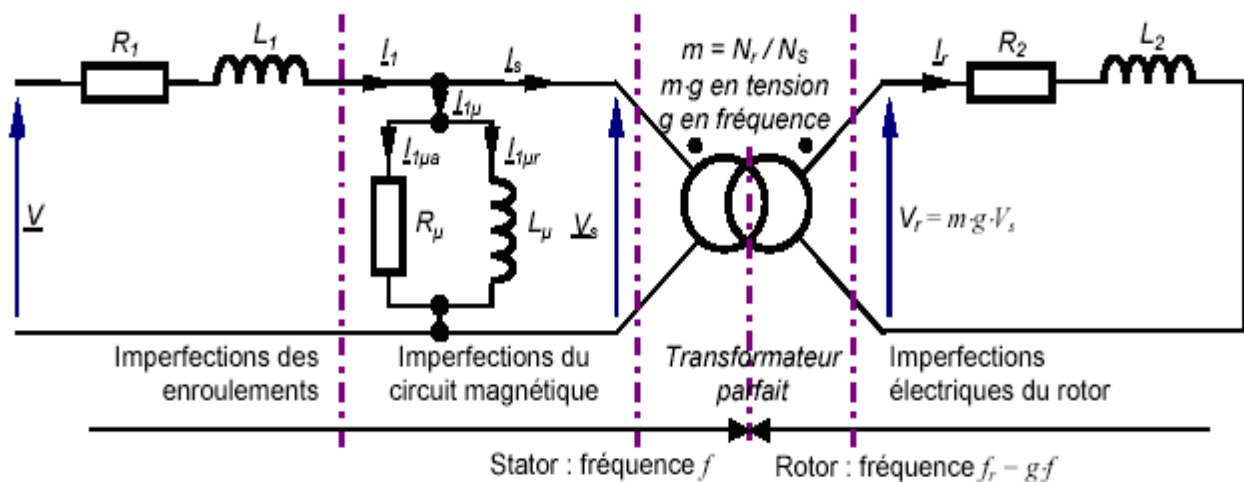


Figure (I.3) Schéma équivalent simplifié d'un moteur asynchrone

En résumé les grandeurs électriques relatives au primaire et au secondaire peuvent s'écrire toujours relativement à un enroulement.

R_μ : résistance représente les pertes fer au stator.

X_μ : résistance magnétisante du stator.

g : glissement.

Notations :

Au primaire les grandeurs caractéristiques sont :

V_s : Valeur efficace de la tension appliquée sur un enroulement de phase

ω_s : Pulsation de la tension appliquée sur un enroulement de phase

R_s : Résistance d'un enroulement

L_s : Inductance de fuite d'un enroulement

E_s : La FEM développée aux bornes du bobinage

Au secondaire les grandeurs caractéristiques sont :

ω_r : Pulsation des FEMs et courants rotoriques

R_r : Résistance d'un enroulement

L_s : Inductance de fuite d'un enroulement

E_r : La FEM développée aux bornes du bobinage.

I.7.La Puissance [5] :

il n'a pas été question du temps pris par l'ouvrier pour faire monter la masse de 50 kg. Il est aisé de se rendre compte qu'il lui est plus facile d'élever la masse de 10 mètres en 10 minutes que de la faire monter à la même hauteur en 1 minute seulement.

Le travail dépensé sera toutefois le même dans les deux cas. On dira alors que la puissance mise en jeu est dix fois plus grande dans le deuxième cas. On définit la puissance comme étant la quantité de travail accompli par seconde. Plus une machine exécute un travail rapidement, plus elle est puissante. Inversement, le produit de la puissance par le temps nous donne le travail. On finit toujours par terminer un travail, même avec une faible puissance, si on y met le temps voulu.

D'après ce qui a été dit plus haut, la puissance est définie par l'équation :

$$P = \frac{W}{t} \quad (I.6)$$

Où

P = puissance, en watts [W]

W = travail effectué, en joules [J]

t = temps, en secondes [s]

L'unité SI de puissance mécanique est le watt ; il est égal à 1 joule par seconde. On utilise aussi fréquemment un multiple du watt, le kilowatt (kW), valant 1000 watts.

Le horsepower (HP) est une unité anglaise de puissance qu'on utilise parfois pour exprimer la puissance d'un moteur. Elle est équivalente à 746 watts et correspond sensiblement à la puissance moyenne d'un cheval. De même, le cheval-vapeur (CH) est une unité française de Puissance ; elle équivaut à 735,5 W.

Bilan de puissance :

a) La puissance absorbée : $P_a = \sqrt{3}.U.I.\cos \varphi \quad (I.7)$

Pa : la puissance électrique absorbée en watts (w).

U : La tension entre fils de ligne, en volts (V).

I : L'intensité du courant de ligne en ampères (A).

φ : Déphasage entre les vecteurs U et I.

Une faible partie de cette puissance (1 à 2%) est perdue dans le stator sous forme de pertes dans le fer (P_{fs}) et de pertes dans le cuivre dues à l'effet Joule (P_{js}).

• **Les pertes par effet joule dans le stator P_{js} :** $P_{js} = \frac{3}{2}.R.I^2 \quad (I.8)$

Couplage étoile : $P_{js} = 3.R'.I^2 \quad (I.9)$

Couplage triangle : $P_{js} = 3.R'.J^2 \quad (I.10)$

P_{js} : En watts (W).

R : Est la résistance mesurée entre deux bornes de stator, en ohms (Ω).

R' : La résistance d'une phase, en ohms (Ω).

I : L'intensité du courant de ligne, en ampères (A).

J : L'intensité du courant dans un enroulement couplé en triangle, en ampères (A).

Remarque : $J = \frac{I}{\sqrt{3}}$

- **Les pertes magnétiques dans le stator P_{fs} :**

Les pertes magnétiques dans les tôles de son armature (appelées aussi pertes dans le fer) sont pratiquement indépendantes de la charge, en revanche, elles sont liées à la valeur efficace U et à la fréquence f de la tension d'alimentation.

Pour un réseau donnée, ces pertes sont considérées comme constantes, elles sont données, ou calculées par :

$$P_{fs} = K_{fs} \cdot f^{1.5} \cdot B^2 \text{ en watts (W)} \quad (\text{I.11})$$

- b) La puissance transmise au rotor P_{tr} (puissance électromagnétique) :**

$$P_{tr} = P_a - P_{js} - P_{fs} \quad (\text{I.12}) \quad \text{ou} \quad P_{tr} = C \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_s) \quad (\text{I.13})$$

P_{tr} : La puissance électrique transmise au rotor en watts (W).

P_{js} : Les pertes par effet joule dans le stator en watts (W).

C : Le couple mécanique transmise au rotor en Newton-mètres (Nm).

n_s : La fréquence de rotation du champ magnétique en tours par seconde (tr/s).

Une faible partie de cette puissance est perdue dans le rotor par effet Joule.

- **Les pertes par effet joule dans le rotor P_{jr} :**

$$P_{jr} = g \cdot P_{tr} \quad (\text{I.14})$$

P_{jr} : Les pertes par effet joule au rotor en watts (W).

Le rotor est également le siège d'un autre type, les pertes magnétiques. Cependant ces pertes seront toujours négligées devant les autres, la fréquence des courants rotoriques étant très faible.

c) La puissance mécanique $P_{méc}$:

$$P_{méc} = P_{tr} - P_{jr} \quad \text{Ou} \quad P_{méc} = C_{él} \cdot (2 \cdot \pi \cdot n)$$

n : la fréquence de rotation du rotor en (tr/s).

$C_{él}$: couple électromagnétique.

Une faible partie de cette puissance est perdue sous forme des pertes mécaniques.

• Les pertes mécaniques $\Delta P_{méca}$:

Ces pertes sont considérées comme constantes, elles sont données, ou calculées par un essai à vide avec la formule suivante :

$$\Delta P_{méca} = C_o \cdot \omega \quad (I.15)$$

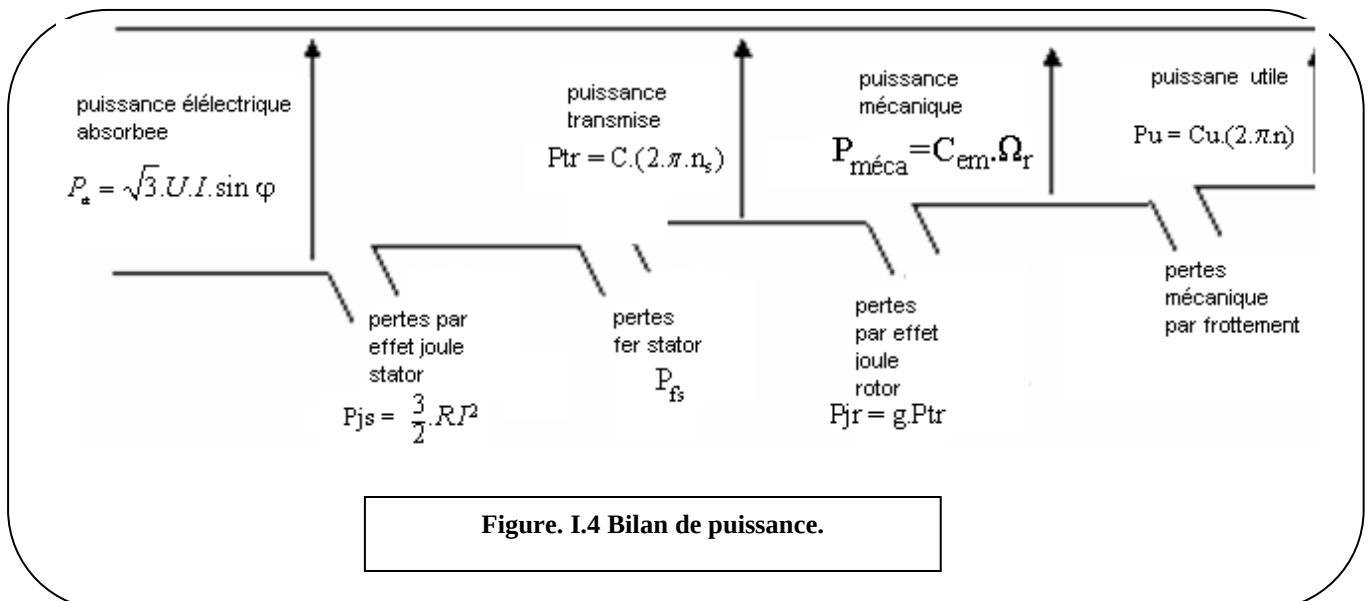
$$\text{Avec : } C_o = C_{él} - C_u \quad (I.16)$$

d) La puissance utile P_u :

$$P_u = C_u \cdot (2 \cdot \pi \cdot n) \quad (I.17)$$

C_u : Le couple utile mécanique sur l'arbre du moteur en newton-mètre (Nm).

On peut schématiser le bilan de puissance de la façon suivante : (Figure. II.5)



I.8. Couple électromagnétique [6] :

La puissance électromagnétique ou la puissance transmise au secondaire à travers l'entrefer est celle qui traverse le transformateur parfait du schéma équivalent, elle s'écrit pour une machine triphasée :

$$P_{em} = 3 E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad (I.18)$$

Si φ_2 est le déphasage de I_2 sur E_2 cette puissance est rapportée par un C.M.T (Champ Magnétique. Tournant résultant) de vitesse par rapport au rotor $\Omega_r = \Omega_s - \Omega = g \cdot \Omega_s$.

D'où le couple électromagnétique moteur (puisque au couple positif, l'énergie passe du stator au rotor) exercé par ce champ magnétique tournant sur ce rotor est :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_r} = \frac{3 E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{g \cdot \Omega_s} \quad (I.19)$$

Si on néglige les effets de l'impédance primaire, on peut écrire

$$E_2 = g \cdot m \cdot E_1 \neq g \cdot m \cdot V_1, V_1 \neq E_1 \quad (I.20)$$

L'impédance primaire complexe est :

$$(Z_2 = r_2 + j L_2 \cdot g \cdot \omega) \quad (I.21)$$

Dont le module :

$$Z_2 = |z_2| = \sqrt{r_2^2 + (g \cdot l_2 \cdot \omega)^2} \quad (I.22)$$

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} \neq \frac{m \cdot g \cdot V_1}{Z_2} \quad (I.23)$$

D'où $C_{em} = \frac{3(m \cdot g \cdot V_1)^2 \cdot r_2}{Z_2^2 \cdot g \cdot \Omega_s}$ (I.24)

Alors : $3(m \cdot V_1)^2 \frac{g \cdot r_2}{r_2^2 + (L_2 \cdot g \cdot \omega)^2} = 3(m \cdot V_1)^2 \cdot \frac{P}{\omega} \cdot \frac{\frac{r_2}{g}}{\left(\frac{r_2}{g}\right)^2 + (L_2 \cdot \omega)^2}$ (I.25)

Aux faibles glissements : $(L_2 \cdot g \cdot \omega \ll r_2)$ (I.26)

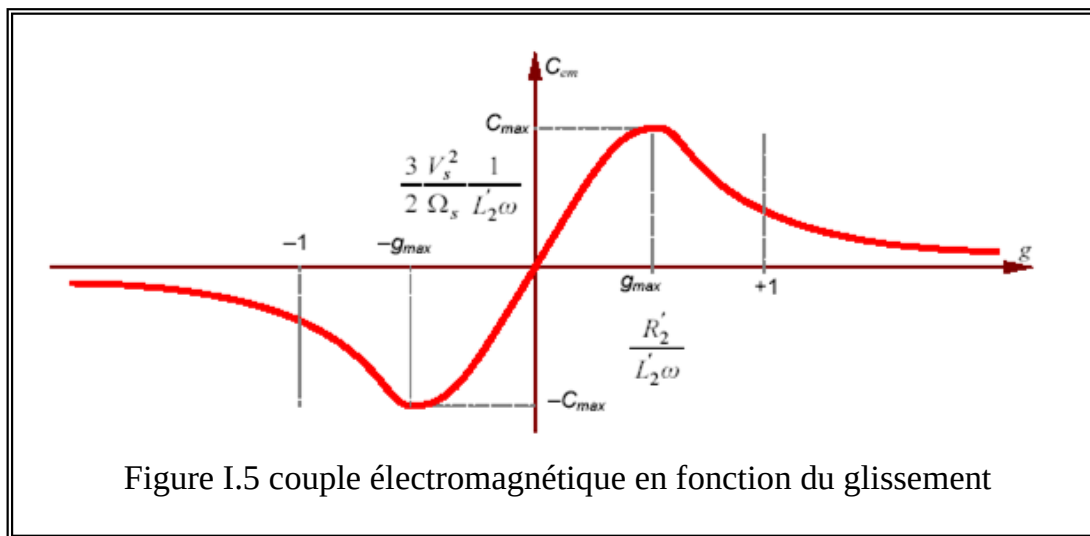
$$C_{em} = 3(m \cdot V_1)^2 \frac{P g}{\omega r_2} = k \cdot g \quad (I.27)$$

Aux forts glissements : $(g \cdot L_2 \omega \gg r_2) C_{em} = 3(m \cdot V_1)^2 \frac{P r_2}{\omega (L_2 \cdot \omega)^2} \frac{1}{g}$ (I.28)

$$C_{em} = \max \quad \text{Alors} \quad \frac{r_2^2}{g} + g(L_2 \cdot \omega)^2 = \min \quad \text{donc.} \quad \frac{r_2^2}{g_0} = g_0(L_2 \omega)^2 \quad (I.29)$$

$$g_0 = \frac{r_2}{L_2 \cdot \omega} \quad \text{Alors} \quad C_{em \max} = 3(m.V_1)^2 \cdot \frac{p}{\omega} \frac{1}{2 L_2 \omega} \quad (I.30)$$

Donc le couple électromagnétique maximale $C_{em \max}$ ne dépend pas de la résistance de l'enroulement rotorique.



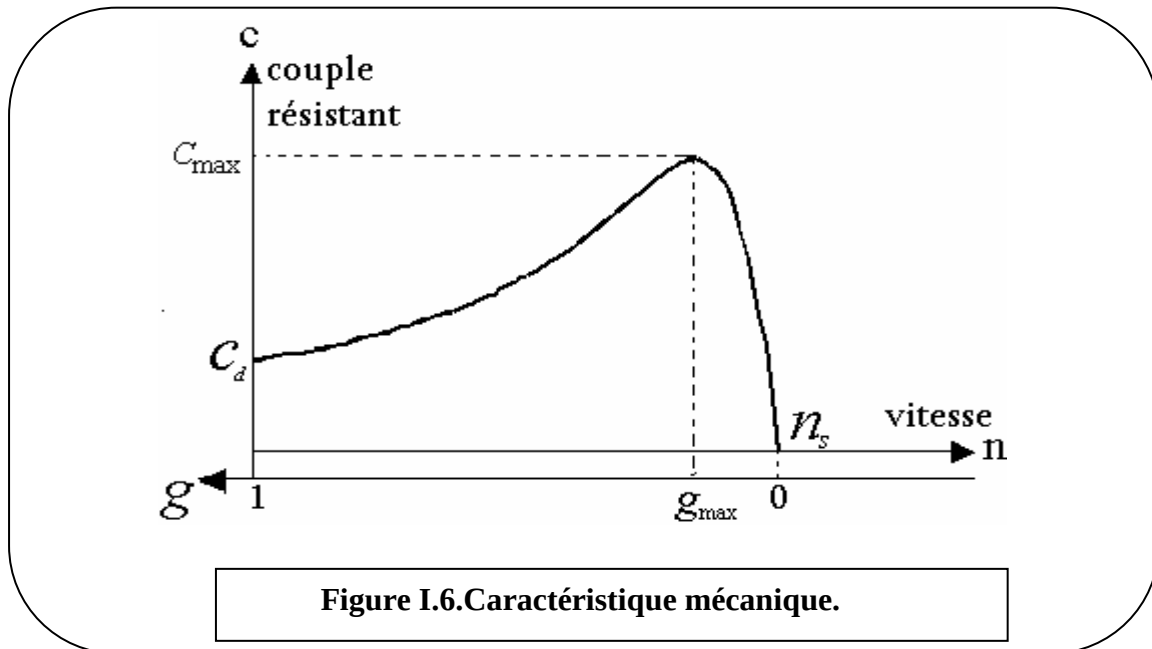
I.9.Caractéristique mécanique :

La caractéristique mécanique d'un moteur asynchrone est la représentation du couple fournie par ce moteur en fonction de sa vitesse de rotation ($C = f(n)$) ou en fonction de glissement ($C = f(g)$).

$$C_{\max} = 3 \cdot (m.v^2) \cdot \frac{p}{\omega} \cdot \frac{1}{2 L_2 \omega} \quad (I.31)$$

Avec : $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

Il est possible de maintenir le couple électromagnétique maximal ($C_{\max}$) constant pour différentes vitesses de rotation, à condition que le rapport tension d'alimentation / fréquence de la tension soit **constant** (U / f constant) Figure. I.9.



Pour avoir un rendement acceptable, le moteur doit fonctionner à faible glissement.

I.10. Conclusion :

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans les industries mondiales vu à : sa robustesse, sa simplicité de construction et à son prix abordable. Pour cela, nous avons focalisé notre étude sur ce type de moteur.

Nous avons exposé une généralité sur ce type de moteur pour préparer nos lecteurs à comprendre la modélisation du moteur à induction qui sera le thème du chapitre suivant.

Chapitre II

Modélisation D'un Moteur Asynchrone Triphasé

II-1 INTRODUCTION

II-2 MODELE DE LA M.A.S TRIPHASE .

II-2-1 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES.

**II-2-2 EQUATIONS GENERALES DE LA M.A.S
TRIPHASEE.**

II-2-3 TRANSFORMATION DE PARK.

II-3 CONCLUSION

II.1. Introduction :

La modélisation des machines électriques est primordiale aussi bien pour le concepteur que pour l'automaticien. Au niveau de la conception, l'utilisateur aura recours aux équations de maxwell afin d'analyser finement le comportement des machines électriques. Un modèle basé sur les équations de circuit est en général suffisant pour faire la synthèse de la commande. La simplicité de la formulation algébrique conduit à des temps de simulations courts. En outre, la précision de la modélisation est acceptable.

Il faut noter qu'il existe trois approches concernant la modélisation des machines électriques. En choisissant de les présenter par leur degré de complexité croissante, nous avons :

- **la modélisation de Park** est construite à partir des équations électriques de la machine. Ce modèle fait un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, en raison de la simplicité de la formulation algébrique, ce type d'approche est bien adapté à l'élaboration d'algorithme de commande.
- **La modélisation par réseau de permanence ou le circuit magnétique** est modélisée par un circuit électrique équivalent. Elle peut être utilisée pour tester la robustesse des algorithmes de commande, comme elle peut contribuer à l'estimation des paramètres de la machine.
- **La modélisation par éléments finis** c'est la modélisation la plus précise elle est surtout utilisée pour la conception des machines entre autres pour leurs dimensionnements.

Dans ce chapitre, nous présenterons le modèle de Park de la machine asynchrone (MAS) avec ses hypothèses simplificatrice, ensuite on établira son modèle avec l'introduction des pertes fer.

II -2 Modèle de la M.A.S triphasé [8]:

Le modèle de la machine à induction triphasé est illustré par le schéma de la «Fig. I-1» Avec les armatures statoriques et rotoriques sont munies chacune d'un enroulement triphasé, sont trois enroulements du stator : S_A , S_B et S_C , et pour les trois enroulements rotoriques : R_a , R_b et R_c , et θ : Angle entre l'axe de la phase statorique et la phase rotorique .

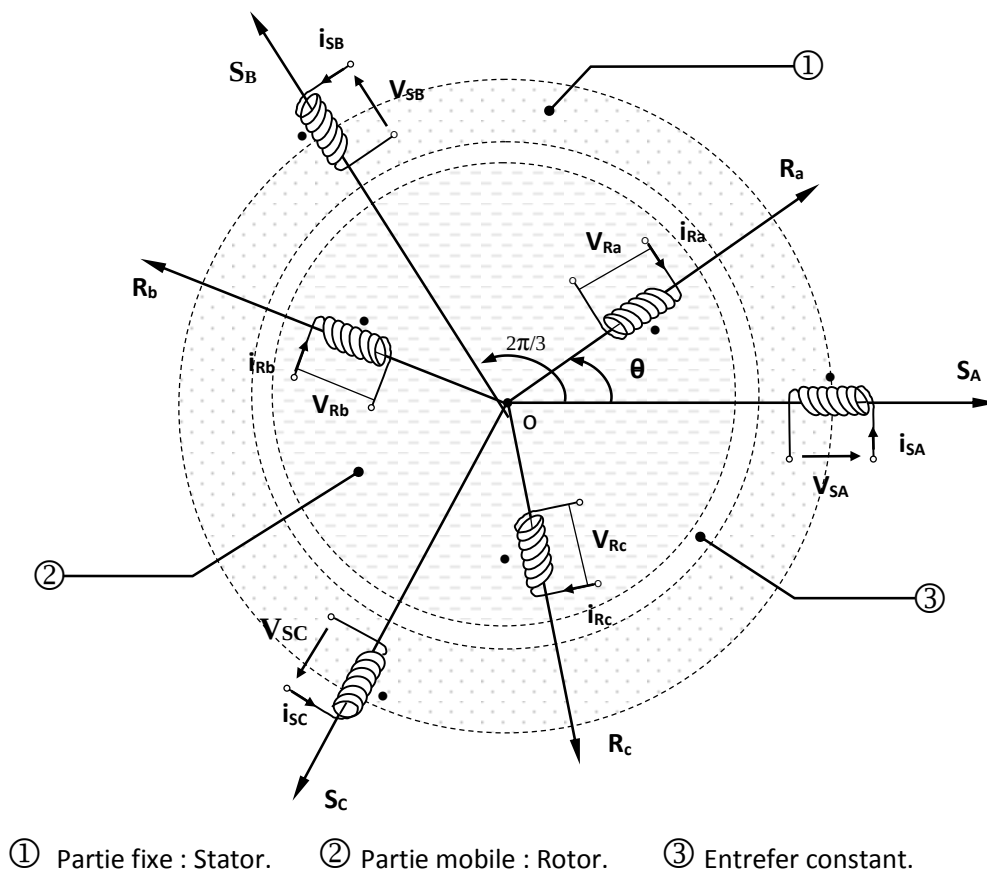


fig.II-1 Modèle d'un Moteur asynchrone triphasé.

II-2.1 Hypothèses simplificatrices :

L'étude du moteur asynchrone traduit les lois de l'électromagnétisme dans le contexte habituel d'hypothèses simplificatrices suivantes :

- Parfaite symétrie.
- Assimilation de la cage à un bobinage en court-circuit de même nombre de phase que le bobinage statorique.
- Répartition sinusoïdale le long de l'entrefer du champ magnétique de chaque bobinage.
- Absence de saturation dans le circuit.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique .

II-2.2. Equations générales de la M.A.S triphasée :

Dans les conditions précédentes, les équations des circuits électriques statoriques et rotoriques se présentent sous forme matricielle donnée ci-après, voir «**Fig.I-1**».

II-2.2.1. Equations électriques :

Les équations électriques du modèle de la machine asynchrone triphasé s'écrivent respectivement :

► pour le stator $[\mathbf{V}_{S \text{ } A B C}] = \mathbf{R}_S [\mathbf{i}_{S \text{ } A B C}] + \frac{d}{dt} [\mathbf{\Phi}_{S \text{ } A B C}]$ (II-1)

► pour le rotor $[\mathbf{V}_{R \text{ } a b c}] = \mathbf{R}_R [\mathbf{i}_{R \text{ } a b c}] + \frac{d}{dt} [\mathbf{\Phi}_{R \text{ } a b c}]$ (II-2)

avec :

R_S, R_R ; Les résistances par phase respectivement du stator, et du rotor.

et :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{S \text{ ABC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{SA} & \mathbf{V}_{SB} & \mathbf{V}_{SC} \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.3}) \quad : \text{Vecteur de tension statorique.}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{R \text{ abc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{Ra} & \mathbf{V}_{Rb} & \mathbf{V}_{Rc} \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.4}) \quad : \text{Vecteur de tension rotorique.}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_{S \text{ ABC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{SA} & \mathbf{i}_{SB} & \mathbf{i}_{SC} \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.5}) \quad : \text{Vecteur de courant statorique.}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_{R \text{ abc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{Ra} & \mathbf{i}_{Rb} & \mathbf{i}_{Rc} \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.6}) \quad : \text{Vecteur de courant rotorique.}$$

Ainsi que pour les vecteurs des flux :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{S \text{ ABC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{SA} & \Phi_{SB} & \Phi_{SC} \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.7}) \quad : \text{Vecteur de flux statorique.}$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{R \text{ abc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{Ra} & \Phi_{Rb} & \Phi_{Rc} \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.8}) \quad : \text{Vecteur de flux rotorique.}$$

II-2.2.2 Equations magnétiques :

Les relations entre les flux et les courants du stator et du rotor s'écrivent comme suit :

$$\text{➤ Pour le stator : } \begin{bmatrix} \Phi_{S \text{ ABC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{S \text{ ABC}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{SR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{R \text{ abc}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

$$\text{➤ Pour le rotor : } \begin{bmatrix} \Phi_{R \text{ abc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{R \text{ abc}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{SR} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{S \text{ ABC}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

où :

$[\mathbf{L}_S]$: Matrice d'inductances statoriques.

$[\mathbf{L}_R]$: Matrice d'inductances rotoriques.

$[\mathbf{M}_{SR}]$: Matrice des inductances mutuelles du couplage entre stator-rotor.

alors :

$$[\mathbf{L}_S] = \begin{bmatrix} \ell_S & \mathbf{M}_S & \mathbf{M}_S \\ \mathbf{M}_S & \ell_S & \mathbf{M}_S \\ \mathbf{M}_S & \mathbf{M}_S & \ell_S \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{L}_R] = \begin{bmatrix} \ell_R & \mathbf{M}_R & \mathbf{M}_R \\ \mathbf{M}_R & \ell_R & \mathbf{M}_R \\ \mathbf{M}_R & \mathbf{M}_R & \ell_R \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

ainsi :

$$[\mathbf{M}_{SR}] = [\mathbf{M}_{RS}]^T = \mathbf{M}_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Où :

ℓ_S : Inductance propre d'une phase statorique.

ℓ_R : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_S : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

M_R : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

M_0 : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspondante du rotor.

II-2.2.3 Equations mécaniques :

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire de la variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse) [8] :

$$C_{em} = p [i_{S \ ABC}]^T \frac{d}{dt} [M_{SR}] [i_{R \ abc}] \quad (II.13)$$

L'équation du mouvement de la machine est :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad (II.14)$$

avec :

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

C_r : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

Ω : Vitesse rotorique.

C_{em} : Couple électromagnétique.

f_r : Coefficient de frottement visqueux.

$(f_r \Omega)$: Terme de couple de frottement visqueux[6].

II-2.3 Transformation de Park [9]:

La transformation de Park appliquée à la machine à induction peut être interprétée comme la substitution aux enroulements réels d'enroulements fictifs $(ds; qs, dr; qr)$ dont les axes magnétiques sont liés au référentiel **o-d-q** conformément à la figure (II-2). Ceci permet d'obtenir un système d'équations à coefficients constants.

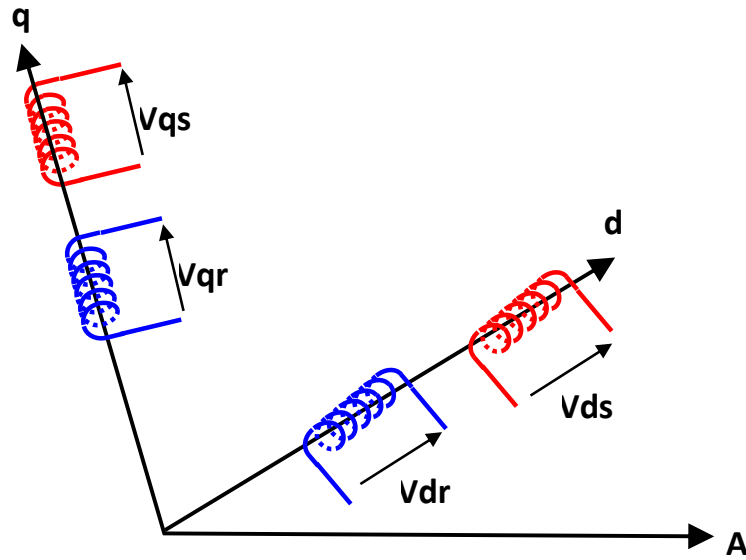


Fig.II.2 Représentation des enroulements de la machine en transformateur de Park

On utilise la transformation unique pour les flux, les tensions, et le courant dont la matrice de transformation est :

$$[A] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_s) & \sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Le coefficient $\sqrt{\frac{2}{3}}$ est choisi pour donner une expression invariante du couple électromagnétique

à partir de la propriété $A^{-1} = A^t$

La transformation 3 vers se fait par : $\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$

$$A^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

La transformation 2 vers 3 se fait par : $\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix}$

Où θ_s est l'angle du repère d-q.

II.2.3.1. Modèle de la MAS triphasée dans le repère de Park

Après avoir effectué les transformations précédentes, on obtient ainsi les équations de tension dans le nouveau repère.

II.2.3.2. Equation des tensions

Les équations des tensions statoriques et rotoriques s'écrivent dans le repère de Park sous la forme suivante:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{sd} = R_s.i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_a.\Phi_{sq} \\ v_{sq} = R_s.i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_a.\Phi_{sd} \\ v_{rd} = 0 = R_r.i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_a - \omega_r).\Phi_{rq} \\ v_{rq} = 0 = R_r.i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} - (\omega_a - \omega_r).\Phi_{rd} \end{array} \right. \quad (II.17)$$

D'après le système d'équations (II.17), on peut se placer dans différents référentiels correspondants à des axes fixes, liés au stator ($\omega_s = 0$), ou à des axes liés au rotor ($\omega_a = \omega_r$) ou des axes liés au champ tournant ($\omega_a = \omega_s$).

ω_a est la vitesse angulaire du système d'axe (d, q).

ω_r est la vitesse angulaire électrique rotorique.

ω_{sl} : Glissement de vitesse angulaire électrique.

Avec

$$\omega_r = \omega_s - \omega_{sl}$$

$$\omega_{sl} = g\omega_s$$

Le système d'axes lié au champ tournant a l'avantage qu'avec une alimentation sinusoïdale les variables sont traitées comme des grandeurs continues en régime permanent. Le repère lié au stator est utilisé pour l'estimation des flux et pour les techniques de commande non linéaire.

Dans notre cas de la machine à induction à cage, $v_{dr} = v_{qr} = 0$ (enroulement court-circuités) et les équations dynamiques de la machine sont représentées dans le référentiel lié au champ tournant par ($\omega_a = \omega_s$) :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s.i_{sd} + l_s.p i_{sd} - \omega_s.\Phi_{sq} + M.p(i_{sd} + i_{rd}) \\ v_{sq} = R_s.i_{sq} + l_s.p i_{sq} + \omega_s.\Phi_{sd} + M.p(i_{sq} + i_{rq}) \\ 0 = R_r.i_{rd} + l_r.p i_{rd} - \omega_{sl}.\Phi_{rq} + M.p(i_{rd} + i_{sd}) \\ 0 = R_r.i_{rq} + l_r.p i_{rq} + \omega_{sl}.\Phi_{rd} + M.p(i_{rq} + i_{sq}) \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

En prenant les composantes des flux statorique et rotorique sont données par :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s.i_{sd} + M.i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s.i_{sq} + M.i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r.i_{rd} + M.i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r.i_{rq} + M.i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Avec

$$L_s = l_s + M$$

$$L_r = l_r + M$$

Et :

A, B, C : Correspondants aux trois phases du stator.

a, b, c : Correspondants aux trois phases du rotor.

s, r : Indices correspondants au stator et au rotor.

P : Variable de Laplace, d/dt .

L_s, L_r : Indices cycliques statorique et rotorique par phase.

M : Inductances mutuelle propre.

R_s, R_r : Résistance statorique et rotorique par phase.

θ_s, θ_r : Angles électriques statorique et rotorique par phase.

ω_s, ω_r : Vitesses angulaires électriques statorique et rotorique par phase.

ω_{sl} : Glissement de vitesse angulaire électrique.

l_s, l_r : Inductances de fuite statorique et rotorique par phase.

❖ Le glissement de vitesse ω_{sl} est défini par:

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r \quad (\text{II-22})$$

$$\text{Avec: } \omega_r = np\Omega_r \quad (\text{II-23})$$

Par ailleurs, l'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega_r}{dt} + f_r \Omega_r \quad (\text{II-24})$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} np \frac{M}{L_r} (\phi_{rd} i_{sq} - \phi_{rq} i_{sd}) \quad (\text{II-25})$$

Avec :

C_e : le couple électromagnétique délivré par la machine.

C_r : le couple résistant de la charge.

f_r : le coefficient des frottements visqueux.

$\Omega_r = \frac{\omega_r}{np}$: la vitesse de rotation mécanique.

np : le nombre de paires de pôles.

II.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné le modèle de Park du moteur asynchrone dont le référence est lié au champs tournant avec toutes les équations électriques et magnétiques et électromagnétiques qui nous aideront à bien organiser le schéma bloc de notre Simulink sous l'environnement Matlab de notre modèle du moteur asynchrone. Le traitement des différents cas se fera à partir de l'un de ces modèles. Le troisième chapitre sera consacré, aux résultats de simulation de notre modèle.

Chapitre III

Simulation d'un Moteur

Asynchrone Triphasé

SIMULATION PAR PROGRAMMATION ET SIMULINK DE LA MOTEUR ASYNCHRONE

III-1 PROGRAMMATION :

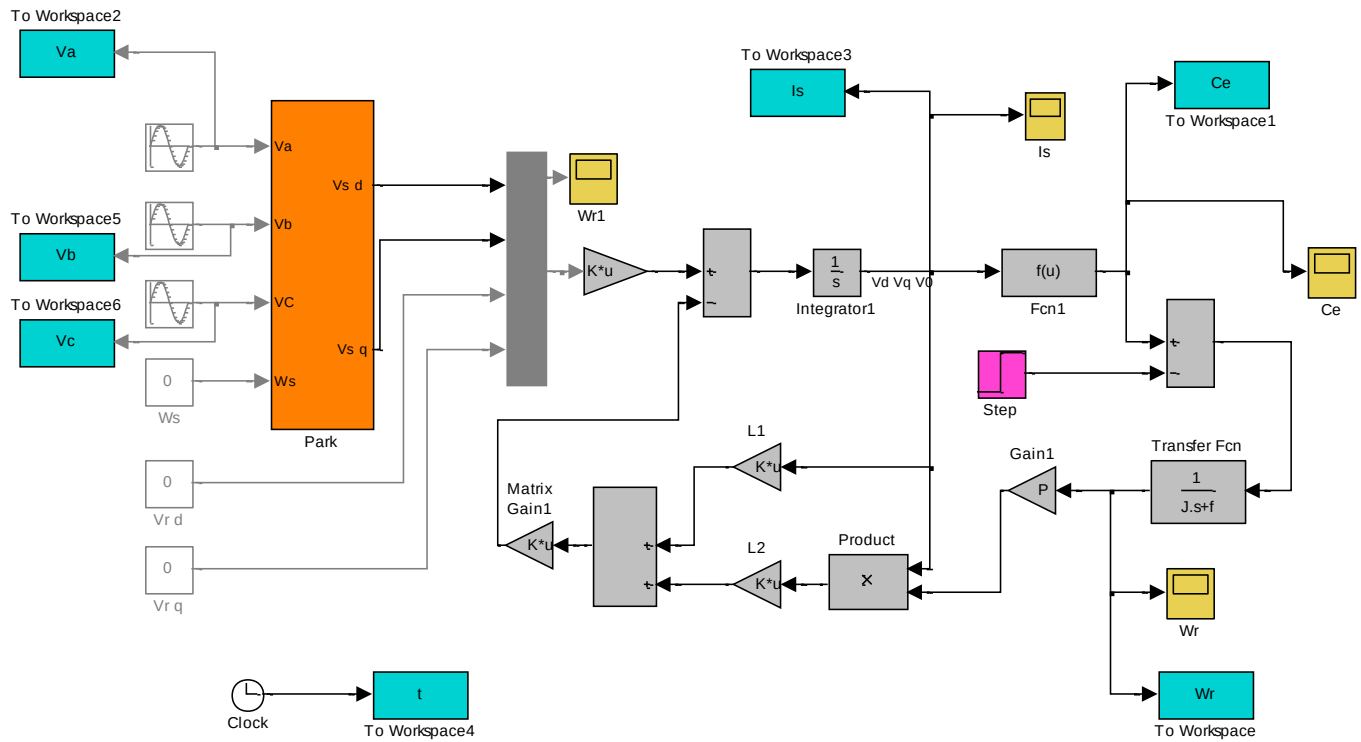
Le logiciel **MATLAB** (**MATrix LABoratory**) est spécialisé dans le domaine du calcul matriciel numérique. Tous les objets définis dans MATLAB le sont donc au moyen de vecteurs et de matrices/tableaux de nombres. Un ensemble important d'opérateurs et de fonctions MATLAB de base facilitent leur manipulation et des opérations comme par exemple le produit et l'inversion matricielles (inv), la transposition (') ou encore le calcul des valeurs propres (eig) font partie de la bibliothèque standard.

Simulink n'est rien d'autre qu'une boîte à outils de MATLAB permettant au moyen d'une interface graphique évoluée, la construction rapide et aisée ainsi que la simulation de schémas fonctionnels complexes, contenant des systèmes linéaires, non linéaires voire non-stationnaires, y compris des opérateurs logiques, des outils mathématiques d'analyse, etc.

%paramètres de la Moteur Asynchrone:

```
CLC ;clear ;
rs 1.15;rr=1.44;ls=0.156;lr=0.156;lm=0.143;
j=0.024;p=2;f=0.001;
d= [rs rr ls lr lm j p f];
tr =lr/rr;
ts =ls/rs;
s=1-lm*lm/ (lr*ls);
ws=100*pi;
v=220;
h=0.001;
```

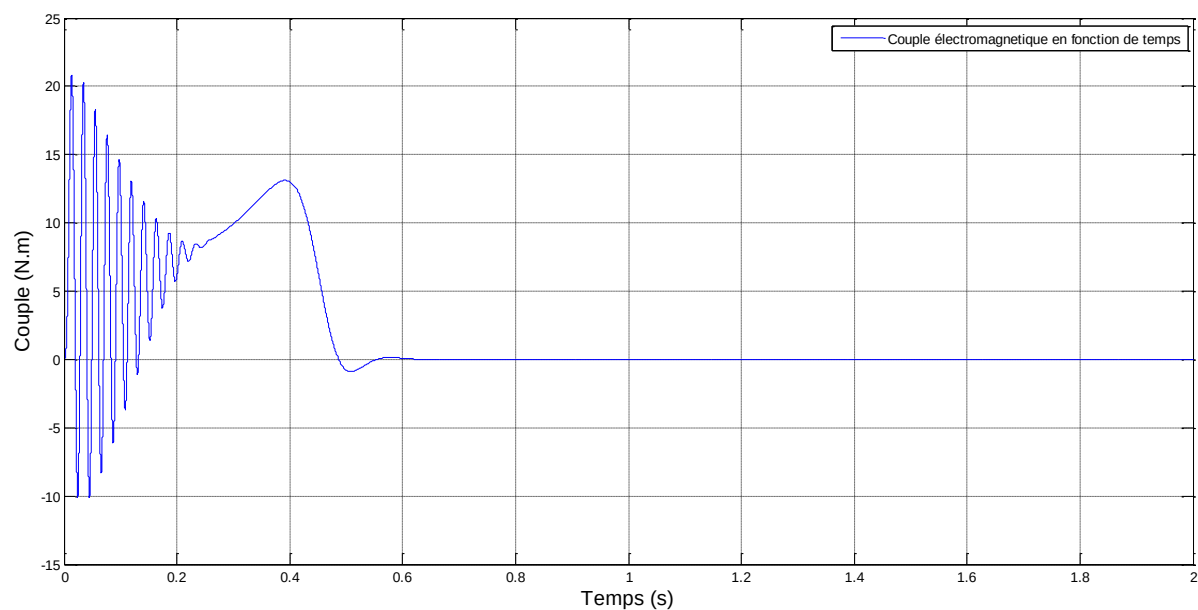
III-2 SIMULINK



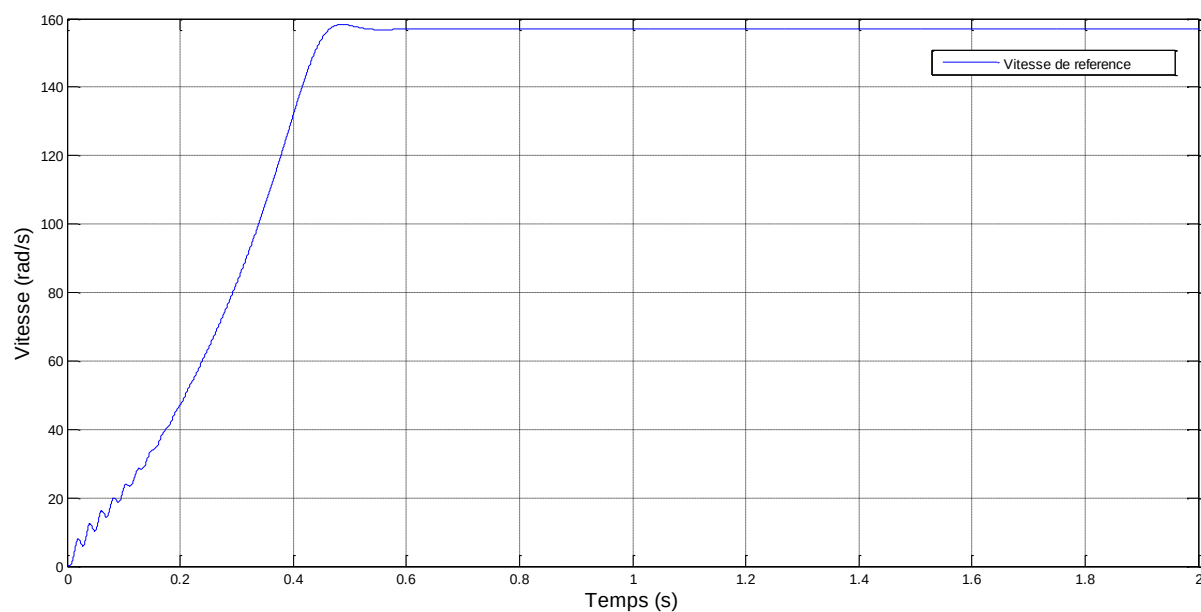
III-3 RESULTATS DE SIMULATION

III-3-1 Moteur marche à vide :

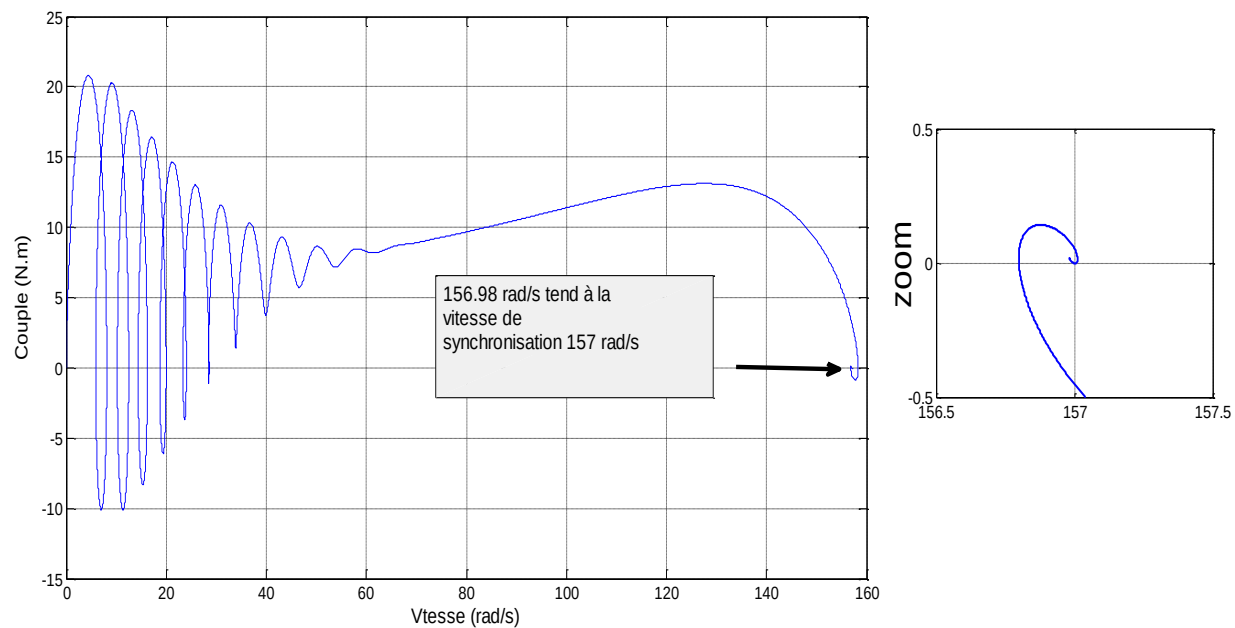
III-3-1-1 Couple électromagnétique en fonction du temps



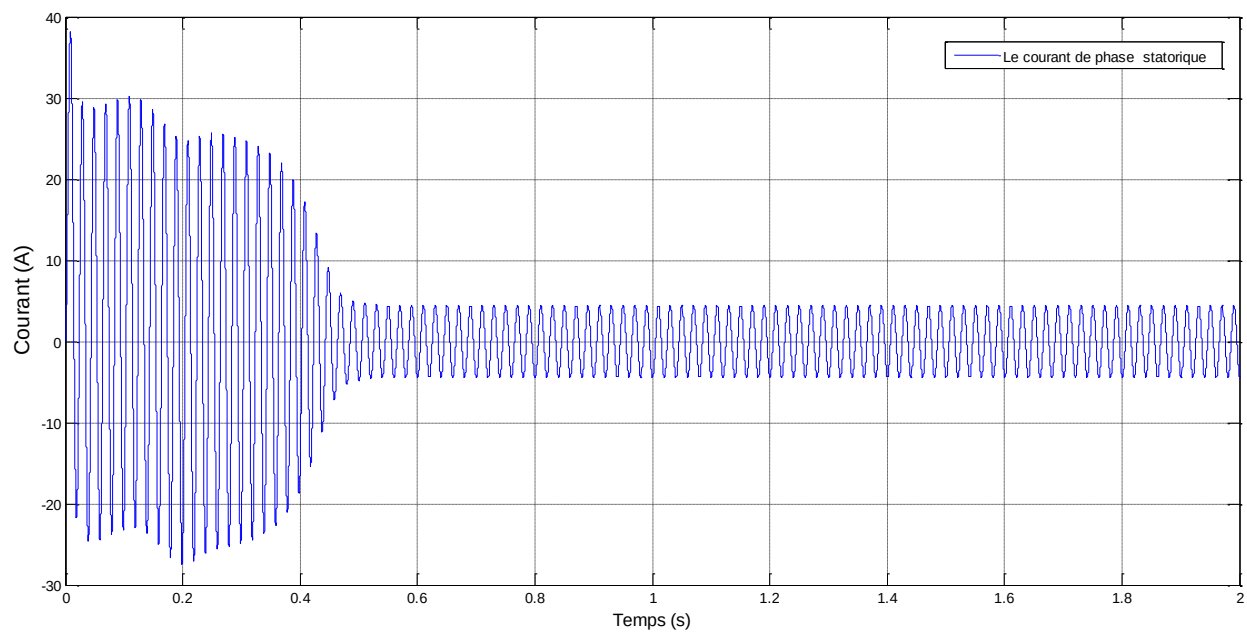
III-3-1-2 Vitesse en fonction du temps



III-3-1-3 Le couple en fonction de la vitesse

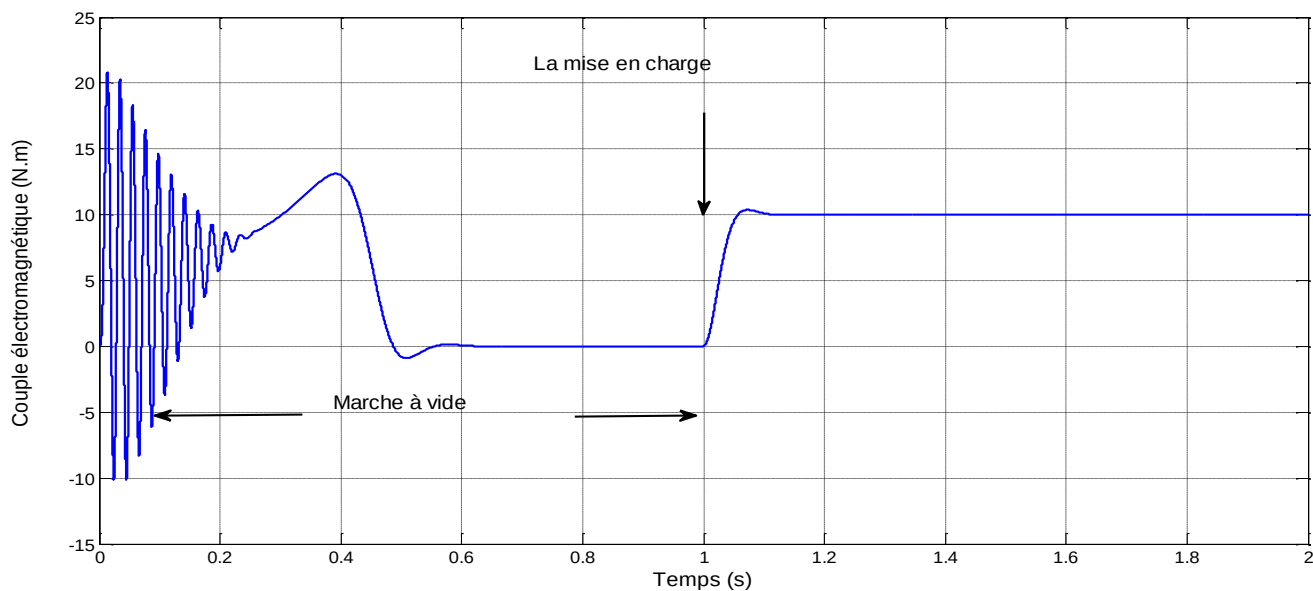


III-3-1-4 Le courant de phase statorique

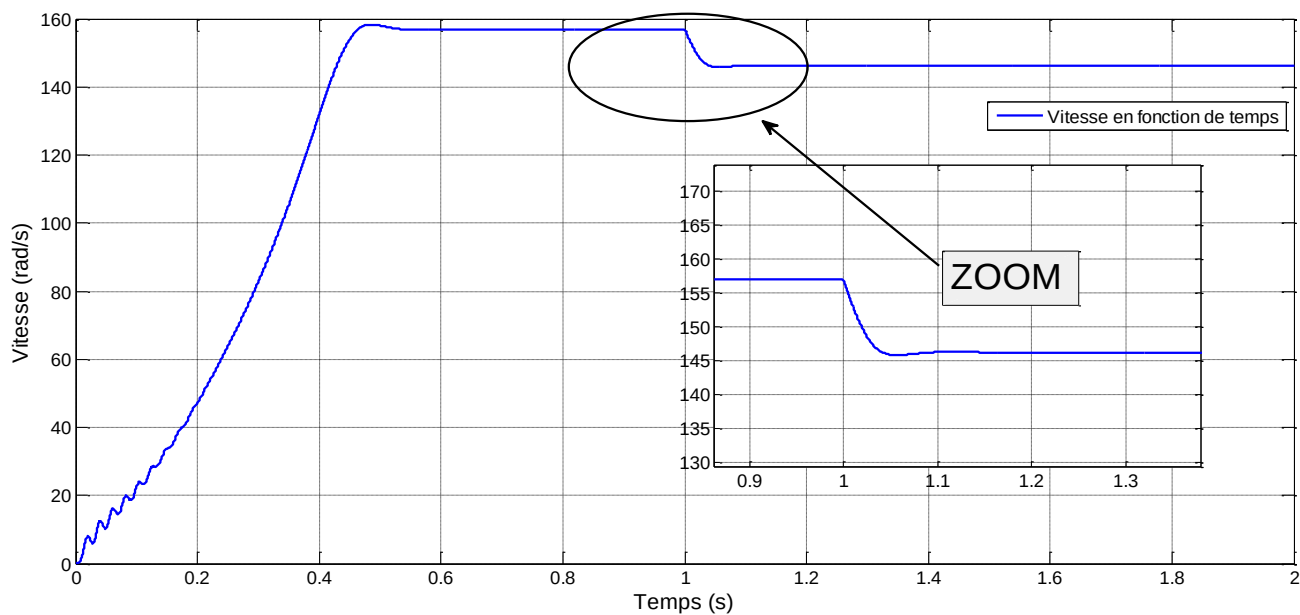


III-3-2 Moteur avec la mise en charge :

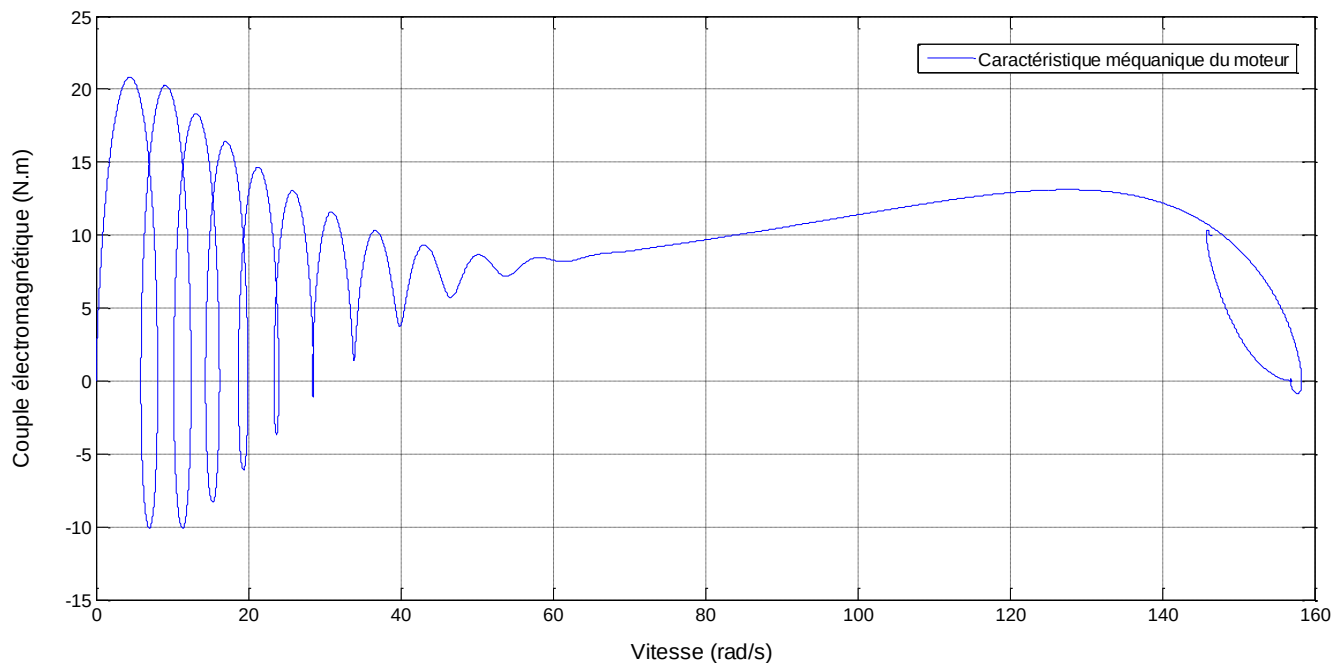
III-3-2-1 Couple électromagnétique en fonction de temps



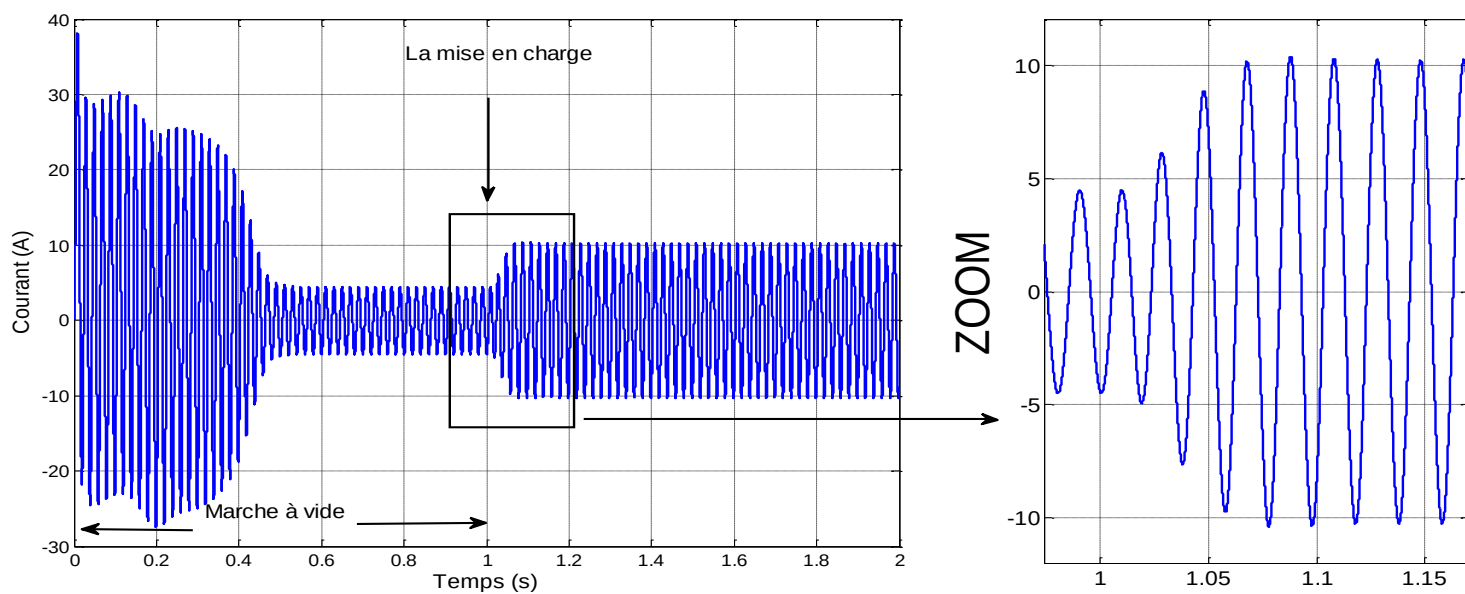
III-3-2-2 Vitesse en fonction du temps



III-3-2-3 Le couple en fonction de la vitesse



III-3-2-4 Le courant de phase statorique



Nous concluons que la forme des courbes dans le régime transitoire fait bien apparaître des ondulations de couple et une forme de courant statorique a une caractéristique en bouteille. Le couple résistant s'annule bien pour une vitesse proche de synchronisme. En chargeant le moteur à l'instant 1 s ceci provoque une diminution de la vitesse provoquée par l'augmentation du glissement. En même temps le couple augmente pour atteindre le couple de charge 10 N·m environ.

III-4 Conclusion :

D'après les différents résultats obtenus par notre simulation dans un repère lié au champ tournant, on peut conclure que l'approche de notre modèle est très pertinente, puisque notre simulation est parfaitement fidèle à la réalité physique des différents moteurs. Le courant statorique présente une caractéristique d'une bouteille, le couple a été soumis à des ondulations en régime transitoire. La caractéristique mécanique (couple en fonction de la vitesse) montre clairement : un couple résistant nul pour une vitesse proche de synchronisme.

Donc ,nous pouvons conclure par l'affirmation que notre modèle est appliqué par la simulation sous l'environnement Matlab reflète bien les caractéristiques réelles du moteur asynchrone . Ce modèle peut être appliqué pour l'étude développée des moteurs asynchrones dans les différents domaines surtout en génie électrique.

Conclusion Générale

Travail Accompli

L'entraînement des machines est assuré en très grande majorité par des moteurs asynchrones, alimentés en courant alternatif triphasé et quelque fois en monophasé .ce type de moteur s'imposent en effet dans la plupart des applications par son prix de revient avantageux ses qualités de robustesse et sa simplicité d'entretien.

Dans notre travail nous avons exposé la modélisation et la simulation d'un moteur asynchrone à cage une étude les pertes et le rendement des moteurs asynchrone triphasé sans oublier de citer les avantages, les inconvénients et domaine d'utilisation du machine asynchrone.

Finalement notre travail reste dans ces premiers pas, on espère que les personnes s'intéressent à ce problème trouvant en ce modeste travail une inspiration, leur permettant de développer d'autres idées comme machine électronique

Difficultés et Problèmes rencontrés

Dans cette partie du travail, l'étudiant soulignera les difficultés suivantes :

-  *L'absence de réalisation, et Nous a conduit simplement à une étude théorique de modélisation*
-  *Diminution de l'année universitaire à cause des grèves.*
-  *Le manque de maitrise de la simulation sur Matlab.*

Suggestions et Perspectives

On suggéré d'élargir le domaine de recherche principalement en étudiant divers système de modélisation et commande et de contrôle pour l'amélioration du fonctionnement de ces moteurs.

.

BIBLIOGRAPHIE



- [1] **Noureddine BESSOUS** « CONTRIBUTION AU DIAGNOSTIC DES MACHINES ASYNCHRONES », mémoire Magistère , 2007 .
- [2] **Haddad Salah et Charif Mourad** , « ETUDE COMPARATIVE DE LA COMMANDE VECTORIALLE ET CELLE PAR MODE DE GLISSEMENT D'UN MOTEUR ASYNCHRONE », mémoire licence LMD , 2005/2006
- [3] **BENAKBA Nabil**, « E'TUDE D'UN CONVERTISSEUR POUR MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE » , Ecole Nationale Polytechnique , 2004/2005 .
- [4] **Théodore Wildi et Gilbert SYBILLE** , « ÉLECTROTECHNIQUE » , 4 édition , 2005 (LIVRE)
- [5] « Electrotechnique », Chapitre 7 , Machine asynchrone triphasée ,© Fabrice Sincère ; version 3.0.3 (LIVRE).
- [6] MOTEUR DE RECHERCHE **GOOGLE** « COURS EN LIGNE »
- [7] **H.Bennadji – C.Hamida et R.Haoumdi**, « CONTRÔLE DIRECTE DE COUPLE DE LA MACHINE INDU CTION », mémoire licence LMD ,centre université d'eloued 2009.
- [8] **DECHOUCHA Ali Et Tarek DJEDIDI**, « COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT PAR IMPOSITION DES PÔLES D'UNE MACHINE À INDUCTION LINÉAIRISÉE PAR ORIENTATION DU FLUX », mémoire licence LMD , 2004/2005 .
- [9] **BENFERDIA Youcef Et Tahari Mohamed**, « GENERALITE SUR LA MODELISATION D'UN MACHINE A INDUCTION » , Magistere Electrotechnique , 2007.