



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

Et de la Recherche Scientifique

Université BADJI MOKHTAR-

Annaba-



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET FIN D'ETUDE LICENCE

ETUDE ET SIMULATION D'UN MOTEUR ASYNCHRONE

Présenté par :

par :

- SAOULI YUCEF
- KAHLI OMAR

Encadré

- Dr MOHAMMEDI
MOUFID

Année Universitaire : 2020/2021

INTRODUCTION GENERALE

Les progrès récemment réalisés dans les domaines de l'électronique de puissance et de la commande numérique ont permis depuis peu l'essor des variateurs de vitesse pour les machines à courant alternatif. Aujourd'hui ces machines peuvent remplacer celles à courant continu dans la plupart des entraînements à vitesse variable.

Les trois machines "à courant continu, synchrone, asynchrone" ont de tout temps servi les besoins de l'industrie traditionnellement, ces machines électriques ont été commandées manuellement et les équipements pour ces opérations sont complexes et coûteux. Le développement des convertisseurs et l'avancée rapide des semi-conducteurs ont permis durant ces trois dernières décennies une intense activité de recherche sur le développement de l'entraînements électrique à vitesse variable des machines électriques.

La machine asynchrone justifie le grand intérêt de l'industrie vis-à-vis de ce type de machine de plus, les développements récents de l'électronique de puissance et de commande permettent aux moteurs asynchrones d'avoir les mêmes performances que celles des machines à courant continu.

En revanche, les machines à courant alternatif (*synchrone et asynchrone*) possèdent de nombreux avantages. L'absence de collecteur leur permet d'avoir un entretien réduit, une fiabilité accrue et une vitesse de fonctionnement élevée.

L'utilisation de la machine asynchrone est en pleine expansion grâce aux avantages qu'elles offrent sur les autres types de machine électrique le faible coût la masse réduite la robustesse et la simplicité de construction.

Dans ce contexte, notre mémoire sera exposé de la manière suivante:

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art sur la machine asynchrone basant sur une synthèse bibliographique.

Dans le deuxième chapitre nous présentons, l'étude et la modélisation du MAS, avec la mise en équations électrique, magnétique et mécanique.

Le dernier chapitre est consacré à la simulation du moteur asynchrone sous « **MATLAB-Simulink** ».

I.1 Introduction

Le moteur asynchrone, ou moteur à induction, est le moteur le plus utilisé dans la plupart des entraînements électrique. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple, robuste mécanique et facile à construire, leur stator est relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constante, il tourne à vitesse peu différente de la vitesse de synchronisme; c'est lui qui est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante. Il permet aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable et la place qu'il occupe dans ce domaine ne cesse de croître.[1]

Ce chapitre, débute par un rappel sur la constitution de la machine asynchrone ainsi que le principe de fonctionnement ; vers les caractéristiques et les applications de la MAS arrivons aux avantages et inconvénients.

I.2 Classification de machines électriques tournantes

Les moteurs électriques sont généralement classés selon le type du réseau électrique dans Le quelle le moteur est relié: moteurs à courant continu (DC) et des moteurs à courant alternatif (CA). Les moteurs avec alimentation AC sont subdivisés en deux synchrones et asynchrones. La différence fondamentale entre une machine à induction et une machine synchrone réside dans la vitesse du rotor de la machine à induction sous charge ne coïncide pas (est asynchrone) avec la vitesse du champ magnétique, généré par la tension d'alimentation.

Les moteurs à induction sont divisés en deux catégories principales: monophasé et triphasé, le premier type de moteurs à induction n'est pas étudié dans ce travail. Les moteurs à induction triphasés sont classés en fonction du type du rotor : rotor à cage et rotor bobiné. La classification principale est illustrée à la figure (I.1) [2].

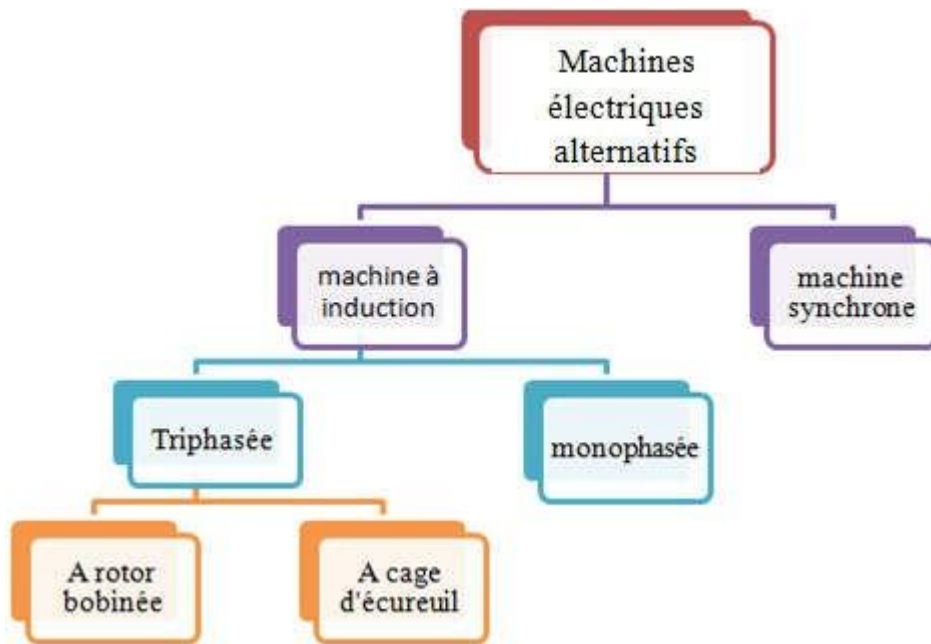


Figure I.1 : classifications de machines électriques alternatives [2].

I.3 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor (figure I.2). Contrairement aux machines synchrone et à courant continu, seul les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation dont les tensions (amplitude et fréquence) définissent l'état magnétique de l'entrefer. Les enroulements du rotor sont raccordés sur eux-mêmes. Le moteur asynchrone ne possède donc ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Pour ce qui est du flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique, il est produit à partir de l'induction. La figure (I.2) représente la machine asynchrone. Du point de vue mécanique, la machine asynchrone est subdivisée en trois parties distinctes :

- ❖ **Le stator** : partie immobile est la partie où est connectée l'alimentation électrique
- ❖ **Le rotor** : partie tournante, elle permet de mettre en rotation la charge magnétique
- ❖ **Les paliers** : organes de support, ces derniers constituent la partie mécanique
Permettant ainsi la mise en rotation de l'arbre moteur. [4]
- ❖ **L'entrefer** : Cette partie est amagnétique (c'est le vide entre le rotor et le stator)

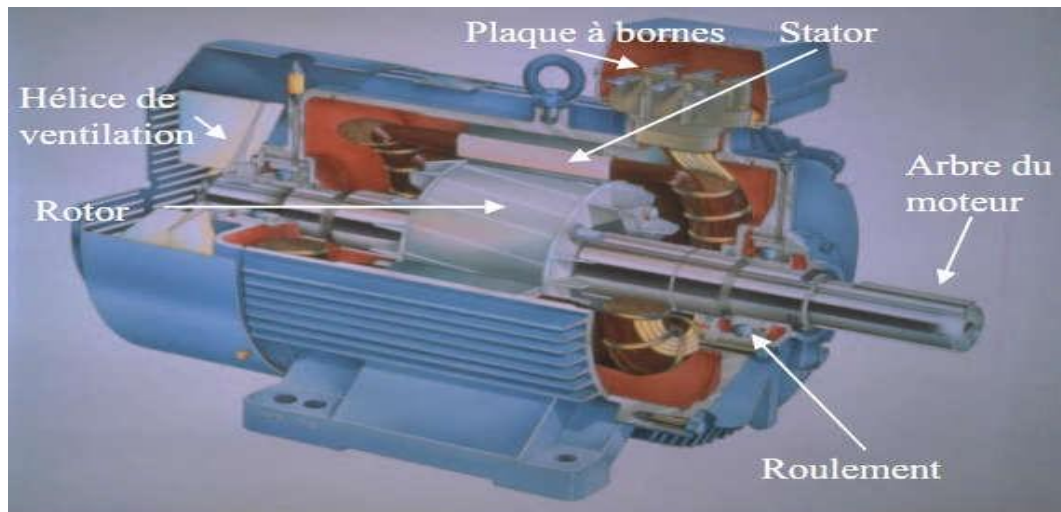


Figure I.2 : constitution de la machine asynchrone [4].

•Le stator

C'est la partie fixe du moteur. Une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces (de l'ordre de 0,5 mm d'épaisseur) en acier au silicium. Les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Le « feuilletage » du circuit magnétique réduit les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Les tôles sont munies d'encoches dans les quelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant (trois enroulements dans le cas moteur triphasé). Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse de rotation. [5]



Figure I.3 : schéma présente l'enroulement du stator [5].

•Le rotor

C'est l'élément mobile du moteur. Il est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Cet élément, de par sa technologie, permet de distinguer deux familles de moteurs asynchrone : ceux dont le rotor est dit « à cage », et ceux dont le rotor bobiné est dit « à bagues ». [5]



Figure I.4 : Vue d'un rotor à cage [5].



Figure I.5 : Vue d'un rotor bobiné [5].

•L'entrefer

Cette partie amagnétique (c'est un vide entre le stator et le rotor) est d'épaisseur la plus faible (de l'ordre du millimètre), cette épaisseur réduite rend la taille de l'entrefer sensible aux variations dues aux encoches statoriques. Ceci crée des harmoniques dites d'encoches, pour les réduire, les encoches sont fermées par des cales magnétiques qui maintiennent le bobinage. [4]

•Les organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie

centrale qui sert de support au corps du rotor il est supporté par un ou plusieurs paliers. ces derniers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre.

Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements [4].

Pour les machines de petite et moyenne puissance. Dans La plupart du temps on trouve aussi un ventilateur de refroidissement [4].

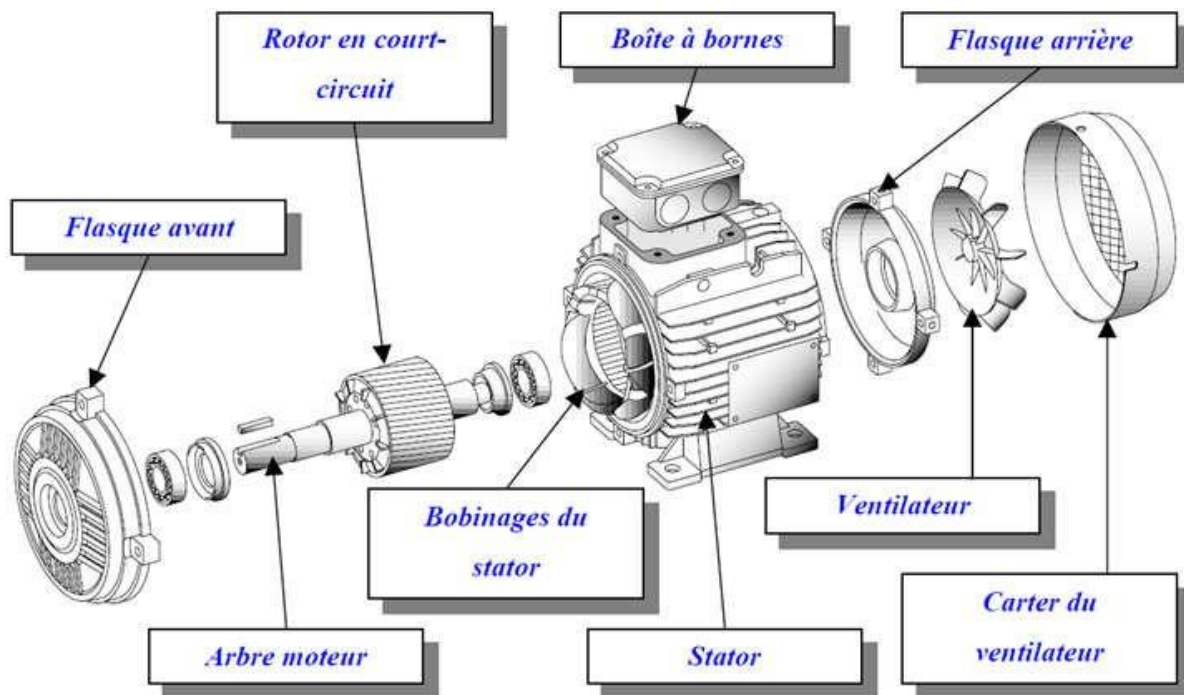


Figure I.6 : Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone [4].

I.4 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur la loi de l'induction ; la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court circuit.

Ce fonctionnement repose sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créée par les courants triphasés fournis à l'enroulement statoriques par le réseau, et

des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

Lorsque le rotor tourne à une vitesse N_c différente du synchronisme, l'application de la loi de FARADAY à un des enroulements rotorique montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuité sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine lorsque le champ est sinusoïdale. La vitesse de rotation est :

$$n_1 = \frac{f}{p} \quad (\text{I.1})$$

Où : f : la fréquence d'alimentation.

P : représente le nombre de pair de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_1) diffère de celle du rotor (n), c'est-à-dire lorsque $n \neq n_1$, car dans le cas contraire, ($n = n_1$), le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

Le rapport $g = \frac{n_1 - n}{n_1}$ est appelé glissement de la machine asynchrone [6].

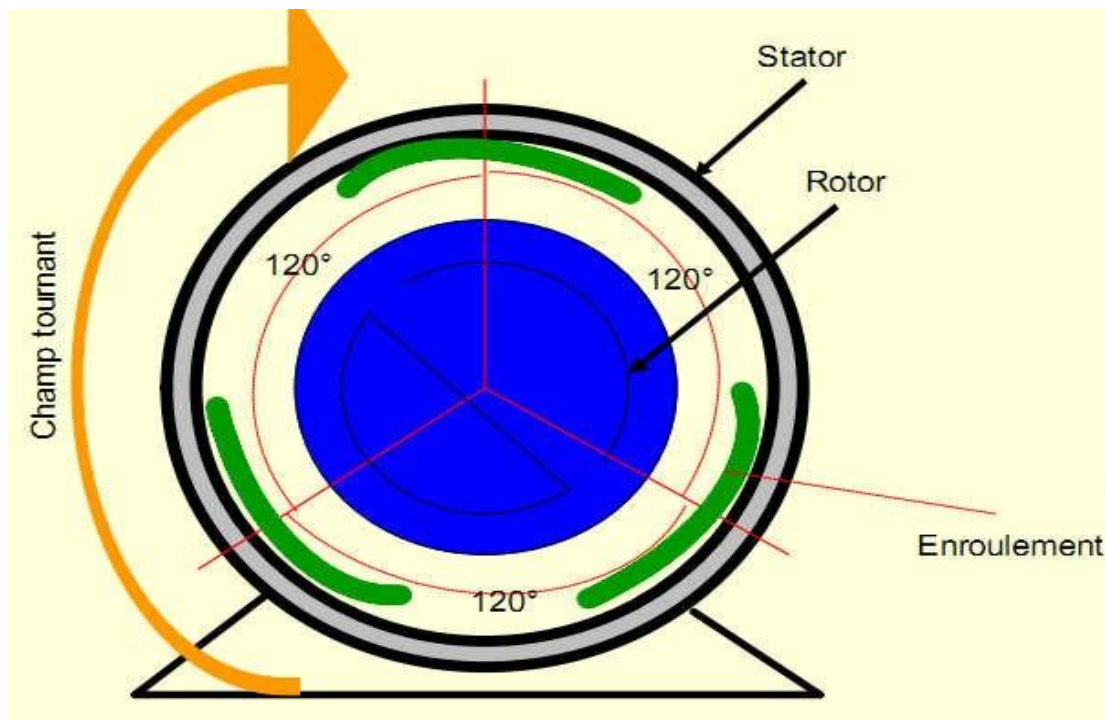


Figure I.7 : Schéma présent principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone [6].

I.5 Bilan des puissances

Le principe de MAS consiste à transmettre une puissance absorbée (électrique) vers une puissance utile (mécanique) passe par quelques étapes comme sur la figure ci-dessous [6] :

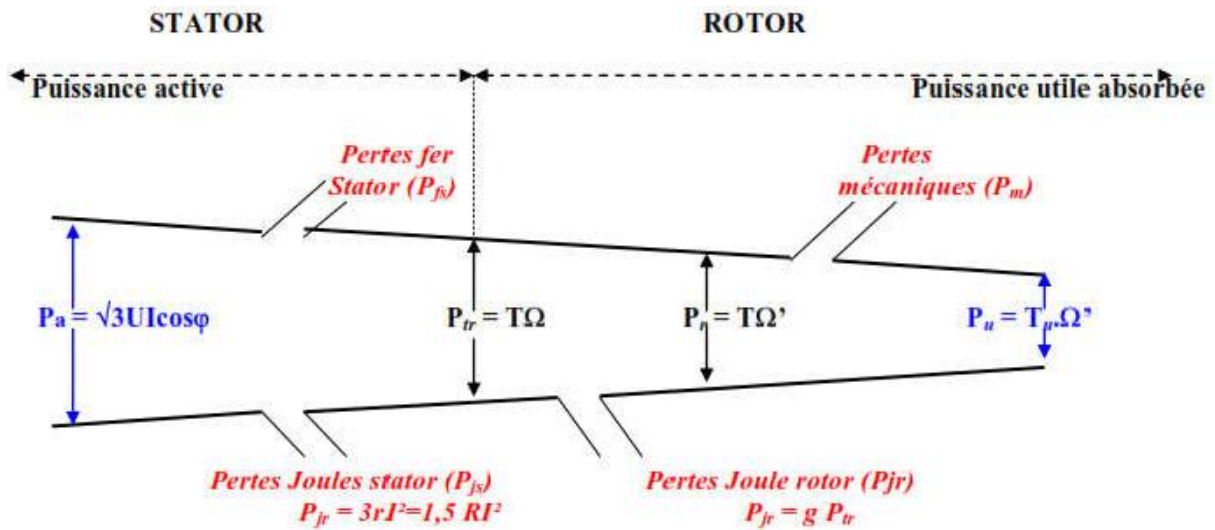


Figure 1.8 : Diagramme et bilan de puissance d'une machine asynchrone. [3]

Avec :

Ω : vitesse de synchronisme.

$\Omega' = G_r$: vitesse de rotor.

$T = C_e$: couple transmis au rotor ou couple électromagnétique.

$T_u = C_u$: couple utile.

P_{tr} : Puissance électromécanique transmise au rotor.

P_r : Puissance mécanique du rotor.

R : résistance entre phase du stator.

R : résistance d'un enroulement.

P_N : perte mécanique.

Perte joule rotor : $P_{jr} = C_e * (\Omega - \Omega') = C_e \Omega [(\Omega - \Omega') / \Omega] = g P_{tr}$ (I.2)

I.6 Plaque signalétique

Chaque machine électrique dispose d'une plaque signalétique qui constitue une sorte de carte d'identité du moteur [8].

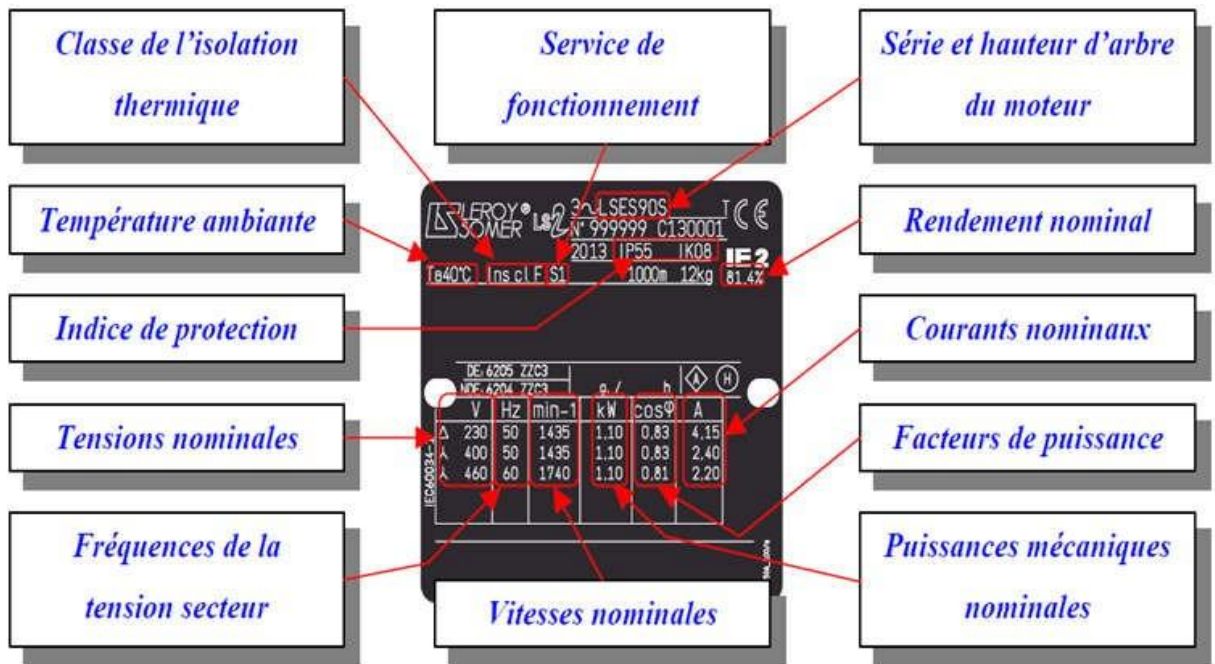


Figure I.9 : Plaque signalétique d'un moteur asynchrone [8].

I.7 Le bobinage d'un moteur asynchrone

Les bobines sont logées dans les encoches du stator. Le branchement des bobines sur le réseau se fait au niveau de la plaque à borne située au dessus du moteur. On dispose ainsi de 6 connexions, une pour chacune des extrémités des trois bobines. Les bornes sont reliées aux bobines selon le schéma suivant [9].

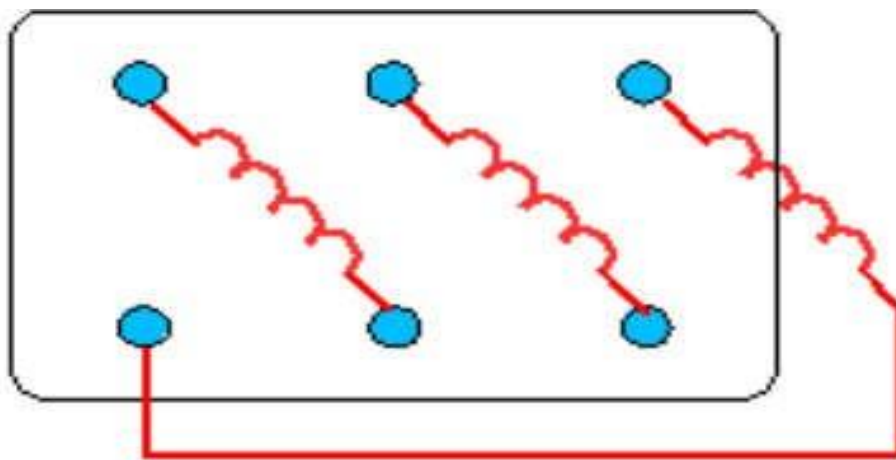


Figure I.10 : Branchements des bobines internes de la machines asynchrone [9].

- **Plaque à bornes**
- **Branchement étoile ou triangle**

Il y a deux possibilités de branchement du moteur au réseau électrique triphasé. Le montage en étoile et le montage en triangle comme la figure ci-dessous montre [9].

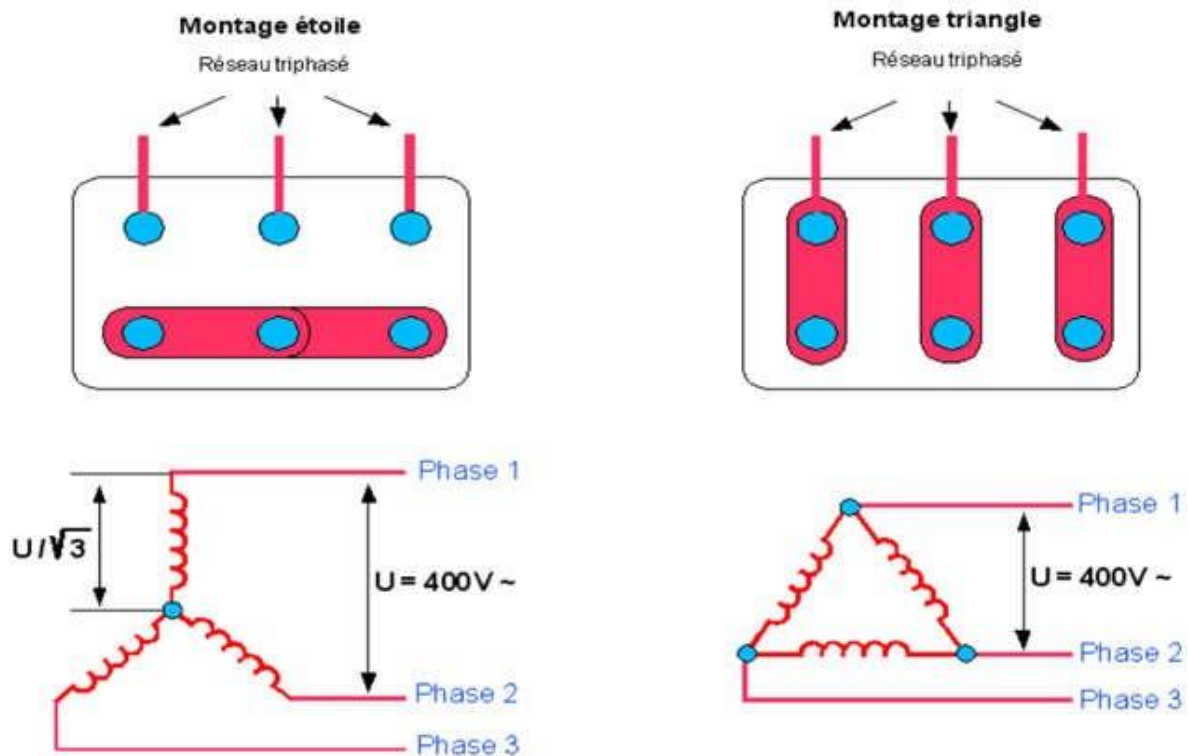


Figure I.11 : Les couplages des moteurs asynchrones (étoile et triangle) [9].

I.8 Caractéristiques électromécaniques

- **Puissance nominale**

La Puissance nominale est la Puissance mécanique disponible sur l'arbre moteur à sa vitesse nominale elle s'exprime en kilowatt (kW). On l'appelle la puissance utile la puissance d'un moteur électrique est liée à son dimensionnement et en particulier à sa hauteur d'axe en relation avec la vitesse [10].

- **vitesse nominale**

La vitesse nominale est la vitesse de l'arbre, il faut distinguer la vitesse du champ tournant du stator, de la vitesse de synchronisme $n_c = \frac{f}{p}$ (I.3)

n_s : vitesse de synchronisme, en [tr/s].

f : fréquence de réseau Hz.

p : nombre de paires de pôles.

La vitesse de rotation du rotor est inférieure au celle du champ tournant [10].

- **Intensité nominale**

L'intensité nominale est la valeur de l'intensité à puissance nominale donnée pour la tension d'alimentation selon le couplage des enroulements [10].

- **Facteur de puissance $\cos \varphi$ et rendement η**

Le rendement et le $\cos \varphi$ évoluent en fonction de la charge du moteur La puissance utile sur l'arbre du moteur en triphasé est donné par la relation [14]:

$$P_u = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \eta \quad (\text{I.4})$$

- **Le courant de démarrage**

Les moteurs triphasés asynchrones réclament un fort courant de démarrage direct I_d . En fonction du modèle utilisé ce courant peut atteindre une valeur de 3 à 15 fois supérieure à celle du courant d'emploi assigné. Comme valeur de base on peut utiliser une valeur de 7 à 8 fois supérieure à celle du courant assigné du moteur, Ceci présente l'inconvénient. Ce qui signifie que pendant le démarrage du moteur, le réseau d'alimentation doit être dimensionné pour fournir cette plus forte intensité [11].

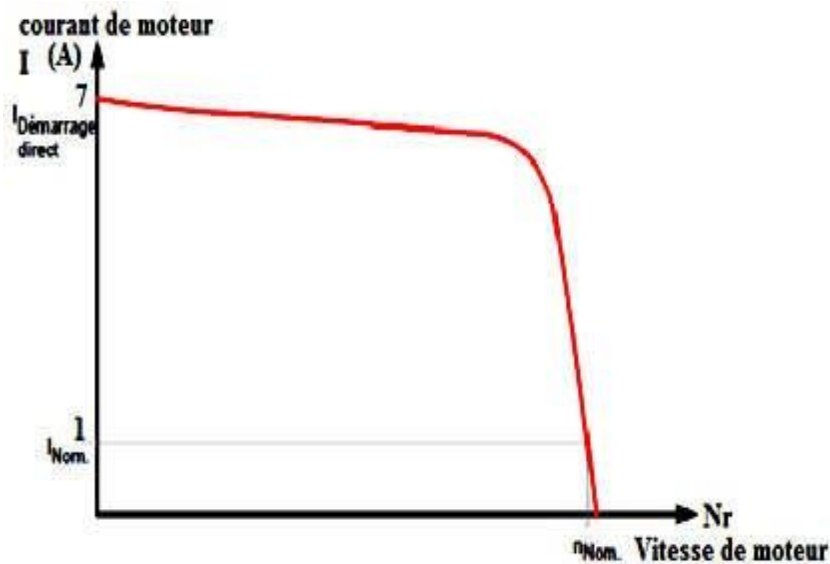


Figure I.12 : Évolution caractéristique du courant de démarrage d'un moteur triphasé asynchrone.

• Le couple (C)

Considérons un moteur à cage, alimenté par une source triphasée dont la tension et la fréquence sont fixes. A mesure qu'on augmente la charge mécanique, la vitesse baisse progressivement. Cependant, lorsque le couple atteint la valeur critique appelée point de décrochage, la vitesse chute subitement et le moteur s'arrête. Il existe donc une relation entre le couple développé par le moteur et sa vitesse. Cette relation n'est pas simple; c'est pourquoi on préfère la présenter sous forme de courbe plutôt que par une équation.

On montre à la (Fig. I.13) une courbe du couple en fonction de la vitesse pour un moteur de 1 kW, de construction conventionnelle. Si C désigne la valeur du couple à pleine charge, on voit que le couple de démarrage vaut $1,5 C$. A mesure que la vitesse croît, le couple diminue, et passe par un minimum avant d'augmenter de nouveau. Il atteint une valeur maximale de $2,5 C$ à 80 % de la vitesse synchrone. Passé ce point, le couple diminue, tandis que la vitesse continue à augmenter. On passe alors par le point d'opération normal (C, n) de pleine charge, avant d'atteindre la vitesse synchrone N_s , où le couple est nul.

Les moteurs de petite puissance (10 kW et moins) atteignent leur couple de décrochage à une vitesse n_d qui est d'environ 80 % de la vitesse synchrone ; les machines de grosse puissance (1000 kW et plus) décrochent à une vitesse de l'ordre de 0,98 N_s .

La forme de la courbe couple/vitesse dépend donc de la grosseur du moteur et de ses caractéristiques particulières [12].

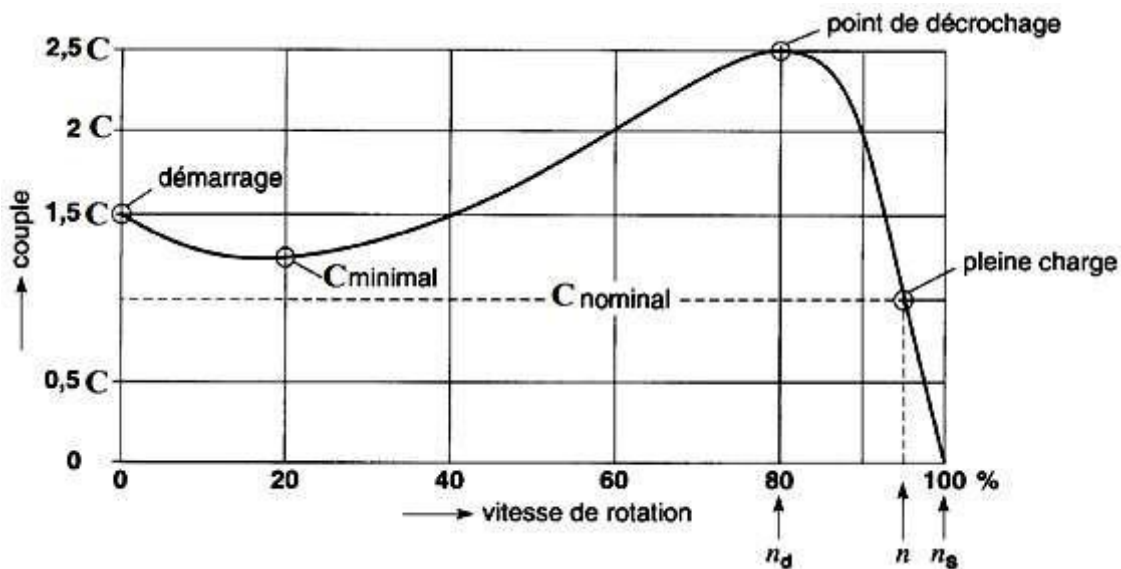


Figure I.13 : Courbe typique du couple en fonction de la vitesse d'un moteur asynchrone triphasé de 1 KW.

I.9 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone

Comme les autres machines électriques, la MAS présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs : sa structure, sa stratégie de commande et ses applications [13].

- **Avantages**

Parmi les avantages de la machine asynchrone et notamment en fonctionnement moteur, on peut citer [13] :

- sa robustesse mécanique.
- son faible coût.
- l'absence d'entretien constant.

- **Inconvénients**

- L'inconvénient majeur du moteur asynchrone est relié à l'absorption du réactif qu'il faut parfois compenser, à des pertes de glissement et surtout à la nécessité de fonctionner pratiquement au voisinage de la vitesse de synchronisme.
- Le courant de démarrage plus élevé (5 à 8 fois le courant nominal).
- Difficile de contrôler la vitesse [13].

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté quelques généralités sur la machine asynchrone ses différents constituants ainsi que son principe de fonctionnement, ce qui va contribuer à entamer les autres chapitres et mettre en évidence le modèle mathématique de la MAS qui sera l'objectif de la deuxième partie.

II.1 Introduction

Compte tenu que la répartition des enroulements statoriques et la géométrie propre de la machine sont très complexes, il est généralement nécessaire de considérer des hypothèses simplificatrices pour avoir un modèle simple de la machine.

II.2 Modélisation de la machine asynchrone (MAS):

L'étude de cette machine traduit les lois de l'électromagnétisme dans le contexte habituel des hypothèses simplificatrices [14] :

- L'entrefer constant.
- L'effet d'encoche négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Pertes ferromagnétiques négligeables.

L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Parmi les conséquences importantes des ces hypothèses on peut citer :

- L'association du flux.
- La constance des inductances propres.
- L'invariance des résistances statoriques et rotoriques.

La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques. [14]

La représentation schématique de la MAS dans l'espace électrique est donnée sur la Fig. (II.14), elle est munie de six enroulements. [15]

Le stator de la machine est formé de trois enroulements fixes décalés de 120° dans l'espace et traversés par trois courants variables.

Le rotor peut être modélisé par trois enroulements identiques décalés dans l'espace de 120° , ces enroulements sont en court-circuit et la tension à leurs bornes est nulle.

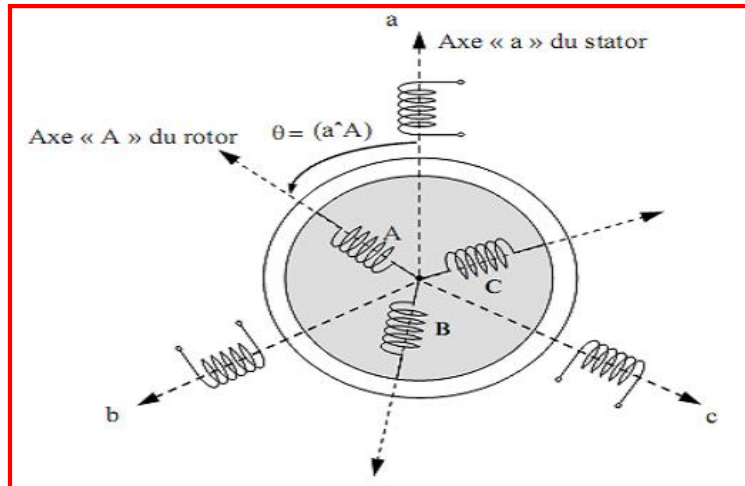


Figure II.1: Représentation schématique d'une machine asynchrone (MAS).

A. Equations électriques:

Les six enroulements (a, b, c, A, B, C) représentés sur la figure (II.14) obéissent aux équations matricielles suivantes. [16]

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\psi_s] \quad (\text{II.1})$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\psi_r] = [0 \ 0 \ 0]^T \quad (\text{II.2})$$

B. Equations magnétiques:

Les hypothèses simplificatrices citées antérieurement conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants de la machine asynchrone, ces relations s'écrivent matriciellement comme suit [17] :

Pour le stator :

$$[\psi_s] = [L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \quad (\text{II.3})$$

Pour le rotor :

$$[\psi_r] = [L_r][i_r] + [M_{sr}][i_s] \quad (\text{II.4})$$

On désigne par :

$$[Ls] = \begin{bmatrix} Ls & Ms & Ms \\ Ms & Ls & Ms \\ Ms & Ms & Ls \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$$[Lr] = \begin{bmatrix} Lr & Mr & Mr \\ Mr & Lr & Mr \\ Mr & Mr & Lr \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$$[Ls] = [M]^T = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + 2\frac{\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Pour le stator :

$$[Vsabc] = [Rs][isabc] + \frac{d}{dt}\{[Ls][isabc] + [Msr][irabc]\} \quad (\text{II.8})$$

Pour le rotor :

$$[Vrabc] = [Rr][irabc] + \frac{d}{dt}\{[Lr][irabc] + [Mrs][isabc]\} \quad (\text{II.9})$$

C. 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) [18]

$$Cem = p[isabc]^T \frac{d}{dt}[Msr][irabc] \quad (\text{II.10})$$

L'équation du mouvement de la machine est :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = Cem - Cr - fr\Omega \quad (\text{II.11})$$

II.3 Transformation du système triphasé en biphasé:

La mise en équation des moteurs triphasés aboutit à des équations différentielles à coefficients variables.

L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse, vu le grand nombre de variable.

On utilise alors des transformations qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants.

Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles.

Ceci permet d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé. [19]

II.4 Transformation CLARKE/CONCORDIA:

Le but de l'utilisation de cette transformation c'est de passer d'un système triphasé abc vers un système diphasé α, β . Il existe principalement deux transformations: Clarke et Concordia.

La transformation de Clarke conserve l'amplitude des grandeurs mais pas la puissance ni le couple (On doit multiplier par un coefficient $3/2$). Tandis que celle de Concordia, qui est normée, elle conserve la puissance mais pas les amplitudes. [20]

Transformation de Concordia	Transformation de Clarke
Passer d'un système triphasé abc vers un système diphasé $\alpha \beta$	
$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{T_{23}} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \text{ c.-à-d. } [x_{\alpha\beta}] = T_{23} [x_{abc}]$ $\text{Avec } T_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{23}} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \text{ c.-à-d. } [x_{\alpha\beta}] = C_{23} [x_{abc}]$ $\text{Avec } C_{23} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$
Passer d'un système diphasé $\alpha \beta$ vers un système abc	
$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \xrightarrow{T_{32}} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \text{ c.-à-d. } [x_{abc}] = T_{32} [x_{\alpha\beta}]$ $\text{Avec } T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{32}} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \text{ c.-à-d. } [x_{abc}] = C_{32} [x_{\alpha\beta}]$ $\text{Avec } C_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$

Tableau II.2: Passage d'un système triphasé au système biphasé.

Le choix de matrice de passage non norme (Clarke) est bien pratique en commande où l'on traite des grandeurs $d q$ (I_{ds}, I_{qs} que l'on verra par la suite). En effet, cela permet, par exemple, d'apprécier directement le module du courant qui est absorbé par le moteur, sans avoir à passer par un coefficient multiplicateur.

Mathématiquement parlant, le choix d'une matrice normée (Concordia) est souvent utilisé pour des raisons de symétrie de transformation directe et inverse.

Nous allons utiliser la transformation de Concordia dans notre modélisation. Son application aux équations de la machine écrites ci-dessous [21] donne :

$$T_{23}[v_{abc}s] = [v\alpha\beta s] = T_{23} \left\{ R_s [i_{abc}s] + \frac{d}{dt} [\psi_{abc}s] \right\} \quad (\text{II.12})$$

$$[v\alpha\beta s] = R_s T_{23} [i_{abc}s] + \frac{d}{dt} T_{23} [\psi_{abc}s] \quad (\text{II.13})$$

$$[v\alpha\beta s] = R_s [i_{abc}s] + \frac{d}{dt} [\psi\alpha\beta s] \quad (\text{II.14})$$

On a alors réduit le système de trois (3) équations à un système de deux (2) équations.

De même pour le rotor :

$$[v\alpha\beta r] = R_r [i_{abc}r] + \frac{d}{dt} [\psi\alpha\beta r] \quad (\text{II.15})$$

Ainsi que pour l'écriture des flux en fonction des courants. L'intérêt pour les flux, c'est que les matrices 3*3 des inductances vont être réduites à des matrices 2*2.

On a alors l'apparition des Inductances cycliques :

$$L_s = l_s - m_s \quad (\text{II.16})$$

$$L_r = l_r - m_r \quad (\text{II.17})$$

$$M = \frac{2}{3} m_{sr} \quad (\text{II.18})$$

$$\text{Alors } \begin{bmatrix} \varphi\alpha\beta s \\ \varphi\alpha\beta r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M.P(-\theta) \\ 0 & L_s & L_r & 0 \\ M.P(-\theta) & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i\alpha\beta s \\ i\alpha\beta r \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

$$\text{Où la matrice } P(\theta) \text{ est la matrice de rotation : } p(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

On dispose à présent d'une modélisation de la machine asynchrone dans deux repères séparés : les grandeurs statoriques sont exprimées dans le repère $\alpha \beta$ stator et les grandeurs rotoriques dans le repère $\alpha \beta$ rotor.

Il faut exprimer toute la modélisation dans un repère commun. En effet, si l'on examine de plus près la matrice des inductances [21]

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & M.P(-\theta) \\ 0 & L_s & L_r & 0 \\ M.P(-\theta) & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

On s'aperçoit que les grandeurs statoriques sont liées aux grandeurs rotoriques à travers l'angle, on choisit alors de transformer les deux grandeurs statoriques et rotoriques vers un repère commun dit « d q » et ceci à l'aide de deux, la transformation de Concordia ou de Clarke qui constitue la transformation de Park.

Alors on peut écrire toute grandeur dans le repère (dq) on utilisant le produit matricielle suivant :

$$\text{Avec : } \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

II.5 Transformation de Park:

La transformation de Park a pour but de traiter une large gamme de machines de façon unifiée en un modèle unique.

Cette conversion est appelée souvent transformation des axes, fait correspondant aux deux enroulements de la machine originale suivie d'une rotation, les enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique.

Cette transformation ainsi, pour l'objectif de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de l'angle de rotation. [22]

- **Différents repères:**

L'isotropie du moteur asynchrone permet une souplesse dans la composition des équations de la machine selon deux axes à l'aide des composantes de Park, cela nécessite l'utilisation d'un repère qui permet de simplifier au maximum les expressions analytiques.

Il existe différentes possibilités pour le choix du repère d'axes, se ramène pratiquement à trois référentiels (systèmes biphasés) orthogonaux : [22]

- Référentiel immobile par rapport au stator : $(\alpha-\beta) \rightarrow \omega=0$
- Référentiel immobile par rapport au rotor : $(x-y) \rightarrow \omega = \omega_r$
- Référentiel immobile par rapport au champ tournant : $(d-q) \rightarrow \omega = \omega_s$

La transformation de Park est souvent définie par la matrice normalisée [P] comme suit [23] :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + 2\frac{\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + 2\frac{\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

$$\begin{bmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{bmatrix} = [M]^T = \begin{bmatrix} Xu \\ Xw \\ X0 \end{bmatrix} \text{ avec : } [P]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + 2\frac{\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + 2\frac{\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

II.6 Application de la transformation de Park au modèle de la MAS:

A. Equations électriques:

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \psi_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \quad (\text{II.25})$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \psi_{sq} + \omega_s \psi_{sd} \quad (\text{II.26})$$

$$0 = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \psi_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \quad (\text{II.27})$$

$$0 = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \psi_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} \quad (\text{II.28})$$

B. Equations magnétiques:

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \quad (\text{II.29})$$

$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \quad (\text{II.30})$$

$$\psi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \quad (\text{II.31})$$

$$\psi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \quad (\text{II.32})$$

Avec : $L_s = l_s - M$, $L_r = l_r - M$, $M = \frac{3}{2}M_0$

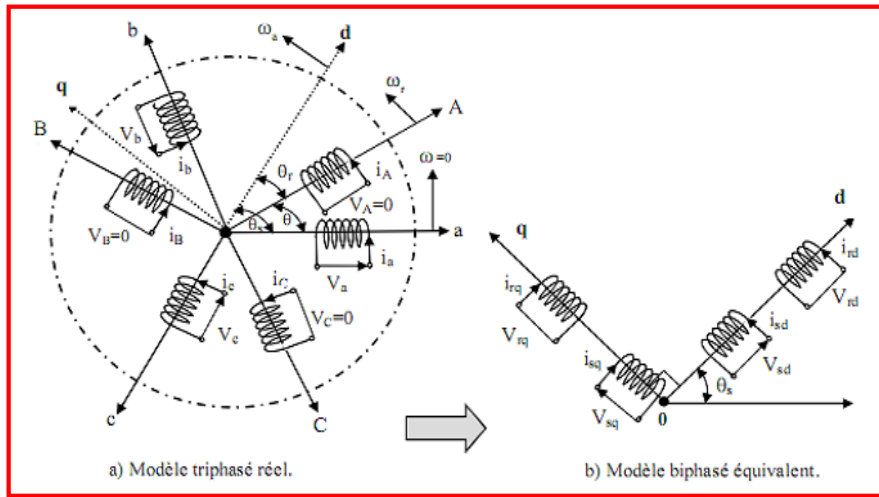


Figure II.3: Représentation de la machine asynchrone triphasée et sa machine biphasée.

C. Equation mécanique:

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} (\psi_{rd} i_{sd} - \psi_{rq} i_{sd}) \tag{II.33}$$

II.7 Alimentation de la machine asynchrone:

Pour une machine asynchrone alimentée en tension, si on considère le courant statorique i_s et le flux ψ_r comme variables d'état, et la pulsation ω_s et les tensions V_{sd} V_{sq} , comme grandeur de commande et le couple C_r comme une perturbation, on aura le schéma bloc suivant Figure (II.16).

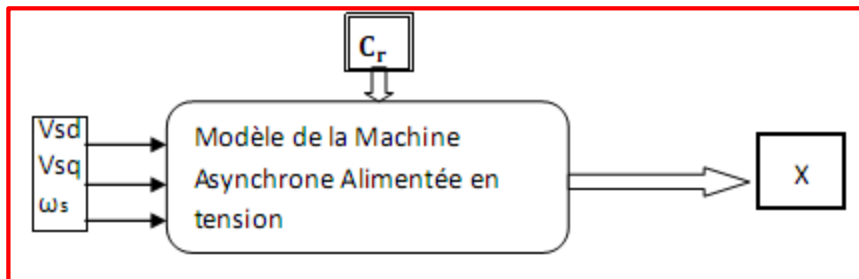


Figure II.4: Schéma synoptique de la machine asynchrone

Le vecteur de sortie [X], peut avoir une des formes des différentes expressions :

$$[X] = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq}]^T \tag{II.34}$$

$$\text{Ou bien : } [X] = \left[\Psi_{sd} \Psi_{sq} \Psi_{rd} \Psi_{rq} \right]^T \quad (\text{II.35})$$

$$\text{Ou bien : } [X] = \left[\Psi_{sd} \Psi_{sq} i_{rd} i_{rq} \right]^T \quad (\text{II.36})$$

$$\text{Ou bien : } [X] = \left[i_{sd} i_{sq} \Psi_{rd} \Psi_{rq} \right]^T \quad (\text{II.37})$$

$$\text{Ainsi notre choix est porté sur le vecteur: } [X] = \left[i_{sd} i_{sq} \Psi_{rd} \Psi_{rq} \right]^T \quad (\text{II.38})$$

II.8 Représentation d'état du modèle de la MAS:

La forme générale de l'équation d'état s'écrit de la façon suivante :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (\text{II.39})$$

Avec :

$$[X] = \left[i_{sd} i_{sq} \Psi_{rd} \Psi_{rq} \right]^T \quad (\text{II.40})$$

$$[U] = [V_{sd} V_{sq}]^T \quad (\text{II.41})$$

Alors, le modèle de la machine asynchrone alimentée en tension dans un repère (d q) tournant à la vitesse synchrone ω_s .

II.9 Mise en équation d'état:

Les phénomènes transitoires dans les machines asynchrones peuvent être étudiés à partir du modèle généralisé dans un référentiel lié au stator (α, β). Considérons les tensions ($V_{s\alpha}, V_{s\beta}$) comme grandeurs de commande, les courants statoriques ($i_{s\alpha}, i_{s\beta}$), les flux rotoriques ($\Phi_{r\alpha}, \Phi_{r\beta}$), la vitesse mécanique Ω_r comme variables d'état et le couple résistant comme perturbation.

Soit le système d'équations statoriques et rotoriques exprimées dans le repère (α, β).

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = r_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\alpha} \\ V_{s\beta} = r_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\beta} \\ V_{r\alpha} = 0 = r_r i_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\alpha} + \omega_r \Phi_{r\beta} \\ V_{r\beta} = 0 = r_r i_{r\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\beta} - \omega_r \Phi_{r\alpha} \end{cases} \quad (\text{I-42})$$

En substituant le système (I-42) dans (I-43), on aboutit à :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r & 0 & 0 \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -\omega_r \\ 0 & \frac{M}{T_r} & \omega_r & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \Phi_{r\alpha} \\ \Phi_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_s & 0 & \frac{M}{l_r} & 0 \\ 0 & \sigma_s & 0 & \frac{M}{l_r} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \Phi_{r\alpha} \\ \Phi_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{I-43})$$

On cherche à obtenir un système d'équation écrit sous forme d'équation d'état le modèle sera de la forme :

$$[X.] = [A] [X] + [B] [U] \quad (\text{II.44})$$

Talque :

$[X] = [i_{s\alpha} i_{s\beta} \Phi_{r\alpha} \Phi_{r\beta}]$ T: Vecteur d'état.

$[A]$: Matrice d'évolution d'état du système.

$[B]$: Matrice de commande du système.

$[U] = [V_{s\alpha} V_{s\beta}]$ T: Vecteur de commande.

Après tous les calculs fait on trouve :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{M^2}{l_r T_r}\right) & 0 & \frac{M}{\sigma_s l_r T_r} & \frac{M}{\sigma_s l_r} \omega_r \\ 0 & -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{M^2}{l_r T_r}\right) & -\frac{M}{\sigma_s l_r} \omega_r & \frac{M}{\sigma_s l_r T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -\omega_r \\ 0 & \frac{M}{T_r} & \omega_r & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.45})$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.46})$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{l_s l_r}$$

Le coefficient de la fuite totale :

$$(II.47) \quad T_s = \frac{l_s}{r_s}$$

Constante de temps statorique :

$$(II.48) \quad T_r = \frac{l_r}{r_r}$$

Constante de temps rotorique :

$$(II.49)$$

- **Equations mécaniques:**

L'équation du couple électromagnétique et de mouvement sont définis comme suit :

$$C_e = \frac{PM}{l_r} (\Phi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Phi_{r\beta} i_{s\alpha})$$

$$J \frac{d}{dt} \Omega_r = C_e - C_r - f \Omega_r \quad (II.50)$$

$$(II.51)$$

$$\omega_r = P \Omega_r$$

$$(II.52)$$

Avec :

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

C_r : Couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine.

Ω_r : Vitesse électrique rotorique.

f : Coefficient de frottement visqueux.

II.10 Conclusion:

Dans ce premier chapitre, nous avons commencé par une description générale du moteur asynchrone ensuite nous avons décrit les différentes parties de la machine asynchrone et leurs types selon une classification qui a été donnée. On a aussi cité les différents avantages et inconvénients en comparant la machine asynchrone avec d'autres machines.

L'utilisation de la transformation de Park, nous permet le passage d'un repère triphasé à un autre biphasé. L'objectif primordial de cette transformation est de rendre le système, modèle de la MAS, linéaire.

III.1 Introduction

L'objectif de l'étude réalisée dans cette section est d'établir un schéma fonctionnel dont les tensions simples d'alimentation nous permettent de déterminer les grandeurs électriques, électromagnétiques et mécaniques en fonction du temps en régime dynamique pour un fonctionnement moteur. On a choisi le référentiel lié au stator. Pour faire cette simulation nous traduisons le modèle représenté par les expressions.

III.2 Bloc de simulation

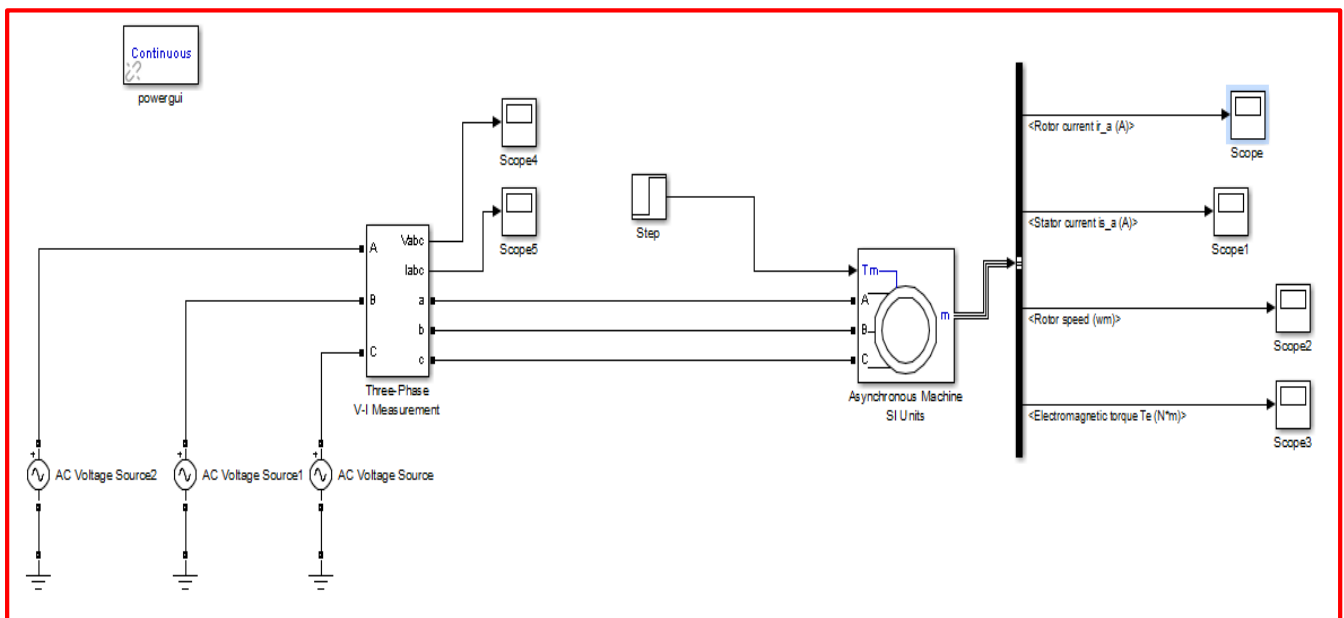


Figure III.1: Schéma bloc de la machine asynchrone alimentée en tension.

III.3 Résultats de simulation

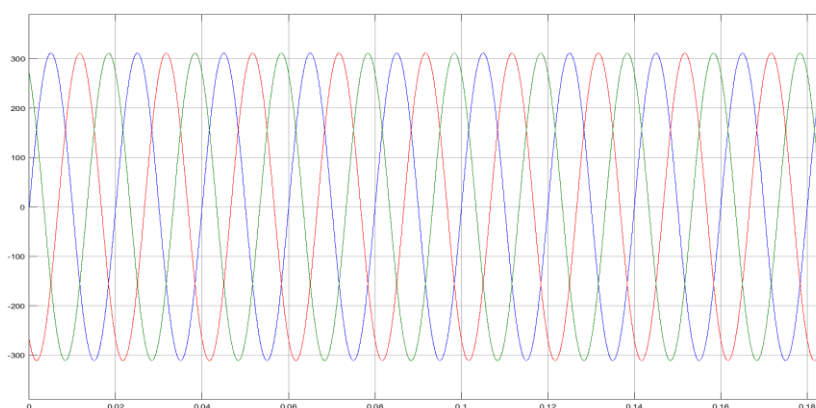


Figure III.2: Tension d'alimentation.

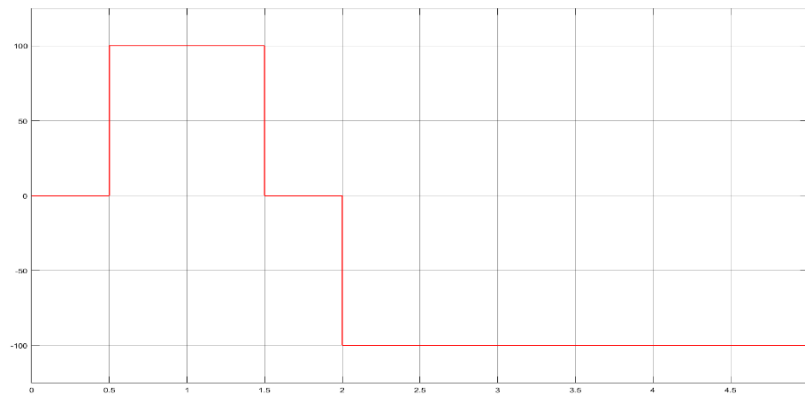


Figure III.3: Couple de charge.

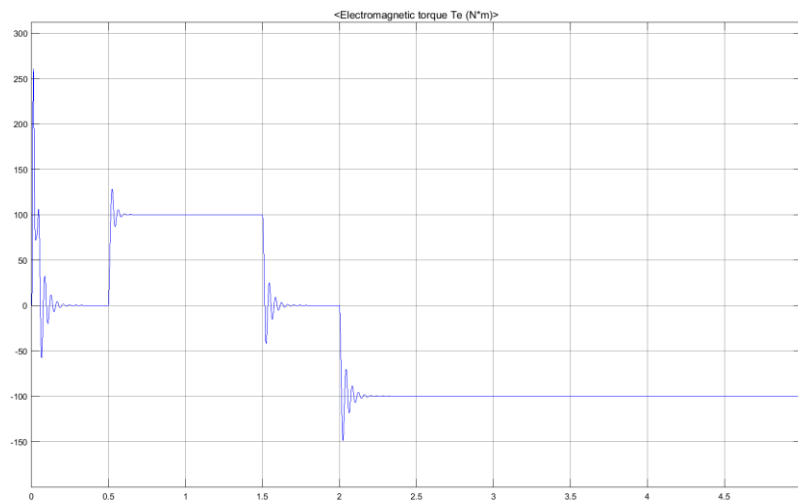


Figure III.4: Couple utile du moteur.

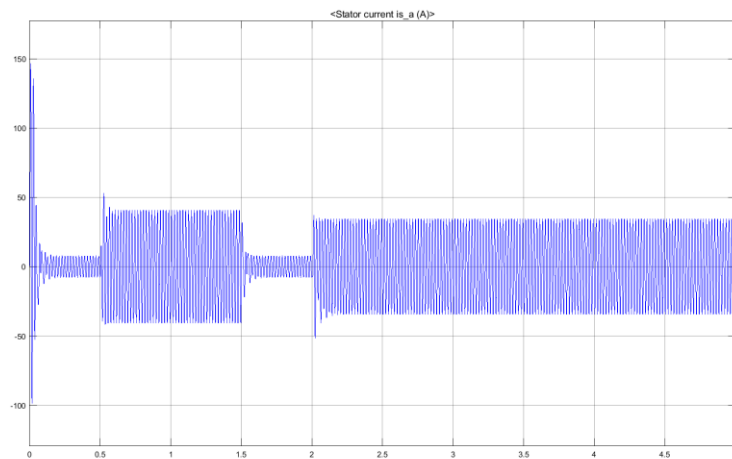


Figure III.5: Courant statorique.

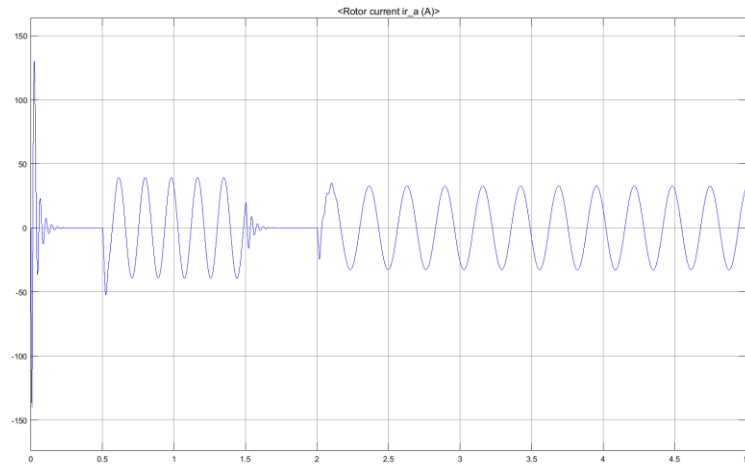


Figure III.6: Courant rotorique.

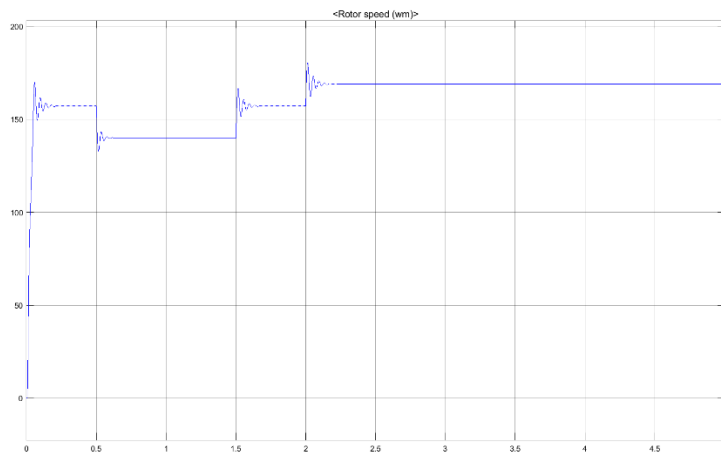


Figure III.7: Vitesse de rotation.

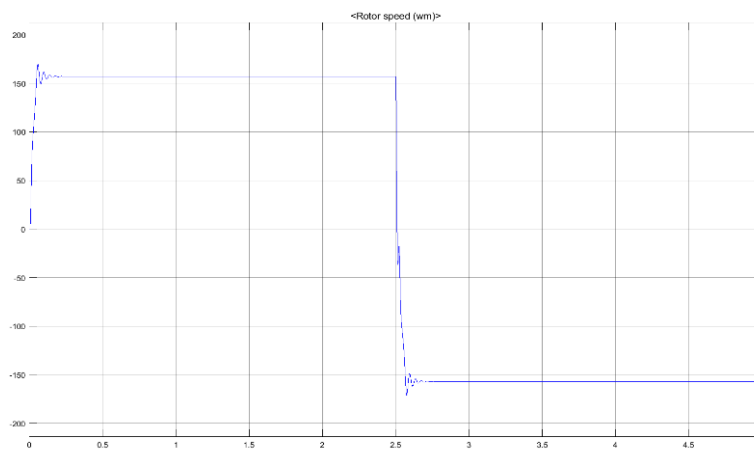


Figure III.8: Changement du sens de rotation.

✓ Interprétation des résultats

Le courant de charge étant proportionnel au couple moteur, alors la figure III.4 et III.5 le valide parfaitement du fait que le couple est une image du courant. Contrairement, l'augmentation du couple de charge diminue la vitesse comme l'illustre la figure III.7. Pour l'inversion du sens de rotation il suffit de changer la polarité de deux phases (figure III.8).

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, la simulation nous permet de mieux comprendre l'aspect théorique relatif au moteur asynchrone.

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de notre travail, nous avons modélisé la machine asynchrone triphasée alimentée depuis le réseau. Nous avons présenté la modélisation du moteur asynchrone alimenté par une source de tension sinusoïdale triphasé et équilibrée établi sous des hypothèses simplificatrices; après, nous avons utilisé la transformation du Park pour éviter la complexité des équations différentielles. Cette transformation permet le changement du système triphasé réel au système biphasé linéaire équivalent de cette machine ce qui signifie une facilité de résolution et de simulation.

Références bibliographiques

- [1] Chekima Djamel, «Commande d'une Machine Asynchrone par Logique Floue», mémoire master ,Université d'EL-Oued, 2014.
- [2] Sabour.K, Elazazi.S, « Commande vectorielle da la machine asynchrone à double alimentation » mémoire master, université AKLI Mohaned Oulhadj de Bouira, année 2015.
- [3] Bayla Bapio, « la machine asynchrone », Site internet, «demo.2ie-edu.org», avril2018
- [4] Cherier.F, Amade. G, « Modélisation en vue du diagnostic des défauts dans une machine asynchrone » mémoire d'Ingénieur d'Etat, Université M'hamed Bougara-Boumerdès, 2009.
- [5] E. Gaucheron, «Les moteurs électriques... pour mieux les piloter et les protéger», <http://www.schneider-electric.com>,avril2018
- [6] Hakima Cherif, « détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes » mémoire de magister, Université mohamed khider biskra, 2014
- [7] Hamadou.A, Nessissen.A, « Modélisation numérique d'un moteur Asynchrone à cage d'écureuil» mémoire master, Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana, 2015
- [8] Site internet, WWW.MELEEC.ORG, extraie Mars 2018
- [9] Alain Charbonne, « Le moteur asynchrone triphase », Site internet «<https://sti.discip.ac-caen.fr> » avril2018
- [10] Henry Ney, « Électro système-1ère SIT » livre, édition technique1997
- [11] Claude Chevas, Grégory Valentin, « Machine asynchrone », cours et problèmes, version du 21/09/2014.
- [12] Theodor.W, Gilbert.S, « Electrotechnique » livre, 3ème édition, 1999.
- [13] Z.Ait Ouali, , « Application de FPGA à la commande d'un moteur asynchrone » mémoire magister, université Mouloud Mammerie de Tizi-Ouzou ,2015.
- [14] franck weinbissinger. «*L'alimentation électrique pour les moteurs asynchrones*».
- [15] N.Khalil «Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone par DTC et logique floue» Thèse de magister, université de Constantine, 2006.
- [16] Thèse Benaissa Malika; Minimisation des pulsations du couple dans une commande directe du couple «DTC» d'une machine asynchrone; université de Batna.
- [17] Bennoui Hassina; Apport de la logique floue et des réseaux de neurones pour la commande avec minimisation des pertes de la machine asynchrone; université de Batna.
- [18] Electrotechnique.wildi.sybille.4eme édition.
- [19] H. Yantour, J.Saadi, A.Khoumsi, 6ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation MOSIM06, «Modélisation et Simulation d'une Commande directe du couple

appliquée à la Machine Asynchrone» Rabat-Maroc, Avril 2006.

- [20] Dissa Abdennour; Contrôle direct du couple du moteur à induction sans capteur de vitesse associée à un observateur non linéaire; université de Batna.
- [21] Lotfi Baghli; contribution à la commande de la MAS utilisation à la logique floue et des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques.
- [22] S. Belkacem «Contribution à la Commande directe du couple de la machine à induction», Thèse de doctorat en sciences en génie électrique, université de Batna, 2011.
- [23] J.Bonal, G.Seguir, «Entrainement Electrique à Vitesse Variable, Rappels d'Electrotechnique de Puissance et d'Automatisme les Variateurs Electroniques de Vitesse», Volume 2, Edition Technique et Documentation, Paris, 1998.

- [24] [https://www.automation-sense.com/blog/electronique/les-convertisseurs-
statiques-
definition-et-exemples.html](https://www.automation-sense.com/blog/electronique/les-convertisseurs-statiques-definition-et-exemples.html)
- [25] :Okba Salah et Beddiar Walid «*Etude et realization d'un onduleur de tension triphasé à MLI*», mémoire de master, université de Msila, **2019**.
- [26] _Ghaddab Abdelhadi et Bouakrif Mouad «*Etude d'un onduleur avec deux techniques de commande*», mémoire de licence, université d'Annaba, 2018.
- [27] Berrezek Farid «*Etude des différentes techniques de commande des onduleurs à MLI associés à une machine asynchrone*», mémoire de magister, université d'Annaba, **2006**.
- [28] Boukaroura Abdelkader «*Modélisation et diagnostic d'un onduleur Triphasé par l'approche Bond-Graph*», mémoire de magister, université de Sétif, **2009**.
- [29] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Onduleur>
- [30] <file:///C:/Users/pc/Downloads/Ondulaut.pdf>
- [31] [file:///C:/Users/pc/Downloads/Commande%20machines%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/pc/Downloads/Commande%20machines%20(1).pdf)