



REPOBLIKAN'I MADAGASIKA
« Fitiavana-Tanindrazana- Fandrosoana »
====0000====



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
====0000====
UNIVERSITE D'ANTSIRANANA

ECOLE NORMALE SUPERIEURE POUR L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE
(E.N.S.E.T)
====0000====

DEPARTEMENT : **GENIE ELECTRIQUE**
====0000====

TRAVAUX DE MEMOIRE DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION
DE **CERTIFICAT D'APTITUDE PEDAGOGIQUE DE L'ECOLE NORMALE**
(**C.A.P.E.N.**)

MODELISATION ET SIMULATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE A CAGE A L'AIDE D'UN LOGICIEL

Réalisé par :

SOATOMBO Lydia

Membres du jury :

- **Président : Madame VIAL Marie Ariane**
- **Encadreur : Monsieur RANDRIAMAROMILA Richard**
- **Examineurs :**
 - **Monsieur MOUSSA**
 - **Monsieur RABE Tsirobaka**

PROMOTION : H.E.N.J.A.N.A

« **H**umbles **E**tudiants **N**ormaliens **J**eunes **A**ctifs et **N**ovateurs pour l'**A**venir »

-Année Universitaire 2010-

UNIVERSITE D'ANTSIRANANA

ENSET

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE(PETGE5)

Nombre d'étudiant : 01

**MODELISATION ET SIMULATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE A CAGE A
L'AIDE D'UN LOGICIEL**

En ingénierie, la simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Actuellement, plusieurs outils de simulation, parmi les lesquels MATLAB/SIMULINK, sont utilisés dans l'industrie et dans les milieux universitaires.

Travail demandé :

- Recherche bibliographie
- Le développement du modèle du moteur asynchrone à cage qui permettra d'établir le modèle mathématique
- Présentation du sommaire MATLAB/SIMULINK en tant que logiciel de modélisation et de simulation en ingénierie
- Réalisation du modèle
- Présentation des résultats
- Conclusion
- Référence bibliographique

Responsable :

RANDRIAMAROMILA Richard

REMERCIEMENT

Grâces soient rendues à l'Eternel Dieu ; notre seigneur ; pour les bienfaits et protection dont nous avons été durant la préparation de ce travail.

Ce travail a été effectué sous la responsabilité de monsieur RANDRIAMAROMILA Richard qui est mon encadreur et que je voudrais lui exprimer toute ma profonde reconnaissance. Je tiens également à lui témoigner ma gratitude pour m'avoir proposé ce sujet et qui n'a cessé de me donner des connaissances théoriques et pratiques pour mener à bien ce travail.

J'adresse aussi mes vives remerciements à :

- ❖ Madame le président et les membres de Jury qui acceptent d'apporter leur jugement sur ce travail ;
- ❖ Les enseignants de l'Ecole Normale Supérieure pour l'Enseignement Technique d'Antsiranana (ENSET) qui m'ont transmis leur connaissance durant mes années d'études ;
- ❖ Mon père, ma mère, mes sœurs et tous les membres de ma grande famille pour le soutiens moraux ; spirituels ; financiers et matériel ;
- ❖ Tous ce qui ont contribués directement ou indirectement à l'accomplissement de ce travail.

Soatombo Lydia

INTRODUCTION

Actuellement, l'énergie est la source du développement d'un pays et surtout dans le monde industriel. Les pays qui consomment plus d'énergie sont les plus développés. Pour les transformations d'énergie, les machines électriques sont les couramment utilisés mais la machine asynchrone représente la machine de base de l'industrie actuelle. Selon le type, la machine asynchrone à cage est le plus utilisé, due à son faible coût d'achat, sa robustesse mécanique et sa simplicité de construction. Pour la conception, on doit avoir l'information nécessaire pour calculer les paramètres de machine asynchrone. Grâce à l'évolution de technologies informatiques, la simulation est un moyen efficace et économique couramment utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement, qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Et c'est l'une des objectifs qui s'intitule notre travail.

Le premier chapitre est consacré sur la généralité sur la machine asynchrone en précisant les constitutions et les modes de démarrage possible. Ensuite la seconde présente le modèle du moteur asynchrone à cage qui permettra d'établir le modèle mathématique pour déterminer la valeur des paramètres de machine. Puis nous introduisons la simulation qui nous amène à la résolution du modèle et des résultats de simulation seront présentés. Le dernier chapitre est réservé pour l'implication pédagogique.

Chapitre I : GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES

Les machines asynchrones sont des machines tournantes à courant alternatif. Ils peuvent être des générateurs ou des moteurs. Quels que soient les constructeurs de machines tournantes, on classe les différentes pièces selon les trois grandes fonctions ci-après :

- Organes électriques : enroulements statoriques, conducteurs rotoriques

L'inducteur (stator) est chargé de créer le flux utile et l'induit (conducteur rotorique) est chargé de créer les forces électromagnétiques dans les génératrices ou les couples dans les moteurs.

- Organes magnétiques : circuit magnétique fixe, circuit magnétique tournant

Les circuits magnétiques ont pour rôle de conduire le flux qui, dans l'entrefer, doit agir les courants circulant dans le circuit électrique.

- Organes mécaniques : carcasse avec fixation ou stator, rotor avec l'arbre, roulement à billes, flasques, ventilateur avec son capot, capot de ventilation, tiges de montage, plaque à borne

1. Constitution d'une machine asynchrone



Figure 1.1 : Une machine asynchrone

Comme dans toutes les machines tournantes, on distingue la partie fixe appelée stator, de la partie tournante appelée rotor. Le stator permet de créer un champ tournant au moyen de courants alternatifs alors que le rotor va créer un champ continu qui va tourner lors de la rotation de la machine. Le couplage entre les deux champs nous permettra d'expliquer le fonctionnement du système.

Le moteur asynchrone fonctionne directement sur le secteur alternatif, sans transformation préalable de l'énergie électrique qui l'alimente. Et les courants qui

circulent dans le stator constituent l'unique source externe de champ magnétique. De plus, le rotor n'est pas relié à une source d'énergie, mais il existe bien des courants rotoriques qui participent, eux aussi à la création du champ magnétique, donc ce sont des courants induits.

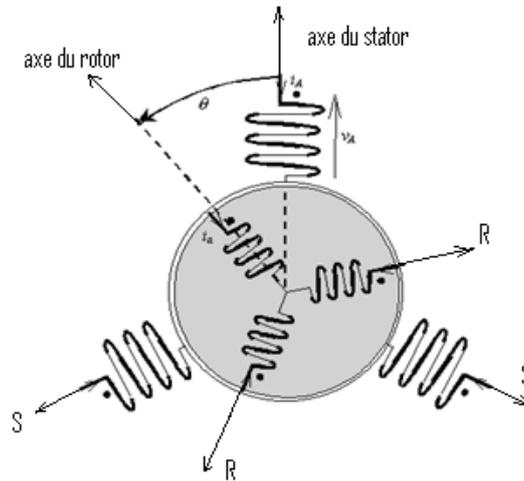


Figure 1.2 : Représentation schématique d'une machine asynchrone

a) Stator

Il est constitué de trois enroulements (bobines) parcourus par des courants alternatifs triphasés et possède p paires de pôles. Cet enroulement est presque toujours relié à la source et constitue le primaire.

Le stator est un empilement des tôles magnétiques isolées entre elles et dans lequel sont pratiqués des encoches pour loger les enroulements statoriques. C'est la partie fixe de la machine, il possède une forme cylindrique creuse. Les tôles magnétiques de bonne qualité sont disposées perpendiculairement à l'axe pour diminuer la perte dans le fer.

Il est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Les enroulements statoriques sont libres de couplage. Chacune est accessible par ses bornes de connexion. Les entrées des enroulements sont repérés U, V, W et les sorties correspondantes sont X, Y, Z.

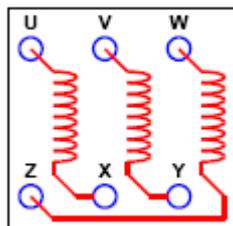


Figure 1.3 : Boîte à bornes

L'interconnexion X, Y, Z et l'alimentation U, V, W pour les couplages sont figurés comme suit :

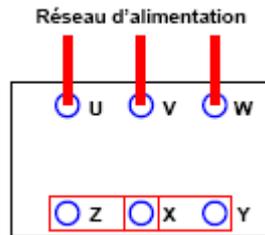


Figure 1.4 : L'interconnexion pour le couplage étoile

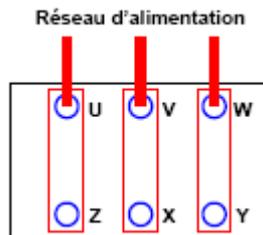


Figure 1.5 : L'interconnexion pour le couplage triangle

b) Rotor

Le rotor, anneau de tôles rainuré à l'extérieur, concentrique au primaire et séparé de stator par un entrefer étroit d'épaisseur constante. Le rotor est un empilement de tôles magnétiques isolées entre elles et dans lequel sont pratiquées des encoches pour loger les enroulements rotoriques. C'est la partie mobile de la machine asynchrone et le siège de grandeurs électromagnétiques variables dont les caractéristiques soient à cage ou bobiné.

➤ Rotor à cage

Le bobinage est réduit à un ensemble de conducteurs dont toutes les extrémités sont reliées entre elles en formant une cage. L'enroulement est remplacé par des barres en cuivre ou en aluminium logées dans des encoches.

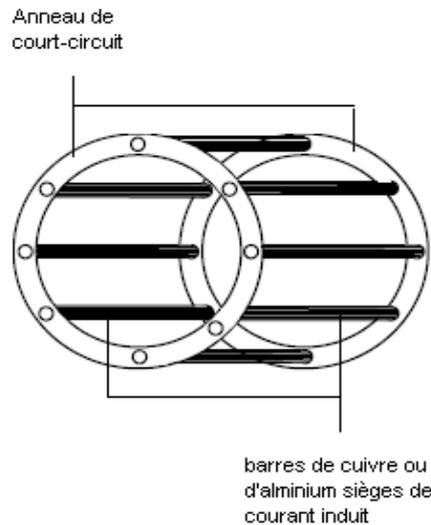


Figure 1.6 : constitution du rotor à cage

➤ Rotor bobiné

Le rotor est bobiné de manière à obtenir p paires de pôles. Il est mis en court-circuit par l'extérieur à travers de trois bornes liées électriquement par des contacts glissants appelés bagues réalisées en laiton. Les enroulements sont couplés en étoile et les entrées du bobinage sont reliées à trois bagues.

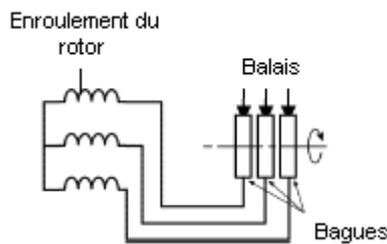


Figure 1.7 : constitution du rotor bobiné

2. Démarrages de machine asynchrone

La machine accouplée à un moteur asynchrone oppose pendant le démarrage un couple résistant et une inertie qui constituent les facteurs principaux pour le choix d'un moteur et de son mode de démarrage. Voici donc les différents types de démarrage possible.

❖ Démarrage direct

Les enroulements du stator sont couplés directement sur le réseau, le moteur démarre et atteint sa vitesse nominale. C'est un démarrage simple mais brutal car la surintensité peut être 4 à 8 fois du nominale.

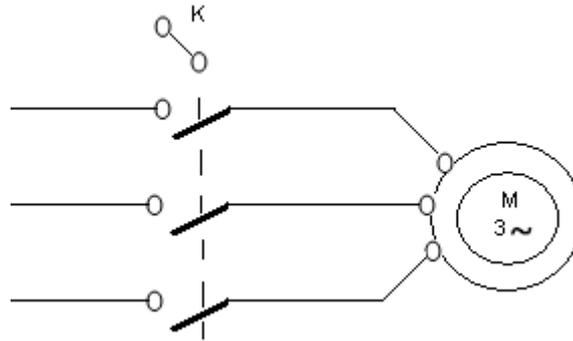


Figure 1.8 : Représentation schématique du démarrage direct

Ce démarrage convient bien pour les moteurs de petite puissance ($P < 75 \text{ ch}$) ou de puissance faible par rapport à la puissance du réseau et les machines nécessitant un bon couple de démarrage.

❖ Démarrage étoile- triangle

Il ne s'applique qu'aux moteurs dont le couplage triangle correspond à la tension du réseau. Il s'effectue en deux temps :

1^{er} temps : la mise sous tension et couplage étoile des enroulements. Le moteur démarre à une tension réduite $\frac{U}{\sqrt{3}}$

2^{ème} temps : la mise en couplage triangle. Le moteur est alimenté en pleine tension.

La coupure pendant le changement de couplage fait apparaître des phénomènes transitoires. L'appel du courant et du couple au moment de démarrage est le tiers de sa valeur en démarrage direct.

Ce démarrage est réservé pour les machines démarrant à vide comme : machines à bois, machines outils, ventilateurs ...

❖ Démarrage à résistances statoriques

Il s'effectue aussi en deux temps : la mise en série dans le circuit une résistance qui est ensuite court-circuitée.

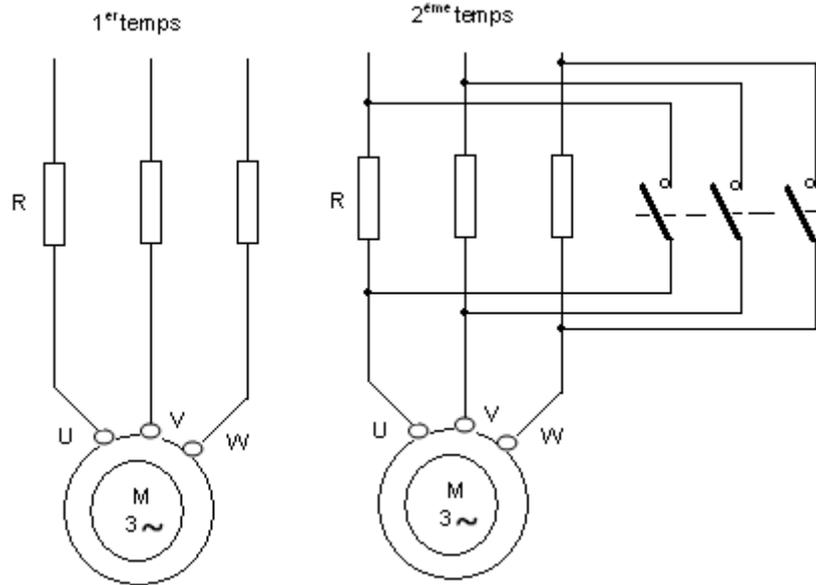


Figure 1.9 : Représentation schématique du démarrage à résistances statoriques

A la mise sous tension, l'intensité du courant est maximale puis elle diminue.

❖ **Démarrage par auto- transformateur**

Il s'effectue en 3 temps dont :

1^{er} temps : Autotransformateur monté en étoile, le moteur est alimenté à tension réduite.

2^{ème} temps : ouverture du point étoile, seule la self de la partie supérieur de l'enroulement limite le courant.

3^{ème} temps : Alimentation du moteur sous pleine tension.

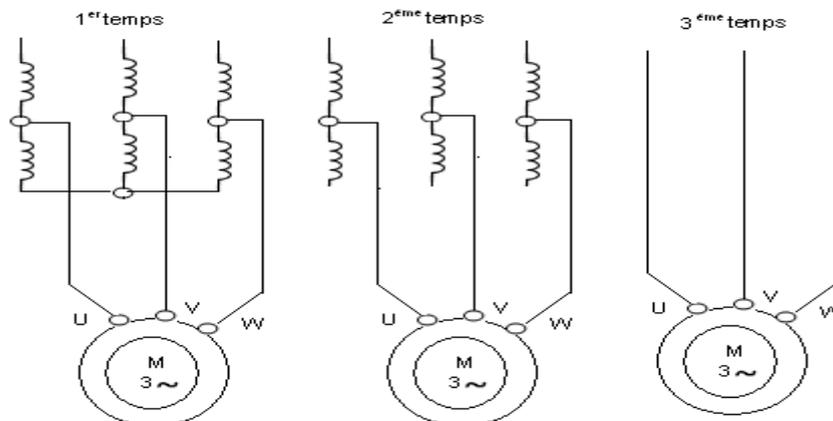


Figure 1.10 : Représentation schématique du démarrage par auto- transformateur

Pour obtenir au 2^{ème} temps une valeur normale d'inductance, l'autotransformateur possède souvent un entrefer.

On obtient un couple plus élevé avec une pointe d'intensité plus faible que pour les autres procédés de démarrage.

Ce démarrage est utilisé pour les machines de puissance supérieure à 100KW et convient pour les compresseurs relatifs à piston, les pompes, les ventilateurs.

❖ Démarrage rotorique

Ce démarrage est obligatoirement pour un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné en étoile avec sortie sur trois bagues. Il s'effectue en trois temps comme figuré ci-dessous.

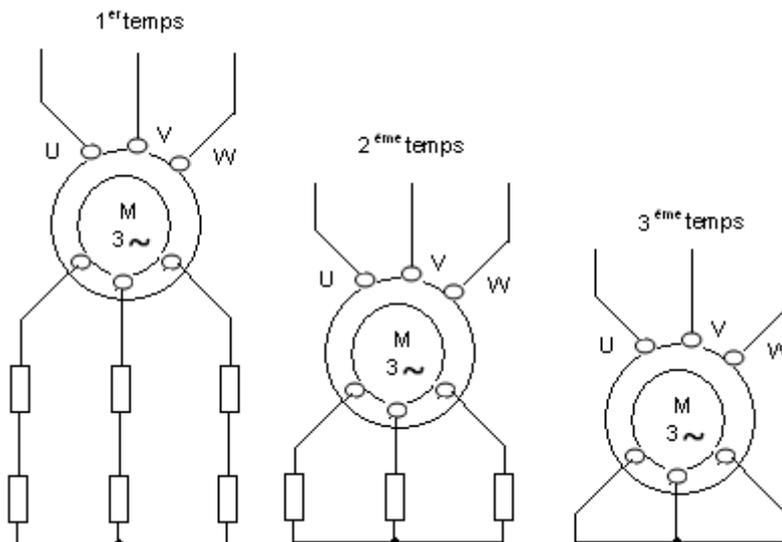


Figure 1.11 : Représentation schématique du démarrage rotorique

Ce démarrage nécessite autant de contacteurs et de résistances que de temps de démarrage. Et l'appel de courant est le plus faible par rapport à tous les autres modes démarrages.

3. Bilan de puissance

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique \vec{B} tournant à une pulsation de synchronisme Ω_s et le rotor tourne à une vitesse Ω .

Le bilan de puissance d'une machine asynchrone peut être représenté par le diagramme suivant.

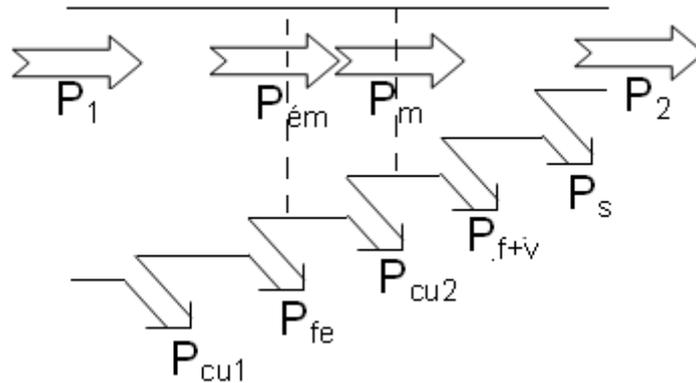


Figure 1.12 : Bilan de puissance

P_1 : la puissance consommée au réseau

P_2 : la puissance fournie du moteur

$P_{ém}$: la puissance électromagnétique

P_m : la puissance mécanique

P_{f+v} : les pertes mécaniques dues au frottement et à la ventilation

P_s : les pertes supplémentaires qui sont les pertes difficilement mesurables telles que celle dû aux harmoniques élevés de la force magnétomotrice à la pulsation d'induction, dû à la denture ...

P_{fe} : les pertes fer, elles sont dues à l'hystérésis et au courant de Foucault

P_{cu2} : les pertes dans l'enroulement rotorique

P_{cu1} : les pertes dans l'enroulement statorique

4. Machines asynchrones à cage

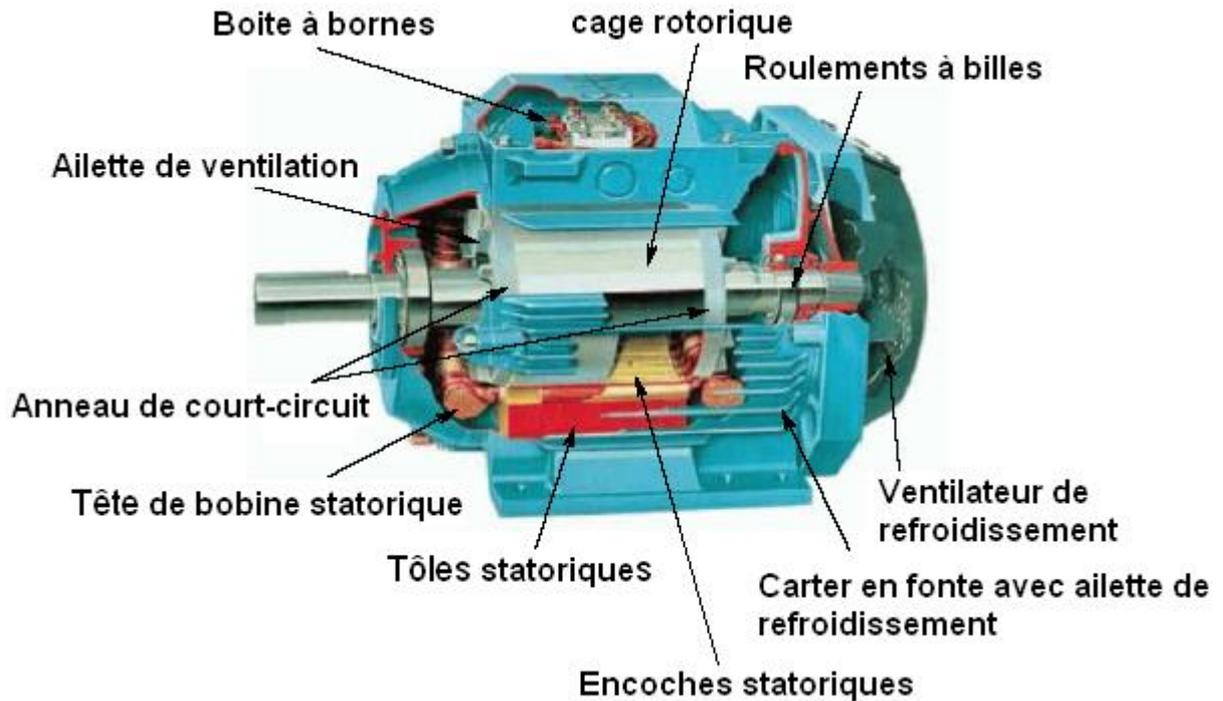


Figure 1.13 : Constitution d'une machine asynchrone à cage [10]

Ce type de machine suit exactement les principes généraux des machines asynchrones mais la particularité se situe sur les conducteurs du rotor qui constituent une sorte de cage. Elle est constituée de bobines en court circuit. Elles seront soumises à une variation de champ magnétique qui donnera naissance à des courants induits et que ceux-ci transforment les bobines en électro-aimants qui ont tendance à suivre le champ magnétique tournant avec un retard appelé glissement.

Le glissement est une vitesse relative entre le champ tournant et le rotor qui s'écrit :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad [1.1]$$

a. Moteurs asynchrones à cage d'écureuil

La cage crée un champ glissant de même nombre de paires de pôles et de même vitesse que le champ glissant du stator. Une force électrique absorbée du stator fait tourner le rotor à une vitesse inférieure à celle de synchronisme.

Du faite de l'impossibilité d'augmenter la résistance rotorique au moyen d'un rhéostat externe, le courant absorbé pendant le démarrage n'est limité que par l'impédance interne du moteur. Donc le démarrage est très brutal car le courant peut atteindre 4 à 6 fois du nominal. Et que ce courant provoque des chutes de tension souvent inacceptables sur les réseaux.

La nécessité d'améliorer les caractéristiques du démarrage a conduit à la création des moteurs asynchrones à cage peu particuliers : avec des rotors à encoches profondes et rotors à double cage. Ces rotors utilisent l'effet pelliculaire qui dans le cas d'un conducteur placé dans une encoche conduit à une concentration de la densité du courant vers le pré encoche. Cet effet pelliculaire est donc à chercher augmenter le couple du démarrage sans diminuer le rendement au régime nominal.

b. Moteurs asynchrones à double cage

Le stator reste le même que précédent mais le rotor est formé par deux cages qui sont constitués différemment. La cage extérieure a une résistance relativement grande pour fournir le couple maximum au démarrage et réduire suffisamment du courant au démarrage. La cage intérieure a une résistance très faible qui donnant un faible glissement en marche normale. Le moteur démarre sur sa cage extérieure donnant un bon couple au démarrage et un appel de courant acceptable. Puis la vitesse augmente, le glissement décroît et proportionnellement à la $f \text{ é m}$ du rotor.

Les courants dans la cage extérieure sont de plus en plus réduits à cause de sa résistance grande. Alors le champ du stator pénètre de plus en plus profondément dans le rotor en atteignant les conducteurs de la cage intérieur. Le moteur fonctionne avec un faible glissement et le rendement du rotor satisfaisant.

c. Génératrices asynchrones

Tout moteur asynchrone peut fonctionner en génératrice asynchrone. Il s'effectue à la condition que la vitesse du champ rotorique soit supérieure à la vitesse du synchronisme.

A l'aide d'une force mécanique, le rotor tourne à une vitesse supérieure à une vitesse du synchronisme en transformant l'énergie mécanique en énergie électrique. Les conducteurs du rotor traverseront le champ tournant dans le sens opposés. Alors, la force électromotrice et le courant changeront de sens. La force d'interaction

du champ tournant et les courants du rotor changeront également de sens. Le courant magnétisant reste alors le même. Le glissement d'une machine asynchrone fonctionnant en génératrice est négatif. La Machine asynchrone est alors fournie de la puissance active mais elle absorbe toujours de la puissance réactive nécessaire à son alimentation.

Les Machines asynchrones ne possèdent pas comme les alternateurs un circuit d'excitation. Le courant peut être emprunté au réseau en branchant en parallèle à la machine une batterie de condensateur. Il est possible d'utiliser une génératrice asynchrone en dehors d'un réseau c'est-à-dire en fonctionnement autonome pour alimenter une charge isolée. Pour une charge active, la puissance réactive des condensateurs doit être égale à la puissance réactive nécessaire pour produire les flux magnétique du générateur.

5. Utilisations des machines asynchrones

Les machines asynchrones sont robustes, leur coût est faible et ont une simplicité mécanique c'est-à-dire les moins chers et peuvent être utilisés dans les atmosphères chimiques dangereuses. Elles tirent soit du réseau, soit à partir de batterie de condensateur, soit à partir d'un convertisseur statique dit onduleurs/redresseur qui offre la possibilité de fonctionnement autonome. Elles équipent généralement les mini ou micro centrales hydrauliques, les Eoliennes, les turbines ou moteurs à gaz de récupération, les groupes électrogènes, de nombreux appareils ménagers et servent aussi pour entrainer de machines outils.

Chapitre II : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE A CAGE

❖ Hypothèse simplificatrices

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices.

- On suppose les circuits magnétiques non saturés, et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordre linéaire ;

- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé ;
 - Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
 - Les enroulements statorique et rotorique sont symétriques et la f. m. m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.
 - On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotorique et statorique.
 - On considère que la machine fonctionne en régime équilibré.
- ❖ Convention de signe ;
- Les angles et les vitesses sont comptés négativement dans le sens trigonométrique ;
 - Une f. é. m positive fait circuler un courant positif ;
 - Un courant positif crée à travers son propre enroulement un flux positif ;
 - Le stator et le rotor sont considérés comme récepteur.

Le fonctionnement d'une machine asynchrone peut représenter suivant les axes de repères classiques ci-dessous.

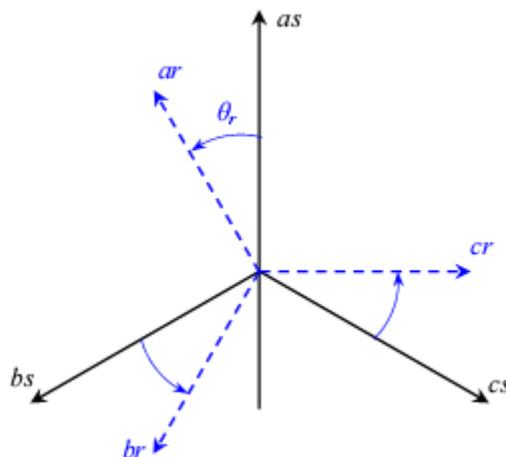


Figure 2.1: Axes de repères classiques de la machine asynchrone

Les axes (as, bs, Cs) orientés suivant les axes des trois enroulements statoriques de la machine. L'axe as est considéré comme référence pour les transformations ultérieures.

1. Equations générales de machine asynchrone à cage

Les équations générales de la machine asynchrone à cage d'écureuil dans un repère triphasé s'écrivent sous forme matricielle :

$$[V_{Sabc}] = [R_S][I_{Sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{Sabc}] \quad [2.1]$$

$$0 = \left[\frac{R_r}{g} \right] [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \quad [2.2]$$

Où $[V_{Sabc}]$, le vecteur tension de trois phases statoriques tel que :

$$[V_{Sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad [2.3]$$

$[I_{Sabc}]$, le vecteur courant de trois phases statoriques tel que :

$$[I_{Sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad [2.4]$$

$[\Phi_{Sabc}]$, le vecteur flux tel que :

$$[\Phi_{Sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad [2.5]$$

$[R_S]$ la matrice de résistance statorique où sont regroupées les résistances de chacune des phases statoriques tel que :

$$[R_S] = \begin{bmatrix} R_{Sa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{Sb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{Sc} \end{bmatrix} \quad [2.6]$$

$[I_{rabc}]$, le vecteur courant de trois phases rotoriques tel que :

$$[I_{rabc}] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad [2.7]$$

$$\text{Avec } I_{ri} = [I_{r_1} \quad I_{r_2} \quad \dots \quad I_{r_{Nr}} \quad I_{rcc}]^t \quad [2.8]$$

Où I_{rcc} , courant dans l'anneau de court-circuit

N_r , nombre de barres du rotor

$[\Phi_{rabc}]$, le vecteur flux de trois phases rotoriques tel que :

$$[\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad [2.9]$$

$$\text{Avec } \Phi_{ri} = [\Phi_{r_1} \quad \Phi_{r_2} \quad \dots \quad \Phi_{r_{Nr}} \quad \Phi_{rcc}]^t \quad [2.10]$$

$[R_r]$ la matrice de résistance rotorique où sont regroupées les résistances de chacune des phases rotoriques tel que :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{ra} & 0 & 0 \\ 0 & R_{rb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rc} \end{bmatrix} \quad [2.11]$$

$$\text{Avec } R_{ri} = [R_{r_1} \quad R_{r_2} \quad \dots \quad R_{r_{Nr}} \quad R_{rcc}] \quad [2.12]$$

Les trois phases statoriques sont non seulement magnétiquement couplées entre elles mais aussi avec le circuit électrique rotorique, d'où :

$$[\Phi_{Sabc}] = [L_S][I_{Sabc}] + [M_{Sr}][I_{rabc}] \quad [2.13]$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r][I_{rabc}] + [M_{rS}][I_{Sabc}] \quad [2.14]$$

Où $[L_S]$ la matrice inductance qui se compose des inductances propres, de magnétisation, de fuites et de mutuelles de trois phases statoriques tel que :

$$[L_S] = \begin{bmatrix} L_{Saa} & M_{Sab} & M_{Sac} \\ M_{Sba} & L_{Sbb} & M_{Sbc} \\ M_{Sca} & M_{Scb} & L_{Scc} \end{bmatrix} \quad [2.15]$$

$[M_{Sr}]$ la matrice inductance mutuelle entre trois phases statoriques et n barres rotoriques tel que :

$$[M_{Sr}] = \begin{bmatrix} M_{sar_1} & M_{sar_2} & \dots & M_{sar_k} & \dots & M_{sar_n} & M_{sar_{cc}} \\ M_{sbr_1} & M_{sbr_2} & \dots & M_{sbr_k} & \dots & M_{sbr_n} & M_{sbr_{cc}} \\ M_{scr_1} & M_{scr_2} & \dots & M_{scr_k} & \dots & M_{scr_n} & M_{scr_{cc}} \end{bmatrix} \quad [2.16]$$

$$[M_{Sr}] = [M_{rS}] = [M] \quad [2.17]$$

L'équation mécanique de la machine asynchrone peut se mettre sous la forme :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - B\Omega - C_r \quad [2.18]$$

$$\Omega = \frac{d\theta}{dt} \quad [2.19]$$

Où J le moment d'inertie de la machine

Ω la vitesse rotorique

C_{em} son couple électromécanique

C_r son couple de charge

θ Position du rotor à un instant quelconque

La coenergie magnétique est exprimée en fonction des différents courants de phases de la machine.

$$[W_{co}] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_S] \\ [I_r] \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} L_S & M_{Sr} \\ M_{rS} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_S] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad [2.20]$$

Et le couple électromagnétique se calcule en dérivant la coénergie par rapport à θ que prend le rotor vis-à-vis du stator, d'où l'expression du couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em} = \frac{d}{d\theta} [W_{co}] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_S] \\ [I_r] \end{bmatrix}^t \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} L_S & M_{Sr} \\ M_{rS} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_S] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad [2.21]$$

a. Induction d'entrefer

➤ Induction statorique

La décomposition en série de Fourier de force magnétomotrice créée par la phase statorique as s'écrit :

$$F_{ma}(\theta_s) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2}{\pi} \frac{nI_s}{p} \frac{(-1)^k}{2k+1} \cos((2k+1)p\theta_s) \quad [2.22]$$

Où p le nombre de paire de pôle

θ_s l'angle mécanique

n le nombre de spires par encoche

$2k+1$ le nombre d'harmonique d'espace

En considérant le fait que le stator et le rotor de la machine sont lisses, l'expression de l'induction d'entrefer créée par la phase statorique as devient :

$$B_{Sa}(\theta_s) = \frac{\mu_0}{\ell} F_{ma}(\theta_s) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2}{\pi} \mu_0 \frac{nI_s}{p\ell} \frac{(-1)^k}{2k+1} \cos((2k+1)p\theta_s) \quad [2.23]$$

Où ℓ longueur moyenne de l'entrefer et μ_0 la perméabilité relative de l'air.

Les inductions d'entrefer des phases bs et cs sont identiques à celle de la phase as mais elles sont déphasées de $\pm \frac{2\pi}{3p}$, donc :

$$B_{Sb}(\theta_s) = \frac{\mu_0}{\ell} F_{mb}(\theta_s) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2}{\pi} \mu_0 \frac{nI_s}{p\ell} \frac{(-1)^k}{2k+1} \cos\left((2k+1)p\theta_s + \frac{2\pi}{3p}\right) \quad [2.24]$$

$$B_{Sc}(\theta_s) = \frac{\mu_0}{\ell} F_{mc}(\theta_s) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2}{\pi} \mu_0 \frac{nI_s}{p\ell} \frac{(-1)^k}{2k+1} \cos\left((2k+1)p\theta_s - \frac{2\pi}{3p}\right) \quad [2.25]$$

➤ Induction rotorique

L'induction d'entrefer créée par une boucle rotorique nous donne :

$$B_{rk}(\theta_r) = \frac{\mu_0}{\ell} F_{rk}(\theta_r) \quad [2.36]$$

Avec $k = 1, 2, \dots, N_r$

b. Induction de magnétisation et les inductances mutuelles

➤ Induction de magnétisation d'une phase statorique

Le flux magnétisant d'une phase statorique s'écrit :

$$\Phi_{S_i} = \oint N_S B_{S_i}(\theta_s) ds \quad [2.27]$$

$$\text{Avec } ds = L R d\theta_s$$

Où i peut se substituer indépendant à la lettre a, b, c

L longueur active du circuit magnétique

R rayon moyen à l'entrefer

Alors l'expression du flux d'une phase statorique donne :

$$\Phi_{S_i} = N_S L R \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_{S_i}(\theta_s) d\theta_s = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_S^2 I_S}{p^2 \ell} L R \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^2} \quad [2.28]$$

Alors l'inductance magnétisante correspondante :

$$L_{S_i} = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_S^2}{p^2 \ell} L R \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^2} \quad [2.29]$$

➤ Inductance mutuelle entre phases statoriques

Pour un stator triphasé, l'expression de l'induction mutuelle entre deux phases statoriques s'écrit :

$$M_{S_{ij}} = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_S^2}{p^2 \ell} L R \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^2} \cos((2k+1)p\theta_s) \quad [2.30]$$

Avec $i \neq j$ et i, j peuvent se substituer indépendant à la lettre a, b, c

➤ Inductance mutuelle entre phases statoriques et les boucles rotoriques

Le calcul du flux entre une phase statorique i et la barre rotorique k nous donne :

$$\Phi_{r_k S_i} = N_r L R \int_{-\frac{\pi}{N_r}}^{\frac{\pi}{N_r}} B_{S_i}(\theta_s - \theta_r) d\theta_{sr} \quad [2.31]$$

Alors l'expression de l'inductance mutuelle correspondant s'écrit :

$$M_{r_k s_i} = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_s N_r}{p^2 \ell} L R \frac{(-1)^k}{(2k+1)^2} \sin\left((2k+1)p \frac{\pi}{N_r}\right) \cos((2k+1)p \theta_{sr}) \quad [2.32]$$

➤ **Inductance de magnétisation d'une barre rotorique**

L'expression du flux magnétisant d'une barre rotorique s'écrit :

$$\Phi_{r_k} = \iint B_{r_k} ds = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{I_r}{\ell} 2\pi L R \quad [2.33]$$

L'inductance magnétisante correspondante donne :

$$L_{r_k} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{\ell} 2\pi L R \quad [2.34]$$

➤ **Inductances mutuelles entre les barres rotoriques**

L'expression de l'inductance mutuelle entre deux boucles rotoriques s'écrit :

$$M_{r_{ij}} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{\ell} 2\pi L R \quad [2.35]$$

Avec $i, j = 1, 2, \dots, N_r$.

2. Modèle mathématique de machine asynchrone à cage suivant les axes (dq)

➤ **Transformation triphasé en diphasé du repère classique**

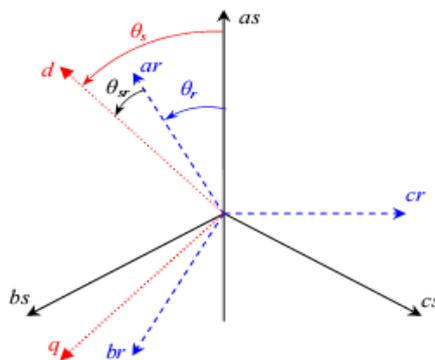


Figure 2.2: Axes de repères dq

Pour passer un système triphasé abc vers un système biphasé dq, on a choisi d'utiliser la transformation de Park.

La transformation de Park directe se formule comme suit :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad [2.36]$$

Où la matrice de Park $[P]$ est :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad [2.37]$$

La transformation de Park inverse se formule comme suit :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad [2.38]$$

Où la matrice de Park $[P]^{-1}$ est :

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad [2.39]$$

Où θ est l'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé (as pour les grandeurs statoriques et ar pour les grandeurs rotoriques).

Les grandeurs (courants, tensions et flux) transformées, du système diphasé sont égales à la matrice de Park multipliée par les grandeurs du système triphasé c'est-à-dire :

$$\begin{cases} [V_{dqS}] = [P][V_{Sabc}] \\ [I_{dqS}] = [P][I_{Sabc}] \\ [\Phi_{dqS}] = [P][\Phi_{Sabc}] \end{cases} \quad \text{Avec } \theta = \theta_S \quad [2.40]$$

$$\begin{cases} [I_{dqr}] = [P][I_{rabc}] \\ [\Phi_{dqr}] = [P][\Phi_{rabc}] \end{cases} \quad \text{Avec } \theta = \theta_{Sr} \quad [2.41]$$

Le choix du référentiel se fait en fonction de la valeur de ω .

$\omega = 0$: correspond au référentiel stationnaire ;

$\omega = \omega_r$: correspond au référentiel lié au rotor ;

$\omega = \omega_s$: correspond au référentiel lié au stator.

- ❖ Les schémas équivalents de moteur asynchrone à simple cage suivant les deux axes (dq) pour un référentiel quelconque de vitesse ω sont représentés ci-dessous.

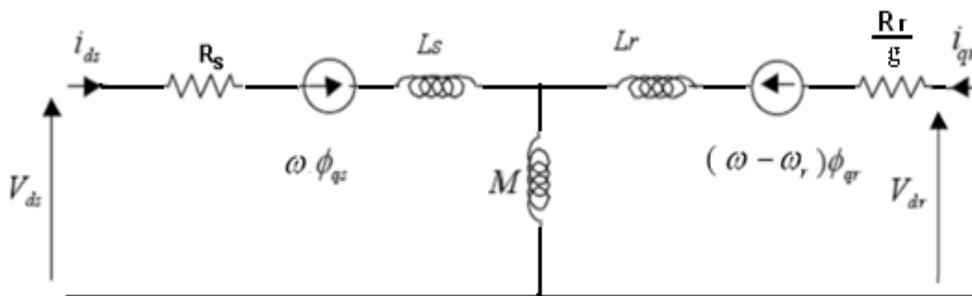


Figure 2.3 : schémas équivalents suivant l'axe d

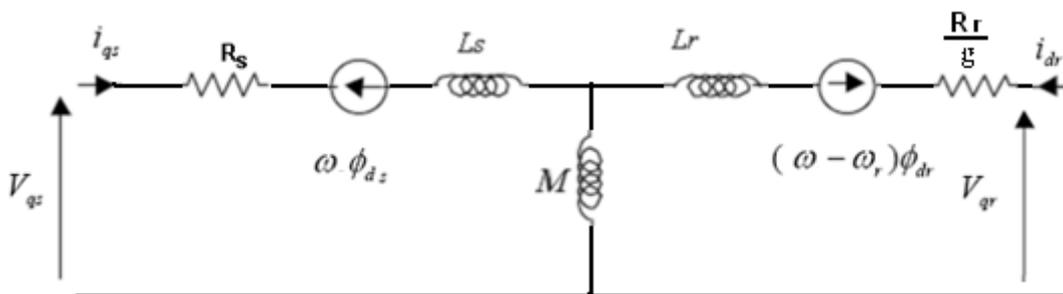


Figure 2.4 : schémas équivalents suivant l'axe q

Posons :

$$\theta_{Sr} = \theta_S - \theta_r \quad [2.42]$$

$$\omega_S = \omega = \frac{d}{dt} \theta_S \quad [2.43]$$

$$\omega_r = \frac{d}{dt} \theta_r \quad [2.44]$$

$$\omega_{Sr} = \frac{d}{dt} \theta_{Sr} \quad [2.45]$$

$$\Omega = p \frac{d}{dt} \theta_m \quad [2.46]$$

Où p est le nombre de paire de pole et θ_m la position mécanique du rotor.

$$\omega_{Sr} = \frac{d}{dt} \theta_S - \frac{d}{dt} \theta_r \quad [2.47]$$

$$\omega_{Sr} = \frac{d}{dt} \theta_S - p \frac{d}{dt} \theta_m \quad [2.48]$$

D'après les schémas équivalents, on obtient :

$$V_{dS} = R_S i_{dS} - \omega_S \Phi_{qS} + \frac{d}{dt} \Phi_{dS} \quad [2.49]$$

$$V_{qS} = R_S i_{qS} + \omega_S \Phi_{dS} + \frac{d}{dt} \Phi_{qS} \quad [2.50]$$

$$0 = \frac{R_r}{g} i_{dr} - \omega_{Sr} \Phi_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} \quad [2.51]$$

$$0 = \frac{R_r}{g} i_{qr} + \omega_{Sr} \Phi_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} \quad [2.52]$$

Les relations entre les courants et les flux sont :

$$\Phi_{dS} = L_S i_{dS} + M i_{dr} \quad [2.53]$$

$$\Phi_{qS} = L_S i_{qS} + M i_{qr} \quad [2.54]$$

$$\Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{dS} \quad [2.55]$$

$$\Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qS} \quad [2.56]$$

Les expressions [2.51] et [2.52] nous donne :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} \Phi_{dr} - \frac{M}{L_r} i_{dS} \quad [2.57]$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r} \Phi_{qr} - \frac{M}{L_r} i_{qS} \quad [2.58]$$

En introduisant [2.57] et [2.58] dans [2.53] et [2.54], on obtient les composants de flux statoriques :

$$\Phi_{dS} = \sigma L_S i_{dS} - \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} \quad [2.59]$$

$$\Phi_{qS} = \sigma L_S i_{qS} - \frac{M}{L_r} \Phi_{qr} \quad [2.60]$$

$$\text{Avec } \sigma = 1 - \frac{M}{L_S L_r}$$

Où σ est le Coefficient de dispersion.

En remplaçant les composantes du flux statorique et du courant rotorique, on obtient le modèle mathématique de la machine asynchrone à cage d'écuréuil :

$$\frac{d}{dt} i_{dS} = -\frac{R_S}{\sigma L_S} i_{dS} + \omega_S i_{qS} + \omega_S \frac{M}{\sigma L_S L_r} \Phi_{qr} - \frac{M}{\sigma L_S L_r} \frac{d}{dt} \Phi_{dr} + \frac{1}{\sigma L_S} V_{dS} \quad [2.61]$$

$$\frac{d}{dt} i_{qS} = -\frac{R_S}{\sigma L_S} i_{qS} - \omega_S i_{dS} - \omega_S \frac{M}{\sigma L_S L_r} \Phi_{dr} - \frac{M}{\sigma L_S L_r} \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma L_S} V_{qS} \quad [2.62]$$

$$\frac{d}{dt} \Phi_{dr} = -\frac{R_r}{g L_r} \Phi_{dr} + \omega_{Sr} \Phi_{qr} + \frac{R_r M}{g L_r} i_{dS} \quad [2.63]$$

$$\frac{d}{dt} \Phi_{qr} = -\frac{R_r}{g L_r} \Phi_{qr} - \omega_{Sr} \Phi_{dr} + \frac{R_r M}{g L_r} i_{qS} \quad [2.64]$$

- ❖ Pour les moteurs à double cage, les schémas équivalents suivant les deux axes (dq) sont figurés ci-dessous.

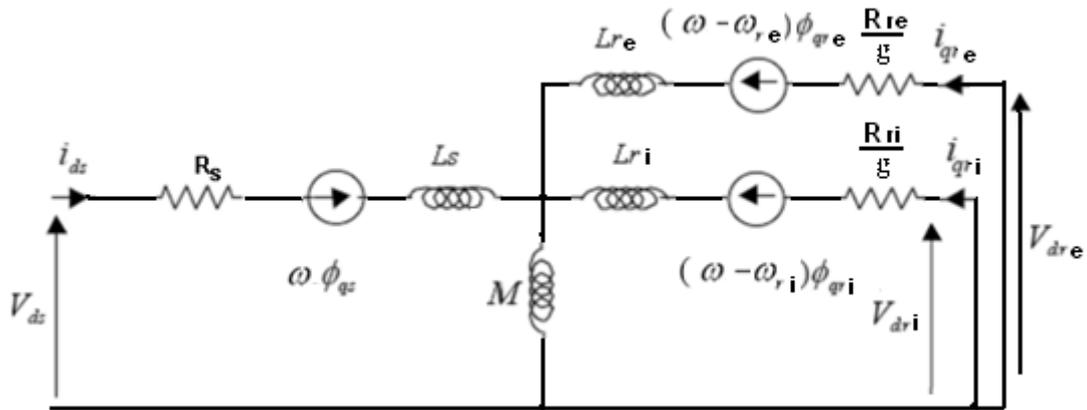


Figure 2.5 : schémas équivalents suivant l'axe d

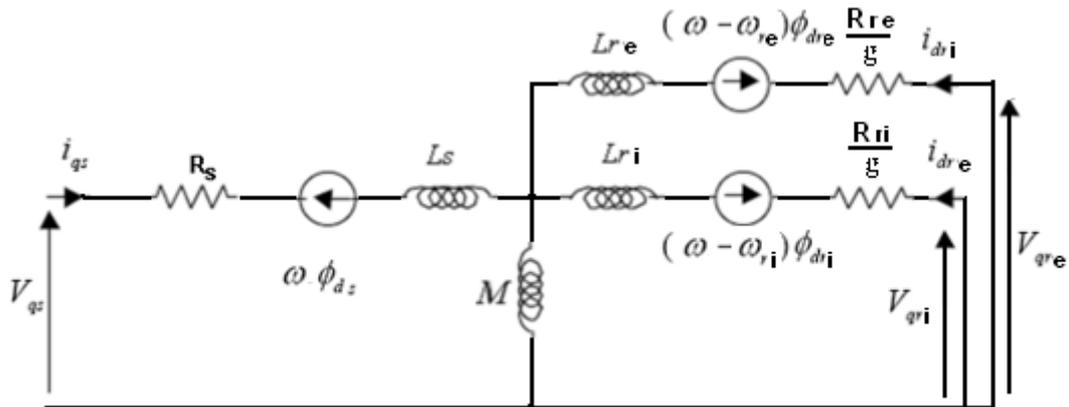


Figure 2.6 : schémas équivalents suivant l'axe q

Le stator est le même que précédent. Mais pour le rotor, la cage extérieure qui intervient au démarrage et la cage intérieure qui intervient en fonctionnement normal.

On peut déduire pour les équations du rotor :

Au démarrage :

$$0 = \frac{R_{re}}{g} i_{dr} + \omega_{Sr} \Phi_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} \quad [2.65]$$

A l'état normal :

$$0 = \frac{R_{ri}}{g} i_{qr} + \omega_{Sr} \Phi_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} \quad [2.66]$$

3. Equation de puissance et du couple

La puissance électrique statorique de la machine asynchrone s'écrit :

$$\begin{cases} P_S = \frac{3}{2}(V_{dS} i_{dS} + V_{qS} i_{qS}) \\ Q_S = \frac{3}{2}(V_{qS} i_{dS} - V_{dS} i_{qS}) \end{cases} \quad [2.67]$$

Le couple électromagnétique peut être représenté par le produit vectoriel, on a :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (i_{dqS} \wedge \Phi_{dqr}) \quad [2.68]$$

D'où l'expression du couple électromécanique s'écrit :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (i_{qS} \Phi_{dr} - i_{dS} \Phi_{qr}) \quad [2.69]$$

4 . Equations du schéma bloc de machine asynchrone à cage

A partir des équations [2.61], [2.62], [2.63] et [2.64], on a :

$$\Phi_{dr} = \Phi_{dr_0} + \int \left(-\frac{R_r}{g L_r} \Phi_{dr} + \omega_{Sr} \Phi_{qr} + \frac{R_r M}{g L_r} i_{dS} \right) dt \quad [2.70]$$

$$\Phi_{qr} = \Phi_{qr_0} + \int \left(-\frac{R_r}{g L_r} \Phi_{qr} - \omega_{Sr} \Phi_{dr} + \frac{R_r M}{g L_r} i_{qS} \right) dt \quad [2.71]$$

$$i_{dS} = i_{dS_0} + \int \left(-\frac{R_S}{\sigma L_S} i_{dS} + \omega_S i_{qS} + \frac{M}{\sigma L_S L_r} \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - \omega_S \frac{M}{\sigma L_S L_r} \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma L_S} V_{dS} \right) dt \quad [2.72]$$

$$i_{qS} = i_{qS_0} + \int \left(-\frac{R_S}{\sigma L_S} i_{qS} - \omega_S i_{dS} + \frac{M}{\sigma L_S L_r} \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + \omega_S \frac{M}{\sigma L_S L_r} \Phi_{dr} + \frac{1}{\sigma L_S} V_{qS} \right) dt \quad [2.73]$$

Avec Φ_{dr_0} , Φ_{qr_0} flux rotoriques à l'instant initial

i_{dS_0} , i_{qS_0} courants statoriques à l'instant initial

Donc, les équations pour le schéma bloc :

$$\Phi_{dr}(s) = \Phi_{dr_0} + \frac{1}{s} \left(-\frac{R_r}{g L_r} \Phi_{dr}(s) + \omega_{Sr} \Phi_{qr}(s) + \frac{R_r M}{g L_r} i_{dS}(s) \right) \quad [2.74]$$

$$\Phi_{qr}(s) = \Phi_{qr_0} + \frac{1}{s} \left(-\frac{R_r}{gL_r} \Phi_{qr}(s) - \omega_{Sr} \Phi_{dr}(s) + \frac{R_r M}{gL_r} i_{qS}(s) \right) \quad [2.75]$$

$$i_{dS}(s) = i_{dS_0} - \frac{M}{\sigma L_S L_r} \Phi_{dr}(s) + \frac{1}{s} \left(-\frac{R_S}{\sigma L_S} i_{dS}(s) + \omega_S i_{qS}(s) + \omega_S \frac{M}{\sigma L_S L_r} \Phi_{qr}(s) + \frac{1}{\sigma L_S} V_{dS}(s) \right) \quad [2.76]$$

$$i_{qS}(s) = i_{qS_0} - \frac{M}{\sigma L_S L_r} \Phi_{qr}(s) + \frac{1}{s} \left(-\frac{R_S}{\sigma L_S} i_{qS}(s) - \omega_S i_{dS}(s) - \omega_S \frac{M}{\sigma L_S L_r} \Phi_{dr}(s) + \frac{1}{\sigma L_S} V_{qS}(s) \right) \quad [2.77]$$

Nous allons choisir la position du référence afin d'annuler la composante d'axe q pour le flux rotorique, c'est-à-dire $\Phi_{rq} = 0$ et $\frac{d}{dt} \Phi_{rq} = C$, $\Phi_{rd} = \Phi_r$. Les équations deviennent :

$$\frac{d}{dt} i_{dS} = -\frac{R_S}{\sigma L_S} i_{dS} + \omega_S i_{qS} - \frac{M}{\sigma L_S L_r} \frac{d}{dt} \Phi_{dr} + \frac{1}{\sigma L_S} V_{dS} \quad [2.78]$$

$$\frac{d}{dt} i_{qS} = -\frac{R_S}{\sigma L_S} i_{qS} - \omega_S i_{dS} - \omega_S \frac{M}{\sigma L_S L_r} \Phi_{dr} + \frac{1}{\sigma L_S} V_{qS} \quad [2.79]$$

$$\frac{d}{dt} \Phi_{dr} = -\frac{R_r}{gL_r} \Phi_{dr} + \frac{R_r M}{gL_r} i_{dS} \quad [2.80]$$

$$0 = -\omega_{Sr} \Phi_{dr} + \frac{R_r M}{gL_r} i_{qS} \quad [2.81]$$

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (i_{qS} \Phi_{dr}) \quad [2.82]$$

Le système d'équation permet d'estime le flux :

$$\Phi_{dr}(s) = \frac{R_r M}{L_r} \frac{1}{\left(s + \frac{R_r}{L_r}\right)} i_{dS} \quad [2.83]$$

Chapitre III : SIMULATION A L'AIDE DE MATLAB/SIMULINK

Le logiciel constitue le cerveau de l'ordinateur. Il indique au matériel ce qu'il doit faire et comment il doit le faire. Les logiciels sont connus sous d'autres noms comme programme, applications.

Pour simuler notre modèle, on a choisi le logiciel Matlab/simulink. Les transformés de Laplace des équations précédentes nous permettent de modéliser la machine sous forme du schéma fonctionnel qui présente les fonctions de transfert suivant les paramètres d'entrées et de sorties considérés.

1. Modèles simulink

Les modèles simulink utilisés en simulation sont comme suit :

- Pour la transformation de Park direct pour les tensions

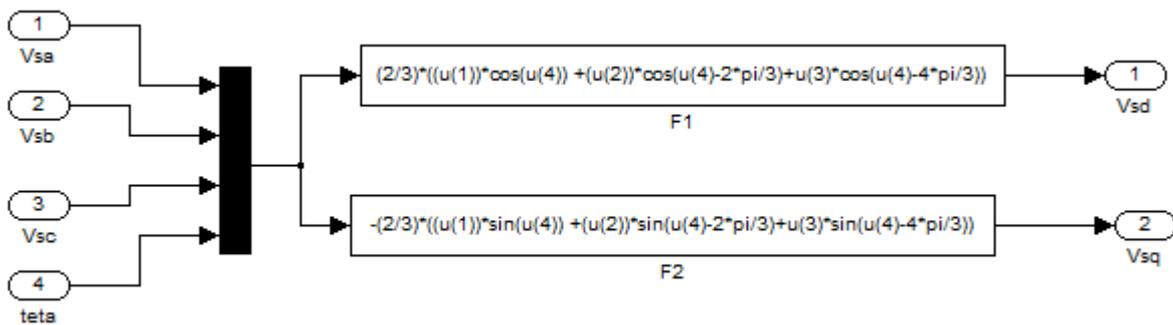


Figure 3 .1: Transformation de Park direct pour les tensions

- Pour la transformation de Park indirect pour les courants

Les transformés de Laplace des équations précédentes nous permettent de modéliser la machine sous forme du schéma fonctionnel qui présente les fonctions de transfert suivant les paramètres d'entrées et de sorties considérés.

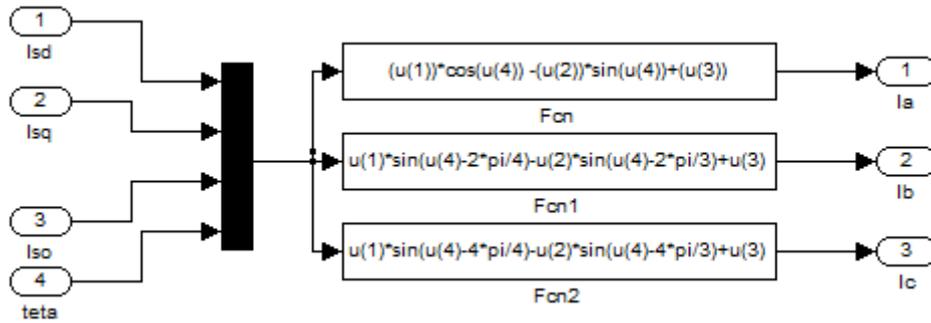


Figure 3 .2: Transformation de Park indirect pour les courants

➤ Pour la machine asynchrone à cage

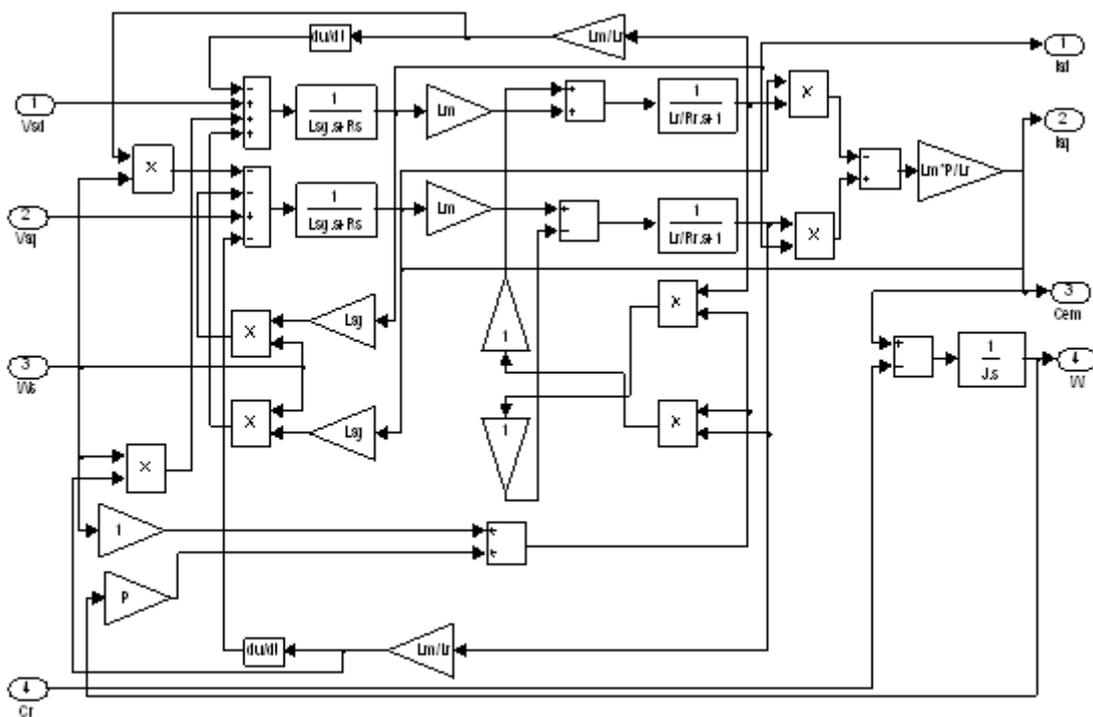


Figure 3 .3: Machine asynchrone à cage

2. Schéma bloc pour la simulation

Chaque modèles simulink est regroupé en un schéma bloc et les schémas blocs obtenus sont regroupés pour former un schéma bloc pour la simulation.

Dans notre simulation, on utilise le schéma bloc simplifié qui suit :

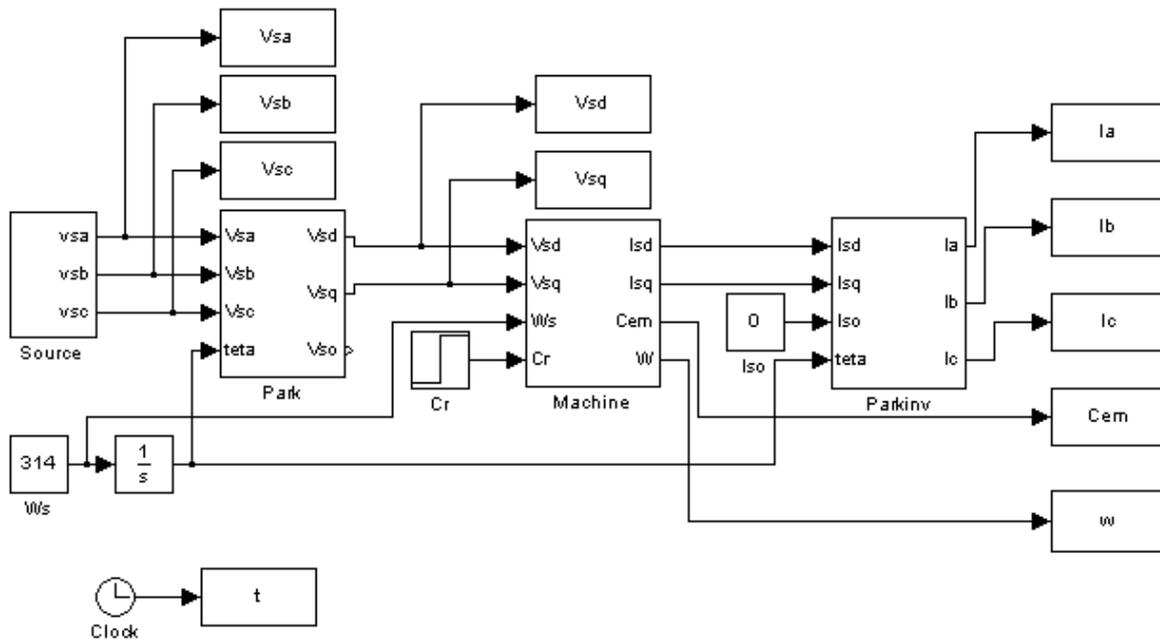


Figure 3 .4: Schéma bloc pour la simulation

Pour établir nos modèles, nous avons utilisés « simulink library » suivants :

- Sink
- Sources
- Ports & subsystem
- Commonly used blocks
- Used- defined function
- Math opération
- continuous

3. Présentation du sommaire Matlab/simulink

Le lancement de l'exécution de MATLAB provoque l'affichage figuré ci-dessous.

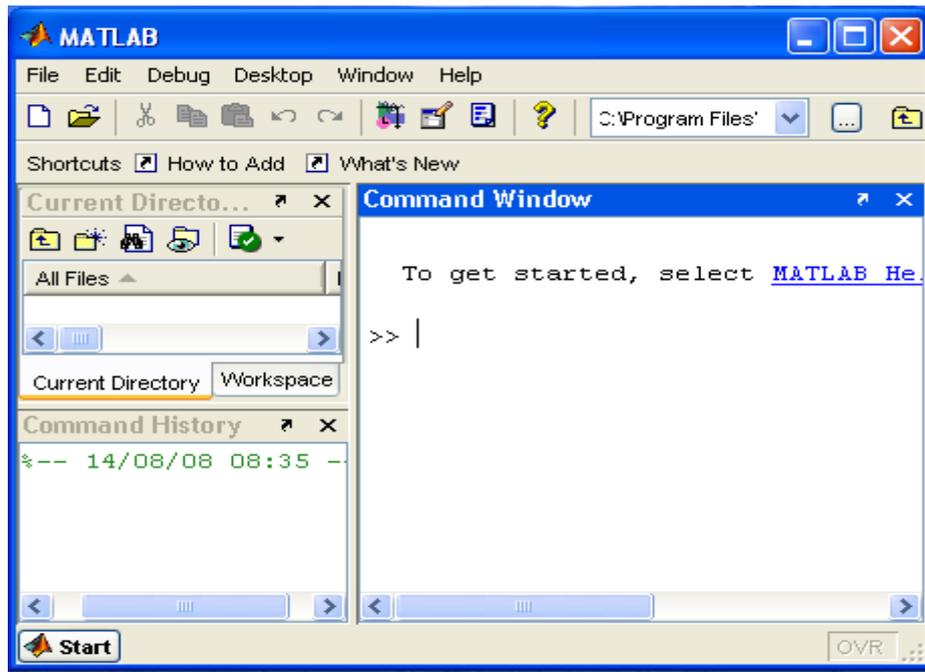


Figure 3 .5: Fenêtre de l'environnement MATLAB

Pour commencer, ouvrez le menu « file ». Sélectionnez alors « New » et dans ce même menu, sélectionnez « Model ».

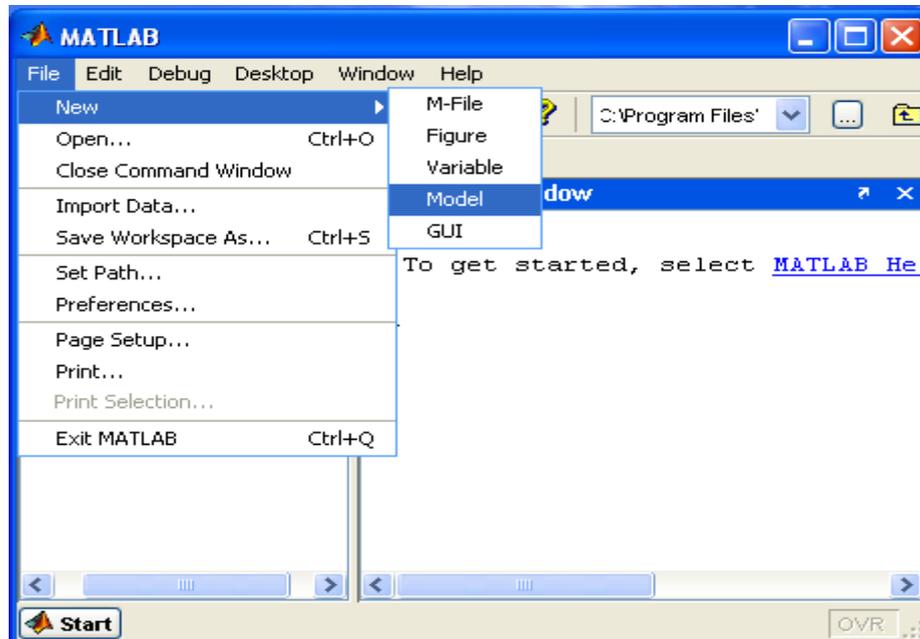


Figure 3 .6: Lancement de l'environnement Model

L'exécution précédente a pour effet de faire ouvrir la fenêtre figurée ci-dessous.

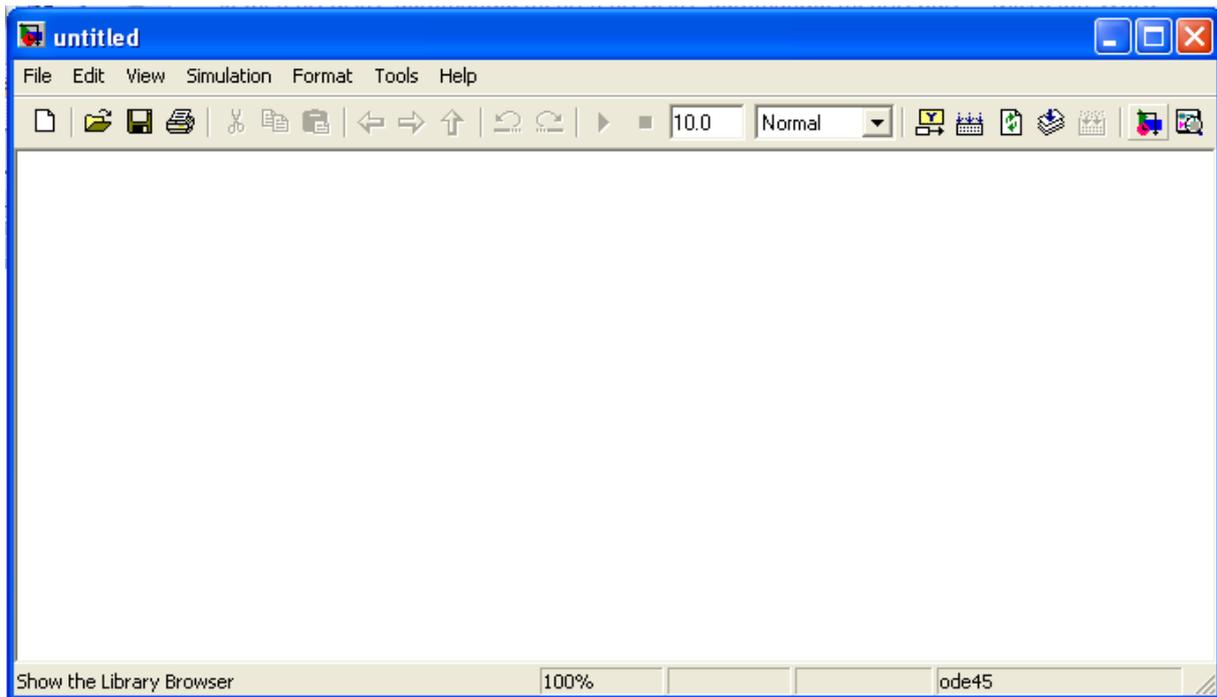


Figure 3 .7: Fenêtre de l'environnement MATLAB

Sur l'onglet de fenêtre du modèle, il suffit de lancer « simulink » en cliquant une fois sur l'icône et la fenêtre « simulink Library » apparaît.

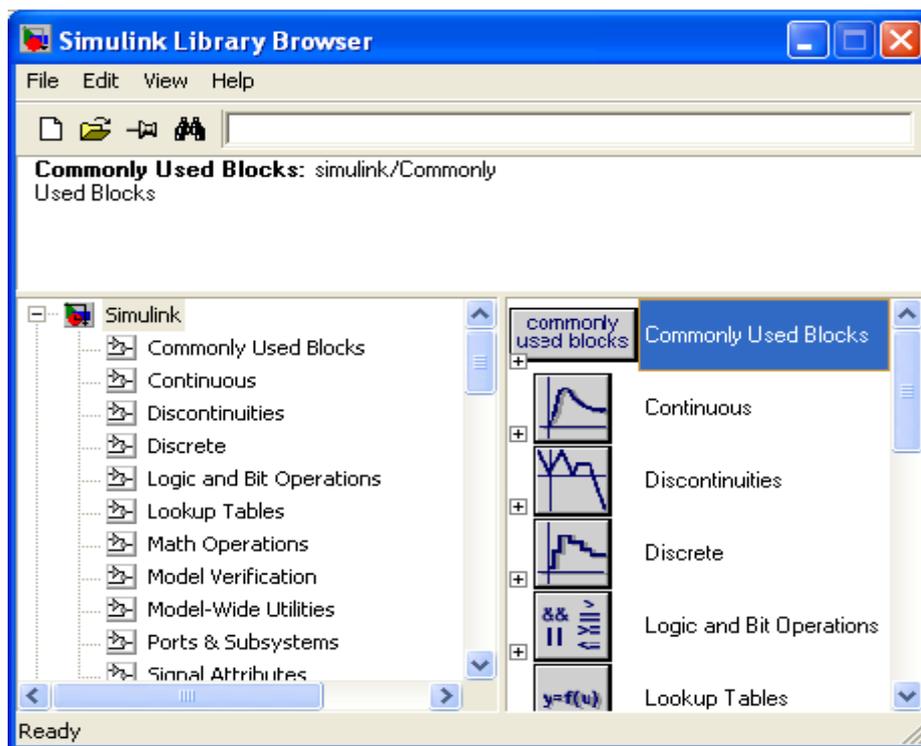


Figure 3 .8: Fenêtre « simulink Library »

Dans la fenêtre « simulink Library », on choisie les variables simulik. Il suffit d'ajouter dans le fenêtre du Modèle l'objet choisi en cliquant (clique gauche) sans le relâcher le souris jusqu'au fenêtre du Modèle. Pour copier un objet dans le fenêtre du Modèle, on clique l'objet en appuyant « ctrl », « ctrl R » pour la rotation et pour le paramétrer un double clique.

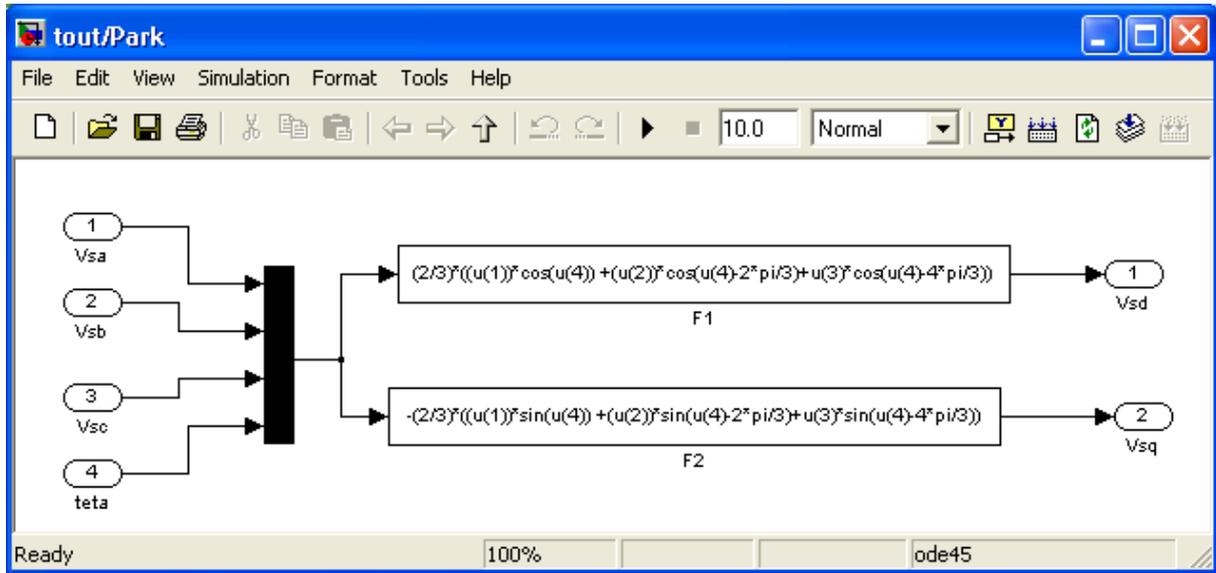


Figure 3 .9: Fenêtre du modèle simulink de Park

Pour regrouper le modèle comme figuré ci-dessous, il suffit de sélectionner ou « ctrl A », on clique (clic droite) et choisir « Create Subsystem ».

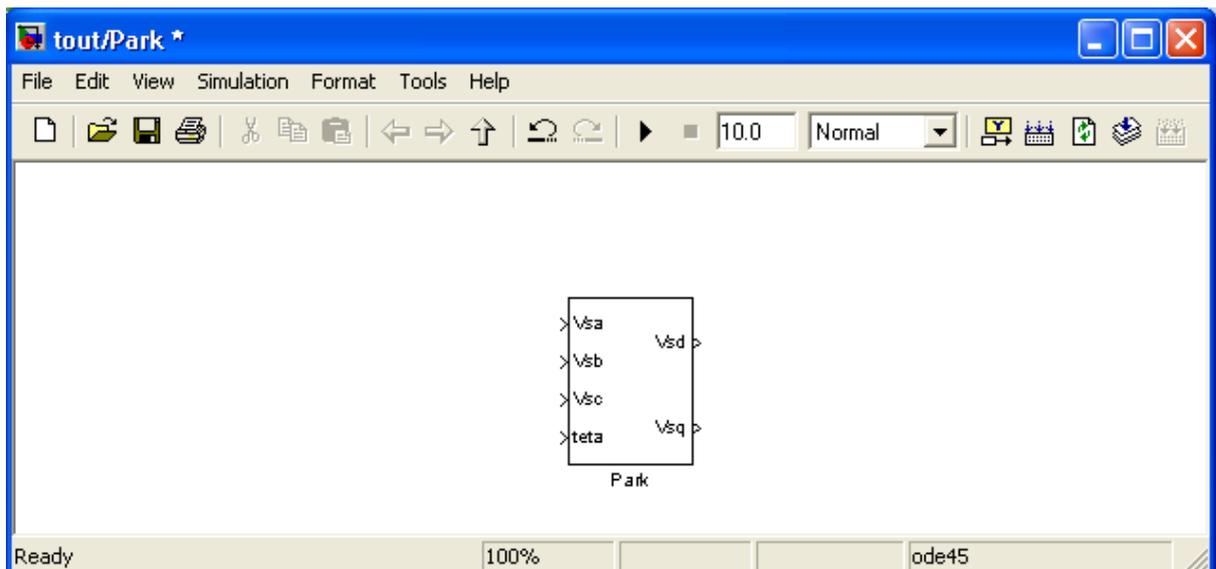


Figure 3 .10: Fenêtre du schéma bloc de Park

Lorsque le schéma block pour la simulation terminée, on peut alors lancer l'exécution du programme. Ouvrez le menu « file » sur la figure 3.4, sélectionnez alors « New » et dans ce même menu, sélectionnez « New M- file », on aura alors la fenêtre figuré ci-dessous.

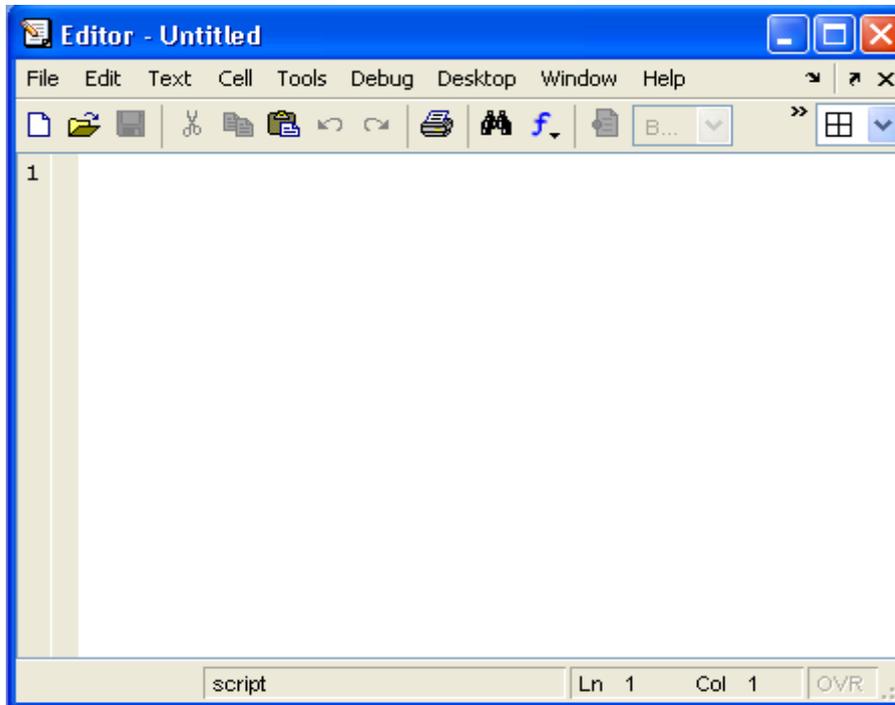


Figure 3 .11: Fenêtre d'édition du programme

Sur l'onglet de fenêtre du programme, il suffit de lancer « Evaluate cell » en cliquant une fois sur l'icône et la fenêtre de la figure apparaît.

4 . Résultats obtenus suite à la simulation

La simulation nous donne les courbes suivantes :

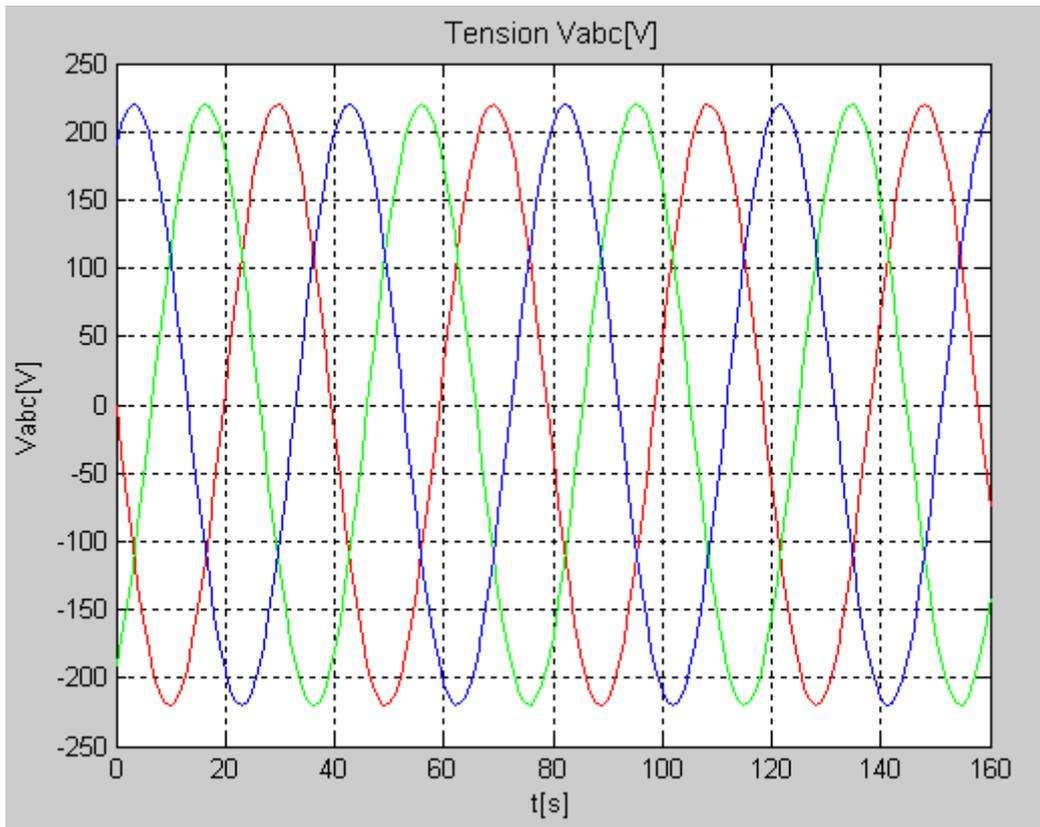


Figure 3.12 : Tensions statoriques d'axes (as, bs, cs)

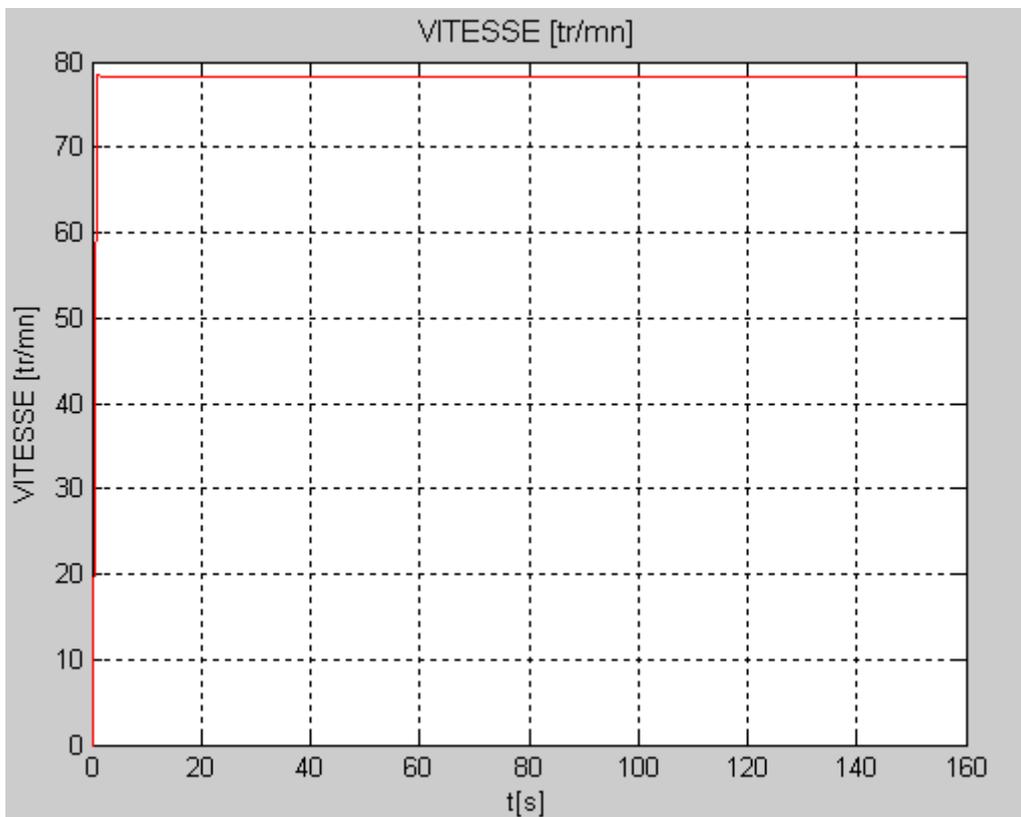


Figure 3.13 : VITESSE [tr/mn]

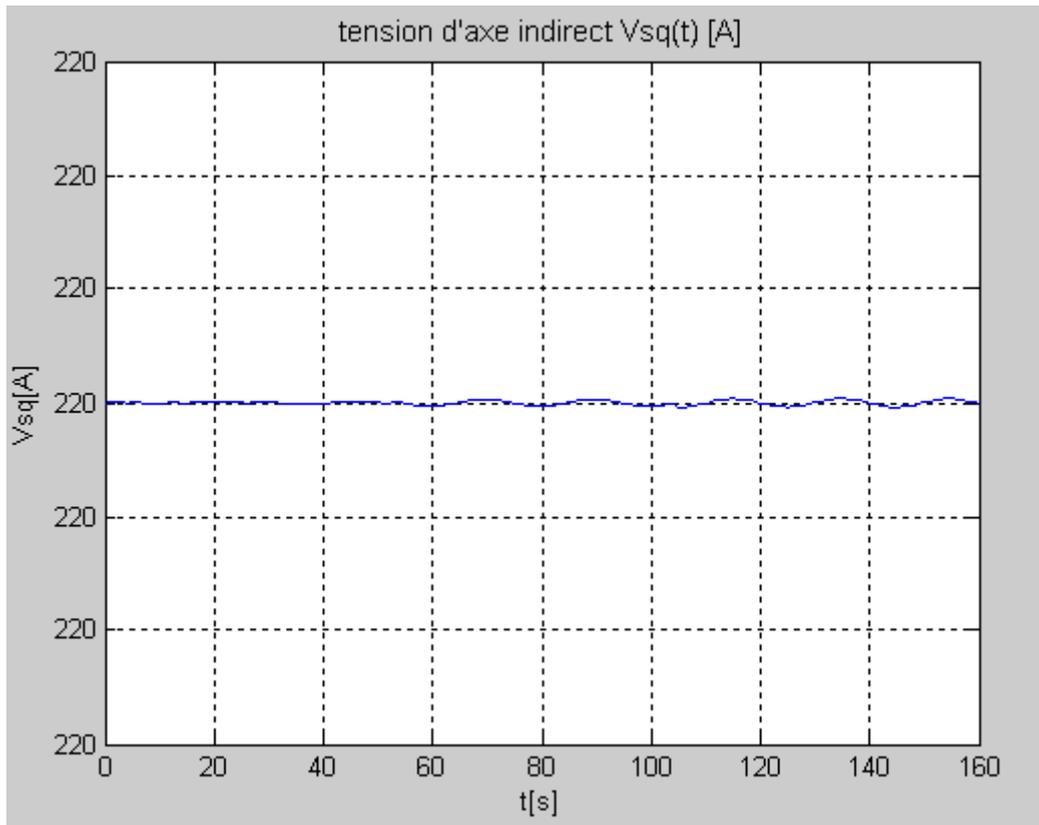


Figure 3.14 : Tensions statoriques d'axes q

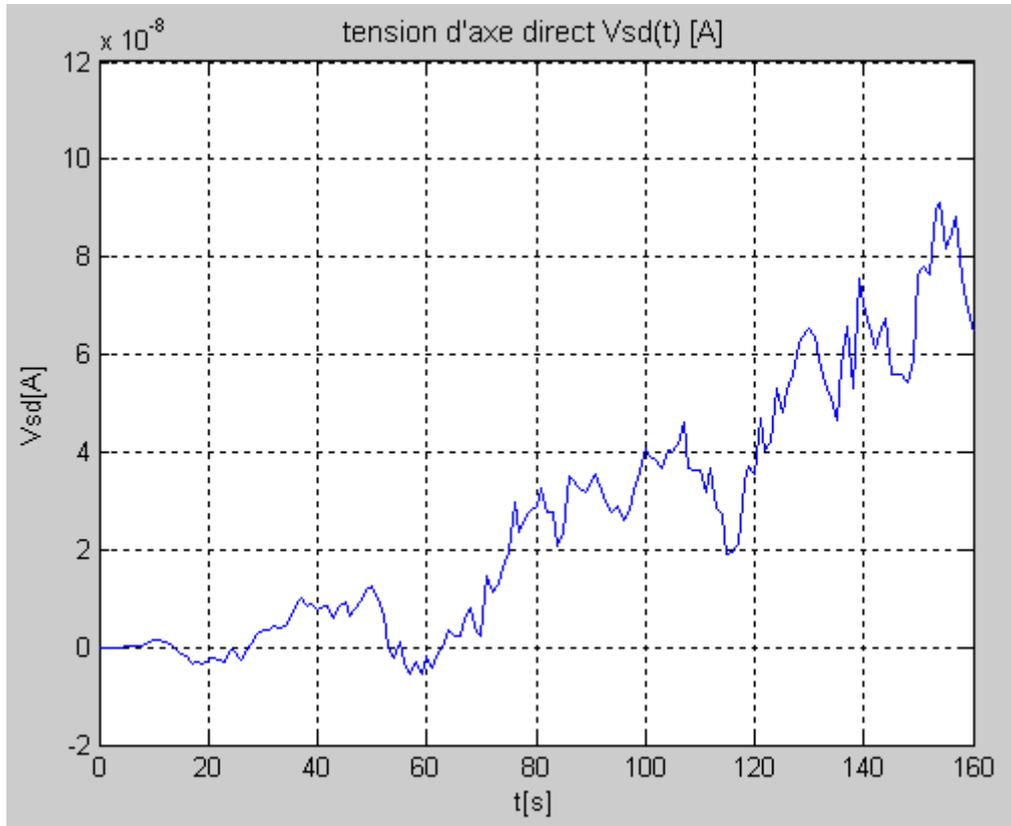


Figure 3.15 : Tensions statoriques d'axes d

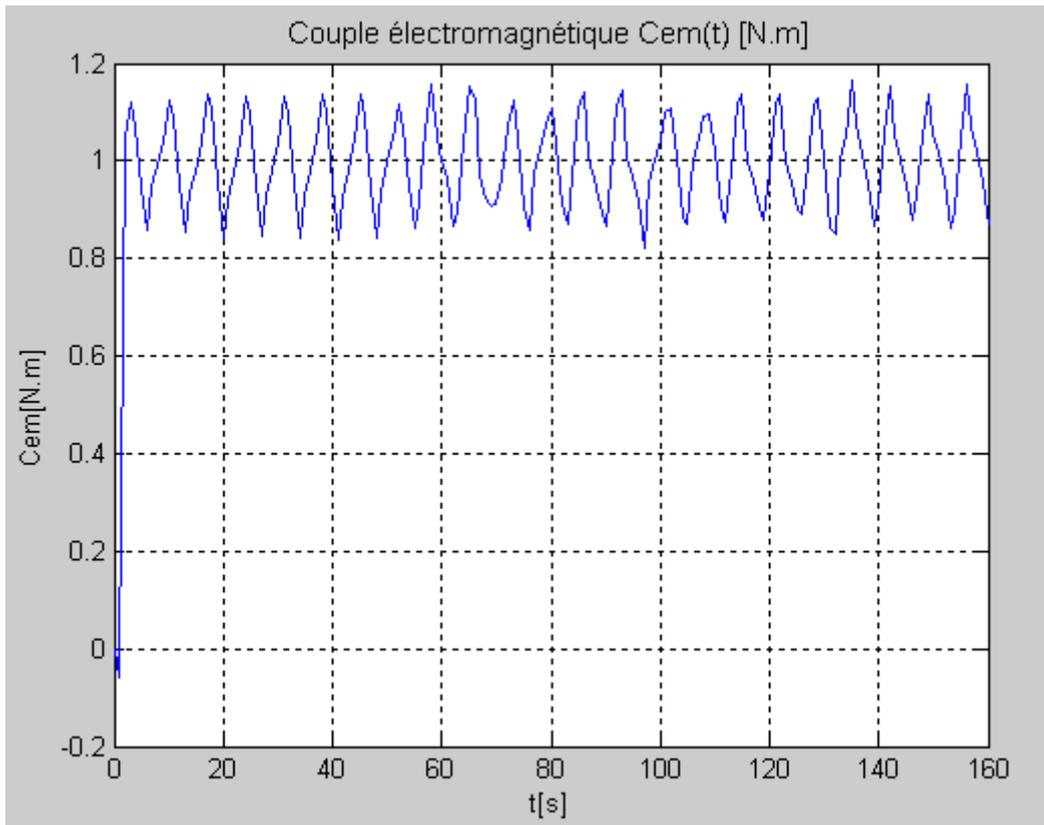


Figure 3.16 : Couple électromagnétique

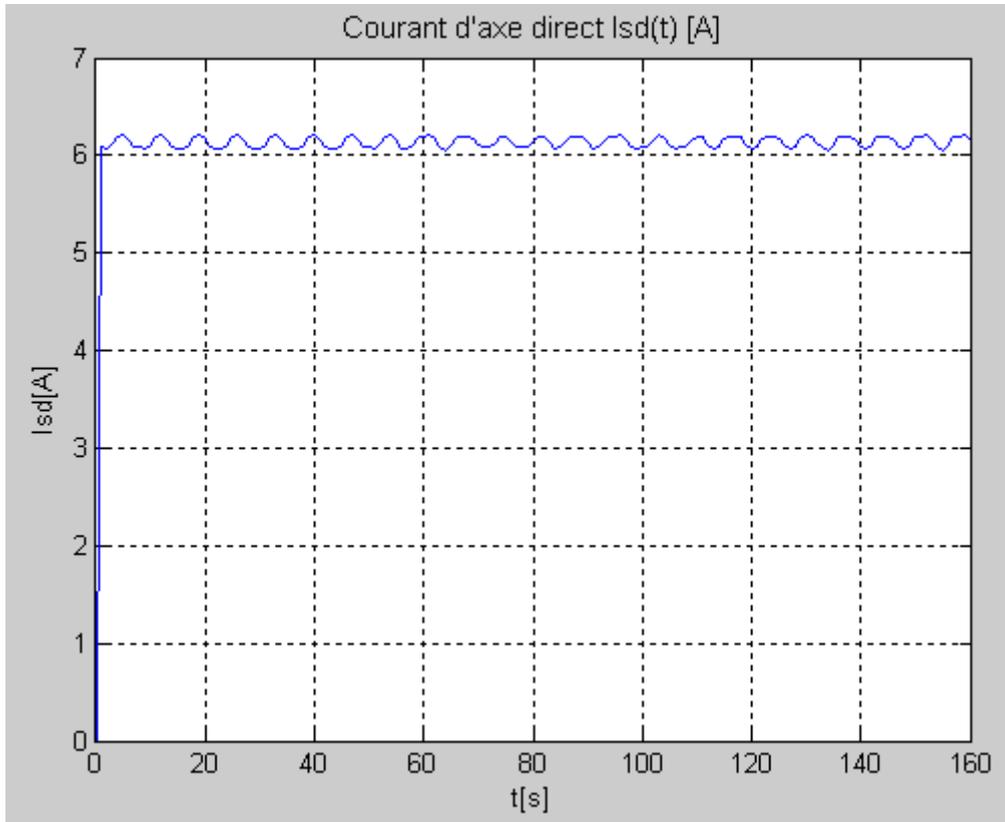


Figure 3.17 : Tensions statoriques d'axes d

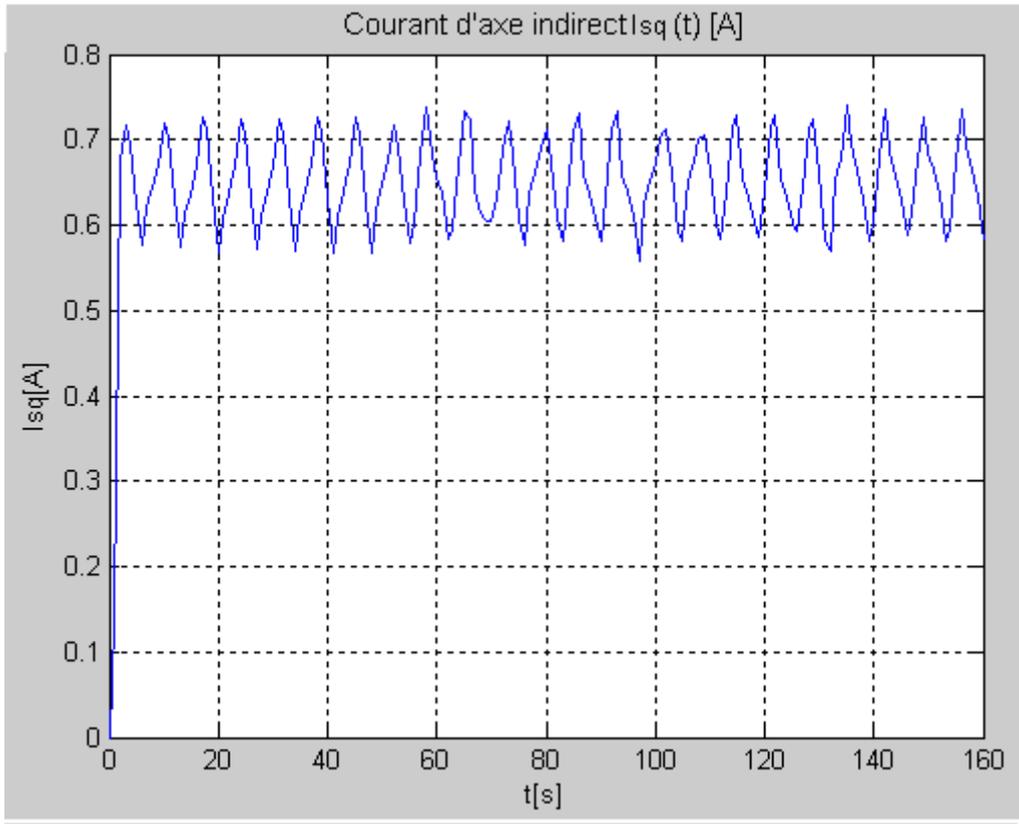


Figure 3.18: Tensions statoriques d'axes q

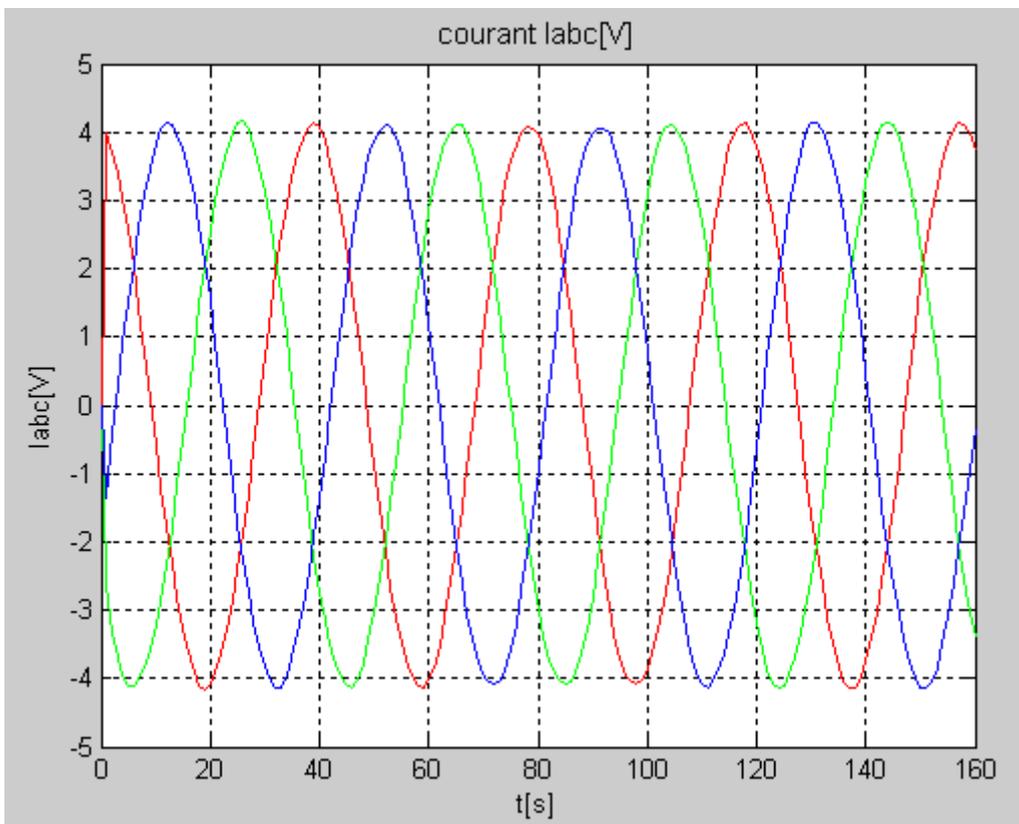


Figure 3.19 : Courants statoriques d'axes (as, bs, cs)

INTERPRETATION :

Les résultats obtenus nous montrent que les courants et les tensions statoriques sont sinusoïdaux en fonction du temps. La vitesse initiale est nul et dévient stable en régime permanent. Les courants statoriques suivants les axes dq sont positifs et à la fois sinusoïdale. Les résultats de simulation sont assez satisfaisants, ce qui nous a permis de valider le modèle. La principale source de la perturbation des courbes restent la précision de l'identification de la caractéristique de magnétisation.

Chapitre IV : IMPLICATION PEDAGOGIQUE**Thème 1 : Moteur asynchrone****Matière :** TECHNOLOGIE**Niveau :** 3^{ème} année**Spécialité :** Formation Technologie Générale ou FTG

Objectif : A L'issue de cette séance, les élèves devront connaître les caractéristiques et les différentes parties de moteur asynchrone ainsi capable de décoder la plaque signalétique de moteur asynchrone

Pré-requis : connaissance sur les machines à courant alternatif

Durée : 3 heures

Contenu :

1- Définition d'un moteur asynchrone

Un moteur asynchrone est un convertisseur d'énergie c'est-à-dire il transforme l'énergie électrique en énergie mécanique.

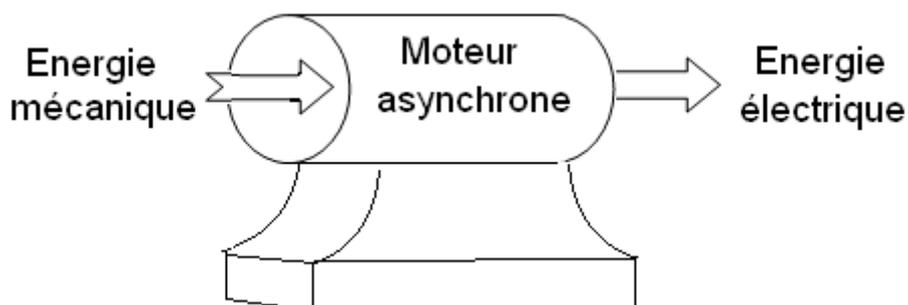


Figure 5 .1: fonctionnement de moteur asynchrone

2- Caractéristiques d'un moteur asynchrone

Un moteur asynchrone est caractérisé par :

- Nature du courant ou tension : alternatif ou continu

- Tension d'alimentation : U[V]
- Nombre de phase : monophasé ou triphasé
- Vitesse de rotation : fréquence de rotation [tr/mn] qui est proportionnelle à la fréquence d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre de pôles

$$\text{c'est-à-dire : } \begin{cases} n = \frac{f}{p} \\ g = \frac{n-n'}{n} \end{cases} \quad [5.1]$$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} n: \text{vitesse du synchronisme} \\ \quad g : \text{glissement} \\ p: \text{nombre de paire de pôles} \\ n' : \text{vitesse de rotation du rotor} \\ \quad f: \text{fréquence [Hz]} \end{array} \right.$

- Nature de couplage : triangle (Δ) ou étoile (Y)
- Nombre de pôles : monopolaire, tripolaire, tétrapolaire, hexapolaire, ...
- Lieu d'emploi qui est indiqué par indice de protection [IP] : protégé, étanche, ou fermé

Exemple :

- IP23 protégé
- IP44 fermé
- IP55 étanche
- Nombre de manœuvre par heure : service (S)
- Classes d'isolation des bobinages :

Classe d'isolation	E	B	F	H
Echauffement maxi en °C	75	80	100	125
Température limite du bobinage en °C	115	120	140	165

Tableau 5 .1: classe d'isolation

3- Constitution d'un moteur asynchrone triphasé

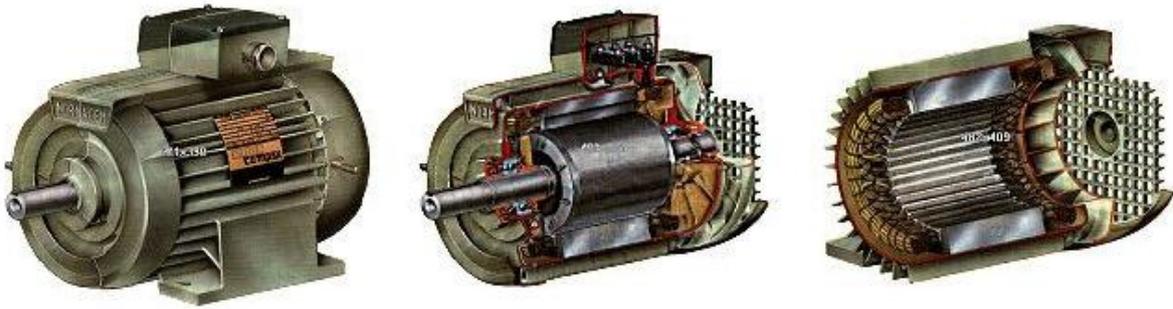


Figure 5.2: Constitution d'un moteur asynchrone triphasé

On peut classer les différentes pièces rencontrées selon les trois organes cités ci-dessous :

- ❖ Composants électriques
 - 1- Enroulement statorique
 - 2- Conducteur rotorique
- ❖ Composants magnétiques
 - 3- Circuit magnétique fixe
- ❖ Composants mécaniques
 - 4- Circuit magnétique tournant
 - 5- Carcasse avec fixation ou stator
 - 6- Rotor avec l'arbre
 - 7- Roulement à billes
 - 8- Flasques
 - 9- Ventilateur avec son capot
 - 10-Capot de ventilation
 - 11-Tige de montage
 - 12-Plaque à bornes

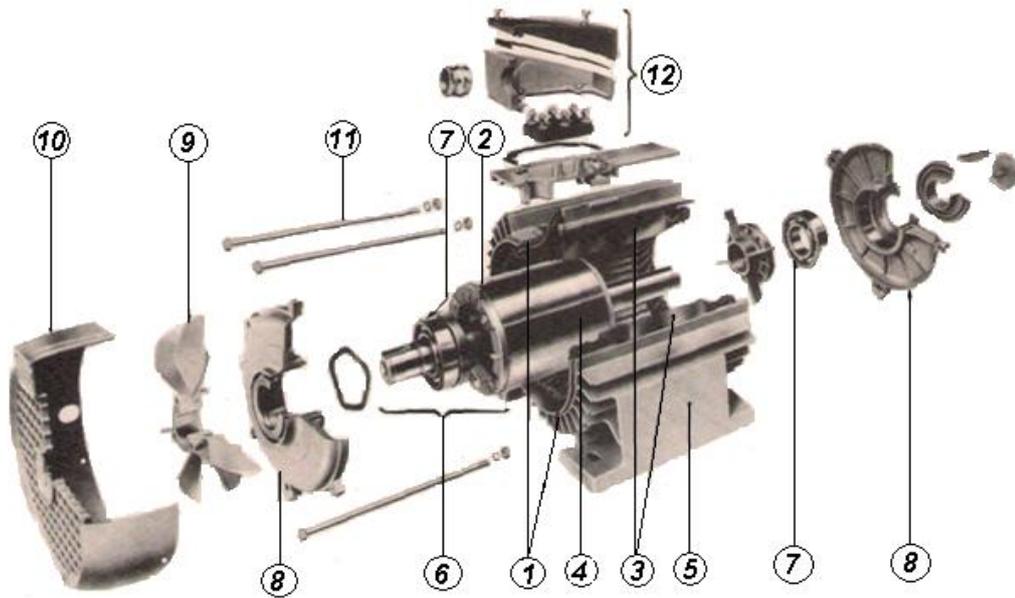


Figure 5.3 : Différentes pièces rencontrées d'un moteur asynchrone

4- Différents types d'un moteur asynchrone

D'une façon générale, un moteur asynchrone est constitué d'une partie fixe appelée **stator** et une partie tournante appelée **rotor**.

On classe les différents types de moteur asynchrone selon les types de rotor :

- Moteur asynchrone à rotor à cage

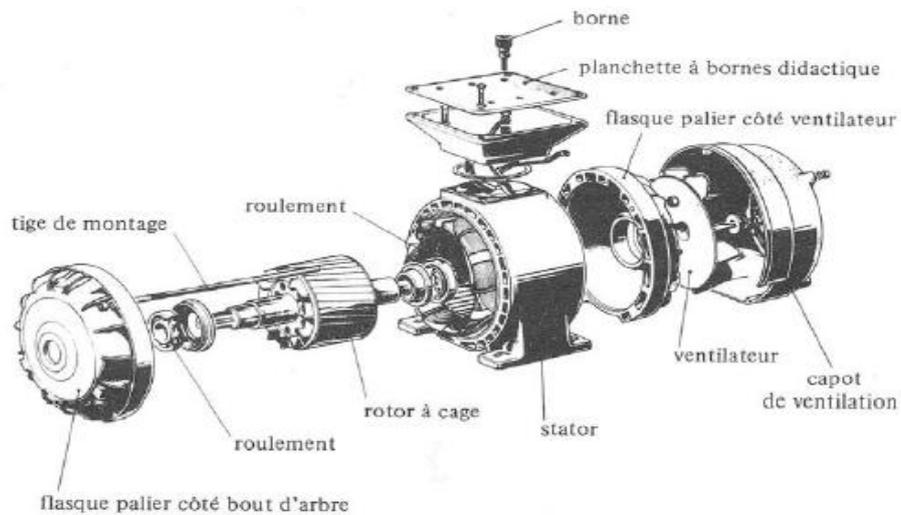


Figure 5.4: vue éclatée de moteur asynchrone à cage

- Moteur asynchrone à rotor à bague

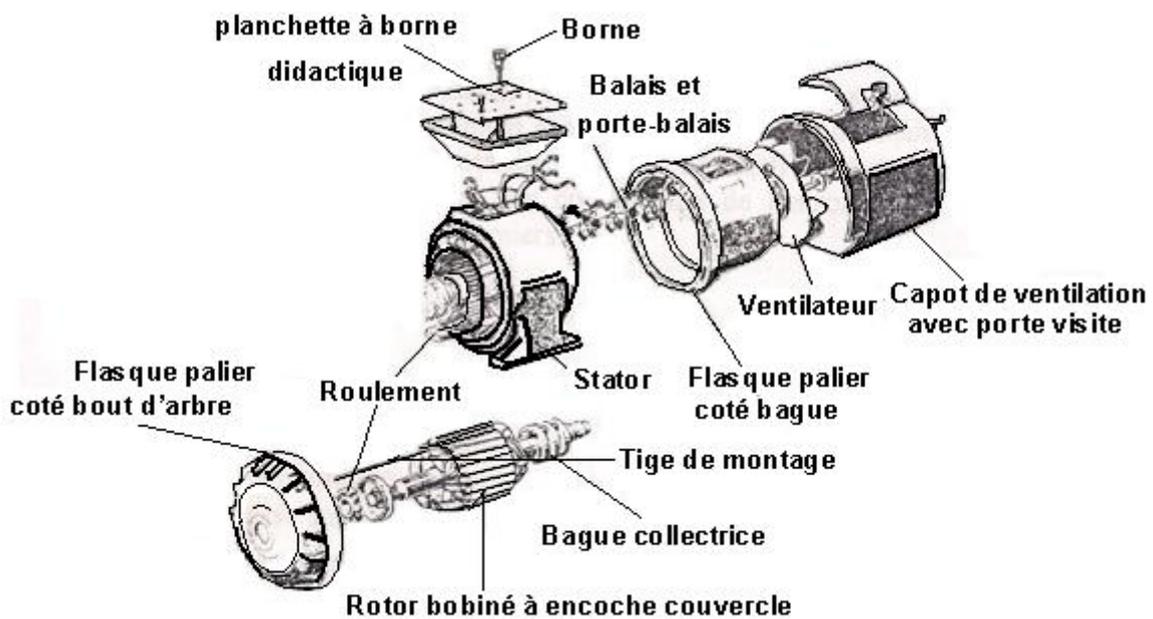


Figure 5.5: vue éclatée de moteur asynchrone à bague

5- Mise sous tension d'un moteur asynchrone triphasé

L'alimentation d'un moteur asynchrone est effectuée directement par le réseau triphasé ou source d'énergie triphasée. On l'alimente à partir des bornes de connexion sur la plaque à bornes statoriques.

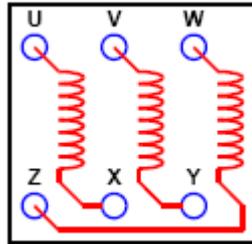


Figure 5.6 : Plaque à borne

Et le symbole électrique correspondant :

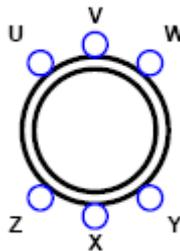


Figure 5.7: symbole

Les interconnexions pour les couplages des enroulements sont comme suit :

- Pour le couplage en étoile

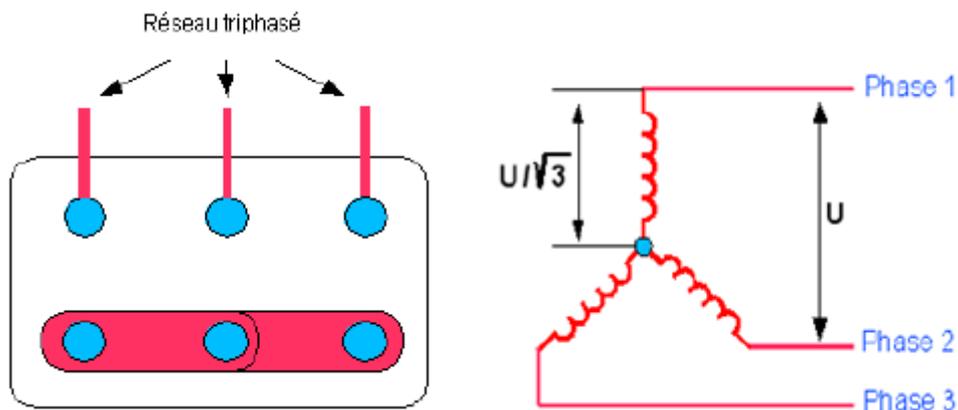


Figure 5.8: Montage en étoile

- Pour le couplage en triangle

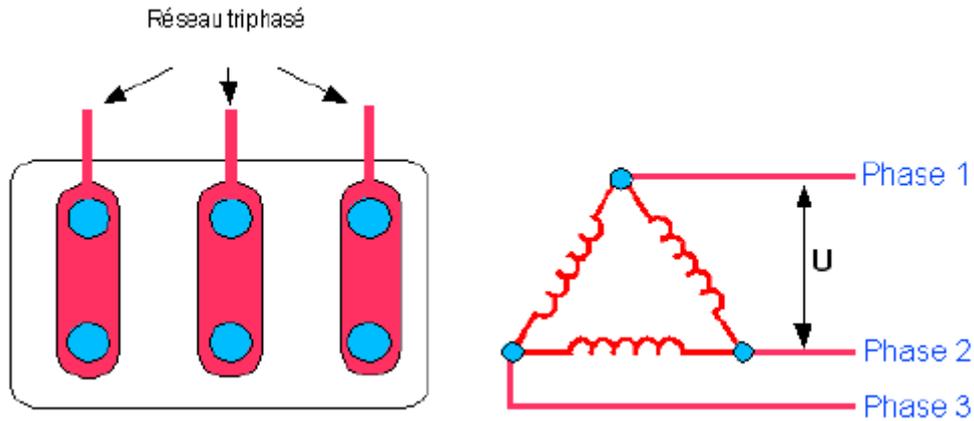


Figure 5.9: Montage en triangle

6- Maintenance

Les principales causes de pannes sont dues :

- A l'alimentation
 - Manque de tension sur une phase
 - Mauvais couplage des barrettes de la plaque à bornes
- Au bobinage statorique
 - Coupure de bobine
 - Court-circuit entre spire
 - Mauvais couplage du bobinage
- A l'enroulement rotorique
 - Manque de puissance
- Aux défauts mécaniques
 - Roulements usés
 - Ventilateur ou rotor décentré

7- Domaines d'utilisation des moteurs asynchrones

En général, ils sont utilisés pour entraîner les Machines à outils, Machines à bois, Ventilateurs, Aspirateurs,...etc.

8- Exercice

Voici la plaque signalétique d'un moteur asynchrone

ABB Motors			
Mot As. D30L/ MEDL 280 M4			
N° FL 528663	~3	Cos. φ 0,87	
Kw 90	CI F	Δ 80K	
50Hz	IP 55	640 kg	
V 220 Δ	290 A		
V 380 Y	167 A		
t/min 1480	S1		
Rot	V	A	CI

Figure 5.10: Plaque signalétique

- Décoder cette plaque signalétique.
- Déterminer la vitesse du synchronisme.
- Calculer le glissement du moteur.
- Quel couplage doit – on effectuer sur ce moteur pour un réseau triphasé 220/380 [V] ?
- Quel sera l'intensité du courant absorbée correspondante à ce couplage ?
- Représenter le schéma de la plaque à bornes correspondant.

➤ **Résultat**

- Décode de plaque signalétique :
 - Nature du courant ou tension : alternatif
 - Tension d'alimentation : 220[V] en triangle et 380[V] en étoile
 - Nombre de phase : triphasé
 - Vitesse de rotation : 1480[tr/mn]
 - Nature de couplage : triangle (Δ) ou étoile (Y)
 - Nombre de pôles : tétrapolaire
 - Indice de protection [IP] : étanche
 - Nombre de manœuvre par heure : service (S_1)
 - Classes d'isolation des bobinages : F
- vitesse du synchronisme :

$$n = \frac{f}{p}$$

Avec $2p = 4$ et $f = 50\text{Hz}$

$$n = \frac{50}{2}$$

$$n = 25 \text{ [tr/s]} = 1500 \text{ [tr/mn]}$$

c. le glissement du moteur :

$$g = \frac{n - n'}{n}$$

$$g = \frac{1500 - 1480}{1500} = 0,013$$

d. Pour un réseau triphasé 220/380 [V], on doit effectuer le couplage triangle à ce moteur.

e. L'intensité du courant absorbée correspondante sera 290 [A].

f. Le schéma de la plaque à bornes :

Réseau d'alimentation

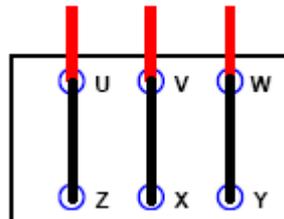


Figure 5.11: Plaque à bornes

Thème 2 : Moteur asynchrone**Matière :** ELECTROTECHNIQUE**Niveau :** 3^{ème} année**Spécialité :** ELECTROTECHNIQUE ou EL**Objectif :** A l'issue de cette séance, les élèves devront connaître les caractéristiques, principe de fonctionnement et les différentes parties de moteur asynchrone de moteur asynchrone**Pré-requis :** connaissance sur les machines à courant alternatif et le circuit équivalent du transformateur**Durée :** 3 heures**Contenu :****1 .Définition de moteur asynchrone**

Le moteur asynchrone est une machine tournante transformant l'énergie électrique apporté par le courant alternatif (monophasé ou triphasé) en énergie mécaniques. Il est caractérisé par des grandeurs d'entrée qui sont électriques et par des grandeurs de sortie qui sont mécaniques.

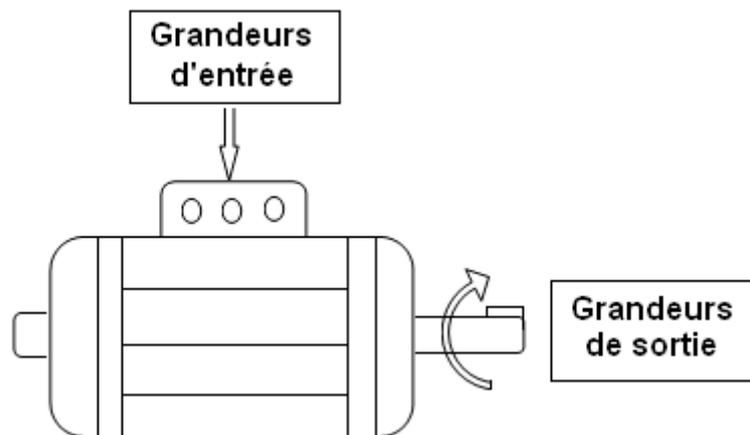


Figure 5.12 : Caractéristique de moteur asynchrone

➤ **Grandeurs d'entrée**

La puissance électrique absorbée par un moteur à courant alternatif :

En monophasé, $P_a = U I \cos \varphi$

En triphasé, $P_a = \sqrt{3} U I \cos \varphi$

Avec U : tension entre phases [V]

I : le courant absorbée [A]

$\cos \varphi$: Cosinus de l'angle de déphasage entre le courant et la tension

➤ **Grandeurs de sortie**

La puissance mécanique obtenue sur l'arbre du moteur est la puissance nominale du moteur qui s'écrit :

$$P = C \omega$$

$$\omega = 2\pi n_s$$

$$n_s = \frac{f}{p}$$

Avec P: la puissance mécanique

C : Couple moteur

ω : vitesse angulaire [rad/s]

n_s : vitesse du synchronisme [tr/s] et f, p la fréquence du réseau et nombre de paire de pôles

2 .Constitution de moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est constitué d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor.

➤ Stator

Le stator est constitué par des tôles magnétiques dont le nombre de phases est indiqué sur la plaque signalétique. Et les enroulements statoriques sont libres de couplage.

➤ Rotor

De manière générale, on distingue deux types de rotor :

- Rotor à cage

Il est constitué des barres conductrices en cuivre placées dans les encoches rotoriques, et mise en court-circuit permanent par deux anneaux de court-circuit.

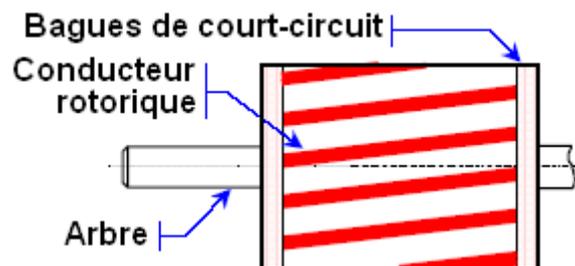


Figure 5.13: constitution du rotor à cage

- Rotor à bague

Il est mis en court-circuit par l'extérieur à travers de trois bornes liées électriquement par des contacts glissants appelés bagues sur lesquelles s'appliquent des balais.

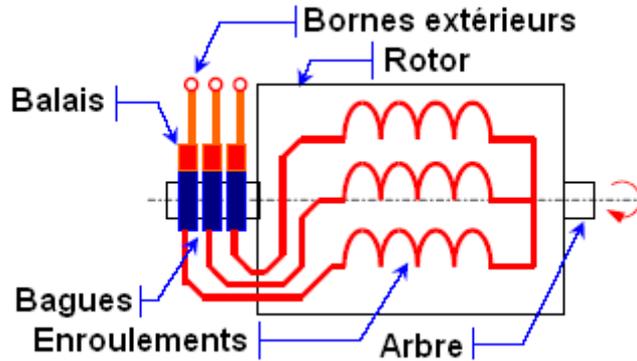


Figure 5.14: constitution du rotor à bagues

1. Symbole

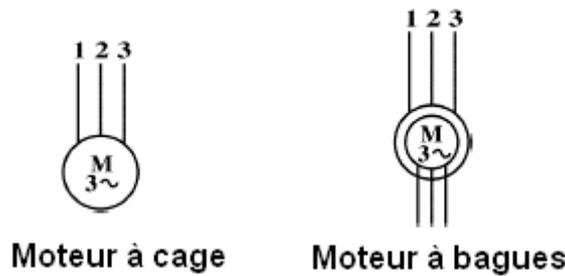


Figure 5.15: symbole des moteurs asynchrones

2. Principe de fonctionnement

Si on alimente les enroulements statoriques de pulsation ω , il créent p paire de pôles d'un champ magnétique glissant à la pulsation du synchronisme $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$

La présence des courants et d'un champ magnétique glissant est l'origine de l'existence d'un couple électromagnétique que celui-ci provoque la rotation relative du champ magnétique par rapport au rotor. Le glissement du rotor par rapport au champ magnétique glissant :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

Ω : la pulsation de rotation

De plus, on distingue trois régimes de fonctionnement de la machine asynchrone :

- Fonctionnement en frein électromagnétique ($g > 1$) :

L'arbre de la machine asynchrone tourne dans le sens contraire à celui du champ tournant statorique.

- Fonctionnement en moteur ($0 < g < 1$)

L'énergie électrique absorbée au stator est transformée en énergie mécanique sur l'arbre de la machine.

- Fonctionnement en génératrice ($g < 0$)

La machine absorbe une puissance mécanique qui sera restituée, en majeure partie, au réseau sous forme d'énergie électrique.

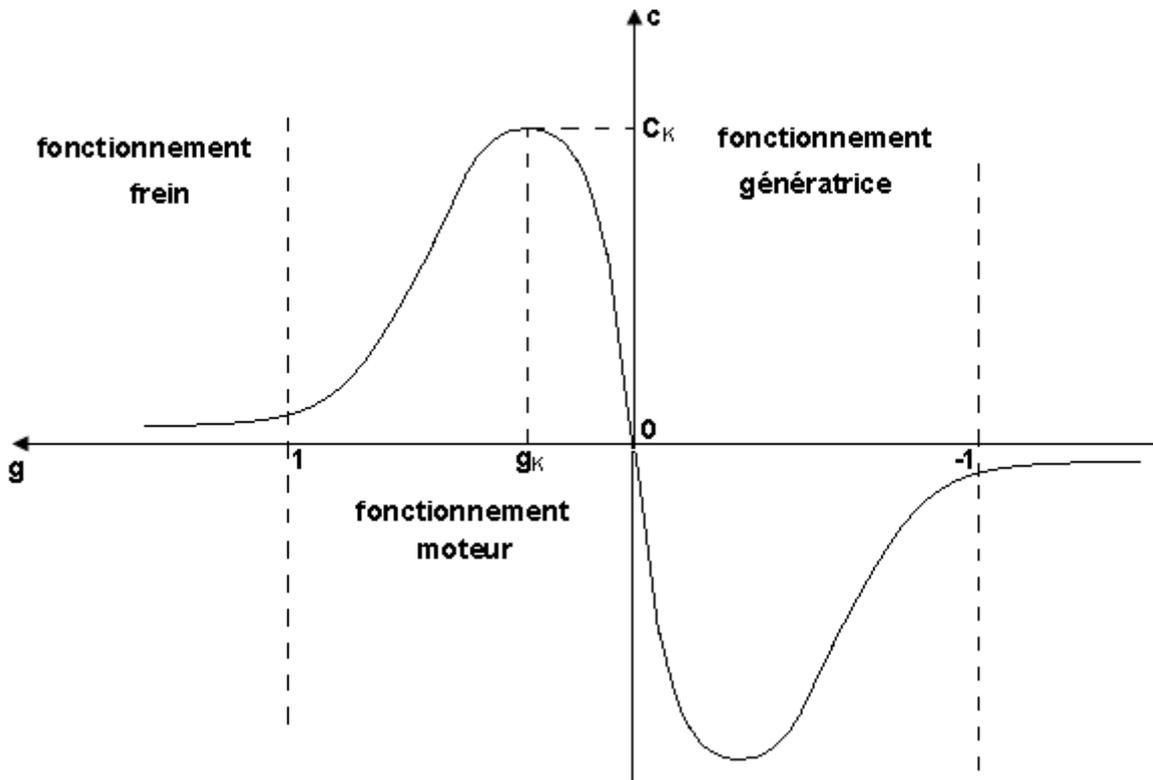


Figure 5.16: Régimes de fonctionnement de la machine asynchrone

3. Bilan de puissance

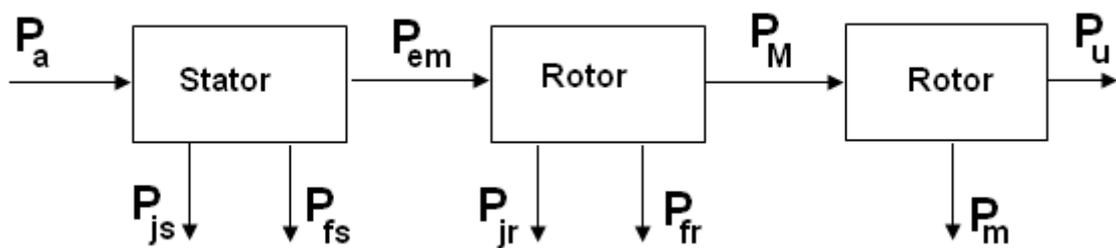


Figure 5.17: Bilan de puissance

P_u : Puissance utile

P_a : Puissance absorbée

P_{fs} : Pertes fer statoriques

P_{fr} : Pertes fer rotoriques

P_{js} : Pertes joules statoriques

P_{jr} : Pertes joules rotoriques

P_m : Pertes mécaniques due au roulement ou ventilation

P_M : Puissance mécanique

P_{em} : Puissance transmise du stator au rotor

Le moteur absorbe du réseau la puissance absorbée à travers les bornes statoriques

- **Puissance électrique absorbée :**

$$P_a = \sqrt{3} U I \cos \varphi$$

U : Tension entre phases [V]

I : Courant absorbée [A]

Une partie de cette puissance absorbée est perdue dans le stator sous forme de pertes fer P_{fs} (pertes magnétiques) et de pertes dans le cuivre P_{js} due à l'effet joules.

- **Pertes joules statoriques :**

$$P_{js} = 3 R_S I^2$$

R_S : Résistance statorique

La puissance restante est alors transmise au rotor par le champ tournant sous forme de puissance électromagnétique.

- **Puissance électromagnétique ou Puissance transmise du stator au rotor:**

$$P_{em} = P_a - P_{js} - P_{fs}$$

- **Moment du couple électromagnétique :**

Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse Ω_s : elles glissent sur le rotor qui lui ne tourne qu'à la vitesse Ω .

L'action de l'ensemble des forces électromagnétiques se réduit à un couple électromagnétique résultant le moment T_{em} .

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s}$$

T_{em} : Moment du couple électromagnétique exprimé en [N m]

Le rotor utilise la puissance électromagnétique et une partie de cette puissance est gaspillée sous forme de pertes par effets joules rotoriques.

- **Pertes joules rotoriques :**

$$P_{jr} = gP_{em}$$

La puissance restante sera la puissance P_M disponible à l'arbre du moteur.

- **Puissance mécanique :**

$$P_M = P_{em} (1 - g) = P_{em} - P_{jr} - P_{fr}$$

Une partie de la puissance mécanique est transformée à des pertes P_m due au frottement ou par ventilation et la puissance restante sera la puissance utile P_u du moteur.

- **Pertes mécaniques :**

$$P_m = P_u - P_M$$

- **Couple utile :**

$$T_u = \frac{P_u}{\Omega}$$

- **Le rendement s'écrit :**

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

4. Circuit équivalent du moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est équivalent à un transformateur dont le circuit équivalent est établi de façon à ramener les éléments rotoriques au stator

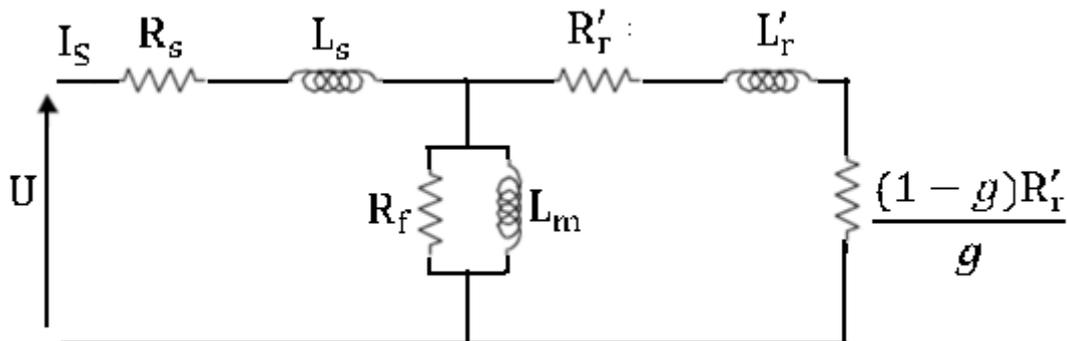


Figure 5.18: circuit équivalent

Avec :

$$R'_r = \frac{R_r}{m^2}$$

$$L_r' = \frac{L_r}{m^2}$$

$$m = \frac{N_2}{N_1}$$

N_1 et N_2 nombre de spires statoriques et rotoriques.

CONCLUSION

Le but essentiel des machines électriques est de transformer l'énergie d'une forme dans une autre (électrique, mécanique). Les machines asynchrones sont les plus utilisées dû à sa robustesse et sa réversibilité.

Nous avons établi le modèle mathématique de machine asynchrone. Cette théorie est basée sur la transformée de Park qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à un système cartésien d'axes dq. Et notre simulation est réalisée à l'aide de logiciel Matlab/simulink en présentant les sommaires. Les résultats de simulation montrent la validation du modèle.

Le travail présente non seulement un intérêt théorique et pratique du logiciel mais il fournit également un outil pédagogique.

ANNEXES

PROGRAMMATION POUR LA SIMULATION

```

clc;clear;
%=====
%Parametre globaux
%global Rr RS Lr Ls J f P
%=====
Rr=1.29511;%Resistance rotorique
Rs=1.07131;%resistance statorique
M=0.10474;%Inductance mutielle
Lr=M+4.8613e-3%0.1101;%Inductance rotorique
Ls=M+8.9382e-3%0.1103;%Inductance statorique
J=0.23;%moment d'inertie
p=4;%nombre de pôle
C=1000e-006;%condensateur de filtrage
sigma=1-M^2/Ls/Lr;%coefficient de disperssion
Tr=Lr/Rr;%constante de temps rotorique
Lsg=sigma*Ls;
sim('fanampy',[0:160]);

figure(1),
plot(t,Ce);
xlabel('t[s]');
ylabel('Cem[N.m]');
title(['Couple électromagnétique ' 'Cem(t) [N.m]'],'fontsize',11)
grid on;

figure(2),
plot(t,Ids);
xlabel('t[s]');
ylabel('Isd[A]');
title(['Courant d''axe direct ' 'Isd(t) [A]'],'fontsize',11)
grid on;

figure(3),
plot(t,Iqs);
xlabel('t[s]');
ylabel('Isq[A]');
title(['Courant d''axe indirect ' 'Isq(t) [A]'],'fontsize',11)
grid on;

figure(4),
plot(t,V,'r');
xlabel('t[s]');
ylabel('VITESSE [tr/mn]');
title(['VITESSE [tr/mn]'],'fontsize',11)
grid on;

figure(5),
plot(t,Va,'r');
hold on
plot(t,Vb,'g');
hold on
plot(t,Vc,'b');
xlabel('t[s]');
ylabel('Vabc[V]');
title(['Tension ' 'Vabc[V]'],'fontsize',11)
grid on;

figure(6),
plot(t,Ia,'r');

```

```
hold on
plot(t,Ib,'g');
hold on
plot(t,Ic,'b');
xlabel('t[s]');
ylabel('Iabc[V]');
title(['courant ' 'Iabc[V]'],'fontsize',11)
grid on;
```

```
figure(7),
plot(t,Vds);
xlabel('t[s]');
ylabel('Vsd[A]');
title(['tension d'axe direct ' 'Vsd(t) [A]'],'fontsize',11)
grid on;
```

```
figure(8),
plot(t,Vqs);
xlabel('t[s]');
ylabel('Vsq[A]');
title(['tension d'axe indirect ' 'Vsq(t) [A]'],'fontsize',11)
grid on;
```

NOMENCLATURE

P_1 : la puissance consommée au réseau

P_2 : la puissance fournie du moteur

$P_{ém}$: la puissance électromagnétique

P_m : la puissance mécanique

P_{f+v} : les pertes mécaniques

P_s : les pertes supplémentaires

P_{fe} : les pertes fer

P_{cu2} : les pertes dans l'enroulement rotorique

P_{cu1} : les pertes dans l'enroulement statorique

g : le glissement

C_{em} : Couple électromécanique

C_r : Couple de charge

θ : Position du rotor à un instant quelconque

θ_s : l'angle mécanique

Φ_{dr} : flux rotorique suivant l'axe de repère d

Φ_{qr} : flux rotorique suivant l'axe de repère q

Φ_{ds} : flux rotorique suivant l'axe de repère d

Φ_{qs} : flux rotorique suivant l'axe de repère q

\dot{i}_{dS} : courant statorique suivant l'axe de repère d

i_{qS} : courant statorique suivant l'axe de repère q

i_{dr} : courant rotorique suivant l'axe de repère d

i_{qr} : courant rotorique suivant l'axe de repère q

V_{dS} : tension statorique suivant l'axe de repère d

V_{qS} : tension statorique suivant l'axe de repère q

n: vitesse du synchronisme

f : fréquence

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES

Figure 1.1 : Une machine asynchrone	4
Figure 1.2 : Représentation schématique d'une machine asynchrone	5
Figure 1.3 : Boite à bornes.....	6
Figure 1.4 : L'interconnexion pour le couplage étoile.....	6
Figure 1.5 : L'interconnexion pour le couplage triangle.....	6
Figure 1.6 : constitution du rotor à cage.....	7
Figure 1.7 : constitution du rotor bobiné.....	7
Figure 1.8 : Représentation schématique du démarrage direct.....	8
Figure 1.9 : Représentation schématique du démarrage à résistances statoriques...9	
Figure 1.10 : Représentation schématique du démarrage par auto- transformateur...9	
Figure 1.11 : Représentation schématique du démarrage rotorique.....	10
Figure 1.12 : Bilan de puissance.....	11
Figure 1.13 : vue éclatée d'une machine asynchrone à cage.....	12

Chapitre II : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE A CAGE

Figure 2.1: Axes de repères classiques de la machine asynchrone.....	15
Figure 2.2: Axes de repères dq.....	21
Figure 2.3 : schémas équivalents suivant l'axe d.....	23
Figure 2.4 : schémas équivalents suivant l'axe q.....	23
Figure 2.5 : schémas équivalents suivant l'axe d	26
Figure 2.6 : schémas équivalents suivant l'axe q	26

Chapitre II : SIMULATION A L'AIDE DE MATLAB/SIMULINK

Figure 3 .1: Transformation de Park direct pour les tensions.....	29
Figure 3 .2: Transformation de Park indirect pour les courants.....	30
Figure 3 .3: Machine asynchrone à cage.....	30

Figure 3 .4: Schéma bloc pour la simulation.....	31
Figure 3 .5: Fenêtre de l'environnement MATLAB.....	32
Figure 3 .6: Lancement de l'environnement Model.....	32
Figure 3 .7: Fenêtre de l'environnement MATLAB.....	33
Figure 3 .8: Fenêtre « simulink Library ».....	33
Figure 3 .9: Fenêtre du modèle simulink de Park.....	34
Figure 3 .10: Fenêtre du schéma bloc de Park.....	34
Figure 3 .11: Fenêtre d'édition du programme.....	35
Figure 3.12 : Tensions statoriques d'axes (as, bs, cs).....	37
Figure 3.13 : VITESSE[tr/mn]	38
Figure 3.14 : Tensions statoriques d'axes q.....	38
Figure 3.15 : Tensions statoriques d'axes d.....	39
Figure 3.16 : Couple électromagnétique	39
Figure 3.17 : Tensions statoriques d'axes d	40
Figure 3.18 : Tensions statoriques d'axes q	40
Figure 3.19 : Courants statoriques d'axes (as, bs, cs)	41

Chapitre IV : IMPLICATION PEDAGOGIQUE

Figure 5 .1: fonctionnement de moteur asynchrone	39
Figure 5.2: Constitution d'un moteur asynchrone triphasé.....	40
Figure 5.3 : Différentes pièces rencontrées d'un moteur asynchrone.....	41
Figure 5.4 : vue éclatée d'une machine asynchrone à cage.....	42
Figure 5.5 : vue éclatée d'une machine asynchrone à bague.....	42
Figure 5.6 : Plaque à borne.....	43
Figure 5.7 : Symbole de Plaque à borne.....	43

Figure 5.8: Montage en étoile.....	43
Figure 5.9: Montage en triangle.....	44
Figure 5.10: Plaque signalétique.....	45
Figure 5.11: Plaque à bornes (exercice).....	46
Figure 5.12 : Caractéristique de moteur asynchrone.....	47
Figure 5.13: constitution du rotor à cage.....	48
Figure 5.14: constitution du rotor à bague.....	49
Figure 5.15: symbole des moteurs asynchrones.....	49
Figure 5.16: Régimes de fonctionnement de la machine asynchrone.....	50
Figure 5.17: Bilan de puissance.....	50
Figure 5.18: circuit équivalent.....	52

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MACHINES ELECTRIQUES
FONCTIONNEMENT ET ESSAIS
Tome IV
Ch.HAREL
- [2] TECHNOLOGIE ET SCHEMA D'ELECTRICITE
Niveau 2
HENRI NEY
- [3] Cours d'électrotechnique
Machines tournantes à courant alternatif
Jean-Louis Dalmasso
Edition 1985
- [4] Nancy
Modélisation et simulation d'une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice asynchrone à cage. Actes du colloque électrotechnique du futur, novembre 2001
- [5] B.Trajin
Détection automatique et diagnostic des défauts de roulement dans une machine asynchrone par analyse spectrale des courants statoriques.
Toulouse, décembre 2008
- [6] Jean le Rond d'Alembert
Principe, fonctionnement et structure interne : machine asynchrone
Juin 2003

- [7] Luc MUTREL
Régimes statique et dynamique des Machines asynchrones, Technosup, édition Ellipses
- [8] Démarrage des moteurs asynchrones. Guide technique à l'usage des professeurs d'électrotechnique de l'académie de Poitiers.
- [9] Frédéric POITIERS
Etude de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ;Machine asynchrone à double alimentation,Thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003.
- [10] Gaëtan Didier
Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances, Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2004.
- [11] Paul- Etienne VIDAL
Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation, thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, décembre 2004
- [12] Smaïl BACHIR
Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique, thèse de diplôme national de l'université de Poitiers, décembre 2002
- [13] J. Lobry et A.Ishii
Etude numérique d'un moteur asynchrone, EDP sciences, Faculté Polytechnique de Mons, Belgique 2005
- [14] S.EL Almani, B. François, Benoit . robyns
Modélisation des générateurs éoliennes à vitesse variable connecté à un bus continu commun, réalisé dans le laboratoire d'electrontechnique et d'électronique de puissance de Lille, 2002
- [15] Saïd M'zé
Cours d'électrotechnique professé à l'ENSET

Table des matières

REMERCIEMENT	2
INTRODUCTION.....	3
Chapitre I : GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES	4
1. Constitution d'une machine asynchrone	4
2. Démarrages de machine asynchrone	7
3. Bilan de puissance	10
4. Machines asynchrones à cage.....	12
Chapitre II : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE A CAGE	14
1. Equations générales de machine asynchrone à cage.....	16
2. Modèle mathématique de machine asynchrone à cage suivant les axes (dq)	21
3. Equation de puissance et du couple	26
4. Equations du schéma bloc de machine asynchrone à cage A partir des équations [2.61], [2.62], [2.63] et [2.64], on a :.....	27
Chapitre III : SIMULATION A L'AIDE DE MATLAB/SIMULINK	29
1. Modèles simulink	29
2. Schéma bloc pour la simulation	30
3. Présentation du sommaire Matlab/simulink.....	31
4. Résultats obtenus suite à la simulation	35
Chapitre IV : IMPLICATION PEDAGOGIQUE	40
Thème 1 : Moteur asynchrone	40
1- Définition d'un moteur asynchrone.....	40
2- Caractéristiques d'un moteur asynchrone	40
3- Constitution d'un moteur asynchrone triphasé.....	41
4- Différents types d'un moteur asynchrone	43
5- Mise sous tension d'un moteur asynchrone triphasé.....	44
6- Maintenance.....	46
7- Domaines d'utilisation des moteurs asynchrones.....	46
Thème 2 : Moteur asynchrone	49
1. Définition de moteur asynchrone.....	49
2. Principe de fonctionnement	51
CONCLUSION	56
ANNEXES	57
BIBLIOGRAPHIE	65

