



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique  
Machines électriques

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**REFRAFI Oussama**

Le : dimanche 24 juin 2018

## **Modélisation et simulation de la machine asynchrone à cage en vue de sa commande**

---

### **Jury :**

Mr	Guedidi Salim	MCB	Université de Biskra	Président
Mr	Ghamri Ahmed	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Mr	RabhiBoualaga	PROF	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2017-2018

# Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord à Dieu tout puissant pour m'avoir donné la volonté, la patience et le courage de réaliser ce modeste travail.

Je tiens à remercier mon encadreur, monsieur **Dr. Ghamri Ahmed** pour son grand soutien scientifique et moral, pour les conseils, les suggestions et les encouragements qu'il m'a apporté durant mon travail.

Je remercie également les membres du jury pour avoir consacré leur temps à examiner ce travail, je leur suis reconnaissant pour l'attention qu'ils ont portée à mon travail.

Mes sincères remerciements vont également aux Enseignants qui m'ont enseigné, du primaire jusqu'à l'université.

Enfin je remercie tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

**Oussama REFRAFI**

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents ; Merci Papa pour votre soutien, pour ton tendresse

Merci Maman pour ton amour, et c'est grâce à vous deux que je suis là aujourd'hui. La mémoire de mes grand-père paternel « Hadj Mohamed Al-salah », « Jida henia et Jida khdra ».

Que dieu, le miséricordieux, vous accueille dans son éternel paradis.

Mes grand-père maternel « hadj terzi et Hadja Aicha », que dieu les protège

Mon frère Mohamed Islem, Ma petite sœur Isra, Ma sœur Sara, son conjoint Abdelhalim;

Mon neveu zine-elabidine, Mes oncles paternels : Ismail, Yahya ;

Mes tentes : Aicha, Naima, Halima ; Mes oncles maternels : Mohamed Bouzid, Abdelhakim, Hocine, Lotfi, Okba, Fouad, Imad, Abderahim pour leurs encouragements.

Mes tentes maternelles pour leur soutien moral : Nour-elhouda, Asma, Marwa.

Mes cousins et cousines chaque un a son nom. Mes chers Amis :

Abdou est Youcef et lokman et hatem et farouk et oussama et abdou tolga et haithem et hessin et tous mes amis sans exceptions pour leurs encouragements ;

Aladin pour son aide précieux ;

Isam pour son gentillesse et de son affection ;



# Sommaire

Remerciements .....	.....
Dédicace .....	.....
Sommaire.. .....	<b>i</b>
Symboles et notations.....	<b>iii</b>
Listes des figures .....	<b>v</b>
Résumé.....	<b>vi</b>
Introduction générale.....	<b>1</b>

## **Chapitre 1 : Etat de l'art sur la machine asynchrone**

<b>1.1. Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Généralités sur la machine asynchrone.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.1. Définition d'une machine asynchrone.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.2. Constitution et principe de fonctionnement .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2.2.1. Constitution.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2.2.2. Principe de fonctionnement.....</b>	<b>8</b>
<b>1.2.3. Domaines d'utilisation de la machine asynchrone.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2.4. Les avantages et les inconvénients de machine asynchrone.....</b>	<b>9</b>
<b>1.3. Variation de vitesse de la machine asynchrone à cage.....</b>	<b>10</b>
<b>1.3.1. Avantages et Inconvénients d'un variateur de vitesse.....</b>	<b>10</b>
<b>1.4. Méthode de réglage de vitesse de la machine asynchrone à cage.....</b>	<b>11</b>
<b>1.5. Conclusion.....</b>	<b>12</b>

## **Chapitre 2 : Modélisation de la machine asynchrone**

<b>2.1. Introduction .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2. Modélisation de la machine asynchrone.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.1. Hypothèses simplificatrices.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.2. Mise en équation de la machine asynchrone .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2.1. Les équations électrique.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2.2. Les équations magnétiques .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3. Transformation de Concordia.....</b>	<b>16</b>

2.4.	Transformation de Park.....	17
2.4.1.	Equations électriques de la machine dans le repère (d, q) .....	18
2.4.2.	Choix du repère (d,q).....	19
2.4.3.	Référentiel lié au champ tournant.....	20
2.4.4.	Expression du couple électromagnétique est puissance et mécanique .....	21
2.5.	Conclusion.....	24

**Chapitre 3: Simulation de la machine asynchrone**

3.1.	Introduction .....	25
3.2.	Simulation .....	25
3.3.	Résultats de simulation au démarrage à vide et en charge.....	27
3.3.1.	Démarrage à vide : courant d'une phase, couple et vitesse du moteur.....	27
3.3.2.	Démarrage à vide suivi de l'application d'une charge ( $C_r=20N.m$ ) : courant de phase, couple et vitesse du moteur.....	28
3.3.3.	Processus de démarrage suivi du freinage par contre courant et redémarrage à en sens inverse.....	29
3.4.	Conclusion.....	32
	Conclusion générale.....	33
	Bibliographie.....	34

# **Symboles et notations**

$\mathbf{d}, \mathbf{q}$  : Axes correspondants au référentiel lié au champ tournant

$N$  : La vitesse de rotation du champ tournant

$P$  : Nombre de pair de pôles

$\mathbf{u}_{ds}$  : Tension statorique d'axe d

$\mathbf{u}_{qs}$  : Tension statorique d'axe q

$\mathbf{u}_{dr}$  : Tension rotorique d'axe d

$\mathbf{u}_{qr}$  : Tension rotorique d'axe q

$R_s$  : Résistance d'une phase statoriques

$R_r$  : Résistance d'une phase rotorique

$\mathbf{i}_{ds}, \mathbf{i}_{qs}$  : Courant statorique d'axe (d,q)

$\mathbf{i}_{qr}, \mathbf{i}_{dr}$  : Courant rotorique d'axe (d,q)

$\omega_r$  : Vitesse de rotation électrique ( $\omega_r = p.\Omega$ ) [rad/s]

$\Omega$  : Vitesse de rotation mécanique [rad/s]

$\psi_{ds}, \psi_{qs}$  : Flux statorique d'axe (d, q)

$\psi_{dr}, \psi_{qr}$  : Flux rotorique d'axe (d, q)

$C_{em}$  : Couple électromagnétique

$C_r$  : Couple résistant

$J$  : Moment d'inertie de la partie tournante de la machine

$V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$  : Tensions d'alimentation du statoriques

$V_{ar}, V_{br}, V_{cr}$  : Tensions d'alimentation du rotoriques

$\psi_{as}, \psi_{bs}, \psi_{cs}$  : Flux statorique

$\psi_{ar}, \psi_{br}, \psi_{cr}$  : Flux rotorique

$\mathbf{i}_{as}, \mathbf{i}_{bs}, \mathbf{i}_{cs}$  : Courant statorique

$\mathbf{i}_{ar}, \mathbf{i}_{br}, \mathbf{i}_{cr}$  : Courant rotorique

$M_s, M_r$  : Inductance mutuelle entre phases statoriques, rotorique

$L_s, L_r$  : Inductance propre d'une phase statorique, rotorique

$\mathbf{X}$  : Peut-être la vectrice tension, courant ou flux

$[\mathbf{P}]$  : La matrice de transformation directe de park

$[\mathbf{P}]^{-1}$  : La matrice de transformation inverse de park

$\omega_s$  : Pulsation électrique statorique

$\omega$  : La pulsation électrique rotorique

$\omega_{sl}$  : Pulsation du glissement

$f_r$  : Coefficient du frottement

# Listes des figures

1.1	Morphologie de la machine asynchrone.....	4
1.2	Le stator.....	5
1.3	Cage d'écureuil.....	6
1.4	Shéma pincipale de la machine asynchrone à cage.....	7
1.5	Interaction rotor stator.....	8
1.6	Point de fonctionnement .....	10
2.1	Schémas électrique d'un moteur asynchrone.....	14
2.2	Déphasage entre phase du rotor et stator.....	16
2.3	Transformation triphasé biphasé.....	16
2.4	Passage du repère triphasé au repère biphasé.....	17
3.1	Schéma bloc de la machine asynchrone.....	25
3.2	Représentation du bloc « TRANSFORMATION DE PARK » .....	26
3.3	Résultats de simulation du modèle en tension de la MAS lors du démarrage à vide.....	27
3.4	Résultats de simulation du modèle en tension de la MAS lors du fonctionnement à vide et avec introduction de la charge à l'instant $t=0.5s$ .....	28
3.5	Bloc inverse sens de rotation.....	29
3.6	Résultats de simulation du modèle en tension de la MAS inversé le sens de rotation avec introduction à vide à l'instant $t=0.5s$ .....	30
3.7	Résultats de simulation du modèle en tension de la MAS inversé le sens de rotation avec introduction de la charge à l'instant $t=0.5$ .....	31

## Résumé

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 lesquels **MATLAB/SIMULINK**, sont utilisés dans l'industrie et dans les milieux universitaires. Dans ce travail, nous présenterons le principe de modélisation et de simulation d'une machine électrique : le moteur asynchrone à cage d'écureuil. Ce dernier, grâce aux nombreux avantages qu'il procure par rapport aux autres types de moteurs électriques, s'est imposé comme le moteur de premier choix dans les mécanismes industriels. Le travail comprendra les sections suivantes :

- ✓ L'introduction, où nous présenterons l'importance des machines électriques dans l'économie moderne ainsi que les outils de simulation couramment dans le domaine du génie électrique,
- ✓ Le développement du modèle du moteur asynchrone à cage qui permettra d'établir le modèle mathématique du moteur étudié,
- ✓ La présentation sommaire de **MATLAB/SIMULINK** en tant que logiciel de modélisation et de simulation en ingénierie,
- ✓ La réalisation du modèle de simulation du moteur asynchrone à cage dans l'environnement **MATLAB/SIMULINK**
- ✓ La présentation des résultats obtenus suite à la simulation du moteur asynchrone à cage,
- ✓ La conclusion, où sera résumé le travail effectué.
- ✓ La référence bibliographique.

# Introduction générale

Les trois machines «courant continu, synchrone et asynchrone » ont de tout temps servi les besoins de l'industrie. Traditionnellement, ces machines électriques ont été commandées manuellement et les équipements demandés pour ces opérations sont complexes et coûteux. Le développement des convertisseurs et la progression rapide des semi-conducteurs ont permis durant ces trois dernière décennies une intense activité de recherche sur le développement de l'entraînement électrique à vitesse variable des machines électriques. La prépondérance des machines asynchrones par rapport aux autres machines électriques est principalement due aux inconvénients présentés par ces dernières.

- Pour le moteur synchrone classique, la nécessité de l'accrochage sur le réseau.
- Pour les moteurs à collecteur, le prix et la fragilité relative au collecteur.

La machine asynchrone est l'objet de nombreuses études depuis longtemps, elles présentent l'avantage d'être robuste, peu coûteuse et de construction simple notamment pour la machine asynchrone à cage. Son utilisation dans les processus industriels était limitée dans les applications qui ne demandent pas des hautes performances dynamiques comme par exemple l'entraînement des pompes, des ventilateurs ou des compresseurs. La variation de la vitesse rotorique se faisait soit à fréquence fixe et tension d'amplitude variable, soit en intervenant sur les caractéristiques du rotor ou sur son alimentation. Cependant, il est à signaler que l'application en positionnement ou en régulation de vitesse du moteur asynchrone a été tardive malgré. C'est sans doute, la conséquence d'une difficulté de contrôle due à son fonctionnement non-linéaire d'une part, et à l'inaccessibilité des grandeurs électriques du rotor d'autre part.

Le moteur asynchrone ou moteur d'induction est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple et robuste facile à construire. Le domaine de puissance va de quelques watts à plusieurs mégawatts. Relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constantes, il tourne à vitesse variable peu différente de la vitesse synchrone ; c'est lui qui est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante. Le moteur asynchrone permet aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable et la place qu'il prend dans ce domaine ne cesse de croître. Dans les pays industrialisés, plus de **60%** de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques.

C'est dans ce contexte que nous allons faire une étude détaillé qui traitera la modélisation et la simulation de la machine asynchrone. **Ce travail sera étalé sur trois chapitres :**

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur la machine asynchrone, principe de fonctionnement, les domaines d'utilisation, puis nous avons présenté aussi les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone à cage, ainsi vous avons présenté les méthodes de réglage de vitesse de la machine asynchrone à cage.

On a présenté dans le deuxième chapitre la modélisation de la machine asynchrone. Nous avons donnons en premier lieu le modèle triphasé de la machine et en second lieu le modèle biphasé basé sur la transformation de Park, on a appliqué le Référentiel lié au champ tournant pour modélisé cette model et exprimé la matrice d'état.

Finalement le troisième chapitre nous verrons alors :

- ✓ La simulation du processus de démarrage à vide (le courant de phase, le couple et la vitesse du moteur) ;
- ✓ La simulation du processus de démarrage à vide suivi de l'application d'une charge **Cr=20Nm** (le courant, le couple et la vitesse du moteur).
- ✓ La simulation du processus de démarrage jusqu'au régime permanent suivi du freinage par contre-courant (inversion de deux phases de la tension d'alimentation).

# **Chapitre 1**

**État de l'art sur la machine asynchrone**

## **1.1. Introduction**

La machine à induction, ou machine asynchrone, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Les machines possédant un rotor « en cage d'écureuil » sont aussi connues sous le nom de machines à cage ou machines à cage d'écureuil. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent. Elle est utilisée dans une gamme de puissance d'applications de quelques Watts à plusieurs MW.

Ces machines à cage d'écureuil occupent une place prépondérante dans tous les secteurs industriels. Elles sont les plus fréquemment utilisées grâce à leur robustesse, leur simplicité de construction et leur bas coût [1].

La modélisation des machines électriques est une phase primordiale pour l'observation et l'analyse des différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques d'une part et d'autre part pour l'élaboration des lois de commande. Pour obtenir le modèle d'un système, trois tâches doivent être accomplies [2] :

- Choisir le modèle.
- Déterminer ses paramètres.
- Et en fin vérifier sa validité

Dans ce chapitre nous présenterons un état de l'art sur la machine asynchrone en générale avec ses principes et les domaines d'utilisation et leurs avantages et les inconvénients. Aussi on parle sur la variation de vitesse de la machine asynchrone à cage et leurs avantages et inconvénients. On termine ce chapitre par les méthodes de réglage de vitesse de la machine asynchrone à cage.

## **1.2. Généralités sur la machine asynchrone**

### **1.2.1. Définition d'une machine asynchrone**

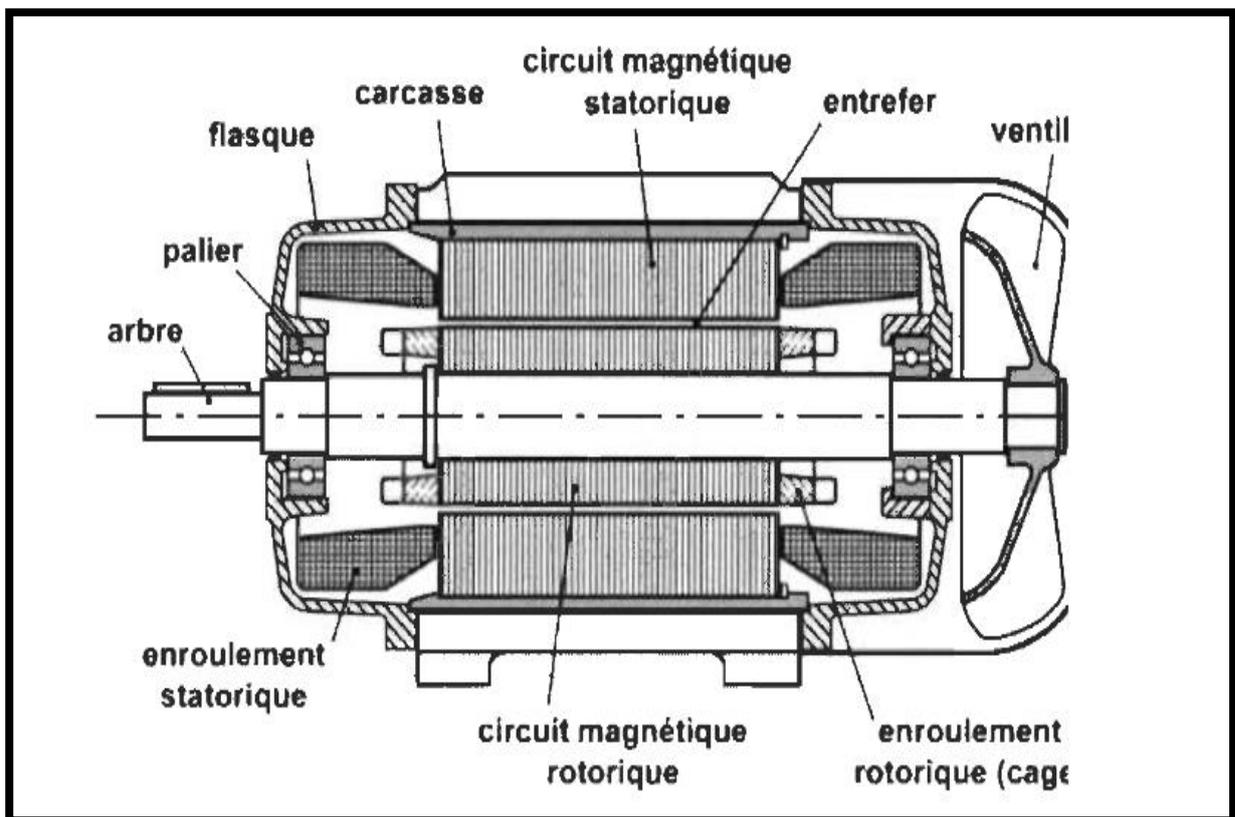
Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales. Le rotor est toujours en retard par rapport à la vitesse du champ statorique [2].

La machine asynchrone est dite machine à induction car l'énergie transférée du stator au rotor se fait par induction électromagnétique. La machine asynchrone est le moteur employé dans plus de 80% des applications. On la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le

transport (métro, trains, propulsion des navires), dans l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Le choix de son utilisation est dû à son principal avantage qui réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple et robuste facile à construire.

Le moteur asynchrone est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie, ce qui conduit à une structure simple et robuste facile à construire. Le domaine de puissance va de quelques watts à plusieurs mégawatts. Relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constante, il tourne à vitesse variable peu différente de la vitesse synchrone. Il est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante [3].

Le moteur asynchrone permet aussi la réalisation des entraînements à vitesse variable, et la place qu'il prend dans ce domaine ne cesse de croître. Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques et particulièrement le moteur asynchrone [4].



**Figure 1.1 : Morphologie de la machine asynchrone**

## **1.2.2. Constitution et principe de fonctionnement**

### **1.2.2.1. Constitution**

Le moteur asynchrone est formé :

- **Un stator** : anneau de tôles encoché à l'intérieur et portant un enroulement triphasé semblable à celui d'un alternateur. Cet enroulement est presque toujours relié à la source et constitue le primaire. Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont pour les machines de puissance plus importante, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique. **La figure 1.2** représente le stator.

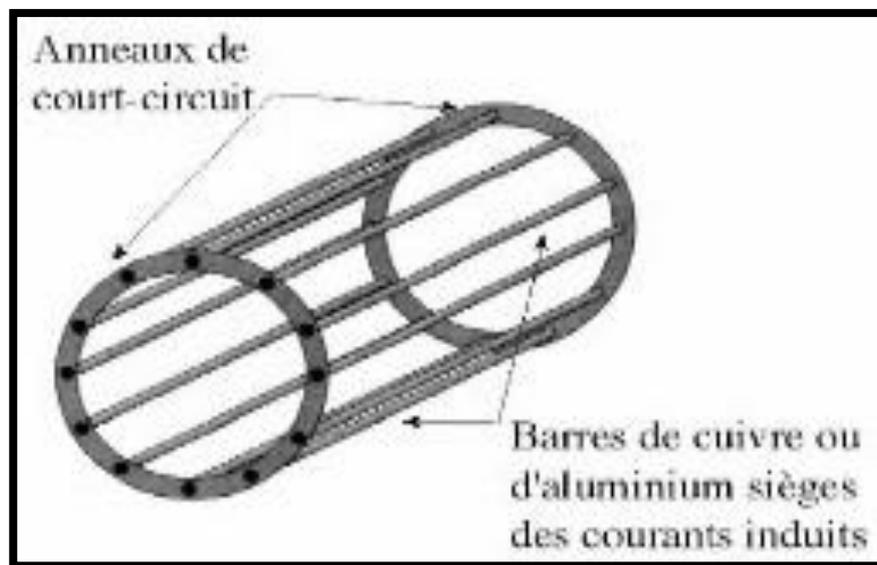


**Figure 1.2** : Le stator

- **Un rotor** : anneau de tôles rainuré à l'extérieur, concentrique à la première et séparé de lui par un entrefer étroit d'épaisseur constante. Le rotor porte un enroulement polyphasé mis en court-circuit constituant le secondaire

On distingue principalement **deux types** de structures de **rotors** :

- **Un rotor à cage (d'écureuil)** : l'ensemble à l'aspect d'une cage cylindrique dont à chaque bout une couronne métallique est raccordée dans laquelle se trouve un empilement de tôles dont l'axe du moteur passe au centre. Les encoches contiennent des barres reliées aux deux extrémités par des anneaux de court-circuit. L'ensemble forme une cage d'écureuil. Les barres sont en alliage d'aluminium pour les machines de petite et moyenne puissance, en cuivre pour les machines de forte puissance. L'enroulement ainsi obtenu n'est pas accessible de l'extérieur. la cage rotorique forme un enroulement dont le nombre de phase et le nombre de pôle ne sont pas fixés par construction. **La figure 1.3** représente la cage d'écureuil [6].

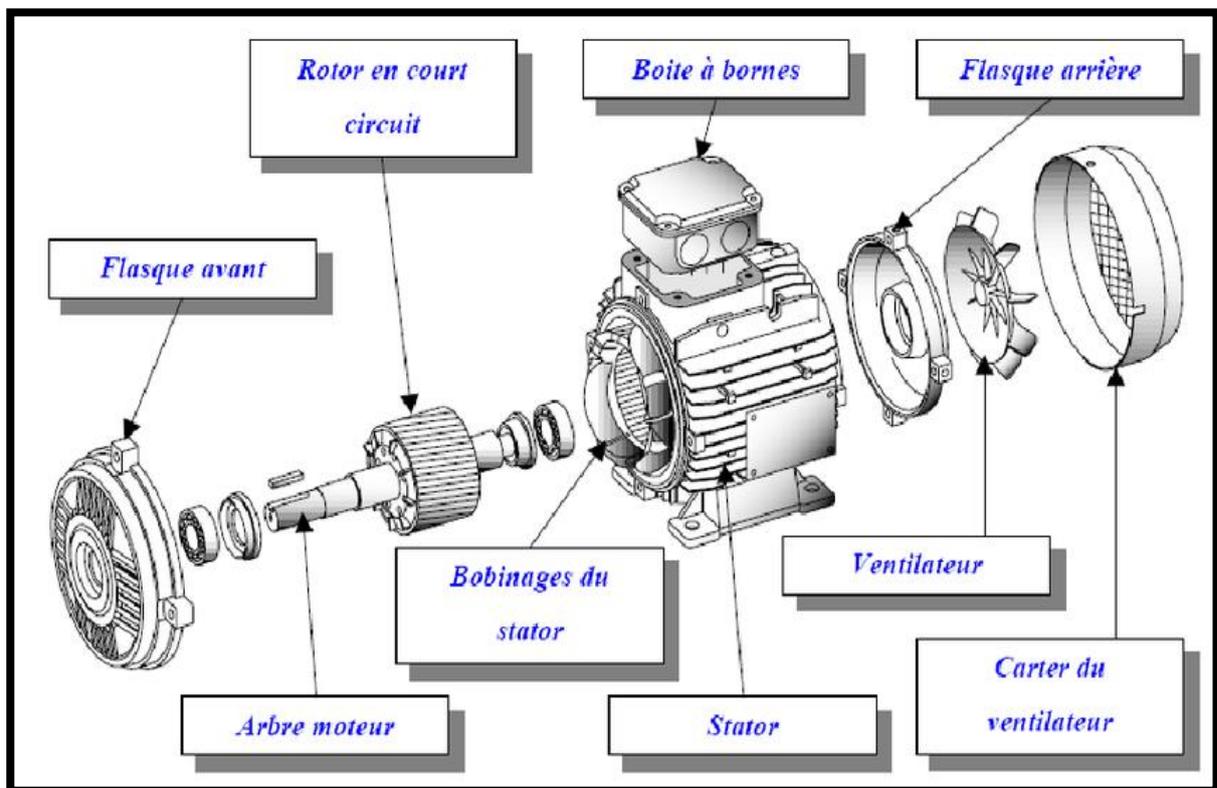


**Figure 1.3** : cage d'écureuil

- **Un rotor bobiné** : comme pour le rotor à cage il est constitué de tôles empilées, mais des encoches sont pratiquées pour le passage du bobinage qui lui-même est raccordé en une extrémité en bout d'arbre sur des bagues l'autre extrémité du bobinage est connecté ensemble (point milieu du couplage étoile). Sur les bagues viennent frotter les balais (aussi appelé les collecteurs) qui sont raccordés au dispositif de démarrage (résistance).

Dans le premier cas, on facilite le démarrage du moteur en introduisant des résistances dans le circuit rotorique, ce qui conduit à une augmentation du couple et à une diminution de l'intensité absorbée. Les avantages des moteurs à cage d'écureuil résident dans leur simplicité de construction, de manœuvre et d'entretien, leur robustesse mécanique et leur faible prix de revient. Le moteur asynchrone est très couramment utilisé, dans une gamme de puissances allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts. Il s'agit d'un engin simple et robuste, caractérisé par un fonctionnement stable, une vitesse pratiquement constante et un rendement élevé autour de la charge nominale.

**La machine asynchrone à cage**, très appréciée dans les applications industrielles par sa grande robustesse électromécanique, son faible cout et sa très bonne standardisation, impose des structures de contrôle spécifiques et complexes pour être utilisée dans des systèmes d'entraînement à vitesse variable performants. Ces systèmes d'entraînement intègrent l'alimentation, le convertisseur statique, la machine et la commande indispensable au fonctionnement de l'ensemble. **La figure 1.4** représente le schéma principal de la machine asynchrone à cage.



**Figure 1.4** : Schéma principale de la machine asynchrone à cage

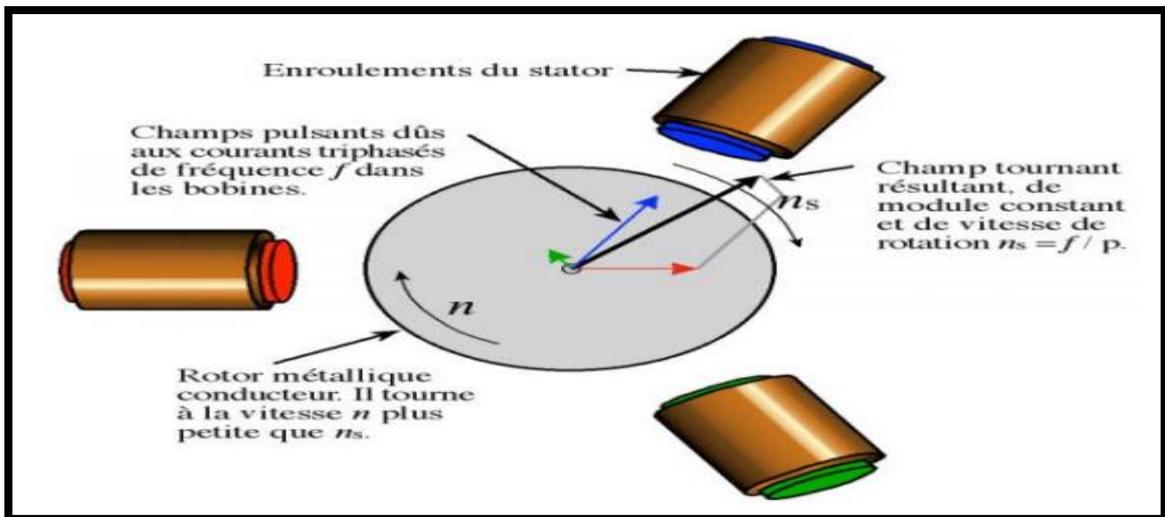
**1.2.2.2. Principe de fonctionnement**

Le principe de fonctionnement de la machine repose sur les lois fondamentales de l'induction électromagnétique. En effet, les trois enroulements statoriques alimentés par un réseau triphasé équilibré créent dans l'entrefer un champ magnétique tournant à la fréquence de rotation de synchronisme  $n_s$ . Les conducteurs du rotor sont soumis à ce champ tournant. Ils sont alors traversés par des courants de Foucault induits d'après la loi de Lenz ("les courants induits s'opposent par leurs effets la cause qui leur donnent naissance"). Les enroulements du rotor étant en court-circuit, la circulation des courants est alors possible. Les forces de Laplace qui en résultent exercent des moments sur le rotor. Le rotor tourne alors à la fréquence de rotation  $N$ . De par son principe, la fréquence de rotation du rotor est inférieure à la fréquence de synchronisme  $f_s : f < f_s$

Ainsi, les effets de l'induction statorique sur les courants induits rotoriques se manifeste par un couple électromagnétique qui lance le rotor à une vitesse  $N$  en essayant d'atteindre la vitesse synchrone  $N_s$ .

La vitesse de rotation du champ tournant statorique  $N_s$ , appelée vitesse synchrone, est rigidement liée à la fréquence de la tension d'alimentation  $f$  (Hz) et au nombre de pair de pôles  $p$  de chacun des enroulements par :  $N \text{ (tr/mn)} = 60f/p$  [5]. On définit le glissement par l'expression :  $g = (N_s - N)/N$  On l'exprime en %, ordre de grandeur 3 à 5 % (pour le nominal). Notons que le moteur asynchrone est caractérisé :

- ✓ Par la présence d'un seul bobinage triphasé alimenté par une source extérieur au stator.
- ✓ Par la présence d'un bobinage massif en court-circuit au rotor.



**Figure 1.5 : Interaction rotor stator**

### **1.2.3. Domaines d'utilisation de la machine asynchrone**

La machine asynchrone est très utilisée dans les applications industrielles, car de par sa conception, son cout est relativement moindre à celui des autres machines, sa robustesse au niveau électromagnétique est grande, et une bonne standardisation existe entre les différents fabricants. Cependant, la simplicité de conception de cette machine cache une complexité fonctionnelle assez importante.

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine Synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. On la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), dans l'industrie (machine-outil), dans l'électroménager. Elle était à l'origine uniquement utilisée en moteur, mais toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en génératrice; c'est par exemple le cas des éoliennes [5].

### **1.2.4. Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone à cage**

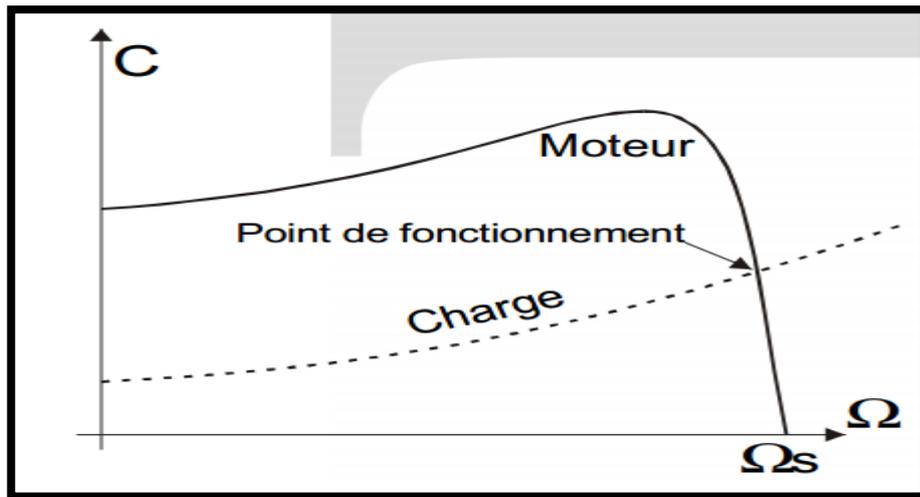
La machine asynchrone à cage a l'**avantage** d'être simple, fiable, robuste, économique et possède une bonne standardisation. En revanche, quand l'emploi de la vitesse variable est justifié, ce moteur présente l'**inconvénient** du couplage du flux avec le couple électromagnétique c'est à dire le découplage naturel de la machine à courant continu n'existe plus.

D'autre part, cette machine cache à travers sa simple structure une complexité fonctionnelle du fait que l'accès direct aux grandeurs rotoriques est impossible, le réglage du courant rotorique n'est possible qu'à travers le courant statorique.

Dans de nombreuses applications industrielles qui ne nécessitent pas la variation de la vitesse, l'**inconvénient** de la machine se situe dans ce courant absorbé qui est de l'ordre de 5 à 8 fois le courant nominal et de ce faible couple au démarrage ce qui pourrait rendre cette machine incapable de démarrer en charge. L'emploi d'autres moteurs qui ont au démarrage un couple plus au moins important et absorbent un courant relativement acceptable tout en conservant les caractéristiques de la machine en fonctionnement normal résout bien le problème dans ce domaine d'applications industrielles. La machine qui semble répondre à ses deux souhaits contradictoires est bien évidemment la machine d'induction à double cage car la machine à barres profondes a au démarrage un couple relativement élevé et un courant assez fort [5].

### 1.3. Variation de vitesse de la machine asynchrone à cage

Le point de fonctionnement ( $C, \Omega$ ) dans le quadrant I en régime établi de l'ensemble machine plus charge se situe à l'intersection des caractéristiques  $C_e = f(\Omega)$  du moteur et  $C_r = f(\Omega)$  de la charge. Le réglage de la vitesse de la machine asynchrone est donc obtenu en agissant sur le couple qu'elle produit, soit, si l'on se réfère à son expression ci-dessus : le nombre de paires de pôles, la tension d'alimentation de la machine, le glissement ou la fréquence d'alimentation de la machine. **La figure 1.6** représente le point de fonctionnement [7].



**Figure 1.6 : Point de fonctionnement**

#### 1.3.1. Avantages et Inconvénients d'un variateur de vitesse

Dans cette section nous avons présenté et détaillés les avantages et les inconvénients du variateur de vitesse : [8]

##### a) Anantages :

Le recours aux variateurs de vitesse offre plusieurs avantages :

- Démarrage progressif des moteurs réduisant les chutes de tension dans le réseau et limitant les courants de démarrage
- Amélioration du facteur de puissance
- Précision accrue de la régulation de vitesse
- Prolongement de la durée de service du matériel entraîné
- Diminution de la consommation d'électricité
- Economies d'énergie

**b) Inconvénients :**

Tous les variateurs de vitesse intégrant des dispositifs de commutation (diodes, thyristors, IGBT, etc.) forment une charge non linéaire qui engendre des courants harmoniques, sources de distorsion de l'onde (chute ou perturbation de la tension) dans le réseau électrique. Cette dégradation de l'onde peut perturber tant que les équipements électriques du client que ceux du réseau électrique si aucune mesure d'immunité n'est prise. Par ailleurs, des résonances harmoniques peuvent également apparaître entre les variateurs de vitesse et les batteries des condensateurs. Les effets néfastes peuvent se manifester par la défaillance prématurée des équipements électriques (surchauffe des moteurs, des câbles et des transformateurs) par la dégradation de l'isolation des moteurs commandés ou par l'interruption des procédés (fusibles brûlés).

## **1.4. Méthodes de réglage de vitesse de la machine asynchrone à cage**

Dans cette section, nous avons donné les méthodes de réglage de vitesse de la machine asynchrone à cage [7].

**a) Réglage par variation du nombre de paires de pôles**

Ceci donnant une variation non continue de la vitesse ce mode n'est donc pas envisagé pour un réglage fin du point de fonctionnement désiré.

**b) Réglage par variation de tension**

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation statorique. Il est donc possible d'envisager un ajustement de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation statorique avec un Gradateur triphasé. Cette solution est le plus souvent utilisée pour le démarrage de charges à caractéristique de couple quadratique ( $C_r = k \cdot \Omega^2$ ).

**c) Réglage par action sur le glissement**

L'utilisation de résistances rotorique permet un réglage de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale mais avec un rendement déplorable. On essaiera donc de récupérer cette énergie transmise au rotor : c'est la cascade hypo synchrone réservée à la très forte puissance pour des machines à rotor bobiné.

#### **d) Réglage par variation de fréquence**

La fréquence de rotation de la machine étant au glissement près proportionnel à la fréquence d'alimentation des enroulements statoriques, on essaiera de créer pour ces enroulements un réseau à fréquence variable ce sont les onduleurs de tension. On peut aussi chercher à injecter des courants dans les enroulements pour imposer le couple de la machine ce sont les onduleurs de courant ou commutateurs de courant. On peut également convertir directement la fréquence du réseau industriel en une fréquence variable plus faible (de 0 à 1/3 de la fréquence réseau) à l'aide d'un cyclo convertisseur à commutation naturelle piloté lui aussi en fréquence en courant ou vectoriellement.

### **1.5. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons fait un survol sur la machine asynchrone en générale et les domaines d'utilisation et le principe de fonctionnement, on a voir aussi les différents types de la machine asynchrone tels que le stator et le rotor et terminer par la machine asynchrone à cage. Enfin nous avons détaillée la variation de la vitesse de la machine asynchrone à cage et les méthodes de réglages de vitesse. Dans le chapitre suivant nous allons décrire sur la modélisation de la machine asynchrone.

# **Chapitre 2**

**Modélisation de la machine asynchrone**

## **2.1. Introduction**

Pour simuler le fonctionnement de la machine asynchrone, ou encore, pour étudier sa commande en régime transitoire ou en régime permanent, il faut choisir un modèle aussi simple que possible qui représente réellement la machine et traduit fidèlement son fonctionnement.

La machine asynchrone est représentée par un système de six équations électriques en plus d'une équation mécanique. Travailler avec ces sept équations n'est pas facile même avec l'utile numérique, l'utilisation d'une transformation est alors indispensable

Les transformations de Concordia et de Clark permettent le passage du système triphasé vers un système biphasé équivalent plus simple à étudier, la transformation de Park aboutit à un modèle biphasé équivalent plus simple à utiliser et permet de déboucher sur une commande suivant un schéma de contrôle vectoriel [9].

L'objectif de ce chapitre est de présenter mathématiquement la modélisation de la machine asynchrone sous forme de différents modèles d'état selon le choix du repère, ces modèles sont définis dans un référentiel champ tournant (**dq**). On applique **la transformation de Park**.

## **2.2. Modélisation de la machine asynchrone**

### **2.2.1. hypothèses simplificatrices**

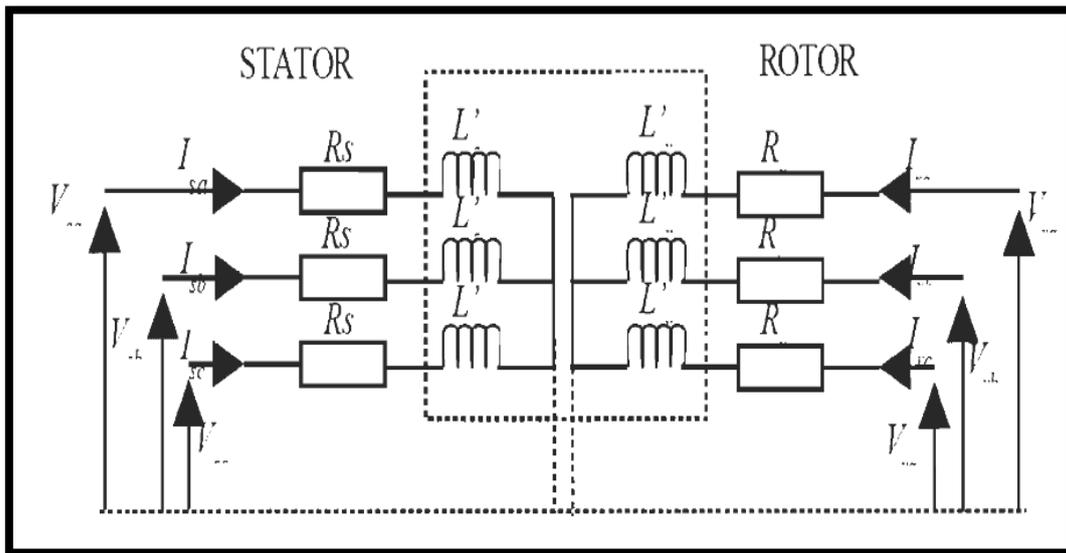
Elle est basée sur de nombreuses hypothèses, parmi ces dernières nous citons : [13]

- ✓ Entrefer parfaitement lisse;
- ✓ Pertes fer négligeables;
- ✓ Saturation dans le circuit magnétique négligeable;
- ✓ La parfaite symétrie de la machine
- ✓ La répartition spatiale sinusoidale des différents champs magnétiques le long de l'entrefer.
- ✓ L'équivalence du rotor en court circuit à un enroulement triphasé monté en étoile.

### 2.2.2. Mise en équation de la machine asynchrone

Le moteur asynchrone à induction se compose comme le montre **la figure 2.1** :

- D'un primaire le stator, portant un bobinage, triphasé, logé dans des encoches et relié à la source d'alimentation.
- D'un secondaire, généralement le rotor, qui peut être soit bobiné soit à cage d'écureuil.



**Figure 2.1** : Schéma électrique d'un moteur asynchrone

A partir du schéma électrique du moteur asynchrone ci-dessus, nous pouvons déduire les équations suivantes :

#### 2.2.2.1. Les équations électriques

En appliquant la loi d'Ohm et la loi de Faraday aux enroulements du stator et du rotor, on trouve une écriture sous forme matricielle :

$$[\mathbf{V}_s] = [\mathbf{R}_s][\mathbf{i}_s] + \frac{d}{dt} [\Psi_s] \quad (2.1)$$

$$[\mathbf{V}_r] = [\mathbf{R}_r][\mathbf{i}_r] + \frac{d}{dt} [\Psi_r]$$

Les matrices de tensions, de courants et du flux sont données :

$$[\mathbf{V}_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{V}_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, \quad [\Psi_s] = \begin{bmatrix} \Psi_{as} \\ \Psi_{bs} \\ \Psi_{cs} \end{bmatrix}, \quad [\Psi_r] = \begin{bmatrix} \Psi_{ar} \\ \Psi_{br} \\ \Psi_{cr} \end{bmatrix},$$

$$[\mathbf{i}_s] = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{as} \\ \mathbf{i}_{bs} \\ \mathbf{i}_{cs} \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{i}_r] = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{ar} \\ \mathbf{i}_{br} \\ \mathbf{i}_{cr} \end{bmatrix}$$

Les matrices des résistances s'écrivent :

$$[\mathbf{R}_s] = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_s \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{R}_r] = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_r & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_r & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_r \end{bmatrix}$$

### 2.2.2.2. Les équations magnétiques

A partir des hypothèses simplificatrices (section 2.2.1), on trouve des équations des flux statoriques et rotoriques linéaires, elles sont données par :

$$[\Psi_s] = [\mathbf{L}_s] [\mathbf{i}_s] + [\mathbf{M}_{sr}] [\mathbf{i}_r] \quad (2.2)$$

$$[\Psi_r] = [\mathbf{L}_r] [\mathbf{i}_r] + [\mathbf{M}_{rs}] [\mathbf{i}_s]$$

Les matrices des inductances s'écrivent :

$$[\mathbf{L}_s] = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{M}_s & \mathbf{M}_s \\ \mathbf{M}_s & \mathbf{L}_s & \mathbf{M}_s \\ \mathbf{M}_s & \mathbf{M}_s & \mathbf{L}_s \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{L}_r] = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_r & \mathbf{M}_r & \mathbf{M}_r \\ \mathbf{M}_r & \mathbf{L}_r & \mathbf{M}_r \\ \mathbf{M}_r & \mathbf{M}_r & \mathbf{L}_r \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{M}_{sr}] = [\mathbf{M}_{rs}] = \mathbf{M}_0 \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos[\theta + \frac{2\pi}{3}] & \cos[\theta - \frac{2\pi}{3}] \\ \cos[\theta - \frac{2\pi}{3}] & \cos\theta & \cos[\theta + \frac{2\pi}{3}] \\ \cos[\theta + \frac{2\pi}{3}] & \cos[\theta - \frac{2\pi}{3}] & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$\mathbf{M}_s$  : L'inductance mutuelle entre phases statoriques.

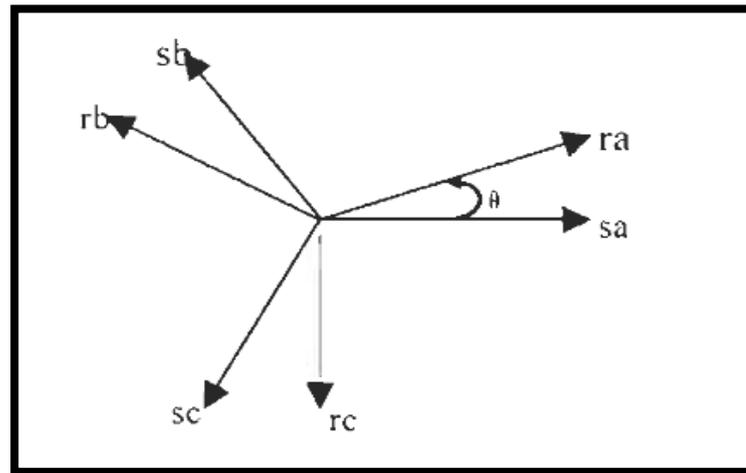
$\mathbf{M}_r$  : L'inductance mutuelle entre phases rotoriques.

$\mathbf{L}_s$  : Inductance propre d'une phase statorique.

$\mathbf{L}_r$  : Inductance propre d'une phase rotorique.

$\mathbf{M}_0$  : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique [9].

$\theta$  : désigne l'angle électrique entre une phase du rotor et la phase correspondante du stator :



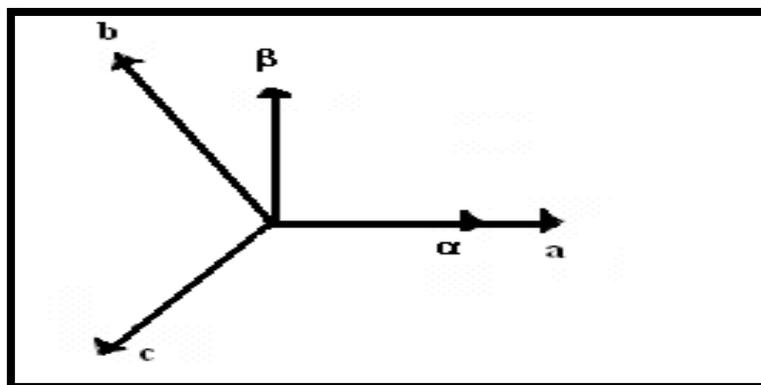
**Figure 2.2** : Déphasage entre phase du rotor et stator

### 2.3. Transformation de Concordia

Transformation de Concordia permet le passage d'un **système triphasé abc** vers un **système biphasé αβ**. Elle est schématisée par **la figure 2.3** dont les matrices de transformations sont définies par : [10]

$$\begin{bmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{23}} \begin{bmatrix} X\alpha \\ X\beta \end{bmatrix} \text{ Avec : } C_{23} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} X\alpha \\ X\beta \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{32}} \begin{bmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{bmatrix} \text{ Avec : } C_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$



**Figure 2.3** : Transformation triphasée biphasée de Concordia

## 2.4. Transformation de Park

La transformation de Park est une transformation du repère triphasé fixe par rapport au stator dans un repère biphasé. Cette transformation permet de réduire la complexité du système.

La position du repère peut être fixée par rapport aux trois référentiels :

- Champ tournant
- Stator
- Rotor

La figure 2.4 représente passage du repère triphasé au repère biphasé.

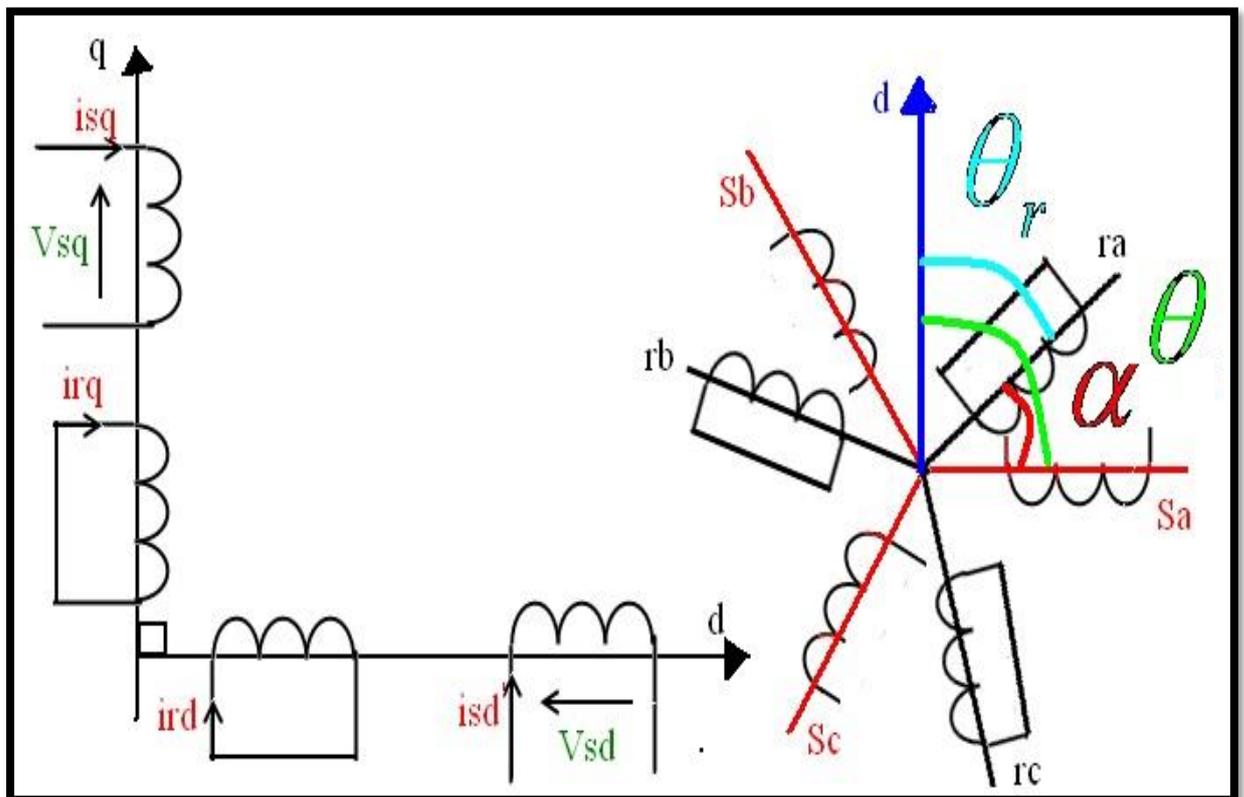


Figure 2.4 : Passage du repère triphasé au repère biphasé.

Pour transformer un système triphasé [abc] en un système biphasé (d,q) avec une composante homopolaire comme indiqué dans l'équation suivante:

$$[\mathbf{X}] = [\mathbf{P}] [\mathbf{X}_{abc}] \quad (2.6)$$

Le passage inverse est donné par :

$$[\mathbf{X}_{abc}] = [\mathbf{P}]^{-1}[\mathbf{X}] \quad (2.7)$$

Tel que :

$[\mathbf{X}]$  : Peut-être la vectrice tension, courant ou flux.

$[\mathbf{P}]$  : Est la matrice de transformation directe de Park.

$[\mathbf{P}]^{-1}$  : Est la matrice de transformation inverse de Park.

La matrice de transformation  $[\mathbf{P}]$  est donnée par :

$$\mathbf{P} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

La valeur  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  pour la transformation avec conservation de puissance ou la valeur  $3/2$  pour la transformation avec non conservation de puissance.

La matrice inverse  $[\mathbf{P}^{-1}]$  est donnée par :

$$\mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$\theta$  : angle de rotation

### 2.4.1. Equations électriques de la machine dans le repère (d, q)

En multipliant l'équation électrique (2.1) du stator et du rotor par  $P(\theta)$ , et après des simplifications on aura les équations générales décrivant le fonctionnement des moteurs à courant alternatif dans un référentiel (d-q).

– Equations des tensions :

$$\begin{aligned}
 V_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \Psi_{qs} \\
 V_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \Psi_{ds} \\
 V_{dr} &= 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \Psi_{qr} \\
 V_{qr} &= 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \Psi_{dr} \\
 \frac{d\theta_s}{dt} &= \omega_s \quad , \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

– Equations magnétiques dans le repère (d, q) :

En multipliant l'équation (2.2) par  $\mathbf{P}(\theta)$  et après simplification on obtient :

$$\text{Pour le stator} \begin{cases} \Psi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} \tag{2.11}$$

$$\text{Pour le rotor} \begin{cases} \Psi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Psi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \tag{2.12}$$

$L_s = I_s - M_s$  : Inductance cyclique statorique.

$L_r = I_r - M_r$  : Inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_0$  : Inductance mutuelle cyclique entre rotor et stator.

### 2.4.2. Choix du repère (d,q)

Ce qui rend la transformation de Park attrayante, est que l'orientation du repère (d,q) peut être quelconque. Il existe trois choix importants, le repère (d,q) peut être fixé au stator, au rotor ou au champ tournant, Selon l'objectif de l'application [11].

Repère d'axes (d,q) fixe lié au stator ou repère stationnaire ( $\theta_s = 0$ ). Les grandeurs électriques évoluent en régime permanent électrique à la pulsation statorique  $\omega_s$ . Cette méthode sera retenue très souvent dans l'étude des observateurs.

Repère d'axes (d,q) lié au rotor ( $\theta_s = \theta$ ). Les grandeurs évoluent en régime permanent électrique à la pulsation des courants rotoriques  $\omega_{sl}$ . Elles sont de faible fréquence (fréquence de glissement).

Repère d'axes (d,q) lié à l'un des flux de la machine. Le modèle est simplifié par l'utilisation d'équations plus simples. En régime permanent électrique les grandeurs du modèle sont continuées.

### 2.4.3. Référentiel lié au champ tournant

Symbolisé par le vecteur flux statorique, le champ tournant est le champ créé par le bobinage statorique et qui tourne, en régime permanent, à la vitesse de synchronisme. Si on choisit de fixer le repère (d,q) au champ tournant alors on a : [12]

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \Rightarrow \omega_{sl} = \omega_s - \omega = \omega_s - p\Omega \quad (2.13)$$

$\omega_s$  : Est la pulsation statorique.

$\omega$  : Est la pulsation rotorique.

$\omega_{sl}$  : Est la pulsation du glissement.

$\Omega$  : La vitesse mécanique, elle est reliée à la pulsation rotorique par :  $\omega = p \cdot \Omega$

– **Equation de tensions :**

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \psi_{qs} \quad (2.14)$$

$$V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \psi_{ds}$$

$$0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \psi_{qr}$$

$$0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \psi_{dr}$$

Le rotor du moteur asynchrone à cage étant fermé sur lui-même (court-circuité), on prend  $u_{dr}$  et  $u_{qr}$  égales à zéro.

Les flux couplés statoriques et rotoriques sont obtenus à partir des inductances propres et Mutuelles :

### 2.4.4. Expression du couple électromagnétique est puissance et mécanique

– Equation de la puissance

La puissance instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques s'écrit :

$$\mathbf{p}_e = [\mathbf{U}_s]^T [\mathbf{I}_s] + [\mathbf{U}_r]^T [\mathbf{I}_r] \quad (2.15)$$

En appliquant la transformation de Park, elle s'exprime en fonction des grandeurs d'axes dq.

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_e = & (\mathbf{V}_{ds} \mathbf{V}_{qs}) \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ds} \\ \mathbf{I}_{qs} \end{bmatrix} + (\mathbf{V}_{dr} \mathbf{V}_{qr}) \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{dr} \\ \mathbf{I}_{qr} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \left[ \mathbf{I}_{ds} \frac{d\psi_{ds}}{dt} + \mathbf{I}_{qs} \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \mathbf{I}_{dr} \frac{d\psi_{dr}}{dt} + \right. \\ & \left. \mathbf{I}_{qr} \frac{d\psi_{qr}}{dt} \right] + \frac{3}{2} [(\psi_{ds} \mathbf{I}_{qs} - \psi_{qs} \mathbf{I}_{ds}) \omega_s + (\psi_{qr} \mathbf{I}_{dr} - \psi_{dr} \mathbf{I}_{qr}) \omega_s] + [\mathbf{R}_s (\mathbf{I}_{ds}^2 + \mathbf{I}_{qs}^2) + \mathbf{R}_r (\mathbf{I}_{dr}^2 + \mathbf{I}_{qr}^2)] \end{aligned} \quad (2.16)$$

- Le premier crochet représente l'énergie magnétique emmagasinée dans le fer.
- Le deuxième crochet représente la puissance électromécanique  $P_{em}$  de la machine.
- Le troisième crochet représente les pertes joules [13].

En tenant compte des équations des flux (2.2), la puissance électromécanique s'écrit dont

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{em} = & \frac{3}{2} [(\psi_{ds} \mathbf{I}_{qs} - \psi_{qs} \mathbf{I}_{ds}) \omega_s + \psi_{qr} \mathbf{I}_{dr} - \psi_{dr} \mathbf{I}_{qr}] \omega_r \\ = & \frac{3}{2} (\psi_{ds} \mathbf{I}_{qs} - \psi_{sq} \mathbf{I}_{ds}) \omega_r \end{aligned} \quad (2.17)$$

– Equation de couple électromagnétique

$$\mathbf{C}_e = P \frac{M}{L_r} (\psi_{dr} \mathbf{I}_{qs} - \psi_{qr} \mathbf{I}_{ds}) \quad (2.18)$$

– Equation mécanique

L'équation mécanique est régie par l'équation suivante :

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{(\mathbf{C}_e - \mathbf{C}_r - \mathbf{f}_r \Omega_r)}{J} \quad (2.19)$$

$\mathbf{J}$  : est l'inertie de toutes les masses tournantes ramenées à l'arbre de la machine.

$\mathbf{f}_r$  : Coefficient du frottement.

– **Expression en modèle d'état**

Maintenant on va réécrire les équations de la machine en modèle d'état en vue de sa commande, en prenant les courants statoriques  $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$  et les flux rotoriques  $\psi_{dr}$ ,  $\psi_{qr}$  comme variables d'états.

A partir de l'équation (2.12) on obtient l'équation suivante :

$$\begin{aligned} I_{dr} &= \frac{\psi_{dr} - M_{sr} I_{ds}}{L_r} \\ I_{qr} &= \frac{\psi_{qr} - M_{sr} I_{qs}}{L_r} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Remplaçons les expressions des courants  $I_{dr}$  et  $I_{qr}$  de l'équation (2.20) par leurs valeurs dans les équations (2.11), on obtient alors :

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= \left( L_s - \frac{M_{sr}^2}{L_r} \right) \cdot I_{ds} + \frac{M_{sr}}{L_r} \psi_{dr} \\ \psi_{qs} &= \left( L_s - \frac{M_{sr}^2}{L_r} \right) \cdot I_{qs} + \frac{M_{sr}}{L_r} \psi_{qr} \end{aligned} \quad (2.21)$$

En dérivant ces dernières en fonction du temps, on trouve :

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{ds}}{dt} &= \left( L_s - \frac{M_{sr}^2}{L_r} \right) \frac{dI_{ds}}{dt} + \frac{M_{sr}}{L_r} \frac{d\psi_{dr}}{dt} \\ \frac{d\psi_{qs}}{dt} &= \left( L_s - \frac{M_{sr}^2}{L_r} \right) \frac{dI_{qs}}{dt} + \frac{M_{sr}}{L_r} \frac{d\psi_{qr}}{dt} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Pour le rotor à partir des équations (2.10) on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{dr}}{dt} &= -R_r I_{dr} + \omega_s \psi_{qr} \\ \frac{d\psi_{qr}}{dt} &= -R_r I_{qr} + \omega_s \psi_{dr} \end{aligned} \quad (2.23)$$

En remplaçant  $I_{dr}$  et  $I_{qr}$  par leurs expressions obtenues en (2.20), les expressions suivantes sont obtenues :

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{dr}}{dt} &= \frac{M_{sr} R_r}{L_r} I_{ds} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{dr} + \omega_s \psi_{qr} \\ \frac{d\psi_{qr}}{dt} &= \frac{M_{sr} R_r}{L_r} I_{qs} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{qr} + \omega_s \psi_{dr} \end{aligned} \quad (2.24)$$

On obtient finalement à partir des équations (2.10), (2.21), (2.22), (2.24) :

$$\begin{aligned} \frac{dI_{ds}}{dt} &= \frac{1}{\delta L_s} V_{ds} - \left( \frac{R_s}{\delta L_s} + \frac{M_{sr}^2 R_r}{\delta L_s L_r^2} \right) I_{ds} + \omega_s I_{qs} + \frac{M_{sr} R_r}{\delta L_s L_r^2} \Psi_{dr} \\ &+ \frac{M_{sr}}{\delta L_s L_r} \omega \Psi_{qr} \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{dI_{qs}}{dt} &= \frac{1}{\delta L_s} V_{qs} - \left( \frac{R_s}{\delta L_s} + \frac{M_{sr}^2 R_r}{\delta L_s L_r^2} \right) I_{qs} - \omega_s I_{ds} + \frac{M_{sr} R_r}{\delta L_s L_r^2} \Psi_{qr} \\ &- \frac{M_{sr}}{\delta L_s L_r} \omega \Psi_{dr} \end{aligned}$$

On peut écrire les équations (2.24) et (2.25) sous forme d'équations d'état telles que :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \\ \dot{\Psi}_{dr} \\ \dot{\Psi}_{qr} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\left( \frac{1}{T_r \delta} + \frac{1}{T_r} \frac{1-\delta}{\delta} \right) & \omega_s & \frac{1-\delta}{\delta} \frac{1}{M T_r} & \frac{1-\delta}{\delta} \frac{1}{M_{sr}} \omega \\ -\omega_s & -\left( \frac{1}{T_r \delta} + \frac{1}{T_r} \frac{1-\delta}{\delta} \right) & -\left( \frac{1-\delta}{\delta} \frac{1}{M_{sr}} \omega \right) & \frac{k}{\tau_r} \\ \frac{M_{sr}}{\tau_r} & 0 & \frac{-1}{\tau_r} & (\omega_s - p\Omega) \\ 0 & \frac{M_{sr}}{\tau_r} & -(\omega_s - \omega) & \frac{-1}{\tau_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.26) \\ & \text{B} \quad \text{U} \end{aligned}$$

Avec :

$$\dot{\mathbf{X}} = \frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}$$

$[\mathbf{X}]$  : Vecteur d'état.

$[\mathbf{U}]$  : Vecteur de commande.

$[\mathbf{A}]$  : Matrice d'évolution.

$[\mathbf{B}]$  : Matrice de commande.

$\delta = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$  Est le coefficient de dispersion.

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$  Est la constate de temps rotorique.

## **2.5. Conclusion**

Dans ce chapitre on a développé un modèle du moteur asynchrone à cage qui permet d'établir le modèle mathématique du moteur étudié, ce modèle a été établi par le passage de système réel triphasé vers un système fictif biphasé appelé de Concordia et on applique la transformation de Park. Dans le chapitre suivant nous allons décrire la simulation de la machine asynchrone.

# **Chapitre 3**

**Simulation de la machine asynchrone**

### 3.1. Introduction

La simulation est un moyen efficace et économique, utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Plusieurs outils (spécialisés ou non) de simulation sont utilisés dans le domaine de l'électronique de puissance ou de la commande des machines électrique : **ATOSEC5**, **EMTP**, **SPICE**, **SIMNON**, **MATLAB**, **SIMULINK**, etc. La difficulté de simulation du moteur asynchrone provient de sa structure fortement non-linéaire. Le modèle contient plusieurs blocs non linéaires [4].

### 3.2. Simulation

La figure 3.1 représente le modèle SIMULINK du moteur asynchrone décrit par les équations du chapitre précédent. Il est constitué des blocs suivants :

- La source d'alimentation triphasée,
- Le bloc de transformation abc/dq,
- Le bloc calculant
- les courants statoriques et rotoriques dans le plan dq,
- Le bloc calculant le couple électromagnétique du moteur,
- Le bloc calculant le couple résistant de la charge,
- Le bloc calculant la vitesse du moteur,
- Et le bloc calculant les trois signaux triphasés du courant statorique.

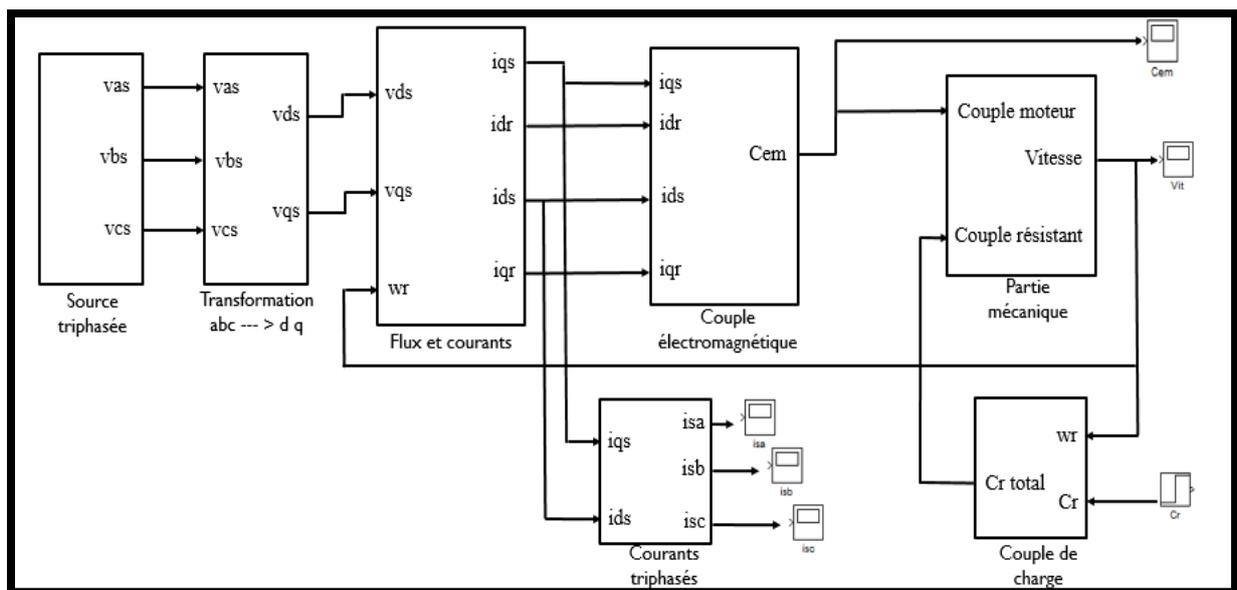
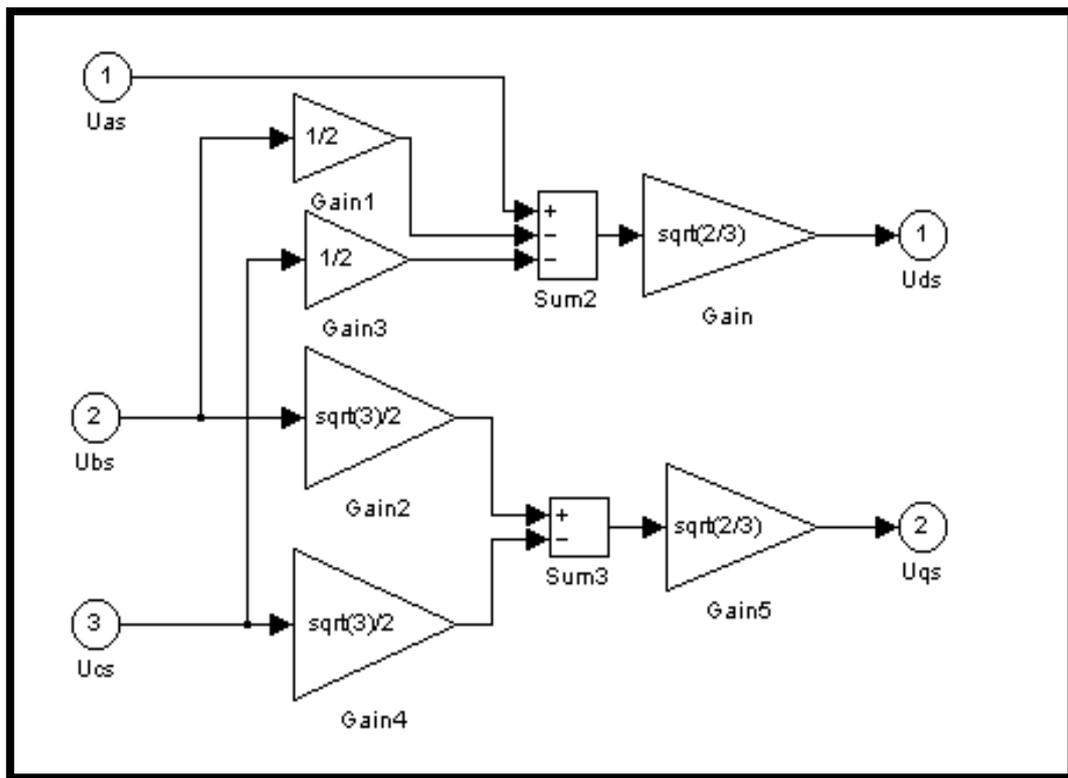


Figure 3.1 : Schéma bloc de la machine asynchrone

Le bloc **transformation de PARK** est représenté dans la figure suivante :



**Figure 3.2 :** Représentation du bloc « TRANSFORMATION DE PARK »

La simulation a été effectuée par le logiciel «**SIMULINK**» sous «**MATLAB**». Dans cette partie on présentera le cas d'une machine asynchrone triphasée alimentée directement par une source de tension sinusoïdale de valeur efficace **220V** et de fréquence **50HZ** dont les paramètres de la machine asynchrone à cage sont :

- Mutuelle :  $M = 58e^{-3}$
- Inductance propre d'une phase rotorique :  $L_r = 23e^{-3}$
- Inductance propre d'une phase statorique :  $l_s = 14e^{-3}$
- Constante de temps rotorique :  $tr = 140e^{-3}$
- Résistances d'enroulements statorique :  $R_s = 0.85$
- Nombre de paires de pôles :  $P = 2$
- Moment d'inertie de la partie tournante de la machine :  $J = 50e^{-3}$

### 3.3. Résultats de simulation au démarrage à vide et en charge

#### 3.3.1. Démarrage à vide : courant d'une phase, couple et vitesse du moteur

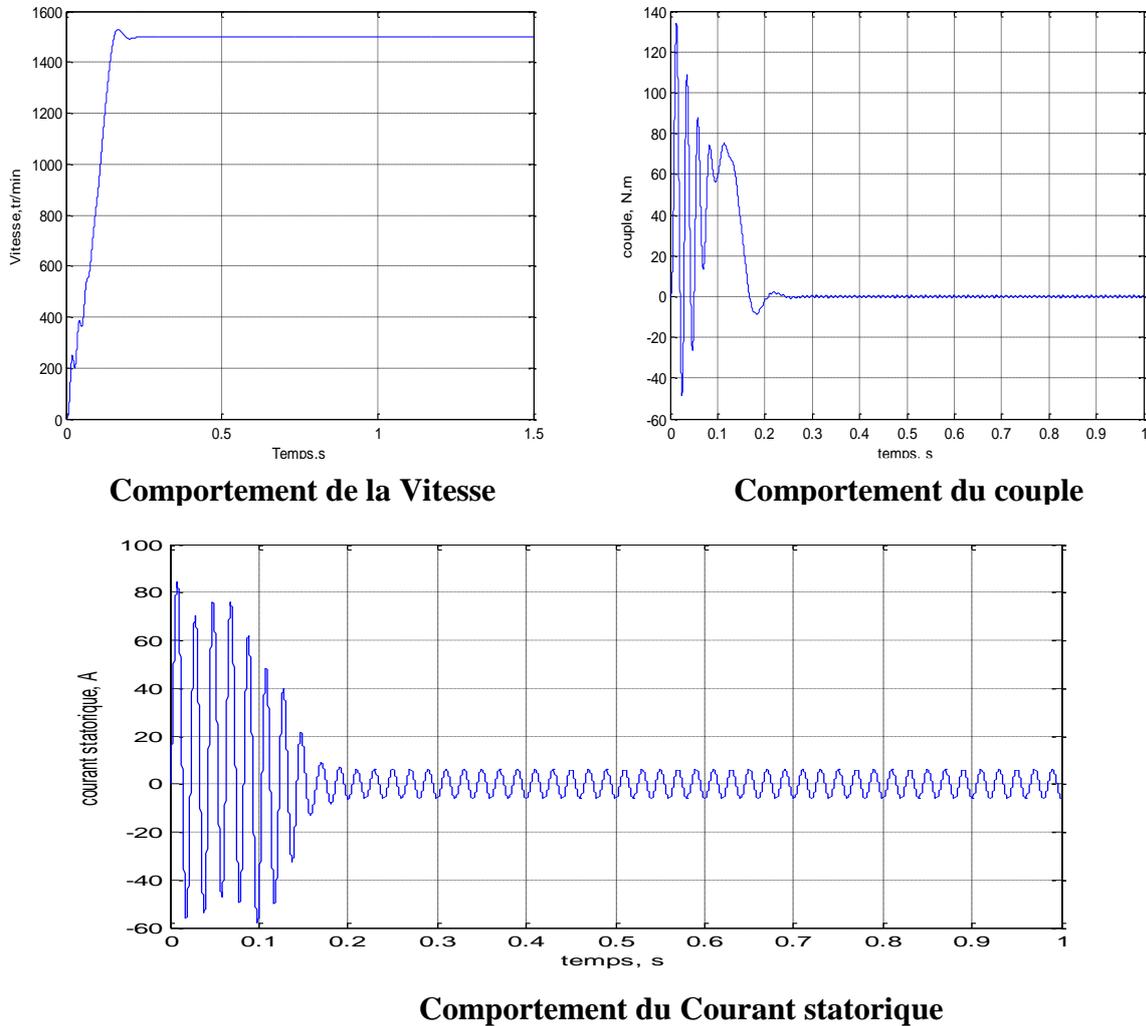
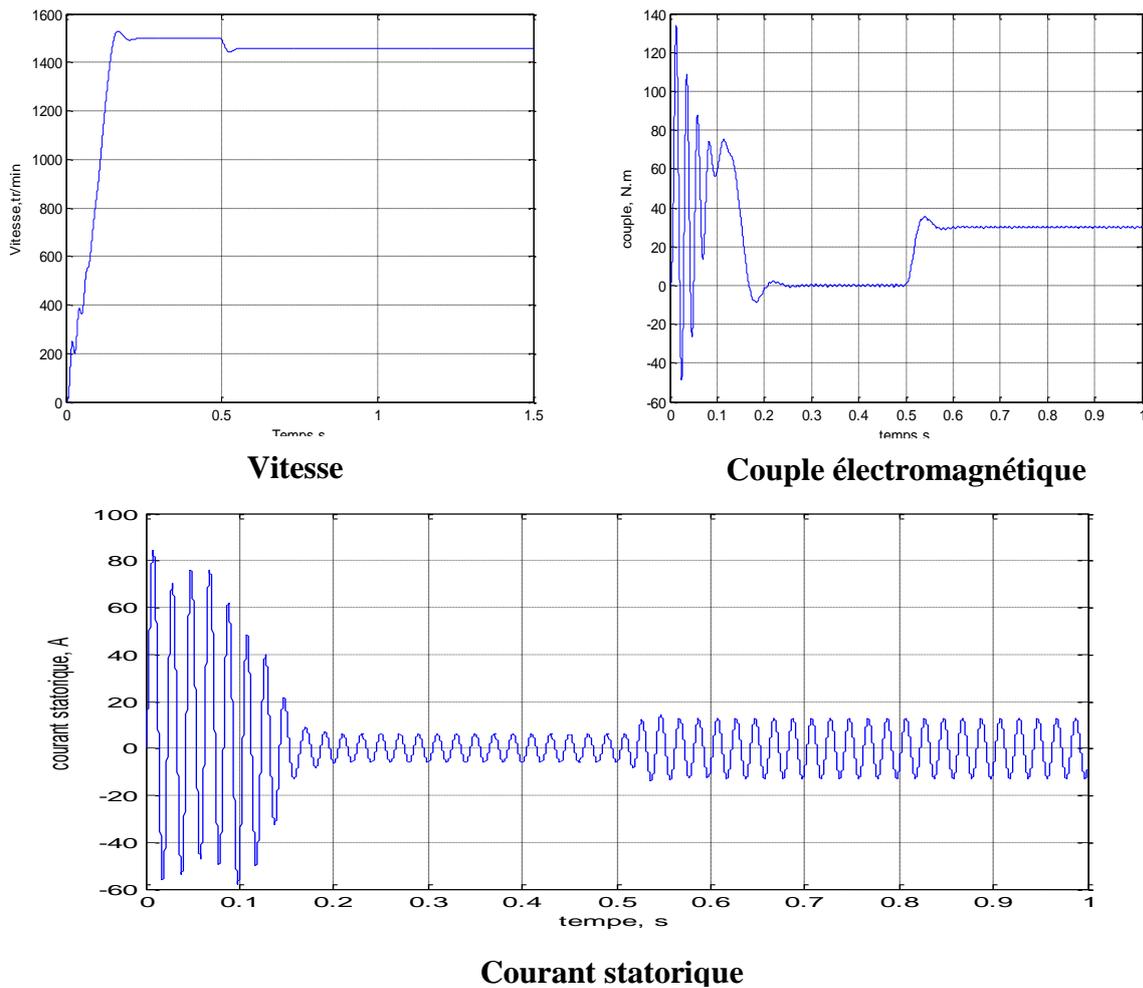


Figure 3.3 : Résultats de la simulation du processus de démarrage à vide

On note le classique appel du courant statorique lors de la mise sous tension du moteur (valeur instantanée maximale 80 A) **Figure 3.3**. La vitesse présente des oscillations dans le premier instant de démarrage avec un accroissement presque linéaire la durée de mise en vitesse est environ **0.23s**. Le moteur continue à accélérer jusqu'à ce que sa vitesse devienne constante et elle est proche de la vitesse de synchronisme le moteur étant à vide. **Figure 3.3**.

La figure 3.3 représenté l'évolution du couple instantané on note les oscillations du couple lors de la mise sous tension pendant une durée de **0.23s**. Ainsi le couple instantané monte à 130N.m. à la fin de la phase du démarrage, le couple s'annule puisque le moteur n'est pas chargé.

**3.3.2. Démarrage à vide suivi de l'application d'une charge (Cr=20N.m) :  
courant de phase, couple et vitesse du moteur**



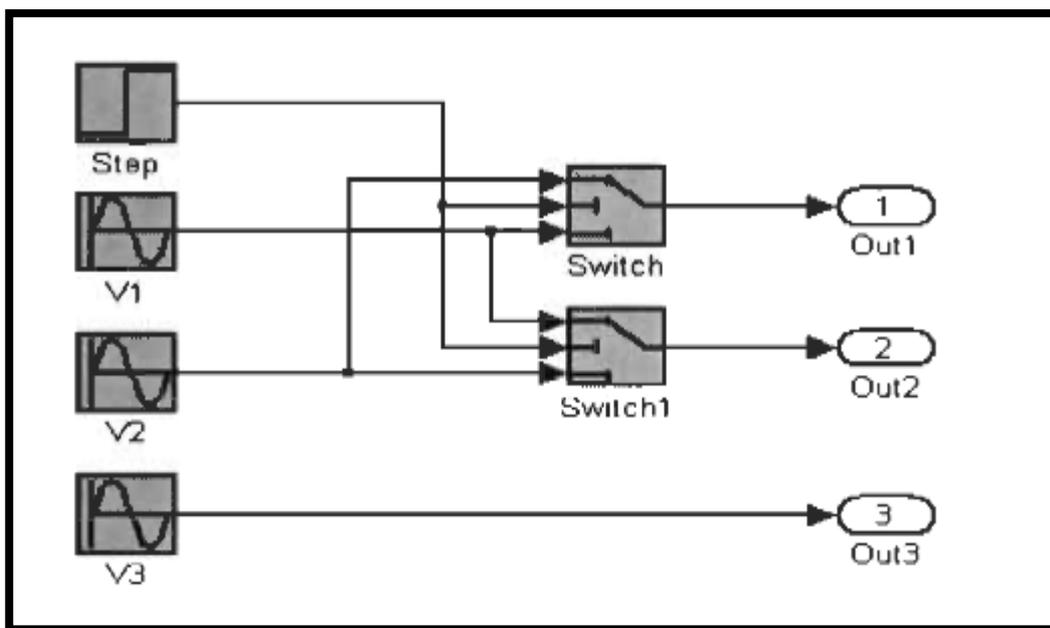
**Figure 3.4 :** Résultats de simulation du modèle en tension de la MAS lors du fonctionnement à vide et avec introduction de la charge à l'instant **t=0.5s**

Les figures ci-dessus montrent les résultats de la simulation du processus de démarrage suivi de l'application d'une charge de **20N.m** à l'instant **t = 0.5s**. On remarque que :

- **Le courant statorique** répond parfaitement au changement de la consigne du couple de **0 à 20N.m**, à l'instant **t=0.5s** **figure 3.4**. A vide  $I_{sa}=4A$ , en charge  $I_{sa}=12A$  nous constatons que le courant statorique évolue suivant la charge appliquée à l'arbre du moteur.
- Après l'application de la charge **la vitesse** du moteur diminue **figure 3.4**. C'est le principe du moteur quand il fonctionne en boucle ouverte à cause du glissement.
- **Le couple électromagnétique** : A l'instant **t = 0.5s** nous avons appliqué à l'arbre de la machine asynchrone un couple résistant ( $C_r=20 N.m$ ) nous constatons que le couple électromagnétique rejoint, après un régime transitoire, la valeur qui compense le couple résistant appliqué **figure 3.4**.

### **3.3.3. Processus de démarrage suivi du freinage par contre courant et redémarrage à en sens inverse**

Modifions le modèle afin d'effectuer la simulation du processus de démarrage (jusqu'au régime permanent) suivi du freinage par contre-courant (inversion de deux phases de la tension d'alimentation). Le contenu de bloc inversion de deux phases est représenté à **la figure 3.5**.



**Figure 3.5** : bloc inverse sens de rotation

Lors du freinage, il y'a inversion de deux phases de la tension d'alimentation : le moteur est alimenté par un champ statorique inverse.

Démarrage à vide : courant, couple et vitesse du moteur

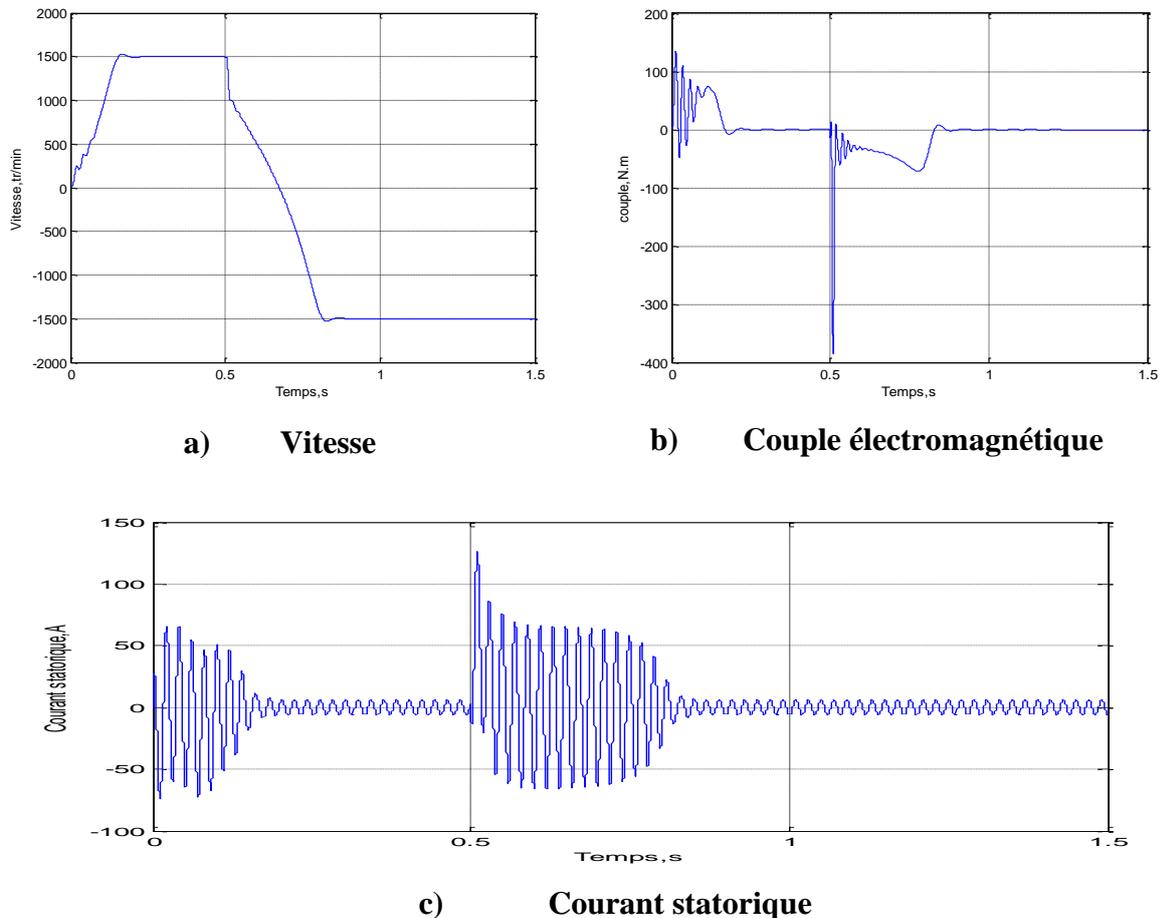


Figure 3.6 : Résultats de simulation du modèle en tension de la MAS inversé le sens de rotation avec introduction à vide à l’instant  $t=0.5s$

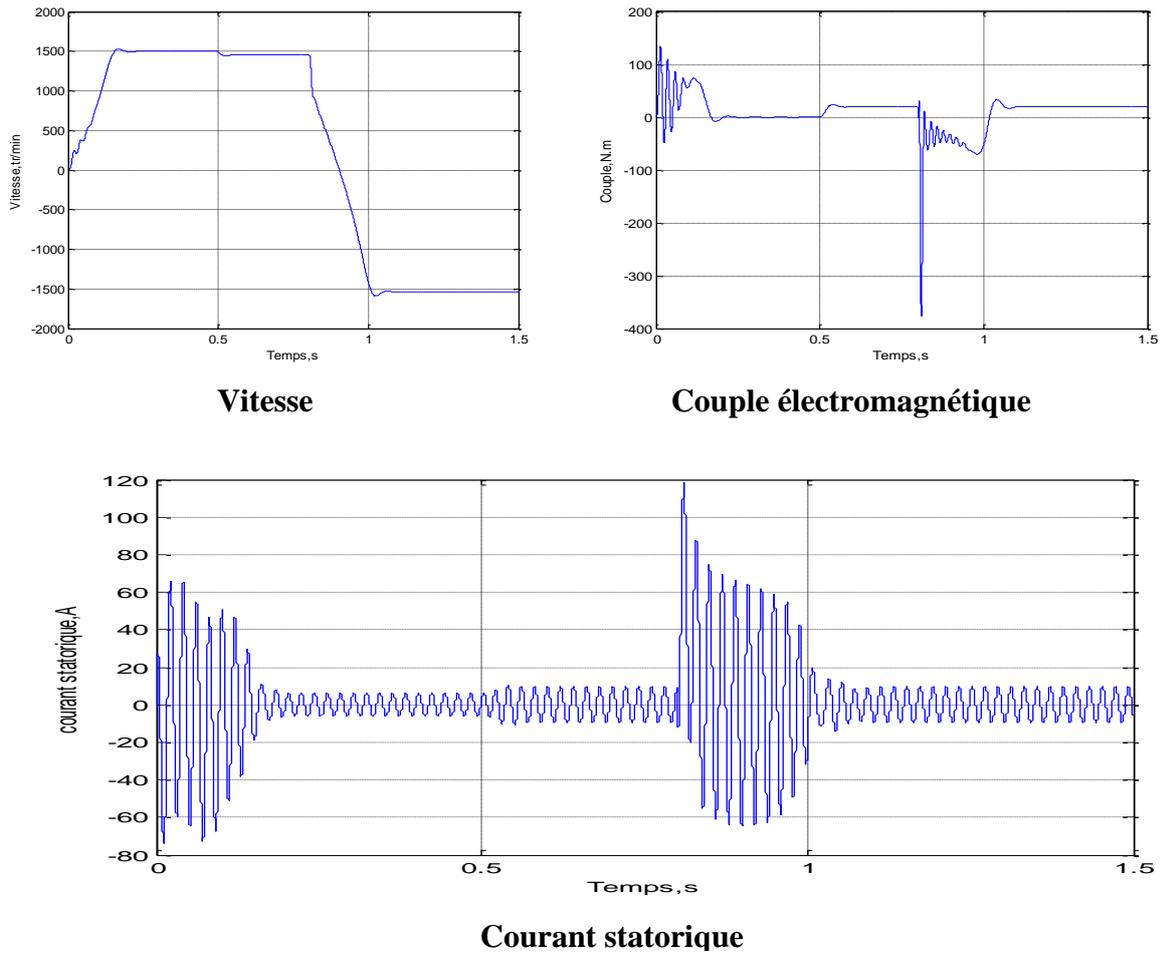
Nous remarquons que :

Entre  $t=0.5s$  et  $t=0.8s$ , avec l'inversement de deux phases de la tension d'alimentation, à l'instant  $t=0.5s$ , le moteur décélère (freinage par contre-courant) **figure 3.6. (a)**

**(b) Figure 3.6 :** Après  $t=0.85s$  le couple est toujours maintenu constant à sa valeur nominale. Même remarques que pour le courant.

Démarrage à charge : courant, couple et vitesse du moteur

La simulation est effectuée sur une période de  $1.5s$ . Elle se fait de façon à envoyer une consigne de couple  $T=20N.m$  pour  $t$  ( $0.5s, 1.5s$ ) et d'inverser les deux phases ( $t=0.8s$ ) de la tension d'alimentation à l'instant  $t=0.5s$ . Les résultats de simulation pour la vitesse, le couple, le courant statorique sont montrés à **figure 3.7.**



**Figure 3.7 :** Résultats de simulation du modèle en tension de la MAS inversé le sens de rotation avec introduction de la charge à l’instant  $t=0.5s$

Dans le régime transitoire la vitesse est stabilisée dans la valeur **157 rad/s** (figure 3.7), à l’instant **0.5s** on a appliqué la charge (**20 N.m**) et influencés par cette variation et diminuer la vitesse. A l’instant **0.8s** le moteur décélère (freinage par contre-courant) **figure 3.7**.

**Figure 3.7** entre (**0.5s,0.8s**) on applique une charge (**20 N.m**) le couple augmente, à l’instant **0.8s** la **Figure 3.7** présente des oscillations jusqu’à **1s**. Même remarques que pour le courant.

### **3.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la simulation d'un moteur Asynchrone à cage en utilisant le logiciel Simulink. Le processus de démarrage du moteur, suivi de l'application d'une charge entraînée a été modélisé et simulé. Les résultats obtenus démontrent la justesse du modèle développé. Cette étape est nécessaire pour pouvoir commander le moteur asynchrone et utiliser les différents procédés de commande par exemple commande scalaire ou la commande vectoriel comme perspective.

## Conclusion générale

On a établi dans ce travail le modèle de la machine asynchrone en passant du système réel triphasé au système diphasé linéaire dans le cadre de la transformation de Park.

La simulation du modèle de la machine asynchrone nous permet de valider le modèle établi et de montrer notamment le caractère bien connu de la mon linéarité entre les grandeurs flux et couple spécialement lorsque une charge (perturbation) est appliquée.

Dans ce présent travail, nous avons présenté la modélisation et la simulation d'un moteur asynchrone à cage. Le processus de démarrage du moteur, suivi de l'application d'une charge entraîné a été modélisé et simulé. Les résultats obtenus démontrent la justesse du modèle développé. Cette étape est nécessaire dans le cadre de ce travail car les mêmes tests réalisés ici seront utiles lors d'une étude sur les procédés de la commande de la machine asynchrone à savoir la commande V/F ou la commande vectorielle.

De plus ce travail nous a permis de mieux voir le comportement de la machine asynchrone dans différentes situations avant son utilisation dans un système de commande à boucle fermée ou avec une alimentation constitué d'onduleurs.

## **Bibliographie**

- [1] **Tidjani Abd el jaouad et Al Amoudi Badreddine** “ Identification paramétrique d’un moteur asynchrone à cage d’écureuil par la technique «optimisation d’essaim de particules»” mémoire master Académique kasdi merbah Ouargla 2016
- [2] **Aoufi Ahmed** “ Utilisation d’observateurs à modes glissants pour le contrôle direct de couple et le contrôle vectorielle d’une machine asynchrone à cage” Mémoire de Magister en électrotechnique Université de Biskra 2011
- [3] **BENAOUDA OMAR FETHI** “ APPLICATION DES TECHNIQUES DE L’INTELLIGENCE ARTIFICIELLE (LF-RN) POUR LE CONTROLE DIRECT DU COUPLE D’UNE MAS ALIMENTEE PAR DES ONDULEURS MULTINIVEAUX” Mémoire magister en électrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie d' Oran 2013
- [4] **Mamadou Lamine Doumbia et Abdoulaye Traoré** “MODÉLISATION ET SIMULATION D’UNE MACHINE ASYNCHRONE À CAGE À L’AIDE DU LOGICIEL MATLAB/SIMULINK”2002
- [5] **Djediai Djedidet Hammi Hicham** “ Etude et modélisation du moteur asynchrone à double cage” mémoire master académique université kasdi merbah Ouargla 2016
- [6] **Pierre Mayé** “Aide-mémoire électrotechnique” Livre en électrotechnique « L’usine Nouvelle » DUNOD
- [7] **Philippe LE BRUN cours** “ Variation de vitesse des machines asynchrones” Lycée Louis ARMAND, 173 Bd de Strasbourg
- [8] **AIT AMRANE Adlane et ZENATI Noureddine** “Réalisation d’un banc d’essai de la chaîne d’action « variateur de vitesse – moteur asynchrone » commandé par un API et supervisé par un écran tactile “ mémoire master Automatique des systèmes de production ,Université Djilali Bounâama - Khemis Miliana 2016
- [9] **Rabah BELHADEF et Bilal BOUTAYA** “Commande Vectorielle et par Logique Floue de la Machine Asynchrone Sans Capteur” mémoire D’Ingénieur, Ecole nationale polytechnique 2008

## ***BIBLIOGRAPHIE***

---

[10] **L. BAGHLI** ‘‘Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone’’ notes de cours, université Henri Poincaré Nancy1 ,IUFM de Lorraine – UHP 2004

[11] **LADJEL Younes ,TOUIL Ameer** ‘‘ÉTUDE D’UN ENTRAINEMENT ÉLECTRIQUE À VITESSE VARIABLE D’UN MOTEUR À INDUCTION ‘’ mémoire Master Académique UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M’SILA 2017

[12] **REZGUI SALAH EDDINE** ‘‘ COMMANDE DE MACHINE ELECTRIQUE EN ENVIRONNEMENT Matlab/Simulink et Temps Réel’’ mémoire MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE UniversitéMentouri de Constantine 2009

[13] **Dr A. Meroufel, cours** ‘‘ Contrôle de la machine asynchrone ‘’ Université Djillali Liabès – Sidi Bel-Abbès 2009