REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté *des Sciences et de la technologie*

Département d'Electromécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : **ELECTROMECANIQUE**

Spécialité : ELECTROMECANIQUE

Par

- **Bechime Amine**
- **Benbelkhir Assala**

Intitulé

Contrôle d'un moteur à deux étoiles au stator en présence d'un défaut

Soutenu le : ……

Devant le Jury composé de :

Nom & Prénom	*Grade*	*Qualité*	*Etablissement*
Mr. Zebiri Fouad	*MCB*	*Président*	*Univ-BBA*
Mr. Merabet Elkheir	*Pr*	*Encadreur*	*Univ-BBA*
Mr. Chouder Adel	*MCB*	*Examinateur*	*Univ-BBA*
Mr. Reffas Abderrahim	*MCA*	*Examinateur*	*Univ-BBA*

Année Universitaire 2021/2022

Dédicaces

En premier lieu, je remerciée le DIEU, qui ma donnée le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail :

- *À la lumière de ma vie, mes chers parents, exemple de courage et de sérieux qui m'ont tout donné pour me permettre de réaliser mes rêves. En ces quelques mots, je leurs exprime tout mon amour et mon respect pour tout ce qu'ils m'ont offert comme soutien, encouragement et aide. Je leurs souhaite une bonne santé, que Dieu me les garde.*
- *A mes chers frères et sœurs.*
- *A mon encadrant Merabet Elkheir pour Sa confiance était l'étai nécessaire pour la réussite de ce travail, et le professeur Zebiri Fouad ce grand homme reconnu par sa compétence, Qu'il reçoive ici le témoignage de toute ma gratitude pour tout ce qu'il a fait, Merci.*
- *A mes tout chers amis.*

Bechime Amine

Dédicaces

En premier lieu, je remerciée le DIEU, qui ma donnée le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail :

- *À la lumière de ma vie, mes chers parents, exemple de courage et de sérieux qui m'ont tout donné pour me permettre de réaliser mes rêves. En ces quelques mots, je leurs exprime tout mon amour et mon respect pour tout ce qu'ils m'ont offert comme soutien, encouragement et aide. Je leurs souhaite une bonne santé, que Dieu me les garde.*
- *A mes chères sœurs.*
- *A mon encadrant Merabet Elkheir pour Sa confiance était l'étai nécessaire pour la réussite de ce travail, et le professeur Zebiri Fouad ce grand homme reconnu par sa compétence, Qu'il reçoive ici le témoignage de toute ma gratitude pour tout ce qu'il a fait, Merci.*

Benbelkhir Assala

Liste des tableaux

Tableau III- 1 : *Technique d'analyse de l'état d'une machine tournante [12].....*49

Liste des figures

Chapitre I

Fig. I- 1 : *Modes de fonctionnement suivant le glissement [2].* 2
Fig. I- 2 : *Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases [4].* 2
Fig. I- 3 : *Représentation des enroulements de la MASDE.* 3
Fig. I- 4 : *Représentation des enroulements de la machine dans le repère (d,q).*.....9
Fig. I- 5 : *Représente le schéma bloc de simulation de la MASDE.*.....18
Fig. I- 6 : *La vitesse de rotation.*.....18
Fig. I- 7 : *Le couple électromagnétique.* 19
Fig. I- 8 : *Les courants statoriques réel.* 19
Fig. I- 9 : *Le courants rotoriques réel.*.....19
Fig. I- 10 : *Le flux rotorique direct* Φ_{dr}.....20
Fig. I- 11 : *Le flux rotorique en quadratique* Φ_{qr}. 20
Fig. I- 12 : *Représente le schéma de l'onduleur triphasé.* 21
Fig. I- 13 : *Principe de la techniques Sinus-Triangle.*.....22
Fig. I- 14 : *Représente MASDE-Onduleur MLI.*.....23
Fig. I- 15 : *Les courants statoriques réel.* 23
Fig. I- 16 : *Le courant rotorique réel.*.....24
Fig. I- 17 : *Le flux rotorique direct* Φ_{dr}.....24
Fig. I- 18 : *Le flux rotorique quadratique* Φ_{qr}.....24
Fig. I- 19 : *Le couple électromagnétique.* 25
Fig. I- 20 : *La vitesse de rotation.*.....25

Chapitre II

Fig. II- 1 : *Principe de la commande vectorielle.*.....28
Fig. II- 2 : *Orientation du flux rotorique sur l'axe d.* 30
Fig. II- 3 : *Schéma bloc simplifié de la commande à flux orienté (FOC).* 31
Fig. II- 4 : *Schéma d'un système asservi du premier ordre régulé par un PI.*.....34
Fig. II- 5 : *Schéma de la boucle de régulation des courants statorique.*.....35
Fig. II- 6 : *Représentation schématique de la commande FOC sur la MASDE.* 35
Fig. II- 7 : *Représentation schématique du bloc de découplage FOC.* 36
Fig. II- 8 : *Le principe du défluxage.*.....36
Fig. II- 9 : *Schéma de la commande FOC avec régulation de vitesse.* 37
Fig. II- 10 : *Boucle de régulation de vitesse.* 37

Fig. II- 11 : *La vitesse de rotation.* 38
Fig. II- 12 : *Le couple électromagnétique.*.....38
Fig. II- 13 : *Le flux rotorique direct* Φ_{dr}. 39
Fig. II- 14 : *Le flux rotorique quadratique* Φ_{qr} 39
Fig. II- 15 : *Les courants statoriques réel.*.....39
Fig. II- 16 : *Le courant statorique* i_{qs1}.....40
Fig. II- 17 : *La tension* V_{as1} *et le courant* i_{as1} *statorique.* 40

Chapitre III

Fig. III- 1 : *Propositions des défauts par Thomson.*.....44
Fig. III- 2 : *Proposition des défauts par Bonnett [18].* 44
Fig. III- 3 : *Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes.* 45
Fig. III- 4 : *Excentricité statique.* 46
Fig. III- 5 : *Excentricité dynamique.* 46
Fig. III- 6 : *Excentricité mixte.* 47
Fig. III- 7 : *Court-circuit entre spire de la même phase.* 48
Fig. III- 8 : *Court-circuit entre phases.* 48
Fig. III- 9 : *Ecarts d'usinage (excentricité et parallélisme) [22].*.....51
Fig. III- 10 : *Spectres fréquentiels du défaut de balourd [23].*.....51
Fig. III- 11 : *Transmissions par courroies [23].*.....52
Fig. III- 12 : *Schéma bloc de la MASDE lors l'ouverture d'une première phase.* 55
Fig. III- 13 : *La vitesse de rotetion avec défauts..*.....56
Fig. III- 14 : *Le couple électromagnétique avec défauts.* 56
Fig. III- 15 : *Les flux rotorique direct* Φ_{dr}, Φ_{qr} *avec défauts.*.....56
Fig. III- 16 : *Les courants statoriques* i_{as1}, i_{as2} *avec défauts.*.....57

Liste des abréviations

Glossaire

MASDE	Machine Asynchrone Double Etoile
PARK	Transformation de Park
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.
PI	Proportionnel Intégral
FOC	Field Oriented Control

Nomenclature

i : Le courant (A).

v : La tension (V).

ω_s : La pulsation électrique statorique (rad/s).

ω_r : La pulsation électrique rotorique (rad/s).

ω_{coor} : La vitesse angulaire des axes (d,q).

ω_{gl} : La pulsation électrique de glissement.

φ : Le flux (Wb).

s_1, s_2, r : Les indices correspondants à l'étoile 1, l'étoile 2 et au rotor.

a_{s1}, b_{s1}, c_{s1} : Les indices correspondants aux trois phases du stator 1.

a_{s2}, b_{s2}, c_{s2} : Les indices correspondants aux trois phases du stator 2.

a_r, b_r, c_r : Les indices correspondants aux trois phases du rotor.

R_{s1}, R_{s2}, R_r : La résistances statoriques et rotorique.

L_{s1}, L_{s2}, L_r : Les inductance propres des étoiles statoriques et du rotorique.

L_{ms} : L'inductance mutuelle entre phases statoriques.

Liste des abréviations

L_{mr} : L'inductance mutuelle entre phases rotorique.

M_{sr} : L'inductance mutuelle entre phases statoriques et rotorique.

N, N^*, N_{rm} : La vitesse de rotation, de référence et du modèle de référence.

p : L'opérateur de Laplace.

τ : Constante de temps d'un système du premier ordre.

T_r *:* Constante de temps rotorique.

k_p, k_i : Paramètres du régulateur PI.

x^*:*Grandeur de référence (vitesse, tension, courant, etc.)*

φ_m : Le flux de magnétisation.

f : *Fréquence de la tension.*

V*pm : Amplitude de la porteuse.*

$\mathcal{P}$: Nombres de paires de poles.

Résume

Résumé :

L'objectif de ce travail est avant tout de posséder un modèle de la machine asynchrone double étoile au stator.

Pour aborder cette étude, nous avons établi la modélisation et la simulation de la MASDE, puis l'ensemble MASDE-onduleur (MLI). Ensuite, nous avons un modèle réel de la machine asynchrone double étoile, basé sur la commande vectorielle est obtenue dont la résolution permet de retrouver l'évolution de toutes les grandeurs de la machine. En fin, la détection des défauts statoriques et rotoriques dans une machine asynchrone double étoile, D'aprés un programme écrit sous MATLAB nous a permis de valider ce modèle.

Mots clés : MASDE, Onduleur MLI, commande vectorielle, défauts statoriques, MATLAB.

ملخص :

الهدف من هذا العمل هو الحصول على نموذج للآلة غير المتزامنة ذات النجم المزدوج في الجزء الثابت.

لمقاربة هذه الدراسة، أنشأنا نمذجة ومحاكاة MASDE، ثم تجميع MASDE-Onduleur(MLI). بعد ذلك، لدينا نموذج حقيقي للآلة غير المتزامنة ذات النجم المزدوج، بناءً على التحكم المتجه الذي يتم الحصول عليه بدقة تجعل من الممكن العثور على تطور جميع كميات الآلة. أخيراً، قمنا بالكشف على أخطاء الجزء الثابت والدوار في آالة غير متزامنة ذات نجمة مزدوجة، وفقا لبرنامج مكتوب في MATLAB، مكننا هذا الأخير من التحقق من صحة هذا النموذج.

Table des Matières

Introduction générale **13**

CHAPITRE I **15**

Modelisation et simulation de la masde et masde-onduleur **15**

I.1. Introduction 1

I.2. Principe de fonctionnement de la MASDE 1

I.3. Applications de la Machine asynchrone double étoile 2

I.3.1. Avantages de la MASDE 2

I.3.2. Inconvénients de la MASDE 3

I.4. Description de la MASDE 3

I.5. Hypothèses simplificatrices 4

I.6. Modélisation de la machine asynchrone double étoile 4

I.6.1. Modèle triphasé équivalent d'une machine asynchrone 4

- Equations des tensions 5
- Equations des flux 5
- Equation mécanique 7
- Couple électromagnétique 7

I.6.2. Transformation (triphasé-biphasé) des équations du modèle 8

I.6.2.1. Principe de la transformation de Park 8

I.6.2.2. Application de la transformation de Park à la MASDE 9

- **Equations de tensions** 9
- **Equations des flux** 10
- **Equation mécanique** 11

I.6.3. Choix du Référentiel 13

I.6.3.1. Référentiel lié au stator 13

I.6.3.2. Référentiel lié au rotor 13

I.6.3.3. Référentiel lié aux champs tournant 13

I.6.4. Modèle de la Machine 13

I.6.4.1. Mise sous forme d'équation d'état 14

I.6.4.2. Simulation et interprétation des résultats 17

- **Résultat simulation :** 18
- **Interprétations des résultats :** 20

I.7. Modélisation du convertisseur commandé en M.L.I 21

I.7.1. Stratégie de commande sinus-triangle 21
I.7.2. Résultat et interprétation de simulation.....23
➢ **Interprétations des résultats :**.....25
I.8. Conclusion.....25
CHAPITRE II 27
Commande vectorielle de la MASDE..... 27
II.1. Introduction 28
II.2. Principe de la commande vectorielle 28
II.3. Procède d'orientation du flux 29
II.4. Méthodes de la commande vectorielle 30
II.4.1. Méthode de commande directe.....30
II.4.2. Méthode de commande indirecte 31
II.5. Commande vectorielle indirecte sans réglage de vitesse.....31
II.5.1. Identification des paramètres des régulateurs PI.....33
II.5.2. Application de la commande indirecte sur la MASDE.....35
II.6. Commande vectorielle indirecte avec régulation de vitesse 36
II.6.1. Identification des paramètres du régulateur de vitesse 37
II.6.2. Simulation et interprétation des résultats 38
II.7. Conclusion.....41
CHAPITRE III..... 42
commande de la MASDE en presence des defauts 42
III.1. INTRODUCTION 43
III.2. Les défauts de da machine tournante 43
III.3. Défaillance d'ordre mécanique 45
III.3.1. Défaillances des roulements 45
III.3.2. Défaillance d'excentricité.....45
III.4. Défaillance d'ordre électrique.....47
III.4.1. Défauts d'isolant dans un enroulement.....47
III.4.2. Court-circuit entre spires 47
III.4.3. Court-circuit entre phases.....48
III.5. Les sources d'informations pour détections des défauts 48
III.5.1. L'analyse vibratoire.....48
III.5.2. L'analyse d'huile 48

III.5.3. L‘analyse acoustique 49
III.6. Principaux défauts d'une machine tournante et leurs manifestations 50
III.6.1. Balourd 50
III.6.2. Défauts de courroies 52
III.7. Méthodes de diagnostic fréquemment utilisées 52
III.7.1. Analyse fréquentielle du courant statorique 52
III.7.2. Analyse des flux 53
III.7.3. Analyse du couple électromagnétique 54
III.8. Analyse du comportement sur une machine asynchrone double étoile en présence de défauts par Simulink/Matlab 54
III.8.1. Simulation et interprétation résultats 55
➢ **Interprétation du résultat** 57
III.9. Conclusion 57
Conclusion générale 60
Bibliographie 62
Annexe 65

Introduction générale

Introduction générale

La conception des machines, originellement couplées directement au réseau électrique, est antérieure à celle des convertisseurs statiques. Ces derniers ont été alors adaptés aux machines existantes. Mais si la machine n'est plus directement couplée au réseau triphasé le choix du nombre de phases peut être apriori reconsidéré. En effet, conserver trois phases dans les domaines soit des systèmes embarqués soit dans le domaine des fortes puissances implique des contraintes fortes tant sur le convertisseur statique que sur la machine. Ainsi, l'utilisation d'onduleurs multi-niveaux avec donc augmentation de la tension pose le problème des tensions élevées que doit supporter la machine. Enfin, les contraintes en terme de fiabilité augmentent avec le niveau de puissance surtout si comme dans le cas de l'éolien offshore la maintenance devient un élément critique. Ces différents aspects ont déjà amené au développement industriel des machines hexaphasées double-étoile alimentées par des commutateurs de courant (ponts à thyristors). Ce mode d'alimentation simple et robuste comporte des limites en termes de dynamique, de souplesse de commande et s'applique surtout à des machines synchrones à excitation indépendante.

En revanche, la constitution des machines multi-phasées asynchrones ne se diffère par rapport à celle des machines triphasées qu'au niveau statorique, la structure du rotor reste identique bobinée ou à cage d'écureuil. Pour cela, les machines multi-phasées subissent également des défauts comme l'excentricité ou cassure des barres au niveau du rotor ou encore un court-circuit au stator.

Dans ce contexte les travaux du présent mémoire de thèse s'inscrivent avec comme objectif d'une part, le contrôle de la MASDE-MLI par la commande vectorielle. D'autre part, la détection des défauts statorique et rotorique dans une machine asynchrone double étoile.

Pour mener cette étude, le manuscrit est structuré en trois chapitres:

Dans le premier chapitre, nous commençons une étude préliminaire sur une description de la machine asynchrone double étoile, le principe de fonctionnement, ces avantages et ces inconvénients, ensuite, on a fait appel à un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et en effectuant un changement de repère par l'application de la transformation de Park dans le but de réduire la complicité du système et de faciliter sa mise en équation. Et puis nous présentons l'alimentation de la machine par onduleur de tension à commande MLI. Nous commentons les résultats de simulation après illustration et visualisation.

Le deuxième chapitre sera consacré à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique de la MASDE. Un aperçu sur le principe de la commande vectorielle ainsi que ses différentes méthodes est présenté. On terminera ce chapitre par l'application de la méthode indirecte sur la machine et l'interprétation des résultats de simulation.

Le troisième chapitre traitera un modèle de la machine asynchrone double étoile avec un défaut statorique qu'il s'agit d'un ouverture d'une phase, ce modèle sera mis en évidence sous l'environnement Matlab afin d'analyser les grandeurs temporelles tel que les courants statoriques et rotoriques, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation.

Enfin, une conclusion générale pour mettre en relief l'essentiel de cette thèse.

CHAPITRE I

MODELISATION ET SIMULATION DE LA MASDE ET MASDE-ONDULEUR

I.1. Introduction

Le modèle mathématique d'une machine électrique est un moyen de représentation de la machine réelle permettant d'avoir une image de ce que l'on peut observer expérimentalement et de prévoir le comportement de la machine dans des situations impossibles de les avoir expérimentalement. Pour modéliser la MASDE, on doit prendre en considération des hypothèses simplificatrices afin d'obtenir un modèle exploitable.

Dans ce chapitre nous présentons, d'une part, la description et le principe de fonctionnement de la machine asynchrone double étoile, ses applications, ses avantages et ses inconvénients, et d'autre part, les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques caractérisant le modèle de la machine. La simulation de modèle est alors fondée sur la transformation de Park qui rapport les équation électrique statorique et rotorique à deux axes perpendiculaire électriquement (direct et quadrature).

Nous étudierons dans un premier temps la MADSE directement alimentée par des sources purement sinusoïdales et équilibrées (réseaux électrique), nous passerons ensuit à l'alimentation de cette dernière par des onduleurs de tension en commande MLI.

I.2. Principe de fonctionnement de la MASDE

Les courants triphasés de fréquence f_s alimentant l'enroulement 1 du stator de la machine donnent naissance à un champ tournant à la vitesse de synchronisme $\boldsymbol{\omega}_s$ tels que :

$$\boldsymbol{\omega_s} = \frac{\boldsymbol{f_s}}{\boldsymbol{\mathcal{P}}}[\boldsymbol{tr/s}] \tag{I.1}$$

Avec : $\boldsymbol{\mathcal{P}}$ le nombre de pair de pôles.

Les mêmes courants triphasés mais décalés d'un angle α alimentant l'enroulement 2 du même stator donnent eux aussi naissance à un autre champ tournant à la même vitesse de synchronismeN_s. Ces deux champs tournants produits par les deux enroulements statoriques vont induire des courants dans les conducteurs du rotor, générant ainsi des forces électromotrices qui feront tourner le rotor à une vitesse $\boldsymbol{\omega_r}$ [tr/s] inférieure à celle du synchronisme ($\boldsymbol{\omega_r} < \boldsymbol{\omega_s}$), ainsi les effets de l'induction statorique sur les courants induits rotoriques se manifestent par l'élaboration d'un couple de force électromagnétique sur le rotor tel que l'écart des vitesses soit réduit. On dit alors que ces deux champs glissent par rapport au rotor et on définit ce glissement par le rapport :

$$g = \frac{\omega_{gl}}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad \text{(I.2)}$$

Les différents modes de fonctionnement dépendent de la valeur du glissement:

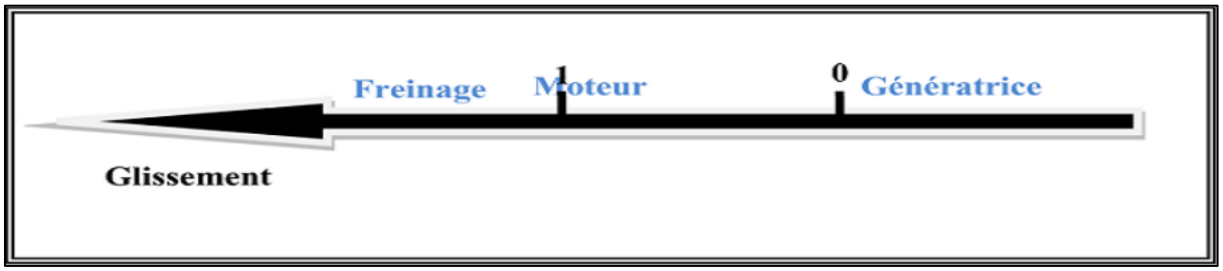

Fig. I- 1 : *Modes de fonctionnement suivant le glissement [2].*

I.3. Applications de la Machine asynchrone double étoile

La machines asynchrone double étoile (MASDE) est utilisée beaucoup plus dans les applications de puissances élevées, par exemple les alternateurs synchrones pour générer une puissance élevée par rapport aux alternateurs conventionnels. Parmi ces applications on cite les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins des compresseurs, les moulins du ciment, etc [3]. Une autre application concerne l'utilisation de la MASDE dans les systèmes de production de l'énergie éolienne (voir la Fig. I.2) [3].

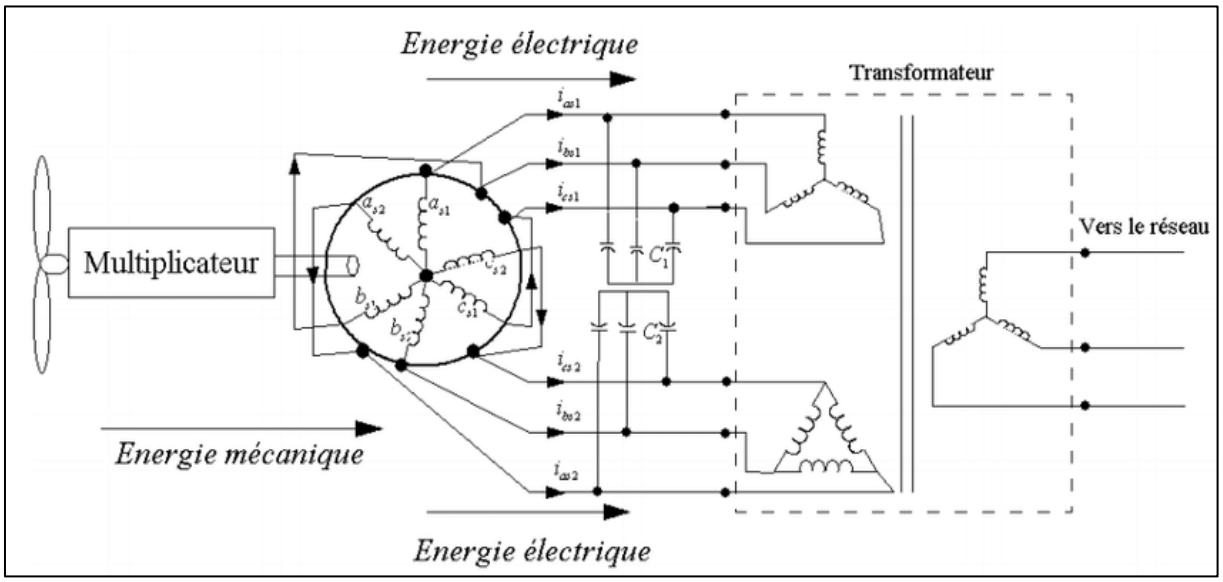

Fig. I- 2 : *Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases [4].*

I.3.1. Avantages de la MASDE

La MASDE présente plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées [5]

- Segmentation de puissance.
- Amélioration de la fiabilité.
- Amélioration du facteur de puissance.
- Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques.

I.3.2. Inconvénients de la MASDE

Cependant, la MASDE présente des inconvénients tels que, [6].

- Le nombre de semi-conducteurs augmente avec le nombre de phases, ce qui peut éventuellement augmenter le coût de l'ensemble convertisseur- machine.
- La multiplication du nombre des semi-conducteurs avec la structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage entre le couple et le flux, ce qui complique évidemment sa commande.
- L'inconvénient majeur des machines double étoile est l'apparition de courants harmoniques de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tension.

I.4. Description de la MASDE

La machine asynchrone double étoile comporte dans le stator deux systèmes de bobinages triphasés décalés entre eux d'un angle électrique α (dans cette modélisation on prend α = 30°) et un rotor soit bobiné soit à cage d'écureuil (Figure I.3). La structure électrique du rotor est supposée être un rotor à cage (barre conductrice en aluminium aux tôles ferromagnétiques). Ce choix permet d'obtenir des machines peu onéreuses, robustes, facile d'emploi et nécessitent un entretien limité. [7]

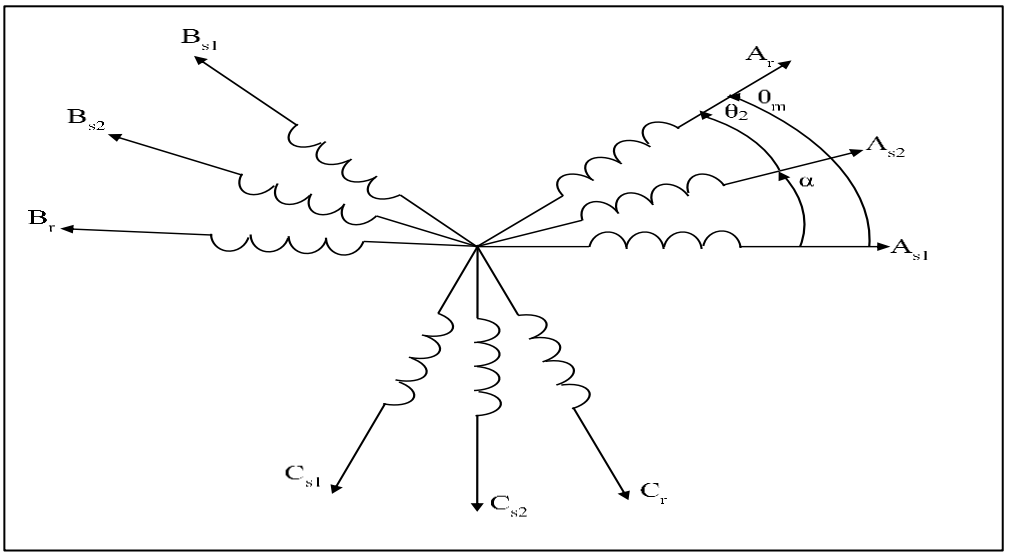

Fig. I- 3 : *Représentation des enroulements de la MASDE.*

On notera par l'indice s1 pour les grandeurs relatives à la première étoile (stator 1) et par l'indice s2 pour celles relatives à la deuxième étoile (stator 2). Les phases de la première étoile A_{s1}, B_{s1}, C_{s1} et les phases de la deuxième étoile prennent A_{s2}, B_{s2}, C_{s2}, les phases rotoriques sont

notées par A_r, B_r, C_r. L'angle de décalage entre les deux étoiles est α. θ_1 exprime la position du rotor (phase Ar) par rapport à l'étoile1 (phase A_{s1}). θ_2 la position du rotor par rapport à l'étoile 2, ces angles sont définis par les équations suivantes :

$$\theta_1 = \Omega_m t + \theta_0$$

$$\theta_2 = \theta_1 - \alpha$$

Ω_m [*rad/s*] : la vitesse mécanique du rotor.
θ_0: La position du rotor par rapport au l'étoile 1.

I.5. Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone double étoile (MASDE), avec la répartition de ses enroulements et sa propre géométrie est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, et comme nous l'avons déjà soulevé, il est alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices [8]:

- La force magnétomotrice créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- L'entrefer uniforme (effets d'encochages négligés).
- La machine est de constitution symétrique ;
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont tous négligés.

I.6. Modélisation de la machine asynchrone double étoile

I.6.1. Modèle triphasé équivalent d'une machine asynchrone

Par application de la loi de Faraday à l'un des six enroulements statoriques et rotoriques de la machine, la loi des mailles s'exprime par la relation (I.3) [9] :

$$\boldsymbol{V = R.I + \frac{d\Phi}{dx}} \qquad (I.3)$$

En tenant compte des hypothèses simplificatrices citées ci-dessus, et la notation des vecteurs des grandeurs tensions, courants et flux. On peut écrire pour les vecteurs des tensions, courants et flux statorique sont:

Pour l'étoile 1

$$\begin{cases} [\boldsymbol{V_{s1}}] = [\boldsymbol{v_{as1}} \boldsymbol{v_{bs1}} \boldsymbol{v_{cs1}}]^{\boldsymbol{T}} \\ [\boldsymbol{I_{s1}}] = [\boldsymbol{i_{as1}} \boldsymbol{i_{bs1}} \boldsymbol{i_{cs1}}]^{\boldsymbol{T}} \\ [\boldsymbol{\Phi_{s1}}] = [\boldsymbol{\varphi_{as1}} \boldsymbol{\varphi_{bs1}} \boldsymbol{\varphi_{cs1}}]^{\boldsymbol{T}} \end{cases} \qquad (I.4)$$

Pour l'étoile 2

$$\begin{cases} [V_{s2}] = [v_{as2} v_{bs2} v_{cs2}]^T \\ [I_{s2}] = [i_{as2} i_{bs2} i_{cs2}]^T \\ [\Phi_{s2}] = [\varphi_{as2} \varphi_{bs2} \varphi_{cs2}]^T \end{cases} \quad \text{(I.5)}$$

Pour le rotor

$$\begin{cases} [V_r] = [v_{ar} v_{br} v_{cr}]^T \\ [I_r] = [i_{ar} i_{br} i_{cr}]^T \\ [\Phi_r] = [\varphi_{ar} \varphi_{br} \varphi_{cr}]^T \end{cases} \quad \text{(I.6)}$$

Equations des tensions

La combinaison de la loi d'Ohm et de la loi de Lenz permet décrire les relations suivantes :

$$[V_{s1}] = [R_{s1}][I_{s1}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{s1}] \quad \textbf{(I.7)}$$

$$[V_{s2}] = [R_{s2}][I_{s2}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{s2}] \quad \textbf{(I.8)}$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \quad \textbf{(I.9)}$$

Equations des flux

Les flux statoriques et rotorique en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes :

$$[\Phi_{s1}] = [\mathrm{L}_{s1,s1}][I_{s1}] + [M_{s1,s2}][I_{s2}] + [M_{s1,r}][I_r] \quad \text{(I. 10)}$$

$$[\Phi_{s2}] = [\mathrm{M}_{s2,s1}][I_{s1}] + [L_{s1,s2}][I_{s2}] + [M_{s2,r}][I_r] \quad \text{(I. 11)}$$

$$[\Phi_r] = [\mathrm{M}_{r,s1}][I_{s1}] + [M_{r,s2}][I_{s2}] + [L_{s1,r}][I_r] \quad \text{(I. 12)}$$

Où :

$[R_{s1}], [R_{s2}], [R_r]$: Les matrices des résistances statoriques (étoile 1 et 2) et rotorique respectivement :

$$\begin{cases} [R_{s1}] = R_{s1}[ID]_{3\times3} \\ [R_{s2}] = R_{s2}[ID]_{3\times3} \\ [R_r] = R_r[ID]_{3\times3} \end{cases} \quad \text{(I.13)}$$

Avec :

$[ID]_{3\times3}$: la matrice identité d'ordre 3 ;

R_{s1}: : la résistance d'une phase de la 1ere étoile ;

R_{s2}: la résistance d'une phase de la 2ere étoile ;

Rr : la résistance d'une phase du rotor.

Les sous matrices des inductances dans les équations (I.10) (I.11) et (I.12) sont exprimés comme suit

$$[L_{s1,s1}]=\begin{bmatrix} L_{as1}+L_{ms} & \frac{-L_{ms}}{2} & \frac{-L_{ms}}{2} \\ \frac{-L_{ms}}{2} & L_{bs1}+L_{ms} & \frac{-L_{ms}}{2} \\ \frac{-L_{ms}}{2} & \frac{-L_{ms}}{2} & L_{cs1}+L_{ms} \end{bmatrix} \quad (I.14)$$

$$[L_{s2,s2}]=\begin{bmatrix} L_{as2}+L_{ms} & \frac{-L_{ms}}{2} & \frac{-L_{ms}}{2} \\ \frac{-L_{ms}}{2} & L_{bs2}+L_{ms} & \frac{-L_{ms}}{2} \\ \frac{-L_{ms}}{2} & \frac{-L_{ms}}{2} & L_{cs2}+L_{ms} \end{bmatrix} \quad (I.15)$$

$$[L_{r,r}]=\begin{bmatrix} L_{ar}+L_{mr} & \frac{-L_{mr}}{2} & \frac{-L_{mr}}{2} \\ \frac{-L_{mr}}{2} & L_{br}+L_{mr} & \frac{-L_{mr}}{2} \\ \frac{-L_{mr}}{2} & \frac{-L_{mr}}{2} & L_{cr}+L_{mr} \end{bmatrix} \quad (I.16)$$

$$[M_{s1,s2}]=L_{ms}\begin{bmatrix} cos(\alpha) & cos(\alpha+\frac{2\pi}{3}) & cos(\alpha+\frac{4\pi}{3}) \\ cos(\alpha+\frac{4\pi}{3}) & cos(\alpha) & cos(\alpha+\frac{2\pi}{3}) \\ cos(\alpha+\frac{2\pi}{3}) & cos(\alpha+\frac{4\pi}{3}) & cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (I.17)$$

$$[M_{s1,r}]=M_{sr}\begin{bmatrix} cos(\theta_m) & cos(\theta_m+\frac{2\pi}{3}) & cos(\theta_m+\frac{4\pi}{3}) \\ cos(\theta_m+\frac{4\pi}{3}) & cos(\theta_m) & cos(\theta_m+\frac{2\pi}{3}) \\ cos(\theta_m+\frac{2\pi}{3}) & cos(\theta_m+\frac{4\pi}{3}) & cos(\theta_m) \end{bmatrix} \quad (I.18)$$

$$[M_{s2,r}]=M_{sr}\begin{bmatrix} cos(\theta_2) & cos(\theta_2+\frac{2\pi}{3}) & cos(\theta_2+\frac{4\pi}{3}) \\ cos(\theta_2+\frac{4\pi}{3}) & cos(\theta_2) & cos(\theta_2+\frac{2\pi}{3}) \\ cos(\theta_2+\frac{2\pi}{3}) & cos(\theta_2+\frac{4\pi}{3}) & cos(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (I.19)$$

$[M_{s2,s1}] = [M_{s1,s2}]^T$; $[M_{r,s1}]=[M_{s1,r}]^T$; $[M_{r,s2}]=[M_{s2,r}]^T$.

Avec :

- $L_{as1}=L_{bs1}=L_{cs1}=L_{s1}$: L'inductance propre de la 1ère étoile ;
- $L_{as2}=L_{bs2}=L_{cs2}=L_{s2}$: L'inductance propre de la 2eme étoile ;
- $L_{ar}=L_{br}=L_{cr}=L_r$: l'inductance propre du rotor ;
- L_{ms} : la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique

- L_{mr} : la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique ;
- M_{sr} : la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle entre un stator et le rotor.

Remarque : Les matrices $[R_r]$, $[L_r]$, $[M_r]$, $[R_s]$, $[L_s]$ et $[M_s]$ sont des paramètres constants. Leurs valeurs peuvent être obtenues soit en connaissant les caractéristiques physiques de la machine équilibré (données constructeur), soit par des essais expérimentaux, ou encore par des procédures d'identification Lorsque le moteur tourne, les coefficients des matrices et ne sont pas constants, ils varient en fonction de l'angle « θ », position angulaire entre le rotor et le stator. Ceci rend le modèle triphasé équivalent difficilement utilisable tant en commande qu'en surveillance, dans l'approche qui suit une transformation mathématique est appliquée sur les équations du modèle précédent afin de rendre l'ensemble indépendantes de la position angulaire « θ », calculable en ligne.

Equation mécanique

L'équation fondamentale de rotation du rotor est décrite par les deux -relations suivantes :

$$(C_{em}-C_r-K_f\,.\,\Omega_m)=\frac{d\Omega_m}{dt}J \tag{I.20}$$

$$\frac{d\theta_m}{dt}=\Omega_m \tag{I.21}$$

Avec :

J : le moment d'inertie de la machine ;

C_{em} : le couple électromagnétique ;

C_r : le couple résistante (couple de la charge) ;

K_f : le coefficient de frottement.

Couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique est obtenue par la dérivation de la convergiez [5] :

$$C_{em}=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}[I_{s1}]^T\\[I_{s2}]^T\\[I_r]^T\end{bmatrix}\left\{\frac{\delta}{\delta\theta_m}\begin{bmatrix}[L_{s1,s1}] & [M_{s1,s2}] & [M_{s1,r}]\\[M_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [L_{s2,r}]\\[M_{r,s1}] & [M_{r,s2}] & [L_{r,r}]\end{bmatrix}\right\}\begin{bmatrix}[I_{s1}]\\[I_{s2}]\\[I_r]\end{bmatrix} \tag{I.22}$$

D'après les sous matrice des inductances, on trouve que les sous matrices suivantes $[M_{s1,r}]$, $[M_{s2,r}]$, $[M_{r,s1}]$ et $[M_{r,s2}]$ dépendant de θ_m ce qui donne une expression du couple électromagnétique plus simple que l'équation (I.21).

$$C_{em} = [I_{s1}]^T \frac{\delta}{\delta\theta_m}\{[M_{s1,r}][I_r]\} + [I_{s2}]^T \frac{\delta}{\delta\theta_m}\{[M_{s2,r}][I_r]\} \quad \text{(I.23)}$$

Les équation (I.7),(I.8),(I.9),(I.10),(I.11),(I.12),(I.20),(I.21) et (I.23), forment le modèle électromagnétique complet de la MASDE dans le système réel, en tenant compte des hypothèses Simplificatrice précitées.

Le modèle de la MASDE établi précédemment ne nous permet pas d'étudier les régimes transitoires de la MASDE, cette partie fait l'objet d'étudier ces régimes. Plusieurs modèles ont été écrits dans ce contexte. On cite, le modèle avec l'utilisation des composantes symétriques, de la théorie du vecteur d'espace et du modèle de Park.

I.6.2. Transformation (triphasé-biphasé) des équations du modèle

I.6.2.1. Principe de la transformation de Park

Le modèle biphasé de la MASDE s'effectue par une transformation du repère triphasé en un repère biphasé, qui n'est en fait qu'un changement de base sur les grandeurs physiques (tensions, flux, et courants), il conduit à des relations indépendantes de l'angle θ et à la réduction d'ordre des équations de la machine. La transformation la plus connue par les électrotechniciens est celle de Park (1929) [9].

Pour simplifier les équations, les repères de Park des grandeurs statoriques et rotoriques doivent coïncider, ceci est possible grâce à la relation suivante:

$$[X_{dqo}]=[P][X_{abc}] \quad \text{(I.24)}$$

$$[X_{abc}]=[P]^{-1}[X_{dqo}] \quad \text{(I.25)}$$

Où, X représente les variables considérées de la machine qui sont : tensions, courants ou flux. La variable X_o représente la composante homopolaire, ajoutée pour rendre la transformation réversible, elle est nulle lorsque le neutre n'est pas branché.

Et $[P]$ et $[P]^{-1}$ sont les matrices de passage direct et inverse, elles sont données par : La matrice de transformée de Park.

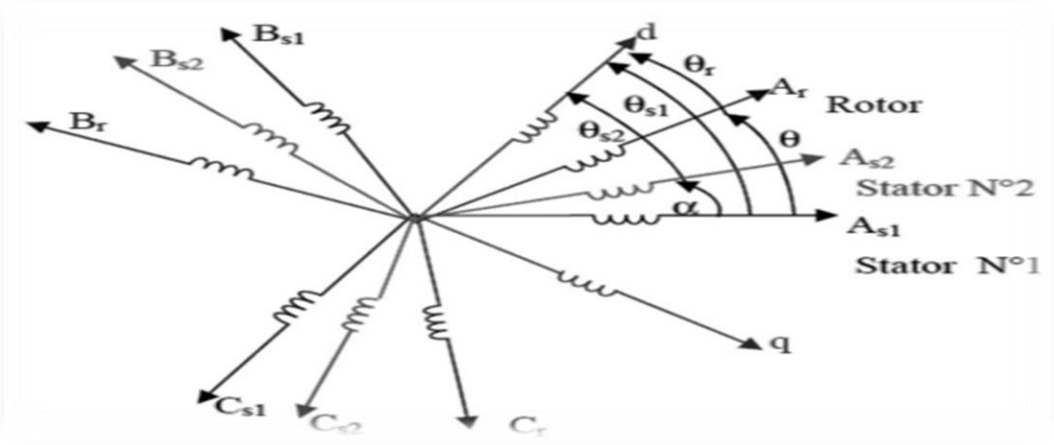

Fig. I- 4 : *Représentation des enroulements de la machine dans le repère (d,q).*

$$[P]=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} cos(\theta) & cos(\theta+\frac{2\pi}{3}) & cos(\theta+\frac{4\pi}{3}) \\ -sin(\theta) & -sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) & -sin(\theta+\frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I.26)$$

$$[P]^{-1}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} cos(\theta) & -sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ cos(\theta+\frac{2\pi}{3}) & -sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ cos(\theta+\frac{4\pi}{3}) & -sin(\theta+\frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I.27)$$

I.6.2.2. Application de la transformation de Park à la MASDE

Equations de tensions

$$[P_{s1p}][V_{s1p}] = [R_s][P_{ps1}][I_{s1p}] + \frac{d}{dt}([P_{ps1}][\Phi_{s1p}])$$

$$[P_{s2p}][V_{s2p}] = [R_s][P_{ps2}][I_{s2p}] + \frac{d}{dt}([P_{ps2}][\Phi_{s2p}]) \quad (I.28)$$

$$0 = [R_r][P_{pr}][I_{rp}] + \frac{d}{dt}([P_{pr}][\Phi_{rp}])$$

En multipliant la première expression de (I.28) par $[P_{ps1}]^{-1}$,on obtient :

$$[V_{s1p}] = [R_s][I_{s1p}] + [P_{s1p}]^{-1}\frac{d}{dt}([P_{ps1}][\Phi_{s1p}])$$

$$[V_{s1p}] = [R_s][I_{s1p}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{s1p}] + [P_{s1p}]^{-1}\frac{d}{dt}([P_{ps1}][\Phi_{s1p}]) \quad (I.29)$$

$$[V_{s1p}] = [R_s][I_{s1p}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{s1p}] + [P_{s1p}]^{-1}\frac{d\theta}{dt}\frac{d}{dt}([P_{ps1}][\Phi_{s1p}])$$

On pose : $\frac{d\theta_{s1}}{dt} = \frac{d\theta_{s2}}{dt} = \omega_s$

Par l'application de cette transformation aux systèmes d'équation de tension (I.7), (I.8) et (I.9), on obtient :

Pour le stator 1 :

$$\begin{bmatrix} v_{ds1} \\ v_{qs1} \\ v_{os1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{os1} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds1} \\ \Phi_{qs1} \\ \Phi_{os1} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_{s1}}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds1} \\ \Phi_{qs1} \\ \Phi_{os1} \end{bmatrix} \qquad (I.30)$$

Pour le stator 2 :

$$\begin{bmatrix} v_{ds2} \\ v_{qs2} \\ v_{os2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{os1} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds2} \\ \Phi_{qs2} \\ \Phi_{os2} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_{s2}}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds2} \\ \Phi_{qs2} \\ \Phi_{os2} \end{bmatrix} \qquad (I.31)$$

Pour le rotor :

Le rotor étant en court-circuit c.-à-d. que $v_{ar} = v_{br} = v_{cr} = 0$.

$$\begin{bmatrix} v_{ds2} \\ v_{qs2} \\ v_{os2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{r} & 0 & 0 \\ 0 & R_{r} & 0 \\ 0 & 0 & R_{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{or} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_{r}}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{or} \end{bmatrix} \qquad (I.32)$$

Avec : $\boldsymbol{\frac{d\theta_{s1}}{dt} = \omega_s}$, $\boldsymbol{\frac{d\theta_{s2}}{dt} = \frac{d(\theta_{s1}-\alpha)}{dt} = \omega_s}$, $\boldsymbol{\frac{d\theta_{r}}{dt} = \frac{d(\theta_{s1}-\theta)}{dt} = \omega_s - \omega_r = \omega_{gl}}$

Ou encore en développant la matrice, avec la composante homopolaire nulle, on obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_s i_{ds1} + \frac{d}{dt}\Phi_{ds1} - \omega_{s1}\Phi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_s i_{qs1} + \frac{d}{dt}\Phi_{qs1} + \omega_{s1}\Phi_{ds1} \end{cases} \qquad (I.33)$$

$$\begin{cases} v_{ds2} = R_s i_{ds2} + \frac{d}{dt}\Phi_{ds2} - \omega_{s2}\Phi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_s i_{qs2} + \frac{d}{dt}\Phi_{qs2} + \omega_{s2}\Phi_{ds2} \end{cases} \qquad (I.34)$$

$$\begin{cases} 0 = R_s i_{dr} + \frac{d}{dt}\Phi_{dr} - \omega_{gl}\Phi_{qr} \\ 0 = R_s i_{qr} + \frac{d}{dt}\Phi_{qr} + \omega_{gl}\Phi_{dr} \end{cases} \qquad (I.35)$$

Equations des flux

Après la transformation des équations de flux et des courants, on peut écrire :

$$\mathbf{[P_{ps1}][\Phi_{s1p}]=[L_{s1s1}][P_{ps1}][I_{s1p}]+[L_{s1s2}][P_{ps2}][I_{s2p}]+[L_{s1r}][P_{pr}][I_{rp}]}$$

$$\mathbf{[P_{ps2}][\Phi_{s2p}]=[L_{s2s1}][P_{ps1}][I_{s1p}]+[L_{s2s2}][P_{ps2}][I_{s2p}]+[L_{s2r}][P_{pr}][I_{rp}]} \qquad (I.36)$$

$$\mathbf{[P_{pr}][\Phi_{rp}]=[L_{rs1}][P_{ps1}][I_{s1p}]+[L_{rs2}][P_{ps2}][I_{s2p}]+[L_{rr}][P_{pr}][I_{rp}]}$$

En multipliant respectivement par : $[P_{ps1}]^{-1}$, $[P_{ps2}]^{-1}$ et $[P_{pr}]^{-1}$ on trouve :

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Phi_{ds1}} = \boldsymbol{L_{s1} i_{ds1}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{L_{ms} i_{ds1}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{L_{ms} i_{ds2}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{M_{sr} i_{dr}} \\ \boldsymbol{\Phi_{qs1}} = \boldsymbol{L_{s1} i_{qs1}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{L_{ms} i_{qs1}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{L_{ms} i_{qs2}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{M_{sr} i_{qr}} \\ \boldsymbol{\Phi_{ds2}} = \boldsymbol{L_{s2} i_{ds2}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{L_{ms} i_{ds2}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{L_{ms1}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{M_{sr} i_{dr}} \\ \boldsymbol{\Phi_{qs1}} = \boldsymbol{L_{s2} i_{qs2}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{L_{ms} i_{qs2}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{L_{ms} i_{qs1}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{M_{sr} i_{qr}} \\ \boldsymbol{\Phi_{dr}} = \boldsymbol{L_{r} i_{dr}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{L_{ms} i_{dr}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{L_{ms} i_{ds1}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{M_{sr} i_{ds2}} \\ \boldsymbol{\Phi_{qr}} = \boldsymbol{L_{r} i_{qr}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{L_{ms} i_{qr}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{L_{ms} i_{qs1}} + \frac{3}{2}\boldsymbol{M_{sr} i_{qs2}} \end{cases} \quad (I.37)$$

On pose : $\frac{3}{2}\ L_{ms} = \frac{3}{2} L_{mr} = \frac{3}{2} M_{sr} = L_m$.

L_m : L'inductance mutuelle cyclique entre le stator 1, stator 2 et le rotor.

Le système d'équation (I.37) devient :

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Phi_{ds1}} = \boldsymbol{L_{s1} i_{ds1}} + \boldsymbol{L_m}(\boldsymbol{i_{ds1}} + \boldsymbol{i_{ds2}} + \boldsymbol{i_{dr}}) \\ \boldsymbol{\Phi_{qs1}} = \boldsymbol{L_{s1} i_{qs1}} + \boldsymbol{L_m}(\boldsymbol{i_{qs1}} + \boldsymbol{i_{qs2}} + \boldsymbol{i_{qr}}) \\ \boldsymbol{\Phi_{ds2}} = \boldsymbol{L_{s2} i_{ds2}} + \boldsymbol{L_m}(\boldsymbol{i_{ds1}} + \boldsymbol{i_{ds2}} + \boldsymbol{i_{dr}}) \\ \boldsymbol{\Phi_{qs2}} = \boldsymbol{L_{s2} i_{qs2}} + \boldsymbol{L_m}(\boldsymbol{i_{qs1}} + \boldsymbol{i_{qs2}} + \boldsymbol{i_{qr}}) \\ \boldsymbol{\Phi_{dr}} = \boldsymbol{L_{r} i_{dr}} + \boldsymbol{L_m}(\boldsymbol{i_{ds1}} + \boldsymbol{i_{ds2}} + \boldsymbol{i_{dr}}) \\ \boldsymbol{\Phi_{qr}} = \boldsymbol{L_{r} i_{qr}} + \boldsymbol{L_m}(\boldsymbol{i_{qs1}} + \boldsymbol{i_{qs2}} + \boldsymbol{i_{qr}}) \end{cases} \quad (I.38)$$

L'expression (I.38) se présente sous la forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi_{ds1}} \\ \boldsymbol{\Phi_{ds2}} \\ \boldsymbol{\Phi_{dr}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{L_{s1} + L_m} & \boldsymbol{L_m} & \boldsymbol{L_m} \\ \boldsymbol{L_m} & \boldsymbol{L_{s2} + L_m} & \boldsymbol{L_m} \\ \boldsymbol{L_m} & \boldsymbol{L_m} & \boldsymbol{L_r + L_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I_{ds1}} \\ \boldsymbol{I_{ds2}} \\ \boldsymbol{I_{dr}} \end{bmatrix} \quad (I.39)$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi_{qs1}} \\ \boldsymbol{\Phi_{qs2}} \\ \boldsymbol{\Phi_{qr}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{L_{s1} + L_m} & \boldsymbol{L_m} & \boldsymbol{L_m} \\ \boldsymbol{L_m} & \boldsymbol{L_{s2} + L_m} & \boldsymbol{L_m} \\ \boldsymbol{L_m} & \boldsymbol{L_m} & \boldsymbol{L_r + L_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I_{qs1}} \\ \boldsymbol{I_{qs2}} \\ \boldsymbol{I_{qr}} \end{bmatrix} \quad (I.40)$$

$(L_{s1} + L_m)$,$(L_{s2} + L_m)$: les inductances propres cycliques des étoiles 1 et 2 ;

$(L_r + L_m)$: l'inductance propre cyclique du rotor.

Equation mécanique

Lors de changement du repère, il faut trouver l'expression du couple électromagnétique dans le nouveau repère.

Pour calculer l'expression du couple instantané, il est nécessaire de déterminer la puissance instantanée. La puissance instantanée absorbé par la machine asynchrone double étoile est donnée par l'expression suivante :

$$\boldsymbol{P_{abs}} = [\boldsymbol{V_{s1}}]^{\boldsymbol{T}}[\boldsymbol{I_{s1}}] + [\boldsymbol{V_{s2}}]^{\boldsymbol{T}}[\boldsymbol{I_{s2}}] \quad (I.41)$$

Ce qui donne :

$$\boldsymbol{P_{abs} = v_{as1}i_{as1} + v_{bs1}i_{bs1} + v_{cs1}i_{cs1} + v_{as1}i_{as2} + v_{bs2}i_{bs2} + v_{cs2}i_{cs2}} \quad \text{(I.42)}$$

Comme nous l'avons indiqué précédemment, La transformation de PARK permet de conserver la puissance, on peut écrire alors :

$$\boldsymbol{P_{abs} = v_{ds1}i_{ds1} + v_{qs1}i_{qs1} + v_{ds2}i_{ds2} + v_{qs2}i_{qs2}} \quad \text{(I.43)}$$

On remplace les tensions et les courants d'axes (d,q) dans les système d'équations (I.43)

Par leur expression dans les équations (I.33),(I.34) et (I.35), on trouve l'expression de la puissance absorbé instantané suivante :

$$\begin{aligned} \boldsymbol{P_{abs}} &= \underbrace{\boldsymbol{R_{s1}i^2{}_{ds1} + R_{s1}i^2{}_{qs1} + R_{s2}i^2{}_{ds2} + R_{s2}i^2{}_{qs2}}}_{\boldsymbol{terme\ 1} } \\ &+ \underbrace{\boldsymbol{\omega_{coor}\,(\Phi_{ds1}i_{qs1} - \Phi_{qs1}i_{ds1} + \Phi_{ds2}i_{qs2} - \Phi_{qs2}i_{ds2}}}_{\boldsymbol{terme\ 2}} \\ &+ \underbrace{\boldsymbol{\frac{d\Phi_{ds1}}{dt}i_{ds1} + \frac{d\Phi_{qs1}}{dt}i_{qs1} + \frac{d\Phi_{ds2}}{dt}i_{ds2} + \frac{d\Phi_{qs2}}{dt}i_{qs2}}}_{\boldsymbol{terme\ 3}} \end{aligned} \quad \text{(I.44)}$$

On constat que la puissance instantané développée se compose de trois termes :

- Le premier terme est identifiable aux pertes joules ;
- Le second terme correspond à la puissance électromagnétique emmagasinée ;
- Le troisième terme représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique (les pertes fer sont supposé négligeables).

La puissance mécanique et le couple électromagnétique peuvent s'écrite sous la forme universelle :

$$\boldsymbol{P_{em} = \omega_s C_{em}}$$

Avec :

ω_s : la vitesse de rotation mécanique du rotor ;

C_{em} : le couple électromagnétique développé.

On a dans l'expression de la puissance absorbé (I.44) le deuxième terme qui représente la puissance électromagnétique.

$$P_{em} = \omega_s(\Phi_{ds1}i_{qs1} - \Phi_{qs1}i_{ds1} + \Phi_{ds2}i_{qs2} - \Phi_{qs2}i_{ds2}) \quad \text{(I.45)}$$

D'après l'équation (I.45) il est clair que le couple électromagnétique est de la forme suivante :

$$C_{em} = P(\Phi_{ds1} i_{qs1} + \Phi_{ds2} i_{qs2} - \Phi_{qs1} i_{ds1} - \Phi_{qs2} i_{ds2}) \quad \text{(I.46)}$$

Avec, P est le nombre de paires de pôle de la machine.

I.6.3. Choix du Référentiel

Pour étudier la théorie des régimes transitoires de la machine asynchrone double étoile, on peut utilisé trois système d'axes de coordonnées du plan d'axes (d , q) [10].

I.6.3.1. Référentiel lié au stator

Dans ce référentiel, les axes (d , q) sont immobiles par rapport au stator ($\omega_{coor} = 0$) Dans ce cas, la phase A_{s1} et de coïncident. Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec la grandeur instantanée et dont l'avantage ne nécessite pas une transformation vers le système réel.

L'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à coutant alternatif.

I.6.3.2. Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, les axes (d ,q) sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse ω_r donc ($\omega_{coor} = \omega_r$).

L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes transitoires dans les machines alternatives asynchrones et synchrones aves une connexion non symétrique des circuits du rotor.

I.6.3.3. Référentiel lié aux champs tournant

Dans ce référentiel les axes (d , q) sont immobiles par rapport au champs magnétique crée par les deux étoile du stator ($\omega_{coor} = \omega_s$).

Ce référentiel est généralement utilisé pour le but de pouvoir appliquer un command de vitesse, de couple, etc. Puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de forme continue.

I.6.4. Modèle de la Machine

Dans notre travaille, on utilise le référentiel lié au champs tournant pour la commande de la MASDE. Dans ce cas, Les tensions devient :

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1} i_{ds1} + \frac{d}{dt}\Phi_{ds1} - \omega_s \Phi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1} i_{qs1} + \frac{d}{dt}\Phi_{qs1} - \omega_s \Phi_{ds1} \\ v_{ds2} = R_{s2} i_{ds2} + \frac{d}{dt}\Phi_{ds1} - \omega_s \Phi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2} i_{qs2} + \frac{d}{dt}\Phi_{qs2} - \omega_s \Phi_{ds2} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt}\Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r)\Phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt}\Phi_{qr} - (\omega_s - \omega_r)\Phi_{dr} \end{cases} \quad (I.47)$$

I.6.4.1. Mise sous forme d'équation d'état

Le flux magnétisant Φ_m est la somme des flux magnétisant direct Φ_{md} est quadratique Φ_{mq} d'où :

$$\Phi_m = \sqrt{\Phi^2{}_{md} + \Phi^2{}_{mq}} \quad (I.48)$$

Les deux expressions des flux magnétisants en fonction des courants statoriques et rotoriques sont :

$$\begin{cases} \Phi_{md} = L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \Phi_{mq} = L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (I.49)$$

En introduisant les expressions des flux magnétisants (I.49) dans le système d'équation (I.38), on obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{ds1} = L_{s1} i_{ds1} + \Phi_{md} \\ \Phi_{qs1} = L_{s1} i_{qs1} + \Phi_{mq} \\ \Phi_{ds2} = L_{s2} i_{ds2} + \Phi_{md} \\ \Phi_{qs2} = L_{s2} i_{qs2} + \Phi_{mq} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + \Phi_{md} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + \Phi_{mq} \end{cases} \quad (I.50)$$

A partir de l'équation (I.50) on tire :

$$\begin{cases} I_{ds1} = \frac{\Phi_{ds1} - \Phi_{md}}{L_{s1}} \\ I_{qs1} = \frac{\Phi_{qs1} - \Phi_{mq}}{L_{s1}} \\ I_{ds2} = \frac{\Phi_{ds2} - \Phi_{md}}{L_{s2}} \\ I_{qs2} = \frac{\Phi_{qs2} - \Phi_{md}}{L_{s2}} \\ I_{dr} = \frac{\Phi_{dr} - \Phi_{md}}{L_r} \\ I_{qr} = \frac{\Phi_{qr} - \Phi_{mq}}{L_r} \end{cases} \quad (I.51)$$

En remplacent les courant du système d'équation (I.51) par leur expression dans le système d'équation (I.47), on obtient :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\boldsymbol{\Phi_{ds1}} = \boldsymbol{v_{ds1}} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}}(\boldsymbol{\Phi_{ds1}} - \boldsymbol{\Phi_{md}}) + \boldsymbol{\omega_s}\boldsymbol{\Phi_{qs1}} \\ \frac{d}{dt}\boldsymbol{\Phi_{qs1}} = \boldsymbol{v_{qs1}} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}}\left(\boldsymbol{\Phi_{qs1}} - \boldsymbol{\Phi_{mq}}\right) - \boldsymbol{\omega_s}\boldsymbol{\Phi_{ds1}} \\ \frac{d}{dt}\boldsymbol{\Phi_{ds2}} = \boldsymbol{v_{ds2}} - \frac{R_{s2}}{L_{s2}}(\boldsymbol{\Phi_{ds2}} - \boldsymbol{\Phi_{md}}) + \boldsymbol{\omega_s}\boldsymbol{\Phi_{qs2}} \\ \frac{d}{dt}\boldsymbol{\Phi_{qs2}} = \boldsymbol{v_{qs2}} - \frac{R_{s2}}{L_{s2}}\left(\boldsymbol{\Phi_{qs2}} - \boldsymbol{\Phi_{md}}\right) - \boldsymbol{\omega_s}\boldsymbol{\Phi_{ds2}} \\ \frac{d}{dt}\boldsymbol{\Phi_{dr}} = -\frac{R_r}{L_r}(\boldsymbol{\Phi_{dr}} - \boldsymbol{\Phi_{md}}) + \boldsymbol{\omega_{gl}}\boldsymbol{\Phi_{qr}} \\ \frac{d}{dt}\boldsymbol{\Phi_{qr}} = -\frac{R_r}{L_r}\left(\boldsymbol{\Phi_{qr}} - \boldsymbol{\Phi_{mq}}\right) - \boldsymbol{\omega_{gl}}\boldsymbol{\Phi_{dr}} \end{cases} \quad \text{(I.52)}$$

Avec : $\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r$

A partir de l'équation (I.38), les expressions de flux magnétisants auront l'expression suivante :

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Phi_{md}} = \boldsymbol{L_a}\left(\frac{\boldsymbol{\Phi_{ds1}}}{L_{s1}} + \frac{\boldsymbol{\Phi_{ds2}}}{L_{s2}} + \frac{\boldsymbol{\Phi_{dr}}}{L_r}\right) \\ \boldsymbol{\Phi_{mq}} = \boldsymbol{L_a}\left(\frac{\boldsymbol{\Phi_{qs1}}}{L_{s1}} + \frac{\boldsymbol{\Phi_{qs2}}}{L_{s2}} + \frac{\boldsymbol{\Phi_{qr}}}{L_r}\right) \end{cases} \quad \text{(I.53)}$$

Ou :

$$L_a = \frac{1}{\left(\frac{1}{L_{S1}}\right)+\left(\frac{1}{L_{S2}}\right)+\left(\frac{1}{L_r}\right)+\left(\frac{1}{L_m}\right)}$$

Il est possible d'obtenir d'autre expression du couple instantané en utilisant l'expression des flux statoriques est en remplaçant (I.38) dans (I.46), on obtient :

$$\boldsymbol{C_{em}} = \boldsymbol{PL_m}[\left(\boldsymbol{I_{qs1}} + \boldsymbol{I_{qs2}}\right)\boldsymbol{I_{dr}} - (\boldsymbol{I_{ds1}} + \boldsymbol{I_{ds2}})\boldsymbol{I_{qr}}] \quad \text{(I.54)}$$

Une autre expression du couple peut être déduite à partir du flux rotorique dans le système d'équation (I.38). On considère les flux rotorique suivants :

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Phi_{dr}} = \boldsymbol{L_r}\boldsymbol{I_{dr}} + \boldsymbol{L_m}(\boldsymbol{I_{ds1}} + \boldsymbol{I_{ds2}} + \boldsymbol{I_{dr}}) \\ \boldsymbol{\Phi_{qr}} = \boldsymbol{L_r}\boldsymbol{I_{qr}} + \boldsymbol{L_m}\left(\boldsymbol{I_{qs1}} + \boldsymbol{I_{qs2}} + \boldsymbol{I_{qr}}\right) \end{cases} \quad \text{(I.55)}$$

Les courants rotorique sont :

$$\begin{cases} \boldsymbol{I_{dr}} = \frac{1}{L_m+L_r}\left[\boldsymbol{\Phi_{dr}} - \boldsymbol{L_m}(\boldsymbol{I_{ds1}} + \boldsymbol{I_{ds2}})\right] \\ \boldsymbol{I_{qr}} = \frac{1}{L_m+L_r}\left[\boldsymbol{\Phi_{qr}} - \boldsymbol{L_m}\left(\boldsymbol{I_{qs1}} + \boldsymbol{I_{qs2}}\right)\right] \end{cases} \quad \text{(I.56)}$$

En introduisant I_{dr} et I_{qr} dans l'expression (I.54), on aura :

$$\boldsymbol{C_{em}} = \text{P}\,\frac{L_m}{L_m+L_r}\left[\left(\boldsymbol{I_{qs1}} + \boldsymbol{I_{qs2}}\right)\boldsymbol{\Phi_{dr}} - (\boldsymbol{I_{ds1}} + \boldsymbol{I_{ds2}})\boldsymbol{\Phi_{qr}}\right] \quad \text{(I.57)}$$

D'après le remplacement des flux magnétisants (Φ_{md}, Φ_{mq}) dans (I.46) et après la simplification, on trouve le nouveau système d'équation :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\boldsymbol{\Phi}_{ds1} = \boldsymbol{v}_{ds1} + \frac{L_a - L_{s1}}{T_{s1}L_{s1}}\boldsymbol{\Phi}_{ds1} + \boldsymbol{\omega}_s\boldsymbol{\Phi}_{qs1} + \frac{L_a}{T_{s1}L_{s2}}\boldsymbol{\Phi}_{ds2} + \frac{L_a}{T_{s1}L_r}\boldsymbol{\Phi}_{dr} \\ \frac{d}{dt}\boldsymbol{\Phi}_{qs1} = \boldsymbol{v}_{qs1} - \boldsymbol{\omega}_s\boldsymbol{\Phi}_{ds1} + \frac{L_a - L_{s1}}{T_{s1}L_{s1}}\boldsymbol{\Phi}_{qs1} + \frac{L_a}{T_{s1}L_{s2}}\boldsymbol{\Phi}_{qs2} + \frac{L_a}{T_{s1}L_r}\boldsymbol{\Phi}_{qr} \\ \frac{d}{dt}\boldsymbol{\Phi}_{ds2} = \boldsymbol{v}_{ds2} + \frac{L_a}{T_{s2}L_{s1}}\boldsymbol{\Phi}_{ds1} + \frac{L_a - L_{s2}}{T_{s2}L_{s2}}\boldsymbol{\Phi}_{ds2} + \boldsymbol{\omega}_s\boldsymbol{\Phi}_{qs2} + \frac{L_a}{T_{s2}L_r}\boldsymbol{\Phi}_{dr} \\ \frac{d}{dt}\boldsymbol{\Phi}_{qs2} = \boldsymbol{v}_{qs2} + \frac{L_a}{T_{s2}L_{s1}}\boldsymbol{\Phi}_{qs1} + \boldsymbol{\omega}_s\boldsymbol{\Phi}_{ds2} + \frac{L_a - L_{s2}}{T_{s2}L_{s2}}\boldsymbol{\Phi}_{qs2} + \frac{L_a}{T_{s2}L_r}\boldsymbol{\Phi}_{qr} \\ \frac{d}{dt}\boldsymbol{\Phi}_{dr} = \frac{L_a}{T_rL_{s1}}\boldsymbol{\Phi}_{ds1} + \frac{L_a}{T_rL_{s2}}\boldsymbol{\Phi}_{ds2} + \frac{L_a - L_r}{T_rL_r}\boldsymbol{\Phi}_{dr} + \boldsymbol{\omega}_{gl}\boldsymbol{\Phi}_{qr} \\ \frac{d}{dt}\boldsymbol{\Phi}_{qr} = \frac{L_a}{T_rL_{s1}}\boldsymbol{\Phi}_{qs1} + \frac{L_a}{T_rL_{s2}}\boldsymbol{\Phi}_{ds2} - \boldsymbol{\omega}_{gl}\boldsymbol{\Phi}_{dr} + \frac{L_a - L_r}{T_rL_r}\boldsymbol{\Phi}_{qr} \end{cases} \quad (I.58)$$

En mettant le système d'équations (I.58) sous forme d'équations d'état :

$$\frac{dX}{dt} = \boldsymbol{AX} + \boldsymbol{BU} \quad (I.59)$$

Avec :

$\boldsymbol{X} = [\boldsymbol{\Phi}_{ds1}\ \boldsymbol{\Phi}_{qs1}\ \boldsymbol{\Phi}_{ds2}\ \boldsymbol{\Phi}_{qs2}\ \boldsymbol{\Phi}_{dr}\ \boldsymbol{\Phi}_{qr}]^T$: Vecteur d'état ;

D'après le calcul matriciel, nous aboutissons aux matrices suivantes :

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \frac{L_a - L_{s1}}{T_{s1}L_{s1}} & \boldsymbol{\omega}_s & \frac{L_a}{T_{s1}L_{s2}} & 0 & \frac{L_a}{T_{s1}L_s} & 0 \\ -\boldsymbol{\omega}_s & \frac{L_a - L_{s1}}{T_{s1}L_{s1}} & 0 & \frac{L_a}{T_{s2}L_{s1}} & 0 & \frac{L_a}{T_{s1}L_r} \\ \frac{L_a}{T_{s2}L_{s1}} & 0 & \frac{L_{s1} - L_{s2}}{T_{s2}L_{s2}} & \boldsymbol{\omega}_s & \frac{L_a}{T_{s2}L_r} & 0 \\ 0 & \frac{L_a}{T_{s2}L_{s1}} & -\boldsymbol{\omega}_s & \frac{L_a - L_{s2}}{T_{s2}L_{s2}} & 0 & \frac{L_a}{T_{s2}L_r} \\ \frac{L_a}{T_rL_{s1}} & 0 & \frac{L_a}{T_rL_{s2}} & 0 & \frac{L_a - L_r}{T_rL_r} & \boldsymbol{\omega}_{gl} \\ 0 & \frac{L_a}{T_rL_{s1}} & 0 & \frac{L_a}{T_rL_{s2}} & -\boldsymbol{\omega}_{gl} & \frac{L_a - L_r}{T_rL_r} \end{bmatrix} \quad (I.60)$$

La matrice A peut-être décomposée comme suit :

$$[\boldsymbol{A}] = [\boldsymbol{A}_{11}] + [\boldsymbol{A}_{12}]\boldsymbol{\omega}_s + [\boldsymbol{A}_{13}]\boldsymbol{\omega}_{gl} \quad (I.61)$$

$$\boldsymbol{U} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_{ds1} \\ \boldsymbol{v}_{qs1} \\ \boldsymbol{v}_{ds2} \\ \boldsymbol{v}_{qs2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad ; \quad \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (I.62)$$

Avec :

$T_{s1} = \frac{L_{s1}}{R_{s1}}$: Constante de temps statorique de la première étoile ;

$T_{s2} = \frac{L_{s2}}{R_{s2}}$: Constante de temps statorique de la deuxième étoile ;

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$: Constante de temps statorique.

$$[\boldsymbol{\Phi}] = [\boldsymbol{H}][\boldsymbol{I}] \tag{I.63}$$

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} L_{s1}+L_m & L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ L_m & L_{s1}+L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{s2}+L_m & L_m & 0 & L_m \\ 0 & 0 & L_m & L_{s2}+L_m & 0 & L_r+L_m \\ L_m & L_m & 0 & 0 & L_r+L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_m & L_m & 0 & L_r+L_m \end{bmatrix} \tag{I.64}$$

I.6.4.2. Simulation et interprétation des résultats

Après avoir décrit le modèle de la MASDE, un programme écrit sous l'environnement Matlab nous a permis de mettre en évidence le comportement de la machine pour la résolution du système différentiel, les paramètres de la machine sont donnés en annexe.

La MASDE est alimentée par des sources purement sinusoïdales et ´équilibrées, exprimées comme suit :

$$\textbf{Pour l'étoile 1} \quad : \begin{cases} v_{as1} = v_m . sin(\omega_s t) \\ v_{bs1} = v_m . sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{cs1} = v_m . sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \tag{I.65}$$

$$\textbf{Pour l'étoile 2} \quad : \begin{cases} v_{as2} = v_m . sin(\omega_s t - \alpha) \\ v_{bs2} = v_m . sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} - \alpha\right) \\ v_{cs2} = v_m . sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} - \alpha\right) \end{cases} \tag{I.66}$$

Avec : $v_m = \sqrt{2} v_{eff}$

La figure I.5 représente le schéma de simulation sous MATLAB.

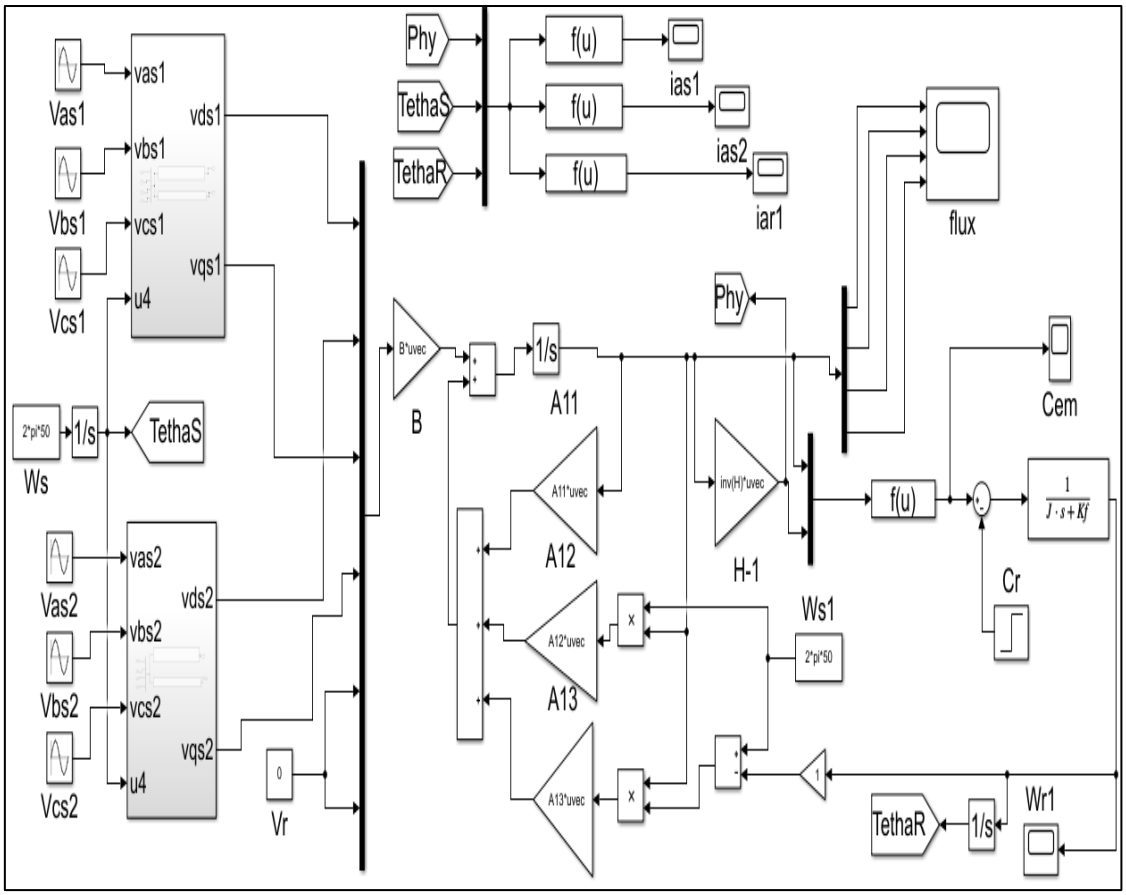

Fig. I- 5 : *Représente le schéma bloc de simulation de la MASDE.*

- **Résultat simulation :**

L'étude des performances de la machine alimentée directement par un réseau triphasé a été faite pour deux cas : à vide C_r=0[$N.m$] à t=[$0\ 3$][s] ; et en charge on applique un couple de charge : C_r=13[$N.m$] à t=[$3\ 4$] [s].

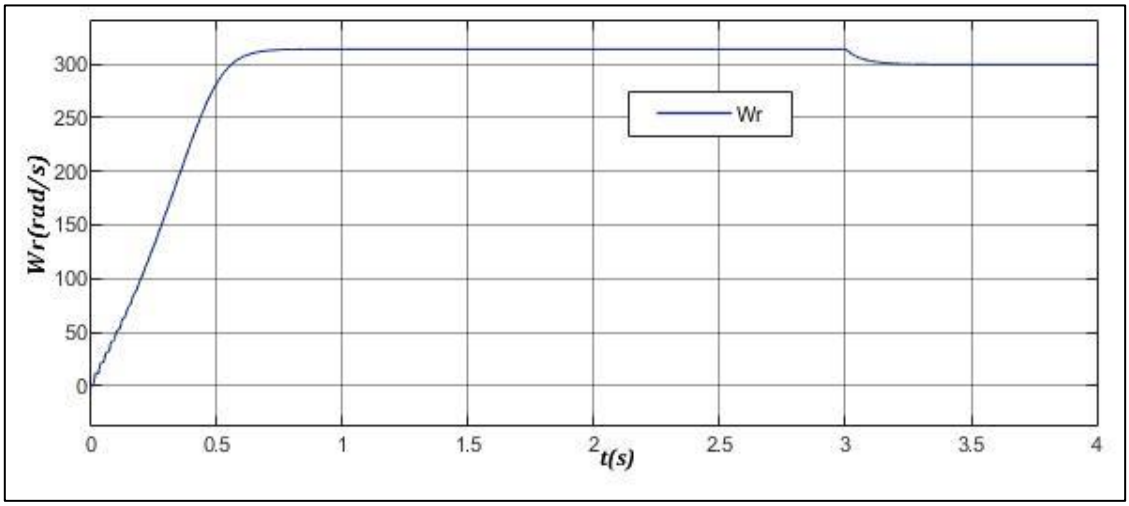

Fig. I- 6 : *La vitesse de rotation.*

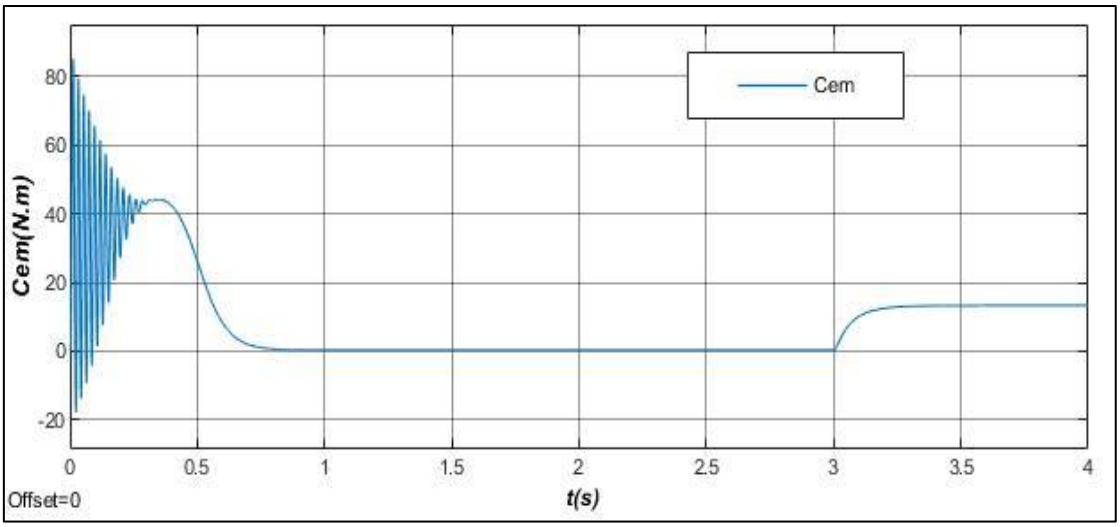

Fig. I- 7 : *Le couple électromagnétique.*

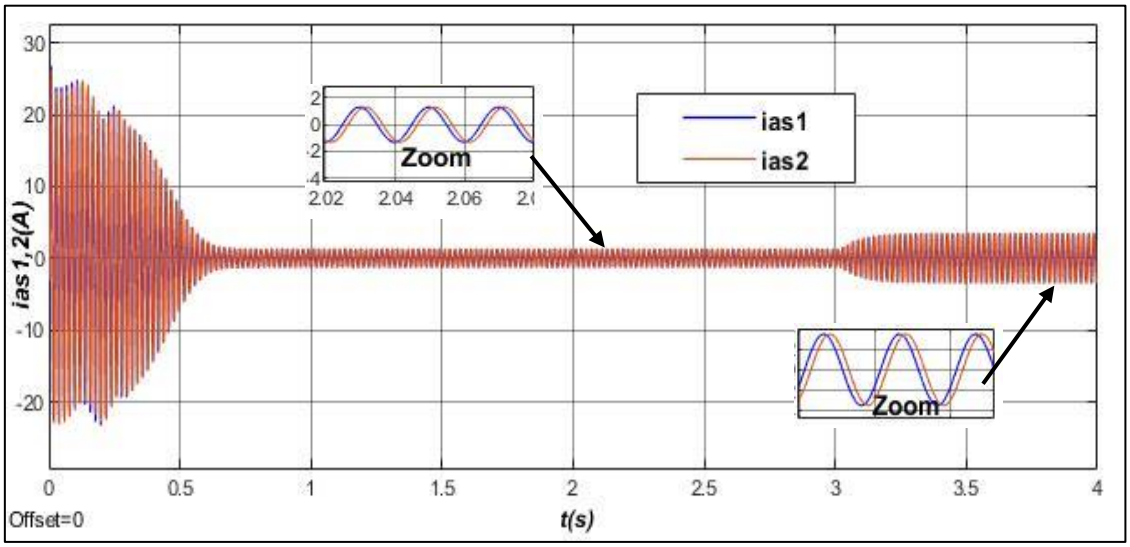

Fig. I- 8 : *Les courants statoriques réel.*

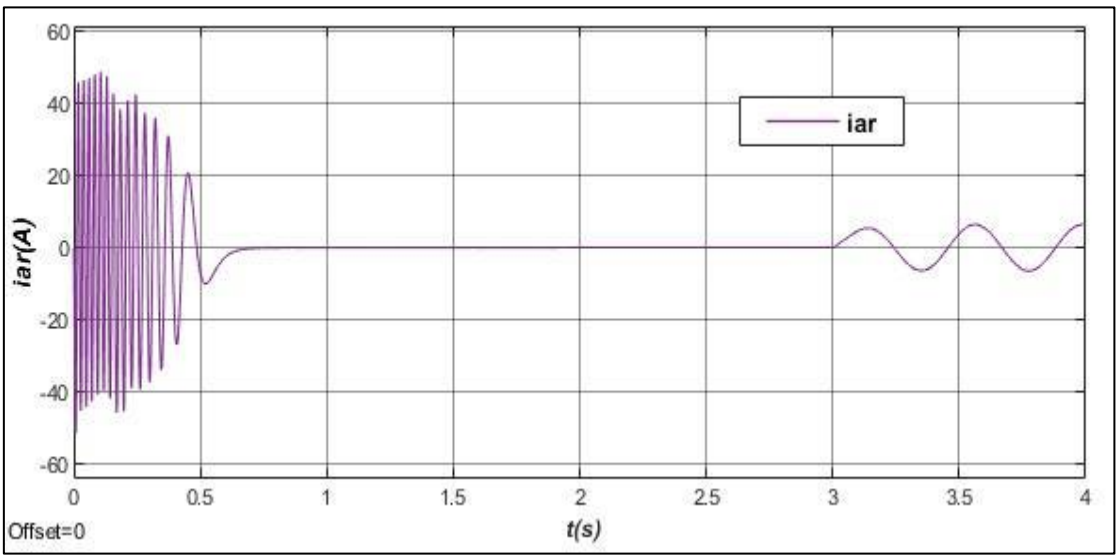

Fig. I- 9 : *Le courants rotoriques réel.*

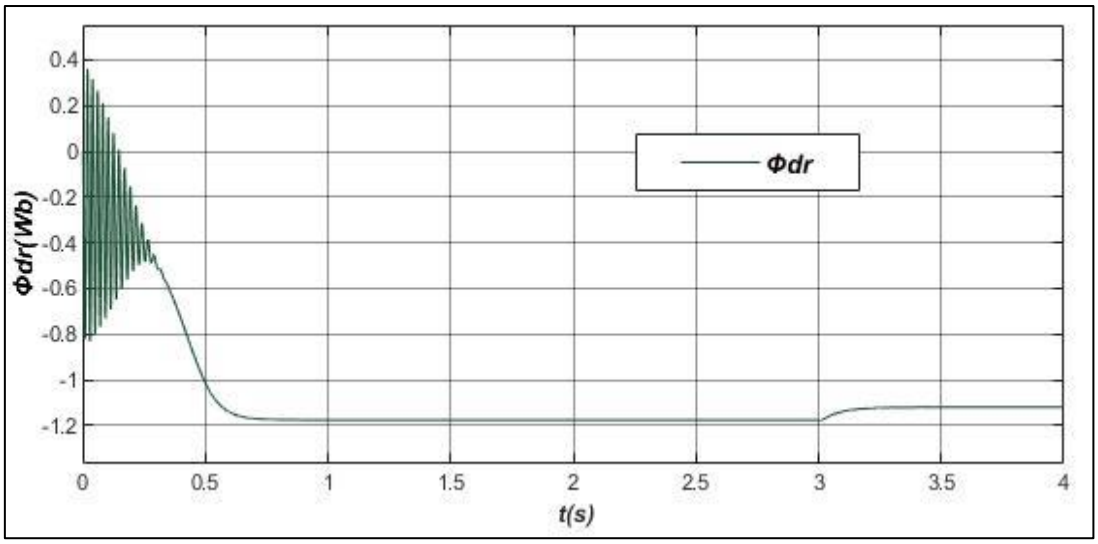

Fig. I- 10 : *Le flux rotorique direct Φ_{dr}.*

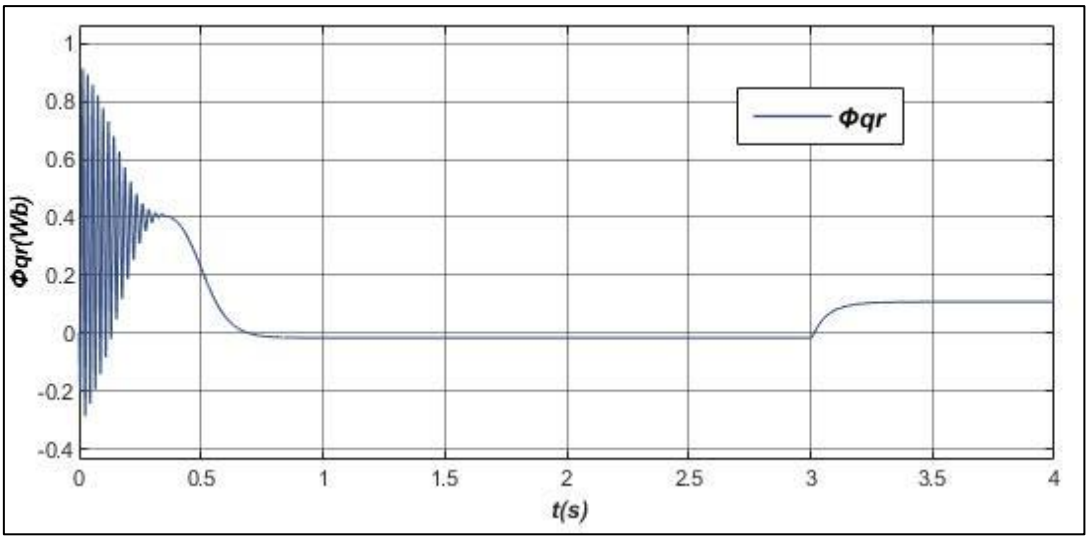

Fig. I- 11 : *Le flux rotorique en quadratique Φ_{qr}.*

- **Interprétations des résultats :**

Au démarrage et pendant le régime transitoire, la vitesse augmente et évolue d'une manière presque linéaire, et elle atteint *310 rad/s* (très proche de celle du synchronisme) à $t \approx 0,7s$ (début du régime permanent).

Le couple électromagnétique, au début atteint sa valeur maximale de *82N.m* et présente des oscillations qui disparaissent au bout de *0.4s* où il rejoint *45 N.m*, puis il diminue d'une façon presque linéaire et se stabile à sa valeur minimale de *0N.m*, qui est due aux frottements.

Les courants statoriques (étoiles i_{as1} et i_{as2}) présentent des dépassements excessifs induisant de fort appel de courant. Cependant, le glissement de la machine devient un peu plus important qu'à vide, la tension d'alimentation (V_{s1} (V)) et le courant statorique ($i_{as1}(A)$) sont presque en phase et de même signe.

L'application de la charge $C_r = 13\ N.m$ à l'instant $t = 3s$, engendre des augmentations aux niveaux, de la vitesse, des courants statoriques.

Les flux rotoriques direct et en quadrature est presque identique à celle du couple électromagnétique, passent par un régime transitoire oscillatoire et puis se stabilisent. Les flux rotoriques (Φ_{dr}) et (Φ_{qr}) se stabilisent respectivement à *-1,15 Wb* et à *-0.13 Wb*.

L'application de la charge $C_r = 13\ N.m$ à l'instant $t = 3s$, engendre des augmentations aux niveaux de la vitesse ainsi qu'aux courants statoriques.

I.7. Modélisation du convertisseur commandé en M.L.I

Le convertisseur statique assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une source alternative, qui peut être à fréquence fixe ou variable [11].

La figure I.3 présente un convertisseur triphasé pour un fonctionnement en mode onduleur, il est à noter que la modélisation reste la même dans le cas d'un fonctionnement en mode redresseur. Il est constitué de trois branches ou chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires ; chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélisé par deux états.

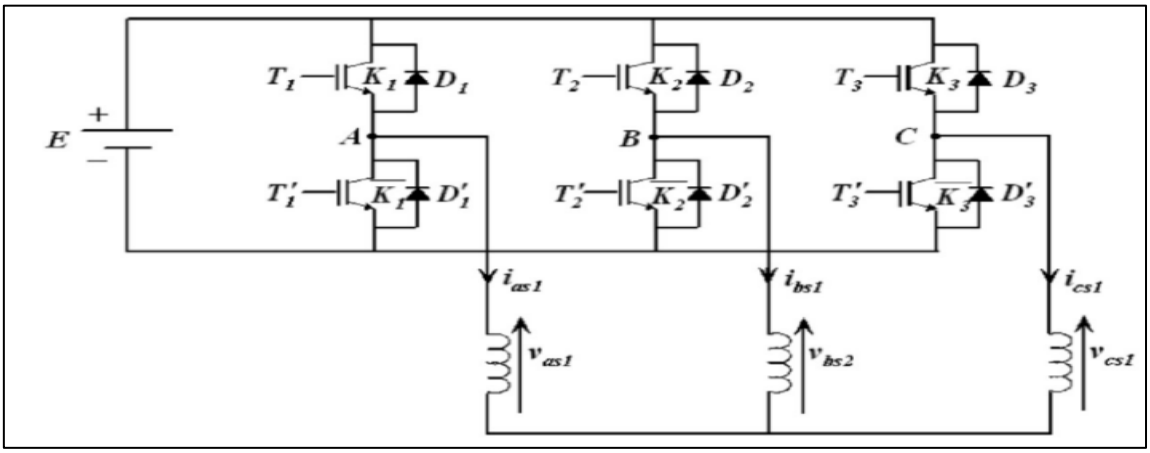

Fig. I- 12 : *Représente le schéma de l'onduleur triphasé.*

I.7.1. Stratégie de commande sinus-triangle

La modulation de largeur d'impulsion sinus triangle est réalisée par comparaison d'une bonde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, trois références sinusoïdale déphasées de 2π/3 à la même fréquence f. Comme la sortie de l'onduleur de tension n'est pas purement sinusoïdale, l'intensité de courant ne l'est pas aussi, donc elle comporte des harmoniques,

seuls responsables des parasites (pulsation de couple électromagnétique) ce qui engendre des pertes supplémentaires.

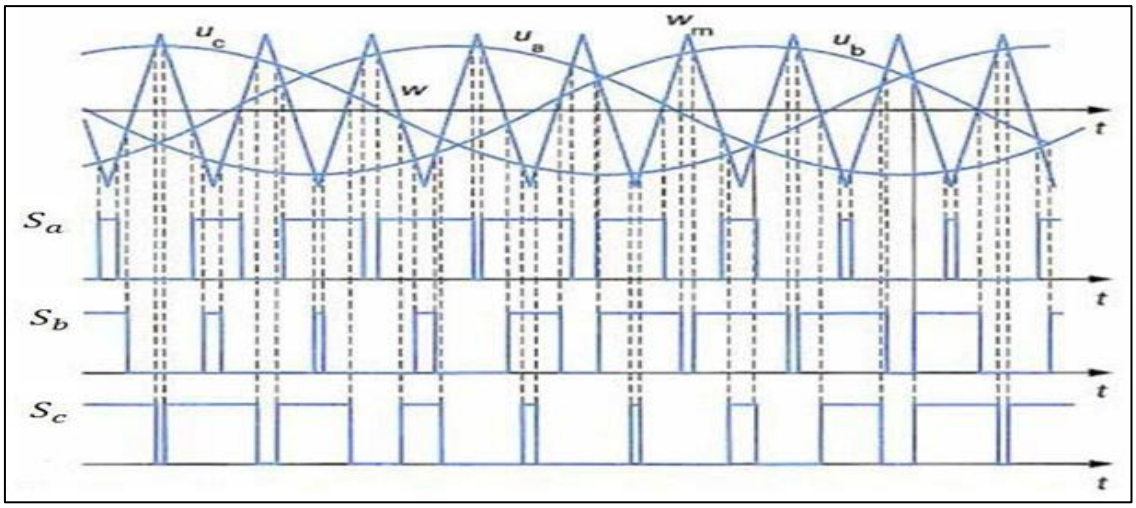

Fig. I- 13 : *Principe de la techniques Sinus-Triangle.*

Les six signaux des références pour les deux onduleurs sont donnés par les équations suivantes :

Pour le stator 1:
$$\begin{cases} V_{refas1} = V_m Sin(2\pi f t) \\ V_{refbs1} = V_m Sin(2\pi f t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{refcs1} = V_m Sin(2\pi f t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{(I.73)}$$

Pour le stator 2 :
$$\begin{cases} V_{refas2} = V_m Sin(2\pi f t - \alpha) \\ V_{refbs2} = V_m Sin(2\pi f t - \alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{refcs2} = V_m Sin(2\pi f t - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{(I.73)}$$

L'équation de la porteuse triangulaire est exprimée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm}\left[4\frac{t}{T_p} - 1\right] si\ 0 \le t \le \frac{T_p}{2} \\ V_{pm}\left[-4\frac{t}{T_p} + 3\right] si\ \frac{T_p}{2} \le t \le T_p \end{cases} \quad \text{(I.73)}$$

Ou : T_p: période de la porteuse (en seconde),

V_m : Amplitude de la tension de référence (en volt),

V_{pm}: Valeur crête de l'onde de modulation (en volte),

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants : L'indice de modulation m représente le rapport de la fréquence de modulation f_p sur la fréquence de référence f. Le

coefficient de réglage en tension r représente le rapport de l'amplitude de la tension de référence V_m à la valeur crête de l'onde de modulation V_{pm}.

I.7.2. Résultat et interprétation de simulation

La figure I.14 représente le schéma de simulation sous MATLAB.

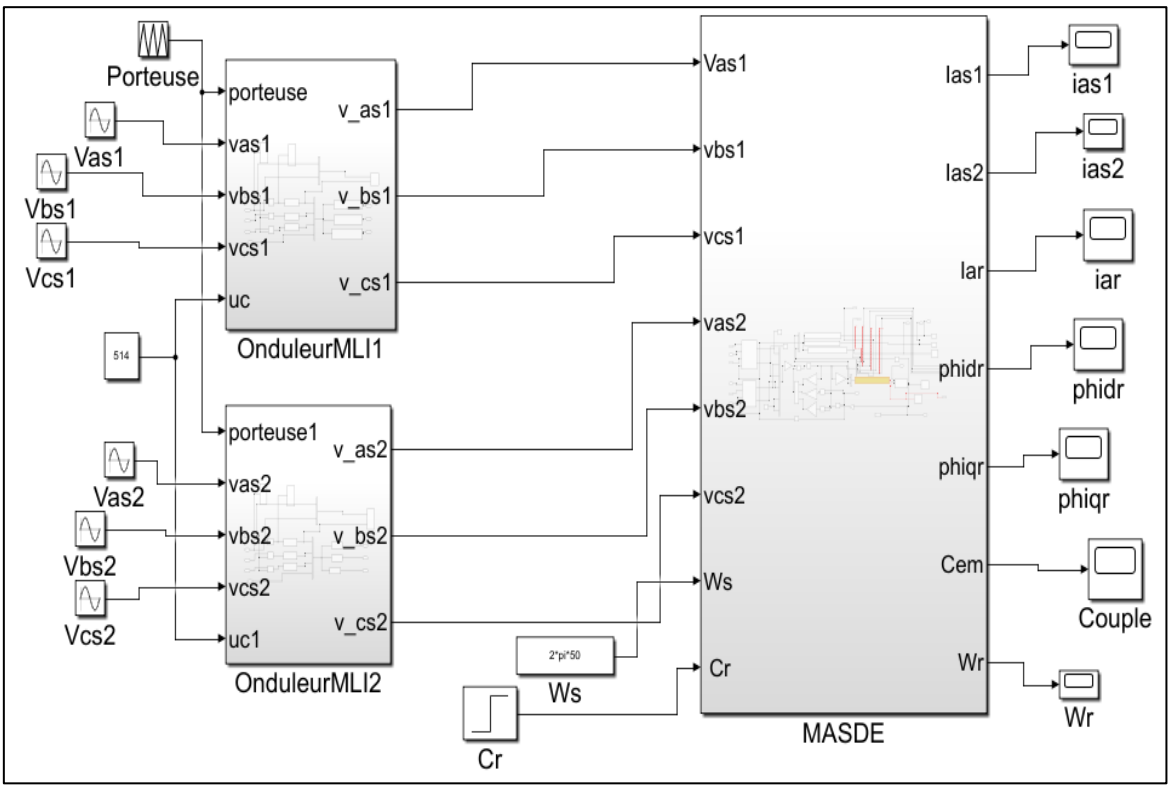

Fig. I- 14 : *Représente MASDE-Onduleur MLI.*

Performances de la conduite de la machine asynchrone triphasée à double étoile alimentée par deux onduleurs de tension a commande MLI. sinus-triangle lors d'une application d'un couple résistant $C_r=13N.m$ à l'instant $t=3s$.

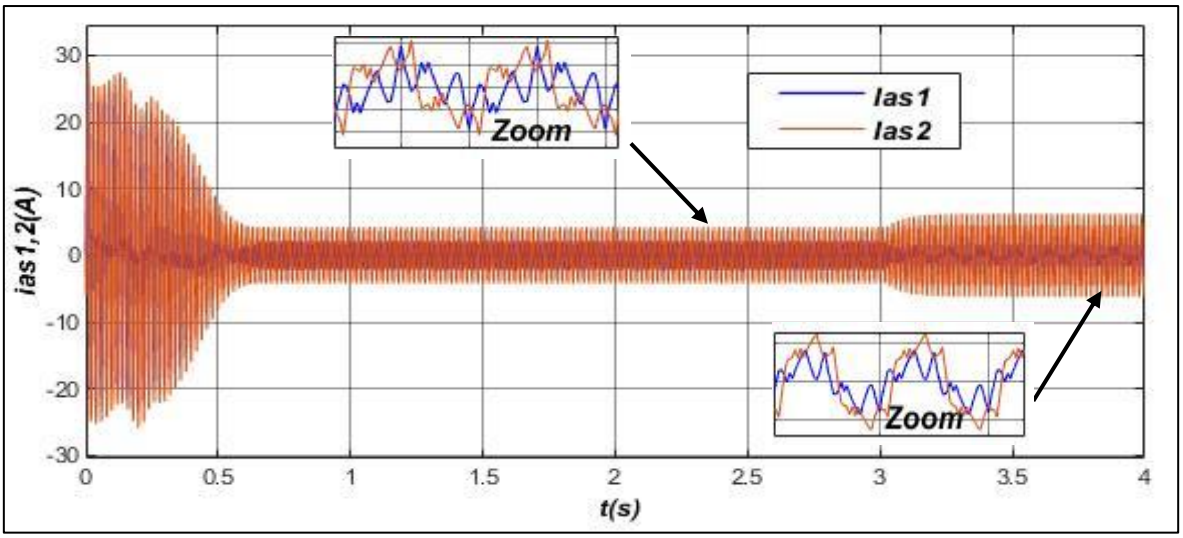

Fig. I- 15 : *Les courants statoriques réel.*

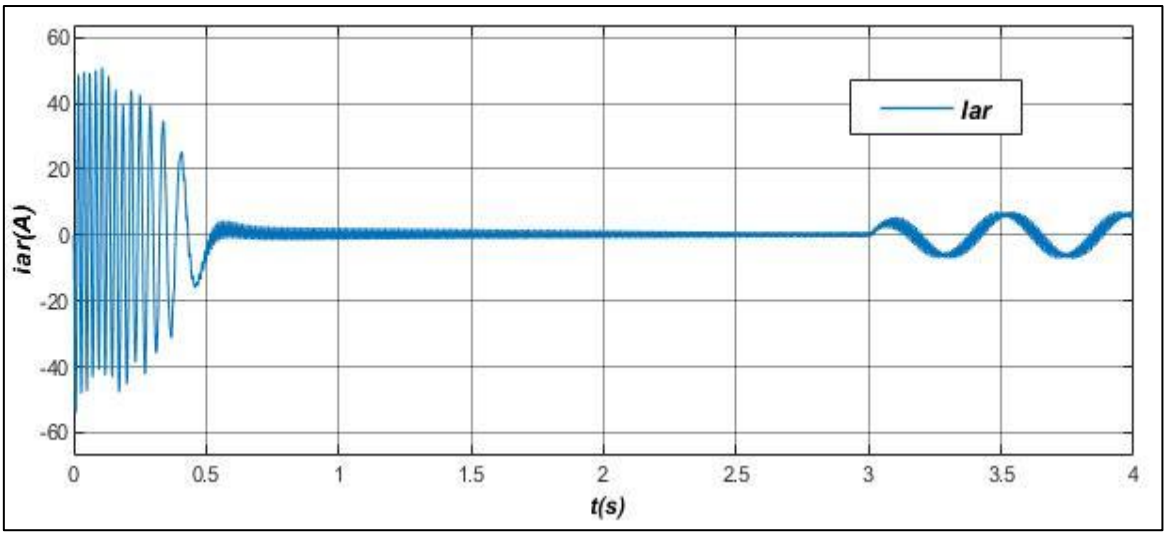

Fig. I- 16 : *Le courant rotorique réel.*

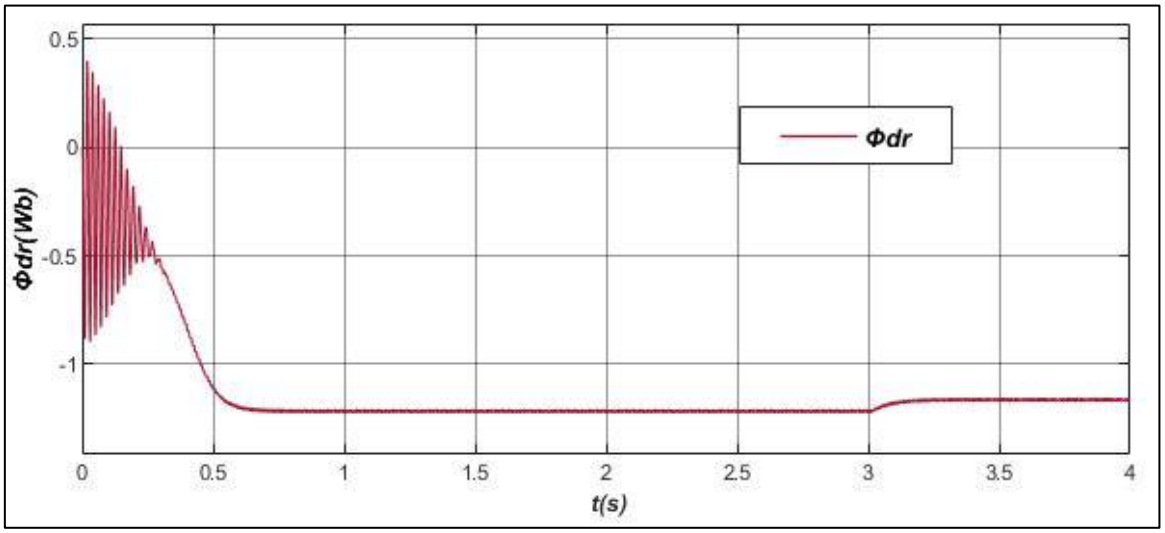

Fig. I- 17 : *Le flux rotorique direct* Φ_{dr}.

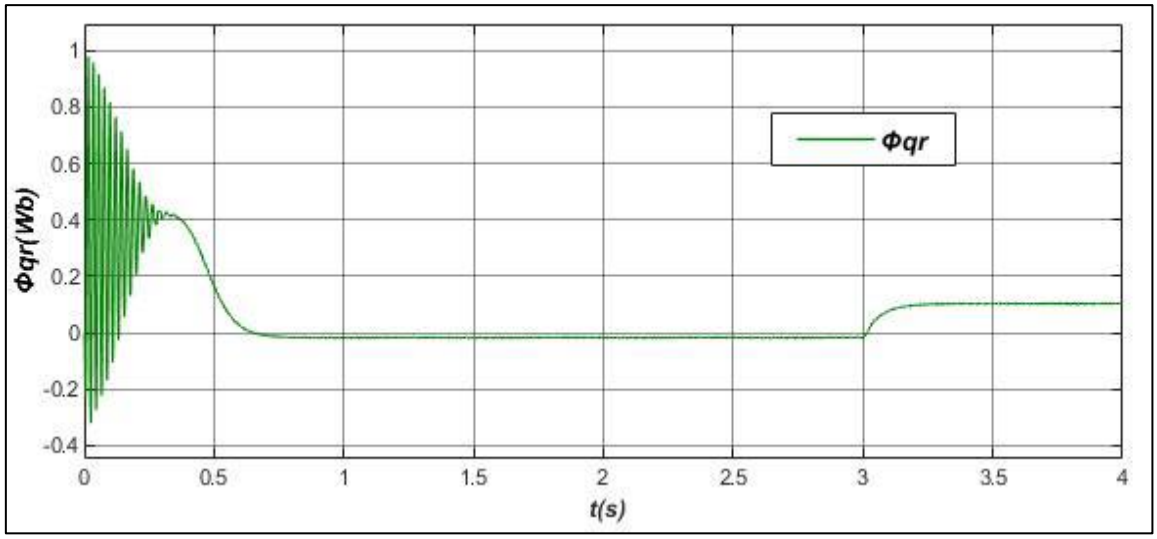

Fig. I- 18 : *Le flux rotorique quadratique* Φ_{qr}.

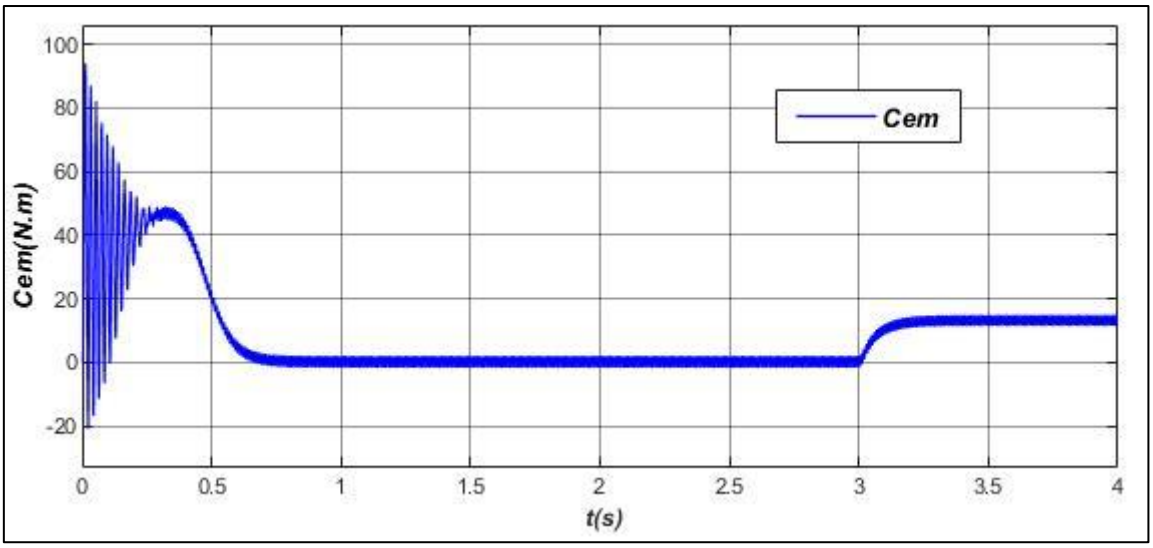

Fig. I- 19 : *Le couple électromagnétique.*

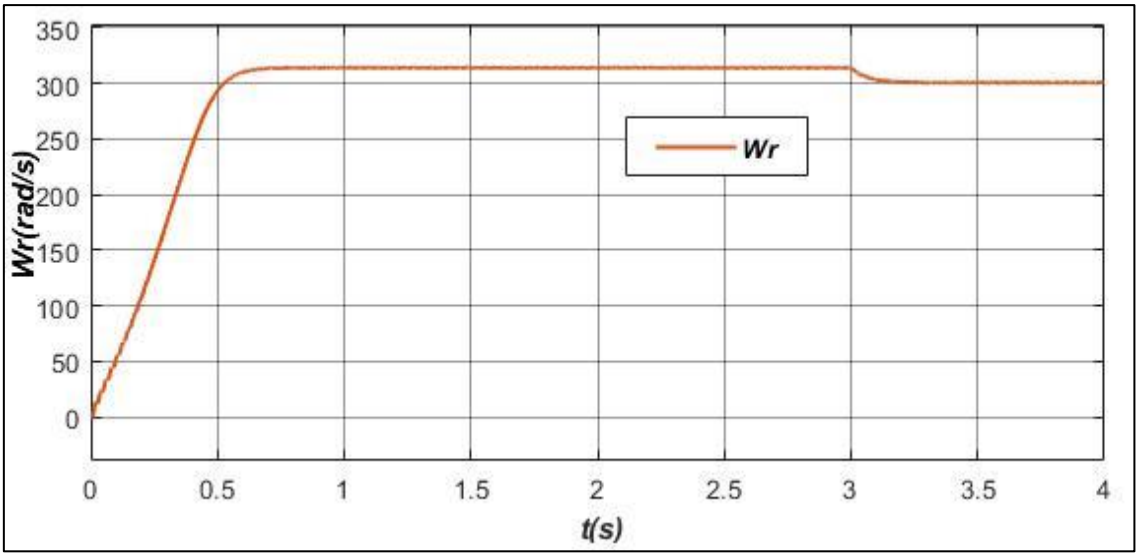

Fig. I- 20 : *La vitesse de rotation.*

- **Interprétations des résultats :**

Les résultats obtenus de simulation sont presque identiques aux résultats obtenus par l'alimentation directe. Cependant, ces allures et en particulier celles, des courants statoriques (1 et 2), du couple électromagnétique, des courants des axes i_{ds1} et i_{qs1} et des flux rotoriques Φ_{dr} et Φ_{qr}. Montrent que cette alimentation engendre une augmentation des ondulations dues principalement aux harmoniques délivrés par les onduleurs, qui se répercutent essentiellement sur le couple électromagnétique.

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone triphasée à double étoile en mode moteur. Cette modélisation nous a permis d'établir un modèle

mathématique de cette machine dont la complexité a été réduite moyennant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Ainsi, nous avons utilisé la transformation de Park et le système d'équation d'état de la machine que nous avons validée à travers une simulation numérique.

Le processus de démarrage du moteur, suivi par une application d'une charge a été simulé par le logiciel MATLAB/SIMULINK. Puis on présence de deux onduleurs de tension à deux niveaux commandés par la stratégie de MLI qui a été présentée. Les résultats de simulation à vide et en charge permis de déterminer et d'analyser les différentes caractéristiques de la vitesse, du couple, du flux et les courants, dont ils montrent bien le fort couplage existant entre le couple et le flux et cela nécessite un réglage de la vitesse du rotor indépendamment de la charge appliquée.

CHAPITRE II

COMMANDE VECTORIELLE DE LA MASDE

II.1. Introduction

La difficulté pour commander une machine asynchrone réside dans le fait qu'il existe un couplage complexe entre les variables d'entrée, les variables de sortie et les variables internes de la machine comme le flux, le couple et la vitesse ou la position.

Blaschke a proposé en 1972 une méthode, dite « commande vectorielle », permettant d'obtenir une situation pour la machine asynchrone équivalente à celle de la machine à courant continu à excitation séparée. Le vecteur courant statorique est décomposé en deux composantes, l'une contrôle le flux et l'autre contrôle le couple.

Dans ce chapitre, nous allons appliquer la commande vectorielle indirecte par Orientation du flux rotorique sur la MASDE. Cependant, nous présentons au premier lieu l'étude du Principe et les différentes méthodes de la commande vectorielle, nous donnons ensuite l'application de ces dernières sur la MASDE, et enfin commenter les performances apportées par ce type de réglage après l'obtention et l'illustration des résultats de simulation.

II.2. Principe de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle (ou commande par flux orienté) consiste à orienter une des composantes de flux statoriques, rotorique ou de l'entrefer sur un axe du référentiel tournant à la vitesse ωs Figure (II.1). Ce principe de commande d´écoulée, conditionnant le fonctionnement stable du moteur asynchrone est la principale caractéristique de la commande vectorielle conduisant aux hautes performances industrielles des entraînements asynchrones (machine de papeterie, laminoirs, traction ´électrique etc.) supportant les perturbations de la charge [12].

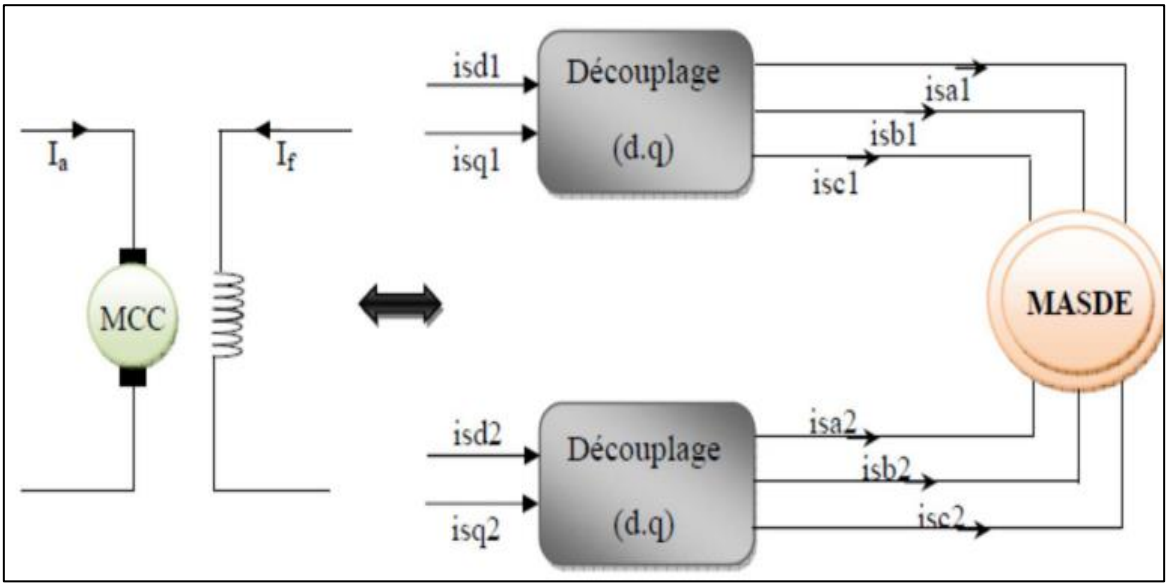

Fig. II- 1 : *Principe de la commande vectorielle.*

Le but de cette commande est d'assimiler le comportement de la machine asynchrone double étoile à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée (équation (II.1)).

Le but de cette commande en deux aspects :

- Le couple et le flux de la machine sont contrôlés indépendamment l'un de l'autre.
- Les conditions optimales de production du couple sont assurées en régime permanente en régime transitoire.

En effet, dans une machine à courant continu le courant d'induit (I_a) contrôle le couple et le courant inducteur (I_f) contrôle le flux.

Pour la machine asynchrone à double étoile, la commande vectorielle consiste à réaliser un découplage des grandeurs génératrices du couple électromagnétique et du flux rotorique. Pour Cela, il faut choisir une loi de commande et un système d'axes assurant le découplage flux et du couple.

L'expression du couple ´électromagnétique de la Mcc est donné par :

$$\boldsymbol{C_{em} = K\Phi I_a = K' I_a I_f} \qquad \text{(II.1)}$$

Avec :

Φ: flux impose par le courant d'excitation

I_f. I_a : courant d induit.

K, K' : constantes.

II.3. Procède d'orientation du flux

Il existe trois types d'orientation du flux :

Orientation du flux rotorique avec les conditions $\boldsymbol{\Phi_{dr} = \Phi_r \quad \Phi_{qr} = 0}$. (II.2)

Orientation du flux statorique avec les conditions $\boldsymbol{\Phi_{ds} = \Phi_s \quad \Phi_{qs} = 0}$. (II.3)

Orientation du flux d'entrefer avec les conditions $\boldsymbol{\Phi_{dm} = \Phi_m \quad \Phi_{qm} = 0}$. (II.4)

Beaucoup de chercheurs utilisent l'orientation du flux rotorique pour la commande de la machine électrique.

Dans notre étude, nous avons opté pour la technique d'orientation du flux rotorique. Pour la machine asynchrone double étoile, la commande vectorielle consiste à réaliser un découplage des grandeurs génératrices du couple électromagnétique et du flux rotorique. Dans l'expression du couple électromagnétique de la MASDE, si on coïncide le flux rotorique avec l'axe (d) du référentiel lié au champ tournant, c'est à dire :

$$\boldsymbol{\Phi_{dr} = \Phi_r \quad ; \quad \Phi_{qr} = 0}.$$

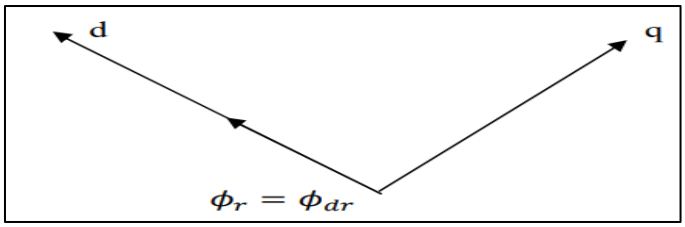

Fig. II- 2 : *Orientation du flux rotorique sur l'axe d.*

On aura la forme du couple électromagnétique suivante :

$$C_{em} = p\frac{L_m}{L_m+L_r}\left(\Phi_{dr}(i_{qs1}+i_{qs2})\right) - \left(\Phi_{qr}(i_{ds1}+i_{ds2})\right) \quad \text{(II.5)}$$

L'équation (2.2) dévient :

$$C_{em} = p\frac{L_m}{L_m+L_r}\Phi_{dr}(i_{qs1}+i_{qs2}) = K\Phi_{dr}(i_{qs1}+i_{qs2}) \quad \text{(II.6)}$$

Avec : $K = p\frac{L_m}{L_m+L_r}$

D'après l'équation (2.3) nous constatons que le couple électromagnétique résulte de l'interaction d'un terme de flux et d'un terme de courant.

Cette expression rappelle le couple de la machine à courant continu à excitation séparée. On déduit donc que le fonctionnement de la machine asynchrone double étoile, avec sa commande vectorielle est similaire à celui de la machine à courant continu à excitation séparée.

II.4. Méthodes de la commande vectorielle

Pour maintenir la condition de la commande, il est nécessaire de connaitre à chaque instant la position du flux à orienter afin d'effectuer le changement de coordonnées qui annulera sa composante en quadrature. Du on distinguera deux méthodes de contrôle du flux, directe et indirecte :

II.4.1. Méthode de commande directe

Cette méthode nécessite une bonne connaissance du module du flux et de sa phase celle-ci doit être vérifiée quel que soit le régime de fonctionnement. Deux méthodes sont utilisées pour cela :

- Mesuré directement en plaçant une spire sous un pôle de chaque phase. Mais, la fragilité et les problèmes de fiabilité limitent sa mise en œuvre.
- Estimé et reconstitué à partir des équations de machine et de la mesure des tensions et des courants statorique.

II.4.2. Méthode de commande indirecte

Cette méthode n'utilise pas l'amplitude du flux de rotor mais seulement sa position, elle n'exige pas l'utilisation d'un capteur de flux rotorique mais nécessite l'utilisation d'un capteur ou un estimateur de position (vitesse) du rotor [13].

L'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité de l'estimation envers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de la température, surtout la constante de temps rotorique [13].

II.5. Commande vectorielle indirecte sans réglage de vitesse

Les lois de commande sont obtenues à partir des équations de la MASDE liées au champ tournant et par orientation du flux rotorique [10]. La figure suivante représente le schéma bloc simplifié de la commande à flux orienté.

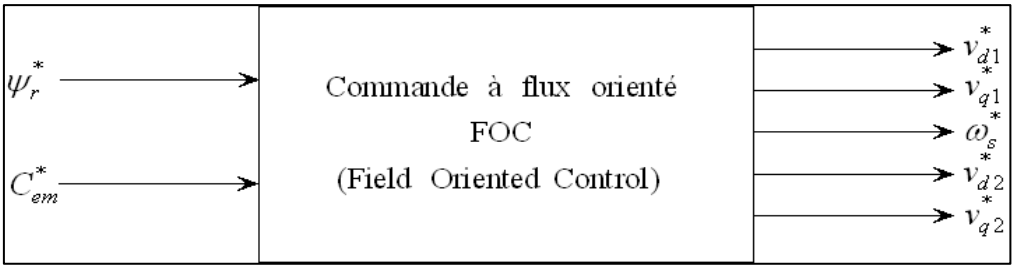

Fig. II- 3 : *Schéma bloc simplifié de la commande à flux orienté (FOC).*

En considérant comme grandeur de référence le flux rotorique Φ_r^* et le couple C_{em}^* , et en exprimant que :

$$\boldsymbol{\Phi_{dr} = \Phi_r^*} \tag{II.7}$$

$$\boldsymbol{\Phi_{qr} = 0} \tag{II.8}$$

$$\boldsymbol{p\Phi_r^* = 0} \tag{II.9}$$

Avec : $p = \frac{d}{dt}$ operateur de la place.

En remplaçant (II.7) (II.9) dans les équations des tensions rotorique (I.47), on obtient [14] :

$$\boldsymbol{R_r i_{dr} = 0 \Rightarrow i_{dr} = 0} \tag{II.10}$$

$$\boldsymbol{R_r i_{qr} + \omega_{gl}^* \Phi_r^* = 0 \Rightarrow i_{qr} = -\frac{\omega_{gl}^* \Phi_r^*}{R_r}} \tag{II.11}$$

Et à partir des équations (I.56), on trouve :

$$\boldsymbol{i_{dr}} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{L_m+L_r}}[\boldsymbol{\Phi_r^*} - \boldsymbol{L_m}(\boldsymbol{i_{ds1}} + \boldsymbol{i_{ds2}})] \tag{II.12}$$

$$\boldsymbol{i_{qr}} = -\frac{\boldsymbol{L_m}}{\boldsymbol{L_m+L_r}}\left(\boldsymbol{i_{qs1}} + \boldsymbol{i_{qs2}}\right) \tag{II.13}$$

En introduisant (II.12) (II.13) dans le système d'équation des flux statorique (I.38), on aura [15] :

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Phi_{ds1}} = \boldsymbol{\lambda_1 i_{ds1}} + \boldsymbol{L_r \eta i_{ds2}} + \boldsymbol{\eta \Phi_r^*} \\ \boldsymbol{\Phi_{qs1}} = \boldsymbol{\lambda_1 i_{qs1}} + \boldsymbol{L_r \eta i_{qs2}} \\ \boldsymbol{\Phi_{ds2}} = \boldsymbol{\lambda_2 i_{ds2}} + \boldsymbol{L_r \eta i_{ds1}} + \boldsymbol{\eta \Phi_r^*} \\ \boldsymbol{\Phi_{qs2}} = \boldsymbol{\lambda_2 i_{qs2}} + \boldsymbol{L_r \eta i_{qs1}} \end{cases} \tag{II.14}$$

Avec :

$$\boldsymbol{\eta} = \frac{\boldsymbol{L_m}}{\boldsymbol{L_m+L_r}} \quad ; \qquad \boldsymbol{\lambda_{1,2}} = \boldsymbol{L_{s\,1,2}} + \boldsymbol{\eta L_r}$$

En introduisant (II.10) dans (II.12), on tire :

$$\boldsymbol{\Phi_r^*} = \boldsymbol{L_m}(\boldsymbol{i_{ds1}} + \boldsymbol{i_{ds2}}) \tag{II.15}$$

A partir du système d'équation (II.13), on trouve :

$$\boldsymbol{L_m}\left(\boldsymbol{i_{qs1}} + \boldsymbol{i_{qs2}}\right) = -(\boldsymbol{L_m} + \boldsymbol{L_r})\boldsymbol{i_{qr}} \tag{II.16}$$

En remplaçant (II.14) et (II.16) dans le système d'équations des tensions statoriques, on obtient :

$$\begin{cases} \boldsymbol{v_{ds1}^*} = \boldsymbol{R_{s1} i_{ds1}} + \boldsymbol{L_{s1} p i_{ds1}} - \boldsymbol{w_s^*}(\boldsymbol{L_{s1} i_{qs1}} + \boldsymbol{T_r \Phi_r^* \omega_{gl}^*}) \\ \boldsymbol{v_{qs1}^*} = \boldsymbol{R_{s1} i_{qs1}} + \boldsymbol{L_{s1} p i_{qs1}} + \boldsymbol{\omega_s^*}(\boldsymbol{L_{s1} i_{ds1}} + \boldsymbol{\Phi_r^*}) \\ \boldsymbol{v_{ds2}^*} = \boldsymbol{R_{s2} i_{ds2}} + \boldsymbol{L_{s2} p i_{ds2}} - \boldsymbol{\omega_s^*}\left(\boldsymbol{L_{s2} i_{qs2}} + \boldsymbol{T_r \Phi_r^* \omega_{gl}^*}\right) \\ \boldsymbol{v_{qs2}^*} = \boldsymbol{R_{s2} i_{qs2}} + \boldsymbol{L_{s2} p i_{qs2}} + \boldsymbol{\omega_s^*}(\boldsymbol{L_{s2} i_{ds2}} + \boldsymbol{\Phi_r^*}) \end{cases} \tag{II.17}$$

Avec :

$$\boldsymbol{T_r} = \frac{\boldsymbol{L_r}}{\boldsymbol{R_r}} \quad ; \quad \boldsymbol{\omega_{gl}^*} = \boldsymbol{\omega_s^*} - \boldsymbol{\omega_r}$$

En introduisant l'équation (II.13) dans (II.11), on tire :

$$\boldsymbol{\omega_{gl}^*} = \frac{\boldsymbol{R_r L_m}}{\boldsymbol{L_m+L_r}} \frac{\left(\boldsymbol{i_{qs1}+i_{qs2}}\right)}{\boldsymbol{\Phi_r^*}} \tag{II.18}$$

A partir de la relation finale du couple électromagnétique (II.1) on tire :

$$\boldsymbol{i_{qs1} + i_{qs2} = \frac{(L_m+L_r)}{PL_m}\frac{C_{em}^*}{\Phi_r^*}} \tag{II.19}$$

Le système d'équation électrique (II.17) montre que les tensions (v_{ds1}^*,v_{qs1}^*,v_{ds2}^* et v_{qs2}^*) influent aux même temps sur les composantes des courants statorique directes et en quadratique (i_{ds1}^*,i_{qs1}^*,i_{ds2}^* et i_{qs2}^*) donc sur le flux et sur le couple. Il est alors nécessaire de réaliser un découplage. Cela, en définissant de nouvelle variable ($v_{ds1r}, v_{qs1r}, v_{ds2r}$ et v_{qs2r}) n'agissant respectivement que sur ($i_{ds1}, i_{qs1}, i_{ds2}$ et i_{qs2}), tels que :

$$\begin{cases} \boldsymbol{v_{ds1r} = R_{s1}i_{ds1} + L_{s1}pi_{ds1}} \\ \boldsymbol{v_{qs1r} = R_{s1}i_{qs1} + L_{s1}pi_{qs1}} \\ \boldsymbol{v_{ds2r} = R_{s2}i_{ds2} + L_{s2}pi_{ds2}} \\ \boldsymbol{v_{qs2r} = R_{s2}i_{qs2} + L_{s2}pi_{qs2}} \end{cases} \tag{II.20}$$

Afin de compenser l'erreur introduite lors de découplage, les tensions statorique de référence à flux constant sont exprimées par :

$$\begin{cases} \boldsymbol{v_{ds1}^* = v_{ds1r} - v_{ds1c}} \\ \boldsymbol{v_{qs1}^* = v_{qs1r} - v_{qs1c}} \\ \boldsymbol{v_{ds2}^* = v_{ds2r} - v_{ds2c}} \\ \boldsymbol{v_{qs2}^* = v_{qs2r} - v_{qs2c}} \end{cases} \tag{II.21}$$

Où :

$$\begin{cases} \boldsymbol{v_{ds1c} = \omega_s^*(L_{s1}i_{qs1} - T_r\Phi_r^*\omega_{gl}^*)} \\ \boldsymbol{v_{qs1c} = \omega_s^*(L_{s1}i_{qs1} - \Phi_r^*)} \\ \boldsymbol{v_{ds2c} = \omega_s^*(L_{s2}i_{qs2} - T_r\Phi_r^*\omega_{gl}^*)} \\ \boldsymbol{v_{qs2c} = \omega_s^*(L_{s2}i_{ds2} - \Phi_r^*)} \end{cases} \tag{II.22}$$

II.5.1. Identification des paramètres des régulateurs PI

Le but d'utilisation des régulateurs est d'assurer des meilleures performances dynamiques et statiques, ainsi qu'une certaines robustesses vis-à-vis les perturbations internes ou externes.

L'identification des paramètres des régulateurs PI des systèmes dont la fonction de transfert est du premier ordre, telle que :

$$\boldsymbol{H(p) = \frac{1}{ap+b}} \tag{II.23}$$

La fonction de transfert d'un régulateur PI se fait d'une manière générale comme suit :

$$\boldsymbol{C(p) = K_p + \frac{K_i}{p}} \tag{II.24}$$

Le schéma représentatif de la boucle de régulation d'un système asservi du premier ordre à retour unitaire régulé par un PI est donné par la figure II-4.

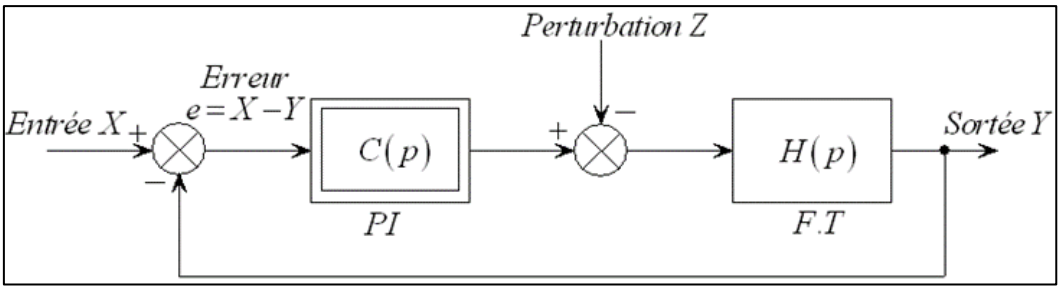

Fig. II- 4 : *Schéma d'un système asservi du premier ordre régulé par un PI.*

La perturbation est négligée dans les étapes d'identification des paramètres des régulateurs. La fonction de transfert en boucle ouverte du système asservi est :

$$\boldsymbol{T(p) = C(p)H(P) = \frac{K_p p + K_i}{ap^2 + bp}} \qquad \text{(II.25)}$$

En boucle fermée, on obtient :

$$\mathbf{F}(\boldsymbol{p}) = \frac{\boldsymbol{T(p)}}{\boldsymbol{1+T(p)}} = \frac{\boldsymbol{K_p p + K_i}}{\boldsymbol{ap^2 + (b+K_p)p + K_i}} \qquad \text{(II.26)}$$

Afin d'avoir un comportement d'un système du premier ordre dont fa fonction de transfert est de la forme :

$$\boldsymbol{G(p) = \frac{1}{\tau p + 1}} \qquad \text{(II.27)}$$

Il suffit d'identifier (II.26) (II.27) comme suit :

$$\frac{\boldsymbol{K_p p + K_i}}{\boldsymbol{ap^2 + (b+K_p)p + K_i}} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{\tau p + 1}} \qquad \text{(II.28)}$$

Ce qui donne :

$$\boldsymbol{K_p \tau p^2 + (K_i \tau + K_p)p + K_i = ap^2 + (b + K_p)p + K_i} \qquad \text{(II.29)}$$

D'où :

$$\begin{cases} \boldsymbol{K_p = \frac{a}{\tau}} \\ \boldsymbol{K_i = \frac{b}{\tau}} \end{cases} \qquad \text{(II.30)}$$

La figure (II-5) représente un schéma de la boucle de régulation des courants statorique étoile (1 et 2) :

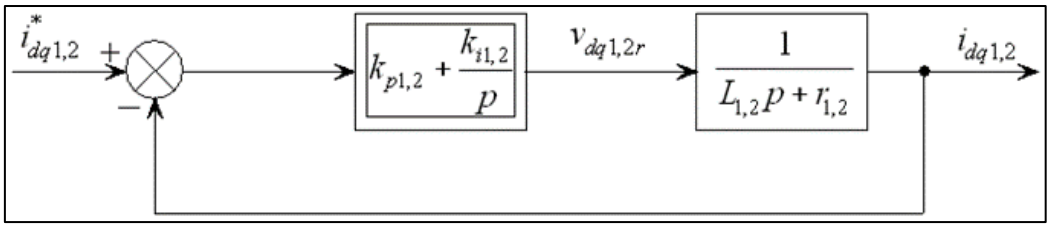

Fig. II- 5 : *Schéma de la boucle de régulation des courants statorique.*

Avec :

$$\begin{cases} \boldsymbol{K_{p1} = L_1/\tau} \\ \boldsymbol{K_{i1} = r_1/\tau} \end{cases} \text{ et } \begin{cases} \boldsymbol{K_{p2} = L_2/\tau} \\ \boldsymbol{K_{i2} = r_2/\tau} \end{cases} \tag{II.31}$$

On prend $\tau = \frac{T_r}{6}$ pour avoir une dynamique du processus rapide avec $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ est la constante de temps électrique (rotorique) du système.

II.5.2. Application de la commande indirecte sur la MASDE

L'application de la commande vectorielle indirecte sans le réglage de vitesse sur la MASDE est illustrée par la figure suivante :

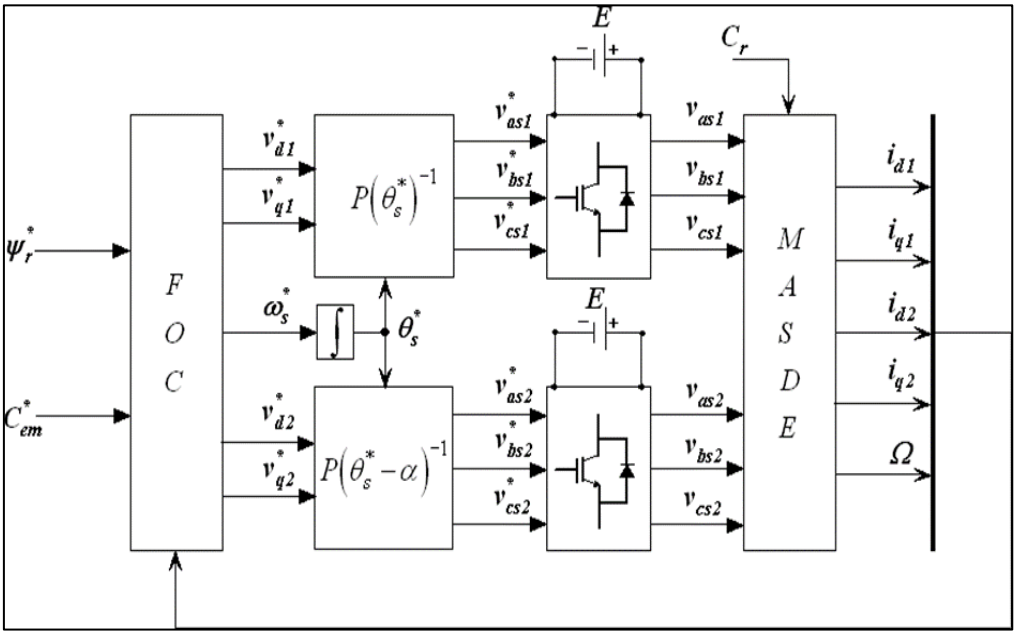

Fig. II- 6 : *Représentation schématique de la commande FOC sur la MASDE.*

Le schéma du bloc de découplage FOC est représenté par la figure II.4, sachant que $i^*{}_{d1} = i^*{}_{d2}$ et $i^*{}_{q1} = i^*{}_{q2}$

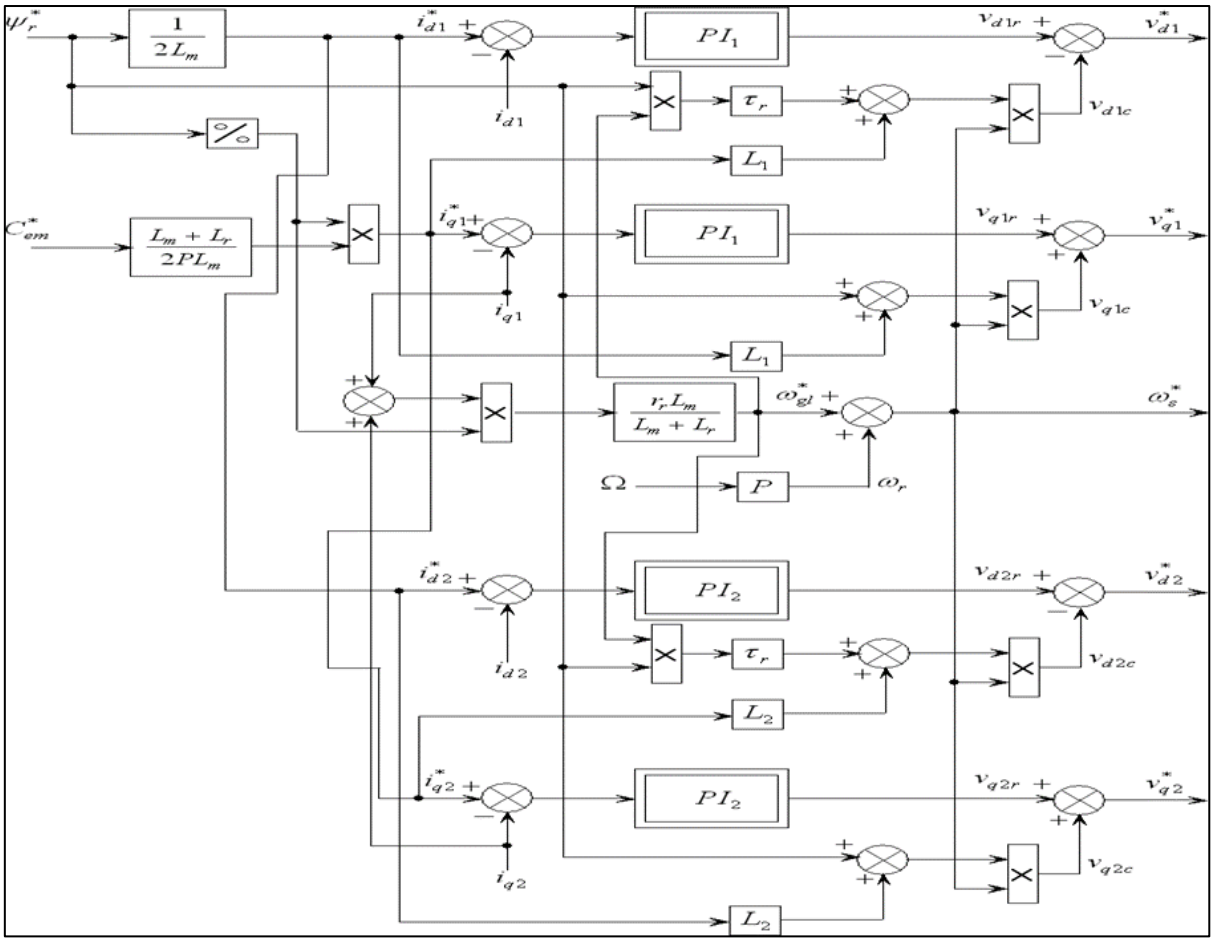

Fig. II- 7 : *Représentation schématique du bloc de découplage FOC.*

II.6. Commande vectorielle indirecte avec régulation de vitesse

Le principe de cette méthode, consiste à déterminer directement la composante du flux rotorique à partir de la vitesse mécanique de rotation du rotor en utilisant un capteur de vitesse, cela réalisable par un bloc de défluxage définit par la fonction non linéaire suivante :

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varphi_r^*} = \boldsymbol{\varphi_n} & \boldsymbol{si} \quad |\Omega| \leq \Omega_{\boldsymbol{n}} \\ \boldsymbol{\varphi_r^*} = \frac{\boldsymbol{\varphi_n}\Omega_{\boldsymbol{n}}}{|\Omega|} & \boldsymbol{si} \quad |\Omega| > \Omega_{\boldsymbol{n}} \end{cases} \tag{II.32}$$

Et schématisé par la figure (II-8) :

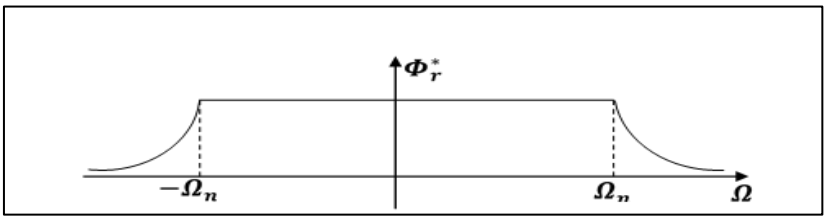

Fig. II- 8 : *Le principe du défluxage.*

Le flux est généralement maintenu constant à sa valeur nominale pour des vitesses rotoriques inférieures ou égales à la vitesse nominale de la machine et pour des vitesses supérieures, le flux décroît lorsque la vitesse augmente afin de limiter la tension aux bornes de la machine. Le schéma de réglage de la vitesse de la MASDE est donné par la Figure (II.9).

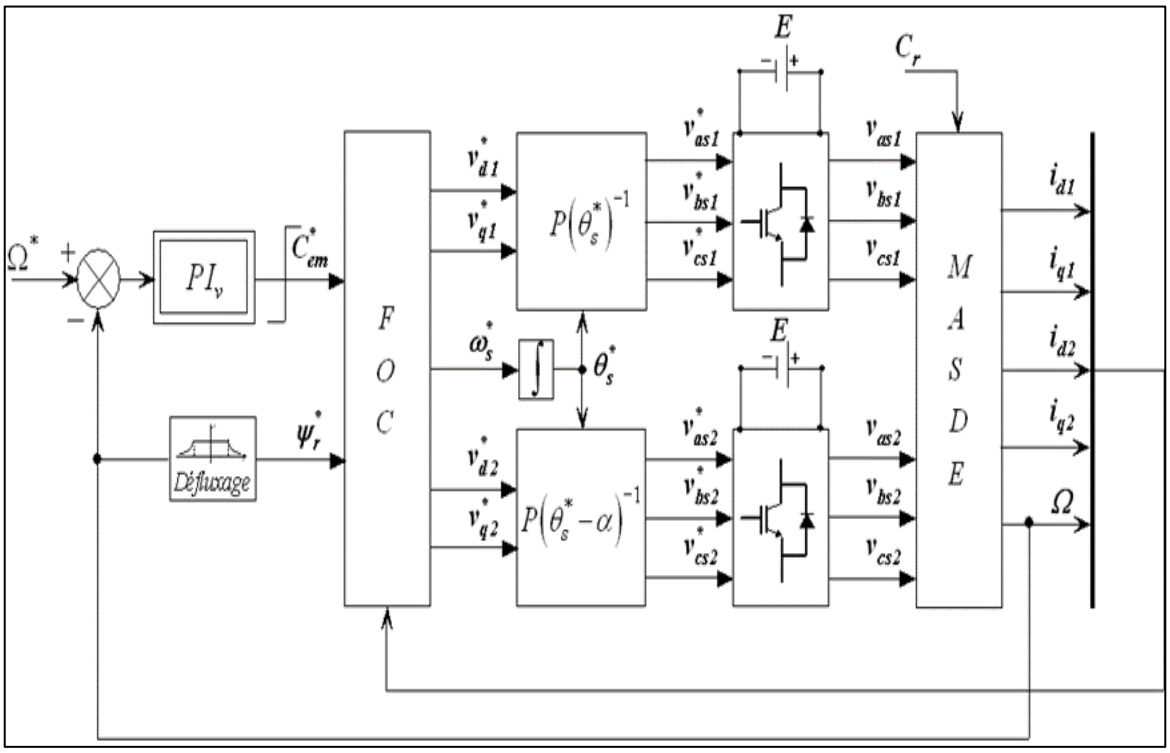

Fig. II- 9 : *Schéma de la commande FOC avec régulation de vitesse.*

II.6.1. Identification des paramètres du régulateur de vitesse

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence; afin de maintenir la vitesse correspondante pour que la cascade soit justifiée, il faut que la boucle interne soit l'équation mécanique donnée. Le schéma de la boucle de régulation de la vitesse est donné par la Figure (II.10).

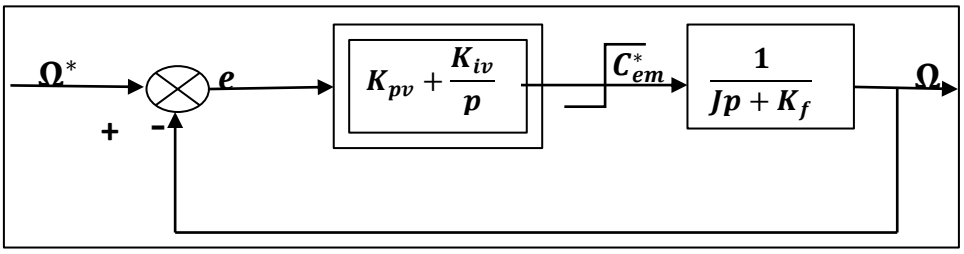

Figure II-10 : *Boucle de régulation de vitesse.*

L'identification nous donne :

$$\begin{cases} k_{pv} = J/T \\ k_{iv} = K_f/T \end{cases} \quad \text{(II.33)}$$

On prend : $T = T_r$

La commande doit être limité par un dispositif de saturation définit par [15], [16] :

$$C_{em}^*(Lim) = \begin{cases} C_{em}^* \; si \; |C_{em}^*| \leq C_{em}^{max} \\ C_{em}^{max} \; sign(C_{em}^*) \; si |C_{em}^*| \geq C_{em}^{max} \end{cases} \quad \text{(II.34)}$$

Le couple maximale adopté est $C_{em}^{max} = 30N.m$

II.6.2. Simulation et interprétation des résultats

Les schéma suivante représente l'évolution des caractéristiques de la MASDE avec la régulation de vitesse par la méthode indirecte, suivi de l'application des charges Cr =[14 -14] [N.m] respectivement entre les intervalles de temps t=[0.46 2 4] [s] en imposant la vitesse de référence N =250 (rd/s) Celle-ci montre que:

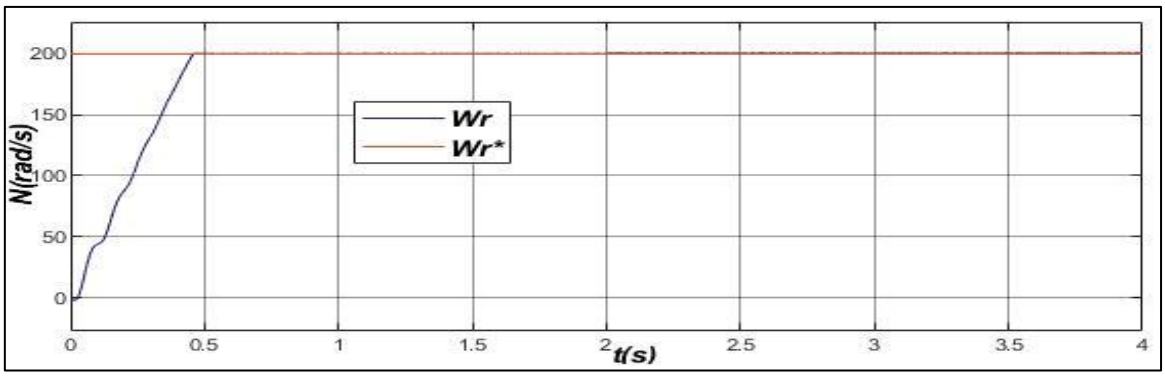

Fig. II- 11 : *La vitesse de rotation.*

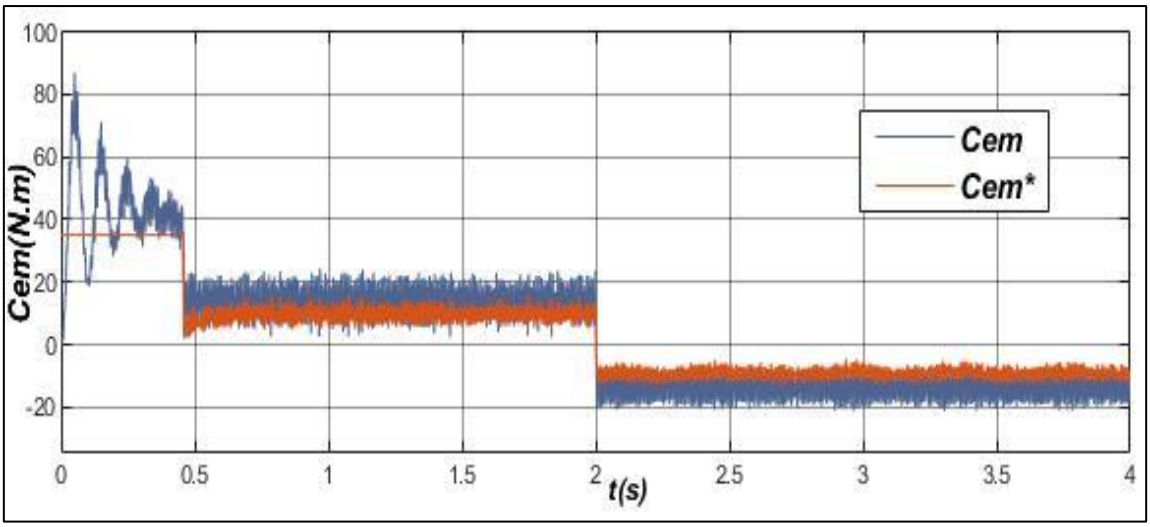

Fig. II- 12 : *Le couple électromagnétique.*

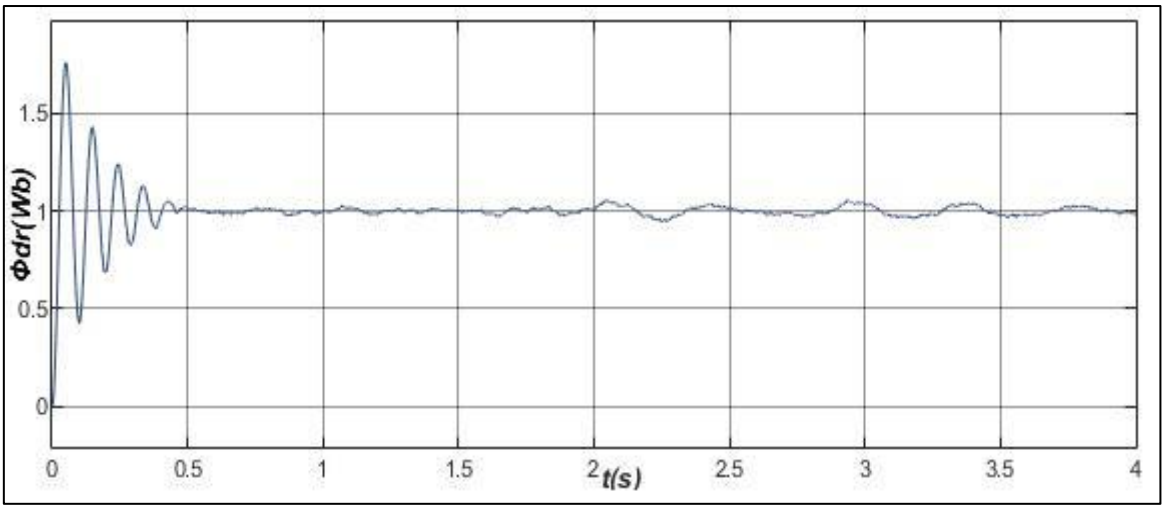

Fig. II- 13 : *Le flux rotorique direct Φ_{dr}.*

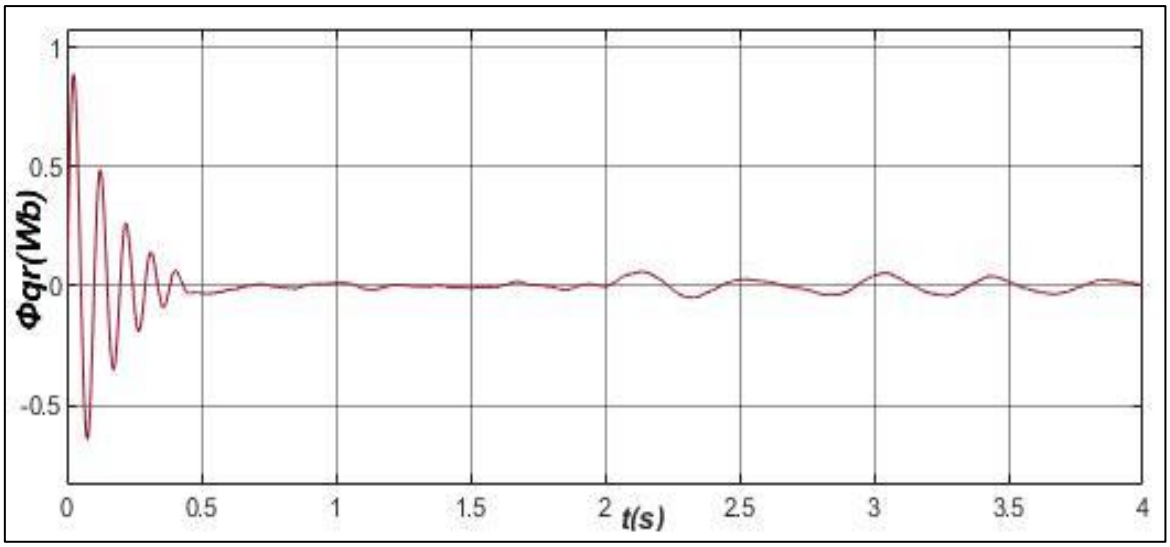

Fig. II- 14 : *Le flux rotorique quadratique Φ_{qr} .*

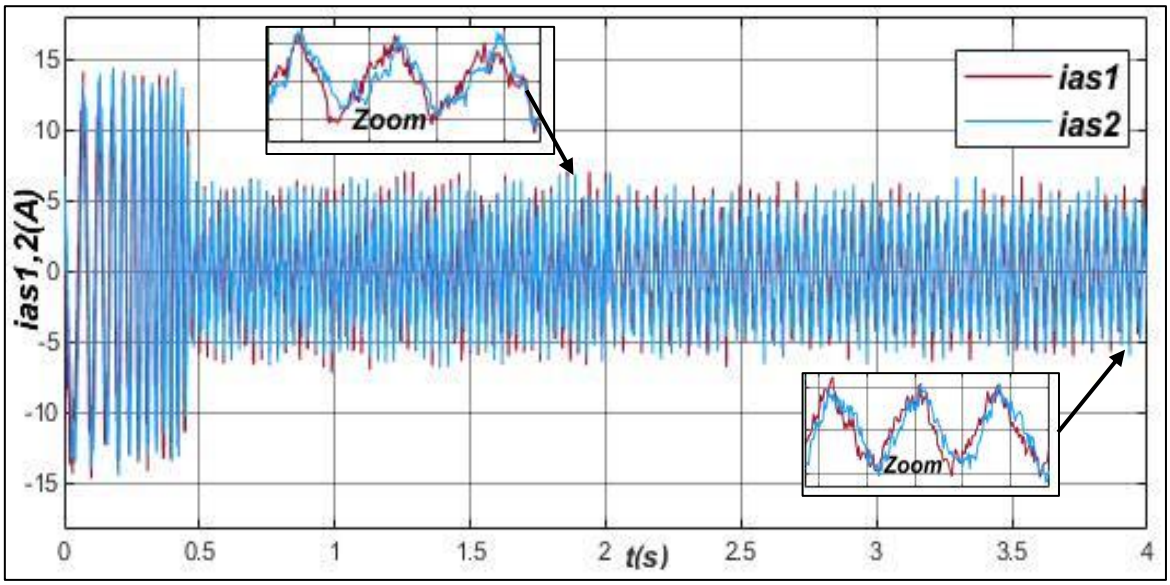

Fig. II- 15 : *Les courants statoriques réel.*

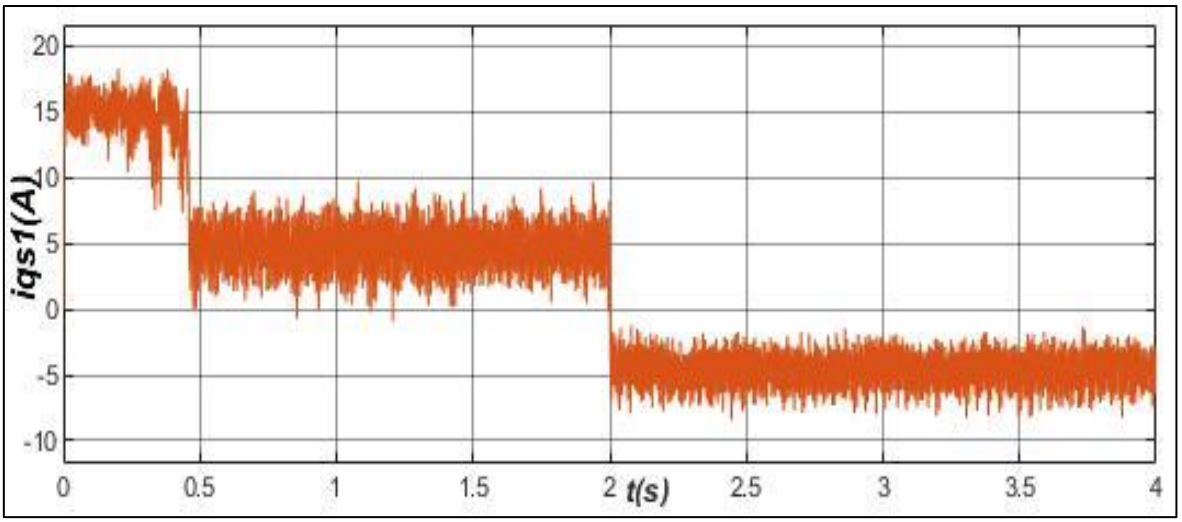

Fig. II- 16 : *Le courant statorique* i_{qs1}.

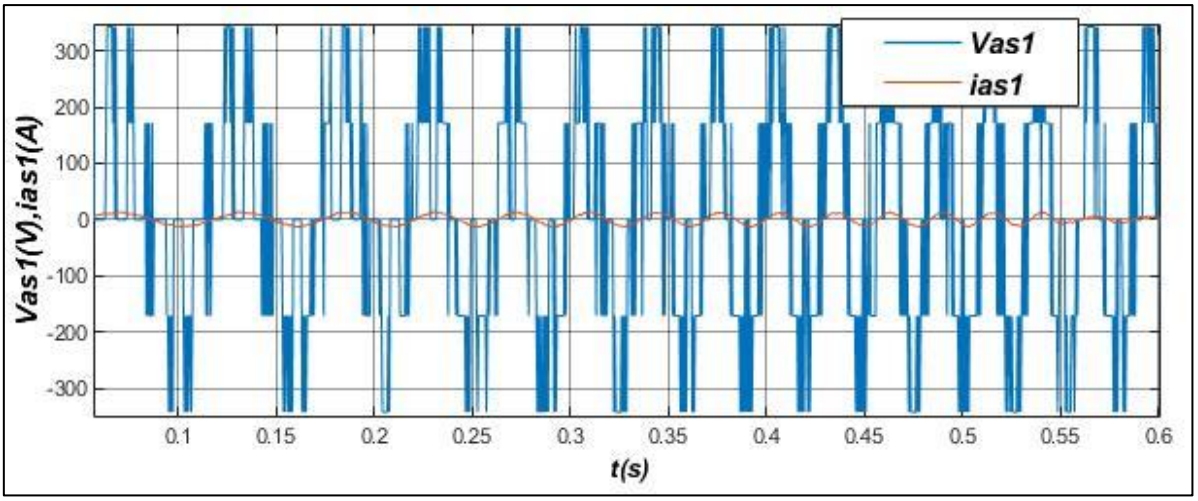

Fig. II- 17 : *La tension* V_{as1} *et le courant* i_{as1} *statorique.*

Au démarrage et durant le fonctionnement à vide, la vitesse rejoint sa valeur de consigne à (*t=0.46s*) on observe une perturbation pendant *0.003s*.

Les courants statoriques (étoiles 1 et 2) évoluent durant le régime permanent d'une façon sinusoïdale. Le courant en quadrature i_{qs1} [A] évolue pendant le régime établi identiquement au couple électromagnétique.

Les flux rotoriques progressent d'une manière similaire à celle du couple électromagnétique en régime permanent.

L'application de la charge C_r =14 [$N.m$] (fonctionnement moteur) pendant l'intervalle de temps t=[0.46 2][s] engendre des augmentations aux niveaux, du couple électromagnétique, des courants statoriques et du courant rotorique, qui se stabilisent respectivement à C_{em} =14 [$N.m$]

$i_{as1} = i_{as2}$, La vitesse et les flux rotoriques demeurent fixes en poursuivant leurs consignes. Cependant, en fonctionnement moteur la tension v_{as1}[V] et le courant i_{as1} $[A]$ sont presque en phase et de même signe, ce qui veut dire que la puissance est de signe positif.

L'application de la charge $Cr = -14$ $[N.m]$ (fonctionnement génératrice) de l'instant t=[2 4][s] engendre des diminutions au niveau du couple électromagnétique et du courant en quadrature, qui s'établissent à -14N.m les mêmes observations sont enregistrées pour les autres grandeurs avec celles en fonctionnement moteur. Cependant, dans le fonctionnement de la génératrice.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la commande vectorielle par orientation du flux rotorique, appliqué à une MASDE. Nous avons appliqué la méthode indirecte nécessite seulement la connaissance de la position de flux. On peut conclure que :

- Le passage des grandeurs continues (repère tournant avec le flux rotorique) vers des grandeurs alternatives (repère fixe) est assuré par la transformation inverse de Park.
- La vitesse de rotation réelle est disponible (supposée être mesurée par un capteur mécanique).
- Le contrôle de la transmission indirecte en dirigeant le flux du rotor permet une manipulation plus simple et facile d'une MASDE. Cela à des répercutions très importantes sur les performances et présente une solution attrayante dans les applications à vitesse variable.

Dans cette technique, un contrôleur intégré PI a été utilisé. L'objectif étant la régulation de la vitesse par la commande indirecte. Cependant, l'étude de cette dernières nous a mené au mieux à mettre en évidence les caractéristiques de la commande vectorielle sur la MASDE.

CHAPITRE III

COMMANDE DE LA MASDE EN PRESENCE DES DEFAUTS

III.1. INTRODUCTION

En raison de fiabilité et segmentation de puissance, les machines multi-phases sont de plus en plus utilisées dans les applications électriques de forte puissance et les domaines exigeant une excellente continuité de service. Toutefois, la multiplication du nombre de phases ne met pas la machine à l'abri, elle reste sujette à de nombreux défauts (électriques et/ou mécaniques) ce qui engendre des pertes financières et des arrêts de la chaîne de production [1].

Ce troisième chapitre est dédié à la présentation des défauts rencontrés dans des machines tournantes double étoiles et aux méthodes utilisées pour diagnostiquer ces défauts. Ensuite, nous rappellerons brièvement les différents défauts usuels auxquels les machines sont exposées avec une description de leurs causes de genèses et de leurs impacts sur les performances de la machine. Enfin nous achevons ce chapitre par une Application des défauts sur une machine asynchrone double étoile par Simulink/Matlab.

III.2. Les défauts de da machine tournante

Les défaillances peuvent être d'origines diverses: électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes:

- Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.
- Les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc.
- Les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc.

Des multiples études statistiques sur des machines électriques ont été effectuées depuis les années 80 jusqu'à présent, toutes ces statistiques mentionnées dans concernent les machines asynchrones de moyenne et grande puissance exploitées dans l'industrie [17].

Les études effectuées sue des machines asynchrones de grande puissance (100 KW à1MW) dans les années 90 par Thorsen mentionnées après par Thomson ont montré que sur cette gamme de puissance certaines pannes sont plus fréquentes que d'autre et les pannes les plus fréquentes sont de type mécanique la majorité d'entre elles se situent dans les roulements (41%)

et le stator (37%) les moines fréquentes sont les pannes au rotor (10%) et les autre type constituant (12%) [17].

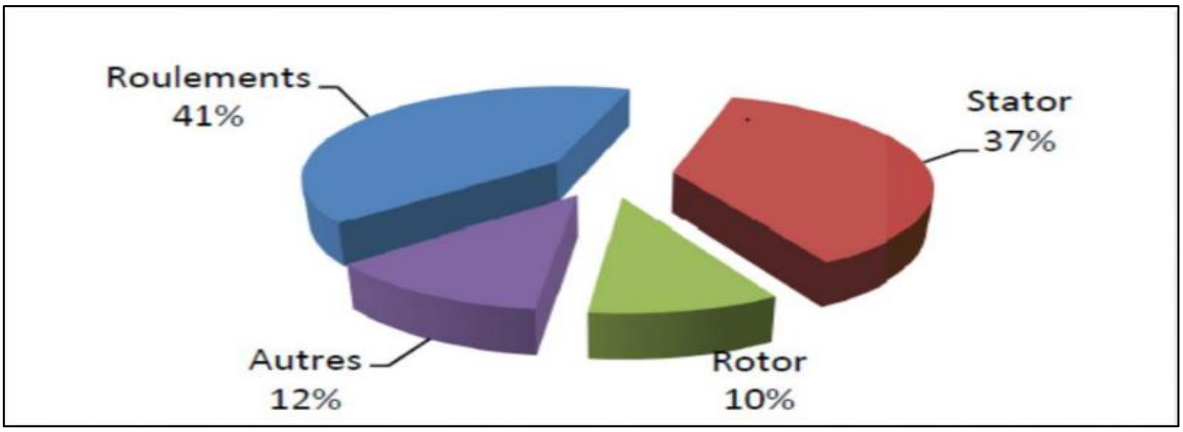

Fig. III- 1 : *Propositions des défauts par Thomson.*

Une étude statistique fait par Bonnett [18] sur les machines asynchrones de grande puissance, exploitées dans l'industrie pétrochimique, montre que (69%) des pannes se situent sur les roulements, (21%) au stator, (7%) au rotor et (3%) dans les autres régions de la machine [17].

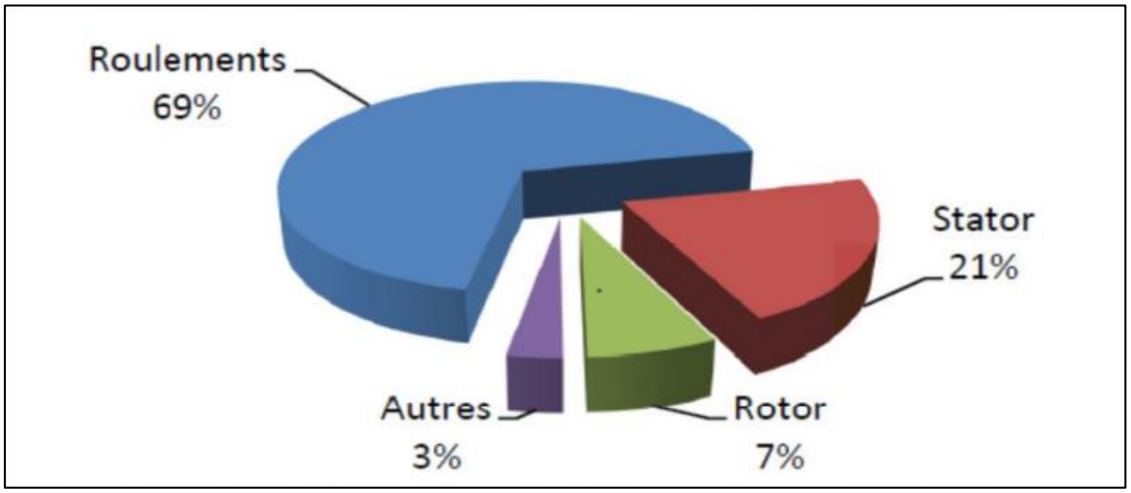

Fig. III- 2 : *Proposition des défauts par Bonnett [18].*

La répartition présentée confirme que les défauts dans les machines de grande puissance proviennent principalement de roulement et de bobinage statorique.

Il est à noter que les techniques d'alimentations des machines électriques provoquent aussi des défaillances, par exemple, les enroulements sont excités par des tensions comprenant des fronts raides ce qui accélère le vieillissement de l'isolation du bobinage statorique [17].

III.3. Défaillance d'ordre mécanique

En général, les défaillances d'ordres mécaniques sont les plus rencontrés parmi tous les défauts de la machine asynchrone double étoile, ces défauts peuvent apparaitre au niveau des flasques, ou encore de l'arbre du moteur.

III.3.1. Défaillances des roulements

Les roulements à bille jouent un rôle très important dans la machine asynchrone double étoile comme tout type de machines tournantes. Les défauts de roulements peuvent être provoqués par un mauvais choix de matériau au cours de la fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causé par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. La graisse de lubrification qui garantit une bonne rotation en minimisant les effets des frottements, peut se rigidifier et causé une résistance à la rotation.

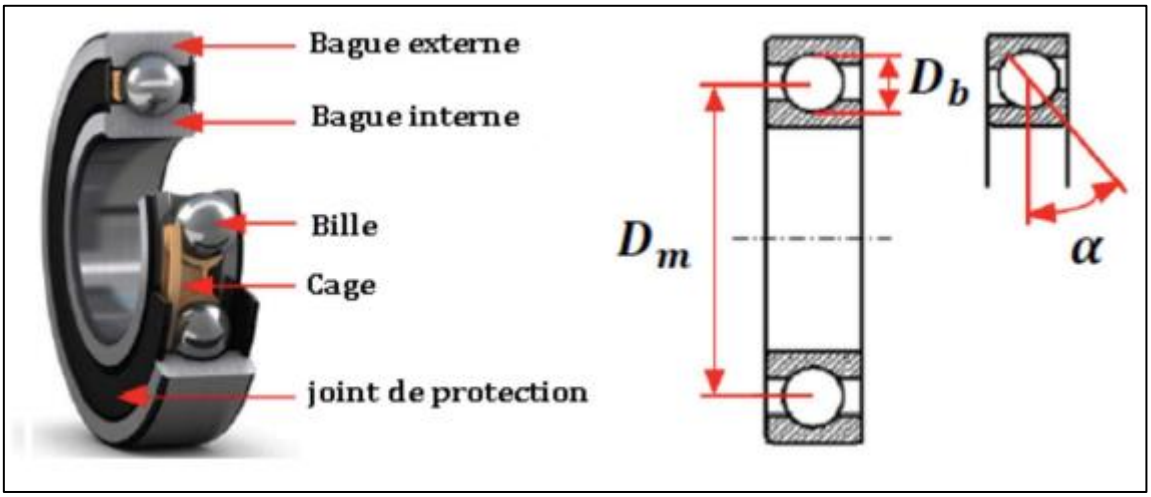

Fig. III- 3 : *Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes.*

Les roulements peuvent être endommagés par des causes externes comme:

- Contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable, etc.
- Corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides, etc.
- Lubrification inadéquate qui peut causer un échaudement et l'usure du roulement

III.3.2. Défaillance d'excentricité

Les excentricités peuvent être statiques, dynamique ou mixte, il s'agit d'un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator qui peut avoir pour origine un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, un défaut de roulement (usure), un défaut de charge, ou un défaut de fabrication, Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent

généralement au niveau de l'entrefer. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe de sa fabrication, le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine [17].

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées :

- **L'excentricité statique :** généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. La cause principale c'est un défaut de centrage des flasques (figure III.4).

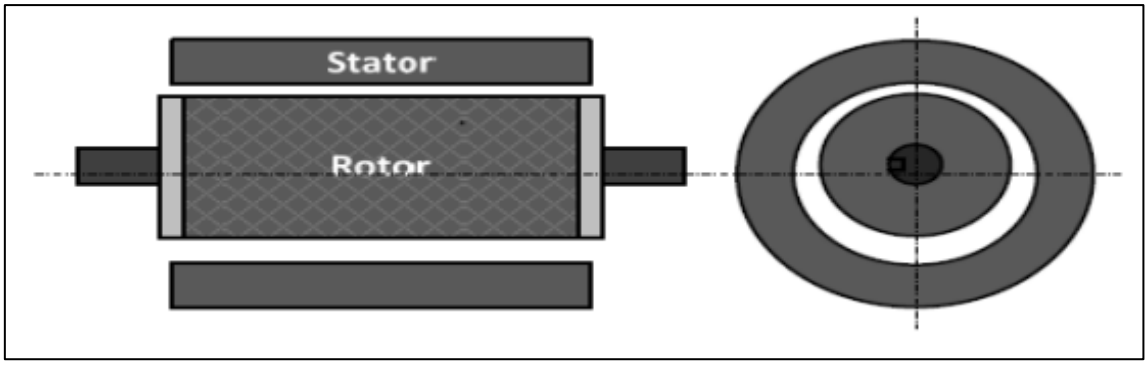

Fig. III- 4 : *Excentricité statique.*

- **L'excentricité dynamique :** lorsque le centre de rotation du rotor est différent du centre géométrique du stator, mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes (figure III.5).

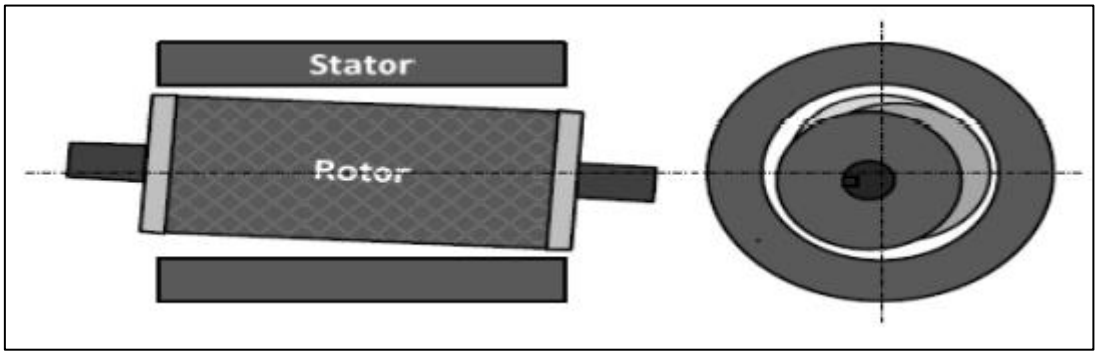

Fig. III- 5 : *Excentricité dynamique.*

- **L'excentricité mixte :** dans laquelle l'axe du rotor tourne autour d'un axe différent de celui du stator. Elle est donc la combinaison des excentricités statique et dynamique (figure III.6).

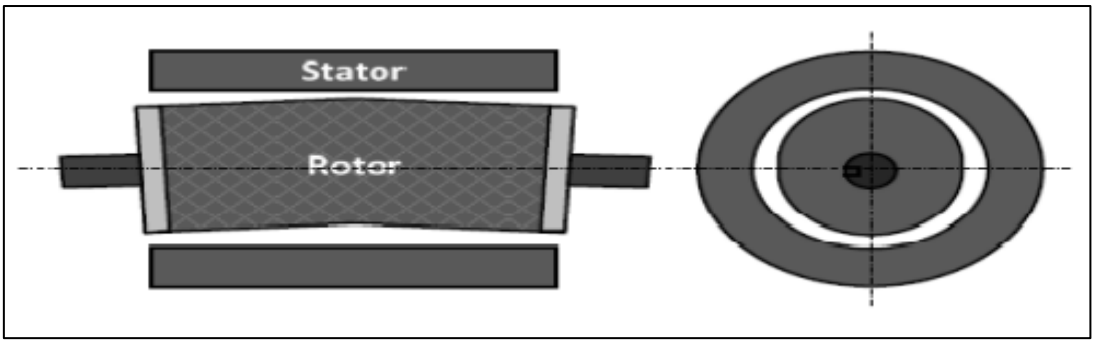

Fig. III- 6 : *Excentricité mixte.*

III.4. Défaillance d'ordre électrique

Les défaillances d'ordre électrique peuvent dans certains cas être la cause d'une panne au niveau de la machine asynchrone double étoile.

III.4.1. Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique, ...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné.

III.4.2. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelles au défaut.

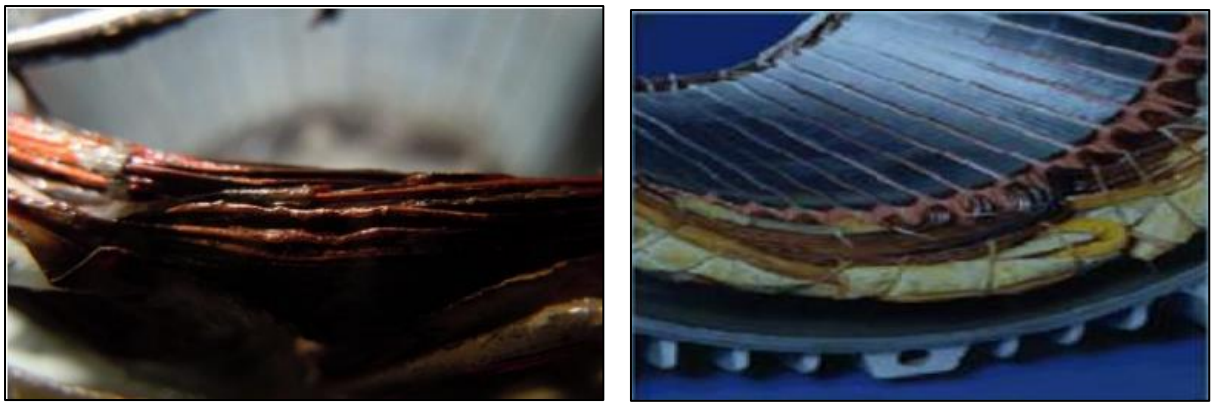

***Fig. III- 7 : Cou**rt-circuit entre spire de la même phase.*

III.4.3. Court-circuit entre phases

L'apparition d'un court-circuit entre phases induirait des courants très élevés conduisant la fusion des conducteurs, cependant, un court-circuit au bobinage près du neutre où entre spires n'a pas un effet radical, il conduit un déséquilibre de phase. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît, les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont amplifiés lors de l'apparition de ce défaut.

(a) Court-circuit due à un rotor bloqué (b) Court-circuit due à une surcharge

***Fig. III- 8 :** Court-circuit entre phases.*

III.5. Les sources d'informations pour détections des défauts

III.5.1. L'analyse vibratoire

C'est est la plus connue et la plus largement utilisée car adaptée aux composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaitre dans les machines tournantes double étoile [19].

III.5.2. L'analyse d'huile

Elle est appliquée à toutes les machines contenant des fluides de lubrification (réducteurs, motoréducteurs, moteurs thermiques…). Elle consiste à prélever un échantillon d'huile et de

l'analyser (particules d'usure) pour déduire l'état de l'équipement ; Les résultats permettent de déceler des anomalies caractéristiques telles que [18] :

- Sur moteur thermique : problèmes d'étanchéité de la filtration d'air, infiltration de liquide de refroidissement ... .
- Sur multiplicateurs, réducteurs et engrenages : mauvais état d'un roulement ou d'un palier, Transmission défectueuse (engrenages endommagés) ... .
- Sur les systèmes hydrauliques : pollution interne telle que la cavitation, défaut d'étanchéité, défaut de filtration.

Elle suscite un intérêt encore récent dans le domaine de la maintenance jusqu' alors réservée au contrôle d'installations électriques. Elle est peu utilisée pour la surveillance des machines tournantes notamment pour la détection de défauts qui se manifestent par un échauffement anormal à la surface de l'équipement. La thermographie permet de réaliser des mesures à distances et d'obtenir instantanément une image thermique de la zone inspectée [20].

III.5.3. L'analyse acoustique

Elle permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones placés à distance de l'équipement [19]

Tableau III- 1 : Technique d'analyse de l'état d'une machine tournante [12].

	Principaux avantages	**Principales limitations**	**Champ d'applications privilégié**
Analyse vibratoire	-Détection de défauts à un stade précoce. -Possibilité de réaliser un Diagnostic approfondi. -Autorise une surveillance continue. - Permet de surveiller l'équipement à distance (télémaintenance)	-Spectres parfois difficiles à interpréter -Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses	Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure

Analyse D'huile	- Détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraine une usure ou un échauffement. - Possibilité de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules.	-Ne permet pas de localiser précisément le défaut. -Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon.	Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure.
Thermographie IR	- Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation. - Interprétation souvent immédiate des résultats.	- Détection de défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire. - Contrôle limité à ce que "voit" la caméra (échauffements de surface).	-Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier).
Analyse acoustique	- Permet de détecter l'apparition de défauts audibles. - Autorise une surveillance continue.	- Sensibilité au bruit ambiant. - Diagnostic souvent difficile à réaliser. -problème de mesure.	- Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire.

III.6. Principaux défauts d'une machine tournante et leurs manifestations

III.6.1. Balourd

Quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il n'est pas possible de faire coïncider l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor, ce qui caractérise le balourd. Il en résulte que l'arbre en rotation est soumis à des efforts centrifuges qui le déforment. Le balourd est un déséquilibre massique qui provient généralement du défaut d'usinage, d'assemblage et de l'échauffement dissymétrique du rotor lors du fonctionnement Figure (III.11) [22]. Les origines des balourds sont multiples.

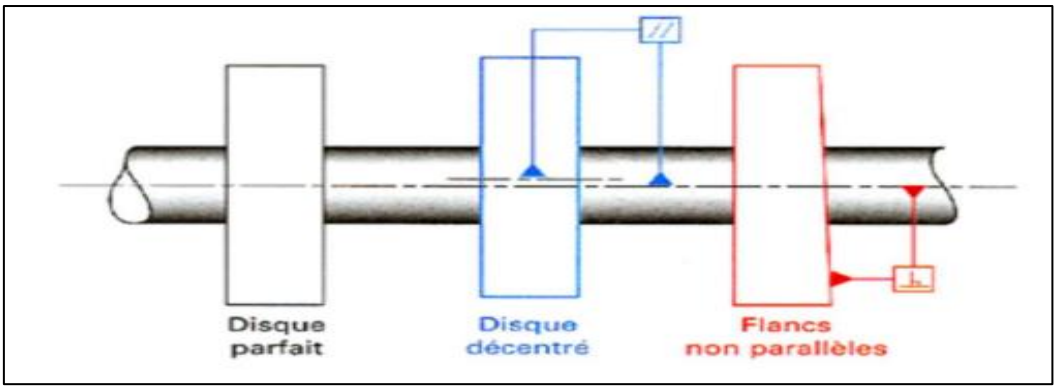

Fig. III- 9 : *Ecarts d'usinage (excentricité et parallélisme) [22].*

- **Manifestation**

Ce défaut se manifeste par [23]:

- l'augmentation du niveau global choisi en basses fréquences, soit D_{cc} [10-1000 Hz], soit V_{eff} [10-1000 Hz],
- la nette augmentation de l'amplitude de la fréquence fondamentale (fréquence de rotation, fr).

$$f_r = \frac{N}{60} \qquad \text{(III.1)}$$

Avec :

N : vitesse de rotation (tr/min).

- **Exemple** Mise en évidence d'un défaut de balourd figure (III.12)

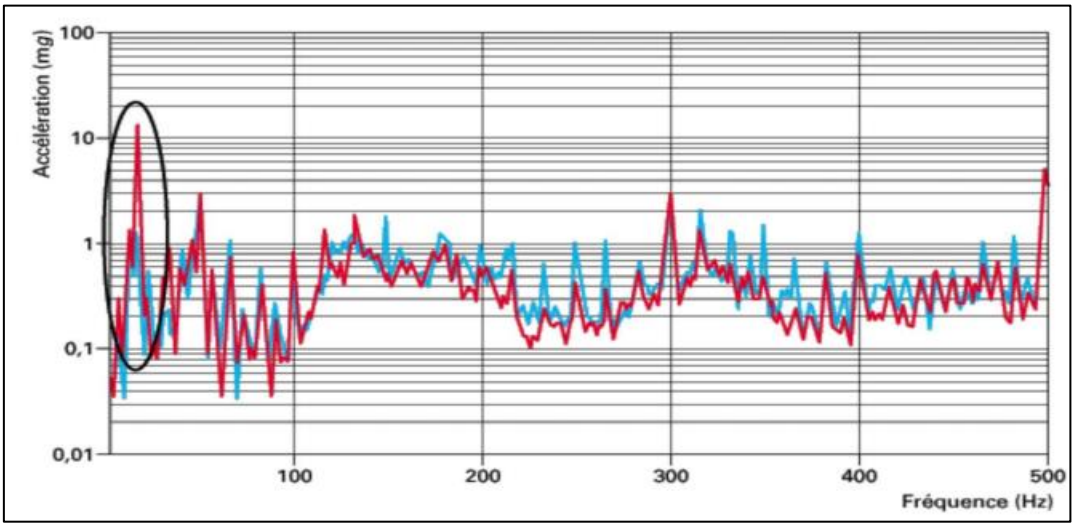

Fig. III- 10 : *Spectres fréquentiels du défaut de balourd [23].*

- Le spectre bleu (machine en bon état de fonctionnement) : amplitude de la fréquence fondamentale 1.323 mg pour 16.25 Hz,
- Le spectre rouge (machine en fonctionnement dégradé : défaut d'équilibrage) : amplitude de la fréquence fondamentale 14.199 mg pour 16.25 Hz.

III.6.2. Défauts de courroies

Les courroies sont utilisées pour transmettre la puissance entre deux arbres dont la distance n'est pas trop importante. Une courroie, constituée par une bande sans fin passant sur deux poulies, transmet l'énergie garce à son adhérence sur les poulies.

- **Manifestation**

-N1 et N2 sont des vitesses de rotation des roues n° 1 et 2 de la figure III.11.

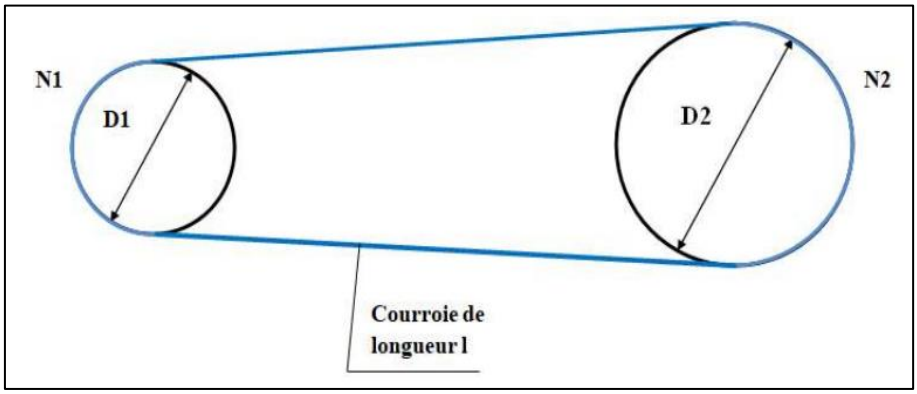

Fig. III- 11 : *Transmissions par courroies [23].*

Les fréquences caractéristiques des défauts de courroies sont :

- **Roue n°1 :** $$f_{c1} = f_r \frac{(\pi D_1)}{l} \quad \text{(III.2)}$$
- **Roue n°2 :** $$f_{c2} = f_r \frac{(\pi D_2)}{l} \quad \text{(III.3)}$$

Où f_r représente la fréquence de rotation de l'arbre.

- **Origine**

Les défauts de courroie sont engendrés par la conséquence d'une mauvaise pose, d'une usure ou par le défaut d'alignement des deux poulies. Les statistiques concernant les causes des défaillances et la localisation des défauts dans les machines tournantes permettent de conclure que les organes les plus sensibles sont les engrenages et les roulements [23].

III.7. Méthodes de diagnostic fréquemment utilisées

La surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic est une partie de la surveillance qui a pour objectif de trouver la cause des défauts.

III.7.1. Analyse fréquentielle du courant statorique

L'analyse des courants statorique dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts électrique et magnétiques pouvant apparaitre au sein d'une MAS.

Nous savons que le suivi de l'amplitude des composantes caractéristiques de fréquence :

$$\boldsymbol{f_{cs} = f_s\left[\frac{n}{p}(1-g) \pm k\right]} \qquad \text{(III.4)}$$

Avec :

n=1,2, 3. Et k= 1, 3,5.

Cette technique est dénommée dans la littérature « Motor curent signature analyses » (MCSA). Les défauts de la MAS se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :

- Les raies spectrales qui apparaissent avec des fréquences qui sont directement liées à la vitesse de rotation de la machine, aux vitesses des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine.
- Les raies spectrales ont une modification de leurs amplitudes, dans le spectre du courant.

Le technicien de la surveillance doit avoir une bonne connaissance des défauts et leurs signatures à partir du courant statorique [24].

III.7.2. Analyse des flux

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion est donc affectée par tout déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou électromagnétique au rotor ou au stator. Le flux d'entrefer est par la même l'induction magnétique dans cet entrefer, le flux embrassé dans les enroulements statoriques, ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés [25].

Le flux axial est toujours présent dans les machines électriques à cause des dissymétries inhérentes à leur fabrication. L'étude des variations de flux peut donc être une solution pour détecter et localiser un défaut à travers l'utilisation de bobines exploratrices placées à l'extérieur de la machine, perpendiculairement à l'axe du rotor. Le flux axial est le résultat de l'effet des courants sur les extrémités de la machine (têtes de bobines, anneaux de court-circuit) [25].

Les composantes fréquentielles du flux de fuite dans l'axe du rotor qui permettent de détecter et d'identifier des courts-circuits dans les enroulements statoriques, les fréquences caractéristiques sont données par l'expression suivante [26] :

$$\boldsymbol{kf_s \pm nf_r} \tag{III.5}$$

Ces composantes présentes dans le spectre de flux pour une machine saine, vont augmenter avec l'apparition d'un défaut.

III.7.3. Analyse du couple électromagnétique

Certains défauts mécaniques peuvent être détectés par la recherche d'harmonique dans le spectre du couple électromagnétique mesuré, résultant d'une interaction entre le flux et le courant. Ce couple peut être reconstruit, soit à partir de deux ou de trois courants statoriques, soit en utilisant un modèle physique de la machine. L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet, les variations du couple de charge vont induire des variations du flux et du courant dans la machine. De même la torsion de l'arbre entraine l'apparition d'harmonique dans le spectre du couple.

La dissymétrie électrique du rotor fait apparaitre des harmoniques de dentures rotoriques, ce qui modifie le champ d'entrefer. Le problème peut alors être détecté en analysant les fréquences d'encoches présentent dans le spectre du couple estimé [27] :

$$\boldsymbol{f_{sb} = f_s\left[\frac{N_r(1-g)}{p} \pm 2gf_s\right]} \tag{III.6}$$

III.8. Analyse du comportement sur une machine asynchrone double étoile en présence de défauts par Simulink/Matlab

Après avoir mentionné les défauts de la MASDE, nous appliquons maintenant un défaut d'ouverture d'une première phase à un onduleur de tension à MLI au niveau de stator, qui est basée sur une approche vectorielle, Les résultats de simulation effectués sur MATLAB/Simulink sont présentés et discutés afin de vérifier les performances de la stratégie et des régulateur étudiés.

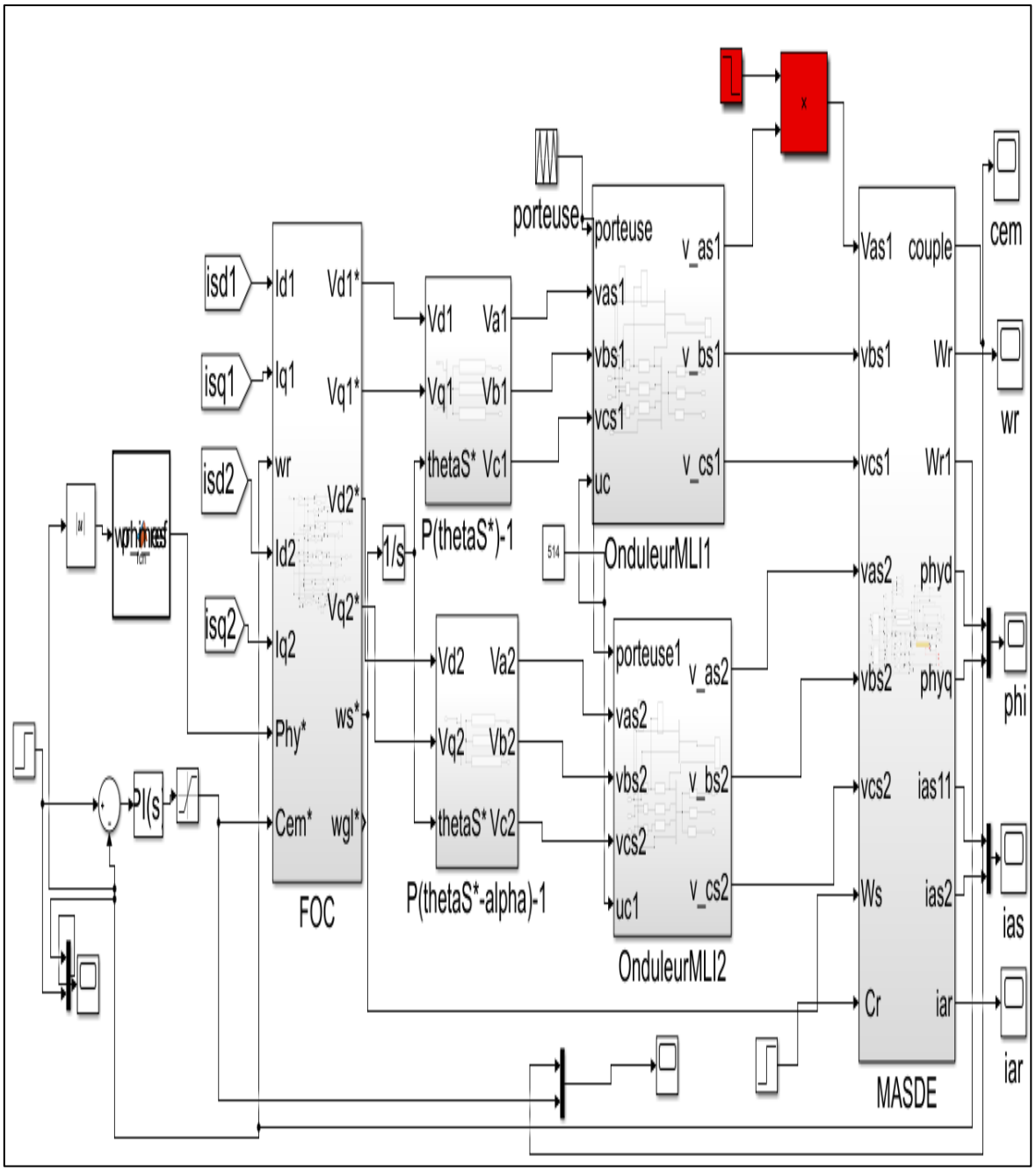

Fig. III- 12 : *Schéma bloc de la MASDE lors l'ouverture d'une première phase.*

III.8.1. Simulation et interprétation résultats

- **La simulation de la MASDE lors l'ouverture d'une phase**

Les schémas suivants représentent l'évolution de la MASDE avec défauts d'ouverture d'une première phase à un onduleur de tension à MLI, la machine démarre à vide. A l'instant t=1[s] nous appliquons un couple résistant C_r = 14 [$N.m$], suivi à t= 2[s], d'un défaut entre

l'onduleur et MASDE au tension statoriques $V_{as1}[V]$.

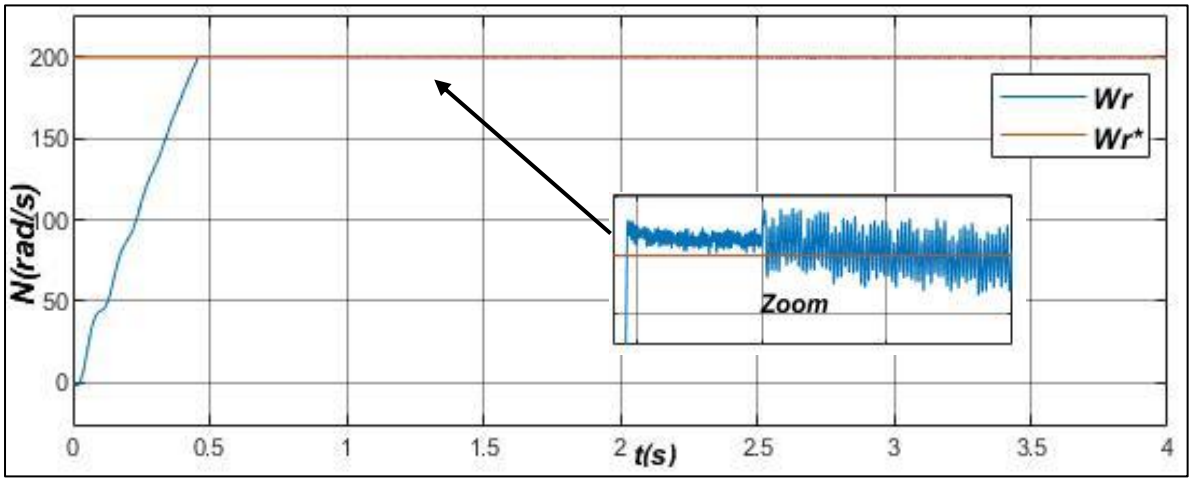

Fig. III- 13 : *La vitesse de rotetion avec défauts..*

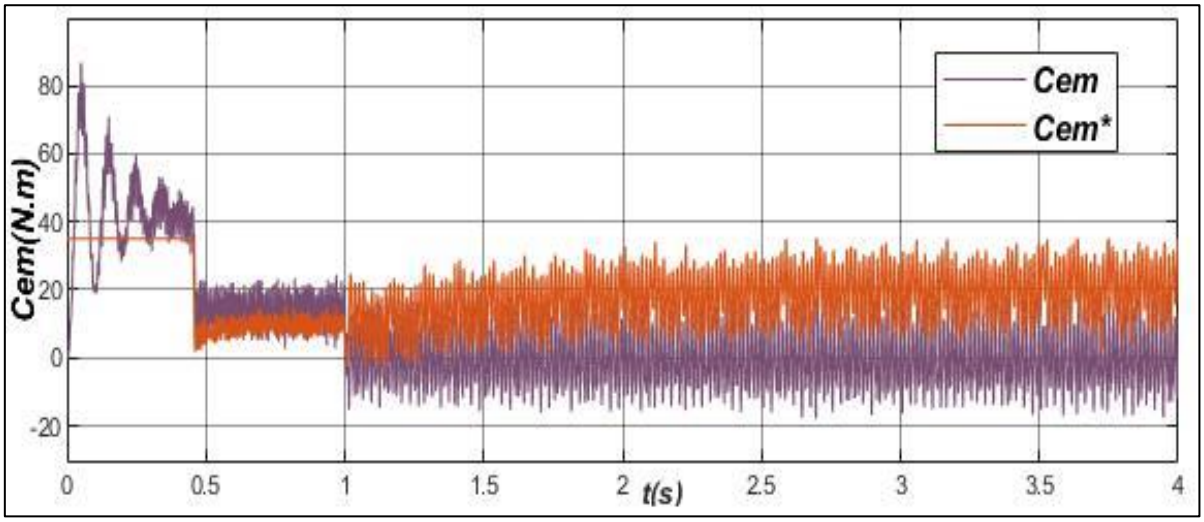

Fig. III- 14 : *Le couple électromagnétique avec défauts.*

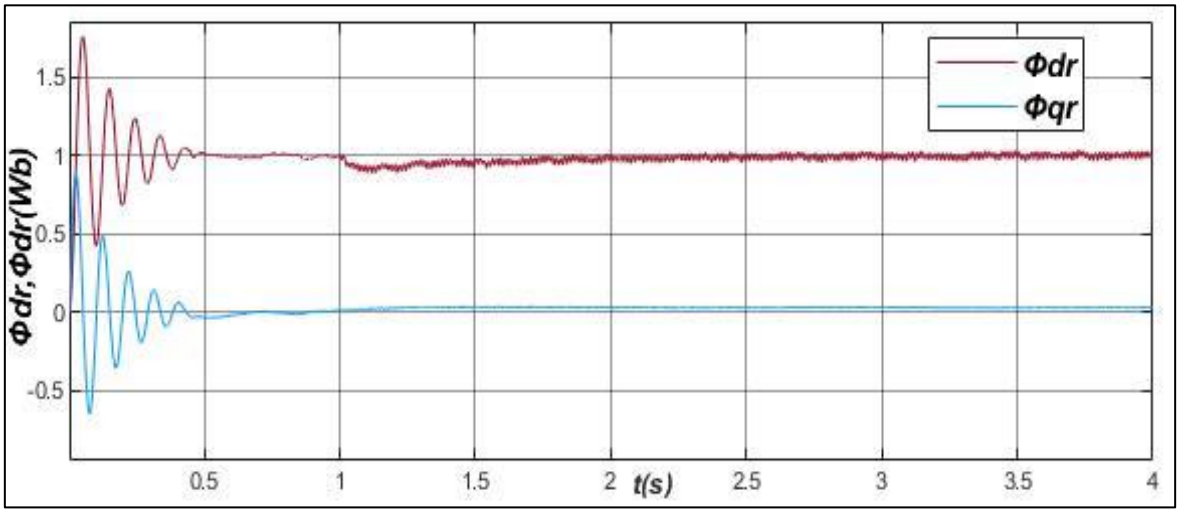

Fig. III- 15 : *Les flux rotorique direct Φ_{dr}, Φ_{qr} avec défauts.*

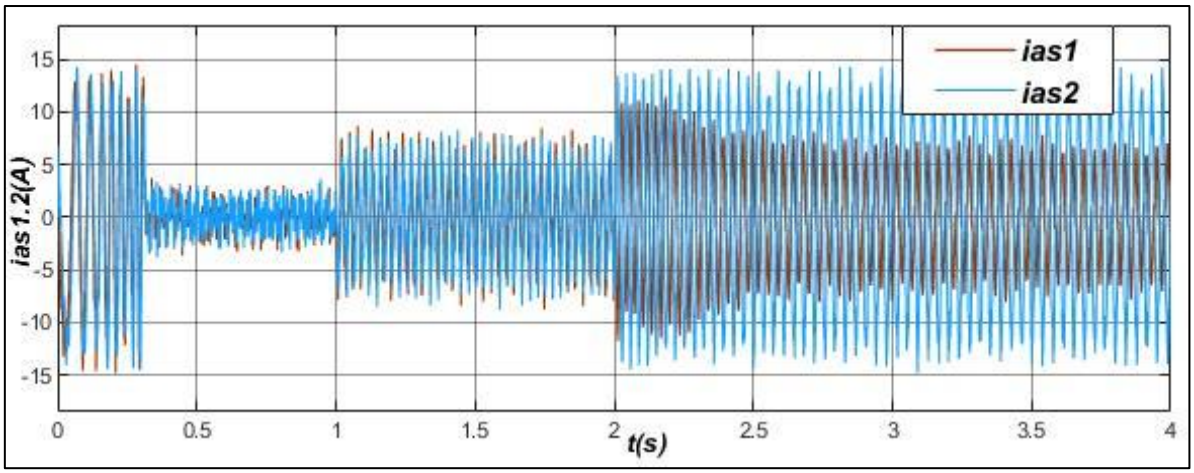

Fig. III- 16 : *Les courants statoriques i_{as1},i_{as2} avec défauts.*

- **Interprétation du résultat**

À l'instant $t=2[s]$ son applique un défaut sur le phase V_{as1} (étoile1) de stator de l'onduleur MLI1 et MASDE.

La vitesse de rotation représente dans la figure (III.13), lors de l'application de défaut statorique $V_{as1}[V]$, nous remarquons qu'à l'instant de l'apparition de ce défaut, la vitesse augmente et oscille avec des ondulations d'amplitude 2 rad/s causées par le défaut et atteindre une valeur de *220 rad/s*.

Le couple électromagnétique est illustré dans la figure (III.14), en présence de défaut statorique $V_{as1}[V]$, le couple augmente brusquement pour atteindre une valeur maximale qui représente le pic de couple égale à *40[N.m]*.

Les flux rotoriques direct dans à l'instant d'apparition de défaut, comme montré la figure (III.15) nous voyons une déformation de la forme des flux (Φ_{dr}, Φ_{qr}), et une augmentation de l'amplitude.

Les courants statoriques représentent dans la figure (III.16) dans les phases de deux étoiles de stator lors d'un défaut de $V_{as1}[V]$, les courants augmentent brusquement et oscillent autour de l'axe de zéros avec des ondulations d'amplitude ($i_{as1}=12[A]$ et $i_{as2}=14[A]$).

En montrent que la différence entre un fonctionnement normal et une erreur apparaît dans l'amplitude du spectre de vitesse, de couple, de flux et de courant (lignes de défaut MASDE).

III.9. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à simulé des défauts sur la machine asynchrone double étoile. Et applique une méthode d'analyse par Simulink/MATLAB. Où le défaut dans le stator et le rotor en général.

Le défaut au niveau de stator, en effet, ce modèle nous a permis d'analyser l'influence de ce défaut sur les grandeurs de la machine tels que le courant, la vitesse et le couple.

L'analyse vibrations est un moyen efficace de détecter rapidement l'origine des problèmes sur les machines et la localisation du problème.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans les applications industrielles, les machines électriques, nécessitent une détection rapide de leurs défaillances à cause de leurs utilisations fréquentes dans la plupart des domaines industriels alors la maintenance de ces machines justifie l'accent mis sur la recherche dans le diagnostic de défauts des entraînements électriques, notamment en vitesse variable. Ce domaine très vaste, ouvre de larges perspectives pour ces différents types de machine. L'étude des défauts a un double objectif :

- Comprendre leur genèse de manière à prévoir leur gravité et leur développement.
- Analyser leur impact sur le comportement de la machine et en déduire les signatures permettant, à posteriori, de remonter jusqu'à la cause de la défaillance. Il est donc important de développer des outils de diagnostic pour détecter de manière précoce ces défauts.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du contrôle aux défauts de la MASDE au niveau de stator, alimentée par deux onduleurs de tension contrôlés par la technique MLI, à base de l'orientation du flux rotorique. A cet effet, nous avons utilisé l'environnement SIMULINK du logiciel MATLAB pour réaliser de ce travail.

Nous avons commencé par l'étude bibliographique et théorique sur la modélisation de MASDE, partir des équations mathématiques dans le repère diphasé en utilisant la transformation de Park, pour obtenir un modèle simple qui traduit finalement le fonctionnement de la MASDE. Simulation de la machine directement par deux sources triphasées équilibrées puis par deux onduleurs de tension à commande MLI, suivi par une application d'une charge a été simulé par le logiciel MATLAB/SIMULINK.

Nous nous sommes intéressés ensuite à la commande vectorielle indirecte de la machine Asynchrone Double Etoile dont le principe consiste à avoir un couple similaire à celui de la machine à courant continu. Pour se faire, nous avons basée sur le principe d'orientation du flux rotorique indirecte qui est appliquée pour la commande en vitesse l'aide des régulateurs classiques de type PI, D'après ce travail on conclure par la présentation des avantages de la commande vectorielle indirect:

- Plus facile à implémenter elle consiste à ne pas mesurer le flux de la machine, mais à, supposer d'être établit en régime permanent la valeur désirée.
- Méthode plus attractive et plus utilisée.
- Elle peut être utilisée pour contrôler à basses vitesses.

En perspective, ce mémoire ouvre des axes de travail pour améliorer le contrôle de la machine asynchrone à double stator. En l'occurrence, la réalisation pratique du travail que nous avons proposé est l'application des techniques de réglage de l'automatique moderne à savoir la commande non linéaire, l'alimentation de la MASDE par les onduleurs multi-niveaux afin de réduire les ondulations du couple

électromagnétique et du courant statorique, et l'étude générale d'autres types de défauts de la machine asynchrone à savoir les défauts rotoriques et mécaniques.

Bibliographie

[1] MAOUCHE Yacine, « *Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile. Application à la sureté de fonctionnement* », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2015.

[2] KERCHA Safia et GOUBI Wissam, « *Etude et modélisation des machines électriques double étoile* », Thème Master académique. Université kasdi merbah Ouargla 27/06/2013.

[3] ELKHEIR Merabet, « *Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile* », Mémoire Magister en Electrotechnique, 04 /06 / 2008.

[4] DJABOREBBI Amina, « *Etude et commande d'machine Asynchrone double étoile* », Théme Master académique, Ouargla 26/06/2013.

[5] D. Hadiouche, « *Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure* », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1., soutenue 20 décembre 2001.

[6] AMIMEUR Hocine, « *Contribution à la commande d'une machine asynchrone double Etoile par mode de glissement* », Mémoire Magister en Electrotechnique, 28 /05 / 2008.

[7] BAZINE Omar, « *Commande Directe du Couple (DTC) d'une Machine Asynchrone à Double Etoile alimentée par un redresseur piloté par DPC (Direct Power Control)* », Thèse de Master, Université de Ghardaïa, 2015/2016.

[8] M. Lakhdari, « *Simulation et commande de la machine asynchrone double étoile pour air génération* », Mémoire de Magister, Université Sétif, Alger, 2014.

[9] J. Chatelain, « *Machine électriques* », tome I, Edition Dunod 1983, ISBN 2-04-015620-8.

[10] R. Abdessamed, M. Kadjoudj, « *Modélisation des machines électriques* », Presses de l'Université de Batna, Algérie, 1997.

[11] H. Ney, « *Equipements de puissance* », Editions Fernand Nathan, Paris, 1988.

[12] ZOUAOUID MED Nabil et MESSAI MED TEDJANI, « *Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à double stator* », Mémoire de fin d'études En vue de l'obtention du Diplôme de Master, Université Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi, 2014.

[13] HAFFAF Adil, CHEBABHI Moqrane, « *Commande d'une machine à induction par la méthode H∞* », Année Universitaire 2006/2007.

[14] G. K. Singh, K. Nam, S. K. Lim, « *A simple indirect field-oriented control schem for multiphase induction machine* », *IEEE Transactions on Industrial Electronics* Vol. 52, No. 4, pp. 1177–1184, August 2005.

[15] E. Merabet, A. Belayali, « *Commande par la logique floue d'une machine asynchrone double stator* », Mémoire d'Ingéniorat, Université Mohamed Boudiaf de Msila, Algérie, Juin 2005.

[16] A. L. Nemmour, « *Contribution `a la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation* », Mémoire de Magister, Université El-Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, Avril 2002.

[17] A. Ceban, « *Méthodologie globale de diagnostic des machines électriques* », Thèse de Doctorat, Université d'Artois, France, 2 Février 2012.

[18] A. H. Bonnett and C. Yung, *Increased Efficiency versus Increased Reliability*, Industry Applications Magazine, IEEE, vol. 14, pp. 29-36, 2008.

[19] B. Vaseghi, « *Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre spires* », Thèse de doctorat, GREEN - Groupe de Recherche en Electrotechnique Electronique de Nancy, Nancy Université - Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.

[20]] C. Breneur, « *Eléments de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenages et de roulements* » Thèse INSA de Lyon, 2002.

[21] Maintenance Service, Document SNR, SNR Industrie, 2004.

[22] A. Boulenger, « *Maintenance conditionnelle par analyse des vibrations* », Techniques de l'ingénieur, MT 9 285, 2007.

[23] Augeix D., Techniques de l'ingénieur BM5 – 145, « *Bruit et vibrations* », 2007.

[24] A. Abderrahim, « *Grandeurs Non Invasives pour le Diagnostic des Machines Asynchrones* », Mémoire Magister, Université de Sétif, Alger, 2010.

[25] R. Casimir, « *Diagnostic des défauts des machines électriques par reconnaissances des formes* », Ecole centrale de Lyon, France, 2003.

[26] S. Bachir, « *Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par Estimation Paramétrique* », Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France, Mars 1992.

[27] O.Ondel, « *Diagnostic par Reconnaissance des Formes : Application a un Ensemble Convertisseur-Machine Asynchrone* », Thèse de Doctorat en École centrale de Lyon, France.

Annexe

Données de l'alimentation

Puissance nominale : $P_n = 4{,}5kW$

Tension d'alimentation nominale : $V_n = 220V$

Courant nominal : $I_n = 6.5A$

Vitesse nominale (synchronisme) : $\omega_s = 3000tr/min$

Fréquence de l'alimentation (réseau) : $f_s = 50Hz$

Nombre de paires de pôles : $p = 1$

Paramètres de la machine

Moment d'inertie : $J = 0.0662kg.m^2$

Coefficient de frottement : $Kf = 0.001N.m.s/rd$

Résistance d'une phase statorique (étoiles 1 et 2) : $Rs1 = Rs2 = 3.72\Omega$

Résistance d'une phase rotorique : $Rr = 2.12\Omega$

Inductance propre cyclique d'une phase statorique (étoiles 1 et 2) : $L1 = L2 = 0.022H$

Inductance propre cyclique d'une phase rotorique : $Lr = 0.006H$

Inductance mutuelle cyclique stators-rotor : $Lm = 0.3672H$

L'angle électrique : alpha = $\pi/6$ *rad*