

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A.MIRA-BEJAIA  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Électrique



## Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme  
de Master en Électrotechnique

### *Thème*

---

# Étude d'une machine asynchrone à multi-étoile

---

**Présenté par :**

Mr BENSMAIL Koceila

Mr GUENAOUI Aimen

**Options :**

Machines électriques

Commande électrique

**Présenté devant le jury composé de :**

Mr MEBARKI Nasreddine

Maître conférence « B »

Président

Mr GHEDAMSI Kaci

Professeur

Examineur

Mr AOUZELLAG Djamel

Professeur

Encadreur

Mr HAMOUDI Yanis

Doctorant

Co-encadreur

**Promotion 2021/2022**

---

# *Remerciements*

---

*Tout d'abord, nous tenons à remercier DIEU le tout puissant de nous avoir guidé et donné le courage et la volonté de réaliser ce travail.*

*Nous exprimons nos profonds remerciements à notre enseignant et promoteur Professeur Mr **AOUZELLAG DJ** d'avoir accepté de nous encadrer, pour l'aide compétent qu'il nous a apporté, pour sa confiance, son encouragement en continu et son œil critique qui nous a été très précieux pour améliorer la qualité de notre mémoire. L'apport de son sincère soutien ne s'est pas limité au cadre formel du travail, mais a été une grande source de motivation pour continuer et accomplir ce travail.*

*Nous tenons à remercier les membres de jury, le président et l'examineur pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre travail ; vos remarques et suggestions ne feront que rehausser la qualité de cette étude et de ce manuscrit.*

*Nous remercions également Mr **HAMOUDI. Y**, doctorant au niveau du laboratoire LMER de l'université de Bejaia pour son aide précieuse.*

*Nous remercions aussi Mr **HAMMACHE. H** doctorant au niveau de l'université de Bejaia, d'avoir réalisé la machine asynchrone à triple étoile.*

*Nous remercions nos familles et nos amis pour leur aide, soutien et encouragement durant notre cursus universitaire, ainsi que toute personne ayant participé de près ou de loin dans notre formation et à tous ceux qui nous ont soutenus depuis le début pour arriver là où nous sommes aujourd'hui, merci d'avoir cru en nous.*

---

---

# *Dédicace*

---

*Je dédie ce modeste travail :*

*À la mémoire de ma grand-mère maternelle.*

*À mes très chers parents, qu'ils m'ont aidé durant mes études, la  
profonde gratitude, leurs consécration et leurs sacrifices.*

*À mon frère Salah et sa femme Maya, à ma sœur Ahlia ainsi que son  
mari Farid.*

*À ma grand-mère paternelle.*

*À toute ma famille et amis qui ont contribué de près ou de loin à la  
réalisation de mon projet.*

*À tout le groupe de machines électriques.*

*À mon binôme Aimen.*

*Mes dédicaces ne seront pas complètes sans cité ma chère BAYA.*

**BENSMAIL. K**

---

---

# Dédicace

---

*Je dédie ce travail,  
Spécialement à **mes parents**, qui ont cru en moi et qui m'ont donné les  
moyens d'aller aussi loin. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous  
avez consentis pour mon éducation et ma formation.*

*À mon frère et mes sœurs : **Oussama, nawel** et **Ines**, les mots ne  
suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection  
que je porte pour vous. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de  
bonheur, de santé et de réussite.*

*À mon cher oncle : **Azouz** et sa femme **houda** Merci pour votre  
présence et votre soutien.*

*Sans oublier Mon chère ami : **koceila** ainsi que toute **sa famille**.*

*Pour finir j'adresse mes remerciements à mes amis: **Nadjim, Juba,**  
**Kaci, Fayçal, Larbi, Ali , Nourddine, Nabil, Aissa, Ahcen,**  
**Malek, Sadek**, à tous les étudiants de la promotion 2021/2022  
Et à tous ceux qui me sont chers.*

**GUENAOUI. A**

---

---

# SOMMAIRE

---

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

<b><i>Chapitre I : Généralités sur les machines multiphasées</i></b>
--

I.1 Introduction .....	3
I.2 Histoire de la machine asynchrone.....	3
I.3 Machine asynchrone.....	3
I.3.1 Définition.....	3
I.3.2 Constitution de la machine asynchrone .....	4
I.4 Machines multiphasées .....	5
I.4.1 Machines multiphasées de « Type 1 ».....	5
I.4.2 Machines multiphasées de « Type 2 ».....	6
I.6 Domaine d'application .....	8
I.7 Avantages des machines multiphasées.....	9
I.7.1 Segmentation de puissance .....	9
I.7.2 Fiabilité.....	9
I.7.3 Élimination d'harmonique d'espace .....	10
I.7.4 Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques .....	10
I.8 Inconvénients des machines multiphasées .....	10
I.8.1 Courants harmoniques de circulation .....	10
I.8.2 Coût .....	10
I.8.3 Commande.....	11
I.9 Conclusion.....	11

<b><i>Chapitre II : Identification de la machine asynchrone à triple étoile</i></b>
---

II.1 Introduction.....	12
II.2 Description de banc d'essai .....	12
II.2.1 Présentation de la machine étudiée .....	12
II.2.2 Mise en point de la machine asynchrone à triple étoile .....	14
II.2.3 Matériels utilisés .....	16
II.2.4 Problèmes rencontrés .....	17
II.2.5 Schéma de bobinage de la machine étudiée .....	18

---

II.3 Identification des paramètres électriques et mécaniques .....	21
II.3.1 Schéma électrique équivalent de la machine étudiée .....	21
II.3.2 Détermination des paramètres électriques .....	21
II.3.3 Détermination des paramètres mécaniques .....	31
II.4 Résultats de l'identification de la machine étudiée .....	33
II.5 Conclusion .....	33

<b><i>Chapitre III : Modélisation et simulation de la machine étudiée</i></b>
---

III.1 Introduction .....	34
III.2 Description de la machine asynchrone à multi-étoile.....	34
III.3 Hypothèses simplificatrices .....	35
III.4 Modèle de la machine asynchrone à multi-étoile dans le repère naturel.....	36
III.5 Modélisation de la machine asynchrone à double étoile .....	38
III.5.1 Modèle de la MASDE dans le repère naturel (abc) .....	38
III.5.2 Avantages et inconvénients du modèle naturel (abc) .....	38
III.5.3 Modèle biphasé de la machine asynchrone à double étoile .....	39
III.6 Modèle de la machine asynchrone à triple étoile dans le repère naturel .....	47
III.7 Simulation et interprétations de résultat de la MASDE .....	48
III.7.1 Simulation et interprétations de résultat dans le cas les deux étoiles identiques .....	49
III.7.2 Simulation et interprétations de résultant dans le cas les étoiles non identiques.....	53
III.7.3 Comparaisons des résultats .....	56
III.8 Simulation et interprétations des résultats de la machine asynchrone à triple étoile .....	56
III.9 Conclusion .....	59
 Conclusion générale .....	 60
 Bibliographie .....	 62

---

---

## Liste des figures

---

<i>Figure (I.1) : Constitution du moteur asynchrone à cage .....</i>	<i>4</i>
<i>Figure (I.2) : Différents types de rotor.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure (I.3) : Machines multiphasées de type « 1 » .....</i>	<i>6</i>
<i>Figure (I.4) : Machines multiphasées de type « 2 » .....</i>	<i>7</i>
<i>Figure (I.5) : Modes de fonctionnement d'une MAS suivant la vitesse.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure (I.6) : Exemple d'application d'une machine multiphasée .....</i>	<i>9</i>
<i>Figure (II.1) : Photo de la plaque à bornes.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure (II.2) : Photo de la machine étudiée avant la préparation .....</i>	<i>13</i>
<i>Figure (II.3) : Photo de la machine étudiée après la préparation .....</i>	<i>14</i>
<i>Figure (II.4) : Plaque signalétique de la machine utilisée à courant continu .....</i>	<i>14</i>
<i>Figure (II.5) : Alignement des deux machines n'est pas constatables .....</i>	<i>15</i>
<i>Figure (II.6) : Alignement des deux machines réalisées .....</i>	<i>15</i>
<i>Figure (II.7) : Photos du matériel utilisé dans les essais expérimentaux .....</i>	<i>17</i>
<i>Figure (II.8) : Photos des nouveaux matériels remplacés.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure (II.9) : Schéma de bobinage de l'étoile 1.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure (II.10) : Schéma de bobinage de l'étoile 2.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure (II.11) : Schéma de bobinage de l'étoile 3.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure (II.12) : Schéma équivalent de la machine étudiée.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure (II.13) : Couplage en triangle de la machine étudiée.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure (II.14) : Schéma de montage de la méthode volt-ampèremétrique.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure (II.15) : Graphe de la méthode de séparation des pertes .....</i>	<i>24</i>
<i>Figure (II.16) : Photo de banc d'essai lors de l'essai en synchronisme .....</i>	<i>25</i>
<i>Figure (II.17) : Schéma équivalent pour chaque étoile concernant l'essai en synchronisme</i>	<i>25</i>
<i>Figure (II.18) : Schéma équivalent à rotor bloqué de chaque étoile .....</i>	<i>30</i>
<i>Figure (II.19) : Courbe d'essai en ralentissement .....</i>	<i>32</i>

---

<i>Figure (III.1) : Schéma des enrôlements statoriques et rotoriques de la machine MASME...</i>	35
<i>Figure (III.2) : Représentation de la transformation des enroulements réels (abc) en enroulements orthogonaux (d, q).....</i>	39
<i>Figure (III.3) : Allure du couple électromagnétique.....</i>	49
<i>Figure (III.4) : Allure de la vitesse de rotation.....</i>	50
<i>Figure (III.5) : Courbe de tension et de courant statorique de l'étoile 1 .....</i>	51
<i>Figure (III.6) : Allure des courants rotoriques .....</i>	51
<i>Figure (III.7) : Allure des courants statoriques direct et en quadrature des deux étoiles.....</i>	52
<i>Figure (III.8) : Allure des flux rotoriques direct et en quadrature .....</i>	23
<i>Figure (III.9) : Allure du couple électromagnétique .....</i>	54
<i>Figure (III.10) : Courbes de la vitesse de rotation .....</i>	54
<i>Figure (III.11) : Courbes des courants statoriques .....</i>	55
<i>Figure (III.12) : Courbes des courants rotoriques.....</i>	56
<i>Figure (III.13) : Evolution des caractérisetiques de la machine asynchrone à triple étoile tel que : (a) :Couple électromagnétique ; (b) : Courants statoriques ; (c) : Vitesse de rotation ; (d) :Courants rotoriques.....</i>	58

---

---

## Liste des tableaux

---

<i>Tableaux (II.1) : Différentes configurations de bobinage de la machine étudiée.....</i>	<i>20</i>
<i>Tableaux (II.2) : Résultats obtenus pour la première étoile .....</i>	<i>22</i>
<i>Tableaux (II.3) : Résultats obtenus pour la deuxième étoile.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableaux (II.4) : Résultats obtenus pour la troisième étoile.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableaux (II.5) : Résultats obtenus avec l'essai à vide.....</i>	<i>24</i>
<i>Tableaux (II.6) : Résultats obtenus pour la première étoile .....</i>	<i>26</i>
<i>Tableaux (II.7) : Résultats obtenus pour la première étoile .....</i>	<i>27</i>
<i>Tableaux (II.8) : Résultats obtenus pour la deuxième étoile.....</i>	<i>28</i>
<i>Tableaux (II.9) : Résultats obtenus pour la deuxième étoile.....</i>	<i>28</i>
<i>Tableaux (II.10) : Résultats obtenus pour la troisième étoile.....</i>	<i>29</i>
<i>Tableaux (II.11) : Résultats obtenus dans l'essai en court-circuit pour l'étoile 1 .....</i>	<i>30</i>
<i>Tableaux (II.12) : Résultats obtenus dans l'essai en court-circuit pour l'étoile 2.....</i>	<i>30</i>
<i>Tableaux (II.13) : Résultats obtenus dans l'essai en court-circuit pour l'étoile 3.....</i>	<i>31</i>
<i>Tableaux (II.14) : Paramètres de la machine asynchrone à triple étoile .....</i>	<i>33</i>

---

---

## Liste des symboles

---

$C_{em}$	Couple électromagnétique	(N.m)
$C_r$	Couple résistant	(N.m)
$E$	Tension continue	(V)
$f_s$	Fréquence de réseau	(Hz)
$i_r$	Courants rotoriques	(A)
$i_{s1}, i_{s2}$	Courants statoriques ( l'étoile 1 et 2)	(A)
$i_{ds1}, i_{qs1}$	Courants de l'étoile 1 dans les axes (d, q)	(A)
$i_{ds2}, i_{qs2}$	Courant de l'étoile 2 dans les axes (d, q)	(A)
$i_{dr}, i_{qr}$	Courants rotoriques dans les axes (d, q)	(A)
$[i_{s1}], [i_{s2}], [i_r]$	Vecteurs des courants statoriques et rotoriques	(A)
$J$	Moment d'inertie des parties tournantes	(kg.m <sup>2</sup> )
$f$	Coefficient de frottement visqueux	(N.m.s/rd)
$l_{s1}$	Inductance de fuite de l'étoile 1	(H)
$l_{s2}$	Inductance de fuite de l'étoile 2	(H)
$l_{s3}$	Inductance de fuite de l'étoile 3	(H)
$L_{sr}$	Inductance mutuelle cyclique entre l'un des étoiles et le rotor	(H)
$L_m$	Inductance mutuelle cyclique étoile 1, étoile 2 et le rotor	(H)
$L_{ms}$	Inductance mutuelle cyclique statorique	(H)
$L_{mr}$	Inductance mutuelle cyclique rotorique	(H)
$L_r$	Inductance de fuite de rotor	(H)
$p$	Nombre de paires de pôles	
$q$	Nombre d'encoche par pôles et par phase	

---

$q$	Nombre de phase	
$q_\alpha$	Nombre équivalent de phase	
$R_{s1}$	Résistance d'une phase statorique de l'étoile 1	( $\Omega$ )
$R_{s2}$	Résistance d'une phase statorique de l'étoile 2	( $\Omega$ )
$R_r$	Résistance d'une phase rotorique	( $\Omega$ )
$R_m$	Résistance de magnétisation	( $\Omega$ )
$t$	Temps	(s)
$v_r$	Tension rotorique	(V)
$v_{s1}, v_{s2}$	Tensions statoriques ( l'étoile 1 et 2)	(V)
$v_{ds1}, v_{qs1}$	Tensions de l'étoile 1 dans les axes (d, q)	(V)
$v_{ds2}, v_{qs2}$	Tensions de l'étoile 2 dans les axes (d, q)	(V)
$v_{dr}, v_{qr}$	Tensions rotoriques dans les axes (d, q)	(V)
$[v_{s1}], [v_{s2}], [v_r]$	Vecteurs des courants statoriques et rotoriques	(V)
$W_{mag}$	Energie magnétique	(J)
$\varphi_r$	Flux rotorique	(Wb)
$\varphi_{s1}, \varphi_{s2}$	Flux statoriques ( l'étoile 1 et 2)	(Wb)
$\varphi_{ds1}, \varphi_{qs1}$	Flux de l'étoile 1 dans les axes (d, q)	(Wb)
$\varphi_{ds2}, \varphi_{qs2}$	Flux de l'étoile 2 dans les axes (d, q)	(Wb)
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$	Flux rotoriques dans les axes (d, q)	(Wb)
$[\varphi_{s1}], [\varphi_{s2}], [\varphi_r]$	Vecteurs des flux statoriques et rotoriques	(Wb)
$\Omega_r$	Vitesse mécanique de rotation du rotor	(rd/s)
$N_s$	Vitesse de synchronisme	(tr/min)
$\omega_{coor}$	Vitesse angulaire de rotation du système d'axe biphasé par rapport au système d'axe triphasé	(rd/s)

---

$\omega_{gl}$	Pulsation électrique de glissement	(rd/s)
$\omega_r$	Pulsation électrique des grandeurs rotoriques	(rd/s)
$\omega_s$	Pulsation électrique des grandeurs statoriques	(rd/s)
$X_{s1}$	Réactance de l'étoile 1	( $\Omega$ )
$X_{s2}$	Réactance de l'étoile 2	( $\Omega$ )
$X'_r$	Réactance rotorique ramené	( $\Omega$ )
$X_m$	Réactance magnétisante	( $\Omega$ )
$X_M$	Réactance mutuelle de l'étoile 1 et l'étoile 2	( $\Omega$ )
$\alpha$	Angle électrique de décalage entre les deux étoiles	(rd)
$\theta_{s1}$	Position de l'axe d par rapport à l'étoile 1	(rd)
$\theta_{s2}$	Position de l'axe d par rapport à l'étoile 2	(rd)
$\theta_{gl}$	Position de l'axe d par rapport au rotor	(rd)
$\tau_m$	Constante de temps mécanique	(s)
$\tau_p$	Nombre d'encoche par pole	
$\theta_e$	Angle électrique	(rd)
$\theta_m$	Angle mécanique	(rd)

**Notations**

MAS	Machine asynchrone
MASME	Machine asynchrone à multi-étoile
MASDE	Machine asynchrone à double étoile
MCC	Machine à courant continu

---

## **Introduction générale**

Au début de la révolution industrielle, le moteur à courant continu (MCC) a dominé le domaine de la traction et la production d'énergie électrique grâce à la simplicité de sa commande, et au large réseau à courant continu disponible à cette époque, mais son système balais collecteur réduits sa fiabilité, et augment le cout de maintenance. Pour cela plusieurs offres sont faites par des chercheurs pour trouver d'autre alternative, et parmi les solutions les plus remarquable en trouve les machines à courant alternative. À l'heure actuelle, ses derniers occupent une place importante dans la production d'énergie électrique et les entraînements électriques. Cela est dû au développement rapide de la technologie de l'électronique de puissance et au développement de la commande numérique. Plusieurs types de machines à courant alternative ont été conçues et appliquées, mais grâce à leur grande robustesse et leur simplicité de construction, les machines asynchrones à cage d'écureuil sont classées parmi les meilleures d'entre elles.

Dans le domaine des entraînements électriques, les machines asynchrones triphasées permettent la transformation électrique-mécanique et vis-versa. Elles sont depuis longtemps largement disponibles en standard dans l'industrie et elles occupent une place importante dans la production de l'énergie électrique et l'entraînement électrique. Cependant, ces machines offrent une simplicité de construction grâce à l'absence du collecteur mécanique, des bonnes performances telles que la fiabilité, la robustesse, l'entretien facile et son prix raisonnable [01] [02].

Les machines asynchrones à cage alimentées par des convertisseurs statiques trouvent de plus en plus d'applications, mais les contraintes subies par les composants d'électronique de puissances limitent la fréquence de commutation, et donc ces performances. Parmi les solutions proposées pour ce problème on trouve la segmentation de la puissance en augmentant le nombre de phase de la machine on parle donc des machines multiphasées [03] [04].

C'est pourquoi nous nous sommes fixés comme objectifs d'étudier et d'analyser ce type de machine, et pour ce faire nous avons suivi ces étapes :

- Choisir un modèle mathématique de la machine à multi-étoile.
- Mise en place d'un banc d'essai d'une machine asynchrone à triple étoile afin d'identifier ces paramètres.

- Simulation de cette machine dans l'environnement MATLAB pour plusieurs configurations et interprétation des résultats.

Pour permettre aux lecteurs de suivre le cheminement de notre raisonnement, nous avons structuré notre mémoire en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation des généralités sur les machines asynchrone multiphasées dans lequel sont illustrées, au passage, les avantages, les inconvénients et les domaines d'application.

Le second chapitre est dédié à la mise en œuvre de quelques méthodes de mesure et d'identification des paramètres électriques et mécaniques de la machine sur la base des résultats obtenus à partir des essais opérés en courant continu, à vide, en synchronisme et à rotor bloqué.

Le dernier chapitre est réservé exclusivement, à l'analyse et l'interprétation des résultats de simulation de comportement de la machine asynchrone à multi-étoile pour plusieurs configuration, à savoir : machine asynchrone à double étoile ; machine asynchrone à triple étoile, afin de suivre leurs comportements dans les deux cas d'étude (étoiles identiques, étoiles non identiques) selon les deux repères (naturelle (abc), d'axes (d, q)), à l'aide d'un outil de simulation logiciel MATLAB/Simulink.

Une conclusion finale vient, couronné l'ensemble des chapitres présentés dans cette étude, où un rapport sur les objectifs atteints est dressé et les perspectives envisagées sont révélées et confiées.

---

# Chapitre I : Généralités sur les machines multiphasées

---

## I.1 Introduction

Dans le domaine de la vitesse variable, l'utilisation de la machine multiphasée est due à ses multiples avantages tels que sa robustesse, la simplicité de sa structure, etc. En raison de la fiabilité et segmentation de puissance, les machines multiphasées sont de plus en plus utilisées dans les applications électriques de forte puissance et les domaines exigent une excellente continuité de service.

Dans ce chapitre, nous avons commencé par une présentation des différentes structures des machines asynchrones multiphasées et leurs types tout en citant leurs avantages et inconvénients.

## I.2 Histoire de la machine asynchrone

En 1888, Invention du premier moteur à courant alternatif par Nikola Tesla qui a joué un rôle majeur dans le développement de l'industrie électrique.

En 1889, l'Allemand Michael Dolivo-Dobrowolski a réalisé la première machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil qui domine assez largement le domaine des machines électriques. Ses avantages sont la plus simple à fabriquer, la moins coûteuse, la moins exigeante en termes d'entretien, présente un taux de défaillance très peu élevé, fabriquée en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances, etc [05].

À partir de la fin des années vingt, les machines à deux enroulements triphasés au stator sont introduites pour développer la puissance des alternateurs synchrones de très et les machines asynchrones multiphasées [06].

## I.3 Machine asynchrone

### I.3.1 Définition

Le moteur asynchrone est une machine à courant alternatif pour lequel la vitesse de rotation de l'arbre est différente de la vitesse de rotation du champ, ne disposant d'aucune connexion entre son rotor et son stator. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent.

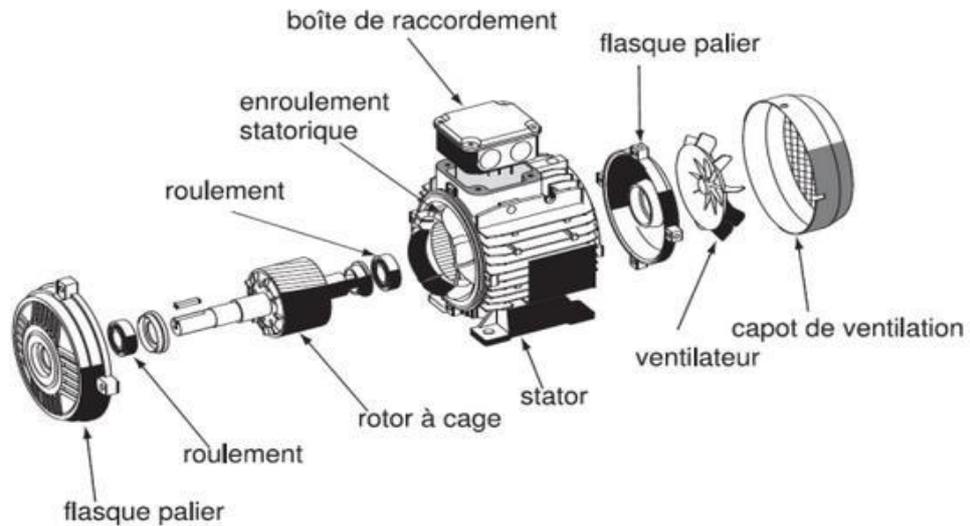
La vitesse est donnée par l'équation suivante :

$$N_s = \frac{60f_s}{P} \quad (\text{I.1})$$

---

### I.3.2 Constitution de la machine asynchrone

Les différentes parties d'une machine asynchrone sont illustrées dans la figure (I.1).



**Figure (I.1) :** Constitution du moteur asynchrone à cage

Elle est constituée d'une partie fixe (stator) et d'une partie tournante (rotor) magnétiquement couplées.

#### *a) Stator*

Le stator comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles minces identiques en forme de couronne qui constituent un cylindre vide, ces tôles sont percées de trous à leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles on loge un bobinage monophasé, biphasé, triphasé ou multiphasé. Cette couronne est serrée dans une carcasse en fonte.

#### *b) Rotor*

Le rotor porte l'enroulement dans lequel doit circuler les courants induits. En pratique, on distingue généralement deux types de rotor de la MAS.

##### ➤ *Rotor à cage d'écureuil*

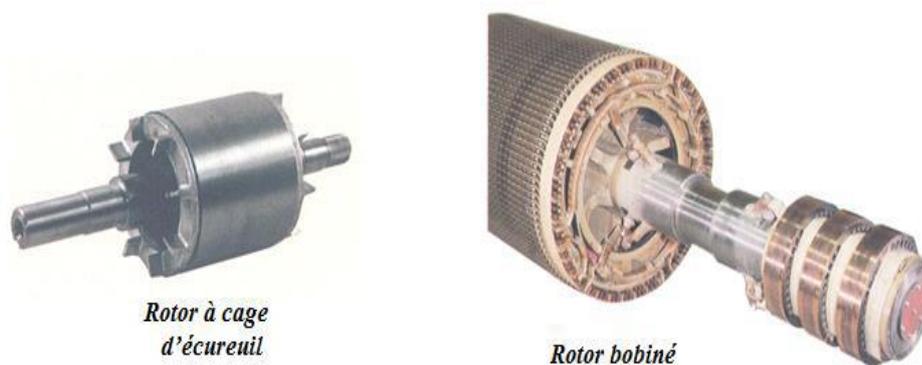
L'enroulement du rotor à cage d'écureuil est constitué de barres de cuivre nues introduites dans les encoches, ces barres sont soudées ou rivées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent. L'ensemble ressemble à une cage d'écureuil d'où le nom de

rotor à cage d'écureuil. Dans les moteurs de petite et moyenne puissance, les barres et les anneaux sont formés d'un seul bloc d'aluminium coulé.

### ➤ *Rotor bobiné*

Le rotor bobiné comprend un bobinage triphasé, semblable à celui du stator, placé dans les encoches. Il est composé d'enroulement de trois phases raccordées généralement en étoile avec un neutre flottant, l'extrémité libre de chaque phase est reliée à une bague tournante avec l'arbre. Ces bagues permettent, par l'intermédiaire de trois balais, d'insérer un rhéostat ou un convertisseur statique avec l'enroulement rotorique.

Les différents types de rotor sont illustrés dans la figure (I.2).



*Figure (I.2) : Différents types de rotor*

## I.4 Machines multiphasées

Habituellement, on distingue deux types de machines multiphasées selon le nombre de phases statoriques (un multiple de trois), on peut les classer en deux groupes « machines multiphasées de type 1 » et « machines multiphasées de type 2 » [07].

### I.4.1 Machines multiphasées de « Type 1 »

Les machines multiphasées de type « 1 » possèdent un nombre de phases statoriques «  $q$  » multiple de trois tel que :

$$q = 3n \quad (I.2)$$

En général, il est préférable d'avoir autant de neutres que d'étoiles en fonctionnement normal [08].

À noter que pour un même nombre de phases plusieurs configurations sont possibles, suivant le décalage angulaire ( $\alpha$ ) entre deux bobines adjacentes qui n'est autre que le décalage angulaire entre deux étoiles [08][09].

Pour se différencier entre les configurations possibles, il s'avère donc nécessaire d'introduire un coefficient nommé « nombre équivalent de phases » avec  $\alpha$  étant l'angle de décalage entre deux phases. Le coefficient est donné par la formule suivante :

$$q_\alpha = \frac{\pi}{\alpha} \tag{I.3}$$

Pour plus de compréhension, quelques configurations possibles sont illustrées par la figure (I.3) [06].

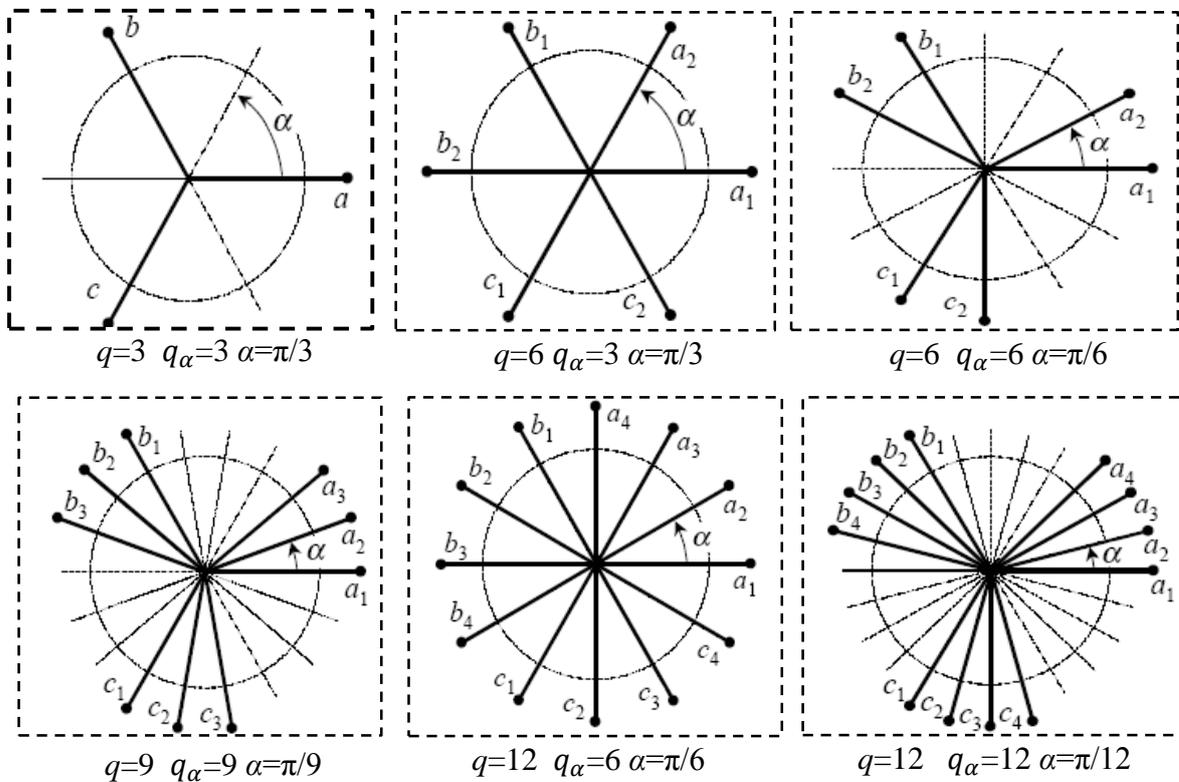


Figure (I.3) : Machines multiphasées de type « 1 »

$q$  : Nombre de phases       $q_\alpha$  : Nombre équivalent de phases       $\alpha$  : Décalage angulaire.

### I.4.2 Machines multiphasées de « Type 2 »

Les machines multiphasées type « 2 » regroupent les machines multiphasées ayant un nombre de phases statoriques «  $q$  » impair. Les «  $q$  » phases sont décalées d'un angle de  $\ll \frac{2\pi}{q} = 2\alpha \gg$  avec  $\alpha$  représentant le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes.

$$q = q_\alpha = \frac{\pi}{\alpha} \tag{I.4}$$

La figure (I.4) résume quelques configurations de machine multiphasées de type « 2 » [06].

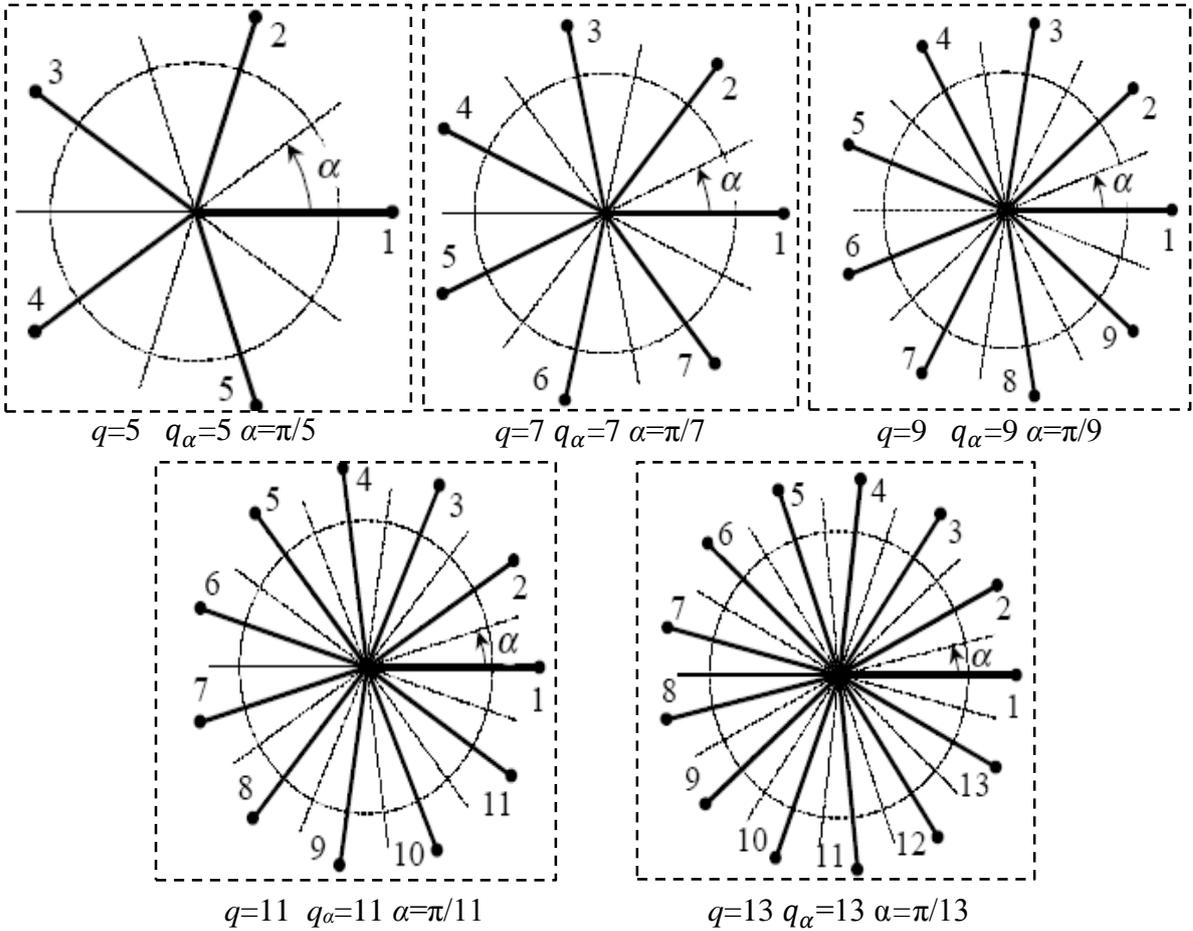


Figure (I.4) : Machines multiphasées de type « 2 »

$q$  : Nombre de phases       $q_\alpha$  : Nombre équivalent de phases       $\alpha$  : Décalage angulaire.

### I.5 Principe de fonctionnement de la machine multiphasée

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statorique, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée la vitesse de synchronisme.

Elle est définie comme suite [07] :

$$W_s = \frac{2\pi f_s}{P} \tag{I.5}$$

Ces deux champs tournants produisent par les deux enroulements statoriques vont induire des courants dans les barres du rotor. Ainsi générant des forces électromotrices qui feront tourner le rotor à une vitesse inférieure à celle du synchronisme ( $W_r < W_s$ ).

La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est nommée la vitesse de glissement  $\omega_{gl}$  qui est définie comme suite :

$$g = \frac{\omega_{gl}}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \tag{I.6}$$

La figure (I.5) représente les différentes caractéristiques de fonctionnement dépendant de la vitesse.

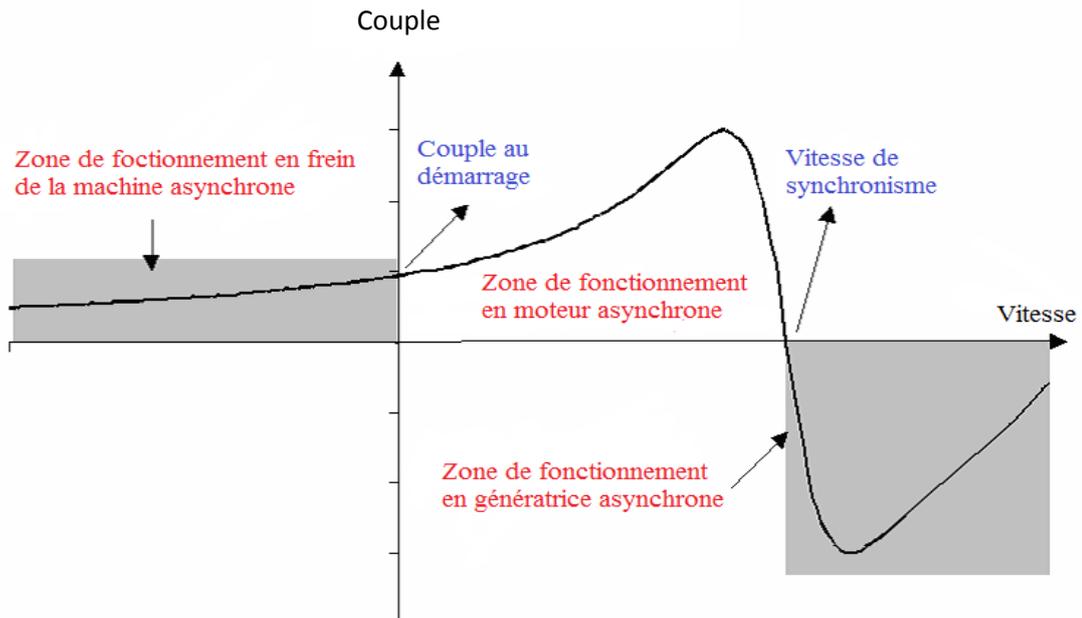


Figure (I.5) : Allure de couple utile en fonction de la vitesse

### I.6 Domaine d’application

Les machines multiphasées sont plus en plus utilisées du fait qu’elles assurent un fonctionnement en mode dégradé.

Aujourd’hui, la machine multiphasée est utilisée dans la traction ferroviaire et automobile, la marine, l’avionique et l’aérospatial offrant ainsi une sécurité supplémentaire du point de vue fonctionnement, couple, vibration et bruit [06].

Dans l’industrie, ces machines sont utilisées pour entrainer les pompes, ventilateurs, compresseurs et moulins des compresseurs, etc.

Une autre application concerne de multiphasée dans les systèmes de production de l’énergie éolienne, elle génère de l’énergie à travers deux systèmes triphasés connectés à un transformateur pour adapter les tensions des six phases aux tensions des réseaux qui sont résumées dans la figure (I.6) [10].

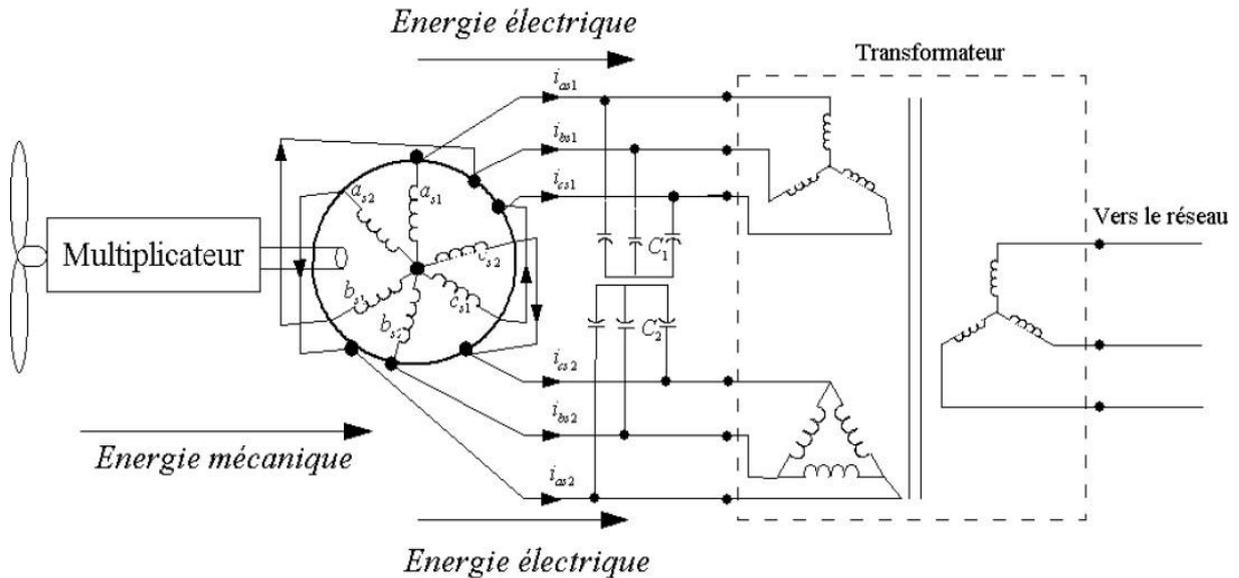


Figure (I.6) : Exemple d'application d'une machine multiphasée [10]

## I.7 Avantages des machines multiphasées

Les machines multiphasées sont plus avantageuses que celles conventionnelles (triphases). Parmi ces avantages, nous citons la segmentation de puissance, la fiabilité, l'élimination d'harmonique d'espace et la minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques.

### I.7.1 Segmentation de puissance

A puissance donnée, lorsqu'on augmente le nombre de phases, on diminue le courant par phase sans augmenter la tension par phase. La segmentation de puissance dans les machines multiphasées permet de réduire les courants de phases sans augmenter les tensions par phases et par conséquent sur les courants à travers les semi-conducteurs constituant les convertisseurs statiques alimentant ces machines [08].

### I.7.2 Fiabilité

La fiabilité de la machine multiphasée est plus élevée que celle de la machine triphasée, car l'augmentation de nombre de phases donnera pour le système une fonction risque très petite que celle de la machine triphasée. Même si un des enroulements ou un des deux onduleurs soit hors d'usage pour une raison quelconque, le moteur a la possibilité de continuer à tourner avec l'autre enroulement. Cette caractéristique revêt un grand intérêt dans certaines applications (traction navale, traction ferroviaire, etc.) [11].

### I.7.3 Élimination d'harmonique d'espace

Plus la valeur de  $q_\alpha$  (nombre équivalent de phase dont  $q_\alpha = \frac{\pi}{\alpha}$ ) est grande, plus les rangs des premiers harmoniques d'espace existants sont élevés. Ces derniers sont ceux de rang dix-sept et dix-neuf pour la machine à neuf phases par exemple. On peut ainsi éliminer les harmoniques cinq et sept, responsables d'un creux au voisinage du septième de la vitesse synchrone, dans la caractéristique couple/vitesse de certaines machines triphasées. Nous remarquons également que à un nombre d'encoches donné, plus le nombre de phases augmente, plus le nombre d'encoches par pôles et par phase diminue. Ce qui augmente le facteur de distribution pour le fondamental. À courant donné, on augmente donc l'amplitude du fondamental de la f.m.m, comparée au cas de la machine triphasée [08].

### I.7.4 Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques

Dans une machine triphasée, l'ondulation du couple électromagnétique dont la fréquence est six fois celle du fondamental est principalement créée par les harmoniques cinq et sept de temps. Mais dans une machine multiphasée, ces harmoniques ne créent pas de f.m.m, l'harmonique de couple de rang six est donc éliminé. Cette propriété des machines multiphasées à éliminer les harmoniques de couple de rang faible est aussi un avantage certain [08].

## I.8 Inconvénients des machines multiphasées

Cependant, la machine multiphasée présente certains inconvénients tels que :

### I.8.1 Courants harmoniques de circulation

L'alimentation de la machine asynchrone multiphasée directement par le réseau prive l'utilisateur d'un contrôle de la vitesse et du couple par une action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension statorique. Un tel contrôle est réalisable par l'utilisation d'un onduleur de tension qui, malheureusement, cause des harmoniques de courant d'amplitude importante [12].

### I.8.2 Coût

Le nombre d'éléments semi-conducteurs dont est constitué le convertisseur statique augmente avec l'augmentation du nombre de phases statoriques de la machine, ce qui augmente le coût de l'ensemble convertisseur-machine.

### **I.8.3 Commande**

Les machines multiphasées sont composées au moins de deux enroulements triphasés ce qui nécessite d'avoir deux convertisseurs (par exemple, deux onduleurs MLI ou deux autotransformateurs) avec un décalage entre les deux sources de  $30^\circ$  et de la commande en même temps et sa structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage entre le couple et le flux, ce qui complique sa commande [13].

### **I.9 Conclusion**

Ce chapitre a pour objectif de présenter quelques généralités sur les machines multiphasées qui concerne l'historique des machines électriques avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements notamment les machines multiphasées où on a distingué deux types de machines (type 1 et type 2) avec ses applications, ses avantages et ses inconvénients.

Compte tenu des recherches récentes, la machine asynchrone multiphasée la plus avantageuse que la machine asynchrone triphasée. Donc, il est très intéressant de pouvoir étudier cette dernière qui sera l'un des objectifs des chapitres suivants où on effectuera l'identification d'une machine asynchrone à triple étoile et décrit le modèle de simulation du système développé.

---

**Chapitre II : Identification de la machine asynchrone à triple étoile**

---

**II.1 Introduction**

La plaque signalétique où les données fournies par le constructeur ne sont pas assez suffisantes pour connaître directement ses paramètres. L'identification est une opération qui intervient pour les déterminer, il s'agit évidemment de déterminer aussi bien les paramètres électriques et mécaniques.

La méthode classique redonne au modèle mathématique défini avec des paramètres inductifs et résistifs que l'on doit identifier au préalable par des essais expérimentaux. Ces paramètres à identifier peuvent être classés en deux catégories ceux directement accessibles par la mesure et ceux qui sont obtenus indirectement.

Parmi les méthodes de détermination des paramètres de la machine asynchrone nous citons la méthode des essais classiques, autrement dit, essai à courant continu, essai à vide, essai en synchronisme et l'essai à rotor bloqué.

Ce chapitre est consacré à l'identification d'une machine asynchrone à triple étoile déjà réalisé au niveau de laboratoire de machines électriques de l'université de Bejaia.

**II.2 Description de banc d'essai**

Pour le besoin de notre étude, nous avons procédé à la mise en place d'un banc d'essai au sein du laboratoire de machines électriques qui sera bien détailler pat la suite.

**II.2.1 Présentation de la machine étudiée**

Les essais d'identifications sont effectués sur un prototype déjà réalisé, qui est une machine asynchrone triphasé à cage d'écureuil, subie des modifications au niveau du bobinage statorique tout en divisant la section des fils et en gardant le même nombre de spires.

Les modifications faites à cette machine a fait en sorte d'avoir une machine asynchrone à triple étoile en connectant celle-ci à une plaque à bornes comme le montre la figure (II.1), et cela pour avoir plusieurs configurations de bobinage en étoile décalé entre eux d'un angle  $\alpha$  (étoile 1 prend 50%, étoile 2 prend 30% et étoile 3 prend 20% de bobinage).

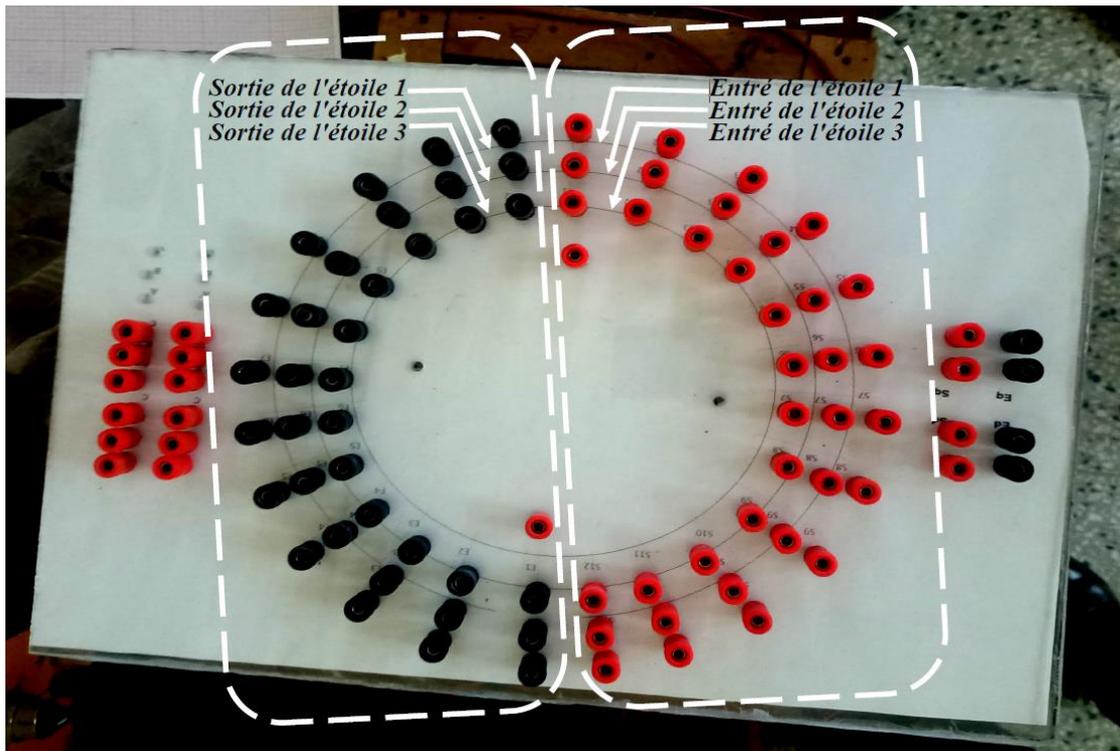


Figure (II.1) : Photo de la plaque à bornes

Sur ce constat de la machine, nous avons procédé à la remise en état des fils détériorés en mettant des gaines d'isolation et soudages ainsi les connectant à la plaque à bornes et l'isolement des câbles par une boîte en plexiglas comme le montre les figures (II.2) et (II.3).

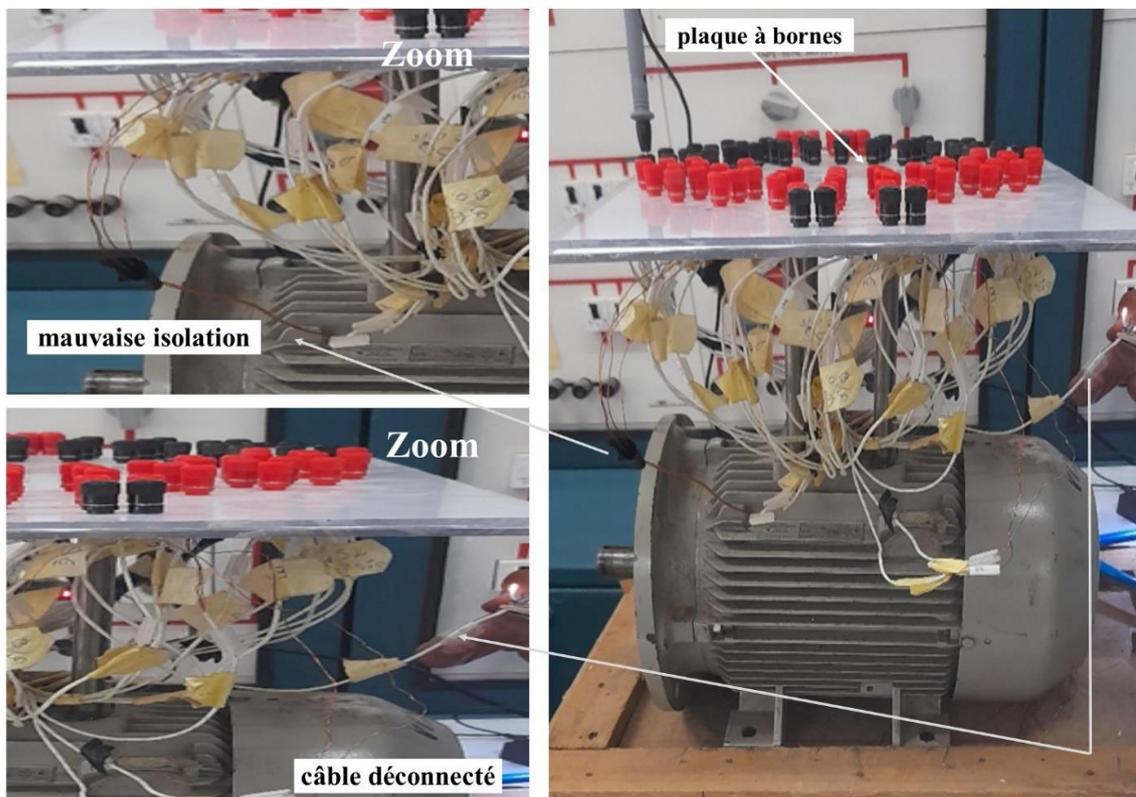


Figure (II.2) : Photo de la machine étudiée avant la préparation

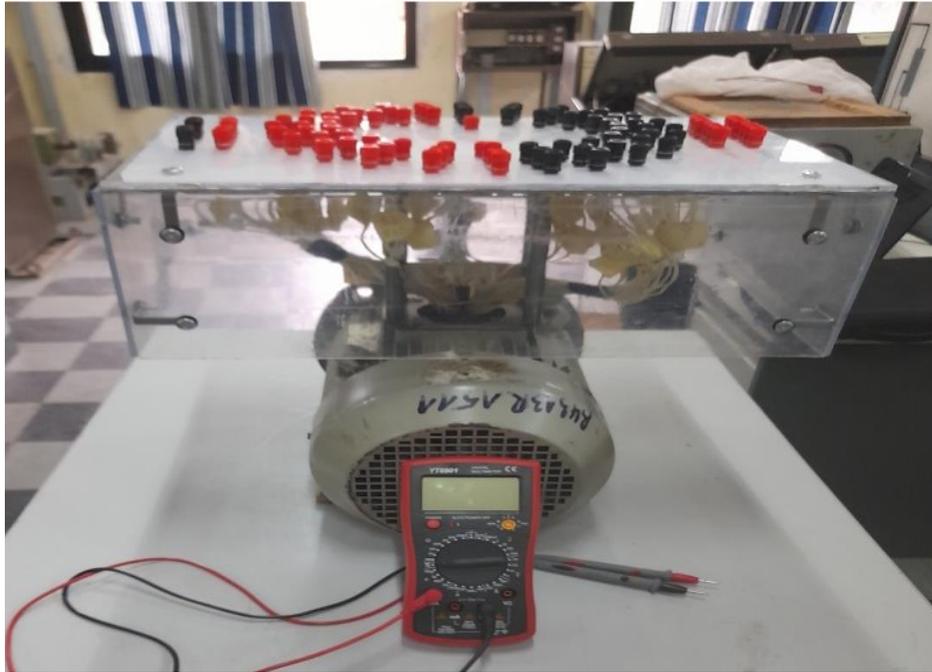


Figure (II.3) : Photo de la machine étudiée après la préparation

### II.2.2 Mise en point de la machine asynchrone à triple étoile

Nous avons réalisé certains paramètres et modifications afin que la machine étudiée atteigne la vitesse du synchronisme (3000 tr/mn), pour cela nous l'avons connecté à une machine à courant continu à excitation séparée déjà fixée sur place au laboratoire, mais l'alignement n'est pas constatable (différents hauteurs d'axe et diamètres des arbres de rotation), de ce fait nous avons construit un support pour la machine étudiée, pour que les deux machines soient alignées et qu'il n'y est pas de fortes vibrations, les différentes étapes de modifications sont représentées dans les figures (II.4) - (II.6) ci-dessous :

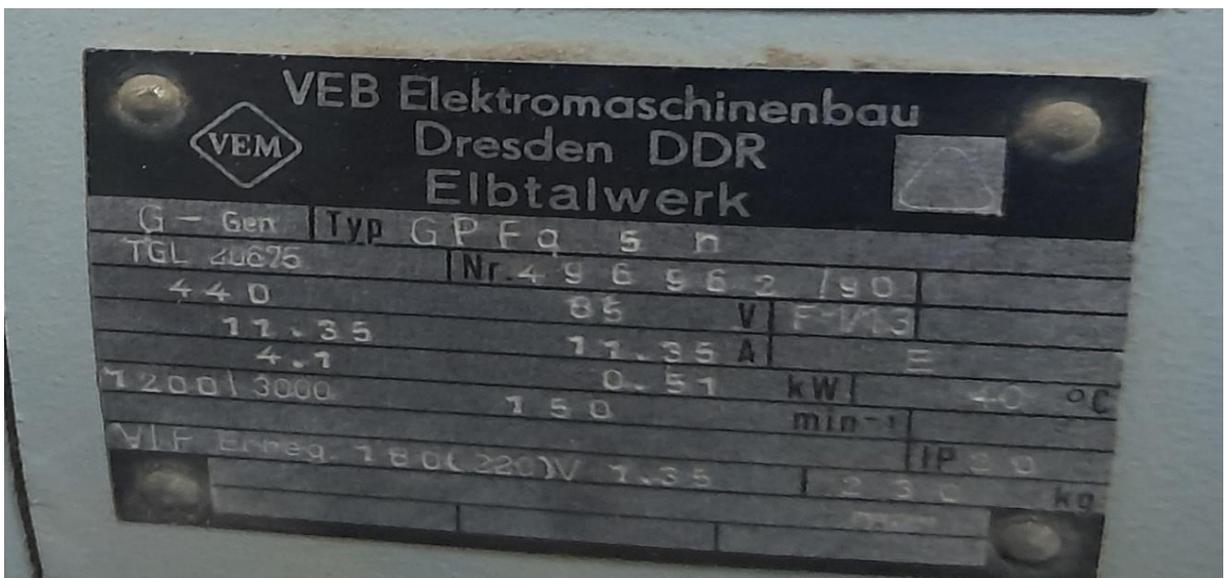


Figure (II.4) : Plaque signalétique de la machine utilisée à courant continu

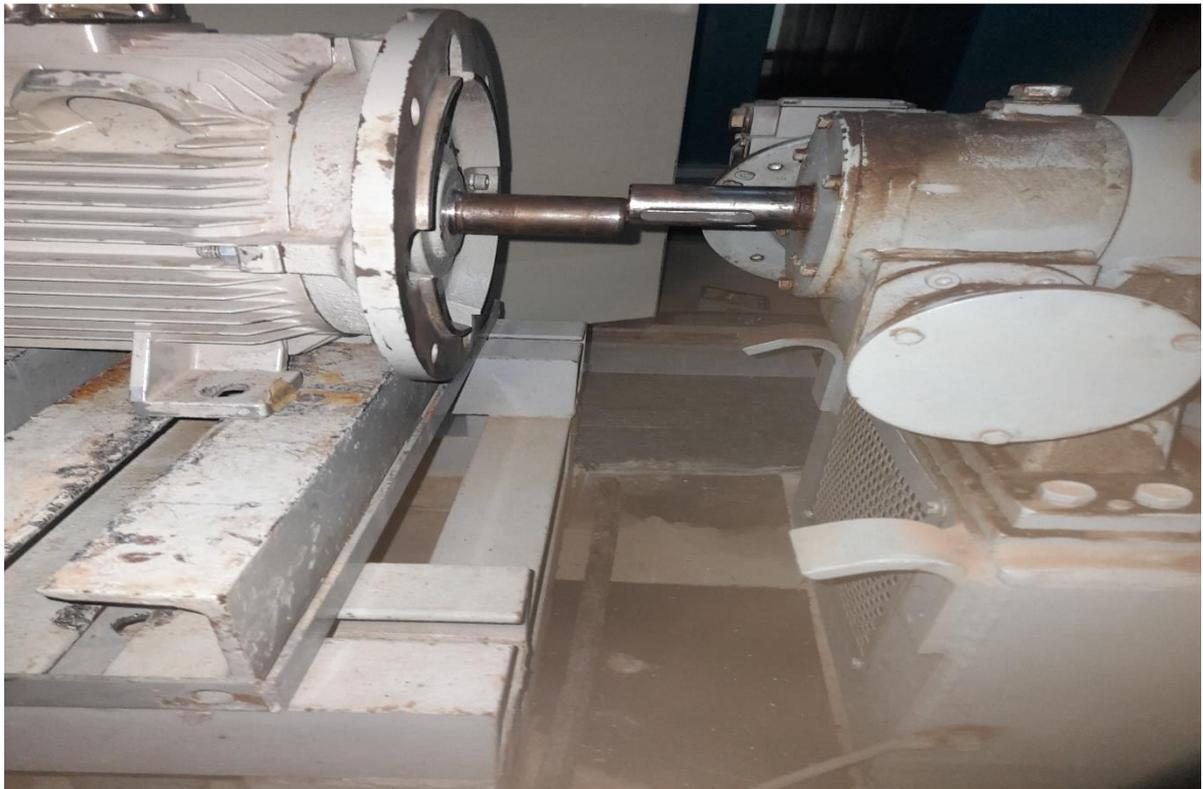


Figure (II.5) : Alignement des deux machines n'est pas constatables

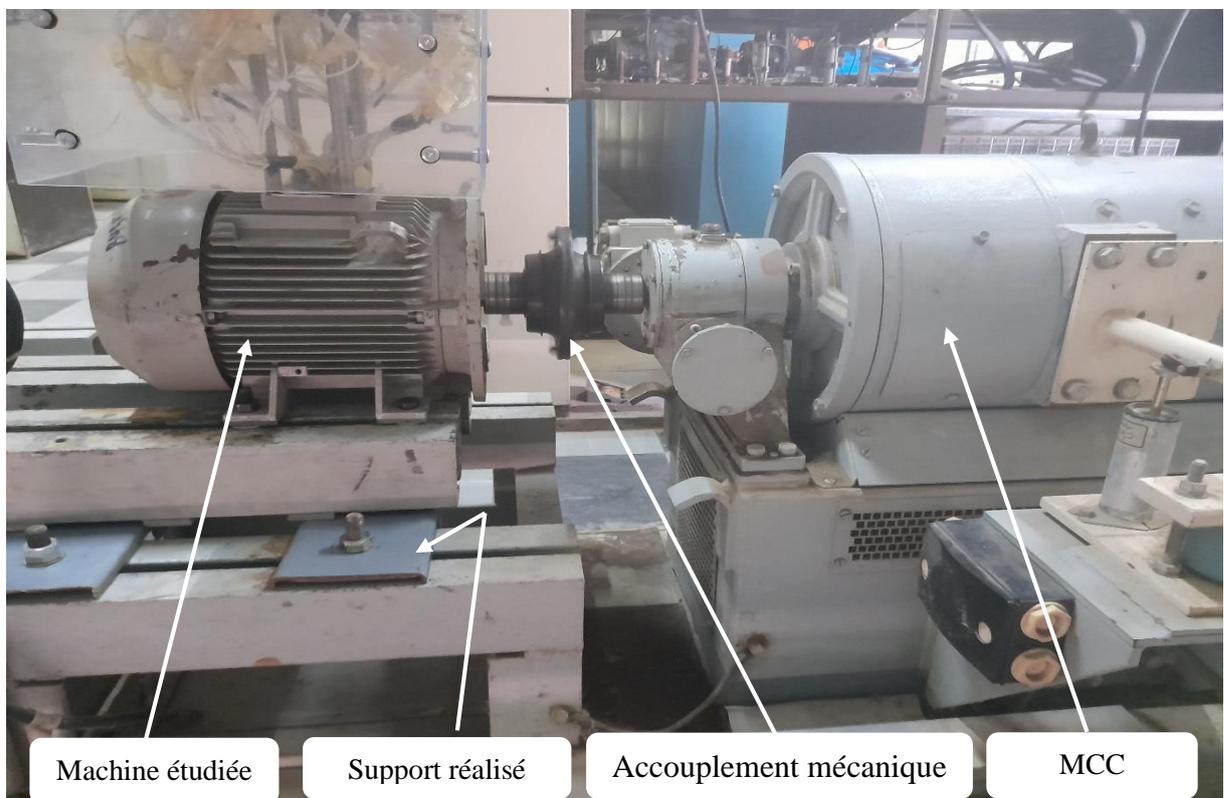


Figure (II.6) : Alignement des deux machines réalisées

Une fois l'alignement des deux machines est réalisé nous avons procédé à l'entraînement de la machine asynchrone via la MCC, en observant les points suivants :

- Avant de connecter la MCC à la machine asynchrone (à vide) la vitesse de 3000 tr/min est atteinte au défluxage maximale.
- Après qu'il y a la connexion entre ces deux machines, on observe que la vitesse de synchronisme diminue jusqu'à atteindre 2994 tr/min.

Dans ce cas de figure la condition pour commencer notre étude et procéder aux différentes mesures n'est pas satisfaisante, vu que la vitesse de synchronisme n'est pas atteinte.

De ce fait, nous avons opté pour une autre solution qui consiste à connecter la machine étudiée avec une machine synchrone à pôles lisses de 1.1 kW, là aussi on construit un autre support pour celle-ci puis on constate que la vitesse du synchronisme est atteinte.

### **II.2.3 Matériels utilisés**

Pour le bon déroulement de notre étude et afin d'avoir des résultats précis, notre choix du matériel est porté comme suit :

- a- Boite à outils
- b- Fer à souder
- c- Appareils de mesure (les pinces multi-métriques, voltmètres et ampèremètres)
- d- Multimètre
- e- Autotransformateurs pour la variation de la tension
- f- Sources à courant continu et à courant alternatif variables
- g- Tachymètre
- h- Dispositif de blocage pour faire l'essai à rotor bloqué
- i- Redresseurs PD3 pour l'alimentation de la machine à courant continu

La figure (II.7) ci-dessous représente le matériel utilisé dans les essais expérimentaux.



*Figure (II.7) : Photos du matériel utilisé dans les essais expérimentaux*

## II.2.4 Problèmes rencontrés

Lors des essais, nous avons constaté des pannes fréquentes au niveau du redresseur PD3 et à chaque fois on a dû intervenir afin de contourner ces pannes qui sont les suivantes :

- Des diodes défectueuses

Lors de l'essai, nous avons constaté un dépassement du courant supporté par la diode qui se suit par un échauffement de celle-ci, qui a rendu la diode défectueuse. On a procédé aux changements de celle-ci par des nouvelles et on les protège par une patte thermique.

- Panne au niveau de relais thermique

Pour la même raison que la diode cela a entraîné systématiquement un échauffement du relais thermique de ce fait on a dû le remplacer.

- Un bouton poussoir (marche) défectueux

Après quelques utilisations, on a constaté que le bouton est usé, de ce fait on a dû le remplacer.

La figure (II.8) suivante représente les nouveaux matériels qu'on a remplacés



Figure (II.8) : Photos des nouveaux matériels qu'est remplacés

### II.2.5 Schéma de bobinage de la machine étudiée

Le bobinage statorique des machines asynchrones de petites puissances, particulièrement lorsque le bobinage est mécanisé, on utilise généralement l'enroulement concentrique avec des encoches semi-ouvertes et de section du fil ronde. L'enroulement concentrique est un bobinage obligatoirement à couche unique, par contre l'enroulement imbriqué peut être un bobinage à simple couche, mais il est plus souvent à double couche.

Durant cette étude, la machine comporte trois couches de bobinage non identique, ce qui nous permet d'avoir plusieurs configurations, donc le choix de bobinage est le bobinage imbriqué à triple faisceaux par encoche. Le schéma de bobinage pour chaque étoile séparément est présenté dans les figures (II.9) - (II.11), le diamètre du fil est donné comme suit :

- Pour l'étoile 1 qui contient deux fils (double voie)

Fils	Sans vernis	Avec vernis
Fil 1	0.41 mm	0.48 mm
Fil 2	0.46 mm	0.53 mm

- Pour l'étoile 2 qui contient un fils (une seule voie)

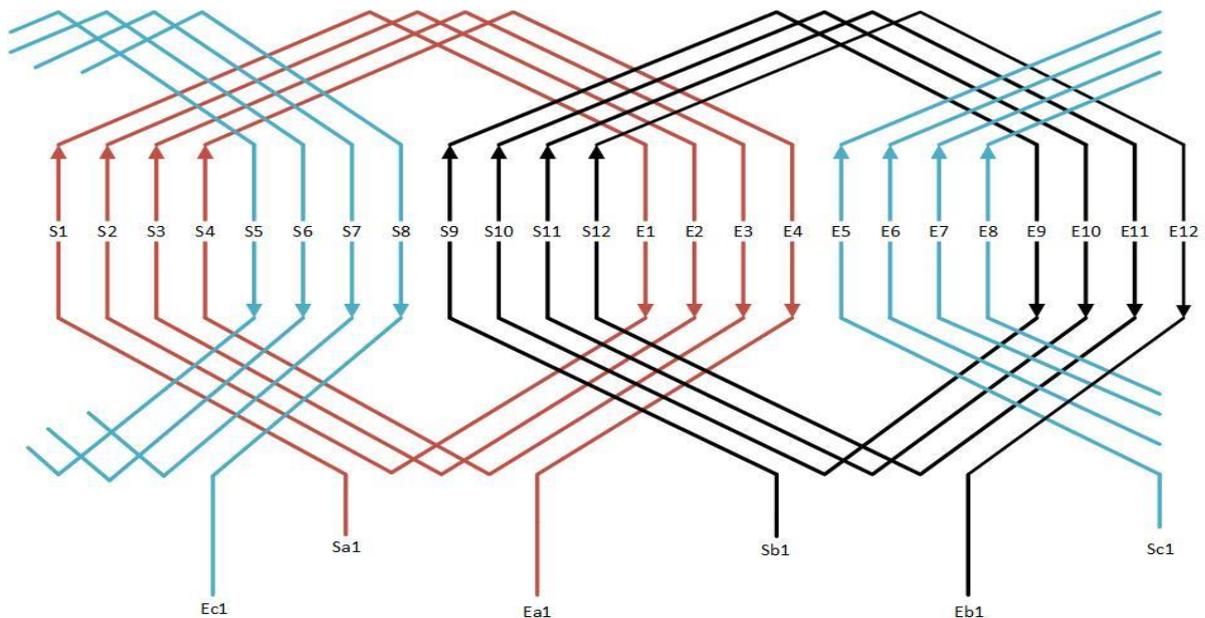
Fils	Sans vernis	Avec vernis
Fil 1	0.46 mm	0.53 mm

- Pour l'étoile 3 qui contient un fils (une seule voie)

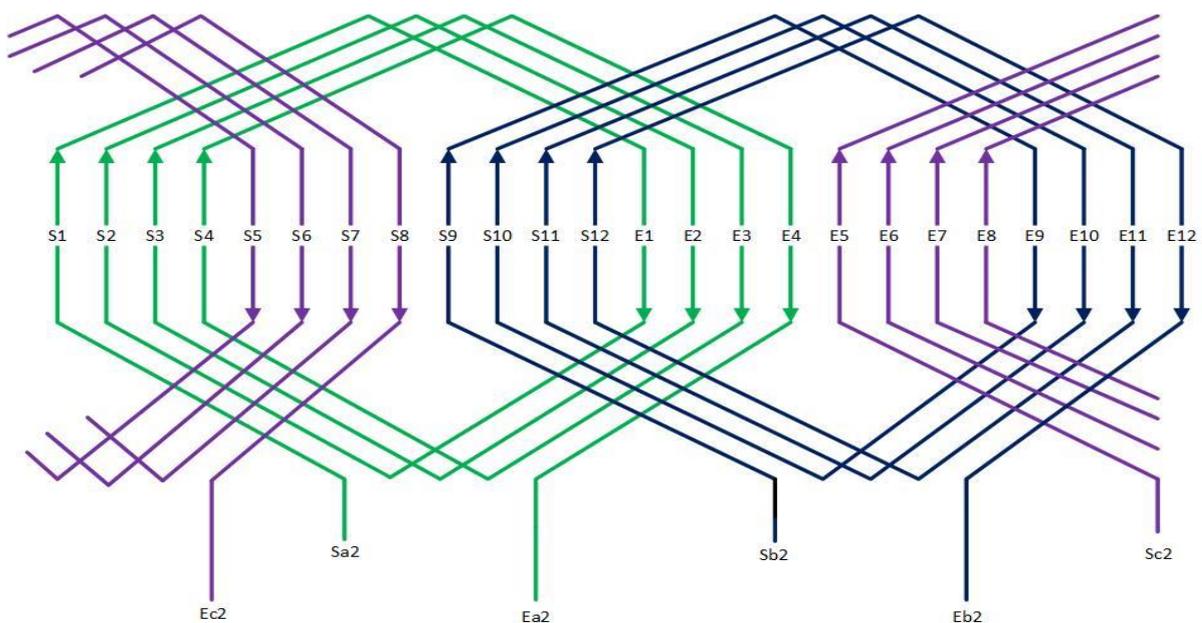
Fils	Sans vernis	Avec vernis
Fil 1	0.41 mm	0.48 mm

Pour : le nombre de pair de pôle  $P = 1$ , le nombre d'encoche  $Z=24$ , nombre de phase  $m = 3$ .

Avec : Angle mécanique  $\alpha_m = \frac{360}{Z} = 15^\circ$  ; Angle électrique  $\alpha_e = \alpha_m \cdot P = 15^\circ$  ; Nombre d'encoche par pôle  $\tau_p = \frac{Z}{2 \cdot P} = 12$  ; Nombre d'encoches par pôle et par phase  $q = \frac{Z}{2 \cdot P \cdot m} = 4$ .



*Figure (II.9) : Schéma de bobinage de l'étoile 1*



*Figure (II.10) : Schéma de bobinage de l'étoile 2*

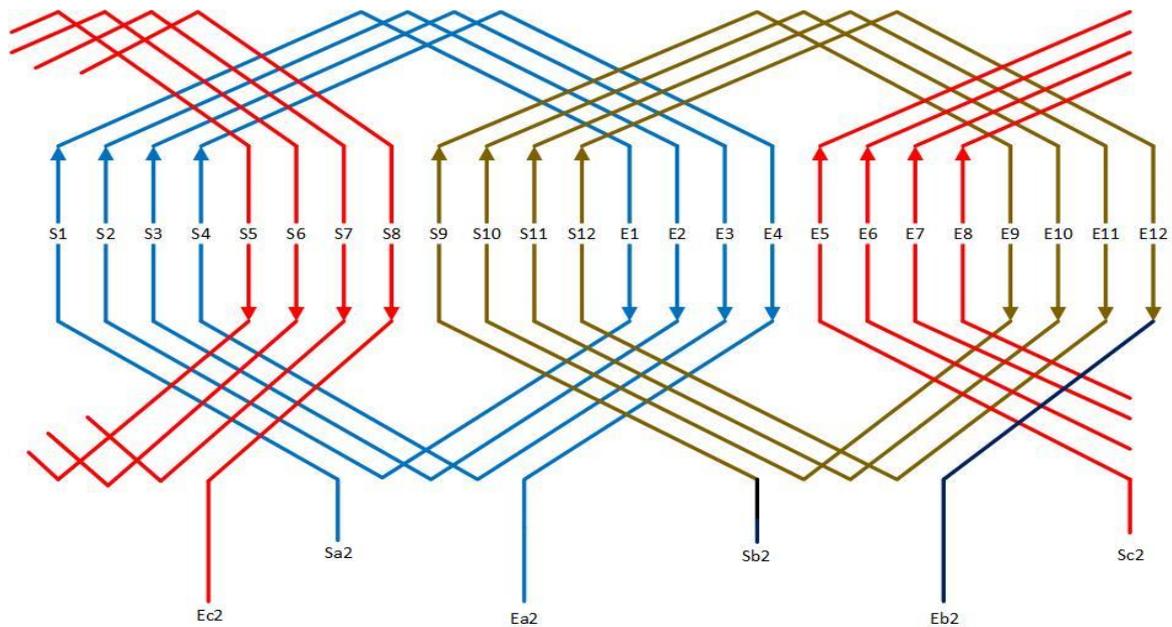


Figure (II.11) : Schéma de bobinage de l'étoile 3

Les différentes configurations de bobinage sont illustrées dans le tableau (II.1) tout en gardant l'étoile 1 comme référence.

Tableaux (II.1) : Différentes configurations de bobinage de la machine étudiée

Angle de décalage	Configurations possibles pour l'étoile 2 et l'étoile 3
$\alpha = 0^\circ$	Figures (II.10) et (II.11)
$\alpha = 15^\circ$	Sa : S02 → E02, S03 → E03, S04 → E04, S05 → E05 : Ea Sb : S10 → E10, S11 → E11, S12 → E12, E01 → S01 : Eb Sc : E06 → S06, E07 → S07, E08 → S08, E09 → S09 : Ec
$\alpha = 30^\circ$	Sa : S03 → E03, S04 → E04, S05 → E05, S06 → E06 : Ea Sb : S11 → E11, S12 → E12, E01 → S01, E02 → S02 : Eb Sc : E07 → S07, E08 → S08, E09 → S09, E10 → S10 : Ec
$\alpha = 45^\circ$	Sa : S04 → E04, S05 → E05, S06 → E06, S07 → E07 : Ea Sb : S12 → E12, E01 → S01, E02 → S02, E03 → S03 : Eb Sc : E08 → S08, E09 → S09, E10 → S10, E11 → S11 : Ec
$\alpha = 60^\circ$	Sa : S05 → E05, S06 → E06, S07 → E07, S08 → E08 : Ea Sb : E01 → S01, E02 → S02, E03 → S03, E04 → S04 : Eb Sc : E09 → S09, E10 → S10, E11 → S11, E12 → S12 : Ec
$\alpha = 75^\circ$	Sa : S06 → E06, S07 → E07, S08 → E08, S09 → E09 : Ea Sb : E02 → S02, E03 → S03, E04 → S04, E05 → S05 : Eb Sc : E10 → S10, E11 → S11, E12 → S12, S01 → E01 : Ec

### II.3 Identification des paramètres électriques et mécaniques

Parmi les méthodes de la détermination des paramètres de la machine asynchrone à cage, nous citons les méthodes des essais classiques après avoir évoqué le schéma équivalent de la machine asynchrone à triple étoile à cage.

#### II.3.1 Schéma électrique équivalent de la machine étudiée

On prend comme modèle le schéma en T présenté sur la figure (II.12), car c'est le modèle le plus habituel dans la littérature puisqu'il comporte des éléments qu'on peut identifier assez simplement, de manière suffisamment précise et il est simple à l'emploi.

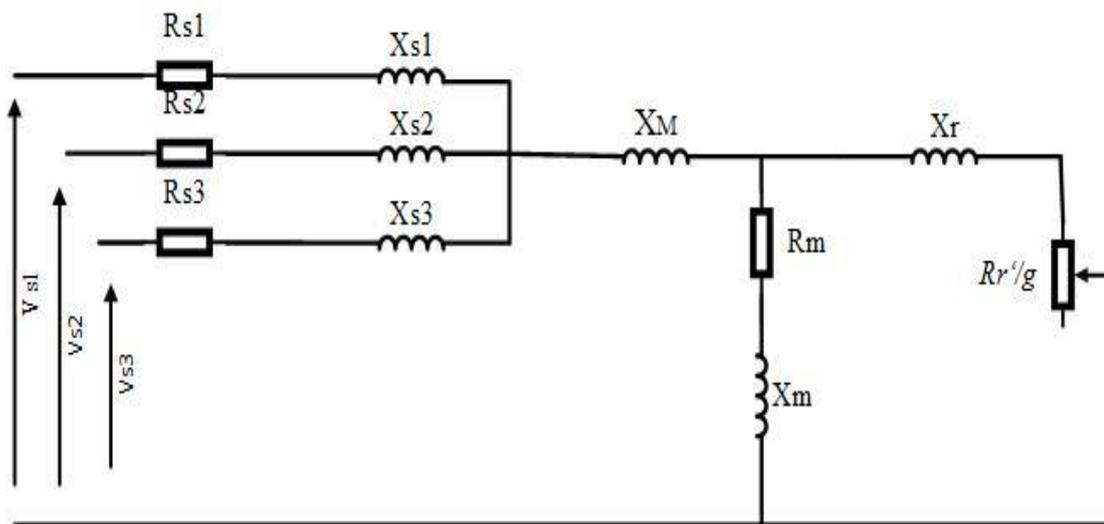


Figure (II.12) : Schéma équivalent de la machine étudiée

#### II.3.2 Détermination des paramètres électriques

Les essais envisagés permettent de déterminer tous les paramètres du schéma équivalent lorsque les enroulements statoriques sont connectés en étoile. Mais dans notre cas les enroulements de cette machine sont couplés en triangle, pour ne pas recourir une source d'alimentation de 660 V, la figure (II.13) représente le couplage en triangle dans le but d'effectuer les essais envisagés.

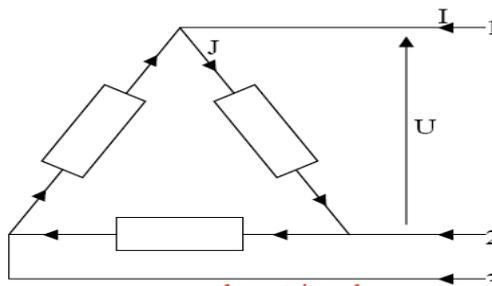


Figure (II.13) : Couplage en triangle de la machine étudiée

Donc :

$$J = \frac{I}{\sqrt{3}} \tag{II.1}$$

$J$  : Courant de phase ;  $I$  : Courant de ligne.

**a) Essai à courant continu**

L'objectif de cet essai est de relever les valeurs des résistances statoriques à chaud en utilisant la méthode volt-ampèremétrique alimenté en courant continu et cela pour chaque phase séparément et pour différentes valeurs de tension  $E$ , on réalise donc le montage aval de la méthode volt-ampérométrique pour une phase statorique représentée dans la figure (II.14).

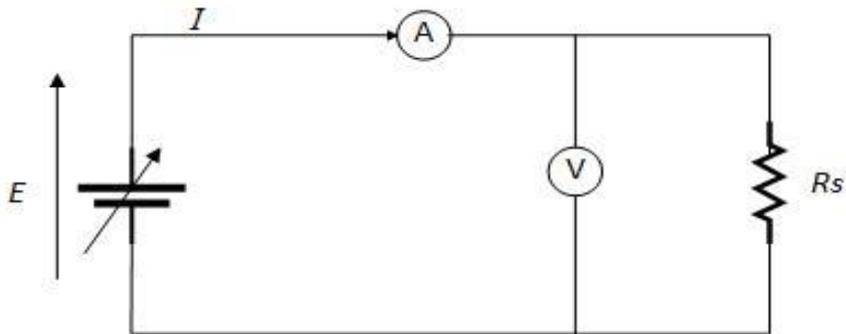


Figure (II.14) : Schéma de montage de la méthode volt-ampèremétrique

La valeur de la résistance est donnée par la loi d'Ohm :

$$R_s = \frac{E}{I} \tag{II.2}$$

➤ Pour l'étoile 1 :

Tableaux (II.2) : Résultats obtenus pour la première étoile

Phase a			Phase b			Phase c		
Tension (V)	Courant (A)	Résistance $R_{a1}(\Omega)$	Tension (V)	Courant (A)	Résistance $R_{b1}(\Omega)$	Tension (V)	Courant (A)	Résistance $R_{c1}(\Omega)$
2	0.22	9.09	2	0.21	9.52	2	0.19	10.52
5	0.56	8.93	5	0.54	9.26	5	0.51	9.80
7	0.79	8.86	7	0.77	9.09	7	0.74	9.46
10	1.13	8.85	10	1.09	9.17	10	1.09	9.17
13	1.47	8.84	13	1.38	9.42	13	1.43	9.09
15	1.69	8.87	15	1.58	9.49	15	1.65	9.09

$$R_{a1} = 8,90666667 \Omega ; R_{b1} = 9,325 \Omega ; R_{c1} = 9,52166667 \Omega$$

Donc

$$R_{s1} = \frac{R_{a1} + R_{b1} + R_{c1}}{3} = 9,25 \Omega$$

➤ Pour l'étoile 2 :

Tableaux (II.3) : Résultats obtenus pour la deuxième étoile

Phase a			Phase b			Phase c		
Tension (V)	Courant (A)	Résistance $R_{a2}(\Omega)$	Tension (V)	Courant (A)	Résistance $R_{b2}(\Omega)$	Tension (V)	Courant (A)	Résistance $R_{c2}(\Omega)$
2	0.12	16.67	2	0.12	16.66	2	0.13	15.38
5	0.32	15.63	5	0.31	16.13	5	0.32	15.62
7	0.44	15.9	7	0.44	15.9	7	0.45	15.55
10	0.63	15.87	10	0.63	15.87	10	0.64	15.62
13	0.82	15.85	13	0.82	15.85	13	0.83	15.66
15	0.95	15.79	15	0.95	15.79	15	0.96	15.62

$$R_{a2} = 15,9516667\Omega ; R_{b2} = 16,0333333\Omega ; R_{c2} = 15,575\Omega$$

Donc :

$$R_{s2} = \frac{R_{a2} + R_{b2} + R_{c2}}{3} = 15,85\Omega$$

➤ Pour l'étoile 3 :

Tableaux (II.4) : Résultats obtenus pour la troisième étoile

Phase a			Phase b			Phase c		
Tension (V)	Courant (A)	Résistance $R_{a3}(\Omega)$	Tension (V)	Courant (A)	Résistance $R_{b3}(\Omega)$	Tension (V)	Courant (A)	Résistance $R_{c3}(\Omega)$
2	0.1	20	2	0.1	20	2	0.08	25
5	0.26	19.23	5	0.26	19.23	5	0.2	25
7	0.37	18.92	7	0.37	18.92	7	0.25	28
10	0.52	19.23	10	0.53	18.86	10	0.51	19.60
15	0.78	19.23	13	0.69	18.84	13	0.61	21.13
20	1.04	19.23	15	0.79	18.98	15	0.72	20.83

$$R_{a3} = 19,3066667\Omega ; R_{b3} = 19,1383333\Omega ; R_{c3} = 23,26\Omega$$

Donc :

$$R_{s3} = \frac{R_{a3} + R_{b3} + R_{c3}}{3} = 20,57\Omega$$

### b) Essai à vide

Dans un fonctionnement à vide la charge est nulle, la machine tourne à une vitesse qui est proche du synchronisme et absorbe une puissance  $P_{s0}$  qui correspond à la somme des pertes mécaniques ( $p_{mec}$ ), ferromagnétiques ( $p_f$ ) et à effet Joule statorique ( $p_{js}$ ) ainsi que les pertes à effet Joule rotorique ( $p_{jr}$ ) négligeables dans ce cas.

$$P_{s0} = p_{js} + p_f + p_{mec} \tag{II.3}$$

On peut déterminer la somme des pertes fer et des pertes mécaniques par la formule suivante :

$$p_f + p_{mec} = P_{s0} - p_{js} \tag{II.4}$$

Avec :

- ✓ Les pertes par effet Joule statorique :  $p_{js} = R_s I_s^2$
- ✓ Les pertes fer :  $p_f = R_m I_s^2$

Pour déterminer les pertes mécaniques, il est nécessaire de tracer la courbe de variation de  $P_{s0} - p_{js}$  en fonction du carré de la tension qui est pratiquement une droite, puis on l'extrapole jusqu'à avoir  $V_{s0} = 0 (V)$  qui correspond aux pertes mécaniques (indépendante de la tension) comme montre la figure (II.15), les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau (II.5).

Tableau (II.5) : Résultats obtenus avec l'essai à vide

$V_{s0} (V)$	$I_{s0} (A)$	$P_{s0} (W)$	$Q_{s0} (VAr)$	$R_s (\Omega)$	$p_{js0} (W)$	$p_f + p_{mec}$	$V_{s0}^2 (V^2)$
382.783228	3.235	247.5	2125.5	4.5	47.0935125	200.406488	146523
346.583367	2.475	249	1432.5	4.5	27.5653125	221.434688	120120.03
329.436064	2.295	219	1276.5	4.5	23.7016125	195.298388	108528.12
315.060042	2.085	190.5	1123.5	4.5	19.5625125	170.937488	99262.83

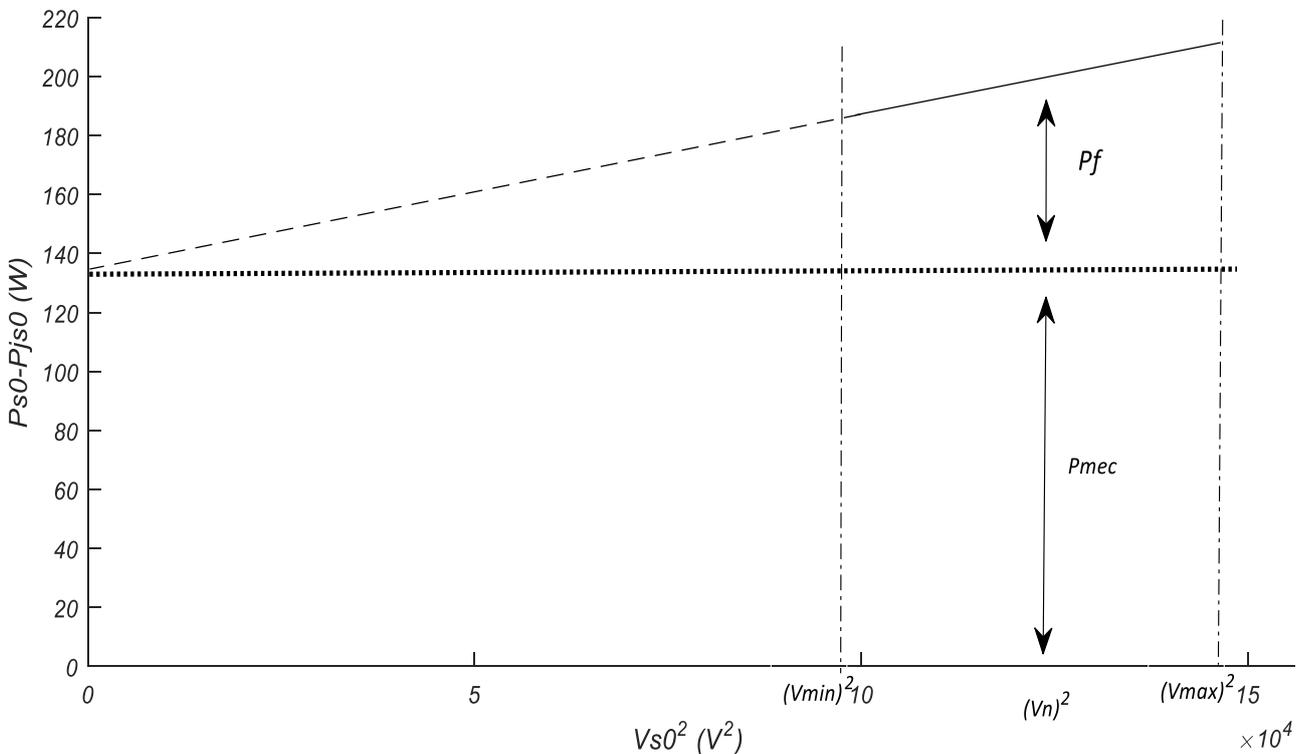


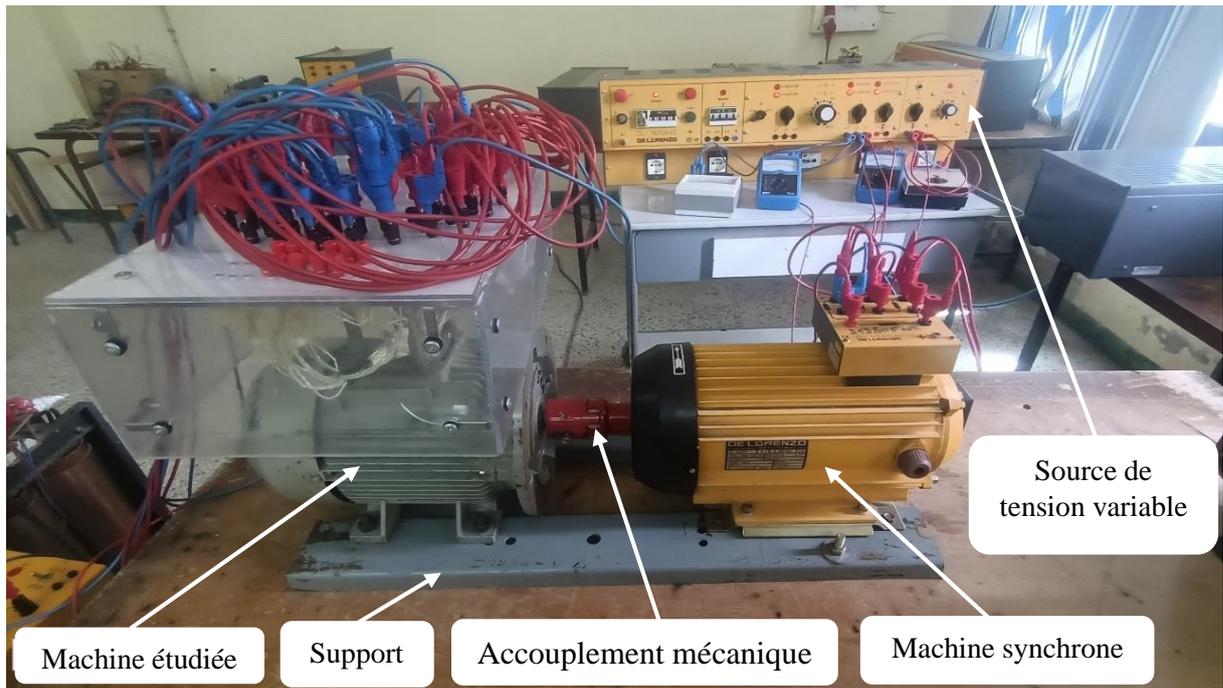
Figure (II.15) : Graphe de la méthode de séparation des pertes

D'après les valeurs obtenues les pertes mécaniques ( $p_{mec}$ ) sont :

$$p_{mec} = 135.4 W$$

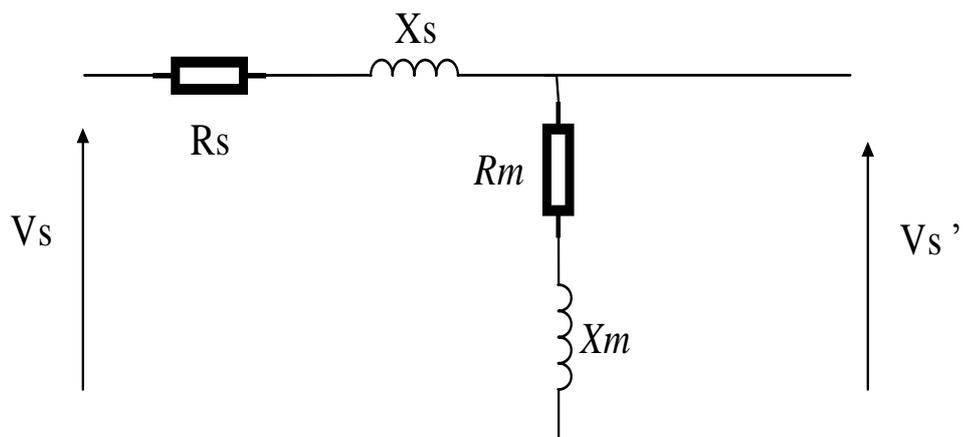
**c) Essai en synchronisme**

En entrainant la machine étudiée à la vitesse de synchronisme à l'aide d'une machine synchrone comme présentée dans la figure (II.16), le but de cet essai est de déterminer les valeurs de l'inductance de fuite statorique et l'inductance mutuelle cyclique.



**Figure (II.16) :** Photo de banc d'essai lors de l'essai en synchronisme

Au synchronisme le glissement est nul ( $g = 0$ ), le schéma électrique équivalent de chaque étoile est représenté dans la figure (II.17).



**Figure (II.17) :** Schéma équivalent pour chaque étoile concernant l'essai en synchronisme

Pour déterminer les inductances de fuite et mutuelle statorique de chaque étoile, il est nécessaire de mesurer les puissances actives, réactives et du courant absorbé pour chaque étoile séparément ainsi que la tension ( $V_s'$ ) mesurée aux bornes de l'autre étoile (secondaire).

L'inductance mutuelle cyclique ( $L_m$ ) est représentée par la formule (II.6).

$$V_s' = Z_m \frac{I_s}{\sqrt{3}} \tag{II.5}$$

Donc

$$L_m = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_s' \sqrt{3}}{I_s}\right)^2 - R_m^2}}{\omega} \tag{II.6}$$

L'inductance de fuite statorique ( $l_s$ ) est représentée par la formule (II.8).

$$Q = (X_s + X_m) I_s^2 \tag{II.7}$$

Donc

$$l_s = \frac{Q}{I_s^2 \omega} - L_m \tag{II.8}$$

Les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux (II.6) - (II.10).

➤ **Pour l'étoile 1 :**

On alimente l'étoile 1 à des valeurs différentes de tension, puis on mesure les puissances actives, réactives et du courant absorbé ainsi que la tension aux bornes de l'étoile 3.

**Tableaux (II.6) : Résultats obtenus pour la première étoile**

Valeurs mesurées	$V_{s1}$ (V)	381,051178	372,737334	364,250285	347,276187	329,436064
	$I_s$ (A)	3,055	2,86	2,63	2,345	2,155
	$P_s$ (W)	108	90	73,5	64,5	49,5
	$Q$ (VAr)	2017,5	1824	1638	1402,5	1218
	$S$ (VA)	2020,5	1827	1639,5	1404	1219,5
	$\cos(\varphi)$	0,052	0,043	0,045	0,045	0,033
	$V_{s3}'$ (V)	377,14	365,03	356,553	342,886	323,51
Valeurs calculées	$p_{js}$ (W)	86,3304813	75,6613	63,981325	50,8659813	42,9572313
	$p_f$ (W)	21,6695188	14,3387	9,518675	13,6340188	6,54276875
	$R_m$ ( $\Omega$ )	2,32181085	1,75298303	1,37614755	2,47935202	1,40885735
	$L_m$ (H)	0,68090107	0,703991	0,74778909	0,80649993	0,82804187
	$l_{s1}$ (H)	0,00753159	0,0061803	0,00638698	0,00574597	0,00722083

Donc :

- Inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 1 et l'étoile 3 :  $L_m = 0.75344459 H$  ;
- Inductance de fuite de l'étoile 1 :  $l_{s1} = 0.00661314 H$ .

On alimente l'étoile 1 a des valeurs différentes de la tension, puis on mesure les puissances actives, réactives et du courant absorbé ainsi que la tension aux bornes de l'étoile 2.

**Tableaux (II.7) : Résultats obtenus pour la première étoile**

Valeurs mesurées	$V_{s1} (V)$	381.570793	372.737334	364.943105	355.763236	347.276187
	$I_s (A)$	3.065	2.845	2.62	2.5	2.365
	$P_s (W)$	124.5	96	76.5	81	76.5
	$Q (VAr)$	2022	1827	1642.5	1542	1410
	$S (VA)$	2026.5	1836	1645.5	1545	1413
	$\cos(\varphi)$	0.061	0.052	0.045	0.052	0.053
	$V_{s2}' (V)$	376.68	366.76	358.456	352.92	341.675
Valeurs calculées	$p_{js} (W)$	86.8965813	74.8697313	63.4957	57.8125	51.7373313
	$p_f (W)$	37.6034188	21.1302688	13.0043	23.1875	24.7626688
	$R_m (\Omega)$	4.00282288	2.61060088	1.89445545	3.71	4.42726133
	$L_m (H)$	0.67779173	0.71103053	0.75463844	0.77858225	0.79676878
	$l_{s1} (H)$	0.00768158	0.00782954	0.00739345	0.00715023	0.00606784

Donc :

- Inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 1 et l'étoile 2 :  $L_m = 0.74376234 H$  ;
- Inductance de fuite de l'étoile 1 :  $l_{s1} = 0.00722453 H$ .

➤ **Pour l'étoile 2 :**

On alimente l'étoile 2 par des valeurs différentes de tension, puis on mesure les puissances actives, réactives et du courant absorbé ainsi que la tension aux bornes de l'étoile 1

Tableaux (II.8) : Résultats obtenus pour la deuxième étoile

Valeurs mesurées	$V_{s2} (V)$	380.704768	379.665537	376.201435	372.737334
	$I_s (A)$	3.01	2.925	2.9	2.815
	$P_s (W)$	165	165	162	142.5
	$Q (VAr)$	1975.5	1912.5	1867.5	1800
	$S (VA)$	1983	1920	1875	1806
	$\cos(\varphi)$	0.083	0.085	0.085	0.079
	$V_{s1}' (V)$	371.95	371.514	366.068	363.3
Valeurs calculées	$p_{js} (W)$	143.602585	135.606656	133.2985	125.598966
	$p_f (W)$	21.397415	29.3933438	28.7015	16.9010338
	$R_m (\Omega)$	2.36171952	3.43555775	3.4127824	2.13283113
	$L_m (H)$	0.68156906	0.7005104	0.6961921	0.71184505
	$l_{s2} (H)$	0.01283843	0.01139134	0.01099604	0.01156754

Donc :

- Inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 2 et l'étoile 1 :  $L_m = 0.69752915 H$  ;
- Inductance de fuite de l'étoile 2 :  $l_{s2} = 0.01169834 H$ .

On alimente l'étoile 2 par des valeurs différentes de tension, puis on mesure les puissances actives, réactives et du courant absorbé ainsi que la tension aux bornes de l'étoile 3.

Tableaux (II.9) : Résultats obtenus pour la deuxième étoile

Valeurs mesurées	$V_{s2} (V)$	381.397588	375.508615	372.737334
	$I_s (A)$	2.975	2.875	2.825
	$P_s (W)$	187.5	180	145.5
	$Q (VAr)$	1947	1858.5	1810.5
	$S (VA)$	1954.5	1864.5	1816.5
	$\cos(\varphi)$	0.091	0.081	0.08
	$V_{s3}' (V)$	371.85	368.317	365.03
Valeurs calculées	$p_{js} (W)$	140.282406	131.010156	126.492906
	$p_f (W)$	47.2175938	48.9898438	19.0070938
	$R_m (\Omega)$	5.33494457	5.92693762	2.38165479
	$L_m (H)$	0.68942018	0.70639426	0.71269507
	$l_{s2} (H)$	0.01116729	0.0096786	0.00979516

Donc :

- Inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 2 et l'étoile 3 :  $L_m = 0.7028365 H$  ;
- Inductance de fuite de l'étoile 2 :  $l_{s2} = 0.01021368 H$ .

➤ **Pour l'étoile 3 :**

On alimente l'étoile 3 par des valeurs différentes de tension, puis on mesure les puissances actives, réactives et du courant absorbé ainsi que la tension aux bornes de l'étoile 1.

**Tableaux (II.10) : Résultats obtenus pour la troisième étoile**

Valeurs mesurées	$V_{s3} (V)$	381.397588	372.564129	355.243621	347.276187
	$I_s (A)$	2.98	2.795	2.485	2.35
	$P_s (W)$	186	162	135	117
	$Q (VAr)$	1960.5	1797	1527	1410
	$S (VA)$	1969.5	1804.5	1533	1414.5
	$\cos(\varphi)$	0.093	0.085	0.077	0.082
	$V_{s1}' (V)$	371.604	362.954	347.384	340.81
Valeurs calculées	$p_{js} (W)$	182.669828	160.693354	127.024378	113.597825
	$p_f (W)$	3.330172	1.30664575	7.97562175	3.402175
	$R_m (\Omega)$	0.37500248	0.16726083	1.2915516	0.61605704
	$L_m (H)$	0.68783093	0.71628836	0.77107297	0.79994734
	$l_{s3} (H)$	0.01524895	0.01629121	0.01643798	0.01317097

Donc :

- Inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 3 et l'étoile 1 :  $L_m = 0.7437849 H$  ;
- Inductance de fuite de l'étoile 3 :  $l_{s3} = 0.01528728 H$ .

**d) Essai à rotor bloqué**

Cet essai aussi appelé « essai en court-circuit », le rotor est immobile (arbre bloqué par un dispositif de blocage). La vitesse de rotation étant nulle, aucune puissance mécanique n'est délivrée sur l'arbre. Le stator doit être alimenté sous une tension réduite  $V_{cc}$  pour avoir un courant au stator  $I_{cc}$  qui ne dépasse pas sa valeur nominale (risque d'un échauffement prohibitif de la machine).

A rotor calé, le glissement est égal à l'unité ( $g = 1$ ). Donc le schéma équivalent d'un enroulement statorique déduit de cet essai est celui de la figure (II.18).

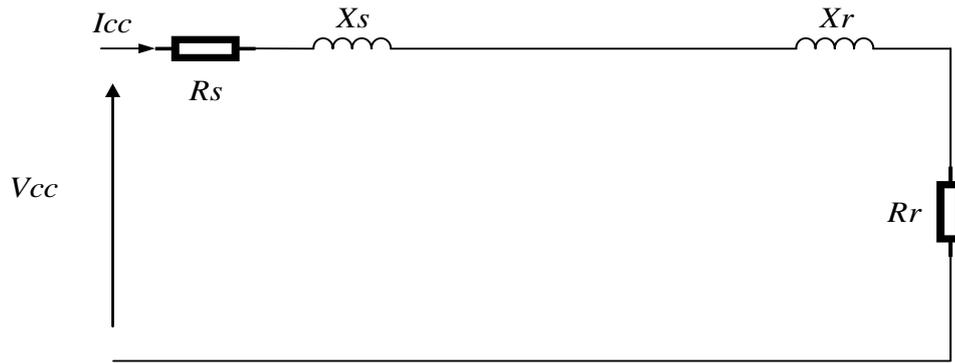


Figure (II.18) : Schéma équivalent à rotor bloqué de chaque étoile

Dans cet essai, on mesure la tension  $V_{CC}$ , le courant  $I_{CC}$ , les puissances actives et réactives, pour calculer la résistance et l'inductance de fuite rotorique qu'elle sont exprimées par les relations suivantes :

$$R_r = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} - R_s \tag{II.9}$$

$$l_r = \frac{Q_{cc}}{\omega I_{cc}^2} - l_s \tag{II.10}$$

Les résultats obtenus sont mentionnés dans les tableaux (II.11) - (II.13).

➤ Pour l'étoile 1

Tableaux (II.11) : Résultats obtenus dans l'essai en court-circuit pour l'étoile 1

Valeurs mesurées						Valeurs calculées	
$V_{CC}$ (V)	$I_{CC}$ (A)	$P_{CC}$ (W)	$Q_{CC}$ (VAr)	$S$ (VA)	$\cos(\varphi)$	$R_r$ ( $\Omega$ )	$l_r$ (H)
60.9664	4.86666667	292.5	417.5	512.5	0.57	3.09987803	0.04913887
51.7868	3.98333333	200	285	350	0.56	3.35482134	0.05020341
43.3	3.24166667	130	202.5	242.5	0.536	3.12105227	0.05437036

➤ Pour l'étoile 2

Tableaux (II.12) : Résultats obtenus dans l'essai en court-circuit pour l'étoile 2

Valeurs mesurées						Valeurs calculées	
$V_{CC}$ (V)	$I_{CC}$ (A)	$P_{CC}$ (W)	$Q_{CC}$ (VAr)	$S$ (VA)	$\cos(\varphi)$	$R_r$ ( $\Omega$ )	$l_r$ (H)
60.6217783	3.8	297	259.5	397.5	0.756	4.71786704	0.04943221
52.1347293	3.165	211.5	187.5	283.5	0.742	5.26363177	0.0518107
42.95486	2.53	136.5	126	186	0.728	5.47512615	0.05489023

## ➤ Pour l'étoile 3

Tableaux (II.13) : Résultats obtenus dans l'essai en court-circuit pour l'étoile 3

Valeurs mesurées						Valeurs calculées	
$V_{CC} (V)$	$I_{CC} (A)$	$P_{CC} (W)$	$Q_{CC} (VAr)$	$S (VA)$	$\cos(\varphi)$	$R_r (\Omega)$	$l_r (H)$
60.621778	3.385	285	208.5	354	0.808	4.30296244	0.04595075
52.481139	2.875	207	156	259.5	0.793	4.47347826	0.0481062
42.95486	2.305	133.5	106.5	171	0.78	4.55692863	0.05183783

Donc :

- Résistance rotorique ramené:  $R_r = 4,265 \Omega$  ;
- Inductance de fuite rotorique :  $l_r = 0,048 \text{ H}$ .

### II.3.3 Détermination des paramètres mécaniques

Les équations électriques sont liées à l'équation mécanique par la position angulaire du rotor qui intervient dans les expressions des inductances mutuelles stator-rotor.

#### a) Coefficient de frottement visqueux

Le coefficient de frottement est une valeur constante qu'on a établi expérimentalement à partir l'expression (II.11).

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega_r \quad (\text{II.11})$$

À vide :

$$C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega_r \quad (\text{II.12})$$

En régime permanent :

$$f = \frac{C_{em}}{\Omega_r} = \frac{p_{mec}}{\Omega_r^2} \quad (\text{II.13})$$

Avec :  $p_{mec} = 135.4 \text{ W}$  ;  $\Omega_r = 2996 \frac{2\pi}{60} = 313.7404 \text{ rd/s}$ .

Donc :

$$f = 0.0014 \text{ Nms/rd}$$

**b) Moment d'inertie**

Afin de déterminer le moment d'inertie en utilisant la méthode d'essai en ralentissement qui nous permet de déterminer les paramètres mécaniques du moteur asynchrone. C'est une méthode qui est utilisée pour tous les types de machines tournantes. Son principe consiste à lancer la machine à sa vitesse nominale, puis à couper l'alimentation et laisser la machine ralentir sous l'effet des frottements. La vitesse diminue progressivement sous l'effet des pertes mécaniques.

Le couple électromagnétique du moteur est donné par l'équation suivante :

$$C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega_r + C_r \tag{II.14}$$

A l'instant  $t = t_1$ , l'alimentation est coupée, le couple électromagnétique du moteur est réduit à zéro ( $C_{em} = 0$ ) et l'équation du couple s'écrit comme suit :

$$0 = \frac{J}{f} \frac{d\Omega}{dt} + \Omega_r + \frac{C_r}{f} \tag{II.15}$$

La solution de cette équation différentielle s'écrit comme suite :

$$\Omega(t) = \Omega_0 \cdot e^{-\left(\frac{t}{\zeta_m}\right)} - \frac{C_r}{f} \tag{II.16}$$

On pose :  $\zeta_m = \frac{J}{f}$ .

La constante de temps mécanique  $\zeta_m$  peut-être calculée à partir de la courbe de ralentissement, comme il est indiqué sur la figure (II.19).

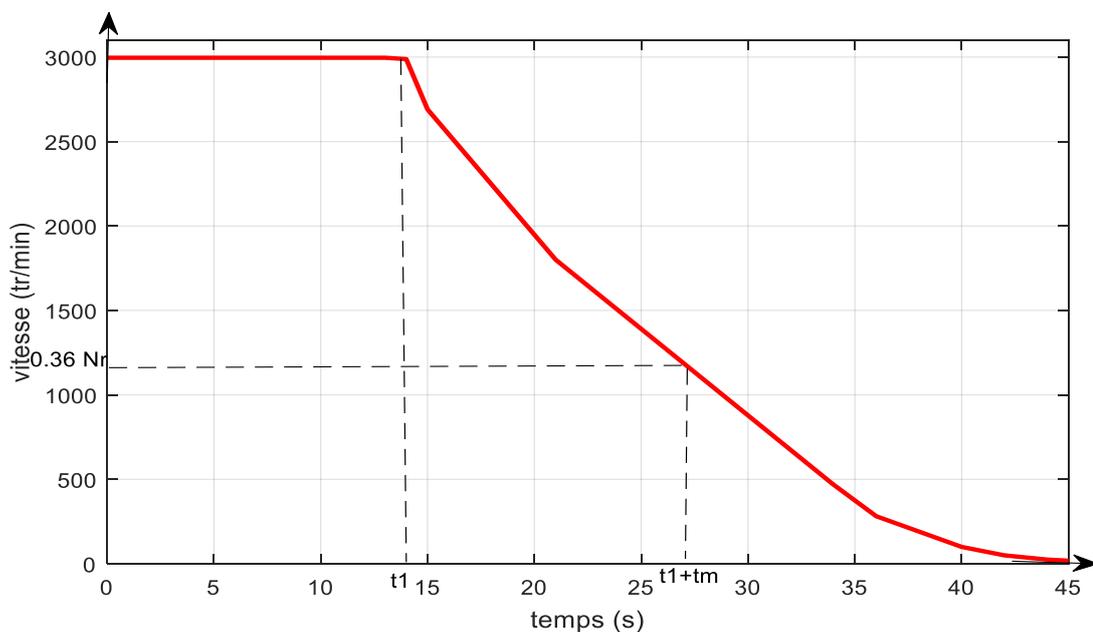


Figure (II.19) : Courbe d'essai en ralentissement

Donc :  $\zeta_m = 15.05$  s.

Le moment d'inertie est calculé à partir de l'équation suivante

$$J = \zeta_m \cdot f = 0.02107 \text{ kg.m}^2$$

## II.4 Résultats de l'identification de la machine étudiée

Les résultats des paramètres identifiés par la méthode des essais classiques sont résumés dans le tableau (II.14).

*Tableaux (II.14) : Paramètres de la machine asynchrone triple étoile*

Résistance statorique de l'étoile 1	$R_{s1} = 9.25 \Omega$
Résistance statorique de l'étoile 2	$R_{s2} = 15.85 \Omega$
Résistance statorique de l'étoile 3	$R_{s3} = 20.57 \Omega$
Résistance de magnétisation	$R_m = 2.69 \Omega$
Résistance d'une phase rotorique	$R_r = 4.265 \Omega$
Inductance de fuite de l'étoile 1	$l_{s1} = 0.007 \text{ H}$
Inductance de fuite de l'étoile 2	$l_{s2} = 0.011 \text{ H}$
Inductance de fuite de l'étoile 3	$l_{s3} = 0.015 \text{ H}$
Inductance de fuite rotorique	$l_r = 0.048 \text{ H}$
Inductance mutuelle cyclique	$L_m = 0.73 \text{ H}$
Coefficient de frottement visqueux	$f = 0.0014 \text{ N.m.s/rd}$
Moment d'inertie	$J = 0.021 \text{ kg.m}^2$

## II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié une machine asynchrone à triple étoile pour un déphasage entre les étoiles égale à zéro degré ainsi qu'un aperçu général sur la description du banc d'essai, qui est réalisé dans laboratoire de machines électriques.

Afin de procéder à la simulation, la connaissance des paramètres crêtes de la machine est nécessaire, alors on a utilisé des différents essais pour déterminer tous les paramètres de la machine électriques, et mécaniques.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et la simulation de la machine asynchrone identifiée.

---

**Chapitre III : Modélisation et simulation de la machine étudiée**

---

**III.1 Introduction**

La modélisation d'une machine électrique est une phase primordiale de son développement. Les progrès de l'informatique et du génie logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques. Cependant, la modélisation d'une telle machine est indispensable pour l'étude et la maîtrise de son fonctionnement.

Afin d'étudier le comportement d'une machine asynchrone à multi-étoile alimentée par des sources de tension triphasées équilibré décalé d'un angle  $\alpha$ , en premier lieu nous sommes intéressés à la modélisation d'une MASDE à l'aide des équations électriques, magnétiques et mécaniques, en général très complexes ceux qui nécessitent l'utilisation de certain nombre d'hypothèses simplificatrices, et par la suite réduire l'ordre de repère naturel (abc) du système par l'utilisation de la transformation de Park qui transfère les équations électriques statoriques et rotoriques ainsi que les équations magnétiques de la machine asynchrone à double étoile à un nouveau référentiel biphasé, afin d'obtenir un modèle simplifié. En second lieu une autre modélisation saura faite à la machine asynchrone à triple étoile dans le repère naturel.

Ensuite, nous avons effectué la simulation de la MASDE dans le repère naturel (abc) et le repère biphasé (d, q), pour les deux cas d'étude étoiles identiques et non identiques alimentées par deux sources de tension triphasée purement sinusoïdales équilibrées (réseau électrique) et décalé d'un angle  $\alpha=30^\circ$ , puis on a terminé par la simulation de la machine asynchrone à triple étoile dans le repère naturel.

**III.2 Description de la machine asynchrone à multi-étoile**

La machine asynchrone à multi-étoile comporte dans le stator des systèmes de bobinages triphasés décalés entre eux d'un angle  $\alpha_i$  et un rotor soit bobiné soit à cage d'écureuil.

Pour simplifier l'étude de la machine, on considère les circuits électriques du rotor comme équivalant à un enroulement triphasé en court-circuit. La figure (III.1) donne la position des enrôlements statoriques et rotoriques de la machine asynchrone à multi-étoile.

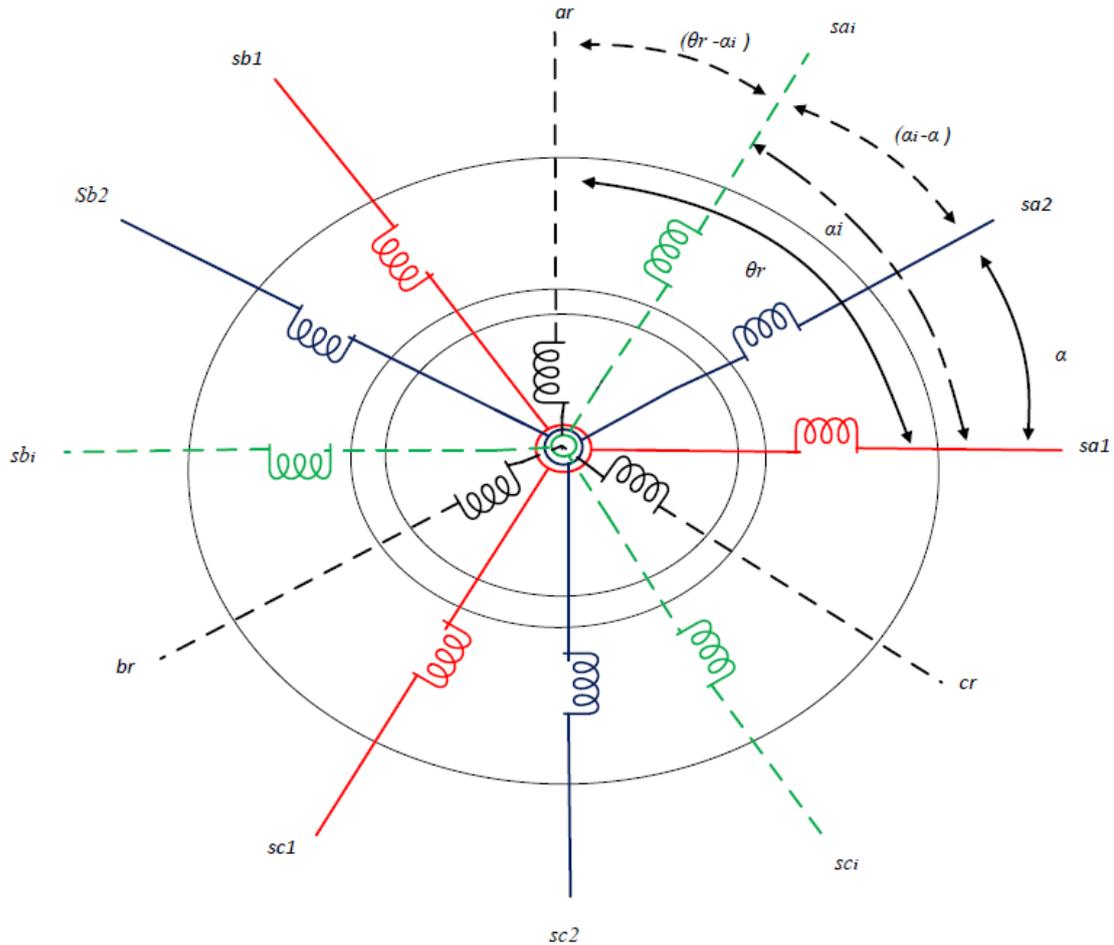


Figure (III.1) : Schéma des enrôlements statoriques et rotoriques de la machine MASME

Les grandeurs relatives aux étoiles seront notées respectivement par les indices  $S_1, S_2, S_i$ . Les phases de la première étoile  $S_{a1}, S_{b1}, S_{c1}$ , les phases de la deuxième étoile  $S_{a2}, S_{b2}, S_{c2}$ , les phases de l' $i$ -ème étoile  $S_{ai}, S_{bi}, S_{ci}$ , et les phases rotoriques  $a_r, b_r, c_r$ .

### III.3 Hypothèses simplificatrices

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable ;
- Force magnétomotrice a répartition spatiale sinusoïdale ;
- Machine de construction symétrique ;
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau (l'effet pelliculaire) ;
- L'inductance de fuite mutuelle commune aux deux circuits (étoiles 1 et 2) est négligeable.

### III.4 Modèle de la machine asynchrone à multi-étoile dans le repère naturel

En tenant compte des hypothèses simplificatrices, les équations de la machine asynchrone à multi-étoile s'écrivent d'une façon globale comme suit :

#### a) Équations électriques

Le système d'équations électriques de la machine s'écrit comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} [v_{s1}] = [R_{s1}] [i_{s1}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s1}] \\ [v_{s2}] = [R_{s2}] [i_{s2}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s2}] \\ \vdots \\ [v_{si}] = [R_{si}] [i_{si}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{si}] \\ \vdots \\ [v_r] = [R_r] [i_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{array} \right. \quad (\text{III.1})$$

Avec :  $i = 1, 2, \dots, n$  :  $i$ -ème étoile ;  $n$  : Nombre d'étoile dans le stator.

#### b) Équations magnétiques

Le système d'équations (III.2) exprime la relation entre les flux et les courants tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} [\varphi_{s1}] = [L_{s1}] [i_{s1}] + [L_{s1,s2}] [i_{s2}] + \dots + [L_{s1,si}] [i_{si}] + \dots + [L_{s1,r}] [i_r] \\ \vdots \\ [\varphi_{si}] = [L_{si,s1}] [i_{s1}] + [L_{si,s2}] [i_{s2}] + \dots + [L_{si}] [i_{si}] + \dots + [L_{si,r}] [i_r] \\ \vdots \\ [\varphi_r] = [L_{r,s1}] [i_{s1}] + [L_{r,s2}] [i_{s2}] + \dots + [L_{r,si}] [i_{si}] + \dots + [L_r] [i_r] \end{array} \right. \quad (\text{III.2})$$

#### Matrice de l'inductance de l' $i$ -ème étoile

$$[L_{si}] = \begin{bmatrix} l_{si} + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & l_{si} + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & l_{si} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

Avec :  $l_{si}$  : Inductance de fuite d'une phase de l' $i$ -ème étoile.



### III.5 Modélisation de la machine asynchrone à double étoile

La MASDE avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte [14].

Cependant, le modèle que nous adopterons tient compte des hypothèses simplificatrices.

#### III.5.1 Modèle de la MASDE dans le repère naturel (abc)

Le modèle de la MASDE dans le repère naturel (abc) à partir de système d'équations du modèle mathématique de la machine asynchrone à multi-étoile (III.9), sous forme d'un système d'équations différentielles (sous forme de Cauchy) à implémenter sous MATLAB/Simulink qui est représenté par le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} [i_{s1}] = [L_{s1}]^{-1} ([v_{s1}] - [R_{s1}] [i_{s1}] - [L_{s1,s2}] \frac{d}{dt} [i_{s2}] - [L_{s1,r}] \frac{d}{dt} [i_r] - \omega_r \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1,r}] [i_r]) \\ \frac{d}{dt} [i_{s2}] = [L_{s2}]^{-1} ([v_{s2}] - [R_{s2}] [i_{s2}] - [L_{s2,s1}] \frac{d}{dt} [i_{s1}] - [L_{s2,r}] \frac{d}{dt} [i_r] - \omega_r \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2,r}] [i_r]) \\ \frac{d}{dt} [i_r] = [L_r]^{-1} ([v_r] - [R_r] [i_r] - [L_{s1,r}]^t \frac{d}{dt} [i_{s1}] - [L_{s2,r}]^t \frac{d}{dt} [i_{s2}] - \omega_r \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1,r}]^t [i_{s1}] - \omega_r \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2,r}]^t [i_{s2}]) \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \left[ P \left( [i_{s1}]^t \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1,r}] + [i_{s2}]^t \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2,r}] \right) [i_r] - C_r - f\Omega_r \right] \end{array} \right. \quad (III.10)$$

#### III.5.2 Avantages et inconvénients du modèle naturel (abc)

On peut noter que chaque terme de la matrice d'inductance est dépendant de l'angle électrique  $\theta_r$ . Par conséquent son inverse doit être calculé à chaque pas de simulation pour résoudre le système d'équations électriques. Ceci représente l'inconvénient majeur de ce modèle pour la simulation car c'est un modèle qui demande une grande puissance de calcul et un temps de simulation relativement long [16]. Mais actuellement avec l'évolution de l'informatique et de génie logicielle, cet inconvénient peut être négligeable.

Par contre, ce modèle est idéal pour l'étude du comportement de la machine lors d'un défaut, car il peut être modélisé facilement pour décrire le défaut souhaité, sans avoir à effectuer d'autres calculs ou transformation [16].

Afin de faciliter l'étude de cette machine lors d'un fonctionnement sain, des modèles simplifiés sont proposés dans la littérature en utilisant des transformations depuis le repère naturel  $abc$  vers un repère biphasé tournant à une vitesse  $\omega_{coord}$  par rapport au plan original [15].

### III.5.3 Modèle biphasé de la machine asynchrone à double étoile

Afin d’obtenir un modèle mathématique du système plus simple que le modèle physique, des transformations orthogonaux sont utilisées pour obtenir des équations simples par des changements de variables appropriés [17].

En effet, dans l’étude des machines électriques, ces transformations permettent de convertir un système réel des bobinages rotoriques et statoriques en un système de deux bobinages en quadrature sans interactions magnétiques entre eux. Le système polyphasé est converti en un système biphasé.

#### a) Transformation de Park

La transformation de Concordia suivie de la rotation de Park, servant à transformer un enroulement triphasé couplé, en un enroulement biphasé orthogonal connue sous le nom de la transformation de Park, et elle est largement utilisée dans la modélisation des machines électriques à courant alternatif.

Dans ce qui suit, cette transformation est utilisée sur la machine asynchrone à double étoile pour transformer ses deux enroulements triphasés, en deux enroulements biphasés représentés dans le plan (d, q). La figure (III.2) représente la transformation des enroulements réels(abc) en enroulements orthogonaux (d, q).

Le principe de la transformation de Park consiste à remplacer les grandeurs (courant, tension et flux) d’indices réelles (abc) par des grandeurs d’indices (d, q, o) (direct, en quadrature et homopolaire) à l’aide de la matrice de Park  $[P(\theta_r)]$ .

On transforme le système multiphasées en un système biphasé tournant à la vitesse  $\omega_{\text{coor}}$ .

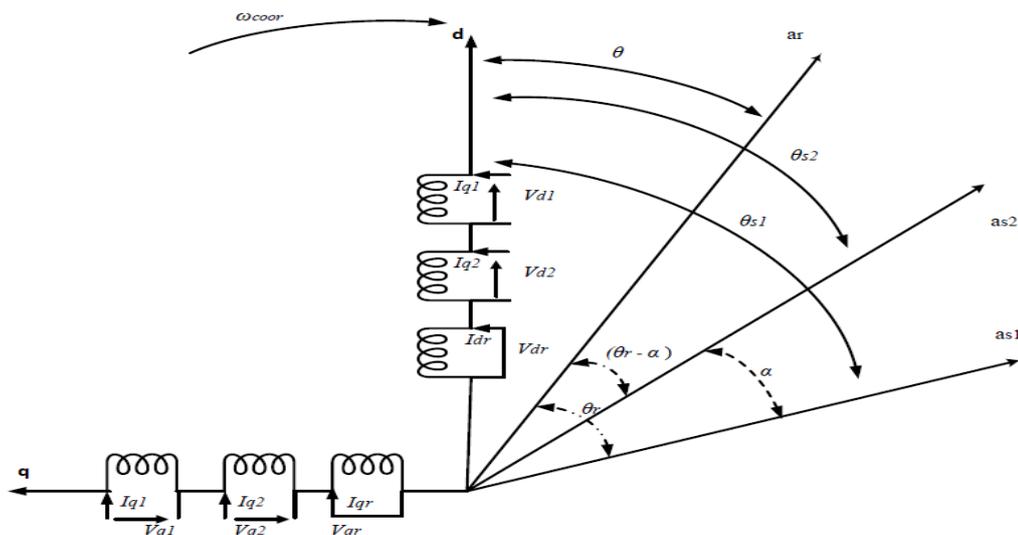


Figure (III.2) : Représentation de la transformation des enroulements réels (abc) en enroulements orthogonaux (d, q)

➤ **Matrice de PARK de l'étoile 1**

Matrice de transformation des enroulements statoriques de l'étoile 1.

$$[P(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_{s1}) & \cos(\theta_{s1} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{s1} + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_{s1}) & -\sin(\theta_{s1} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{s1} + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

➤ **Matrice de PARK de l'étoile 2**

Matrice de transformation des enroulements statoriques de l'étoile 2.

$$[P(\theta_{s2})] = [P(\theta_{s1} - \alpha)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_{s1} - \alpha) & \cos(\theta_{s1} - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{s1} - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_{s1} - \alpha) & -\sin(\theta_{s1} - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{s1} - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

➤ **Matrice de PARK du rotor**

Matrice de transformation de l'enroulement rotorique.

$$[P(\theta)] = [P(\theta_{s1} - \theta_r)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_{s1} - \theta_r) & \cos(\theta_{s1} - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{s1} - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_{s1} - \theta_r) & -\sin(\theta_{s1} - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{s1} - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

***b) Transformation de PARK inverse***

Après l'étude du système simplifié, il est impératif de revenir à la dimension réelle de la machine à travers une autre matrice de passage appelée « matrice de PARK inverse ».

➤ **Matrice de PARK inverse de l'étoile 1**

$$[P(\theta_{s1})]^{-1} = [P(\theta_{s1})]^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_{s1}) & -\sin(\theta_{s1}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_{s1} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{s1} - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_{s1} + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{s1} + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

➤ **Matrice de PARK inverse de l'étoile 2**

$$[P(\theta_{s2})]^{-1} = [P(\theta_{s1} - \alpha)]^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_{s1} - \alpha) & -\sin(\theta_{s1} - \alpha) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_{s1} - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{s1} - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_{s1} - \alpha + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{s1} - \alpha + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

➤ **Matrice de PARK inverse du rotor**

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta_{s1} - \theta_r)]^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_{s1} - \theta_r) & -\sin(\theta_{s1} - \theta_r) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_{s1} - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{s1} - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_{s1} - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{s1} - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

**c) Choix du référentiel**

Trois types de référentiels sont intéressants en pratique, le choix du référentiel fait selon le problème à étudier.

- **Référentiel Lié au Stator «  $\alpha, \beta$  »**

Dans ce référentiel, les axes ( $\alpha, \beta$ ) sont immobiles par rapport au stator ( $\omega_{\text{coor}} = 0$ ). Dans ce cas, la phase  $S_{a1}$  et  $\alpha$  coïncident. Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les gradeurs instantanés 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 courant alternatif

- **Référentiel Lié au Rotor «  $x, y$  »**

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

L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes transitoires des machines alternatives synchrone et asynchrone.

- **Référentiel Lié au Champ Tournant «  $d, q$  »**

Dans ce référentiel, les axes ( $d, q$ ) sont immobiles par rapport au champ tournant créé par les deux étoiles du stator ( $\omega_{\text{coor}} = \omega_s$ ).

Ce référentiel n'introduit pas des simplifications dans la transformation des équations électrique, mais l'avantage on obtient les grandeurs continues. Dans notre étude on fixe le repère (d, q) au champ tournant.

**d) Application de la transformation de PARK à la MASDE**

Avec le choix du référentiel lié au champ tournant en appliquant la transformation de Park aux courants, aux tensions et aux flux, un nouveau système d'équations sera mis en évidence tel que :

✓ **Transformation des tensions**

$$\begin{cases} [v_{dqo,s1}] = [P(\theta_{s1})] \cdot [v_{s1}] \\ [v_{dqo,s2}] = [P(\theta_{s2})] \cdot [v_{s2}] \end{cases} \quad (III.17)$$

✓ **Transformation des courants**

$$\begin{cases} [i_{dqo,s1}] = [P(\theta_{s1})] \cdot [i_{s1}] \\ [i_{dqo,s2}] = [P(\theta_{s2})] \cdot [i_{s2}] \\ [i_{dqo,r}] = [P(\theta)] \cdot [i_r] \end{cases} \quad (III.18)$$

✓ **Transformation des flux**

$$\begin{cases} [\varphi_{dqo,s1}] = [P(\theta_{s1})] \cdot [\varphi_{s1}] \\ [\varphi_{dqo,s2}] = [P(\theta_{s2})] \cdot [\varphi_{s2}] \\ [\varphi_{dqo,r}] = [P(\theta)] \cdot [\varphi_r] \end{cases} \quad (III.19)$$

Avec :

$$[v_{dqo,s1}] = \begin{bmatrix} v_{ds1} \\ v_{qs1} \\ v_{os1} \end{bmatrix}; [v_{dqo,s2}] = \begin{bmatrix} v_{ds2} \\ v_{qs2} \\ v_{os2} \end{bmatrix}; [i_{dqo,s1}] = \begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{os1} \end{bmatrix}; [i_{dqo,s2}] = \begin{bmatrix} i_{ds2} \\ i_{qs2} \\ i_{os2} \end{bmatrix}$$

$$[i_{dqo,r}] = \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix}; [\varphi_{dqo,s1}] = \begin{bmatrix} \varphi_{ds1} \\ \varphi_{qs1} \\ \varphi_{os1} \end{bmatrix}; [\varphi_{dqo,s2}] = \begin{bmatrix} \varphi_{ds2} \\ \varphi_{qs2} \\ \varphi_{os2} \end{bmatrix}; [\varphi_{dqo,r}] = \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{or} \end{bmatrix}$$

• **Équations des tensions**

L'application de la transformation de Park sur le système d'équations électrique (III.1) nous donne :

➤ **Pour l'étoile 1**

$$[v_{dqo,s1}] = [P(\theta_{s1})] \cdot [v_{s1}] = [R_{s1}] \cdot [P(\theta_{s1})] \cdot [i_{s1}] + [P(\theta_{s1})] \frac{d}{dt} ([P(\theta_{s1})]^{-1} \cdot [\varphi_{dqo,s1}])$$

$$\begin{bmatrix} v_{ds1} \\ v_{qs1} \\ v_{os1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{os1} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ds1} \\ \varphi_{qs1} \\ \varphi_{os1} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_{s1}}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{ds1} \\ \varphi_{qs1} \\ \varphi_{os1} \end{bmatrix}$$

Donc :

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1} i_{ds1} + \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1} i_{qs1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds1} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

➤ Pour l'étoile 2

$$[v_{dqo,s2}] = [P(\theta_{s2})] \cdot [v_{s2}] = [R_{s2}] \cdot [P(\theta_{s2})] \cdot [i_{s2}] + [P(\theta_{s2})] \frac{d}{dt} ([P(\theta_{s1})]^{-1} \cdot [\varphi_{dqo,s2}])$$

$$\begin{bmatrix} v_{ds2} \\ v_{qs2} \\ v_{os2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds2} \\ i_{qs2} \\ i_{os2} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ds2} \\ \varphi_{qs2} \\ \varphi_{os2} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_{s2}}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{ds2} \\ \varphi_{qs2} \\ \varphi_{os2} \end{bmatrix}$$

Donc :

$$\begin{cases} v_{ds2} = R_{s2} i_{ds2} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2} i_{qs2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{ds2} \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

➤ Pour le rotor

Les bobines ou les barres conductrices de la cage d'écureuil du rotor sont court-circuitées

$$v_{ar} = v_{br} = v_{cr} = 0$$

$$[0] = [P(\theta)] \cdot [v_r] = [R_r] \cdot [P(\theta)] \cdot [i_r] + [P(\theta)] \frac{d}{dt} ([P(\theta)]^{-1} \cdot [\varphi_{dqo,r}])$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{or} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{or} \end{bmatrix}$$

Donc :

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

Avec :  $\frac{d\theta_{s1}}{dt} = \omega_s$  ;  $\frac{d\theta_{s2}}{dt} = \frac{d(\theta_{s1} - \alpha)}{dt} = \frac{d\theta_{s1}}{dt} = \omega_s$  et  $\frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\theta_{s1} - \theta_r)}{dt} = \omega_s - \omega_r = \omega_{gl}$

Les relations (III.20) - (III.22) représente les systèmes équations de tension dans le repère (d-q) qui se résume dans le système d'équation suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds1} = R_{s1} \cdot i_{ds1} + \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1} \cdot i_{qs1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{ds1} \\ v_{ds2} = R_{s2} \cdot i_{ds2} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2} \cdot i_{qs2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{ds2} \\ 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{III.23})$$

• **Équations magnétiques**

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{ds1} = l_{s1} \cdot i_{ds1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{ds1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{ds2} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{dr} \\ \varphi_{qs1} = l_{s1} \cdot i_{qs1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{qs1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{qs2} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{qr} \\ \varphi_{ds2} = l_{s2} \cdot i_{ds2} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{ds1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{ds2} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{dr} \\ \varphi_{qs2} = l_{s2} \cdot i_{qs2} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{qs1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{qs2} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{qr} \\ \varphi_{dr} = l_r \cdot i_{dr} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{ds1} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{ds2} + \frac{3}{2} L_{mr} i_{dr} \\ \varphi_{qr} = l_r \cdot i_{qr} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{qs1} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{qs2} + \frac{3}{2} L_{mr} i_{qr} \end{array} \right. \quad (\text{III.24})$$

Les diverses inductances propres des deux stators et du rotor ainsi que les inductances mutuelles entre les différents bobinages sont données par :

Inductance propre cyclique du stator 1 :  $l_{s1} + \frac{3}{2} L_{ms} = l_{s1} + L_m$  ;

Inductance propre cyclique du stator 2 :  $l_{s2} + \frac{3}{2} L_{ms} = l_{s2} + L_m$  ;

Inductance propre cyclique du rotor :  $l_r + \frac{3}{2} L_{mr} = l_r + L_m$ .

On suppose que l'inductance mutuelle cyclique entre le stator 1, le stator 2 et le rotor est :

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ms} = \frac{3}{2} L_{sr} = \frac{3}{2} L_{mr} \quad (\text{III.25})$$

Étant donné que l'étoile 1 et l'étoile 2 sont de conception identique, les inductances propres des phases des deux étoiles ainsi que la résistance des enroulements statoriques sont égales  $l_{s1} = l_{s2}$  et  $R_{s1} = R_{s2}$ .

Le système d'équation (III.44) devient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = l_{s1} \cdot i_{ds1} + L_m (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qs1} = l_{s1} \cdot i_{qs1} + L_m (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\ \varphi_{ds2} = l_{s2} \cdot i_{ds2} + L_m (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qs2} = l_{s2} \cdot i_{qs2} + L_m (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\ \varphi_{dr} = l_r \cdot i_{dr} + L_m (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qr} = l_r \cdot i_{qr} + L_m (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (III.26)$$

La forme matricielle est donnée comme suivant :

$$\text{L'axe direct :} \quad \begin{bmatrix} \varphi_{ds1} \\ \varphi_{ds2} \\ \varphi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{s1} + L_m & L_m & L_m \\ L_m & l_{s2} + L_m & L_m \\ L_m & L_m & l_r + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{ds2} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

$$\text{L'axe en quadrature :} \quad \begin{bmatrix} \varphi_{qs1} \\ \varphi_{qs2} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{s1} + L_m & L_m & L_m \\ L_m & l_{s2} + L_m & L_m \\ L_m & L_m & l_r + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs1} \\ i_{qs2} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

## • Puissance instantanée et couple électromagnétique

### ➤ Puissance instantanée

La puissance instantanée absorbée par la machine asynchrone double étoile est donnée par l'expression suivante [08] [10] :

$$P_a = [v_s]^t [i_s] = v_{a1} i_{a1} + v_{b1} i_{b1} + v_{c1} i_{c1} + v_{a2} i_{a2} + v_{b2} i_{b2} + v_{c2} i_{c2} \quad (III.27)$$

Et comme la transformation de Park utilisée repose sur l'invariance de la puissance instantanée, ce qui conduit à leur équivalence physique, l'équation (III.27) devient :

$$P_a = v_{ds1} i_{ds1} + v_{qs1} i_{qs1} + v_{ds2} i_{ds2} + v_{qs2} i_{qs2} + v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \quad (III.28)$$

En remplace le système d'équations (III.23) dans l'équation (III.28) la puissance instantanée s'écrit comme suite :

$$\begin{aligned} P_a = & i_{ds1} \left( R_{s1} i_{ds1} + \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs1} \right) + i_{qs1} \left( R_{s1} i_{qs1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds1} \right) + \\ & i_{ds2} \left( R_{s2} i_{ds2} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs2} \right) + i_{qs2} \left( R_{s2} i_{qs2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds2} \right) + i_{dr} \left( R_r i_{dr} + \right. \\ & \left. \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \right) + i_{qr} \left( R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \right) \end{aligned} \quad (III.29)$$

La puissance devient :

$$P_a = [R_{s1}i_{ds1}^2 + R_{s2}i_{ds2}^2 + R_{s1}i_{qs1}^2 + R_{s2}i_{qs2}^2 + R_r i_{dr}^2 + R_r i_{qr}^2] + \left[ \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} i_{ds1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} i_{qs1} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} i_{ds2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} i_{qs2} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} i_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} i_{qr} \right] + \omega_s \left[ \varphi_{ds1} i_{qs1} + \varphi_{ds2} i_{qs2} + \varphi_{dr} i_{qr} - \varphi_{qs1} i_{ds1} - \varphi_{qs2} i_{ds2} - \varphi_{qr} i_{dr} \right] \quad (\text{III.30})$$

Cette expression se compose de trois termes : le premier correspond aux pertes par effet Joule statorique et rotorique, le second représente la variation de l'énergie électromagnétique (réserve d'énergie) et le dernier terme représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique, représente comme suite [08] [09]:

✓ **Pertes par effet Joule statorique et rotorique**

$$p_j = R_{s1}i_{ds1}^2 + R_{s2}i_{ds2}^2 + R_{s1}i_{qs1}^2 + R_{s2}i_{qs2}^2 + R_r i_{dr}^2 + R_r i_{qr}^2 \quad (\text{III.31})$$

Cette équation représente les pertes par effet Joule statorique et rotorique.

✓ **Puissance électromagnétique emmagasinée**

$$P_{em} = \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} i_{ds1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} i_{qs1} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} i_{ds2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} i_{qs2} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} i_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} i_{qr} \quad (\text{III.32})$$

C'est la variation de l'énergie électromagnétique ou la réserve d'énergie stockée dans le champ électromagnétique.

✓ **Puissance mécanique**

$$p_{mec} = \omega_s (\varphi_{ds1} i_{qs1} + \varphi_{ds2} i_{qs2} + \varphi_{dr} i_{qr} - \varphi_{qs1} i_{ds1} - \varphi_{qs2} i_{ds2} - \varphi_{qr} i_{dr}) \quad (\text{III.33})$$

Représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique avec les pertes fer supposées négligeables.

➤ **Couple électromagnétique**

Étant donné la relation entre la puissance et le couple, il en résulte :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{l_r + L_m} [\varphi_{dr} (i_{qs1} + i_{qs2}) - \varphi_{qr} (i_{ds1} + i_{ds2})] \quad (\text{III.34})$$

**c) Mise sous forme d'équation d'état**

Pour pouvoir commander la machine, il est intéressé de la représenter sous forme d'équations d'état. L'équation (III.35) représente la forme d'équations d'état tel que :

$$[B]. [U] = [L]. [\dot{I}] + \omega_{gl}[C]. [I] + [D]. [I] \quad (III.35)$$

Où :

$[U] = [v_{d1} \ v_{q1} \ v_{d2} \ v_{q2} \ v_{dr} \ v_{qr}]^t$  : Vecteur de commande ;

$[I] = [i_{d1} \ i_{q1} \ i_{d2} \ i_{q2} \ i_{dr} \ i_{qr}]^t$  : Vecteur d'état, et  $[\dot{I}] = \frac{d}{dt} [I]$ ;

$[B] = \text{diag}[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]$  .

$$[L] = \begin{bmatrix} (l_{s1} + L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & (l_{s1} + L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m \\ L_m & 0 & (l_{s2} + L_m) & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & (l_{s2} + L_m) & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_m & 0 & (l_r + L_m) & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_m & 0 & (l_r + L_m) \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & -L_m & 0 & -(l_r + L_m) \\ L_m & 0 & L_m & 0 & (l_r + L_m) & 0 \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} R_{s1} & -\omega_s(l_{s1} + L_m) & 0 & -\omega_s L_m & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s(l_{s1} + L_m) & R_{s1} & \omega_s L_m & 0 & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & -\omega_s L_m & R_{s2} & -\omega_s(l_{s2} + L_m) & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_m & 0 & \omega_s(l_{s2} + L_m) & R_{s2} & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

En mettant l'équation (III.35) sous forme d'état, on trouve :

$$[\dot{I}] = [L]^{-1} \{ [B]. [U] - \omega_{gl}[C]. [I] - [D]. [I] \} \quad (III.36)$$

### III.6 Modèle de la machine asynchrone à triple étoile dans le repère naturel

À partir de système d'équations du modèle mathématique de la machine asynchrone à multi-étoile (III.9), nous avons déterminé la modélisation de la machine asynchrone à triple étoile dans le repère naturel (abc) qui s'écrit sous la forme d'un système d'équation différentielle (sous la forme Cauchy) comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} [i_{s1}] = [L_{s1}]^{-1} ([v_{s1}] - [R_{s1}][i_{s1}] - [L_{s1,s2}] \frac{d}{dt} [i_{s2}] - [L_{s1,s3}] \frac{d}{dt} [i_{s3}] - [L_{s1,r}] \frac{d}{dt} [i_r] - \omega_r \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1,r}][i_r]) \\ \frac{d}{dt} [i_{s2}] = [L_{s2}]^{-1} ([v_{s2}] - [R_{s2}][i_{s2}] - [L_{s1,s2}]^t \frac{d}{dt} [i_{s1}] - [L_{s2,s3}] \frac{d}{dt} [i_{s3}] - [L_{s2,r}] \frac{d}{dt} [i_r] - \omega_r \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2,r}][i_r]) \\ \frac{d}{dt} [i_{s3}] = [L_{s3}]^{-1} ([v_{s3}] - [R_{s3}][i_{s3}] - [L_{s1,s3}]^t \frac{d}{dt} [i_{s1}] - [L_{s2,s3}]^t \frac{d}{dt} [i_{s2}] - [L_{s3,r}] \frac{d}{dt} [i_r] - \omega_r \frac{d}{d\theta_r} [L_{s3,r}][i_r]) \\ \frac{d}{dt} [i_r] = [L_r]^{-1} ([v_r] - [R_r][i_r] - [L_{s1,r}]^t \frac{d}{dt} [i_{s1}] - [L_{s2,r}]^t \frac{d}{dt} [i_{s2}] - [L_{s3,r}]^t \frac{d}{dt} [i_{s3}] - \\ \omega_r \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1,r}]^t [i_{s1}] - \omega_r \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2,r}]^t [i_{s2}] - \omega_r \frac{d}{d\theta_r} [L_{s3,r}]^t [i_{s3}]) \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \left[ P \left( [i_{s1}]^t \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1,r}][i_r] + [i_{s2}]^t \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2,r}][i_r] + [i_{s3}]^t \frac{d}{d\theta_r} [L_{s3,r}][i_r] \right) - C_r - f\Omega_r \right] \end{array} \right. \quad (\text{III.37})$$

### III.7 Simulation et interprétations de résultat de la MASDE

Pour la simulation il suffit d'implanter le modèle électrique de la machine asynchrone double étoile sous l'environnement MATLAB/Simulink.

La MASDE est alimentée par deux sources de tensions triphasées purement sinusoïdale, équilibrées (380 V - 50Hz) et décalées entre elles d'un angle  $\alpha=30^\circ$  comme exprimées dans les équations (III.72) et (III.73), où les paramètres sont déterminés dans le chapitre précédent.

➤ pour l'étoile 1 :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{sa1} = \sqrt{2} V_s \sin(\omega_s t) \\ v_{sb1} = \sqrt{2} V_s \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{sc1} = \sqrt{2} V_s \sin(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) \end{array} \right. \quad (\text{III.38})$$

➤ pour l'étoile 2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{sa2} = \sqrt{2} V_s \sin(\omega_s t - \frac{\pi}{6}) \\ v_{sb2} = \sqrt{2} V_s \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}) \\ v_{sc2} = \sqrt{2} V_s \sin(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}) \end{array} \right. \quad (\text{III.39})$$

Avec :

$V_s$  : Valeur efficace de la tension ;  $\omega_s$  : Pulsation d'alimentation.

La machine, tout d'abord tourne à vide, puis dans l'intervalle de temps [1 s , 2 s] nous appliquons une charge nominale de 13.2 (N.m), en suite la charge est débranchée dans l'intervalle de temps [2 s , 3 s] et enfin à t = 3 (s) une charge de -13.2 sera appliquée.

### III.7.1 Simulation et interprétations de résultat dans le cas les deux étoiles identiques

Cela consiste l'étude de comportement de la MASDE dans le cas deux étoiles identiques dans les deux repères (abc) et (d, q), sachant que  $l_{s1} = l_{s2}$ ,  $R_{s1} = R_{s2}$ .

#### ✓ Couple électromagnétique

Au démarrage, le couple électromagnétique passe par un régime transitoire. Il présente des oscillations qui atteignent une valeur maximale de 50.82 (N.m) et qui disparaissent au bout de 0.22 (s), puis il diminue d'une façon presque linéaire et se stabilise à sa valeur minimale de 0.38 (N.m) qui correspond à la compensation des pertes par frottements.

À l'instant  $t = 1$  (s), on constate l'augmentation du couple électromagnétique à une valeur de 13.46 (N.m) qui compose le couple de charge, à  $t = 2$  (s) la charge est débranchée le couple électromagnétique chute et reprend sa valeur précédente à vide.

À l'instant  $t = 3$  (s), diminution de couple qui suit de près la référence de couple de charge à une valeur de -12.77 (N.m), comme montre la figure (III.3).

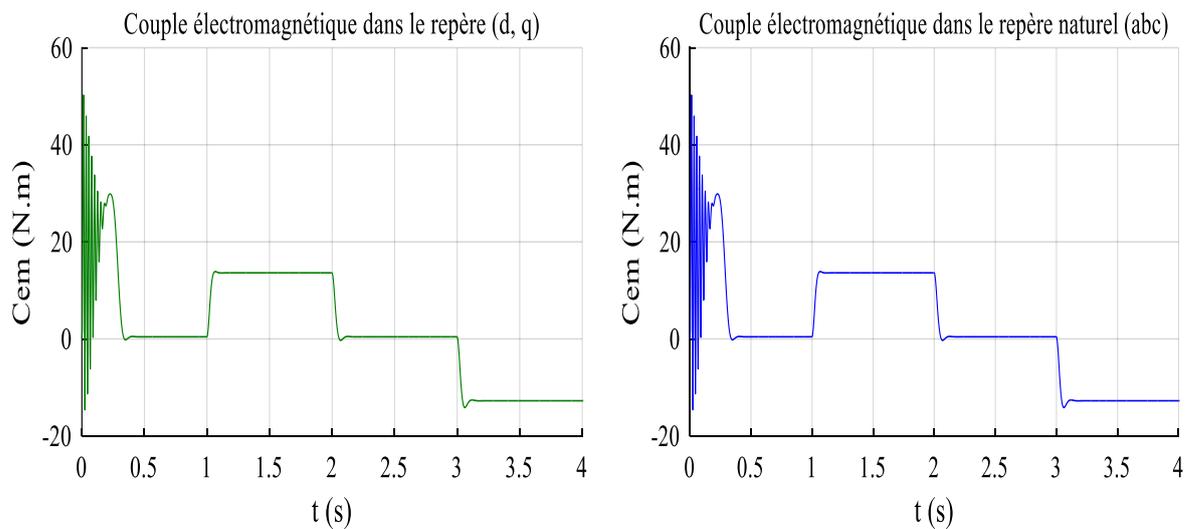


Figure (III.3): Allure du couple électromagnétique

#### ✓ Vitesse de rotation

La figure (III.4) retrace l'évolution de la vitesse de rotation de la machine exprimée en (rd/s) en fonction du temps. En effet au démarrage à vide la vitesse augmente et évolue d'une manière presque linéaire qui représente le temps de réponse de la machine, puis elle se stabilise au voisinage de la vitesse de synchronisme d'une valeur de 313.22 (rd/s).

Lors de la connexion de la charge à  $t = 1$  (s), la vitesse diminue jusqu'à 297.7 (rd/s) de cela la machine fonction comme moteur, puis dans l'intervalle [2 s, 3 s] la charge est séparée, l'arbre de la machine retrouve sa vitesse précédente à vide.

À l'instante  $t = 3$  (s), l'arbre de la machine est entraîné à une vitesse de rotation de 325.5 (rd/s), le glissement devient négatif ou la machine fonction comme génératrice.

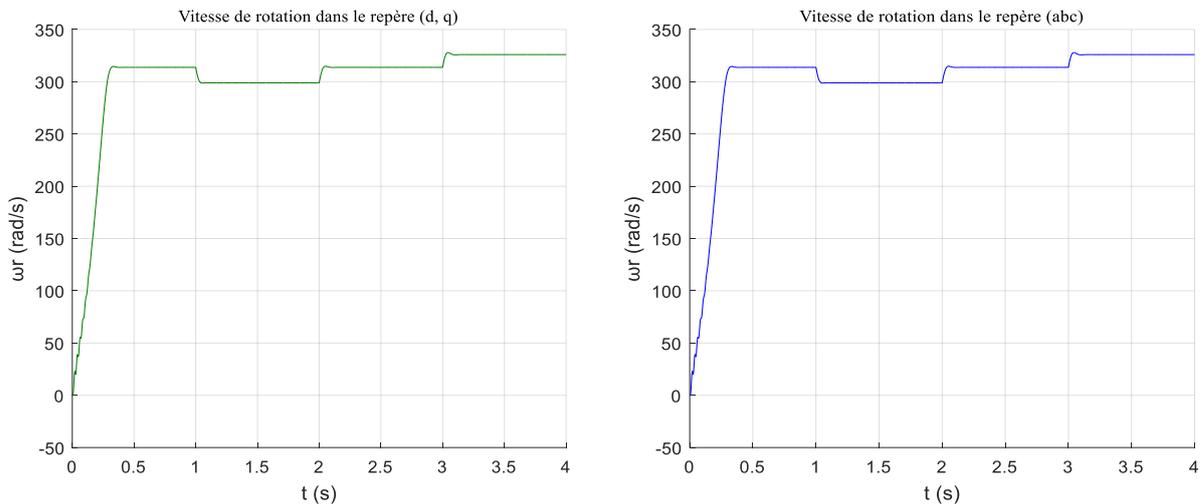


Figure (III.4) : Allure de la vitesse de rotation

✓ **Courants et tensions statoriques**

Lors de démarrage à vide, les courants absorbés par les deux étoiles présentent des dépassements excessifs qui atteignent la valeur de 45.8 (A), presque cinq fois le courant nominal. Le régime permanent est atteint après une période de 0.35 (s) et donner lieu à une forme sinusoïdale d'amplitude constante de 2.79 (A).

Après l'application de la charge à  $t = 1$  (s), les courants statoriques  $i_{s1}$  et  $i_{s2}$  augmentent instantanément et atteignent une valeur de 4.06 (A), à  $t = 2$  (s), la charge est débranchée les courants diminue et prennent les valeurs précédentes à vide.

Lors de l'application de la charge à  $t = 3$  (s), les courants statoriques  $i_{s1}$  et  $i_{s2}$  augmentent et atteignent une valeur de 3.3 (A). La figure (III.5) représente l'évolution des courants statoriques.

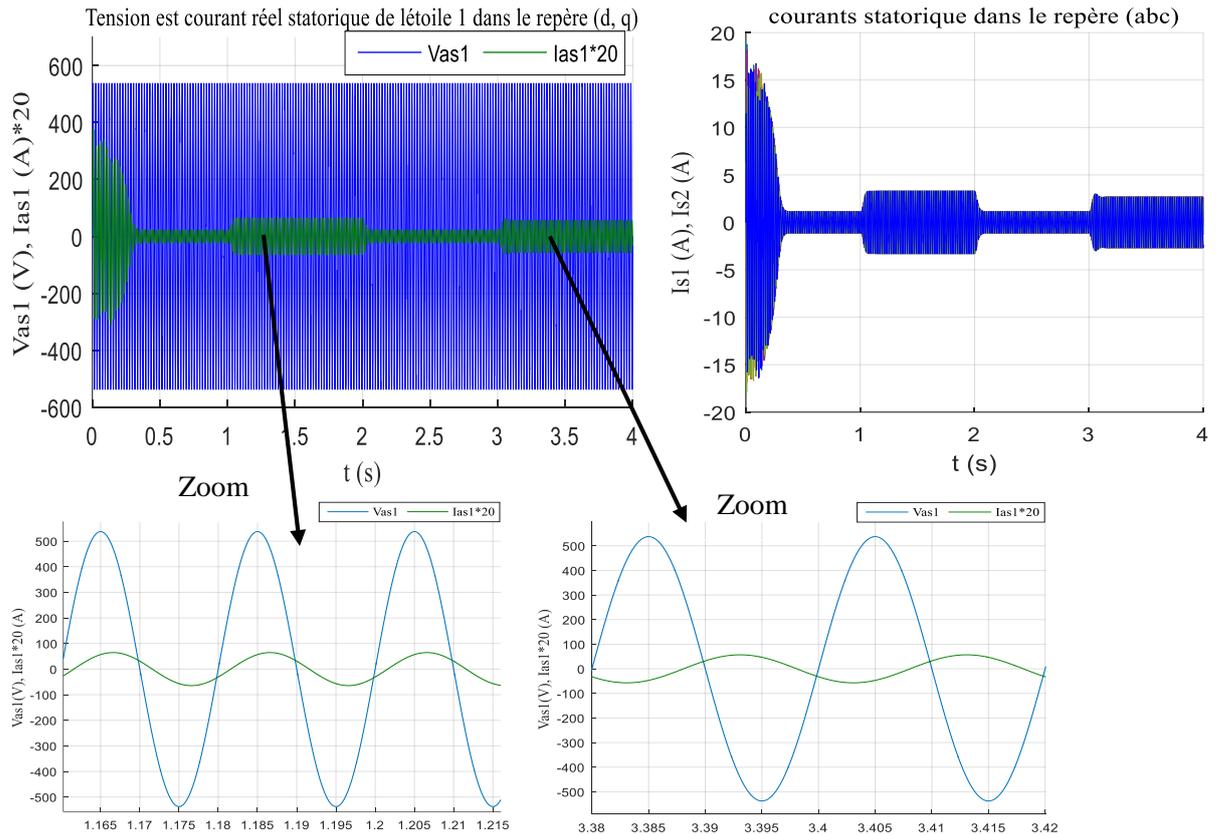


Figure (III.5): Courbe de tension et de courant statorique de l'étoile 1 de la première phase

✓ **Courants rotoriques**

La figure (II.6) retrace l'évolution des courants rotoriques en fonction de temps, en effet les courants rotoriques évoluent pendant le régime transitoire à la même manière que les courants statoriques par rapport l'amplitude, le régime permanent atteint à 0.36 (s), le courant est presque nul à cause des faibles valeurs de glissement.

À l'instant  $t = 1$  (s), les courants rotoriques augmentant à une valeur de 5.75 (A), à  $t = 2$  (s), la charge est débranchée et les courants sont presque nuls.

À l'instant  $t = 3$  (s), les courants rotoriques augmentant à une valeur de 4.81 (A).

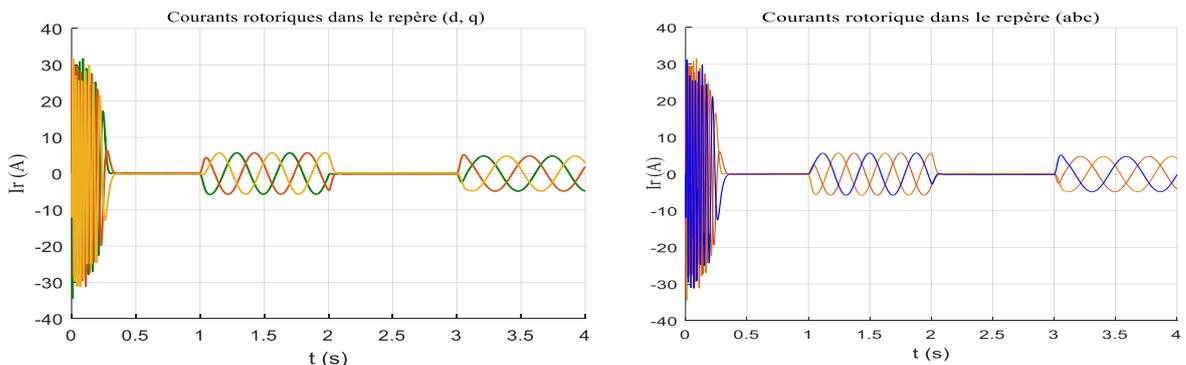
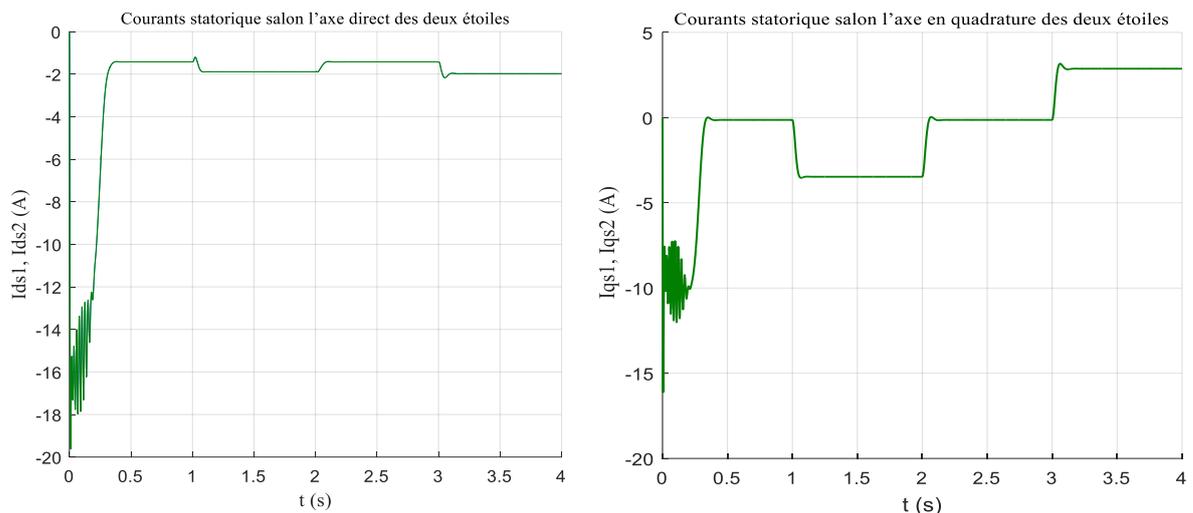


Figure (III.6) : Allure des courants rotoriques

✓ **Courants statorique direct et en quadrature**

La figure (III.7) représente les courants statoriques direct et en quadrature des deux étoiles, au démarrage les courants sont évolués d’une manière presque linéaire avec quelques oscillations qui sont enregistrées pendant près de 0.22 (s), puis ils se stabilisent en atteignant les valeurs de  $i_{ds1} = i_{ds2} = -1.42$  (A) pour les courants selon l’axe direct et de  $i_{qs1} = i_{qs2} = -1.13$  (A) pour les courants selon l’axe en quadrature. Puis dans l’intervalle [1 s , 2 s] les courants diminuent selon l’axe direct et en quadrature à des valeurs suivantes  $i_{ds1} = i_{ds2} = -1.89$  (A) et  $i_{qs1} = i_{qs2} = -3.46$  (A) respectivement, ensuite dans l’intervalle [2 s, 3 s] la charge est séparée donc les courants prennent les valeurs précédentes à vide.

À l’instant  $t = 3$  (s), les courants statoriques direct des deux étoiles diminuent à une valeur qui égale à  $i_{ds1} = i_{ds2} = -1.89$  (A), par contre les courants statoriques en quadrature des deux étoiles augmentent jusqu’à la valeur de  $i_{qs1} = i_{qs2} = 2.87$  (A).



**Figure (III.7) :** Allure des courants statoriques direct et en quadrature des deux étoiles

✓ **Flux rotorique direct et en quadrature**

Selon la figure (III.8), l’évolution des flux rotoriques est presque égale à celle de couple électromagnétique.

au démarrage l’allure du flux rotorique direct et le flux rotorique en quadrature représente des oscillations pendant 0.22 (s), ensuite il diminue d’une façon presque linéaire et se stabilise à -2.08 (Wb) pour le flux rotorique direct et à -0.03 (Wb) pour le flux rotorique en quadrature.

À l'instant  $t=1$  (s), la valeur du flux augmente jusqu'à  $-1.92$  (Wb) pour le flux rotorique direct et à  $-0.29$  (Wb) pour le flux rotorique en quadrature. Puis à  $t = 2$  (s), la charge est débranchée le flux reprend à sa valeur précédente à vide.

À l'instant  $t=3$  (s), le flux diminue à  $-2.11$  (Wb) pour le flux rotorique direct et à  $-0.35$  (Wb) pour le flux rotorique en quadrature.

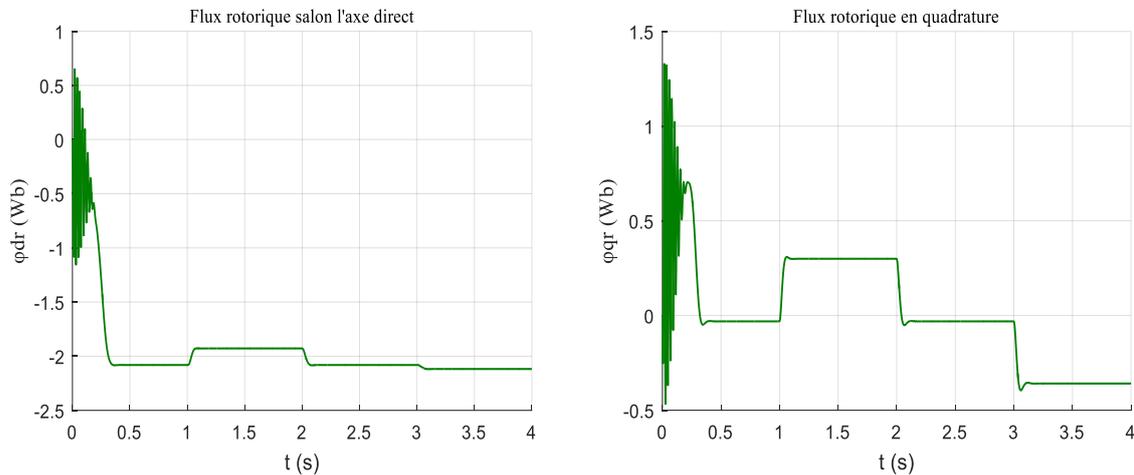


Figure (III.8) : Allure du flux rotoriques direct et en quadrature

### III.7.2 Simulation et interprétations de résultant dans le cas les étoiles non identiques

Cela consiste l'étude de comportement de la MASDE dans le cas étoile non identique dans les deux repères (abc) et (d, q), sachant que  $l_{s1} \neq l_{s2}$ ,  $R_{s1} \neq R_{s2}$ .

#### ✓ Couple électromagnétique

Au démarrage à vide, le couple présente des oscillations qui atteignent une valeur maximale de  $50.82$  (N.m) et qui disparaissent au bout de  $0.22$  (s), puis se stabilise à sa valeur minimale de  $0.38$  (N.m), qui correspond à la compensation des pertes par frottements.

À l'instant  $t = 1$  (s), on constate l'augmentation du couple électromagnétique à une valeur de  $13.46$  (N.m),

À l'instant  $t = 3$  (s), engendre une diminution de couple qui suit de près la référence de couple de charge à une valeur de  $-12.77$  (N.m), comme montre la figure (III.9).

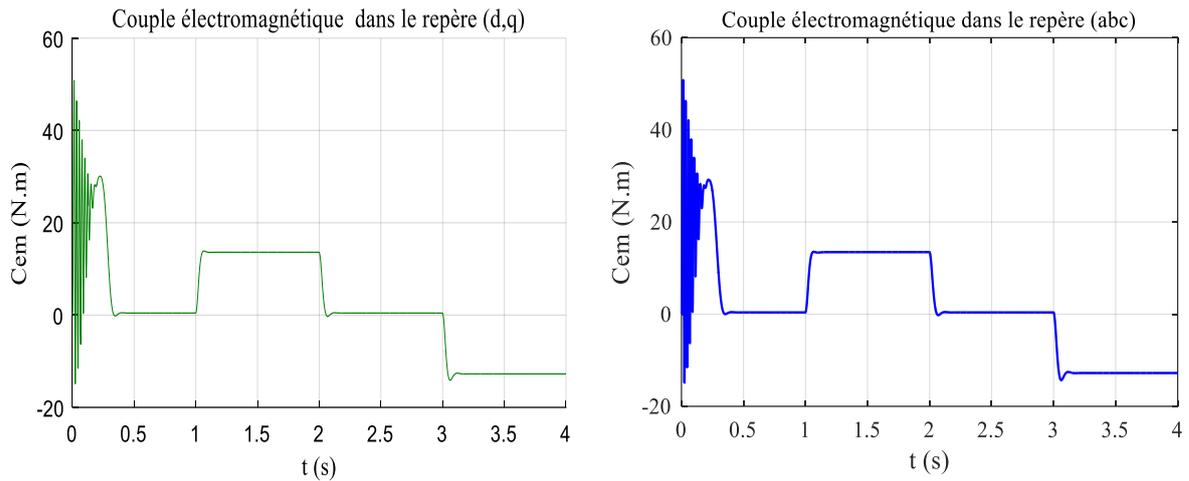


Figure (III.9): Allure du couple électromagnétique

✓ **Vitesse de rotation**

La figure (III.10) représente l'évolution de la vitesse de rotation de la machine exprimée en (rad/s) en fonction du temps. En effet au démarrage à vide la vitesse augmente et évolue d'une manière presque linéaire qui représente le temps de réponse de la machine, puis elle se stabilise au voisinage de la vitesse de synchronisme d'une valeur de 313.22 (rd/s).

À  $t = 1$  (s), la machine fonctionne comme moteur et on constate que la vitesse diminue jusqu'à 297.7 (rd/s).

À l'instante  $t = 3$  (s), l'arbre de la machine est entraîné à une vitesse de rotation de 325.5 (rd/s), le glissement devient négatif ou la machine fonctionne comme génératrice.

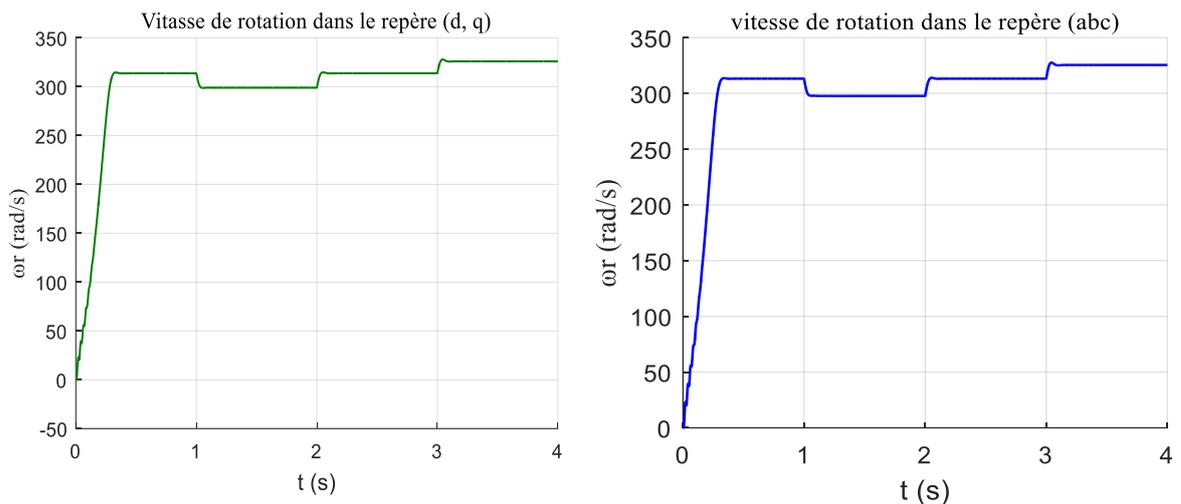


Figure (III.10) : Courbes de la vitesse de rotation

### ✓ Courants statoriques

Lors du démarrage de la machine, les courants absorbés par l'étoile 1 et l'étoile 2 présentent des dépassements excessifs qui atteignent les valeurs de  $i_{s1} = 36$  (A) et  $i_{s2} = 9.9$  (A), en effet le courant absorbé par la machine est presque cinq fois le courant nominal. Le régime permanent est atteint après une période de 0.35 (s) qui donne lieu à une forme sinusoïdale d'amplitude constante de 2.18 (A) pour l'étoile 1 et de 0.61 (A) pour l'étoile 2.

Après la connexion de la charge, la machine absorbe du réseau d'avantage de courant selon la nature de la charge. Lors l'application d'une charge de 13.2 (N.m) le courant oscille autour de 6.32 (A) pour l'étoile 1 et 1.79 (A) pour l'étoile 2. En effet le courant absorbé par la machine est de 8.11 (A) qui représente le courant nominal de la machine, donc la plaque signalétique donné par le constructeur est pertinente, cependant lors on applique une charge de -13.2 (N.m) le courant passe à une valeur de 5.14 (A) pour l'étoile 1 et 1.46 (A) pour l'étoile 2, comme le présente dans la figure (III.11).

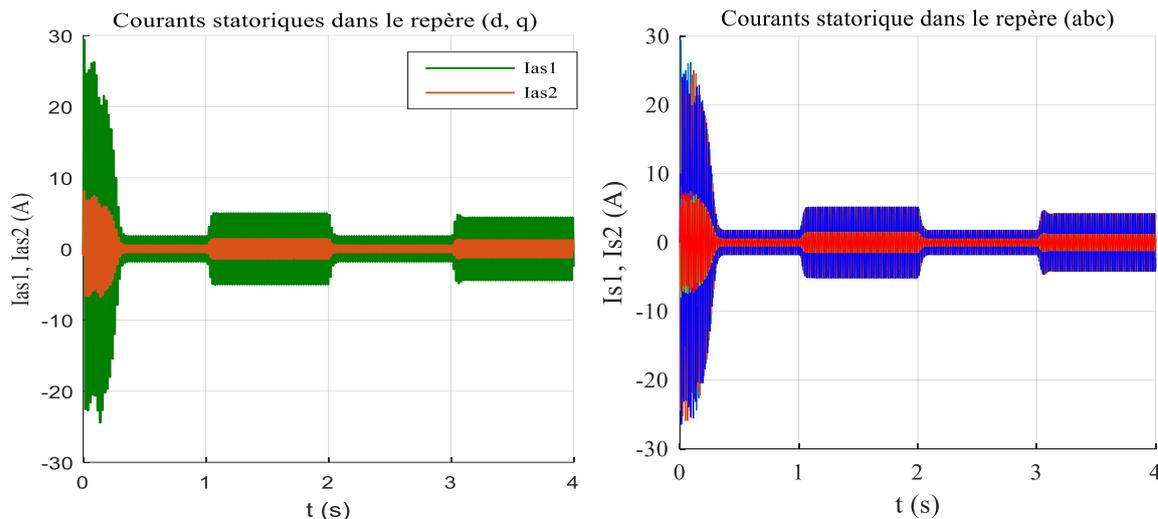


Figure (III.11) : Courbes des courants statoriques

### ✓ Courants rotoriques

La figure (III.12) retrace l'évolution des courants rotoriques en fonction du temps, en effet les courants rotoriques évoluent pendant le régime transitoire de la même manière que les courant statoriques, le régime permanent atteint à 0.36 (s), le courant est presque nul à cause des faibles valeurs de glissement.

À l'instant  $t = 1$  (s), les courants rotoriques augmentent à une valeur de 5.75 (A), à  $t = 2$  (s), la charge est débranchée et les courants sont presque nuls. À l'instant  $t = 3$  (s), les courants rotoriques augmentent à une valeur de 4.81 (A).

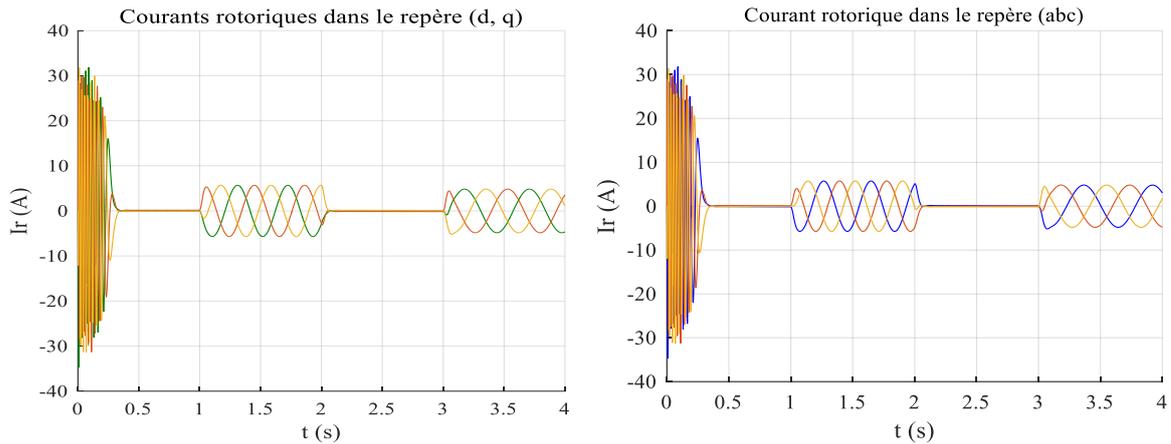


Figure (III.12) : Courbes des courants rotoriques

### III.7.3 Comparaisons des résultats

#### a) Comparaison entre le modèle d'axe (d, q) et le modèle naturel (abc)

Après les simulations des deux modèles, nous constatons que les résultats sont identiques pour la vitesse de rotation, le couple électromagnétique, les courants statoriques ainsi que les courants rotoriques. En effet le modèle naturel (abc) se régit sur le temps de la simulation qui est long par rapport le modèle d'axe (d, q).

#### b) Comparaison entre les deux cas d'étude

Lors de l'étude de comportement de la machine dans les deux cas, nous constatons que les résultats de la vitesse de rotation, le couple électromagnétique et le courant rotorique sont identiques, cependant les courants statoriques dans le premier cas d'étude, les deux étoiles sont de même oscillation, mais dans le deuxième cas ses amplitudes sont différentes entre eux.

En conséquence le cas non identique ne conduit pas à des variations de couple n'est des diminutions de la vitesse rotation, en revanche les courants statoriques de la première étoile s'augmentant par rapport à la deuxième étoile.

### III.8 Simulation et interprétations des résultats de la machine asynchrone à triple étoile

Pour la simulation de la machine asynchrone à triple étoile, il suffit d'implanter le modèle électromécanique sous l'environnement MATLAB/ Simulink.

La figure (III.13) montre les résultats de simulation d'un démarrage à vide de la machine asynchrone à triple étoile alimentée par trois sources de tension triphasés décalés d'un angle  $\alpha = \alpha_2 = 0^\circ$  suivi de l'application de charge de 13.2 (N.m) à l'instant  $t = 1.5$  (s). À noter que les

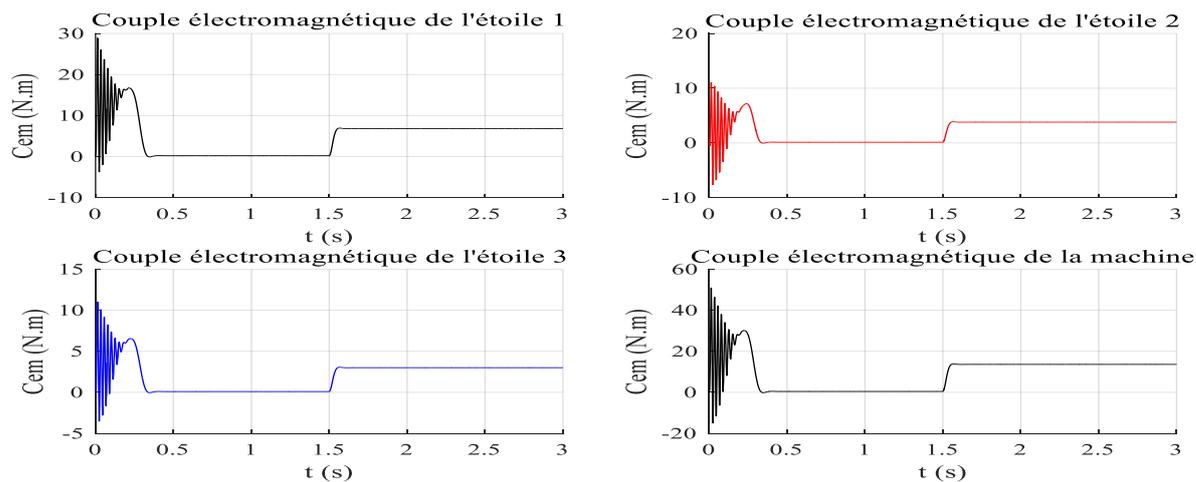
étoiles n'ont pas les mêmes paramètres (étoiles non identique) sachant que  $l_{s1} \neq l_{s2} \neq l_{s3}$   
 $R_{s1} \neq R_{s2} \neq R_{s3}$ .

➤ **Fonctionnement à vide**

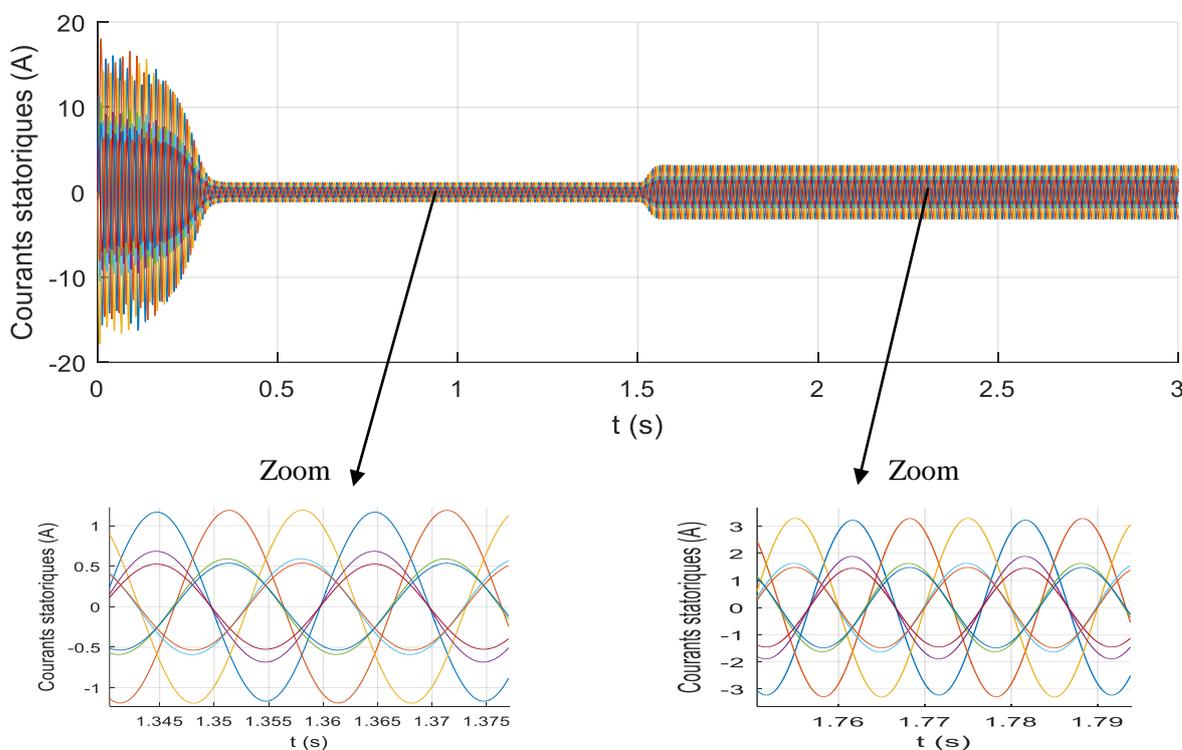
- Lors le démarrage à vide, le couple électromagnétique présente des oscillations au régime transitoire qui atteignent la valeur maximale de 50.8 (N.m), et se stabilise à partir  $t = 0.38$  (s) à une valeur très faible de 0.43 (N.m) pour compenser les pertes par frottements.
- La vitesse rotorique passe aussi par un régime transitoire d'une durée de 0.36 (s) que représente le temps de réponse de la machine, puis elle se stabilise au voisinage de la vitesse de synchronisme d'une valeur 313.72 rd/s.
- Au démarrage, les courants des étoiles 1, 2 et 3 ( $i_{s1}$ ,  $i_{s2}$  et  $i_{s3}$ ) passent par un régime transitoire dont les valeurs qui atteignent 5 fois le courant nominal de la machine. Leurs valeurs sont d'ordre de  $i_{s1} = 12.73$  (A),  $i_{s2} = 7.14$  (A),  $i_{s3} = 5.72$  (A). Ensuite, ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre les valeurs de  $i_{s1} = 0.8$  (A),  $i_{s2} = 0.47$  (A),  $i_{s3} = 0.36$  (A).
- Les courants rotoriques évoluent pendant le régime transitoire à la même manière que les courants statoriques et s'annulent pendant le régime établi.

➤ **Fonctionnement en charge**

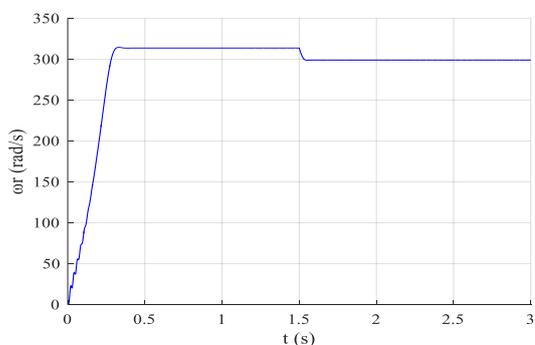
L'application d'une charge la machine à l'instant  $t = 1.5$  (s), provoque une perturbation qui sera compensée par l'accroissement de couple électromagnétique, il atteint une valeur établie de 13.6 (N.m) qui est légèrement supérieure au couple de la charge 13.2 (N.m). Pour la vitesse, on constate qu'elle diminue jusqu'à 298.9 (rad/s). Les courants statoriques comme montre la figure (III.13), augmentent instantanément et atteignent les valeurs suivantes :  $i_{s1} = 2.23$  (A),  $i_{s2} = 1.3$  (A),  $i_{s3} = 1$  (A).



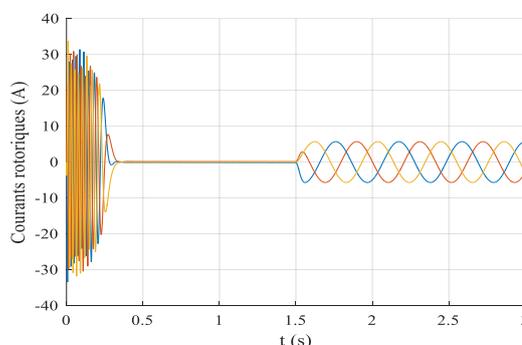
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure (III.13) :** Evolutions des caractéristiques de la machine asynchrone à triple étoile tel que : (a) : Couples électromagnétiques ; (b) : Courants statoriques ; (c) : Vitesse de rotation ; (d) : Courants rotoriques.

### **III.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, une description de la machine asynchrone multi-étoile avec une modélisation générale de la machine double et triple étoile dans les deux repères  $(abc)$ ,  $(d, q)$  a été effectuée tout en adoptant certaines hypothèses simplificatrices.

Une simulation de la MASDE par le logiciel MATLAB/Simulink pour le modèle de Park et naturel est élaborée dans les deux cas les étoiles identiques et les étoiles non identiques dans le but d'effectuer une étude caractéristique de la MASDE directement alimentée par deux sources sinusoïdales. Nous concluons que les résultats de la simulation sont identiques pour les deux modèles, le modèle naturel nous permettra de faire de nouvelles études et simulations (par exemple le mode dégradé) de la MASDE, l'inconvénient se régit sur le temps de la simulation qui est assez grand.

La simulation de la machine asynchrone triple étoile dans le repère naturel  $(abc)$  alimentée par trois sources de tensions sinusoïdales est réalisée afin de suivre l'évolution des caractéristiques de la machine à triple étoile.

---

## Conclusion générale

---

En conclusion, l'analyse et l'étude précédent nous a permis de bien cerner le comportement de la machine asynchrone multi-étoile, ainsi que la détermination des paramètres d'une machine asynchrone triple étoile, afin de mieux maîtriser la machine sous ces différents aspects de fonctionnels.

En premier lieu, nous avons présenté quelques généralités sur les machines multiphasées et leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs domaines d'application et ce qu'elles peuvent apporter de plus comparé aux machines triphasées, en suite la connaissance des paramètres crêtes de la machine qui sont indispensable pour la modélisation et la simulation, cela est fait à l'aide d'une machine asynchrone triple étoile à cage qui est déjà réalisée.

Pour déterminer ces paramètres nous avons mis en place un banc d'essai pour effectuer les essais envisagés tels que l'essai en courant continu, l'essai à vide, l'essai en synchronisme, l'essai à rotor bloqué et l'essai par ralentissement.

Afin de vérifier les paramètres obtenus par les essais pratiques et mieux maîtriser la machine, nous avons procédé à la modélisation de la machine asynchrone à double étoile et la machine asynchrone à triple étoile tout en adoptant certaines hypothèses simplificatrices et en effectuant un changement de repère par l'application de la transformation de Park.

Après la détermination des paramètres, nous avons effectué la simulation des deux machines la machine asynchrone à triple étoile dans le repère naturel et la machine asynchrone à double étoile alimentée par deux sources de tension triphasé équilibré afin d'étudier son comportement dans les deux cas ( étoiles identiques et étoiles non identiques) selon les deux repères naturel (abc) et le système d'axes (d, q). Pour terminer, on a relevé les résultats de simulation sur MATLAB/Simulink, une comparaison est faite entre les deux cas et on a conclu que les résultats de simulation sont satisfaisants.

D'après les résultats obtenus et des observations enregistrées, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à mieux exploiter la machine asynchrone multi-étoile sont envisageables :

- ◆ L'application expérimentale des différentes commandes telle que la commande vectorielle directe.
  - ◆ L'étude du comportement de la machine dans les différents angles de décalage.
-

- ◆ Étude expérimentale de la machine en poste défauts (court-circuit d'une ou plusieurs bobine, cassure de barre du rotor).
- ◆ L'étude de cette machine en mode génératrice et son intégration dans un système de production d'énergie.

L'effort de contribution à l'étude de la machine asynchrone multi-étoile s'achève dans ces remarques et conclusions. Il reste tout de même la possibilité d'espérer de poursuivre les recherches liées à sa structure, à son alimentation et aux différentes commandes qui peuvent lui être associées.

---

## Bibliographie

---

- [01] : P. Mayyé, « Moteur électrique industrielle », Sciences Sup, 2 éditions, 2011.
- [02] : Bouagga et Merabet « Commande d'une machine Asynchrone à double stator par régulateur glissant », Université de Ouargla 2019.
- [03] : BOUDJTAT et HIMOURA Étude et Simulation d'une Machine Asynchrone Alimenté Par Un Onduleur De Tension A Commande MLI 2017 Université de Annaba.
- [04] : S. Eric, « Machines polyphasées pour application maritime. Modélisation et contrôle », Journées d'Eté à Lille, Juillet 2005.
- [05] : M. Bernard, « Historique des machines électromagnétiques et plus particulières des machines a réluctance variable ». Revue 3E. In°3. pp. 3–8, Juin 1995.
- [06] : J. Belhadj, I. Slama-Belkhodja, M. Pietrzak-David, B.de Fornel, « A multi machine multi-inverter DTC strategy », Electrimacs, 18-21. Electric Drives 1, aout 2002.
- [07]: B. Mohamed said, S. Berrabahh, « Commande non linéaire d'une machine asynchrone double étoile », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2020.
- [08]: D. Hadiouche, « Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure », Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré de Nancy I, faculté des sciences et technique, 2001.
- [09]: L. Benalia, « Commande en tension des moteurs à induction double alimentés », Thèse de Doctorat, Université de BATNA, juin 2010.
- [10]: E. Merabet, « Commande floue adaptative d'une machine asynchrone double étoile », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2008.
- [11]: H. Amimeur, « Contribution au contrôle de la machine asynchrone double étoile », Thèse de Doctorat en science de l'université de Batna, 2012.
- [12]: M.A. Abbas, R. Christen, T.M. Jahns, « Six-phase voltage source inverter driven induction motor », IEEE Trans. Ind. Appl, Vol. IA-20, No. 5, pp. 1251-1259, Sept./Oct. 1984.

- [13]: F. Berrabah, Commande sans capteur de la machine asynchrone, Thèse Doctorat, Université Badji Mokhtar- Annaba, Algérie 2016.
- [14]: H. Hammache, « Étude et réalisation d'une machine asynchrone double étoile: conception, alimentation et commande », Mémoire de Magister de l'École Militaire Polytechnique, Alger, Algérie, Janvier 2007.
- [15]: H. Knudsen, « Extended Park transformation for 2×3-phase synchronous machine and Converter phasor model with representation of AC harmonics », IEEE Trans Energy Convers 1995; 10:126– 32. DIO: 10.1109/60.372577.
- [16]: E. Amirouche, « Modélisation dynamique et commande d'une génératrice hydrolienne polyphasée en fonctionnement non conventionnel », Thèse de Doctorat de l'Université A. MIRA-BEJAIA, Faculté de Technologie, février 2022.
- [17]: H.Yantour, J.Saadi, A.Khoumsi, « Modélisation et simulation d'une commande directe du couple appliquée à la machine asynchrone (DTC) », 6e conférence Francophone de Modélisation et Simulation, MOSIM'06, Rabat-MAROC, 3-5 avril 2006.