

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES ET SCIENCES DE LA MATIERE
DÉPARTEMENT :GÉNIE ÉLECTRIQUE



Mémoire

Master académique

Domaine : science et technique

Filière : Génie électrique

Spécialité: Machines électriques et électronique de puissance

Présenté par :

KERCHA SAFIA GOUBI WISSAM

Thème

***Etude et modélisation des machines
électriques double étoile***

Soutenu publiquement

Le :27/06/2013

Devant le jury :

M ^r .	R. KAFI	MAA	Président	UKM Ouargla
M ^r .	L. KHETTACHE	MAA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M ^r .	M. RACHEDI	MAA	Examineur	UKM Ouargla
M ^r .	M. RAZOUG	MAB	Examineur	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2012 /2013

Remerciement

Au nom de Dieu, le miséricordieux, louange à Dieu seigneur des mondes

et que la prière

et la paix soit sur notre prophète « MOUHAMED »

Nous tenons, tout d'abord ; à adresser nos plus profonds et sincères remerciement

A notre encadreur «Khattache Laid »

Qui a dirigé ce travail, pour tous ses conseils et ses encouragements avisés ainsi que pour

Ses travaux de recherche qui furent d'une aide précieuse.

à monsieur «Taibi Djamel»

pour ses conseils et son aide, toutes les expressions respectueuses

nous remercions aussi les membres de jury :

M^r.KAFI, M^r.M.RACHEDI, M^r.M.RAZOUG

qui ont accepté d'examiner notre travail.





Dédicace

À

ce qui m'est très chères du monde

À

*Mon regrettable papa qui m'a toujours soutenue dans mes études et
qui m'a donné le courage de continuer à vivre*

À

*Ma très chère mère, que ce travail soit pour toi la récompense
d'amour et de reconnaissance pour tout ce que tu fais pour moi.*

De mes sentiments les plus profonds.

A tous mes sœurs. Khadidja, Rekia, Yamina, Zineb

Et mes frères : Ali, Mohammed lamine.

Ainsi à toutes les enfants de mes sœurs

En témoignage de l'attachement, de l'amour et de

L'affection que je porte pour vous

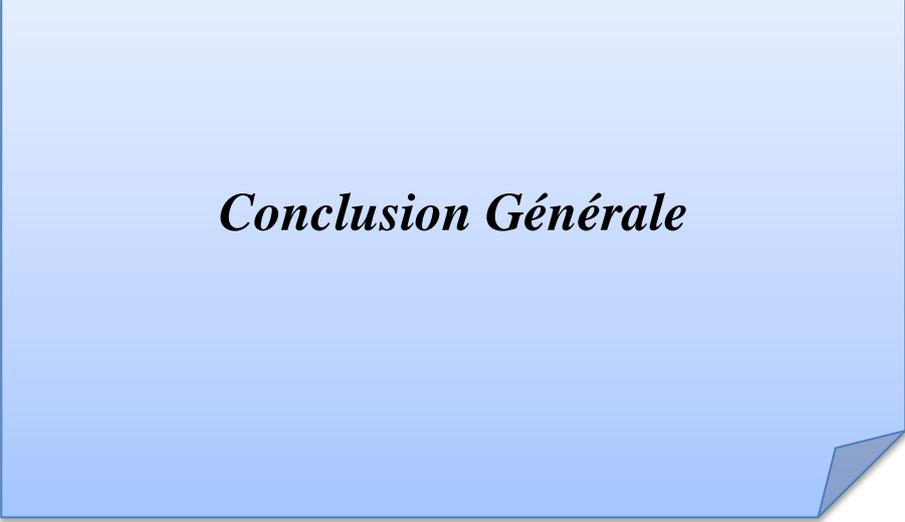
A tous mes amis de proches :

Amina, Mainana, Aicha, Kaouther, Tarek, Fethi.

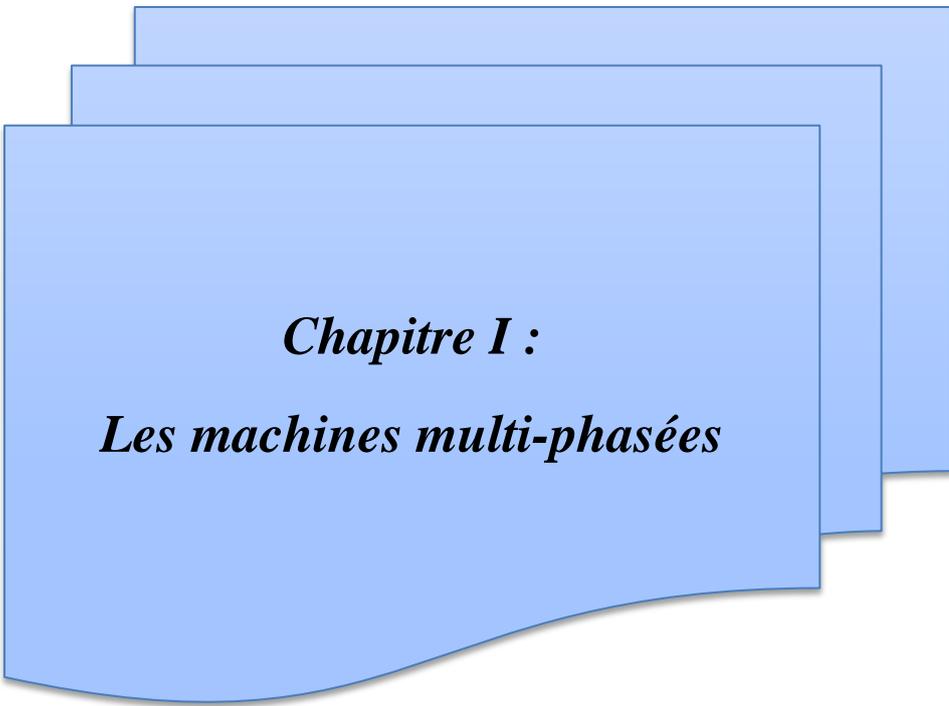
A ma grande famille

A toutes mes amies

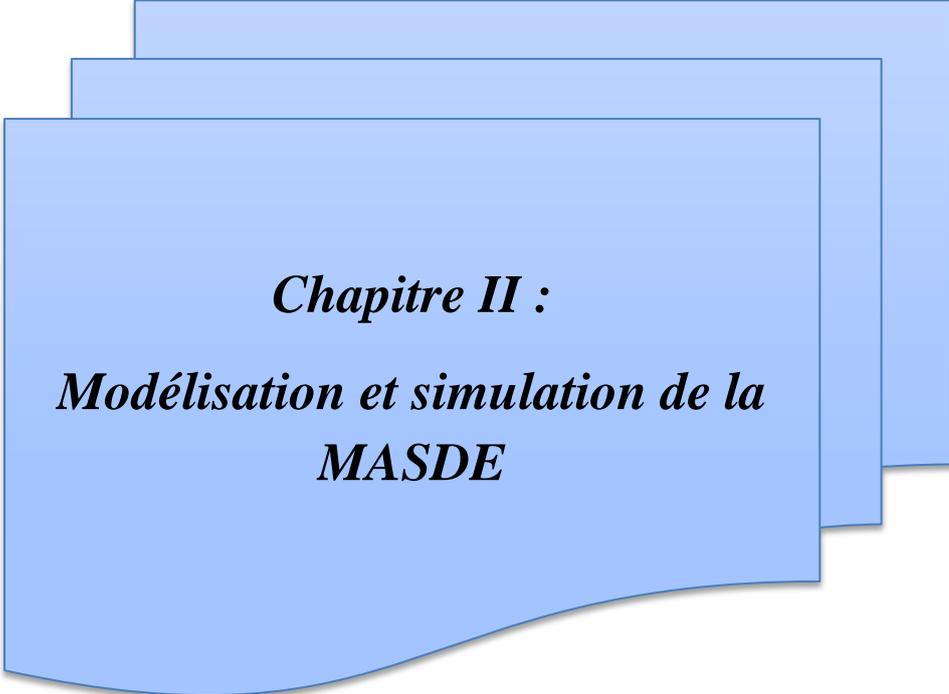
Safia.



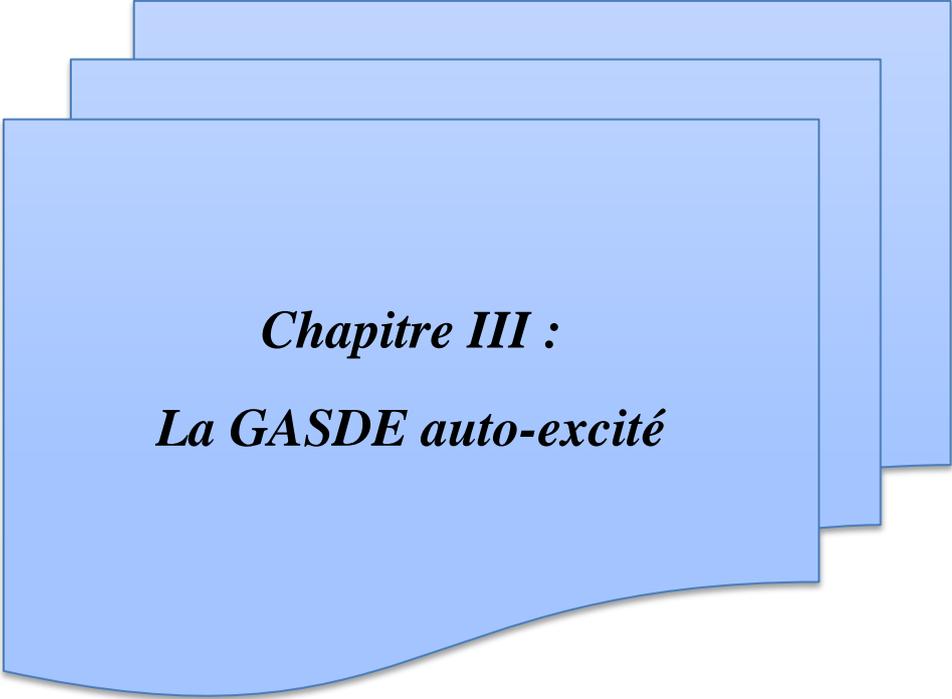
Conclusion Générale



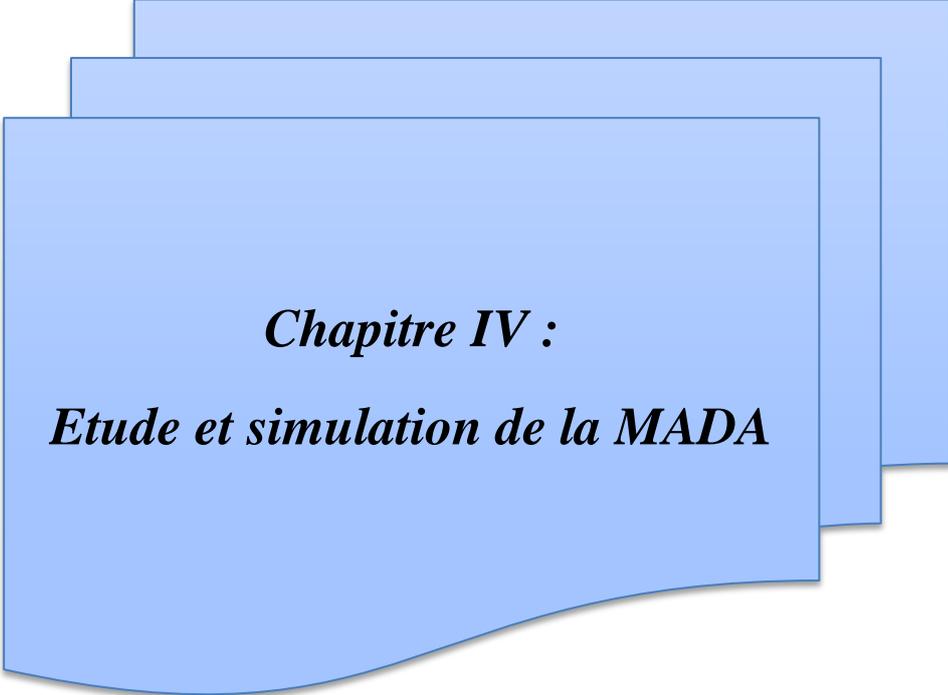
Chapitre I :
Les machines multi-phasées



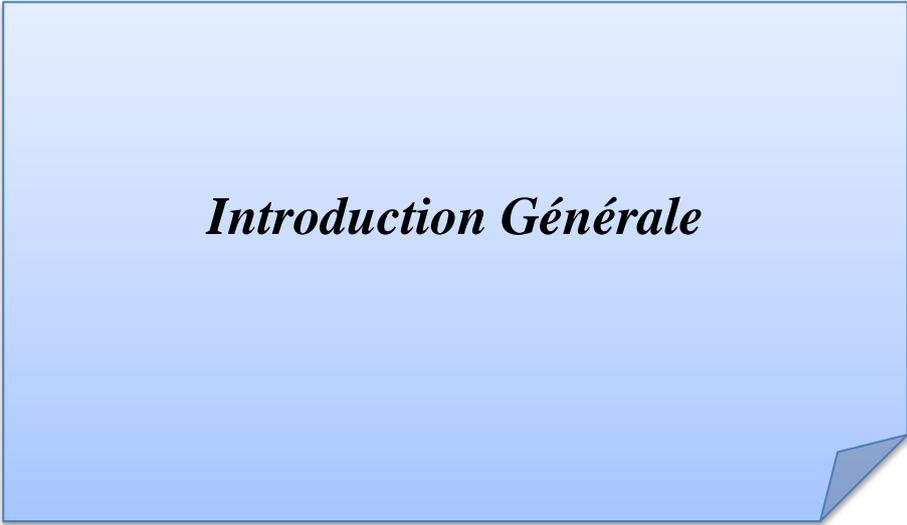
Chapitre II :
Modélisation et simulation de la
MASDE



Chapitre III :
La GASDE auto-excité



Chapitre IV :
Etude et simulation de la MADA



Introduction Générale

Notations

MASDE:	Machine Asynchrone à Double Etoile.
GASDE :	Génératrice Asynchrone à Double Etoile.
$S_1, S_2; r$:	Indices correspondants au stator 1, stator 2 et au rotor.
a_{s1}, b_{s1}, c_{s1} :	Indices correspondants au trois phases du 1 stator.
a_{s2}, b_{s2}, c_{s2} :	Indices correspondants aux trois phases du 2 stator.
a_r, b_r, c_r :	Indices correspondants aux trois phases du rotor.
R_{s1}, R_{s2}, R_r :	Résistances statoriques et rotoriques.
L_{s1}, L_{s2} :	Inductance propre d'une phase statorique.
L_r :	Inductance propre d'une phase rotorique.
L_{ms} :	Inductance mutuelle entre phases statoriques.
L_{sr} :	Inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques.
L_{mr} :	Inductance mutuelle entre phases rotoriques.
J :	Moment d'inertie.
Ω_m :	Vitesse mécanique de la machine.
ω_s :	Pulsation électrique statorique.
ω_r :	Pulsation électrique rotorique.
p :	Nombre de paires de pôles de la machine.
ω :	Vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport au rotor.
d, q :	Axes longitudinal et en quadrature du repère de Park.
C_r :	Couple résistant.
C_{em} :	Couple électromécanique.
K_f :	Coefficient de frottement.
$\Phi_{s1}, \Phi_{s2}, \Phi_r$:	Flux statorique et rotorique.
v :	Tension.
i :	Courant.
Φ_m :	Flux magnétisant

Tableau des figures

Listes des figures	Page
Figure (I.1) : Modes de fonctionnement suivant le glissement	05
Figure (I.2) : Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases.	06
Figure (II.1) : Représentation des enroulements statoriques et rotoriques de la MASDE	10
Figure (II.2) : Représentation des enroulements de la machine dans le repère (d, q) .	14
Figure (II.3) : Représentation schématique du modèle de Park de la MSADE	16
Figure (II.4) : Schéma bloc de simulation de la MASDE	23
Figure (II.5) : La vitesse de rotation	24
Figure (II.6) : Le couple électromagnétique	24
Figure (II.7) : Les flux rotoriques	24
Figure (II.8) : Les courants statoriques i_{ds}, i_{qs}	24
Figure (II.9) : Le courant statorique i_{sa1}	25
Figure (II.10) : courant rotorique réel	25
Figure (II.11) : La vitesse de rotation	26
Figure (II.12) : Le couple électromagnétique	26
Figure (II.13) : Les flux rotoriques Φ_{rd}, Φ_{qr} (Wb)	26
Figure (II.14) : Les courants statoriques	27
Figure (II.15) : Les courants statorique i_{sa1}	27
Figure (III.1) : Schéma représentatif de la GASDE auto-amorçée	29
Figure (III.2) : Le phénomène d'auto-amorçage	30
Figure (III.3) : Schéma équivalent de la GASDE	31
Figure (III.4) : Représentation des enroulements de la machine asynchrone double étoile selon les axes d, q .	31
Figure (III.5) : le schéma bloc de simulation de GASDE sans saturation	35
Figure (III.6) : la tension statorique ($c < \frac{1}{L_s \omega_s^2}$)	36
Figure (III.7) : Le courant statorique ($c < \frac{1}{L_s \omega_s^2}$)	36
Figure (III.8) : La tension statorique ($c > \frac{1}{L_s \omega_s^2}$)	37
Figure (III.9) : Le courant statorique ($c > \frac{1}{L_s \omega_s^2}$)	37

Figure (III.10) : le schéma bloc de simulation de GASDE avec saturation	38
Figure (III.11) : La variation de l'inductance de magnétisation	39
Figure (III.12) : La variation de l'inductance dynamique	39
Figure(III.13) : Evolution des tensions statoriques	39
Figure(III.14) : Evolution de courant de magnétisation	40
Figure (III. 15) : Influence de capacité sur les tensions statoriques	40
Figure (III. 16) : Influence de capacité sur le courant de magnétisation	41
Figure(III.17) : Influence de capacité sur l'inductance de magnétisation	41
Figure(III.18) : Influence de capacité sur l'inductance dynamique	41
Figure(IV.1) : Structure du stator et des contacts rotoriques de la machine asynchrone à rotor bobiné.	44
Figure(IV.2) : Représentation dans le repère naturel (a, b, c)	45
Figure(IV.3) : Représentation des enroulements de la machine dans le repère (d, q).	48
Figure (IV.4): Schéma bloc de simulation de la MADA	50
Figure(IV.5) : La vitesse de rotation	50
Figure (IV.6): Le couple électromagnétique	50
Figure(IV.7) : Les courants sotoriques	51
Figure (IV.8):Les courants rotoriques	51
Figure (IV.9) : Le courants statorique réel Ias	51
Figure(IV.10) : La vitesse de rotation	52
Figure (IV.11) : Le couple électromagnétique	52
Figure (IV.12) : Les courants sotoriques	52
Figure(IV.13) : Les courants rotoriques	52
Figure(IV.14) : Le courants statorique réel Ias	53
Figure(IV.15) : La vitesse de rotation	53
Figure(IV.16): Le couple électromagnétique	53
Figure(IV.17) : Les courants sotoriques	53
Figure (IV.18): Les courants rotoriques	54
Figure(IV.19) : Le courants statorique réel Ias	54

Liste de Tableau

Tableau.I.1 : machines dont le nombre de phases statoriques est un multiple de trois "type1"	03
Tableau.I.2 : machines dont le nombre de phases statoriques est un nombre impair "type2"	04

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Les machines multi-phaées		
I.1. Introduction		01
I.2. Histoire des machines électriques		01
I.3. Les Caractéristiques des Machines Multiphasées.....		02
I.3.1. Les Machine multi-phasées de type 1		02
I.3.2. Les machines multiples de type2		04
I.4. Principe de fonctionnement de la machine multi-phasées		05
I.5. Applications des Machines Multiphasées.....		06
I.6. Avantages des Machines Multiphasées.....		06
I.7. Inconvénients des machines multiphasées.....		07
I.8. conclusion.....		07
Chapitre II : Modelisation et simulation de la MASDE		
II.1. Introduction.....		08
II.2. Description du moteur asynchrone à double étoile.....		08
II.3. Hypothèses simplificatrices.....		09
II.4. Modèle triphasé de la MASDE sur les axes réels.....		09
II.4.1. Equations électriques.....		10
II.4.2. Equations magnétiques.....		12
II.4.3. Equations mécaniques.....		13
II.5. Modèle biphasé.....		14
II.6. choix du référentiel		16
II.6.1. Référentiel lié au stator.....		16
II.6.2. Référentiel lié au rotor.....		16
II.6.3. Référentiel lié au champ tournant.....		16
II.7. Application de la transformation de Park.....		17

II.7.1. Equations des tensions.....	17
II.7.2. Equations des flux.....	18
II.7.3. Equation mécanique.....	19
II.8. Mise sous forme d'équation d'état.....	21
II.9. Simulation numérique.....	23
II.11. Conclusion.....	28

Chapitre III : La GASDE auto-excitée

Introduction.....	29
III.2. Description de la génératrice asynchrone double étoile (GASDE).....	29
III.3. Phénomène d'Auto-amorçage.....	29
III.4. Modélisation de la GASDE.....	30
III.4. 1.Modèle biphasé de la GASDE dans le référentiel généralisé.....	30
III.4.2. Modèle de la GASDE dans le repère de Park (d,q).....	32
III.4.3. Modélisation de l'auto-amorçage de la GASDE à vide.....	35
III.5.La simulation numérique.....	35
III.5.1. Les résultats de simulation.....	36
III.5.2.Interprétation des résultats.....	36
III.6.La simulation de la GASDE avec saturation.....	37
III.6.1.Les résultats de la simulation.....	38
III.6.2.Effet de la Capacité.....	39
III.6.3.Interprétation des résultats.....	41
III.7.Conclusion.....	42

Chapitre IV : Etude et simulation de la MADA

Introduction.....	43
IV.2.Constitution de la machine asynchrone à rotor bobiné.....	43
IV.3.Les avantages.....	44
IV.4.Les inconvénients.....	44
IV.5.Modèle triphasé de la MASDE sur les axes réels.....	45
IV.5.1.Equations électriques.....	45
IV.5.2.Equations magnétiques.....	46

IV.5.3. Equations mécaniques.....	47
IV.5.4. Modèle biphasé.....	48
IV.5.5. Simulation numérique.....	50
IV.6.6. Interprétations des résultats.....	54
IV.7. Conclusion.....	55
Conclusion générale	56
Annexe A	
Annexe B	
Annexe C	
Bibliographique	

Introduction générale

Les machines triphasées à courant alternatif sont des ensembles moteurs générateurs permettant la transformation électrique- mécanique et vis versa. Elles sont les plus largement utilisées dans les applications industrielles et domestiques depuis longtemps après une version des machines biphasées qui n'a pas prospéré. Néanmoins, la machine asynchrone est la plus populaire, cela est dû à sa simplicité : de construction, de fiabilité, de maintenance et de sa robustesse.

L'une des machines les plus courants de machines multiphasées est la Machine Asynchrone Double Etoile (MASDE) qui comprend deux bobinages statoriques triphasées fixes et un bobinage rotorique mobile. Les deux étoiles sont déphasées entre elles d'un angle électrique ($\alpha=\pi/6$) chacune d'elle comporte trois enroulements; leurs axes sont décalés entre eux d'un angle électrique ($2\pi/3$) et sont alimentés par un système de tensions équilibrées, qui en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer. Le rotor est à cage d'écureuil constitué des barres conductrices court circuitées par un anneau conducteur à chaque extrémité.

D'ailleurs, la machine asynchrone double étoile, on constate des nouvelles solutions pour la vitesse variable sont les machines à double alimentation MADA. La machine asynchrone à bagues présente l'avantage d'être mieux adaptée à la variation de vitesse. Des dispositifs primitifs ne présentent qu'une plage de variation de vitesse limitée et un rendement global réduit.

La modélisation et la simulation de la MASDE fait l'objet de ce travail, la simulation est un moyen efficace et économique, utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Plusieurs outils (spécialisés ou non) de simulation sont utilisés dans le domaine de l'électronique de puissance ou de la commande des machines électriques : MATLAB, SIMULINK...etc.

La difficulté de simulation du moteur asynchrone provient de sa structure fortement non-linéaire, le modèle contient plusieurs blocs non linéaires.

Pour ce faire, le travail est réparti en quatre chapitres, on commence par un état de l'art sur les machines multi-phaseés dans le premier chapitre.

Le second chapitre est consacré à la modélisation de la MASDE. Après une description de la machine, nous développons en premier lieu un modèle triphasé de la MASDE, eu second lieu le modèle biphasé basé sur la transformation de Park,

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude du fonctionnement de la MASDE en mode générateur la GASDE, sans et avec saturation à l'aide des capacités d'auto-amorçage et de la vitesse d'entraînement.

Dans le dernier chapitre, nous présentons des généralités sur la MADA, ses applications, ses variations de fonctionnement et ses avantages .Ainsi la modélisation de la MADA en faisant appel à la transformée de Park et qu'une étude comparative de leurs performances avec la MASDE.

Nous terminerons avec une conclusion générale et quelques perspectives de notre travail.

Introduction

Ce chapitre permettra d'une part de présenter l'histoire des machines électriques, les caractéristiques intrinsèques des machines multi-phasées, ses avantages et inconvénients et d'autre part d'introduire la machine asynchrone double étoile et de la situer dans l'ensemble des machines multi-phases.

I.2. Histoire des machines électriques

En 1821 l'Anglais Michael Faraday réalise le premier moteur électromagnétique, et en 1822 Peter Barlow lui adjoint une roue dentée.

En 1831 Faraday énonce les principes de l'induction électromagnétique. En parelle, le Russe Friedrich Emil Lenz et l'Américain Joseph Henry ont de leur côté effectué des travaux similaires contribuant ainsi à la découverte et à la compréhension de ce phénomène.

L'année suivante Ampère en collaboration avec le constructeur français Hippolyte Paxi, ont réalisé la génératrice à courant continu.

En 1836 l'Anglais Hyde Clarke réalisation une machine dont la structure est inversée par rapport à celle de Paxii/Ampère qui améliorait le commutateur redresseur.

En 1842 Davidson utilise un des premiers moteurs tournant à réactance variable.

En 1848 apparaissaient les moteurs de Froment dont le couple atteignait 500 N.m. Ces moteurs furent utilisés pour les applications industrielles.

En 1860 la compagnie "l'Alliance" fabriquait industriellement des génératrices de structures complexes.

En 1865 l'Italien Antonio Pacinotti construit un prototype de machine à courant continu à induit en anneau et collecteur radial dont le fonctionnement est très amélioré.

En 1888 Nikola Tesla a inventé le premier moteur à courant alternatif, qui a eu un rôle majeur dans le développement de l'industrie électrique. en1889 l'Allemand Michael Dolivo-Dobrowolski réalise la première machine asynchrone triphasée cette dernière domine assez largement le domaine des machines électriques, grâce à plusieurs avantages qu'elle présente par rapport aux autres types. Elle est la plus simple à fabriquer, la moins couteuse, 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 [16].

Depuis la fin des années 1920, les machines à deux enroulements triphasés au stator avaient été introduites pour accroître la puissance des alternateurs synchrones de très forte puissance [3].

I.3. Les caractéristiques des machines multiphasées

Suivant le nombre de phases qu'on peut avoir dans le stator (les phases statoriques) qui est ou non multiple de trois on distingue deux types de "machines multi phases de type 1" sont appelées "les machines multi-phasées" et "machines multi phases de type 2". De plus, on considère rarement les ou le nombre de phases est un nombre pair sauf si celui-ci est un multiple de trois [3].

On peut avoir plusieurs configurations possible dans une machines à nombre de phases donné suivant le décalage angulaire α entre deux bobines adjacentes. C-à-est dire le décalage entre les étoile, pour pouvoir différencier entre les configurations possibles, on peut introduire un autre terme : le nombre de phases équivalent, il est défini comme suit :

$$nph_{\alpha} = \frac{\pi}{\alpha} \quad (\text{I.1})$$

Par exemple : une machine double étoile hixa-phasées (6 phases) et le décalage angulaire entre les étoiles $\alpha = \frac{\pi}{6}$ a des caractéristiques différentes de celles d'une machine ayant même nombre de phase mais leurs étoile sont décalées de $= \frac{\pi}{3}$.

I.3.1. Les machine multi-phasées de type1

Dans ce type de machines le nombre de phases statoriques est un multiple de trois, on puisse les grouper en η étoile triphasées [3] :

$$nph = 3\eta \quad (\eta = 1,2,3, \dots) \quad (\text{I.2})$$

Tableau (I.1) : machines dont le nombre de phases statoriques est un multiple de trois
 ‘’type1’’[6].

Nombre de phases (nph)	Nombre équivalent de phases (nph_α)	Décalage angulaire (α) Degré	Représentation des axes des bobines
3	3	60°	
6	3	60°	
6	6	30°	
9	9	20°	
12	6	30°	

I.3.2. Les machines multiples de type2

Les machines multiples de type2 dont le nombre de phases statorique (nph) impaire

$$nph = 2\eta + 1 \quad (\eta = 1, 2, 3, \dots) \quad (I.3)$$

Pour le décalage angulaire α entre deux bobines adjacents, les phases sont décalées régulièrement de $2\alpha = \frac{2\pi}{nph}$. Alors on a : $nph\alpha = \pi$ (I.4)

Tableau (I.2) : machines dont le nombre de phases statoriques est un nombre impair ‘type2’[6].

Nombre de phases (nph)	Nombre équivalent de phases (nph_α)	Décalage angulaire (α) Degré	Représentation des axes des bobines
5	5	36°	
7	7	25.7°	
9	9	20°	
11	11	16.3°	
13	13	13.8°	

I.4. Principe de fonctionnement de la machine multi-phasées

On prendra comme exemple le principe de fonctionnement de la machine double étoile [14].

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans les deux stators (l'étoile 1 alimenté par des courants triphasés et l'étoile alimenté par les mêmes courants triphasés mais décalé d'un angle α). La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques « f_s », 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 vitesse de synchronisme « ω_s ». Elle définit comme suite [4] :

$$\omega_s = \frac{f_s}{p} \text{ [rad/s]} \quad (\text{I.5})$$

Ces deux Champs tournants produits par les deux enroulements statoriques vont induire des courants dans les conducteurs du rotor. Ainsi générant des forces électromotrices qui feront tourner le rotor à une vitesse « ω_r » inférieure à celle du synchronisme ($\omega_r < \omega_s$), ainsi les effets de l'induction statoriques sur les courants induits rotoriques se manifestent par l'élaboration d'un couple de force électromagnétique sur le rotor tel que l'écart des vitesses soit réduit. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est dite vitesse relative :

$$\omega = \omega_s - \omega_r \quad (\text{I.6})$$

On dira alors que ces deux champs glissent par rapport au rotor et on définit ce glissement par le rapport:

$$g = \frac{\omega}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (\text{I.7})$$

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

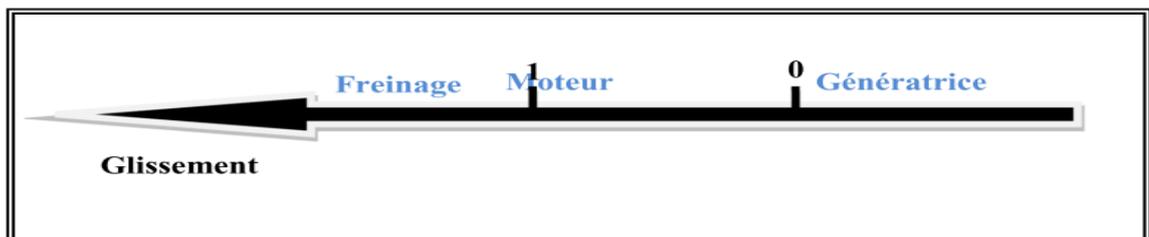


Figure (I.1) : Modes de fonctionnement suivant le glissement.

I.5. Applications des machines multiphasées

Les éoliennes à vitesse fixe sont couplées au réseau via les GAS, certains constructeurs utilisent un autre système de conversion d'énergie éolienne basé sur la GASDE qu'afin d'améliorer le rendement. Ainsi, le bruit engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses, la présence d'une deuxième étoile rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble[6].

- Une étoile de forte puissance à un grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent [10].
- Une étoile de faible puissance à un faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées [10].

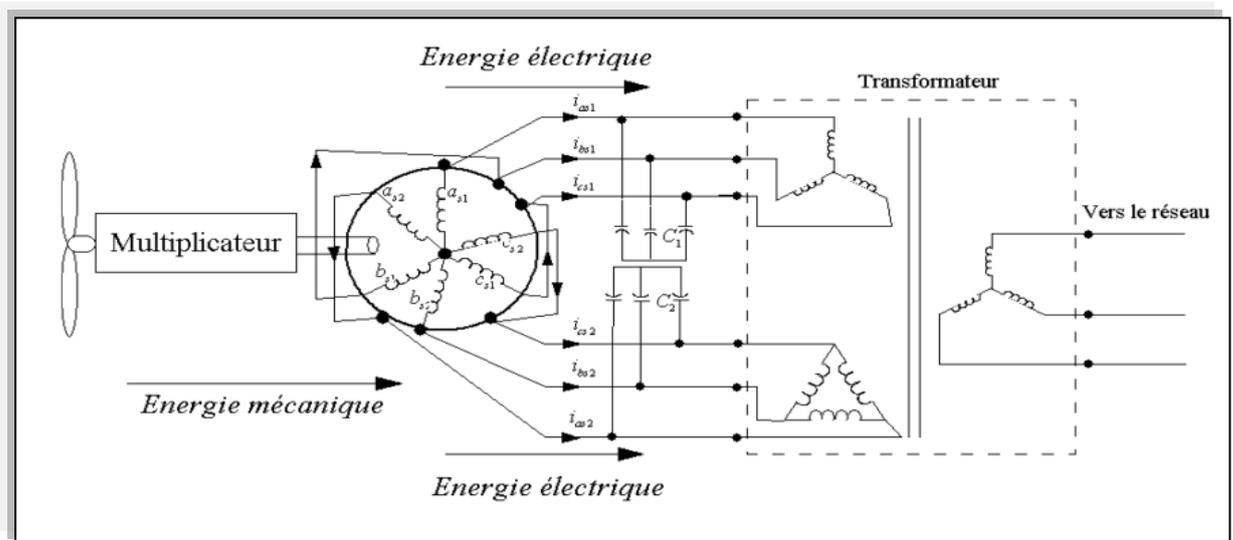


Figure (I.2) : Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases.

I.6. Avantages des Machines Multiphasées

Les machines multiphasées ont par la suite fait un intérêt grandissant, et en particulier la machine asynchrone double étoile (MASDE), qui présente en plus des avantages des machines asynchrones à cage, ceux des machines multiphasées. En effet, les variateurs multiphasés présentent plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées[3].

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

I.7. Inconvénients des machines multiphasées

Cependant, la machine asynchrone présente des inconvénients tels que[10] :

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

I.8. Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux machines multi-phasées et ce qu'elles pourraient apporter de plus que les machines triphasées. On s'intéresse aux machines les plus courantes, les machines double étoile (MASDE) et vu ses avantages, il est très intéressant de pouvoir étudier cette dernière en ces deux modes de fonctionnement (moteur et générateur). Par la suite nous passons tout d'abord à la modélisation de la MASDE en les deux modes (moteur et générateur).

Introduction

Dans ce chapitre la modélisation de la MASDE basée sur la résolution des équations régissant son fonctionnement en régime linéaire.

L'étude sera menée avec un décalage $\alpha = 30^\circ$, enfin des résultats de simulations avec des commentaires.

II.2. Description du moteur asynchrone à double étoile

Le moteur asynchrone triphasé à double stator est une machine qui comporte deux bobinages statoriques fixes et un bobinage rotorique mobile.

Les deux stators sont décalés entre eux d'un angle $\alpha = 30^\circ$, chacun est composé de trois enroulements identiques. Leurs axes sont décalés entre eux d'un angle électrique égal $2\pi/3$ dans l'espace. Ils sont logés dans des encoches du circuit magnétique [3].

Les deux enroulements statoriques sont alimentés chacun par un système triphasé de courant équilibré, d'où la création d'un champ tournant glissant dans l'entrefer.

La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de paires de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques tel que:

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$$

Le rotor est constitué de manière à obtenir trois enroulements ayant un nombre de paire de pôles identique à celui du stator.

La structure électrique du rotor est supposée être un rotor à cage d'écureuil constituée des barres conductrices court circuitées par un anneau conducteur à chaque extrémité (barre conductrice en aluminium aux tôles ferromagnétiques).

Ce choix permet d'obtenir des machines peu onéreuse, robuste, facile d'emploi et nécessitent un entretien limité.

Le rotor tourne à une vitesse ω différente de ω_s , pour cette raison, la cage rotorique devient le siège d'un système des forces électromotrices triphasées engendrant elles-mêmes trois courants rotoriques. Ainsi les effets de l'induction statorique sur les courants induits

rotoriques se manifestant par l'élaboration d'un couple de forces électromagnétiques sur le rotor tel que l'écart des vitesses soit réduit.

Le rapport $g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$: est appelé glissement du rotor par rapport aux champs tournant du stator.

II.3. Hypothèses simplificatrices

Avant de commencer la modélisation de la machine, on considère quelques hypothèses simplificatrices pour faciliter quelques difficultés concernant le comportement de la machine à étudier. Le modèle que nous adopterons tient compte des hypothèses suivantes [4]:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- Nous admettons de plus que la f.e.m créée par chacune des phases des deux armatures est à 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 [17], [20].
- L'inductance de fuit mutuelle commune aux deux circuits (étoile1et2) est négligeable.
- On considère que la machine fonctionne en régime équilibré.

II.4. Modèle triphasé de la MASDE sur les axes réels

La représentation schématique de la machine asynchrone à double étoile dans l'espace électrique est donnée sur la figure suivante :

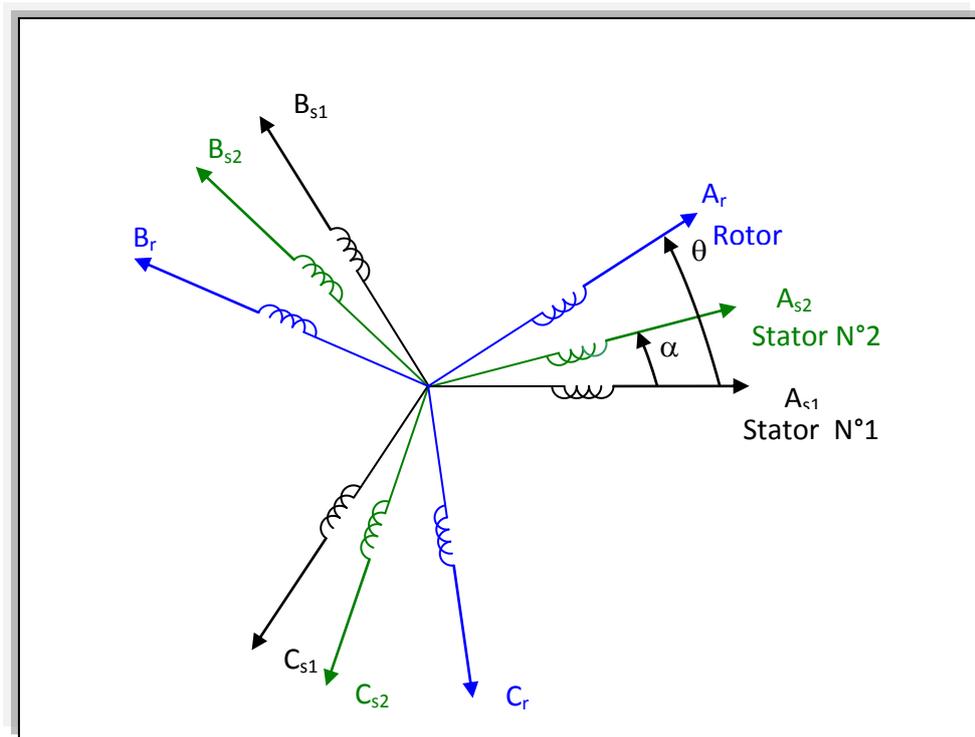


Figure (II.1) : Représentation des enroulements statoriques et rotoriques de la MASDE.

II.4.1. Equations électriques

Les équations des tensions de la machine à double étoile représentent pour chaque enroulement la somme de la chute ohmique et la chute inductive due au flux [3].

Pour étoile 1 :

$$\begin{cases} V_{as1} = R_{as1}I_{as1} + \frac{d\phi_{as1}}{dt} \\ V_{bs1} = R_{bs1}I_{bs1} + \frac{d\phi_{bs1}}{dt} \\ V_{cs1} = R_{cs1}I_{cs1} + \frac{d\phi_{cs1}}{dt} \end{cases} \quad (II.1)$$

Pour étoile 2 :

$$\begin{cases} V_{as2} = R_{as2}I_{as2} + \frac{d\phi_{as2}}{dt} \\ V_{bs2} = R_{bs2}I_{bs2} + \frac{d\phi_{bs2}}{dt} \\ V_{cs2} = R_{cs2}I_{cs2} + \frac{d\phi_{cs2}}{dt} \end{cases} \quad (II.2)$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} 0 = R_{ar}I_{ar} + \frac{d\phi_{ar}}{dt} \\ 0 = R_{br}I_{br} + \frac{d\phi_{br}}{dt} \\ 0 = R_{cr}I_{cr} + \frac{d\phi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Sous forme matricielle on a :

$$\begin{aligned} \text{Pour étoile 1 : } [V_{abc,s1}] &= [R_{s1}][I_{abc,s1}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc,s1}] \\ \text{Pour étoile 2 : } [V_{abc,s2}] &= [R_{s2}][I_{abc,s2}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc,s2}] \\ \text{Pour rotor : } [V_{abc,r}] &= [R_r][I_{abc,r}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc,r}] \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

On pose : $R_{as1} = R_{bs1} = R_{cs1} = R_{s1}$ et $R_{as2} = R_{bs2} = R_{cs2} = R_{s2}$.

$$\begin{aligned} [R_{s1}] &= \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix}; [R_{s2}] = \begin{bmatrix} R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \\ [I_{abc,s1}] &= \begin{bmatrix} i_{as1} \\ i_{bs1} \\ i_{cs1} \end{bmatrix}; [I_{abc,s2}] = \begin{bmatrix} i_{as2} \\ i_{bs2} \\ i_{cs2} \end{bmatrix}; [I_{abc,r}] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

$$[V_{abc,s1}] = \begin{bmatrix} v_{as1} \\ v_{bs1} \\ v_{cs1} \end{bmatrix}; [V_{abc,s2}] = \begin{bmatrix} v_{as2} \\ v_{bs2} \\ v_{cs2} \end{bmatrix}; [V_{abc,r}] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}.$$

$$[\Phi_{abc,s1}] = \begin{bmatrix} \Phi_{as1} \\ \Phi_{bs1} \\ \Phi_{cs1} \end{bmatrix}; [\Phi_{abc,s2}] = \begin{bmatrix} \Phi_{as2} \\ \Phi_{bs2} \\ \Phi_{cs2} \end{bmatrix}; [\Phi_{abc,r}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}.$$

$[I_{abc,s1}], [I_{abc,s2}], [I_{abc,r}]$: Matrices descourants statoriques de l'étoile 1,2 et des courants rotoriques.

$[V_{abc,s1}], [V_{abc,s2}], [V_{abc,r}]$: Matrices des tensions statoriques de l'étoile 1,2 et des tensions rotoriques.

$[\Phi_{abc,s1}], [\Phi_{abc,s2}], [\Phi_{abc,r}]$: Matrices des flux statoriques de l'étoile 1,2 et des flux rotoriques.

II.4.2. Equations magnétiques

Les flux statoriques et rotoriques en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes [23], [7]:

$$\begin{bmatrix} [\Phi_{abc,s1}] \\ [\Phi_{abc,s2}] \\ [\Phi_{abc,r}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{s1,s1}] & [L_{s1,s2}] & [L_{s1,r}] \\ [L_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [L_{s2,r}] \\ [L_{r,s1}] & [L_{r,s2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Le développement de la matrice inductance en tenant compte des hypothèses simplificatrices citées précédemment nous permet d'écrire :

$$[L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} (L_{as1} + L_{ms}) & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & (L_{bs1} + L_{ms}) & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & (L_{cs1} + L_{ms}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$$[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} (L_{as2} + L_{ms}) & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & (L_{bs2} + L_{ms}) & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & (L_{cs2} + L_{ms}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} (L_{ar} + L_{mr}) & -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & (L_{br} + L_{mr}) & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 & (L_{cr} + L_{mr}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

$$[L_{s1,s2}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha + 4\pi/3) \\ \cos(\alpha + 4\pi/3) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha + 4\pi/3) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

$$[L_{s1,r}] = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta + 4\pi/3) \\ \cos(\theta + 4\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta + 4\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$[L_{s1,r}] = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) & \cos(\theta - \alpha + 4\pi/3) \\ \cos(\theta - \alpha + 4\pi/3) & \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) & \cos(\theta - \alpha + 4\pi/3) & \cos(\theta - \alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$[L_{s2,s1}] = [L_{s1,s2}]^t; [L_{r,s1}] = [L_{s1,r}]^t; [L_{r,s2}] = [L_{s2,r}]^t.$$

$L_{as1} = L_{bs1} = L_{cs1} = L_{s1}$: Inductance propre du 1^{er} stator.

$L_{as2} = L_{bs2} = L_{cs2} = L_{s2}$: Inductance propre du 2^{eme} stator.

$L_{ar} = L_{br} = L_{cr} = L_r$: Inductance propre du rotor.

L_{ms} : La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique.

L_{mr} : La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique.

L_{sr} : La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle entre un stator et le rotor.

II.4.3. Equations mécaniques

L'équation mécanique de la machine s'écrit [21] :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - k_f \Omega. \quad (\text{II.12})$$

Avec:

J : Moment d'inertie.

Ω : Vitesse de rotation rotorique de la machine.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant (couple de charge).

k_f : Coefficient de frottement.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = \frac{P}{2} \left[[i_{abc,s1}] \frac{d}{d\theta} [L_{s1,r}] [i_{abc,r}]^t + [i_{abc,s2}] \frac{d}{d\theta} [L_{s2,r}] [i_{abc,r}]^t \right] \quad (II.13)$$

II.5. Modèle biphasé

Transformation de Park[13] est basée sur la transformation d'un système triphasé d'axes (a, b, c) en système équivalent biphasé d'axe (d, q) et inversement, avec la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices [21].

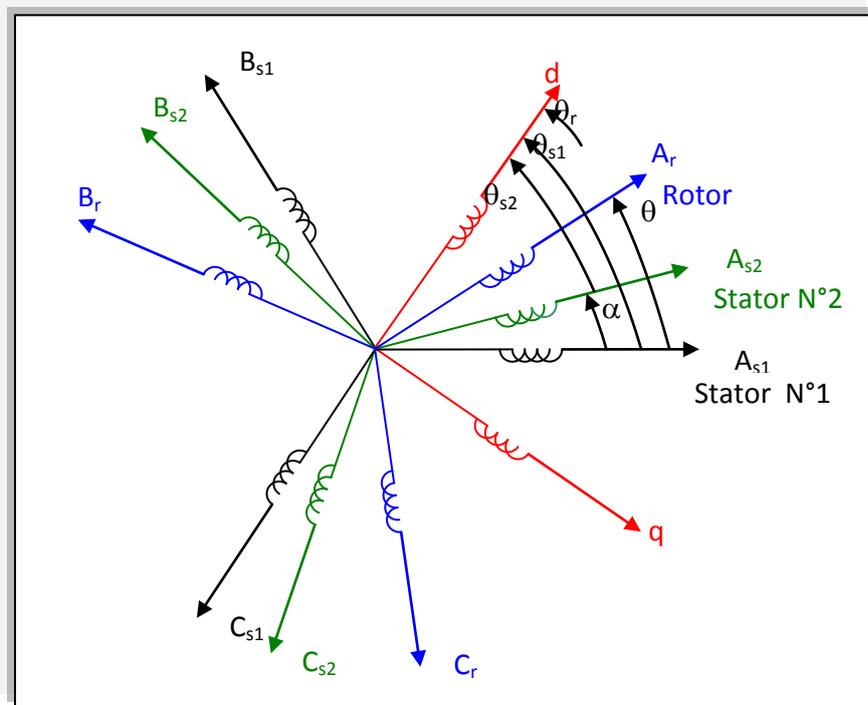


Figure (II.2) : Représentation des enroulements de la machine dans le repère (d, q) .

La matrice de Park en générale:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (II.14)$$

La matrice de Park pour l'étoile 1 :

$$[A_{ps1}(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

La matrice de Park pour l'étoile 2 :

$$[A_{ps2}(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha - 2\pi/3) & \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha - 2\pi/3) & -\sin(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

La matrice de Park pour le rotor :

$$[A_{pr}(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta - \theta_r + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r - 2\pi/3) & -\sin(\theta - \theta_r + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

La matrice inverse de Park : $[G_{abc}] = [P(\theta)]^{-1}[G_{a\alpha o}]$.

Sachant que : $[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^t$.

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

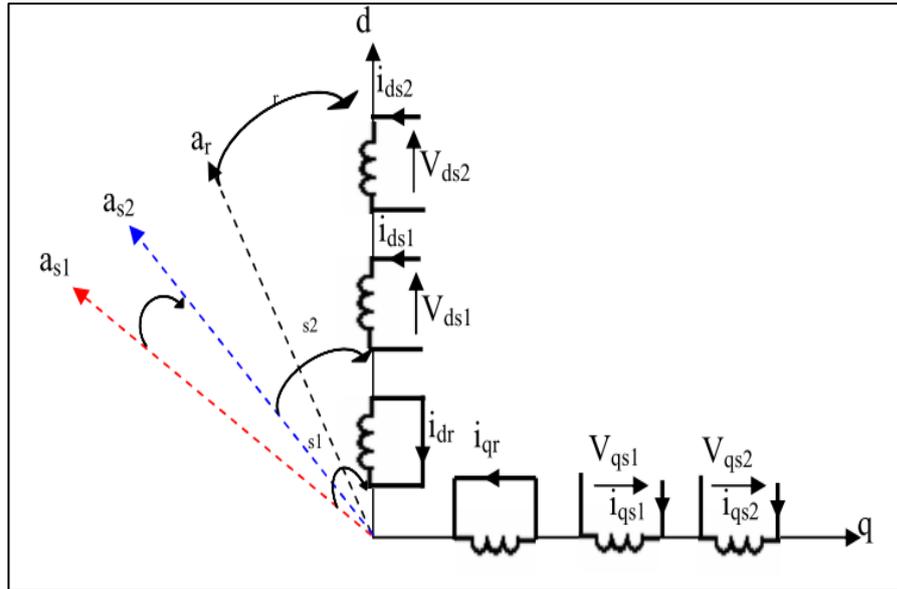


Figure (II.3) : La représentation schématique du modèle de Park de la MASDE.

II.6. Choix du référentiel

Les équations de la machine asynchrone triphasée peuvent être exprimées dans différents référentiels selon la vitesse attribuée au repère (d, q) .

II.6.1. Référentiel lié au stator

Pour ce type de choix, $\theta_s = 0$ et $\omega_s = 0$, dans ce cas les phases A_s et d coïncident. Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées.

II.6.2. Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, la vitesse électrique du repère (d, q) est égale à la pulsation électrique ω_r du rotor ($\omega_s = \omega_r$).

II.6.3. Référentiel lié au champ tournant

Dans ce référentiel, la vitesse du repère (d, q) est la vitesse du champ tournant ω_s . Dans notre travail, nous utilisons ce référentiel pour la modélisation de la MASDE.

II.7. Application de la transformation de Park

On choisit le référentiel lié au champ tournant et on applique la transformation de Park aux équations précédentes, nous obtenons le système d'équations suivant :

II.7.1. Equations des tensions

On applique la transformation de Park sur le système des équations (II.1), (II.2) et (II.3) on obtient :

Pour le stator 1 :

$$\begin{bmatrix} v_{ds1} \\ v_{qs1} \\ v_{os1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{os1} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds1} \\ \Phi_{qs1} \\ \Phi_{os1} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_{s1}}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds1} \\ \Phi_{qs1} \\ \Phi_{os1} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Pour le stator 2

$$\begin{bmatrix} v_{ds2} \\ v_{qs2} \\ v_{os2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds2} \\ i_{qs2} \\ i_{os2} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds2} \\ \Phi_{qs2} \\ \Phi_{os2} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_{s2}}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds2} \\ \Phi_{qs2} \\ \Phi_{os2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Pour le rotor : Le rotor étant en court-circuit :

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

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{or} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{or} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

$$\text{Avec : } \frac{d\theta_{s1}}{dt} = \omega_s, \quad \frac{d\theta_{s2}}{dt} = \frac{d(\theta_{s1} - \alpha)}{dt} = \omega_s, \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d(\theta_{s1} - \theta)}{dt} = \omega_s - \omega_r = \omega_{gl}.$$

Sous forme d'équation:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds1} = R_{s1} i_{ds1} + \frac{d\Phi_{ds1}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1} i_{qs1} + \frac{d\Phi_{qs1}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds1} \\ v_{ds2} = R_{s2} i_{ds2} + \frac{d\Phi_{ds2}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2} i_{qs2} + \frac{d\Phi_{qs2}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds2} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_{g1} \Phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_{g1} \Phi_{dr} \end{array} \right. \quad (II.22)$$

II.7.2. Equations des flux

On applique la transformation de Park sur le système d'équations (II.5), on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{ds1} = L_{s1} i_{ds1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{ds1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{ds2} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{dr} \\ \Phi_{qs1} = L_{s1} i_{qs1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{qs1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{qs2} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{qr} \\ \Phi_{ds2} = L_{s2} i_{ds2} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{ds2} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{ds1} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{dr} \\ \Phi_{qs2} = L_{s2} i_{qs2} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{qs2} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{qs1} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + \frac{3}{2} L_{mr} i_{dr} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{ds1} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{ds2} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + \frac{3}{2} L_{mr} i_{qr} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{qs1} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{qs2} \end{array} \right. \quad (II.23)$$

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

L_m : Inductance mutuelle cyclique entre le stator 1, stator 2 et le rotor.

Donc le système d'équations (II.9) est écrire comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{ds1} = L_{s1} i_{ds1} + L_m (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \Phi_{qs1} = L_{s1} i_{qs1} + L_m (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\ \Phi_{ds2} = L_{s2} i_{ds2} + L_m (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \Phi_{qs2} = L_{s2} i_{qs2} + L_m (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \end{array} \right. \quad (II.24)$$

Avec:

$L_{s1} + L_m$: Inductance propre cyclique du stator 1.

$L_{s2} + L_m$: Inductance propre cyclique du stator 2.

$L_r + L_m$: Inductance propre cyclique du rotor.

II.7.3. Equation mécanique

Le calcul d'expression du couple instantané, nécessite la détermination de la puissance instantanée.

La puissance instantanée absorbée par la machine asynchrone double stator est donnée par l'expression suivante:

$$P_e = [v_s]^t [i_s] = v_{as1} i_{as1} + v_{bs1} i_{bs1} + v_{cs1} i_{cs1} + v_{as2} i_{as2} + v_{bs2} i_{bs2} + v_{cs2} i_{cs2} . \quad (II.25)$$

Comme la transformation de Park utilisée conserve la puissance instantanée, on peut écrire:

$$P_e = v_{ds1} i_{ds1} + v_{qs1} i_{qs1} + v_{ds2} i_{ds2} + v_{qs2} i_{qs2} \quad (II.26)$$

En introduisant le système d'équation (II.22) dans l'expression de la puissance instantanée (II.26) on obtient :

$$\begin{aligned} P_e = & \underbrace{R_{s1} i_{ds1}^2 + R_{s2} i_{ds2}^2 + R_{s1} i_{qs1}^2 + R_{s2} i_{qs2}^2}_{\text{Terme 1}} + \\ & \underbrace{\omega_s (\Phi_{ds1} i_{qs1} + \Phi_{ds2} i_{qs2} - \Phi_{qs1} i_{ds1} - \Phi_{qs2} i_{ds2})}_{\text{Terme 2}} + \\ & \underbrace{\frac{d\Phi_{ds1}}{dt} i_{ds1} + \frac{d\Phi_{ds2}}{dt} i_{ds2} + \frac{d\Phi_{qs1}}{dt} i_{qs1} + \frac{d\Phi_{qs2}}{dt} i_{qs2}}_{\text{Terme 3}} . \end{aligned} \quad (II.27)$$

On constate que la puissance instantanée développée se compose de trois termes :

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

La puissance et le couple électromagnétique peuvent s'écrire sous la forme :

$$P_{em} = \omega_s (\Phi_{ds1} i_{qs1} + \Phi_{ds2} i_{qs2} - \Phi_{qs1} i_{ds1} - \Phi_{qs2} i_{ds2}). \quad (\text{II.28})$$

$$C_{em} = p (\Phi_{ds1} i_{qs1} + \Phi_{ds2} i_{qs2} - \Phi_{qs1} i_{ds1} - \Phi_{qs2} i_{ds2}). \quad (\text{II.29})$$

Il est possible d'obtenir d'autres expressions du couple instantané en utilisant les expressions des flux statoriques et en remplaçant (II.24) dans (II.29), on obtient :

$$C_{em} = p L_m ((i_{qs1} + i_{qs2}) i_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2}) i_{qr}). \quad (\text{II.30})$$

Le couple électromagnétique peut être déduit à partir du flux rotorique :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}). \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}). \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

$$\begin{cases} i_{dr} = \frac{\Phi_{dr}}{L_m + L_r} - \frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{ds1} + i_{ds2}). \\ i_{qr} = \frac{\Phi_{qr}}{L_m + L_r} - \frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{qs1} + i_{qs2}). \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

En introduisant i_{dr} et i_{qr} dans l'expression (II.16), on obtient [21] :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} (\Phi_{dr} (i_{qs1} + i_{qs2}) - \Phi_{qr} (i_{ds1} + i_{ds2})). \quad (\text{II.33})$$

Le couple électromagnétique dans le repère de Park doit être multiplié par 3/2 :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_m + L_r} (\Phi_{dr} (i_{qs1} + i_{qs2}) - \Phi_{qr} (i_{ds1} + i_{ds2})).$$

Enfin l'équation mécanique de la machine peut s'écrire comme suite :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - k_f \Omega \quad . \quad (\text{II.34})$$

II.8. Mise sous forme d'équation d'état

Le flux magnétisant Φ_m est la somme des deux flux Φ_{md} et Φ_{mq} , d'où :

$$\Phi_m = \sqrt{\Phi_{md}^2 + \Phi_{mq}^2} \quad (\text{II.35})$$

Avec:

$$\begin{cases} \Phi_{md} = L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \Phi_{mq} = L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

En remplaçant les équations des flux (II.24) par leur expression dans le système (II.22), on obtient le système (II.37) :

$$\left[\begin{array}{l} (L_{s1} + L_m) \frac{di_{ds1}}{dt} + L_m \frac{di_{ds2}}{dt} + L_m \frac{di_{dr}}{dt} = V_{ds1} - R_{s1}I_{ds1} + w_s[(L_{s1} + L_m)I_{qs1} + L_m I_{qs2} + L_m I_{qr}] \\ (L_{s1} + L_m) \frac{di_{qs1}}{dt} + L_m \frac{di_{qs2}}{dt} + L_m \frac{di_{qr}}{dt} = V_{qs1} - R_{s1}I_{qs1} - w_s[(L_{s1} + L_m)I_{ds1} + L_m I_{ds2} + L_m I_{dr}] \\ L_m \frac{di_{ds1}}{dt} + (L_{s2} + L_m) \frac{di_{ds2}}{dt} + L_m \frac{di_{dr}}{dt} = V_{ds2} - R_{s1}I_{ds2} + w_s[L_m I_{qs1} + (L_{s2} + L_m)I_{qs2} + L_m I_{qr}] \\ L_m \frac{di_{qs1}}{dt} + (L_{s2} + L_m) \frac{di_{qs2}}{dt} + L_m \frac{di_{qr}}{dt} = V_{qs2} - R_{s1}I_{qs2} - w_s[L_m I_{ds1} + (L_{s2} + L_m)I_{ds2} + L_m I_{dr}] \\ L_m \frac{di_{qs1}}{dt} + L_m \frac{di_{qs2}}{dt} + (L_r + L_m) \frac{di_{qr}}{dt} = V_{qs2} - R_{s1}I_{qs2} - w_s[L_m I_{qs1} + L_m I_{qs2} + (L_r + L_m)I_{qr}] \\ L_m \frac{di_{qs1}}{dt} + L_m \frac{di_{qs2}}{dt} + (L_r + L_m) \frac{di_{qr}}{dt} = V_{qs2} - R_{s1}I_{qs2} - w_s[L_m I_{ds1} + L_m I_{ds2} + (L_r + L_m)I_{dr}] \end{array} \right.$$

Nous mettons le système d'équations (II.22) sous forme d'un système d'équation d'état.

$$\dot{x} = AX + BU$$

Avec :

X : Vecteur d'état.

$$X = [i_{ds1}, i_{qs1}, i_{ds2}, i_{qs2}, i_{dr}, i_{qr}]^t.$$

U : Vecteur de commande.

Après un calcul matriciel, nous aboutissons au système suivant :

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} ; U = \begin{bmatrix} v_{ds1} \\ v_{ds2} \\ v_{qs1} \\ v_{qs2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[A] = [L]^{-1}([R] + w_s[M_1] + w_{gl}[M_2])$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} (L_{s1}+L_n) & 0 & L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & (L_{s1}+L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m \\ L_m & 0 & (L_{s2}+L_m) & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & (L_{s2}+L_m) & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r+L_m) & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r+L_m) \end{bmatrix}$$

$$[M_1] = \begin{bmatrix} 0 & -(L_{s1}+L_m) & 0 & L_m & 0 & -L_m \\ (L_{s1}+L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & -(L_{s2}+L_m) & 0 & -L_m \\ L_m & 0 & (L_{s2}+L_m) & 0 & L_m & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & -L_m & 0 & -(L_r+L_m) \\ L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r+L_m) & 0 \end{bmatrix}$$

$$[M_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r + L_m) \\ -L_m & 0 & -L_m & 0 & -(L_r + L_m) & 0 \end{bmatrix}$$

II.9. Simulation numérique

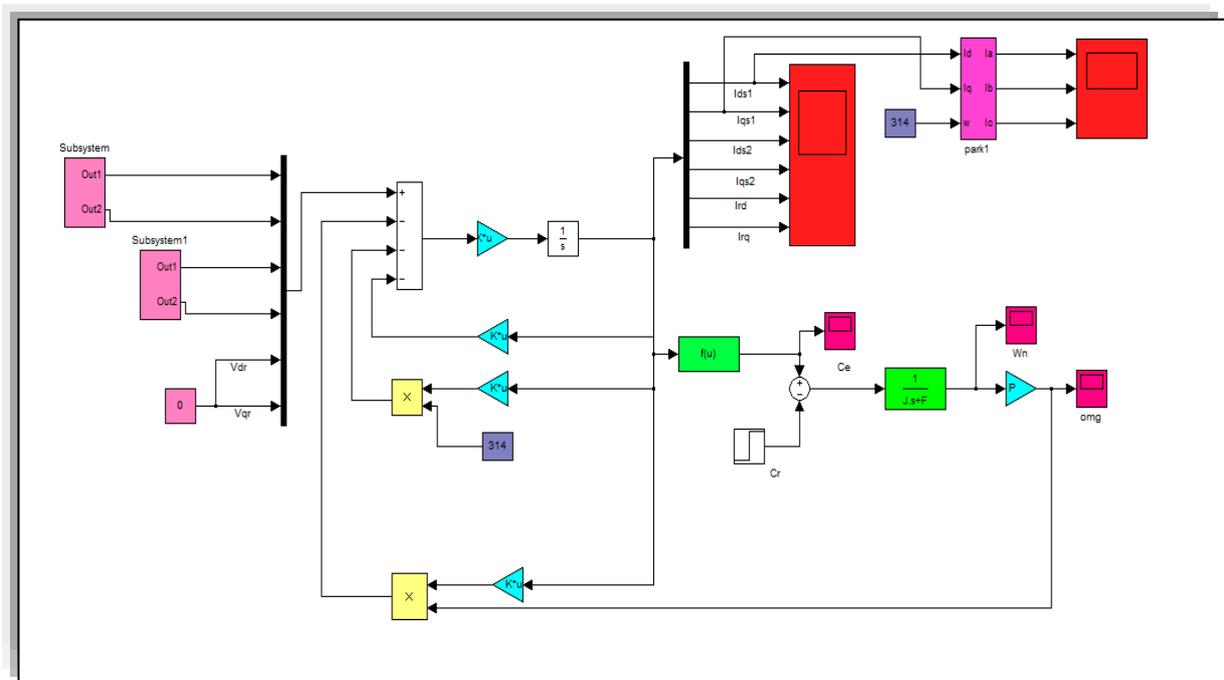


Figure (II.4) : Le schéma bloc de la Machine asynchrone double étoile.

$$\text{Pour la 1}^{\text{ere}} \text{ étoile : } \begin{cases} V_{as1} = V_m \cdot \sin w_s t \\ V_{bs1} = V_m \cdot \sin(w_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{cs1} = V_m \cdot \sin(w_s t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

$$\text{Pour la 2}^{\text{eme}} \text{ étoile : } \begin{cases} V_{as2} = V_m \cdot \sin(w_s t - \alpha) \\ V_{bs2} = V_m \cdot \sin(w_s t - \frac{2\pi}{3} - \alpha) \\ V_{cs2} = V_m \cdot \sin(w_s t + \frac{2\pi}{3} - \alpha) \end{cases}$$

Avec : $V_m = \sqrt{2} \cdot V_{eff}$

➤ **Fonctionnement à vide**

Performances de la conduite de la machine asynchrone triphasée à double stator lors d'un démarrage à vide.

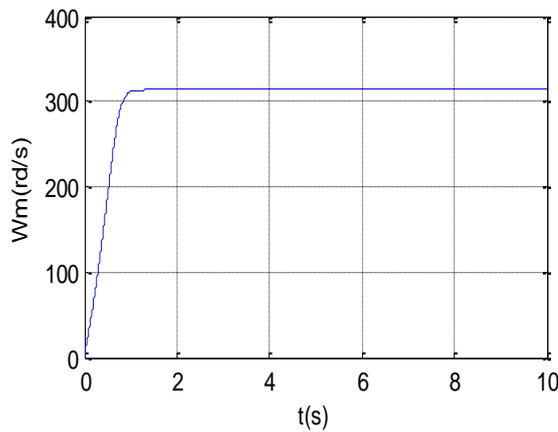


Figure (II.5): La vitesse de rotation.

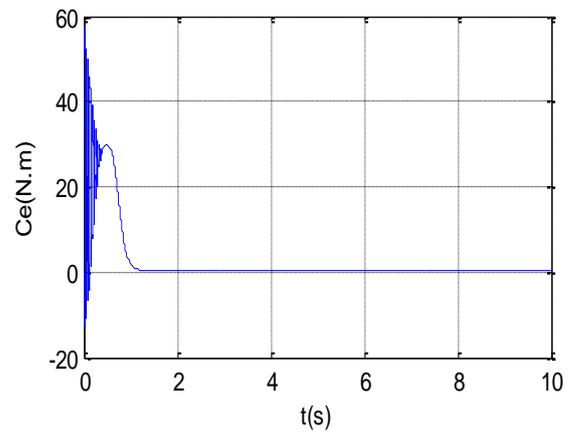


Figure (II.6) : Le couple électromagnétique.

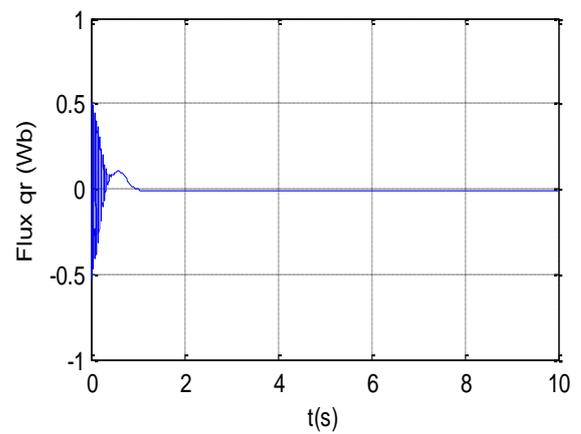
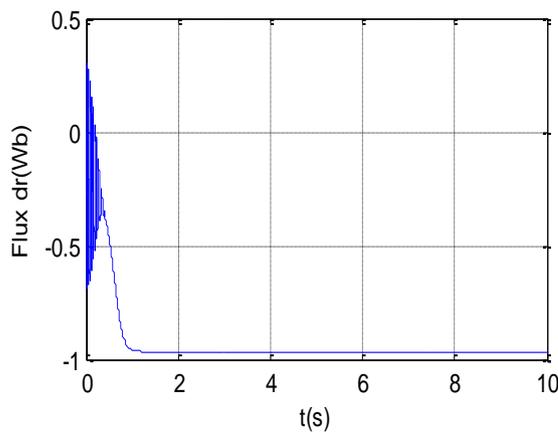


Figure (II.7): Les flux rotoriques.

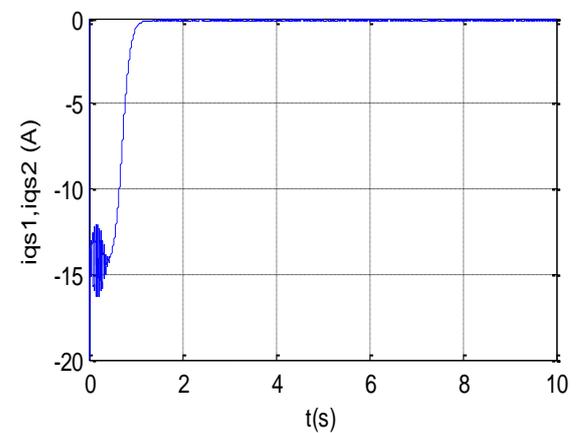
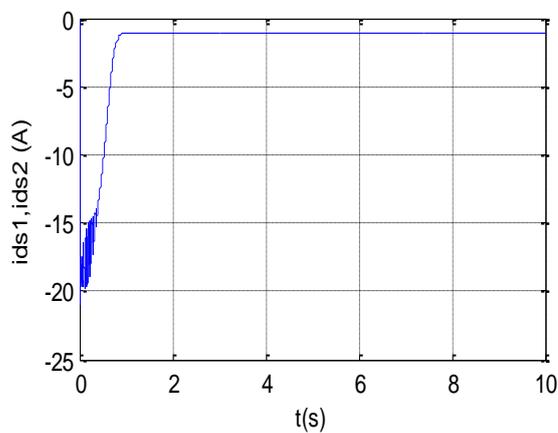


Figure (II.8) : Les courants statoriques i_{ds} , i_{qs} .

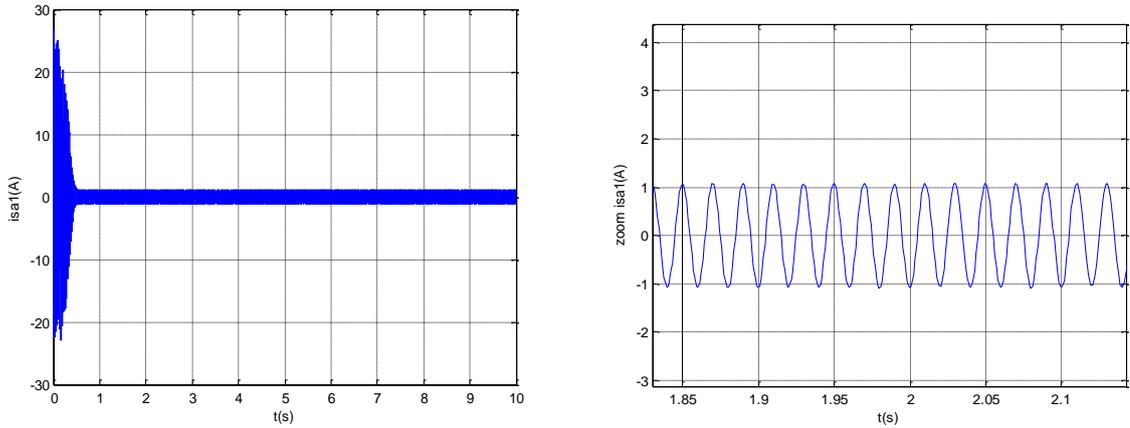


Figure (II.9) : Le courant statorique i_{sa1} .

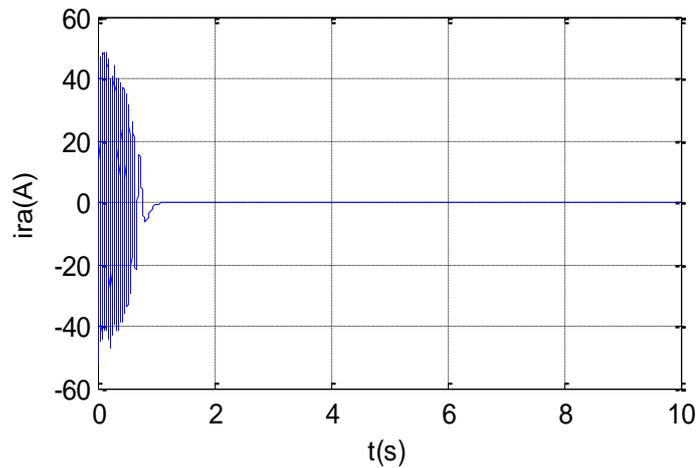


Figure (II.10) : Le courant rotorique réel.

Au démarrage et pendant le régime transitoire, la vitesse figure (II.5) augmente et évolue d’une manière presque linéaire, et elle atteint 313.52 rd/s très proche de celle du synchronisme à $t= 1.07s$ début du régime permanent. Le couple électromagnétique figure (II.6), au début atteint sa valeur maximale de 57.5N.m et présente des oscillations qui disparaissent au bout de 0.51s où il rejoint 29.75N.m, puis il diminue d’une façon presque linéaire et se stable à $t= 2s$ sa valeur minimale de 0.313N.m, qui est due aux frottements. L’évolution des flux rotoriques figure (II.7) est presque identique à celle du couple électromagnétique; en fin du régime transitoire, les flux selon les deux axes (d, q) se stabilisent respectivement à $-0.96Wb$ et à $-0.008Wb$ (tend vers une valeur nulle). Les courants

statoriques figure (II.8) suivant les axes direct et en quadrature, évoluent d’une façon à peu près analogue à l’évolution de la vitesse.

On remarque de faible oscillations au niveau de ces derniers durant approximativement 0.4s. Les courants statoriques (étoiles 1 et 2) figure (II.9) présentent des dépassements excessifs induisant de fort appel de courant, qui sont d’environ 4 ou 5 fois le courant nominal, Leurs valeurs sont de l’ordre de 25 A pour permettre au couple électromagnétique de variation l’inertie de la machine,mais ils disparaissent au bout de quelques alternances pour donner lieu à des formes sinusoïdales d’amplitude constante au régime permanent.

➤ **Fonctionnement en charge**

Performances de la conduite de la machine asynchrone triphasée à double stator lors d’une application d’un couple résistant $C_r=29 \text{ N.m}$ à l’instant $t=5\text{s}$.

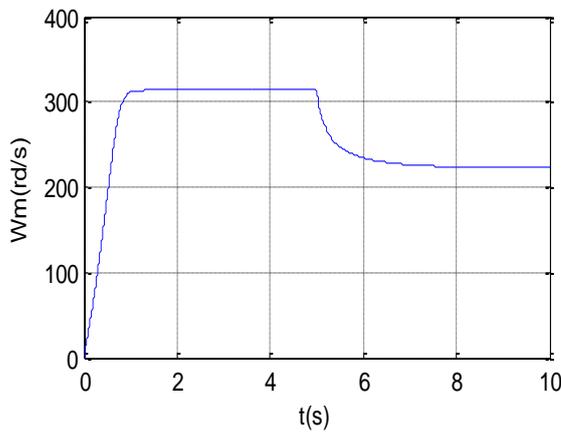


Figure (II.11) : La vitesse de rotation.

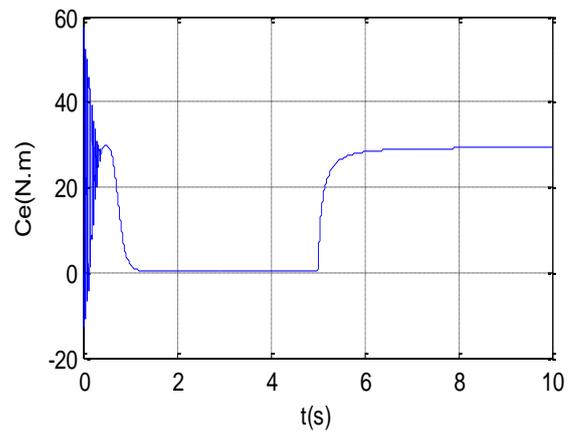


Figure (II.12) : Le couple électromagnétique.

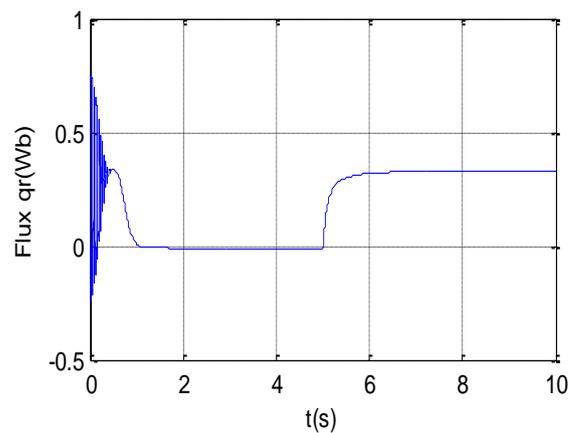
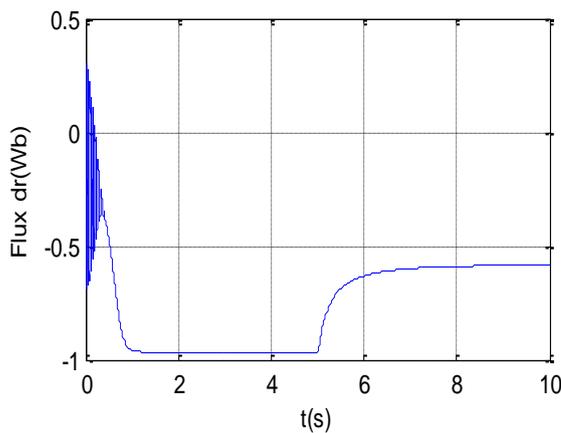


Figure (II.13) : Les flux rotoriques Φ_{rd}, Φ_{qr} .

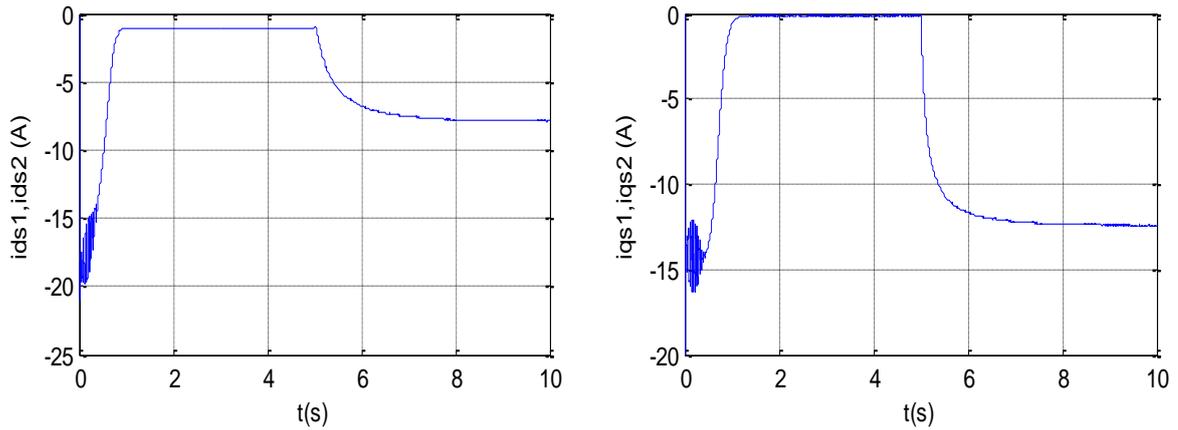


Figure (II.14) : Les courants statoriques.

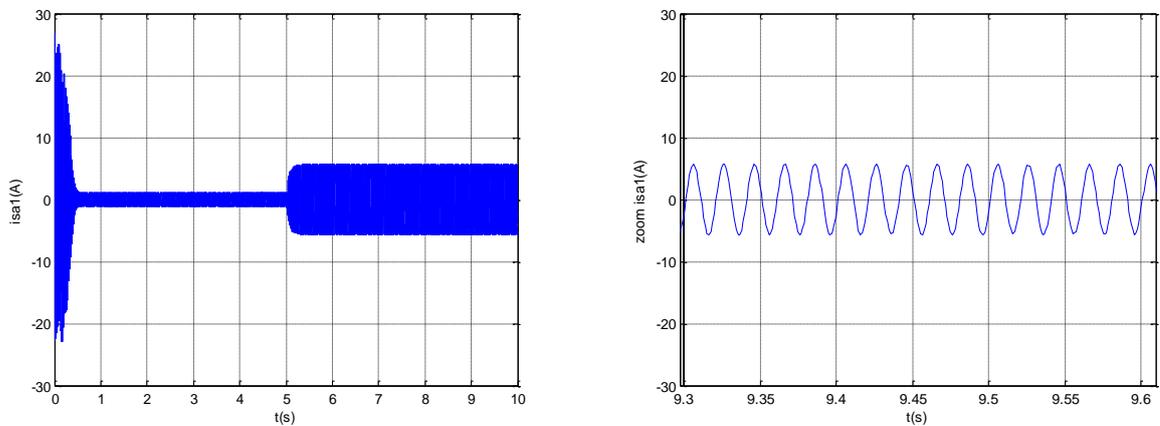


Figure (II.15) : Les courants statorique i_{sa1} .

En appliquant la charge $C_r = 29 N.m$ (machine en fonctionnement moteur) à partir de l'instant $t = 5s$, on constate que la vitesse (figure II.11) et les courants selon (d, q) (figure II.14) diminuent et se stabilisent respectivement à $288.5rd/s$, $I_{ds1}=I_{ds2}=-7.42(A)$, et $I_{qs1}=I_{qs2}=-12.27(A)$.

Par contre, des augmentations sont observées par le couple électromagnétique (figure II.12) se stabilise à $C_{em} = 29.21 N.m$ légèrement supérieur au couple de charge, les flux rotoriques selon (d, q) (figure II.13) à $\Phi_{dr} = -0.876Wb$ et $\Phi_{qr} = 0.154Wb$ et les courants statoriques figure (II.15) à $i_{as1} = i_{as2} = 4.45A$.

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone triphasée à double étoile en mode moteur. Cette modélisation nous a permis d'établir un modèle mathématique de cette machine dont la complexité a été réduite moyennant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Ainsi, nous avons utilisé la transformation de Park et le système d'équation d'état de la machine que nous avons validée à travers une simulation numérique. Puis nous avons interprété les résultats obtenues.

Introduction

L'objectif de ce chapitre est la modélisation et l'analyse de la génératrice asynchrone double étoile (GASDE) sans saturation, puis en tenant compte de la saturation du circuit magnétique, nous avons commentés les résultats de la simulation de ce type de génératrice.

III.2. Description de la génératrice asynchrone double étoile (GASDE)

La génératrice asynchrone double étoile (GASDE) comme la génératrice asynchrone à cage (GAS), si la vitesse de rotation du rotor est légèrement supérieure à celle du champ magnétique du stator, elle se développe alors une force électromagnétique similaire à celle qui obtenue avec un générateur synchrone, la machine n'engendre pas sa propre énergie d'excitation. Pour cela, il faudra lui apporter cette énergie et stabiliser sa tension de sortie et sa fréquence à travers des condensateurs connectés à la borne du stator [12].

Une présentation schématique de la GASDE auto-amorçée est donnée par la figure (III.1).

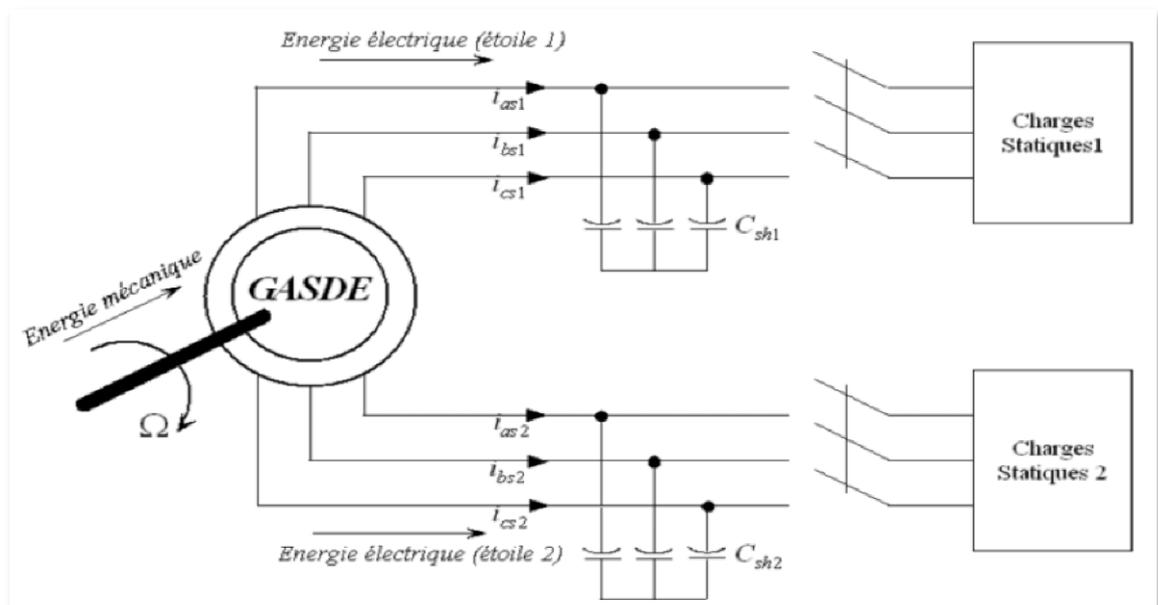


Figure (III.1) : Le schéma représentatif de la GASDE auto-amorçée.

III.3. Phénomène d'auto-amorçage

En l'absence de réseau pilote, il est possible d'auto-exciter la génératrice asynchrone au moyen de condensateurs, mais l'amorçage et la protection contre les surtensions de résonance nécessitent une étude très soignée de l'installation. Le phénomène d'auto-amorçage de la génératrice commence par le flux rémanent et avec la rotation du rotor, il donne une

petite tension/courant aux bornes de la GASDE et à travers le condensateur d'auto-amorçage qui va augmenter la tension/courant par sa nature, puis il renvoie de tension/courant de valeur supérieure par rapport à celle envoyée par la génératrice. Ce processus est répété jusqu'à l'instant où la tension/courant renvoyée par le condensateur soit égale à celle envoyée par la génératrice (point de fonctionnement) [15].

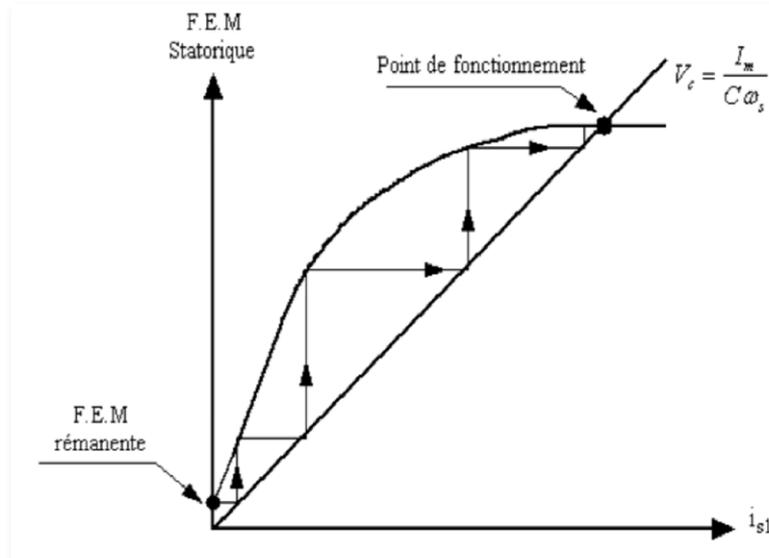


Figure (III.2): Le phénomène d'auto-amorçage.

III.4. Modélisation de la GASDE

III.4. 1. Modèle biphasé de la GASDE dans le référentiel généralisé

La figure (III.3) représente le schéma équivalent de la GASDE dans le référentiel de Park généralisé (U, V) tournant à la vitesse ω_{coor} .

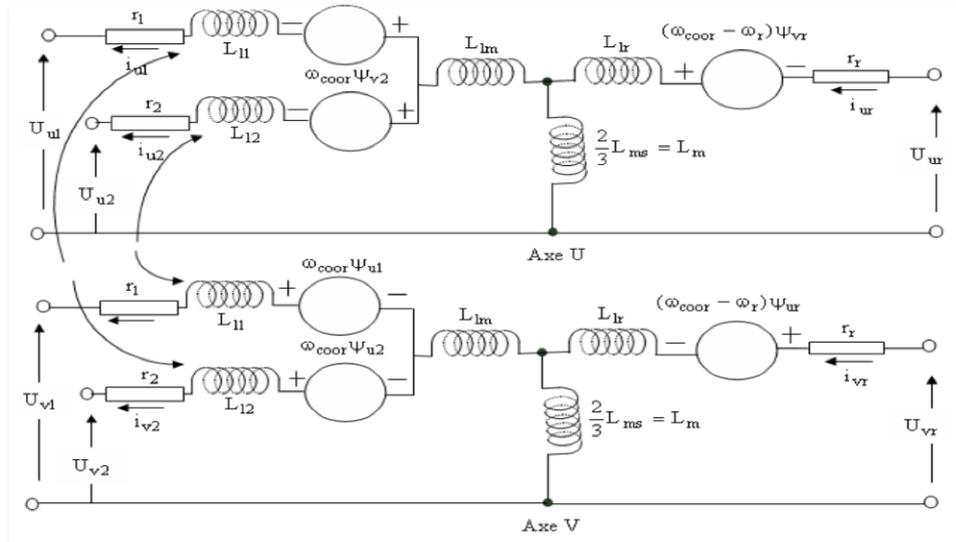


Figure (III.3) : Le schéma équivalent de la GASDE.

Afin d'étudier la machine asynchrone double étoile en fonctionnement génératrice il faut réécrire les équations des tensions et des flux pour mode génératrice par le placement devant chaque courant statorique ($i_{sd1}, i_{qs1}, i_{ds2}, i_{qs2}$) d'un signe moins et prise en compte des hypothèses simplificatrices en considération la saturation du circuit magnétique n'est pas négligeable car l'inductance de magnétisation est le facteur principale de la stabilisation de la tension générée[5].

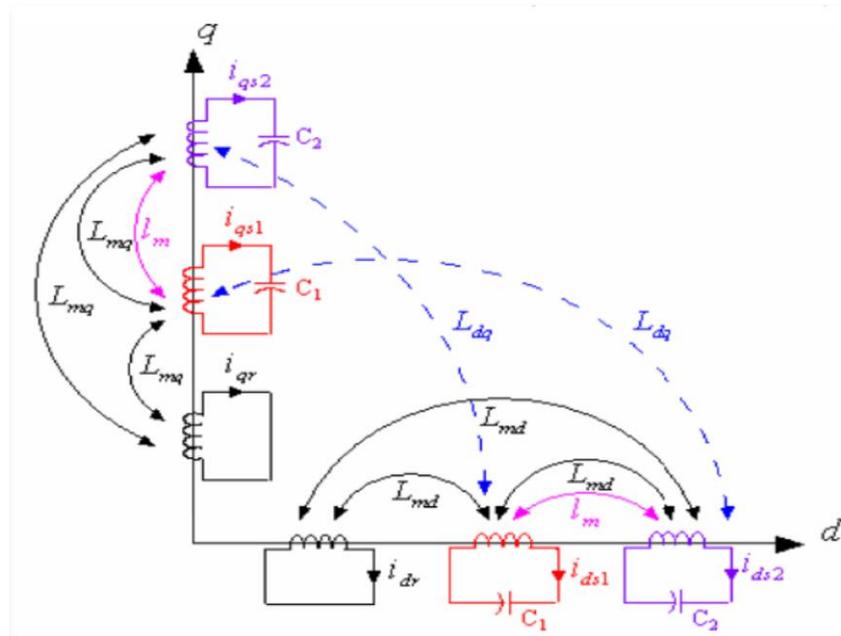


Figure (III.4) : La représentation des enroulements de la machine asynchrone double étoile selon les axes d, q.

III.4.2. Modèle de la GASDE dans le repère de Park (d,q)

Les équations électriques de la GASDE dans le repère de Park tournant avec le champ magnétique créé par les enroulements statoriques deviennent [7], [8] :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds1} = -R_{s1}i_{ds1} + \frac{d\Phi_{ds1}}{dt} - \Phi_{qs1}\omega_s \\ V_{qs1} = -R_{s1}i_{qs1} + \frac{d\Phi_{qs1}}{dt} + \Phi_{ds1}\omega_s \\ V_{ds2} = -R_{s2}i_{ds2} + \frac{d\Phi_{ds2}}{dt} - \Phi_{qs2}\omega_s \\ V_{qs2} = -R_{s2}i_{qs2} + \frac{d\Phi_{qs2}}{dt} + \Phi_{ds2}\omega_s \\ V_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \Phi_{qr}(\omega_s - \omega_r) \\ V_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \Phi_{dr}(\omega_s - \omega_r) \end{array} \right. \quad (\text{III.1})$$

Les expressions des flux statoriques et rotoriques :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{ds1} = -L_{s1}i_{ds1} - L_m(i_{ds1} + i_{ds2}) - L_{dq}i_{qs2} + L_{md}(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr}) \\ \Phi_{qs1} = -L_{s1}i_{qs1} - L_m(i_{qs1} + i_{qs2}) + L_{dq}i_{ds2} + L_{mq}(-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr}) \\ \Phi_{ds2} = -L_{s2}i_{ds2} - L_m(i_{ds1} + i_{ds2}) + L_{dq}i_{qs1} + L_{md}(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr}) \\ \Phi_{qs2} = -L_{s2}i_{qs2} - L_m(i_{qs1} + i_{qs2}) - L_{dq}i_{ds1} + L_{mq}(-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr}) \\ \Phi_{dr} = -L_r i_{dr} + L_{md}(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr}) \\ \Phi_{qr} = -L_r i_{qr} + L_{mq}(-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr}) \end{array} \right. \quad (\text{III.2})$$

L_{s1}, L_{s2}, L_r : les inductances de fuite statoriques (étoile 1 et 2) et rotorique respectivement.

L_{md}, L_{mq} : les inductances cycliques de saturation sont données par [21], [8] :

$$L_{md} = L_m + \frac{i_{md}}{i_{mq}} L_{dq} = L \cos^2 \mu + L_m \sin^2 \mu. \quad (\text{III.3})$$

$$L_{mq} = L_m + \frac{i_{mq}}{i_{md}} L_{dq} = L \sin^2 \mu + L_m \cos^2 \mu. \quad (\text{III.4})$$

Avec :
$$\cos \mu = \frac{i_{md}}{|i_m|} \quad (III.5)$$

$$\sin \mu = \frac{i_{mq}}{|i_m|} \quad (III.6)$$

L_m : est l'inductance de magnétisation:

$$L_m = \frac{|\Phi_m|}{|i_m|} \quad (III.7)$$

L_{dq} : l'inductance cyclique d'inter saturation dans le repère d,q est :

$$L_{dq} = \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} \frac{dL_m}{d|i_m|} = \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|^2} (L - L_m). \quad (III.8)$$

L : l'inductance dynamique donnée par la relation suivante :

$$L = \frac{d|\Phi_m|}{d|i_m|} \quad (III.9)$$

L'expression du courant de magnétisation est exprimée par:

$$i_m = \sqrt{(-i_{xs1} - i_{xs2} + i_{xr})^2 + (-i_{ys1} - i_{ys2} + i_{yr})^2}. \quad (III.10)$$

Avec :

$$\begin{cases} I_{md} = -i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr} \\ I_{mq} = -i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr} \end{cases} \quad (III.11)$$

L'expression de L_m est donnée par une expression non linéaire, pour la génératrice asynchrone double étoile, on a l'expression suivante :

$$L_m = b_1 + b_2 I_m + b_3 I_m^2 + b_4 I_m^3. \quad (III.12)$$

Les inductances cycliques totales statoriques selon les axes d et q sont exprimées par :

$$\begin{cases} L_{ds} = L_m + L_{md} \\ L_{qs} = L_m + L_{mq} \end{cases} \quad (III.13)$$

La relation du couple électromagnétique de la génératrice est donnée par :

$$C_e = \frac{3}{2} p L_m ((i_{qs1} + i_{qs2}) i_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2}) i_{qr}). \quad (III.14)$$

Le couple électromagnétique en fonction de flux :

$$C_e = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_r + L_m} [(i_{qs1} + i_{qs2}) \Phi_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2}) \Phi_{qr}]. \quad (III.15)$$

La vitesse rotorique dynamique:

$$\frac{J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} = C_m - C_e - f\Omega. \quad (III.16)$$

Il en résulte sous les conditions magnétiques linéaires :

$$L_{dq} = 0, L_{md} = L_{mq} = L_m, L_{ds1} = L_{qs1}, L_{ds2} = L_{qs2} \text{ et } L_{dr} = L_{qr}.$$

$$\omega_{gl} = (\omega_s - \omega_r).$$

En remplaçant le système d'équations (III.2) dans les équations (III.1), on obtient le système d'équations (III.17) suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} -(L_{s1} + L_{ds}) \frac{di_{ds1}}{dt} - L_{ds} \frac{di_{ds2}}{dt} + L_m \frac{di_{dr}}{dt} = V_{ds1} + R_{s1} - \omega_s (L_{s1} + L_{qs}) i_{qs1} - \omega_s L_{qs} i_{qs2} + L_m i_{qr} \\ -(L_{s1} + L_{qs}) \frac{di_{qs1}}{dt} - L_{qs} \frac{di_{qs2}}{dt} + L_m \frac{di_{qr}}{dt} = V_{qs1} + R_{s1} + \omega_s (L_{s1} + L_{ds}) i_{ds1} + \omega_s L_{ds} i_{ds2} - L_m i_{dr} \\ -L_{ds} \frac{di_{ds1}}{dt} - (L_{s2} + L_{ds}) \frac{di_{ds2}}{dt} + L_m \frac{di_{dr}}{dt} = V_{ds2} + R_{s2} - \omega_s (L_{s2} + L_{qs}) i_{qs1} - \omega_s L_{qs} i_{qs2} + L_m \\ -L_{qs} \frac{di_{qs1}}{dt} - (L_{s2} + L_{qs}) \frac{di_{qs2}}{dt} + L_m \frac{di_{qr}}{dt} = V_{qs2} + R_{s2} + \omega_s (L_{s1} + L_{ds}) i_{qs1} + \omega_s L_{ds} i_{ds2} - L_m i_{qr} \\ -L_m \frac{di_{ds1}}{dt} - L_m \frac{di_{ds2}}{dt} + (L_r + L_m) \frac{di_{dr}}{dt} = -R_r - \omega_g L_m i_{qs1} - \omega_g L_m i_{qs2} + \omega_g (L_r + L_m) i_{qr} \\ -L_m \frac{di_{qs1}}{dt} - L_m \frac{di_{qs2}}{dt} + (L_r + L_m) \frac{di_{qr}}{dt} = -R_r + \omega_g L_m i_{ds1} + \omega_g L_m i_{ds2} - \omega_g (L_r + L_m) i_{dr} \end{array} \right.$$

III.4.3. Modélisation de l'auto-amorçage de la GASDE à vide

La modélisation de l'auto-amorçage de la GASDE se résume par les équations des tensions aux bornes des condensateurs donnés, sachant que le système d'axe est lié au champ tournant, le système d'équations suivant « d,q » deviendrait :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}V_{ds1} = \frac{1}{C_1}i_{dc1} + \omega_s V_{qs1} \\ \frac{d}{dt}V_{qs1} = \frac{1}{C_1}i_{qc1} - \omega_s V_{ds1} \\ \frac{d}{dt}V_{ds2} = \frac{1}{C_2}i_{dc2} + \omega_s V_{qs2} \\ \frac{d}{dt}V_{qs2} = \frac{1}{C_2}i_{qc2} - \omega_s V_{ds2} \end{cases} \quad (III.18)$$

Où $i_{dc1}, i_{dc2}, i_{qc1}$ et i_{qc2} représentent les courants d'excitation selon les axes d et q.

C_1, C_2 Sont les condensateurs d'excitation aux bornes des étoiles 1 et 2.

Dans le cas d'un fonctionnement à vide, on a :

$$\begin{cases} i_{ds1} = i_{dc1} \\ i_{qs1} = i_{qc1} \\ i_{ds2} = i_{dc2} \\ i_{qs2} = i_{qc2} \end{cases} \quad (III.19)$$

III.5. La simulation numérique

D'abord on a commencé par la simulation de la GASDE sans saturation ou on considère l'inductance de magnétisation est n'a pas variante.

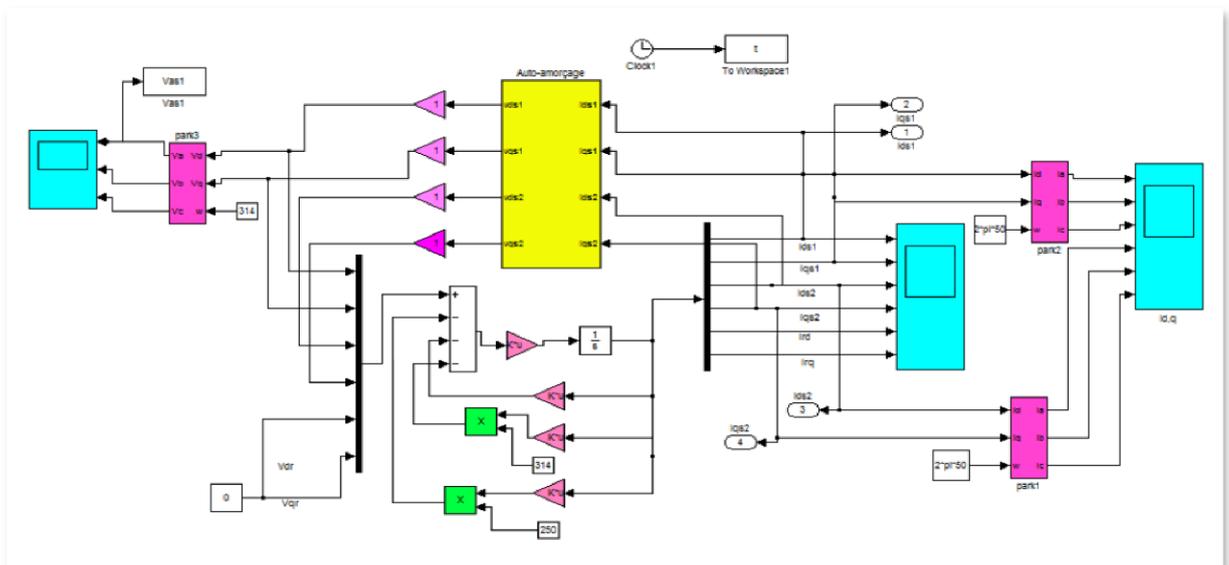


Figure (III.5) : Le schéma bloc de simulation de GASDE sans saturation.

III.5.1. Les résultats de simulation

➤ Pour $(c < \frac{1}{L_s w_s^2})$

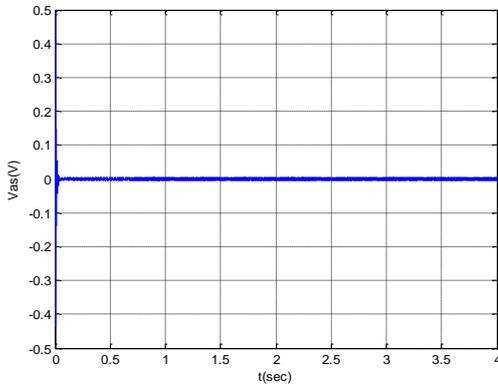


Figure (III.6) : La tension statorique.

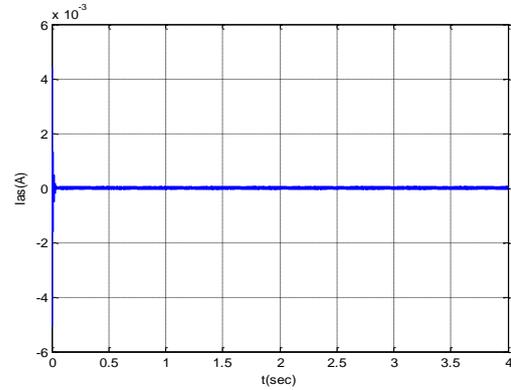


Figure (III.7) : Le courant statorique.

L’auto-amorçage de la GASDE, ne peut avoir lieu que si la puissance apparente qu’elle produit correspond à celle qu’elle absorbe. Cependant, pour la partie puissance réactive, on doit insérer et déterminer la valeur des capacités d’excitation [6] :

$$L_s c w_s^2 > 1 \leftrightarrow c > \frac{1}{L_s w_s^2} \tag{III.20}$$

➤ Pour $(c > \frac{1}{L_s w_s^2})$

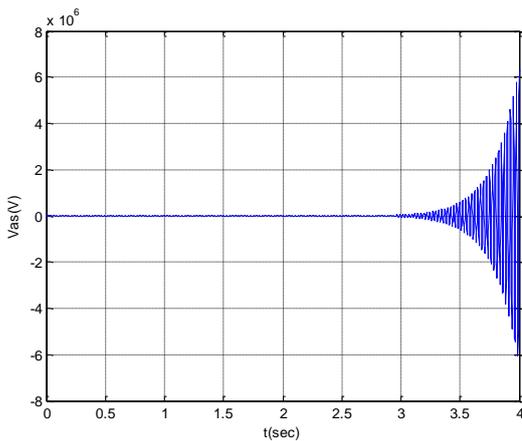


Figure (III.8) : La tension statorique.

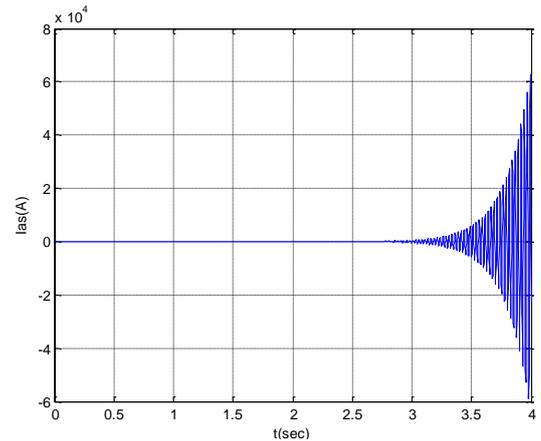


Figure (III. 9) : Le courant statorique.

III.5.2. Interprétation des résultats

Les résultats de simulation illustrée dans les figures (III.6) et (III.7) représentent l'évolution de la tension et le courant où les condensateurs d'auto-amorçage sont inférieures à $\frac{1}{L_s w_s^2}$, au démarrage la tension et le courant présentent des importantes oscillations, puis elle amortisse rapidement jusqu'à atteindre une très faible valeur et le courant atteindre des valeurs critiques.

Par contre, pour $c > \frac{1}{L_s w_s^2}$ la tension et le courant respectivement figure(III.8) et (III.9) dans une croissance indéfini car l'hypothèse de saturation est négligeable.

III.6. La simulation de la GASDE avec saturation

On considère l'inductance de magnétisation L_m n'est pas constante.

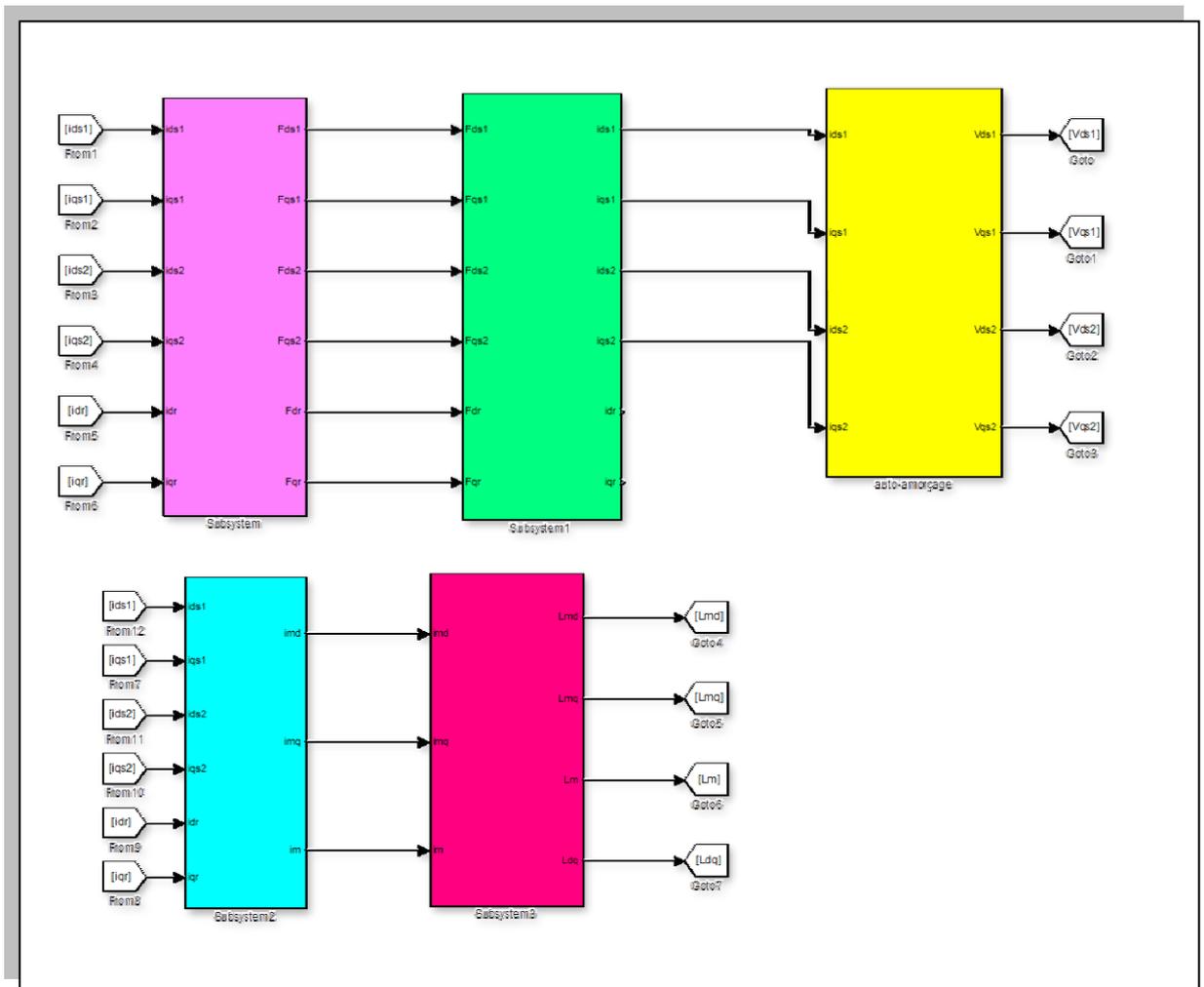


Figure (III.10) : Le schéma bloc de simulation de GASDE avec saturation.

III.6.1. Les résultats de la simulation

La courbe de magnétisation est approximée par un polynôme d'interpolation.

La Figure (III.11) représente les variations de l'inductance de magnétisation L_m en fonction du module du courant de magnétisation $|I_m|$.

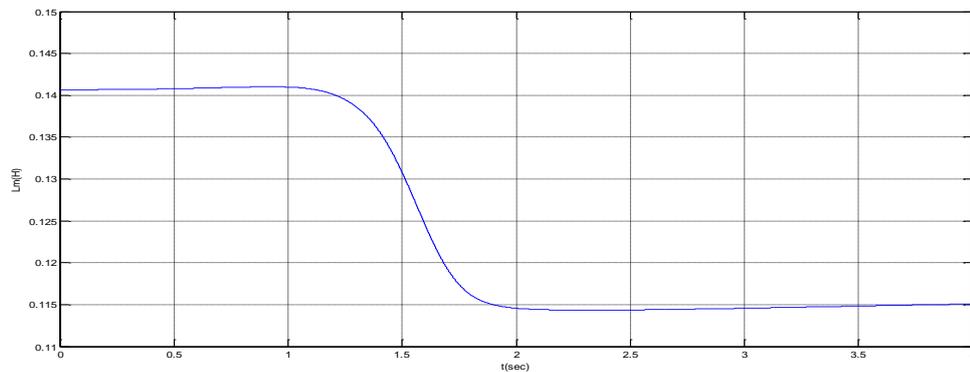


Figure (III.11) : La variation de l'inductance de magnétisation.

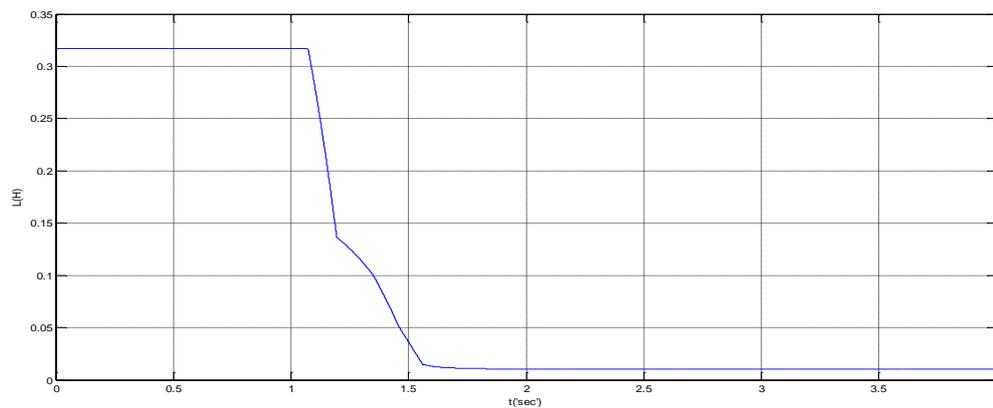


Figure (III.12): La variation de l'inductance dynamique.

Les résultats de simulation numérique dans « l'étoile 1 » pour le fonctionnement à vide de la GASDE avec $C_1 = C_2 = 40\mu\text{F}$.

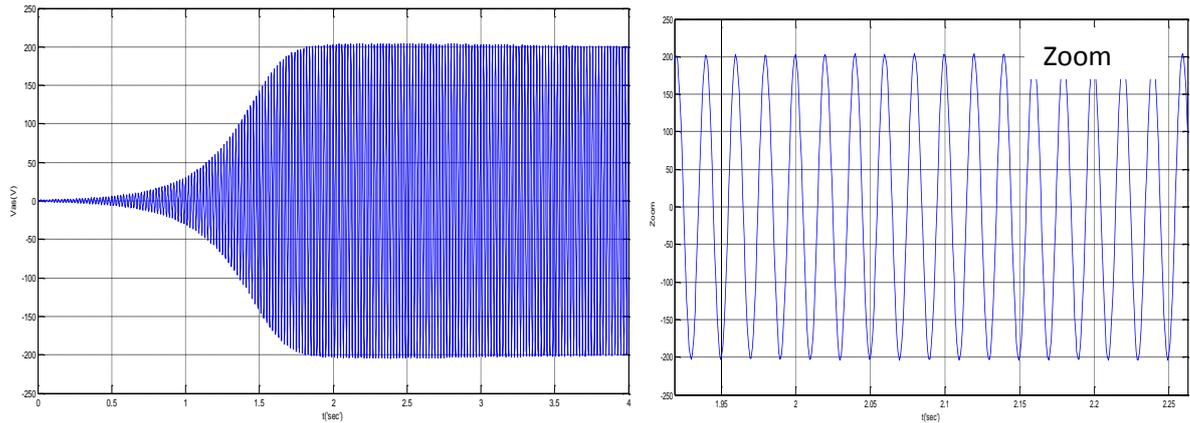


Figure (III.13): L'évolution des tensions statoriques.

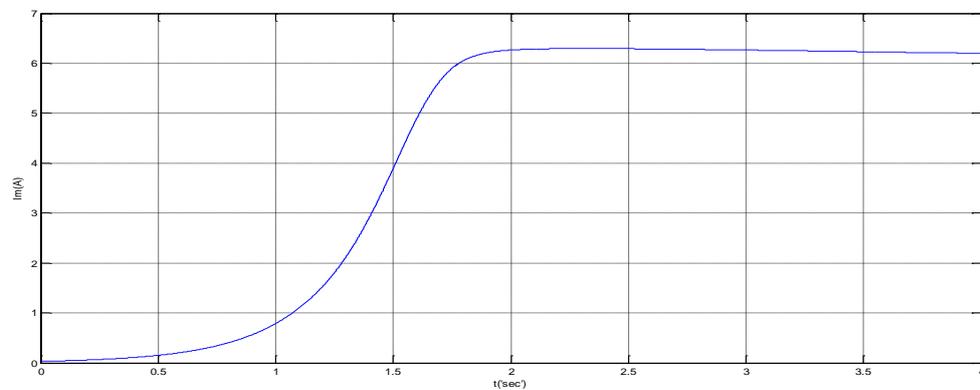


Figure (III.14) : L'évolution de courant de magnétisation.

III.6.2.Effet de la Capacité

Pour mesurer l'influence des capacités sur les tensions de la GASDE, on fait tourner le rotor à la vitesse de synchronisme et on représente les enveloppes des tensions V_{as1} , V_{as2} , la figure (III.15) dans les 2 cas suivants :

Premier test : $C1 = C2 = 40 \mu\text{F}$.

Deuxième test : $C1 = C2 = 62 \mu\text{F}$.

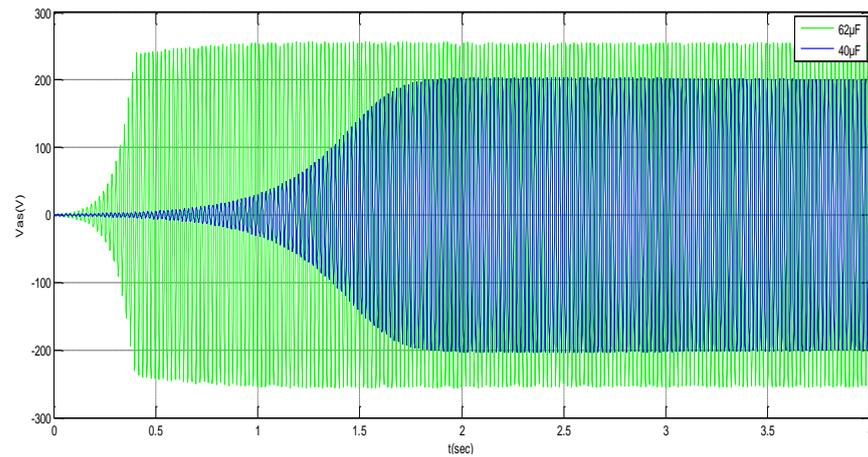


Figure (III.15) : L'influence de capacité sur les tensions statoriques.

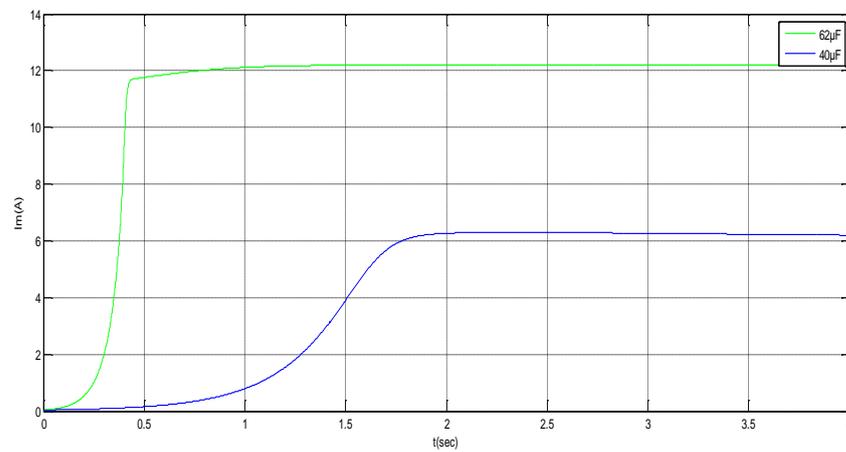


Figure (III.16) : L'influence de capacité sur le courant de magnétisation.

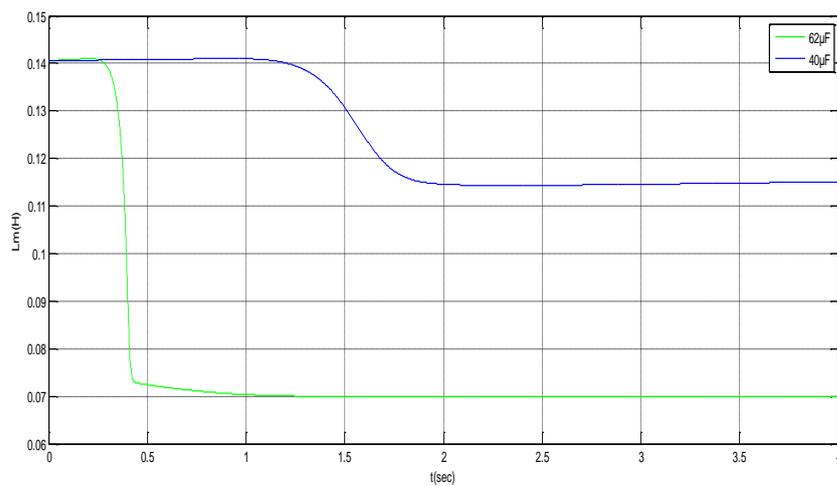


Figure (III.17) : L'influence de capacité sur l'inductance de magnétisation.

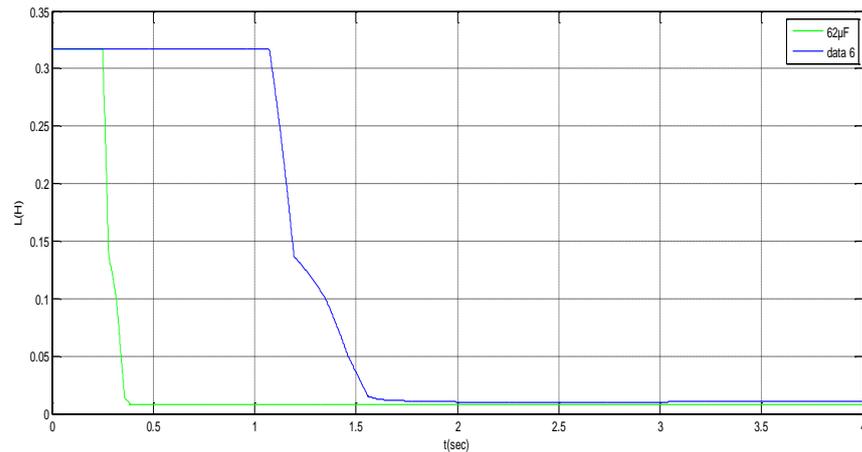


Figure (III.18) : L'influence de capacité sur l'inductance dynamique.

III.6.3. Interprétation des résultats

Dans cette application, la valeur de la capacité d'excitation shunt est considérée égale à $C1 = C2 = 40 \mu F$. Pour tenir compte de la saturation du circuit magnétique de la machine, on doit introduire la courbe de magnétisation qui est généralement obtenue par expérimentation et approximée par un polynôme d'interpolation. Les variations de l'inductance de magnétisation L_m et de l'inductance dynamique L en fonction du courant de magnétisation I_m sont représentées respectivement par les figures (III.11) et (III.12).

-Le courant de magnétisation a une forme exponentielle dans la période $t = 0.5s$ et $t = 2s$, puis il se stabilise à une valeur de $6.3A$.

-Les tensions V_{as1} et V_{as2} aux bornes de la première phase de l'étoile sont illustrées par la figure (III.13), ont des évolutions exponentielles de $t = 0.5s$ à $t = 2s$ où ils se stabilisent et prennent les formes sinusoïdales de valeur crête $200V$ pour les tensions, de fréquence d'environ $50Hz$. On constate que l'évolution des tensions et des courants statoriques suivent la forme d'évolution du courant de magnétisation.

Afin de voir l'influence de la capacité d'excitation sur les caractéristiques de la génératrice, nous avons simulé cette dernière en des différentes valeurs et on a remarqué que l'augmentation de la capacité d'excitation engendre une augmentation au niveau des caractéristiques de la machine ainsi qu'une diminution du temps d'amorçage (plus rapide).

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons effectué différentes simulations sur la GASDE auto excitée en cas d'un fonctionnement autonome (non connectée au réseau). De cette raison, la modèle mathématique de la GASDE a été développée en incluant l'inductance de fuite mutuelle commune aux deux enroulements. Les résultats de ces simulations peuvent se résumer à :

-La simulation de la génératrice asynchrone double étoile non saturée et nous avons testé la valeur du condensateur shunt sous condition d'amorçage, cette condition montre que la valeur minimale (critique) conduisant à l'auto-amorçage est fonction de l'inductance cyclique statorique ainsi que de la pulsation rotorique du glissement ($c > \frac{1}{L_s w_s^2}$), seule la valeur de C_{shmin} est intéressante, car au-de là de C_{shmax} correspond à un fonctionnement instable.

-L'influence des capacités d'auto-amorçage, ainsi que la vitesse d'entraînement sur le fonctionnement de la GASDE ont été présentes et discutés.

Introduction

Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage d'écureuil, la vitesse de rotation est directement dépendant de la fréquence des courants des bobinages statoriques, la solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine, ceci est réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commandé, ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés.

La littérature atteste du grand intérêt accordé à la Machine Asynchrone Double alimentée.

En tant que Moteur, dans les applications requérant de la vitesse variable, son utilisation permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par l'action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Dans ce chapitre, nous allons présenter une généralité sur la machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation, ainsi que ses modes de fonctionnement et on le conclut par sa modélisation [2].

IV.2. Constitution de la machine asynchrone à rotor bobiné

La machine asynchrone à rotor bobiné présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent de s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont accessibles de l'extérieur par l'intermédiaire de bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais [11], [19].

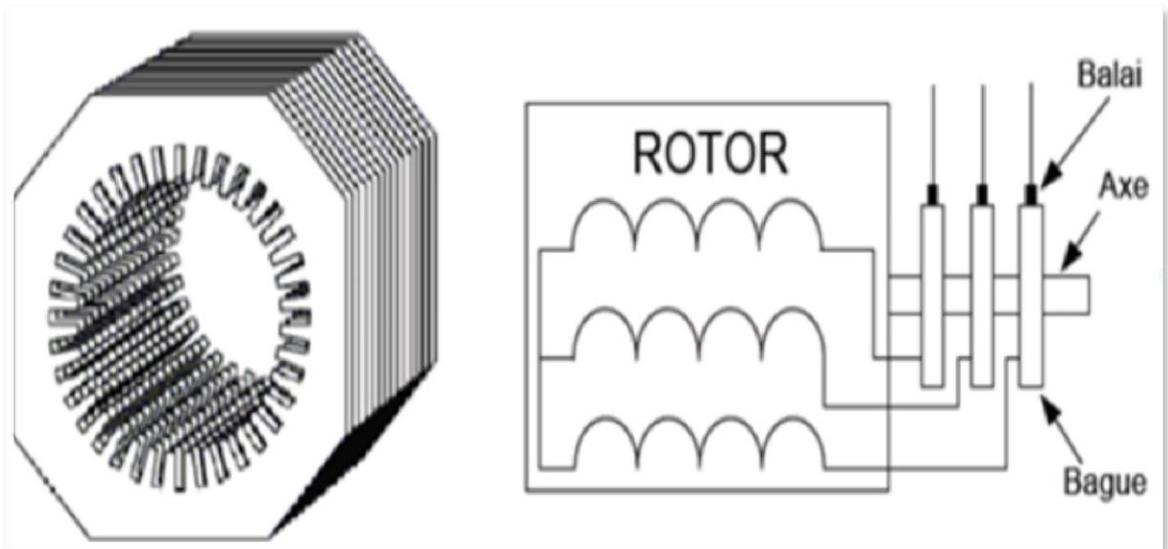


Figure (IV.1) : La structure du stator et des contacts rotoriques de la machine asynchrone à rotor bobiné.

IV.3. Les avantages

La configuration qui utilise deux onduleurs avec un ou deux redresseurs présente un certain nombre d'avantages [9]:

- Le contrôle des tensions rotoriques nous permettra de maîtriser les puissances produites, au niveau actif ainsi qu'au niveau réactif.
- La production de puissance électrique quelle que soit la vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme), puisqu'elle peut tolérer une variation de $\pm 30\%$ autour de la puissance de synchronisme.
- La récupération de la puissance de glissement.

IV.4. Les inconvénients

Difficile de lui en trouver!!Mais tout de même, trois aspects retiendront notre attention :

- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix. Pourtant certaines études prétendent le contraire [18].

- Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudié et très connue.
- A notre connaissance, peu d'industriels n'ont encore mené d'études rigoureux ses comparatives de prix total de revient sous la forme deux onduleurs.

Cela la marginalise toujours par rapport à sa concurrente directe, la configuration avec stator connecté au réseau dont le coût global est bien maîtrisé.

IV.5. Modèle triphasé de la MASDE sur les axes réels

La machine asynchrone à double alimentation est une machine très complexe. Nous devons procéder les mêmes hypothèses simplificatrices de la MASDE pour pouvoir la modéliser (ces modifications n'altèrent pas le fonctionnement de la MADA).

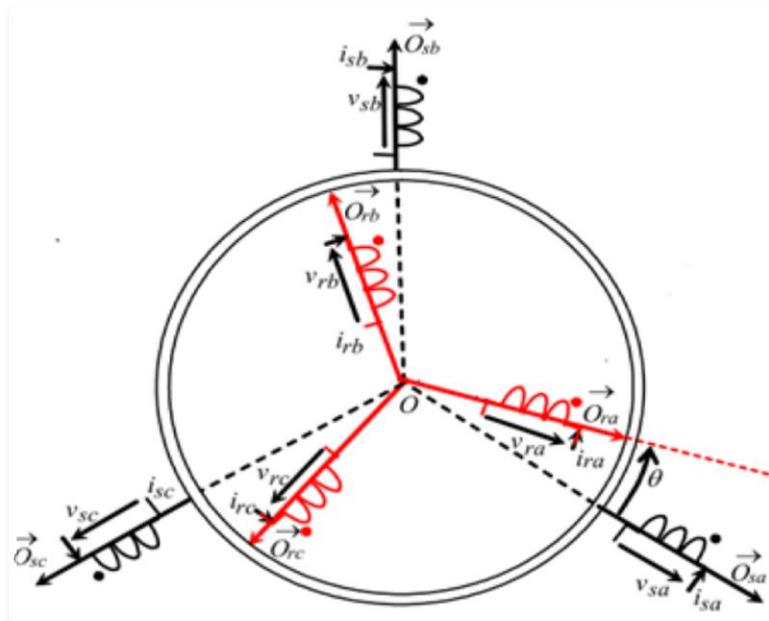


Figure (IV.2) : La représentation dans le repère naturel (a, b, c).

IV.5.1. Equations électriques

Les équations électriques de la machine

$$\text{Pour le stator : } [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{Pour le rotor : } [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (\text{IV.2})$$

$[V_s]$, $[V_r]$ les tensions statoriques et rotoriques de la machine.

$[I_s], [I_r]$ es courants statoriques et rotoriques de la machine.

$[\Phi_s], [\Phi_r]$ les flux statoriques et rotoriques de la machine.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

R_s : Résistance d'une phase statorique.

R_r : Résistance d'une phase rotorique.

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}.$$

$$[I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}.$$

$$[\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}.$$

IV.5.2. Equations magnétiques

$$[\Phi_s] = [L_s] \cdot [I_s] + [M] \cdot [I_r] \tag{IV.3}$$

$$[\Phi_r] = [L_r] \cdot [I_r] + [M] \cdot [I_s] \tag{IV.4}$$

$$\begin{cases} L_s = l_s - M_s \\ L_r = l_r - M_r \\ M = \frac{3}{2} M_{sr} \end{cases} \tag{IV.5}$$

$$L_s = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \tag{IV.6}$$

$$L_r = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \tag{IV.7}$$

Avec :

l_s et l_r : les inductances propres statoriques et rotoriques de la machine.

L_s et L_r : les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine.

M_s et M_r : les inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques de la machine.

M : l'inductance magnétisante.

M_{sr} : la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.

La matrice des inductances mutuelles s'écrit comme suite :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta + 4\pi/3) \\ \cos(\theta + 4\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta + 4\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.8})$$

IV.5.3. Equations mécaniques

L'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad (\text{II.9})$$

avec:

J : Moment d'inertie.

Ω : Vitesse de rotation rotorique de la machine.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant (couple de charge).

f_r : Coefficient de frottement.

IV.5.4. Modèle biphasé

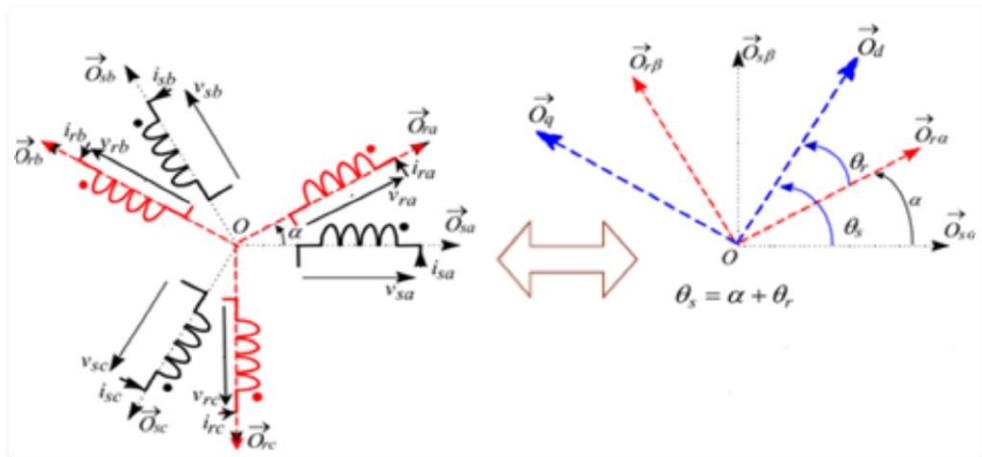


Figure (IV.3) : La représentation des enroulements de la machine dans le repère (d, q).

Nous avons besoin de la transformation de Park [17] pour passer d'un modèle triphasé à un modèle diphasé. Celle-ci est définie par une matrice qui permet de ramener les grandeurs du repère triphasé abc sur les axes d'un repère tournant d,q.

Après avoir effectué ces différentes transformation nous obtenons les équations de tension suivante :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_{gl} \Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_{gl} \Phi_{dr} \end{cases} \quad (IV.10)$$

Avec les équations du flux :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (IV.11)$$

En remplaçant les équations des flux (IV.11) par leur expression dans le système(IV.10), on obtient le système (IV.12):

$$\begin{cases} L_s \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \frac{di_{dr}}{dt} = V_{ds} - R_s i_{ds} + w_s(L_s i_{qs} + L_m i_{qr}) \\ L_s \frac{di_{qs}}{dt} + L_m \frac{di_{qr}}{dt} = V_{qs} - R_s i_{qs} - w_s(L_s i_{ds} + L_m i_{dr}) \\ L_r \frac{di_{dr}}{dt} + L_m \frac{di_{ds}}{dt} = V_{dr} - R_r i_{dr} + w_{gl}(L_r i_{qr} + L_m i_{qs}) \\ L_r \frac{di_{qr}}{dt} + L_m \frac{di_{qs}}{dt} = V_{qr} - R_r i_{qr} - w_{gl}(L_r i_{dr} + L_m i_{ds}) \end{cases} \quad (IV.12)$$

Nous considérons les courants rotoriques comme variable d'état, après les équations (IV.12), ce système devient comme suit:

$$\frac{dX}{dt} = \dot{x} = AX + BU$$

Avec :

$$X = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad U = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix}$$

Nous en déduisons les expressions des matrices [A], [B] comme suit :

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[A] = [L]^{-1}([R] + w_s[M_1] + w_{gl}[M_2])$$

$$L = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; \quad M_1 = \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -L_m \\ L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad M_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & -L_r \\ L_m & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix}$$

IV.5.5. Simulation numérique

Le schéma bloc de la MADA est donné comme :

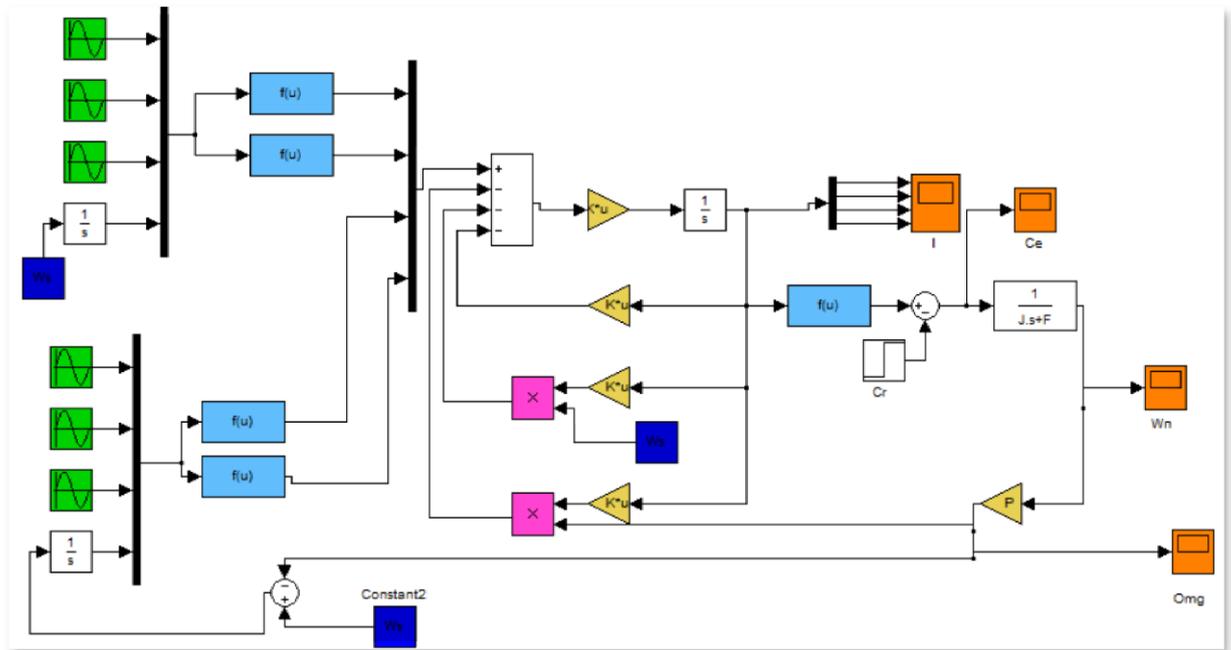


Figure (IV.4) : Le schéma bloc de simulation de la MADA.

Les résultats obtenus sont représentés par les figures suivantes :

- Performances de la conduite de la machine asynchrone triphasée à double alimentation lors d'un démarrage à vide ($V_s = 220 V ; f_s = 50 Hz$), ($V_r = 7V ; f_r = 1.2 Hz$).

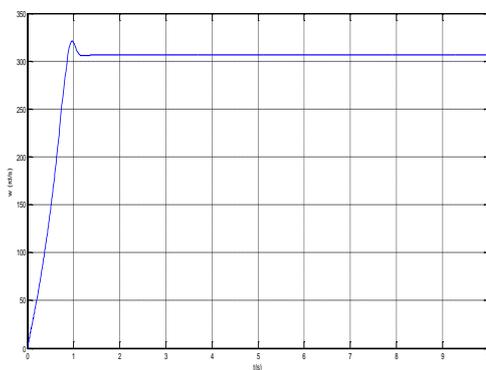


Figure (IV.5) : La vitesse de rotation.

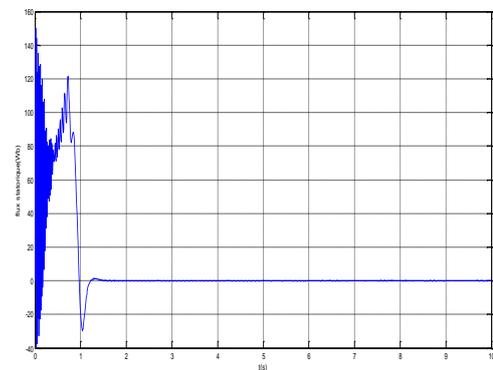


Figure (IV.6) : Le couple électromagnétique.

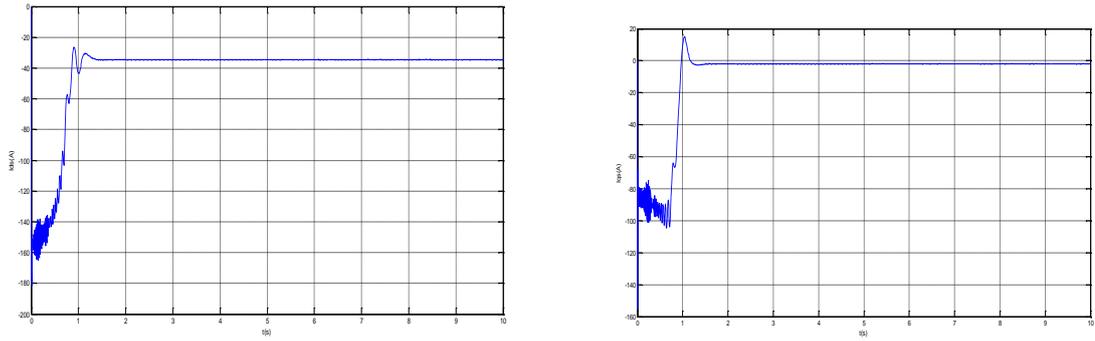


Figure (IV.7) : Les courants statoriques.

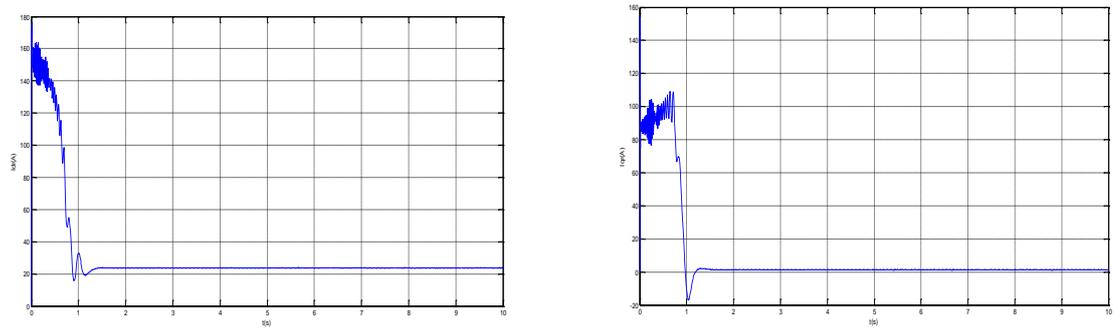


Figure (IV.8) : Les courants rotoriques.

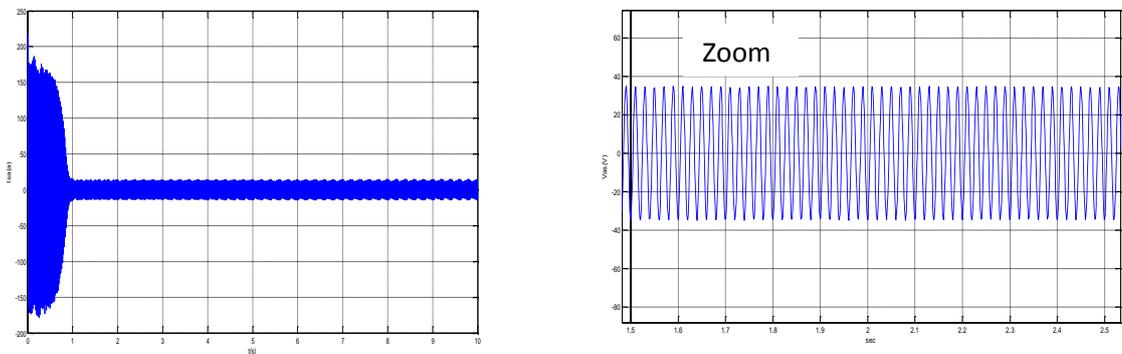


Figure (IV.9) : Le courants statorique réel I_{as} .

- Performances de la conduite de la machine asynchrone triphasée à double alimentation lors d'une application d'un couple résistant $C_r=50\text{N.m}$ à l'instant $t=5\text{s}$, ($V_s = 220\text{ V}$; $f_s = 50\text{ Hz}$) et ($V_r = 7\text{ V}$; $f_r = 1.2\text{ Hz}$).

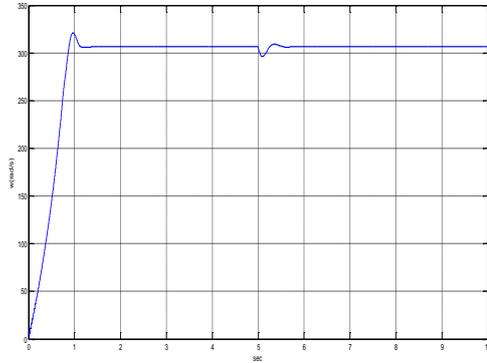


Figure (IV.10) : La vitesse de rotation.

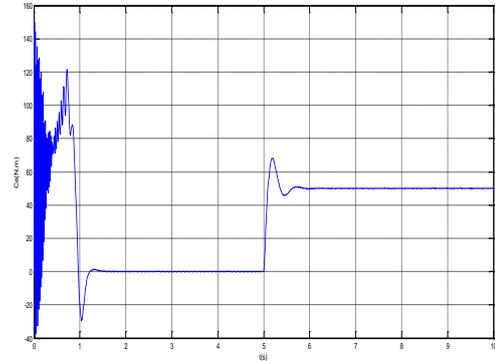


Figure (IV.11) : Le couple le électromagnétique.

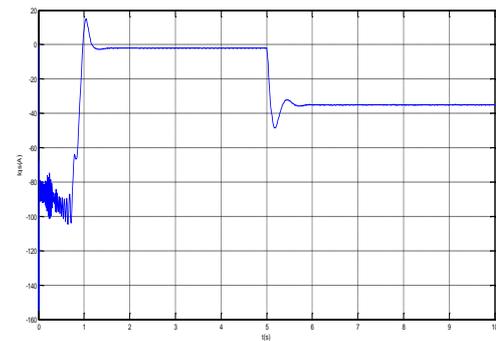
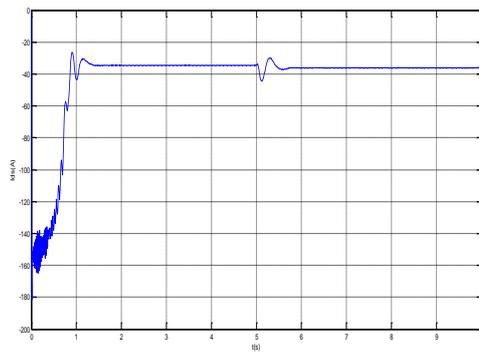


Figure (IV.12) : Les courants statoriques.

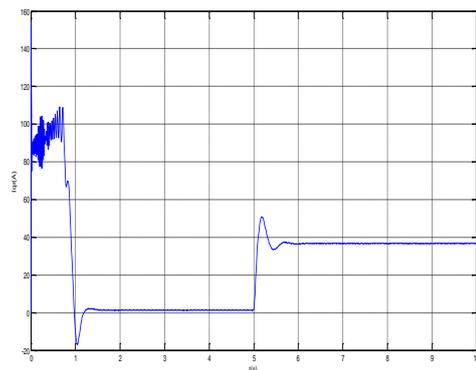
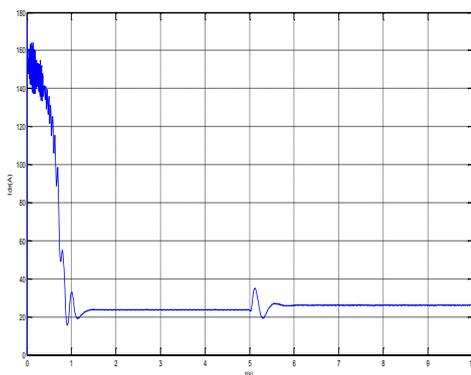


Figure (IV.13) : Les courants rotoriques.

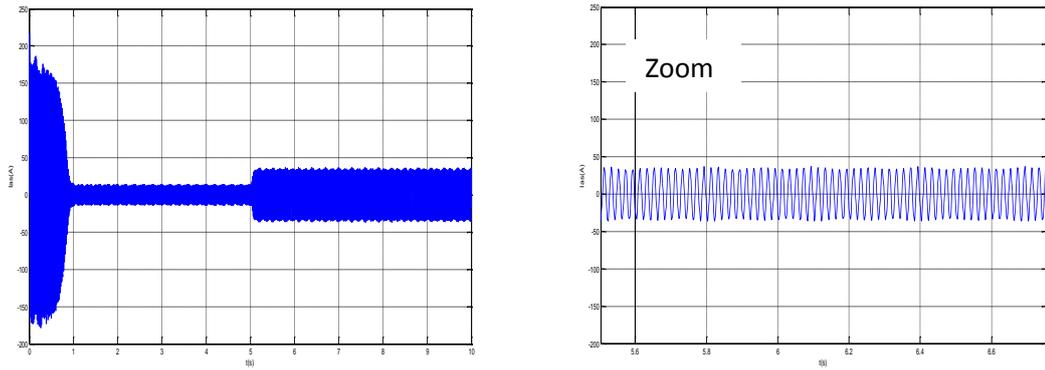


Figure (IV.14) : Le courants statorique réel I_{as} .

- Performances de la conduite de la machine asynchrone triphasée à double alimentation lors d'une application d'un couple résistant $C_r=50 \text{ N.m}$ à l'instant $t=5\text{s}$, ($V_s = 220 \text{ V}$; $f_s= 50 \text{ Hz}$) et ($V_r = 7 \text{ à } 20 \text{ V}$; $f_r= 1.2 \text{ à } 20 \text{ Hz}$).

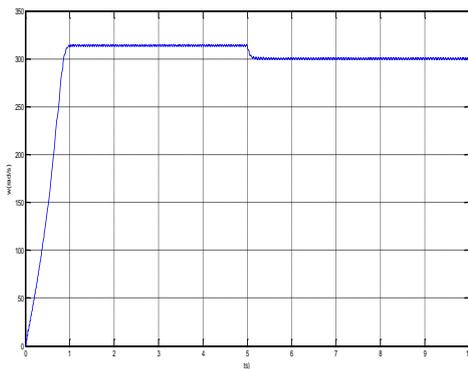


Figure (IV.15) : La vitesse de rotation.

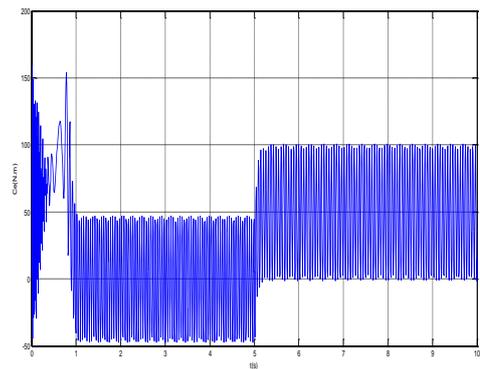


Figure (IV.16) : Le couple électromagnétique.

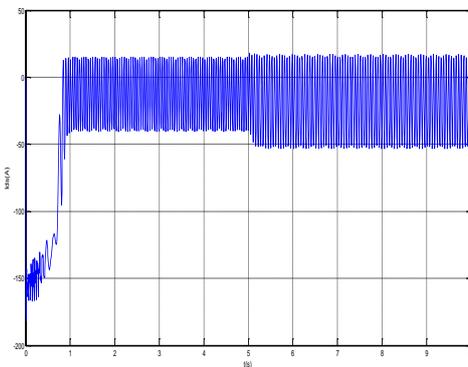
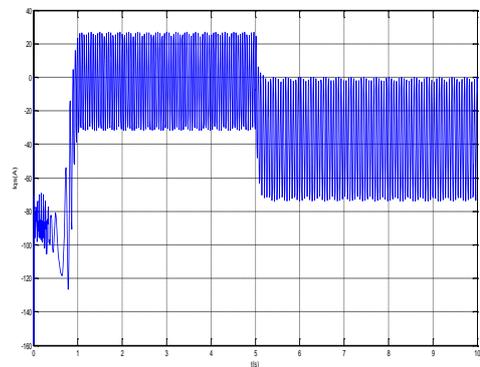


Figure (IV.17) : Les courants sotoriques.



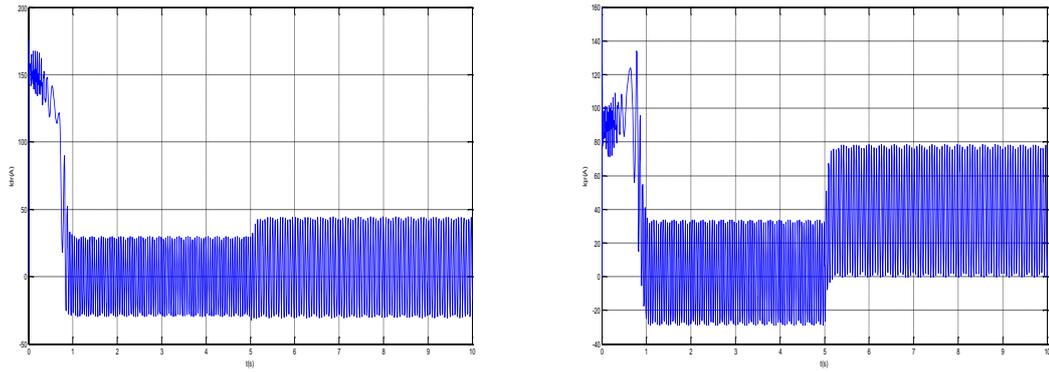


Figure (IV.18) : Les courants rotoriques.

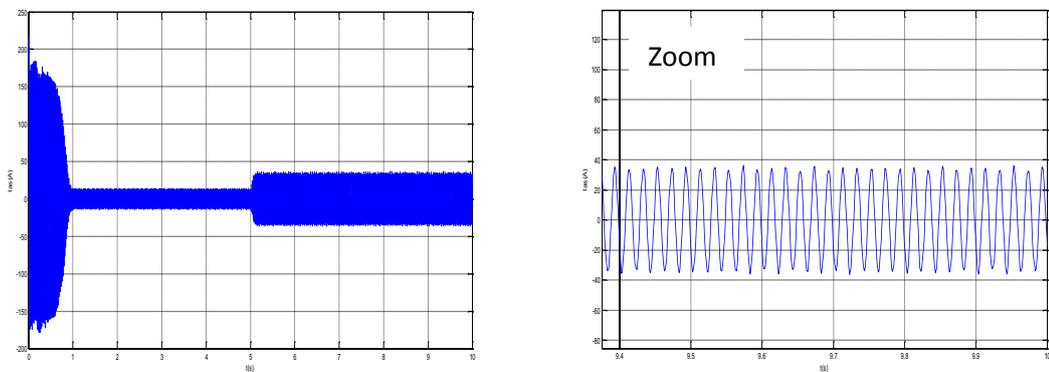


Figure (IV.19) : Le courants statorique réel I_{as} .

IV.6.6. Interprétations des résultats

D’après les résultats de simulation obtenus, nous avons observé que toute variation au niveau de la fréquence ou tension rotoriques a une influence directe sur la vitesse et le couple.

Les figures (IV.5), (IV.6),(IV.7),(IV.8),et(IV.9) représentent le fonctionnement de la MADA sous la charge nominale après un démarrage à vide (elle fonctionne comme une machine asynchrone classique). Après l’introduction de la charge à l’instant $t = 5$ s, on remarque que la vitesse diminue puis elle se stabilise comme il est illustré sur les figures (IV.10),(IV.11), (IV.12),(IV.13),et(IV.14).

Dans le cas où on fait varier la fréquence rotorique de (1.2 Hz à 20 Hz), nous avons remarqué que l’augmentation au niveau de la fréquence rotorique f_r implique des oscillations

au niveau des grandeurs de la machine, et la tension rotorique est variable de (7 V à 12 V) on remarque qu'elle a une influence directe sur la vitesse comme il est démontré sur les figures (IV.15), (IV.16), (IV.17), (IV.18), et (IV.19).

IV.7. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, l'étude de la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.

Puis, nous avons s'intéressé à l'établissement du modèle de la machine asynchrone à double alimentation, en régime quelconque, de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park lié au champ tournant. Ce modèle a été développé dans le cadre de certaines hypothèses simplificatrices que nous devons respecter. Les résultats obtenus sont satisfaisants, elles répondent bien à l'évolution d'une opération d'un démarrage à vide, ensuite les résultats concernant la machine en charge, avec la variation de la fréquence et la tension d'alimentation. Afin nous avons présenté l'interprétation des résultats.

Conclusion générale

L'objectif de ce présent mémoire concerne l'étude d'une machine plus courante parmi les machines multi-phaseés est la machines asynchrones double étoile. Cette étude suivi par la modélisation et l'analyse de la machine en régime moteur et générateur en fonctionnement autonome, à fin de mieux maitriser la machine.

Nous nous sommes tout d'abord intéressés dans le premier chapitre aux machines multiphasées afin de présenter leurs caractéristiques.

Dans le deuxième chapitre nos efforts a été consacrée à la modélisation de la MASDE, le modèle a été développés décrivant les équations de la MASDE dans un système d'axes orthogonaux grâce à la matrice de transformation de Park que nous avons développée, a facilité l'étude des régimes dynamiques et la simulation numérique, l'étude a été menée avec un décalage angulaire 30° entre les deux étoiles.

Par ailleurs, la modélisation et l'analyse de la GASDE ont été présentées dans le troisième chapitre. Dans ce dernier, nous avons développé un modèle unifié de la génératrice, nous avons aussi montré l'influence de la capacité, les tensions et les courants de la GASDE sont aussi influencés par les capacités d'autoamorçage.

L'objectif du quatrième chapitre est l'étude de machine asynchrone double alimentation en générale. Particulièrement on exige une bonne modélisation mathématique décrivant la machine à entraîner. Cela permet de prévoir les performances dynamiques de ses entraînements avec la variation de fréquence et la tension d'alimentation.

A partir de cette étude et les résultats de simulation obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes qu'on a jugé une étude comparative entre les machines la MADA et la MASDE.

Tout d'abord, la MADA et la MASDE sont des machines asynchrones ; alors le premier inconvénient est que leurs structures sont non linéaires, ce qui implique la complexité de leurs commandes.

- De côté constructive, la MADA est plus simple que la MASDE, on peut dire que la MADA est une machine asynchrone double étoile avec l'une des étoiles court-circuitée et un rotor bobiné ,nous pourrions dire que la MADA nécessite a une bobine d'excitation qui doit être alimentée en courant alternatif, soit par une source externe soit par l'intermédiaire d'une

machine auxiliaire alternative, et la MASDE à rotors à cage d'écureuil est simple et robuste. Il en résulte une grande fiabilité, La MASDE plus on augmente le nombre de phases, plus on a de degrés de liberté pour commander la machine.

- L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ainsi la MASDE réduit la taille des convertisseurs par la variation de la fréquence d'alimentation de 2^{ème} étoile.
- Pour l'application en générale la MADA est étudiée et connue par rapport la MASDE, elle utilisée dans les applications de la vitesse variable tels que Textile, laminoirs...etc.
- Cependant, la MASDE est utilisée beaucoup plus dans les applications de puissances élevées comme les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins du ciment,... etc.
- De côté économique, Il nous semble que la MASDE est plus volumique et plus chère que la MADA, à cause de l'augmentation du nombre déphases de la MASDE.

Enfin, ce travail est un prolongement des études réalisées sur la MASDE et a besoin d'une continuation dans plusieurs directions. D'après les résultats obtenus, il serait intéressant d'envisager les perspectives et les suggestions suivantes :

- Etudier la MASDE associée à d'intermédiaire d'un convertisseur.
- L'application des techniques de commande telles que: la commande vectorielle, les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones,etc.
- Refaire le même travail, avec un fonctionnement générateur utilisé dans les systèmes d'énergie renouvelable.

Annexe A

Paramètre de la machine asynchrone à double stator	
❖ Puissance nominale	$P_n = 4,5 \text{ kW}$
❖ Tension nominale	$V_n = 220 \text{ V}$
❖ Courant nominale	$I_n = 6,5 \text{ A}$
❖ Nombre de paires de pôles	$p = 2$
❖ Résistance du premier enroulement statorique	$R_{s1} = 3,72 \Omega$
❖ Résistance du deuxième enroulement statorique	$R_{s2} = 3,72 \Omega$
❖ Résistance rotorique	$R_r = 2,12 \Omega$
❖ Inductance du premier enroulement statorique	$L_{s1} = 0,022 \text{ H}$
❖ Inductance du deuxième enroulement statorique	$L_{s2} = 0,022 \text{ H}$
❖ Inductance du deuxième enroulement statorique	$L_r = 0,006 \text{ H}$
❖ Inductance du deuxième enroulement statorique	$L_m = 0,3672 \text{ H}$
❖ Moment d'inertie	$J = 0,662 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
❖ Coefficient de frottement	$K_f = 0,001 \text{ Nms/rd}$
❖ Fréquence nominale	$f = 50 \text{ Hz}$

Annexe B

Paramètre de la génératrice asynchrone à double stator

$$b1 = 0.1406, b2 = 0.0014, b3 = 0.0012, b4 = 0.00005$$

❖ Puissance nominale	$P_n = 4,5 \text{ kW}$
❖ Tension à vide	$V_n = 158 \text{ V}$
❖ Courant à vide	$I_n = 2 \text{ A}$
❖ Nombre de paires de pôles	$p = 2$
❖ Résistance du premier enroulement statorique	$R_{s1} = 1.9 \Omega$
❖ Résistance du deuxième enroulement statorique	$R_{s2} = 1.9 \Omega$
❖ Résistance rotorique	$R_r = 2,11 \Omega$
❖ Inductance du premier enroulement statorique	$L_{s1} = 0,0132 \text{ H}$
❖ Inductance du deuxième enroulement statorique	$L_{s2} = 0,0132 \text{ H}$
❖ Inductance rotorique	$L_r = 0,0132 \text{ H}$
❖ Inductance mutuelle	$L_m = 0,011 \text{ H}$
❖ Moment d'inertie	$J = 0,038 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
❖ Coefficient de frottement	$K_f = 0,0 \text{ Nms/rd}$
❖ Fréquence nominale	$f = 50 \text{ Hz}$

Annexe C

Paramètre de la machine asynchrone à double alimentation	
❖ Puissance nominale	$P_n = 4,5 \text{ kW}$
❖ Tension nominale	$V_n = 220 \text{ V}$
❖ Tension nominale rotorique	$V_r = 7 \text{ V}$
❖ Courant nominale	$I_n = 6,5 \text{ A}$
❖ Nombre de paires de pôles	$p = 2$
❖ Résistance du premier enroulement statorique	$R_s = 1,2 \Omega$
❖ Résistance rotorique	$R_r = 1,8 \Omega$
❖ Inductance du premier enroulement statorique	$L_s = 0,022 \text{ H}$
❖ Inductance du deuxième enroulement statorique	$L_r = 0,1568 \text{ H}$
❖ Inductance du deuxième enroulement statorique	$L_m = 0,15 \text{ H}$
❖ Moment d'inertie	$J = 0,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
❖ Coefficient de frottement	$K_f = 0,001 \text{ Nms/rd}$
❖ Fréquence nominale statorique	$f_s = 50 \text{ Hz}$
❖ Fréquence nominale rotorique	$f_r = 1,2 \text{ Hz}$

Bibliographie

- [1] ARDJOUN SID AHMED MEHDI ''*Commande en vitesse par mode glissant d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation*'', MAGISTER en Electrotechnique. UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 2010.
- [2] BOUARAKI MOULOUD ''*Etude d'un entrainement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : application sur un site à Tindouf*''. thèse magister ,Université M'hamed Bougara – Boumardas ,2012.
- [3] D. Hadiouche, ''*contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure*'', Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-1., soutenue 20 décembre 2001.
- [4] D.Hadiouche, H.Razik, A.Rezzoug, ''*Modelling of a double-star induction motor with an arbitrary shift angle between its three phase windings* '' , EPE-PEMC2000, Kosice.
- [5] D.Seyoum,C.Grantham,M.F.Rahman, ''*The dynamic characteristics of an isolated self-excited induction generator driven by a wind turbine*,'' IEEE Trans on Indus Appl.,vol. 39,no. 4, pp. 936–944, July/August 2003.
- [6] E. Merabet, ''*Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile*'', Mémoire de Magister, l'Université de Batna 2008.
- [7] E.Merabet, R. Abdessemed, H. Amimeur, F. Hamoudi, L.Abdelhamid, ''*Influence de la charge sur une génératrice asynchrone double étoile (GASDE)*'',International Conférence on Renewable Energy ICRE'07, University of Bejaia,pp. 63–68 (CDROM), 25–27 November 2007.
- [8] G.K.Singh, ''*Modeling and experimental analysis of a self-excited six-phase induction Generator for stand-alone renewable energy generation*,'' Renewable Energy 0960-1481 2007 Elsevier., doi :10.1016/j.renene.2007.08.007.
- [[9] G.SALLOUM, ''*contribution à la commande robuste de la machine asynchrone a doublé alimentation*'', docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2007.
- [10] H. AMIMEUR, ''*Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement*'', mémoire d'ingénieur, Université de BATNA 2008.

- [11] HAKIM BENNANI''*machine asynchrone a doublé alimentation les lois de commande en régime permanent*'' pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.). UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, 2011.
- [12] Hassen Badi, El-Harrach''*Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne*, thèse d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique'', 10, AV., Algérie, 2007.
- [13] KHALED FERKOUS ''*Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne université Mentouri constantine*'', thèse magister, 2009.
- [14] L.Benalia, ''*commande en tension des moteurs à induction a doublé alimente*'', Thèse doctorat, l'Université de Batna 2010.
- [15] Lamri LOUZE ''*Production décentralisée de l'énergie électrique : Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée*'', Thèse de Doctorat, CONSTANTINE, 2010.
- [16] M. Bernard, ''*Historique des machines électromagnétiques et plus particulières des machines a réluctance variable*,'' Revue 3E.In°3. pp. 3–8, Juin 1995.
- [17] P.Vidal, ''*Commande non-linéaire d'une machine asynchrone a doublé alimentation*'', Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse France, Décembre 2004.
- [18] P-E. Vidal, ''*Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double Alimentation*'', Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [19] Poitiers. F, ''*Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne*'' Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Déc. 19, 2003.
- [20] R. Abdessemed, M. Kadjoudj, ''*Modélisation des machines électriques*'', Presses de l'Université de Batna, Algérie, 1997.
- [21] Rachide Abdessamade, ''*Modélisation et simulation des machines électriques*''.
- [22] V. Pant, G. K. Singh, S. N. Singh, ''*Modeling of a multi-phase induction machine under fault condition*,'' IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS'99., pp. 92–97, Hong Kong, July 1999.
- [23] Z. Oudjebour, E. M. Berkouk, N. Sami, S. Belgasmi, S. Arezki, I. Messaif, ''*Indirect space vector control of a doubles tar induction machine*'' , fed by twofive-

levelsNPC VSI,” International Conférence on Electric Machine, ICEM’04, Poland,2004.

Webographie

https://theses.univ-batna.dz/index.php?option=com_docman&task

<https://sitelec.org/download.php?filename=cours/mas.pdf>

<https://ori.univ-lille1.fr/notice/view/univ-lille1-ori-125262>

https://Commande_à_structure_variable_d_une_mac.html

<https://fr.scribd.com/.../COMMANDE-DIRECTE-DU-COUPLE-DE-LA-MACH>

www.electrotechnique-fr.com/t738-gasdemasde

Résumé : Autre solution pour la vitesse variable à part les solutions classiques telles que les convertisseurs multi-niveaux, sont les machines multi-phasées et les machines asynchrones à rotor bobiné, sont les plus utilisées pour des raisons de fiabilité et de segmentation de puissance. Nous avons étudié des exemples courants, la machine asynchrone double étoile (MASDE) et la machine asynchrone à doublement alimenté (MADA). La machine asynchrone double étoile en mode moteur (MASDE) sans saturation, en mode génératrice Auto-Excité (GASDE) sans et avec saturation et la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement moteur (MADA). Les résultats des différentes simulations pour les deux machines sous MATLAB et sous SIMULINK ont été analysés, ce qui permettant d'arriver à conclusion d'une étude comparative entre les deux dispositifs.

Les mots clés : Machines multi-phasées - Machine asynchrone double étoile - Machine asynchrone double alimentation - Auto-amorçage - Modélisation - Simulation - Matlab/Simulink.

Abstract: Another solution for variable speed from the usual solutions such as multi-level converters, are the multi-phase machines and wound rotor induction motors are most commonly used for reasons of reliability and segmentation power. We studied for examples, the double star induction machine (MASDE) and doubly fed induction machine (MADA); we are particularly interested in a double star induction machine in motor mode (MASDE) without saturation, generator Auto-Excited (GASDE) with saturation and without it, and doubly fed induction machine in motor mode (MADA). In addition, we analyzed the results of simulation of two different machines running from MATLAB and SIMULINK, after that we concluded the comparative study between the two devices.

Keywords: multi-phase machines - double star asynchronous machine - doubly fed induction machine- Self- Excited - Modelling - Simulation - Matlab / Simulink.

الملخص: تعتبر الآلات متعددة الطور والآلات اللامتزامنة ذات اللفاف الدوار حل للسرعة المتغيرة بدلا من الحلول الكلاسيكية مثل المحولات الساكنة متعددة المستويات، وهي الأكثر شيوعا بسبب صلابتها وقدرتها على تجزئة الاستطاعة. قمنا بدراسة الأمثلة الأكثر شيوعا، الآلات اللامتزامنة مزدوجة النجم والآلات مضاعفة التغذية، وبشكل خاص قمنا بنمذجة و محاكاة كل من: الآلات مزدوجة النجم في وضع محرك بدون تشبع، و في وضع مولد ذاتي الحث بدون تشبع، بتشبع و الآلات اللامتزامنة مضاعفة التغذية في وضع محرك. كما قمنا بتحليل مختلف نتائج المحاكاة التي تعمل بالماتلاب والسيميلنك، حيث توصلنا من خلال هذه النتائج إلى المقارنة بين كل من الآلتين مزدوجة النجم و مضاعفة التغذية.

الكلمات المفتاحية : آلات متعددة المراحل، آلات لامتزامنة مزدوجة النجم، آلات لامتزامنة

مضاعفة التغذية، ذاتي الحث، نمذجة، محاكاة، ماتلاب/ سيميلنك.