

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Commande Electrique

Présenté par

LAID LATRECHE & BACHIR BASSOUS

Thème

Modélisation et simulation des machines électriques Triphasées à double étoile

Soutenu le 28/05/2017. Devant le jury composé de :

Mr. HALEM noura	Maitre de conférences	Président
Mr. ALLAL abderrahim	Maitre de conférences	Rapporteur
Mr. Allag mariem	Maitre de conférences	Examineur

Année Universitaire 2016/2017



Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord mon Dieu « الحمد لله رب العالمين ».

*Et pour leurs précieux conseils et suggestions, je voudrais exprimer ma gratitude à mon promoteur Mr **Allal Abderrahim**, pour son aide permanent et son encouragement qu'il m'a prodigué.*

Mes remerciements vont également à tous les Enseignants du Département de Génie Electrique et particulièrement Dr MESBAHI NATHIR.

Je tiens à remercier vivement messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce modeste travail.

Que tous mes amis, l'expression de ma profonde gratitude pour leur soutien moral dont ils ont fait preuve à mon égard.

Enfin, que tous ceux, qui de près ou de loin, ont participé à l'élaboration de ce travail trouvent ici l'expression de mes meilleurs remerciements.



Dedicaces

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de mon père, que dieu l'accueille dans son vaste paradis ;

A ma mère, pour sa tendresse, sa bienveillance, son encouragement pour ce qu'elle a fait depuis mon enfance jusqu'à ce jour ;

A mes chers frères et sœurs, tous par leurs noms ; Djabbari , Said Bachir , AbdLazziz et mes cousins Amara , Laid ;

A toute ma grande famille ;

A tous mes amis, surtout à : Oussama, Nasre, Lotfi , Brahim, Yacine, Abd elhak, et toute la promotion Commande Elcreiaque 2017 ;

A tous mes professeurs

A mon binôme Bachire que je remercie pour avoir partagé avec moi ces moments pour la réalisation de ce modeste travail et j'espère en garder de très bons souvenirs.

L.AID

Dedicaces

Consacrer mon humble ce premier, à mon père et à ma grand-mère Alkarimin et mon grand-père, qui a grandi à Hjarhama depuis le plus jeune âge à nos jours et à mes frères et sœurs: Yacine, Fatima, Imane, Amdjad, Wedjdan, Esra, et à mes tantes chaque nom, surtout ma tante plus jeune Nadyaet à mon frère Ahmed qui ont été élevés ensemble

et aussi ne pas oublier tous mes amis qui étaient favorables et aider à moi, surtout mon ami et compagnon Derby dans le parcours académique Laid bonjour est celui qui a partagé avec lui dans l'accomplissement de cette note dans la dernière consacrez à renouveler Ahdaia ont contribué à la relative ou à défaut d'autres succès Dieu.

Bachir

Liste des Symboles

MASDE : Machine Asynchrone Double Etoile.

n_{ph} : Nombres de phases

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

a_{s1}, b_{c1}, c_{s1} : Les indices correspondants aux trois phases du stator 1

a_{s2}, b_{c2}, c_{s2} : Les indices correspondants aux trois phases du stator 2

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

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

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

C_{em} : couple électromagnétique (N.m)

C_r : Le couple résistant.

d,q : Les axes directs et quadratiques du repère de Park.

θ_m, Ω_m : La position et la vitesse mécanique du rotor.

ω_r : La pulsation électrique rotorique.

ω_s : La pulsation électrique statorique.

ϕ_m : Le flux magnétisant

ϕ_r flux rotorique.

ϕ_{s1}, ϕ_{s2} flux statorique

L_{dq} : inductance cyclique d'intersaturation selon (d,q) (H)

L_{mr} : valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique(H)

L_{ms} : indice de modulation valeur maximale des coefficients d'inductance

L_{s1} : inductance propre d'une phase de l'étoile 1 (H)

L_{s2} : inductance propre d'une phase de l'étoile 2 (H)

i : Le courant

v : La tension

Liste des Figures

Chapitre I		
Fig. I-1	Modes de fonctionnement suivant le glissement	7
Fig. I-2	Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases	8
Fig. I-3	Exemple d'application d'une machine synchrone de 15 phases, [7]	9
Chapitre II		
Fig. II- 1	Représentation des enroulements statoriques et rotoriques de la MASDE	12
Fig. II- 2	Représentation des enroulements de la machine dans le repère (d;q)	16
Fig. II- 3	Représentation schématique du modèle de Park de la MASDE.	18
Fig. II- 4	Schéma bloc de la Machine asynchrone double étoile. Pour la 1 ^{ère}	24
Fig. II- 5	Tensions Statoriques V_{s1a} et V_{s2a}	25
Fig. II- 6	Courant Statoriques i_{s1a} (A)	25
Fig. II- 7	Courant statoriques i_{s2a} (A)	25
Fig. II- 8	Flux statoriques Φ_{is2a} (Wb)	26
Fig. II- 9	Flux statoriques Φ_{is1a} (Wb)	26
Fig. II- 10	Couple électromagnétique C_{em}	26
Fig. II- 11	Vitesse de rotation.	27
Fig. II- 12	Courant rotorique réel.	27
Fig. II- 13	Courant Statoriques i_{s1a} (A)	28
Fig. II- 14	Courant statoriques i_{s2a} (A)	28
Fig. II- 15	Flux statoriques Φ_{is1a} (Wb)	29
Fig. II- 16	Flux statoriques Φ_{is2a} (Wb)	29
Fig. II- 17	Couple électromagnétique C_{em}	29
Fig. II- 18	Vitesse de rotation. N(tr/min)	30
Fig. II- 19	Courant rotorique réel	30
Chapitre III		
Fig. III- 1	Schéma de principe de l'onduleur triphasé	31
Fig. III- 2	Alimentation de la MASDE par deux onduleurs de tension	33
Fig. III- 3	Tensions Statoriques 1 et 2 V_{s1a} , V_{s2a}	34
Fig. III- 4	Vitesse de rotation N (tr/min).	34
Fig. III- 5	Couple électromagnétique C_{em} (N.m)	34
Fig. III- 6	Courants statorique i_{s1a} (A)	35
Fig. III- 7	Courant statorique i_{s2a} (A)	35

Fig. III- 8	Courant rotorique i_{ra} (A)	35
Fig. III- 9	Flux statoriques 1 ϕ_{S1a} (Wb)	35
Fig. III- 10	Flux statoriques 2 ϕ_{S2a} (Wb)	36
Fig. III- 11	Flux rotorique ϕ_{ra} (Wb)	36
Chapitre IV		
Fig. IV -1	Principe de filtrage passif en MASDE	39
Fig. IV -2	Couple électromagnétique C_{em}	40
Fig. IV -3	Vitesse N(tr/min)	40
Fig. IV -4	Courant rotorique réel.	41
Fig. IV -5	Couple électromagnétique C_{em}	41
Fig. IV -6	Courant rotorique réel.	42
Fig. IV -7	Couple électromagnétique C_{em}	42
Fig. IV -8	Vitesse N(tr/min)	42
Fig. IV -9	Courant rotorique réel.	43

Liste de Tableau

Tableau.I.1 : machines dont le nombre de phases statoriques est un multiple de trois "type1"	5
Tableau.I.2 : machines dont le nombre de phases statoriques est un nombre impair "type2"	6

Sommaire

Remerciement	
Dédicaces	
Liste des Symboles	
Liste des Figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1

Chapitre I

Etat de l'art

I.1 Introduction.....	3
I.2 Histoire des Machines Electriques.....	3
I.3. Les caractéristiques des machines multi phasées.....	4
I.3.1 Les machine multi-phasées de type1.....	4
I.4. Principe de fonctionnement de la machine multi-phasées.....	7
I.5 Applications des Machines Multi phasées.....	8
I.6.Avantages des Machines Multi phasées.....	9
I.7 Inconvénients des machines multi phasées.....	10
I.8. Conclusion.....	10

Chapitre II

Modélisation et simulation de la MASDE

II-1 Introduction.....	11
II.2. Description du moteur asynchrone à double étoile.....	11
II.3. Hypothèses simplificatrices.....	12
II.4. Modèle triphasé de la MASDE sur les axes réels.....	12

II.4.1. Equations électriques.....	13
II.4.2. Equations magnétiques.....	14
II.4.3. Equations mécaniques.....	15
II.5. Modèle biphasé.....	16
II.6. Choix du référentiel.....	18
II.6.1. Référentiel lié au stator.....	18
II.6.2. Référentiel lié au rotor.....	18
II.6.3. Référentiel lié au champ tournant.....	18
II.7. Application de la transformation de Park.....	18
II.7.1. Equations des tensions.....	19
II.7.2. Equations des flux.....	20
II.8. Mise sous forme d'équation d'état.....	20
II.9. Simulation numérique.....	24
II.10. Résultats Simulation.....	25
II.11. Conclusion.....	30

Chapitre III

Alimentation MASDE par deux onduleurs de tensions

III.1 Introduction.....	31
III.2 Modélisation de l'onduleur à commande MLI.....	31
III. 3 Stratégie de commande.....	32
III.3.1 L'indice de modulation.....	32
II.3.2 Le coefficient de réglage en tension.....	33
II.4 Alimentation de la MASDE par deux Onduleurs de Tension	33
III.5 Résultats simulation.....	34
II.6 Conclusion.....	36

Chapitre IV

Systemes de Filtrages

IV.1 Introduction.....	37
IV.2. Qualité de l'Energie Electrique.....	37
IV.3. Définition des systemes de filtrages.....	38
IV.4. Rôle d'un systeme de filtrage.....	38
IV.5. Systemes de Filtrage des Harmoniques.....	38
IV.5.1. Filtrage Passif.....	38
IV.5.2. Filtrage Actif.....	39
IV.6. Alimentation avant filtrage.....	40
IV. 7 Alimentation après filtrage.....	41
IV.9. Conclusion.....	44
Conclusion générale.....	45
Paramètre de la MASDE	
Programme de simulation	
Bibliographies	
Résumé	

Introduction général

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, sa fiabilité, sa maintenance et de sa robustesse.

La croissance de la consommation d'énergie électrique et les applications électriques de forte puissance ont conduit à utiliser les machines multi-phases (dont le nombre de phases est supérieur à trois) pour segmenter la puissance. En plus de cet avantage, les machines multi phases présentent plusieurs autres avantages tel que la segmentation de puissance sans augmenter les courants par phase et la minimisation des pertes fer. A travers ces avantages, la machine multi phase est utilisée dans plusieurs applications surtout dans le domaine des fortes puissances, entre autre, dans la production éolienne d'énergie électrique .

L'une des machines les plus courantes de machines multi phases est la Machine Asynchrone à Double Etoile (MASDE) qui comprend deux bobinages statoriques triphasés fixes et un bobinage rotorique mobile. Les deux étoiles sont déphasées entre elles d'un angle électrique (par exemple $\alpha=\pi/6$) 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 de barres conductrices court circuits par un anneau conducteur à chaque extrémité.

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.

Nous avons fait la simulation de cette machine qui est commandée par deux onduleurs de tensions. Cependant, la machine asynchrone à double étoile présente un inconvénient majeur : la structure dynamique est fortement non linéaire surtout l'existence des oscillations du couple du à la non linéarité des tensions d'alimentation pour pallier ce problème mécanique qui peut engendrer des graves conséquences sur la dégradation de la production ou de la service entraînée. Nous avons fait un système de filtrage bien choisi améliorant la caractéristique mécanique.

Pour ce faire, ce travail est réparti en quatre chapitres suivants:

- ❖ Etat de l'art
- ❖ Modélisation et simulation de la MASDE
- ❖ Alimentation de la MASDE par deux onduleurs de tensions
- ❖ Systèmes de Filtrage

CHAPITRE I

Etat de l'art

2017/2016

I.1 Introduction

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

I.2 Historique des Machines Electriques

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 parallèle, 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 Hyade Clarke réalisation une machine dont la structure est inversée par rapport à celle de Paxi/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. en 1889 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. [6].

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 [1].

I.3. Les caractéristiques des machines multi phasées

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 [1].

On peut avoir plusieurs configurations possibles dans une machines à nombre de phases donné suivant le décalage angulaire α entre deux bobines adjacentes. C'est-à-dire le décalage entre les étoiles, pour pouvoir différencier entre les configurations possibles, on peut introduire un autre terme : le nombre de phases équivalent, il est défini comme suit [18]:

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

Par exemple : une machine double étoile six-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 étoiles sont décalées de $\frac{\pi}{3}$

I.3.1 Les machines multi-phasées de type 1

Dans ce type de machines le nombre de phases statoriques est un multiple de trois, on puisse les grouper en η étoile triphasées [1] :

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

Tableau (I.1) : machines dont le nombre de phases statoriques est un multiple de trois
 "type1" [3].

Nombre dephases (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 multi- phrasés de type2

Les machines multiples de type 2 dont le nombre de phases statoriques (nph) impaire

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

Pour le décalage angulaire α entre deux bobines adjacents, les phases sont décalées

$$\text{Régulièrement de } 2\alpha = \frac{2\pi}{nph} \text{ . Alors on a : } nph = nph_\alpha = \frac{\pi}{\alpha} \quad (I.4)$$

Tableau (I.2) : machines dont le nombre de phases statoriques est un nombre impair
 "type2" [3].

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 [5].

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans les deux stators (L'étoile 1 alimenté par des courants triphasés et l'étoile 2 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 [2] :

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

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 :

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

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

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

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

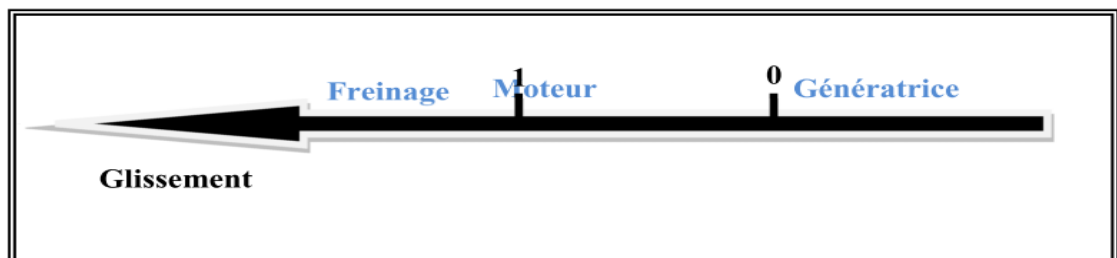


Figure (I.1) : Modes de fonctionnement suivant le glissement.

I.5 Applications des Machines Multi phases

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 Équation 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 [3].

- Une étoile de forte puissance à un grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent [4].
- Une étoile de faible puissance à un faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées [4].

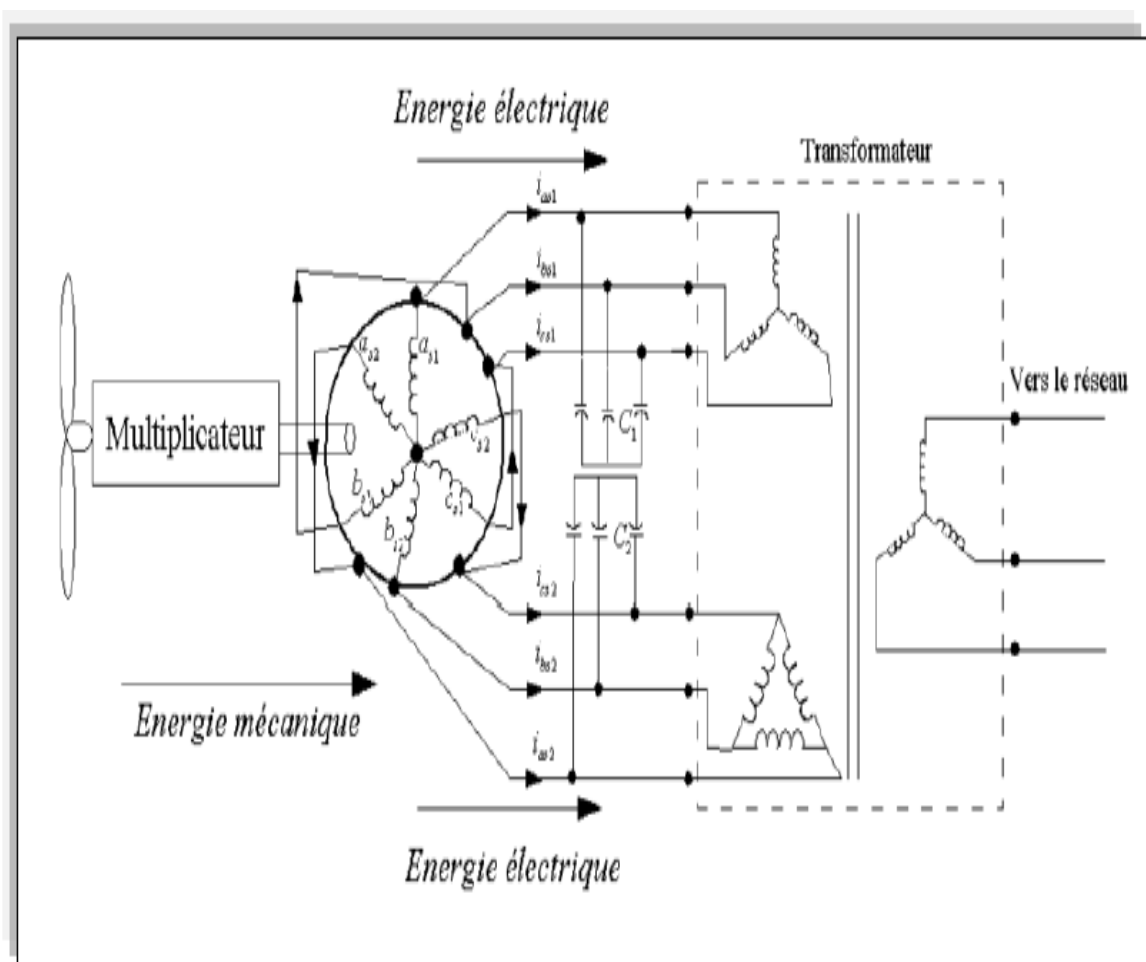


Figure (I.2) : Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases.

Les machines multi-phasées sont utilisées beaucoup plus dans les applications de puissances élevées, par exemple les alternateurs synchrones pour générer une puissance élevée par rapport aux alternateurs conventionnels. Parmi ces applications, on cite les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins des compresseurs, les moulins du ciment, etc. (Fig. 1.1).

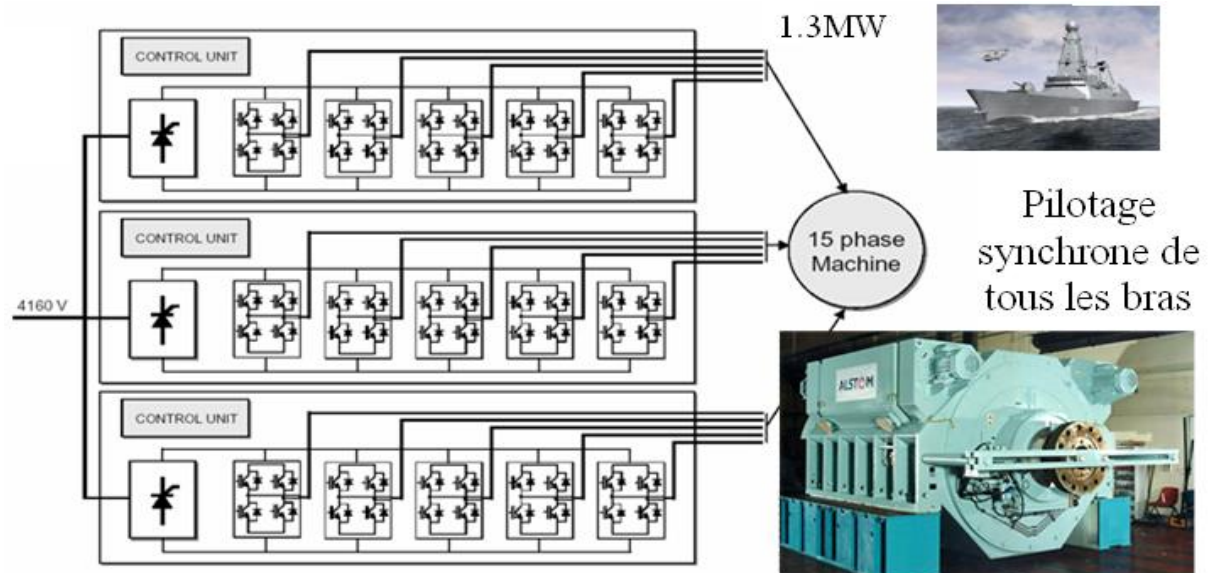


Figure (I.3) : Exemple d'application d'une machine synchrone de 15 phases, [7].

I.6. Avantages des Machines Multi phasées

Les machines multi-phasées 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 multi-phasées. En effet, les variateurs multi-phasés 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 multi phasées

Cependant, la machine asynchrone présente des inconvénients tels que[4] :

- ❖ 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).

CHAPITRE II

Modélisation et simulation de la MASDE

2017/2016

II-1 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 seront présentés.

II.2. Description du moteur asynchrone à double étoile

Le moteur asynchrone triphasé à double étoile 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 dans l'espace. Ils sont logés dans des encoches du circuit magnétique [1].

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 paires 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 onéreuses, robustes, faciles 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 manifestent par l'élaboration d'un couple de forces électromagnétiques sur le rotor tel que l'écart des vitesses soit réduit [18].

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

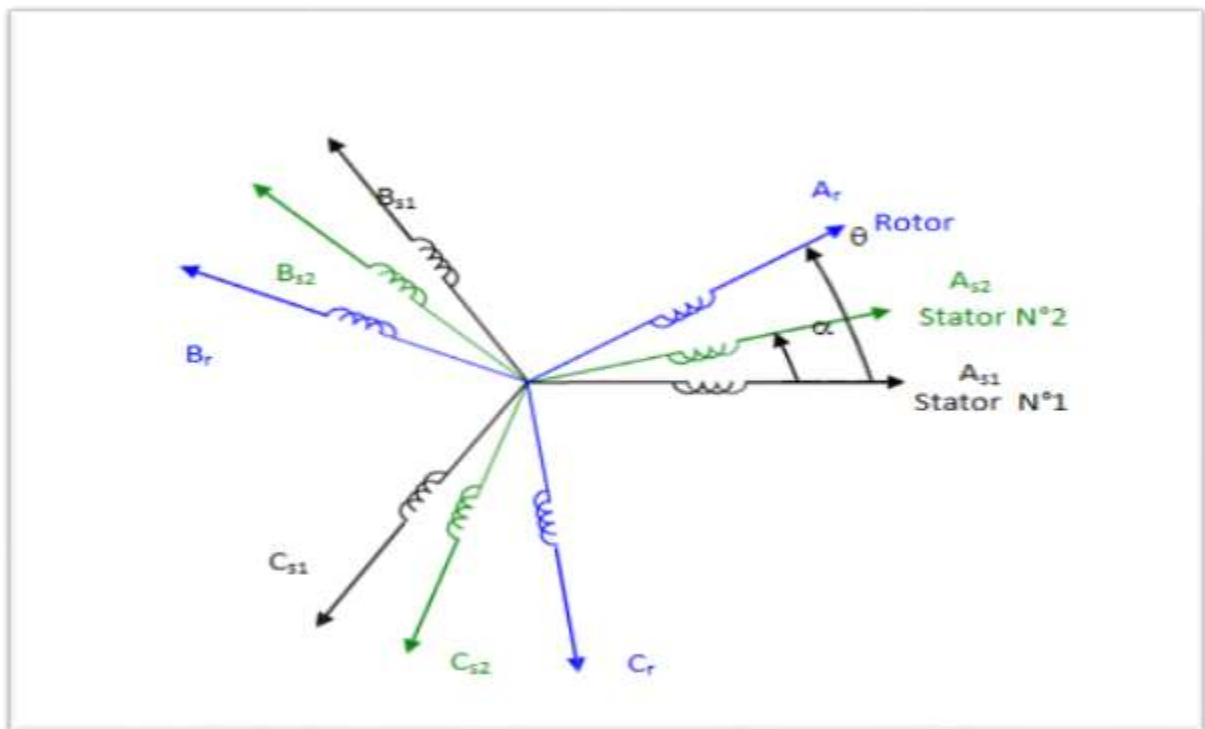
II.3. Hypothèses simplificatrices

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 [2]:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- Nous admettons de plus que la f.é.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 [9], [8].
- L'inductance de fuit mutuelle commune aux deux circuits (étoile 1 et 2) 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 [18]. .

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 [1].

Pour étoile 1 :

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

Pour étoile 2 :

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

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 :

$$\text{Pour étoile 1: } [V_{abc,s1}] = [R_{s1}][I_{abc,s1}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc,s1}]$$

$$\text{Pour étoile 2 : } [V_{abc,s2}] = [R_{s2}][I_{abc,s2}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc,s2}]$$

$$\text{Pour le rotor: } [V_{abc,r}] = [R_r][I_{abc,r}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc,r}]$$

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

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

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

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

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

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

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

, $[\Phi_{abc,s2}]$, $[\Phi_{abc,r}]$: Matrices des flux statoriques de l'étoile 1,2 et des flux $[\Phi_{abc,s1}]$ 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 [11], [10]:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$L_{as1} = L_{bs1} = L_{cs1} = L_{s1}$: 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).

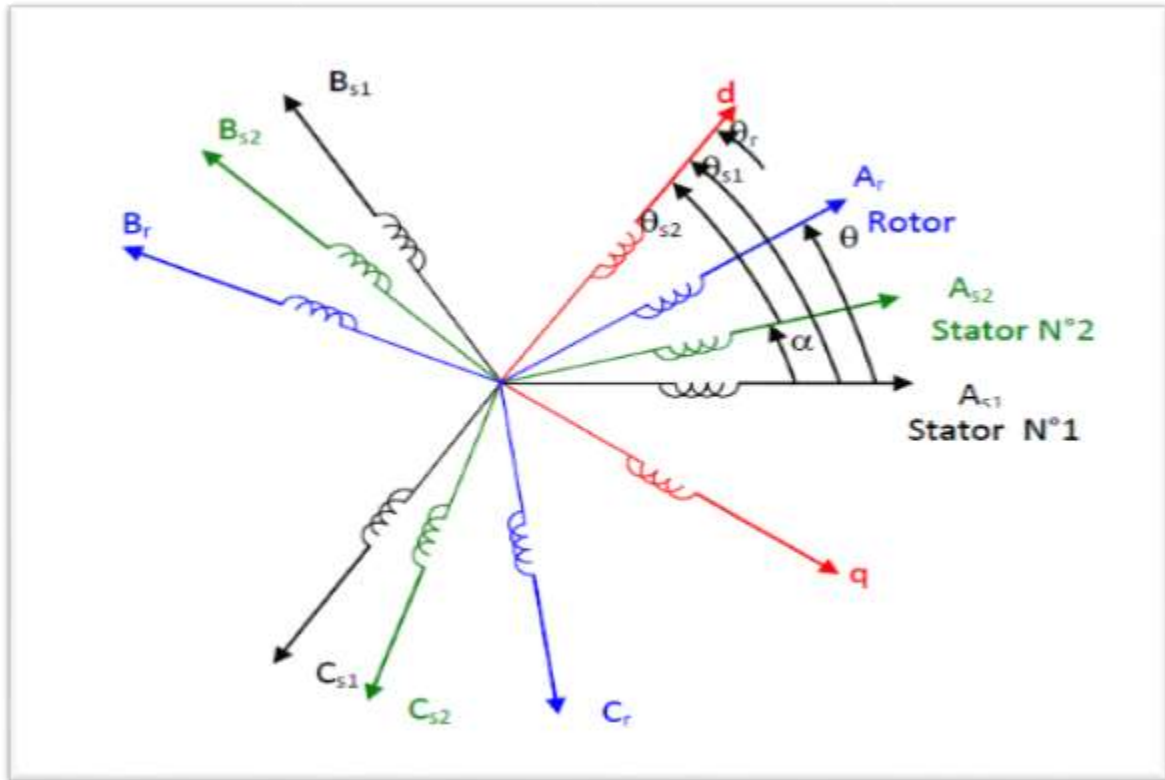
k_f : Coefficient de frottement.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par:

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

II.5. Modèle biphasé

Transformation de Park 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 [12] , [13].



Figure(II.2) : Représentation des enroulements de la machine dans le repère (d,q) [18].

La matrice de Park en générale:

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

La matrice de Park pour l'étoile 1 :

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

La matrice de Park pour l'étoile 2 :

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

La matrice de Park pour le rotor :

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

La matrice inverse de Park :

$$[G_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} [G_{dqo}]$$

Sachant que

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^t$$

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

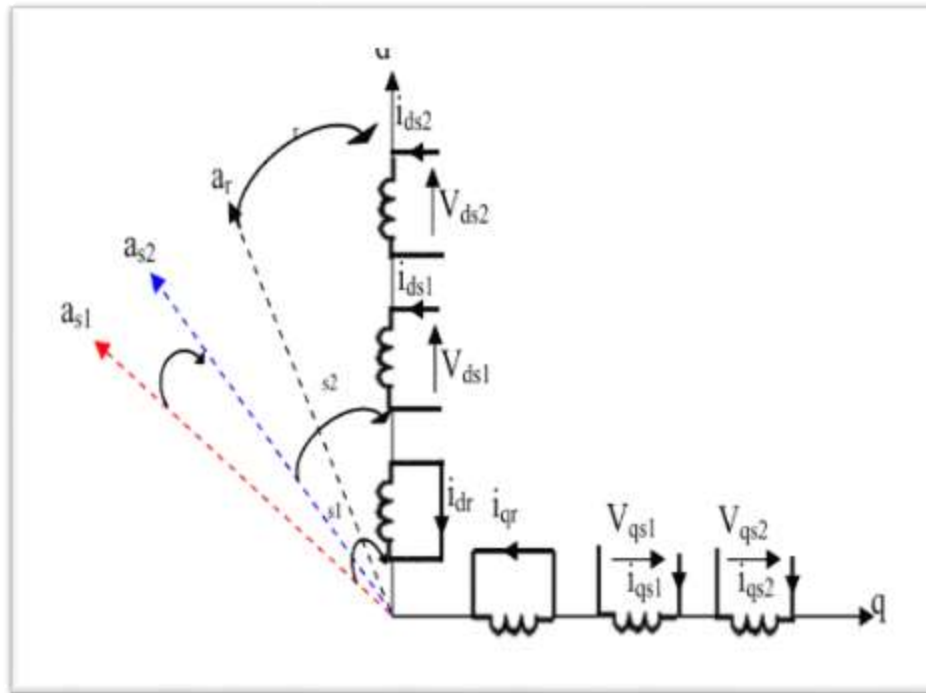


Figure (II.3) : Représentation schématique du modèle de Park de la MASDE [18].

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, $\theta_{s1} = 0$ et $\omega_s = 0$, dans ce cas les phases et 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 :

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

Pour le stator 2 :

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

Pour le rotor : Le rotor étant en court-circuit $v_{ar} = 0v_{br} = 0v_{cr} = 0$

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

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

Sous forme d'équation :

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

II.7.2. Equations des flux

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

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

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

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

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

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

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 :

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

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

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

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

- ❖ Le premier terme est identifiable aux pertes joules
- ❖ le deuxième 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 :

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

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

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 :

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

Le couple électromagnétique peut être déduit à partir du flux rotorique

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

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

En introduisant i_{dr} et i_{qr} dans l'expression (II.16), on obtient [12] :

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

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

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

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

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

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) :

$$\begin{cases} (L_{s1} + L_m) \frac{di_{ds1}}{dt} + L_m \frac{di_{ds2}}{dt} + L_m \frac{di_{dr}}{dt} = V_{ds1} - R_{s1}i_{ds1} + \omega_s [(L_{s1} + L_m)i_{qs1} + L_m i_{qs2} + L_m i_{qr}] \\ (L_{s1} + L_m) \frac{di_{qs1}}{dt} + L_m \frac{di_{qs2}}{dt} + L_m \frac{di_{qr}}{dt} = V_{qs1} - R_{s1}i_{qs1} - \omega_s [(L_{s1} + L_m)i_{ds1} + L_m i_{ds2} + L_m i_{dr}] \\ L_m \frac{di_{ds1}}{dt} + (L_{s2} + L_m) \frac{di_{ds2}}{dt} + L_m \frac{di_{dr}}{dt} = V_{ds2} - R_{s2}i_{ds2} + \omega_s [L_m i_{qs1} + (L_{s2} + L_m)i_{qs2} + L_m i_{qr}] \\ L_m \frac{di_{qs1}}{dt} + (L_{s2} + L_m) \frac{di_{qs2}}{dt} + L_m \frac{di_{qr}}{dt} = V_{qs2} - R_{s1}i_{qs2} - \omega_s [L_m i_{ds1} + (L_{s2} + L_m)i_{ds2} + L_m i_{dr}] \\ L_m \frac{di_{qs1}}{dt} + L_m \frac{di_{qs2}}{dt} + (L_r + L_m) \frac{di_{qr}}{dt} = V_{qs2} - R_{s1}i_{qs2} - \omega_s [L_m i_{qs1} + L_m i_{qs2} + (L_r + L_m)i_{qr}] \\ L_m \frac{di_{qs1}}{dt} + L_m \frac{di_{qs2}}{dt} + (L_r + L_m) \frac{di_{qr}}{dt} = V_{qs2} - R_{s1}i_{qs2} - \omega_s [L_m i_{ds1} + L_m i_{ds2} + (L_r + L_m)i_{dr}] \end{cases}$$

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

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

$$[A] = [L]^{-1}([R] + \omega_s[M_1] + \omega_{gl}[M_2])$$

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

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

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

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

II.9. Simulation numérique

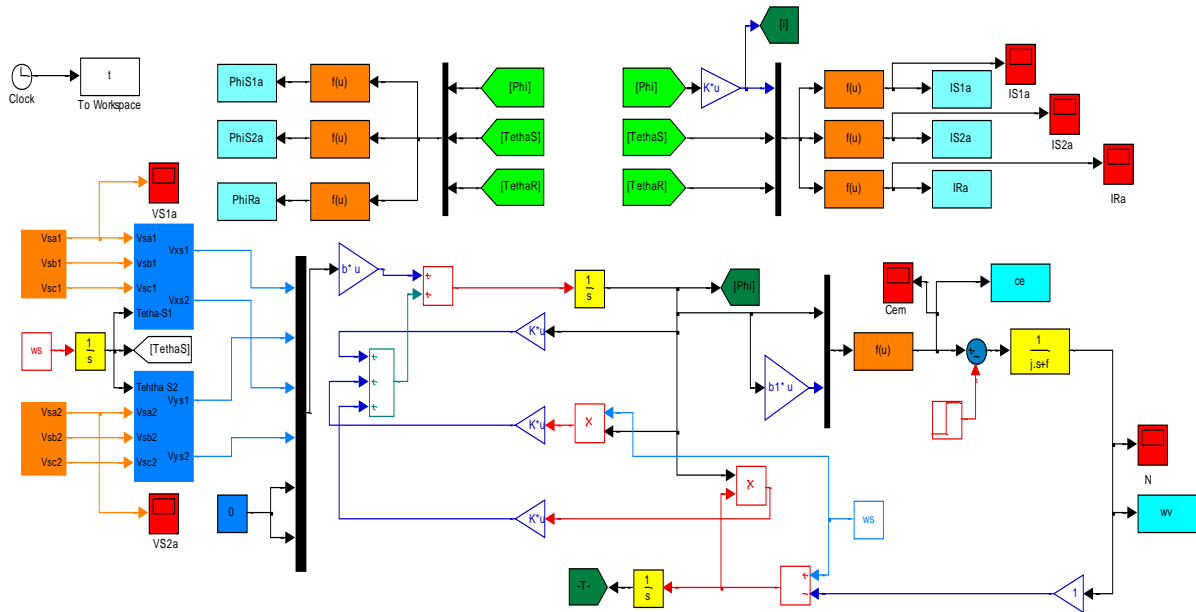


Figure (II.4) : Schéma bloc de la Machine asynchrone double étoile.

Pour la 1^{ère} étoile:

$$\begin{cases} V_{as1} = V_m \cdot \sin \omega_s t \\ V_{bs1} = V_m \cdot \sin \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ V_{cs1} = V_m \cdot \sin \left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases}$$

Pour la 2^{ème} étoile :

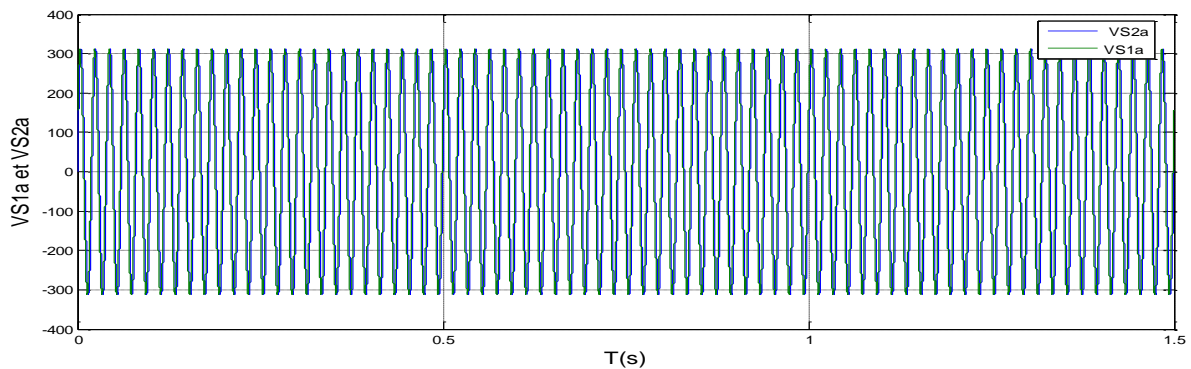
$$\begin{cases} V_{as2} = V_m \cdot \sin(\omega_s t - \alpha) \\ V_{bs2} = V_m \cdot \sin \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} - \alpha \right) \\ V_{cs2} = V_m \cdot \sin \left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} - \alpha \right) \end{cases}$$

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

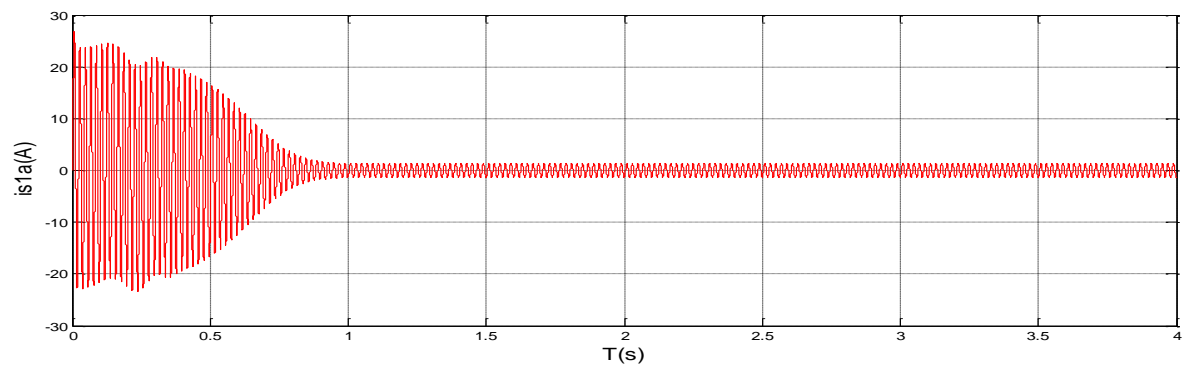
II.10. Résultat de Simulation

❖ Fonctionnement à vide

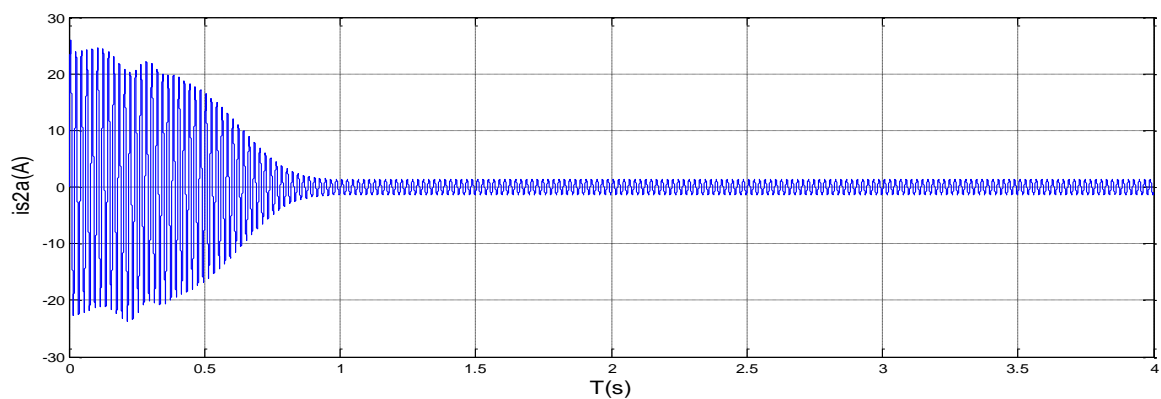
Performances de la conduite de la machine asynchrone triphasée à double stator lors d'un démarrage à vide.



Figure(II.5):Tensions Statoriques V_{S1a} et V_{S2a}

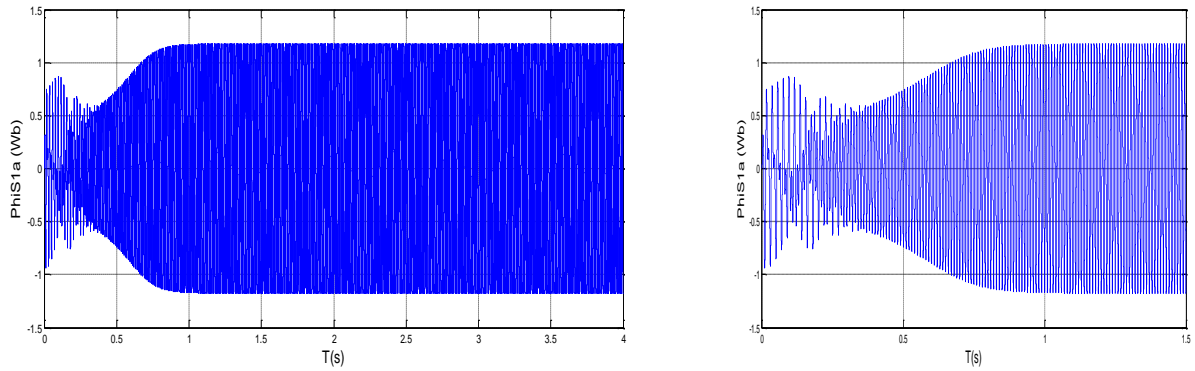


Figure(II.6):Courant Statoriques i_{s1a} (A)

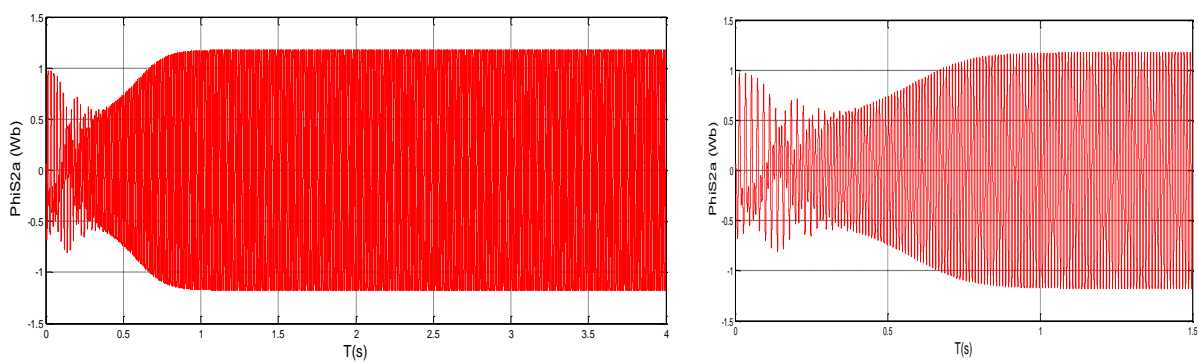


Figure(II.7):Courant statoriques i_{s2a} (A)

Commentaire Figure(II.7): Suspension du courant dans un système permanent stable

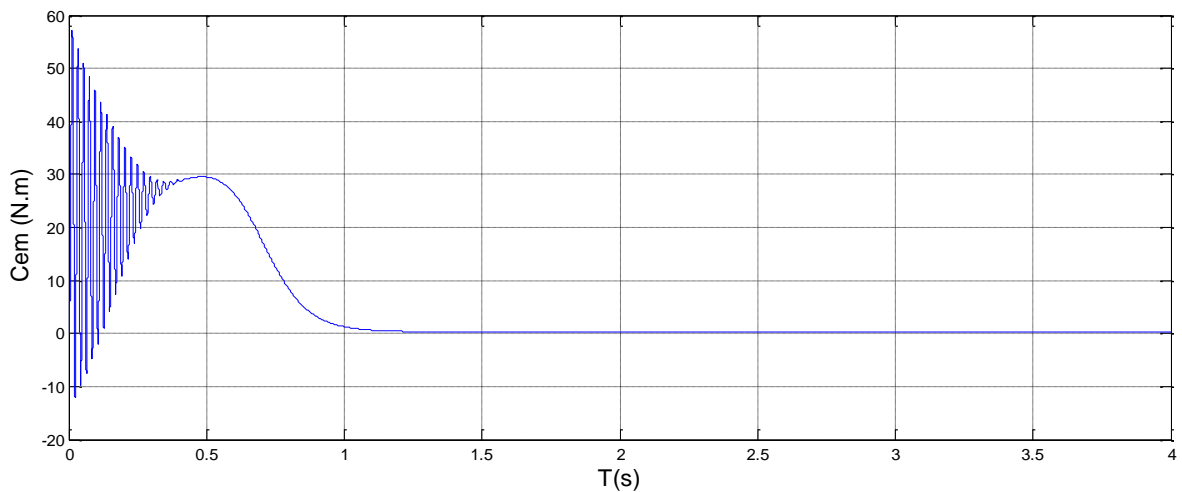


Figure(II.8):Flux statoriques Φ_{S2a} (Wb)



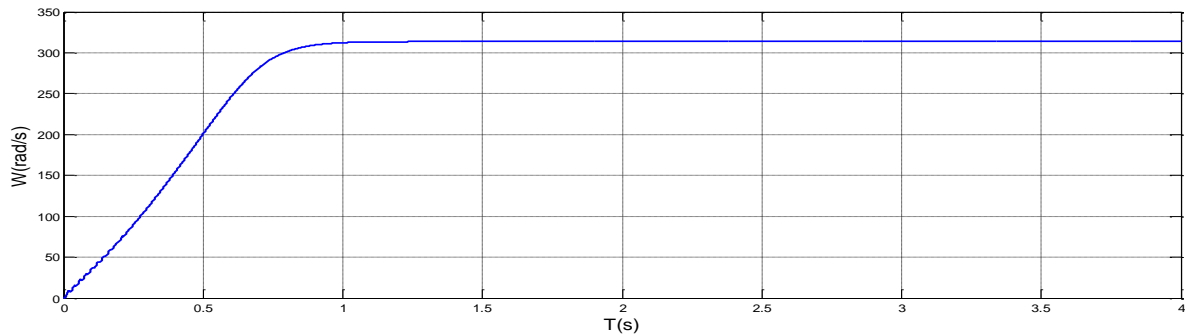
Figure(II.9):Flux statoriques Φ_{S1a} (Wb)

commentaire Figure(II.9): Suspension du Flux statoriques dans un système permanent stable



Figure(II.10):Couple électromagnétique C_{em}

Commentaire Figure(II.10):: Nous notons une augmentation de la première phase 50 N.m et Observer le silence dans une deuxième phase



Figure(II.11): Vitesse de rotation.

commentaire Figure(II.11): nous notons à Vitesse de rotation Augmentation de la première phase de stabilité et dans la deuxième étape 300 rad/s

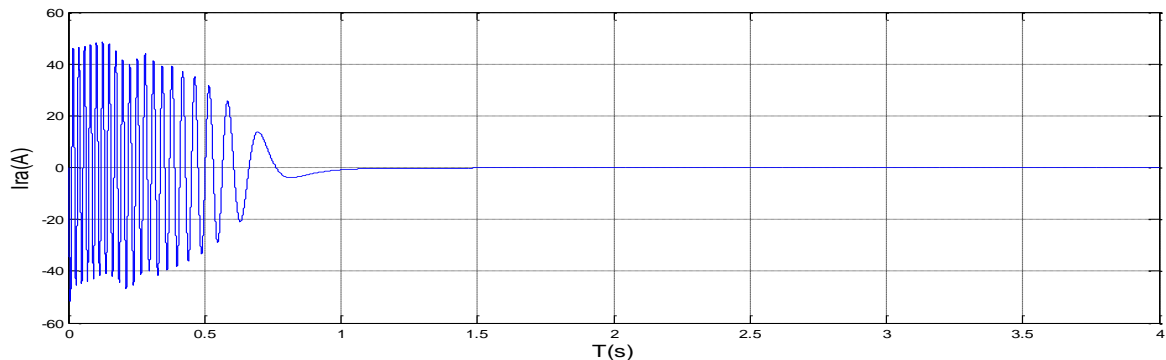


Figure (II.12): Courant rotorique réel.

Au démarrage et pendant le régime transitoire, la vitesse figure (II.11) 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.10), au début atteint sa valeur maximale de 57.5 N.m et présente des oscillations qui disparaissent au bout de 0.51s où il rejoint 29.75 N.m, puis il diminue d'une façon presque linéaire et se stabilise à $t = 2s$ sa valeur minimale de 0.313 N.m, qui est due aux frottements. L'évolution des flux statoriques figure (II.8) 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.6/7) suivant les axes direct et en quadrature, évoluent d'une façon à peu près analogue à l'évolution de la vitesse.

On remarque de faibles oscillations au niveau de ces derniers durant approximativement 0.4s.

Les courants statoriques (étoiles 1 et 2) figure (II.6/7) présentent des dépassements excessifs induisant de forts appels 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 varier 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 $C_r=15 \text{ N.m}$ à l'instant $t=3\text{s}$.

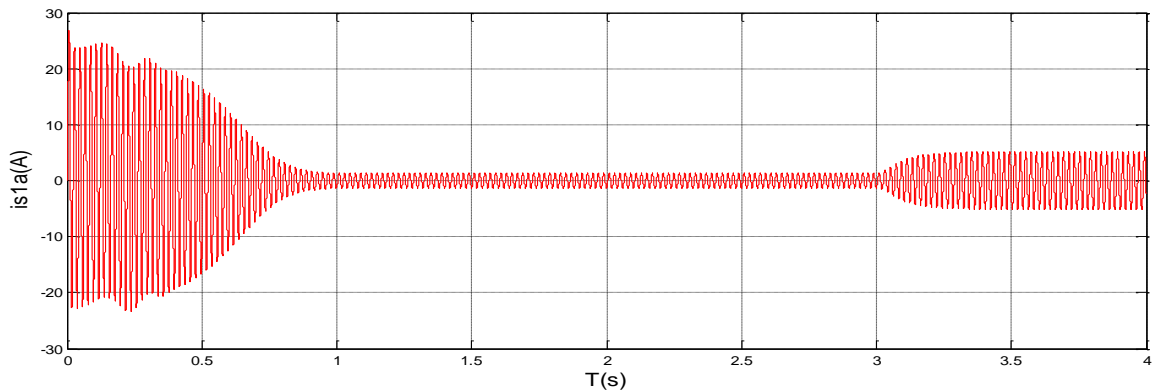


Figure (II.13): Courant Statoriques i_{s1a} (A)

commentaire Figure (II.13): Nous notons à l'augmentation actuelle de la première étape de la stabilité et dans la deuxième étape et au moment $T=3\text{s}$ augmenter 5A

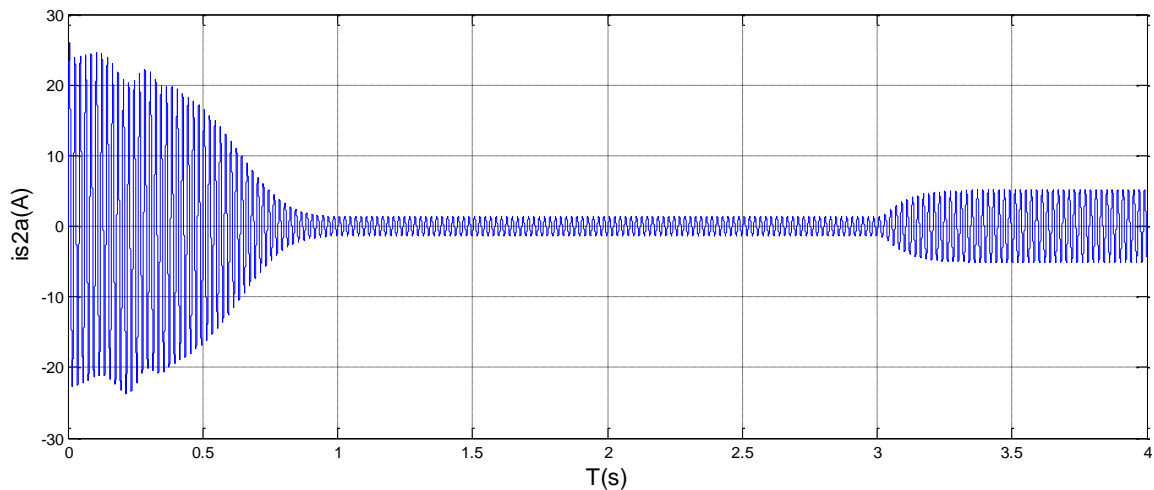


Figure (II.14): Courant statoriques i_{s2a} (A)

Commentaire Figure (II.14) : le même commentaire: Figure (II.13): Courant Statoriques

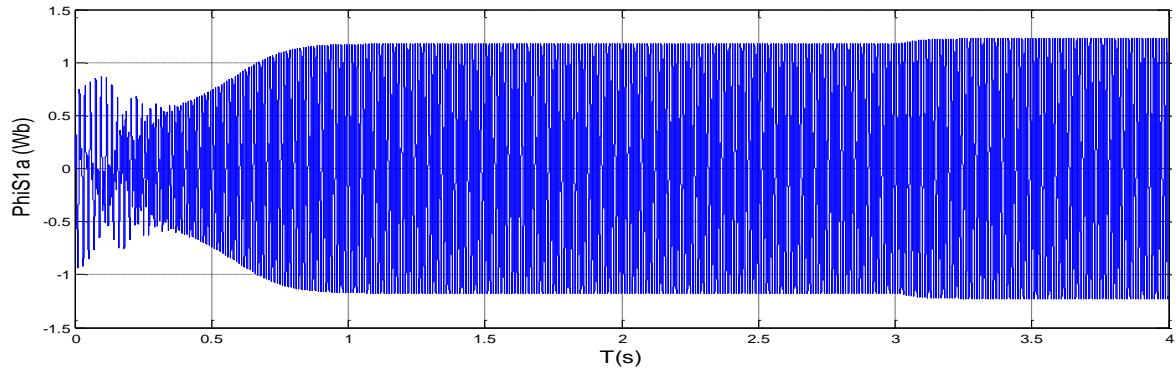


Figure (II.15): Flux statoriques Φ_{S1a} (Wb)

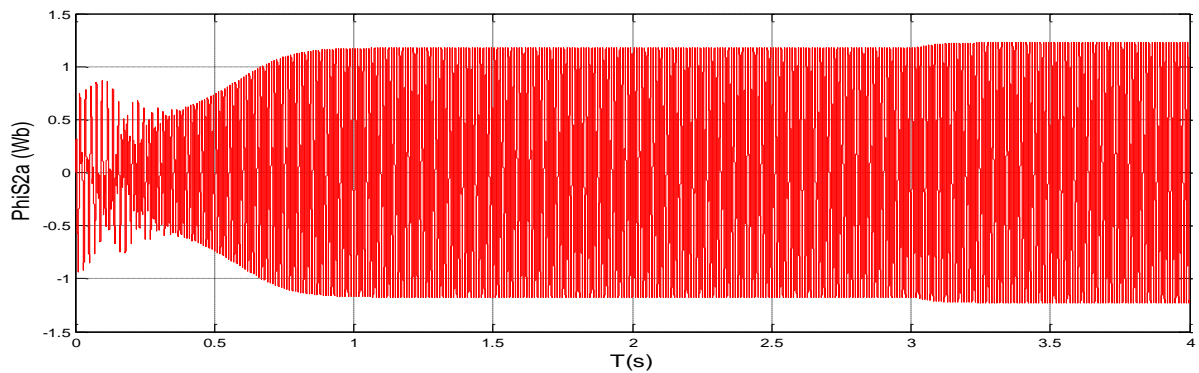


Figure (II.16): Flux statoriques Φ_{S2a} (Wb)

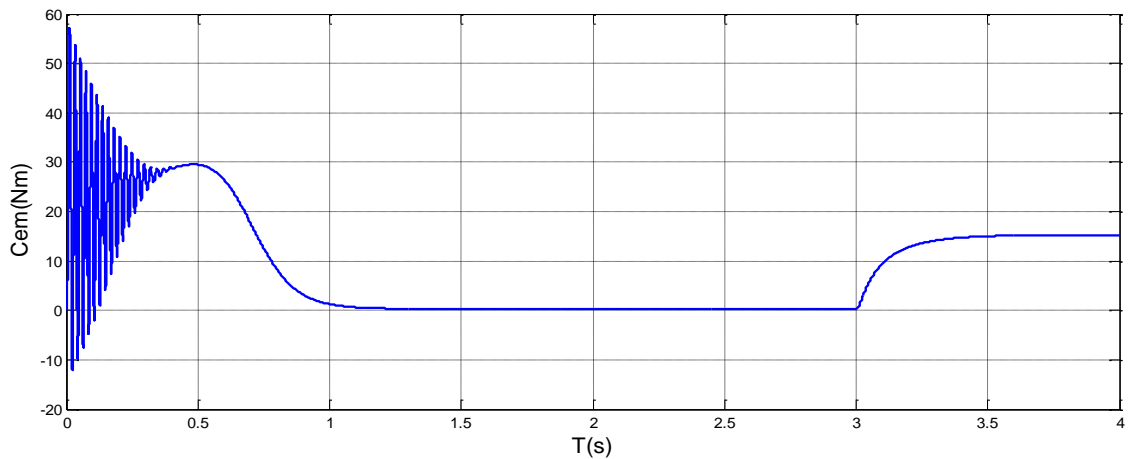


Figure (II.17): Couple électromagnétique C_{em}

Commentaire Figure (II.17): Notez les vibrations dans la première étape et s'installe au moment $T=3$ augmenter $C_{em}=15$ N.m

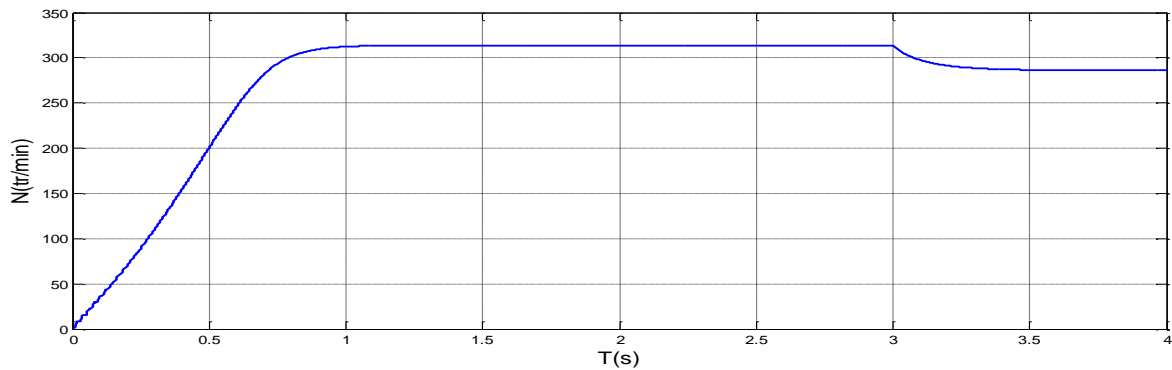


Figure (II.18): Vitesse de rotation. N (tr/min)

Commentaire Figure (II.18) : le même commentaire Figure(II.11) mais $T=3$ s Il y a une diminution

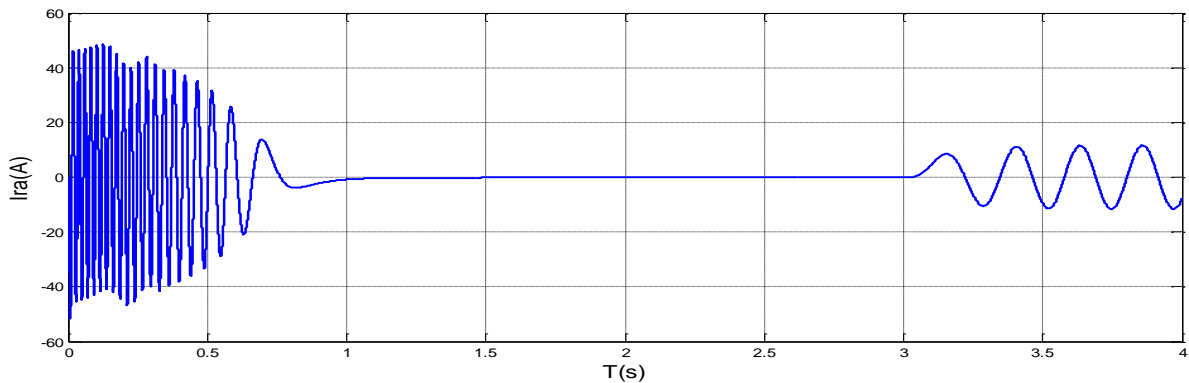


Figure (II.19): Courant rotorique réel

Même commentaire pour les figures ci-dessus que celles de fonctionnement a vide seulement pendant l'application de la charge $C_n = 15 \text{ Nm}$ à 3 secondes, nous notons à ce moment courant statoriques 5A et Flux statoriques 1.2 Wb, Couple électromagnétique 15 N.m remarque se tortiller courant rotorique réel valeur maximal 10A

Nous notons également une diminution de la vitesse au moment La vitesse de rotation valeur minimal 295 rd/s

II.11. 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.

CHAPITRE III

*Alimentation MASDE par deux onduleurs
de tensions*

2017/2016

III.1 Introduction

Les développements dans le domaine de l'électronique de puissance, soit au niveau des éléments semi-conducteurs, soit au niveau des convertisseurs statiques, permettent la réalisation d'organes de commande avec des puissances de sortie élevées et facilement commandables. [14]

III.2 Modélisation de l'onduleur à commande MLI

Les onduleurs deviennent de plus en plus importants dans le domaine de l'électronique de puissance. Les entraînements électriques à vitesse variable font également de plus en plus appel aux onduleurs.

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation pour les puissances élevées, on utilise les transistors ou les thyristors GTO surtout dans le domaine des entraînements électriques à vitesse variable.

Pour alimenter la MASDE, on utilise deux onduleurs triphasés symétriques (Fig. II.1). Pour modéliser l'onduleur, on doit distinguer d'une part les tensions de branches v_{10} , v_{20} et v_{30} mesurées par rapport à la borne (-) de la tension continue E , la tension d'entrée de l'onduleur. D'autre part, il y a les tensions de phases v_a , v_b et v_c mesurées par rapport au neutre N . Ces dernières sont formées par une charge triphasée symétrique, (les enroulements statoriques étoile 1 de la MASDE par exemple). [14]

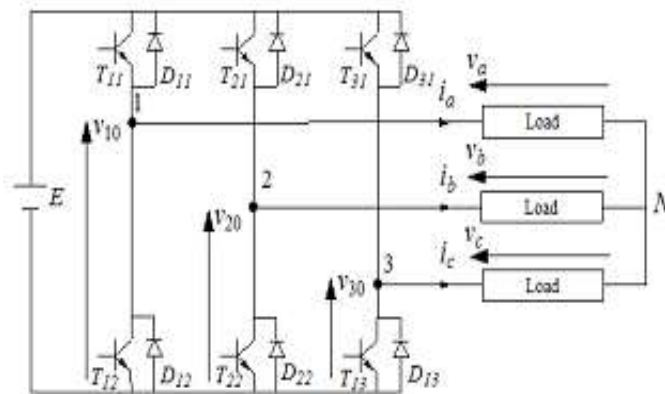


Figure (III.1): Schéma de principe de l'onduleur triphasé

Chaque interrupteur (transistor + diode) (Fig. II.1) ($K_{ij}i = 1, 2$ ou 3 $j = 1$ ou 2) suppose idéalise. On peut établir les relations

$$v_{10} - v_a + v_b - v_{20} = 0 \quad (\text{III.1})$$

$$v_{10} - v_a + v_c - v_{30} = 0$$

En additionnant ces équations, on obtient

$$2v_{10} - 2v_a + v_b - v_{20} \quad (\text{III.2})$$

Dans une charge triphasée symétrique avec le point neutre la somme des courants i_a, i_b et i_c doit être nulle. Même chose pour les tensions des phases. Il existe donc la condition $v_a + v_b + v_c = 0$.

Dans (II.2), on peut remplacer $v_b + v_c$ par $-v_a$ et on tire

$$\begin{aligned} v_a &= \frac{1}{3}(2v_{10} - v_{20} - v_{30}) \\ v_b &= \frac{1}{3}(-v_{10} + 2v_{20} - v_{30}) \\ v_c &= \frac{1}{3}(-v_{10} - v_{20} + 2v_{30}) \end{aligned} \quad (\text{III.3})$$

Selon la fermeture ou l'ouverture des interrupteurs K_{ij} les tensions de branche v_{j0} peuvent être égales à E ou à 0 . On introduit d'autres variables $f_{11}, f_{21},$ et f_{31} qui prennent 1 (fermée) ou 0 (bloquée) pour les interrupteur K_{i1} respectivement. L'équation (II.4) peut être réécrite comme suit [16]:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

III. 3 Stratégie de commande

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs on fait appel à la technique MLI (modulation de largeur d'impulsion) qui consiste à calculer les intersections d'une tension de référence sinusoïdale et d'une tension de modulation triangulaire.

Les six signaux des références pour les deux onduleurs sont données par les équations suivantes [15] :

$$\begin{aligned} V_{ks1ref} &= V \sin[2\pi ft - 2(j-1)\pi/3] && \text{Pour l'onduleur 1} \\ V_{ks2ref} &= V \sin[2\pi ft - 2(j-1)\pi/3 - \alpha] && \text{Pour l'onduleur 2} \end{aligned} \quad (\text{III.5})$$

avec: $k = a, b$ ou $c, j = 1, 2$ ou 3 .

L'équation de la porteuse triangulaire est exprimée par

$$V_p = \begin{cases} V_{pm} \left[4 \frac{t}{T_p} - 1 \right] & \text{si} & 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ V_{pm} \left[-4 \frac{t}{T_p} + 3 \right] & \text{si} & \frac{T_p}{2} < t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

La commande MLI de l'onduleur est caractérisée par les deux paramètres suivants

III.3.1 L'indice de modulation "m" est égale au rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de référence ($m = fp/f$)

II.3.2 Le coefficient de réglage en tension "r" est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation ($r = \frac{Vm}{Vpm}$)

La technique MLI est basée sur la comparaison des signaux de références avec la porteuse pour déterminer les instants des impulsions des bases des transistors selon l'algorithme suivant :

Pour l'onduleur N°1

Si $v_{as1ref} \geq v_p(t)$ $f_{11} = 1$ sinon $f_{11} = 0$

Si $v_{bs1ref} \geq v_p(t)$ $f_{21} = 1$ sinon $f_{21} = 0$ (III.7)

Si $v_{cs1ref} \geq v_p(t)$ $f_{31} = 1$ sinon $f_{31} = 0$

Pour l'onduleur N°2

Si $v_{as2ref} \geq v_p(t)$ $f_{12} = 1$ sinon $f_{12} = 0$

Si $v_{bs2ref} \geq v_p(t)$ $f_{22} = 1$ sinon $f_{22} = 0$ (III.8)

Si $v_{cs2ref} \geq v_p(t)$ $f_{32} = 1$ sinon $f_{32} = 0$

II.4 Alimentation de la MASDE par deux Onduleurs de Tension

La (Fig. III.2) représente l'association de la MASDE avec deux onduleurs de tension triphasés à commande MLI, les tensions de référence sont purement sinusoïdales. [15]

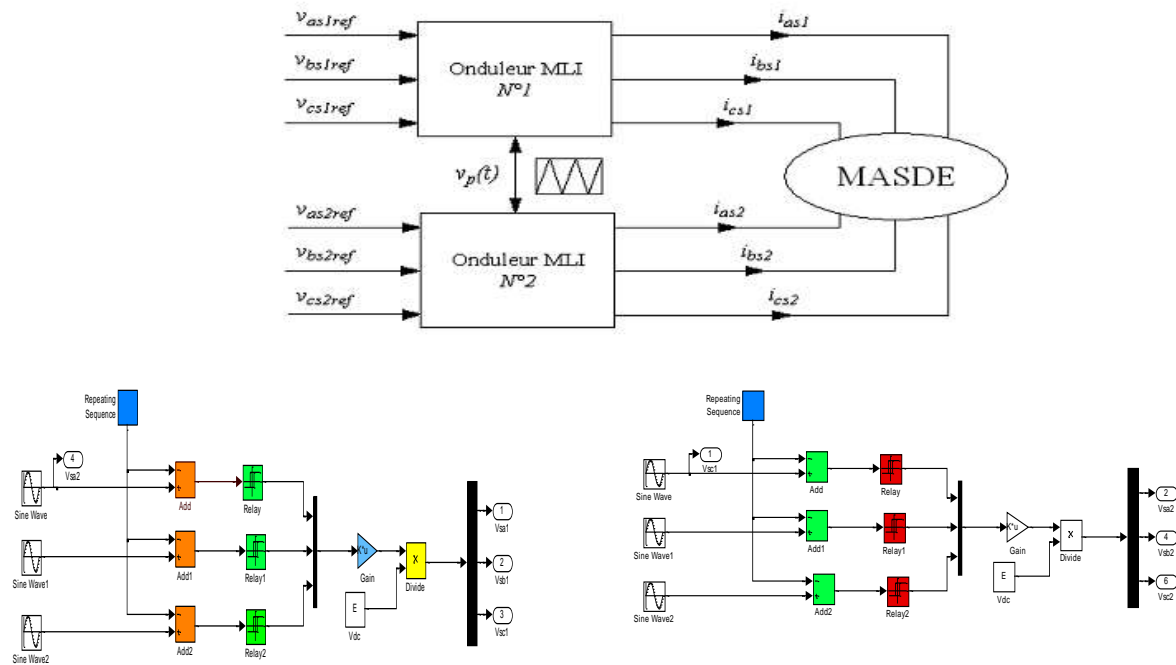


Figure (III.2): Alimentation de la MASDE par deux onduleurs de tension et bloc simulation MLI

III.5 Résultats simulation

La simulation est effectuée pour un décalage angulaire $\alpha = 30^\circ$. Les ci-dessous représente des caractéristiques de la MASDE alimentée par deux onduleurs de tension à commande M.L.I. sinus-triangle dont $V_r = 0.8$ et $m = 63$, suivi de l'application des charges $C_r = 15 \text{ N.m}$ entre les intervalles de temps $t = [3, 4] \text{ s}$

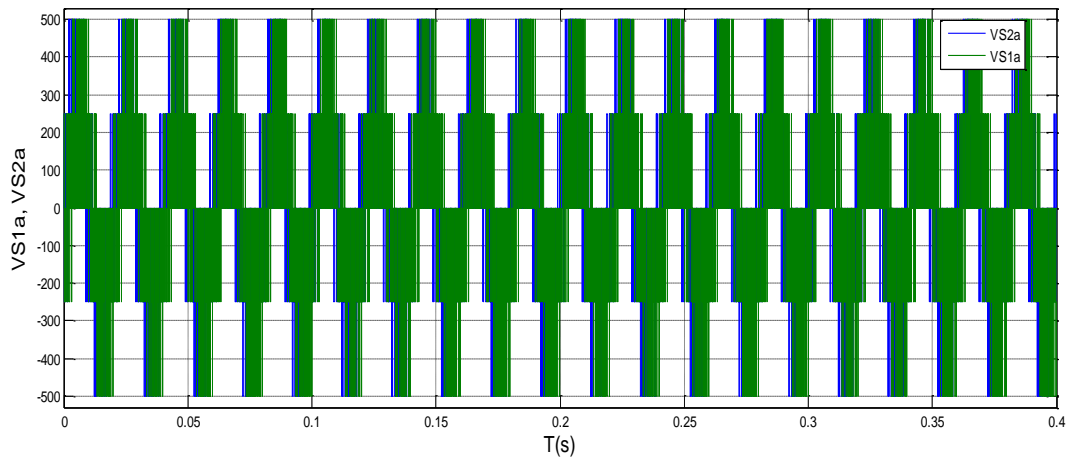


Figure (III.3): Tensions Statoriques 1 et 2 V_{S1a} , V_{S2a}

Commentaire Figure (III.3): Tensions Statoriques après avoir ajouté onglie Sous la forme

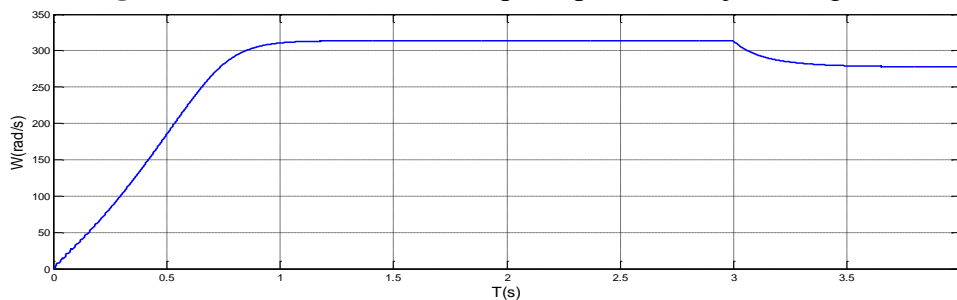


Figure (III.4): Vitesse de rotation N (tr/min).

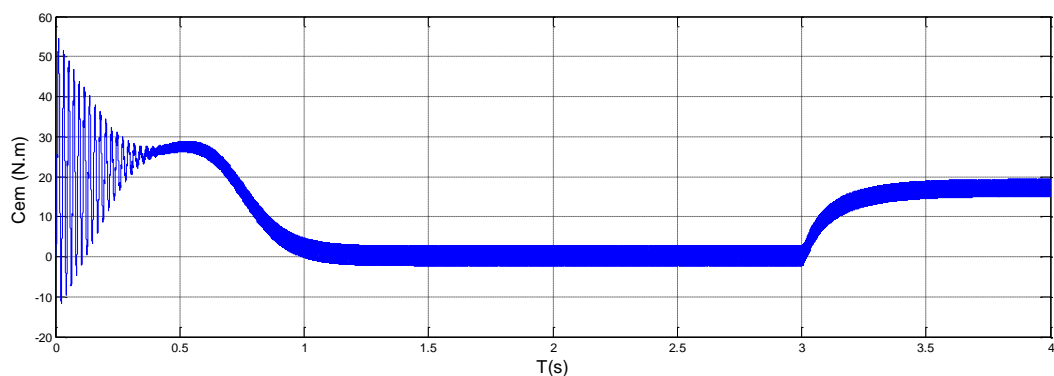


Figure (III.5): Couple électromagnétique C_{em} (N.m)

Commentaire Figure (III.5) : Notez les vibrations dans la première étape et s'installe au moment $T=3$ augmenter $C_{em}=15 \text{ N.m}$ mais l'existence de harmoniques.

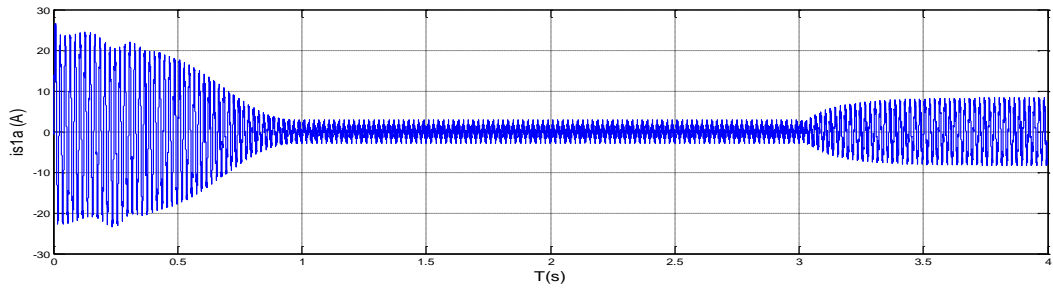


Figure (III.6): Le courants statorique i_{s1a} (A)

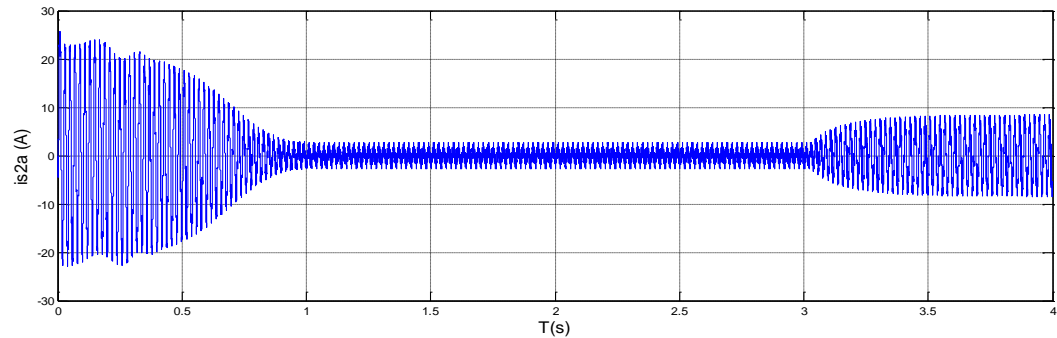


Figure (III.7): Courant statorique i_{s2a} (A)

commentaire Figure (III.6) (III.7): Nous notons à l'augmentation actuelle de la première étape de la stabilité et dans la deuxième étape et au moment $T=3s$ augmenter 5A mais l'existence de harmoniques.

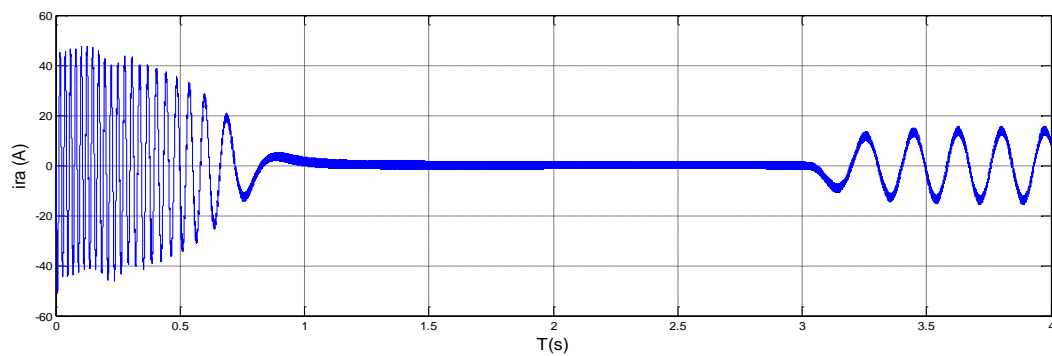


Figure (III.8): Courant rotorique i_{ra} (A)

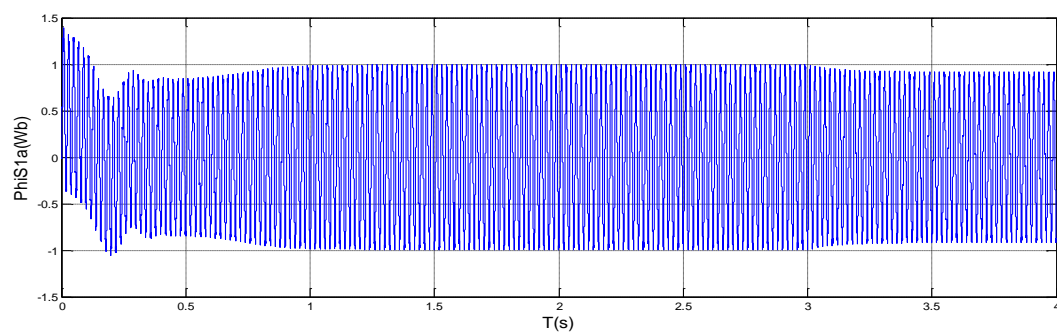


Figure (III.9): Le flux statoriques 1 ϕ_{s1a} (Wb)

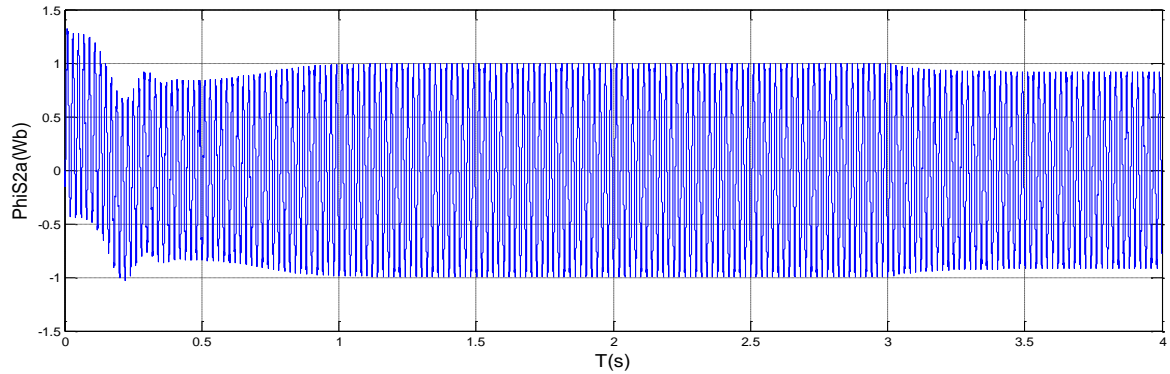


Figure (III.10): Flux statoriques $2 \phi_{s2a}$ (Wb)

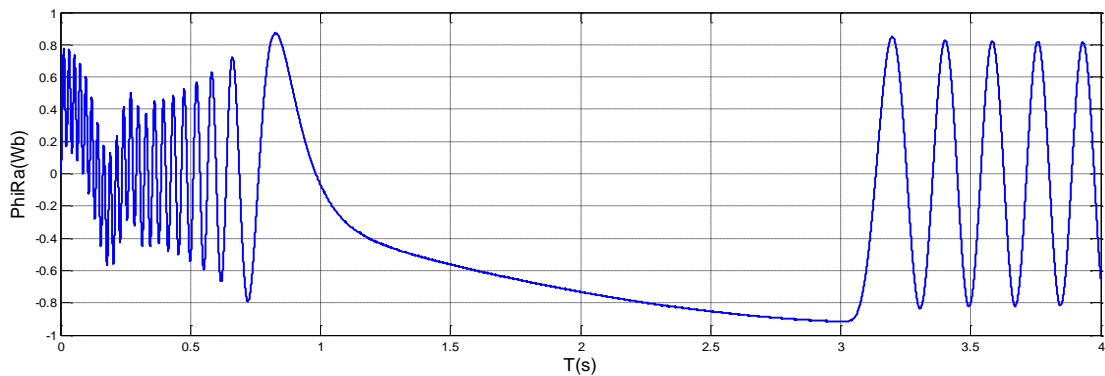


Figure (III.11): Flux rotorique ϕ_{ra} (Wb)

commentaire Figure (III.11): Notez l'incertitude dans la première étape et le calme de $T=1$ à $T=3$ après $T=3$ note une augmentation significative Flux rotorique .

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé la machine asynchrone double étoile en utilisant la transformation de Park, de même que la modélisation de l'alimentation présentée par deux onduleurs.

Les résultats de simulation numérique montrent la nécessité de régler la vitesse du rotor indépendamment de la charge appliquée

D'après les caractéristiques mécaniques de notre machine, nous avons remarqué une dégradation de cette dernière à cause de l'apparition des harmoniques liés à la commande des onduleurs. Pour cela nous essayons de surmonter ce problème par un système de filtrage qui sera le thème du chapitre suivant.

CHAPITRE IV

Systemes de Filtrage

2017/2016

IV.1 Introduction :

Les producteurs d'énergie électrique font de grands efforts afin de fournir aux clients une énergie de qualité dont laquelle l'onde électrique à une forme de tension sinusoïdale avec une amplitude et une fréquence préétablie, d'une manière permanente, même dans les circonstances qui empêchent d'assurer cet objectif. Ceci est dû, principalement, à la présence significative des équipements polluants de divers types et surtout les charges non linéaires basées sur les équipements d'électronique de puissance. Cependant, cet objectif semble idéal et n'est jamais facile à assurer, car le réseau électrique est appelé à fonctionner dans un environnement, de plus en plus, agressif. Afin d'éviter le dysfonctionnement, voire la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer, ou du moins les réduire [19]

Nous commencerons, ce chapitre, par un exposé des principales perturbations affectant la qualité de l'onde électrique, notamment, les harmoniques provoqués par les onduleurs alimentant notre machine asynchrone à double étoile pour palier les oscillations nocives du couple électromagnétique qui va nous permettre d'avoir des caractéristiques mécaniques lisses par exemples : pour une bonne qualité d'usinage d'une pièce quelconque . Nous présenterons, à titre informatif les différents filtres avec leur utilisation et de leurs avantages afin de neutraliser les harmoniques (en particulier le filtrage actif et dynamique pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques.) qui nuit au bon fonctionnement du système en question au point de vue rendement ou efficacité qui jouent un rôle économique sur le destin des entreprises qui sont les poumons des progrès des pays.

IV.2. Qualité de l'Energie Electrique

La qualité de l'énergie électrique est, étroitement, liée à la qualité de l'onde de tension. Cette dernière est caractérisée par une onde de forme parfaitement sinusoïdale ; absence de distorsions, de pics, de creux...etc. Des phases équilibrées et parfaitement symétriques en amplitude et en phase, ayant une valeur efficace dans les limites tolérées de fréquence stable. Ceci assure un facteur de puissance dans des limites tolérables.

La qualité d'énergie peut être affectée (dégradée) par la présence avec l'onde fondamentale que soit des signaux harmoniques, inter harmoniques ou infra harmoniques.

IV.3. Définition des systèmes de filtrages

Un système de filtrage est l'ensemble des composants et des techniques utilisés pour produire un système capable d'absorber, d'injecter, ou de court-circuiter des harmoniques existant dans un circuit ou dans un réseau électrique

IV.4. Rôle d'un système de filtrage

Un système de filtrage a pour objet l'amélioration de la qualité de l'énergie fournie par une source ou absorbée par une charge par l'amélioration du facteur de puissance « l'élimination des harmoniques perturbateurs ».

IV.5. Systèmes de Filtrage des Harmoniques

IV.5.1. Filtrage Passif

Le filtrage passif consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur fondamentale du réseau. Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonnant série est placé en parallèle sur le réseau. Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence Pour atténuer tout une bande de fréquences, un filtre passif amorti du second ordre est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs. Par cette technique, il est, en général, plus facile de rejeter les harmoniques de rangs élevés que celles de rangs faibles. Malgré sa large utilisation dans l'industrie, ce dispositif simple a tout de même certains inconvénients qui résident dans la nécessité de la connaissance approfondie de la configuration du réseau. De même, les variations de l'impédance des réseaux peuvent détériorer les performances du filtre. Ainsi, le réseau peut former un système résonant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance peuvent s'amplifier,...etc. [19]

C'est une solution classique pour l'amélioration de la qualité d'énergie qui repose sur le principe de piéger les harmoniques dans des éléments passifs (R, L, C) connectés, en dérivation au réseau, formant des impédances dont la fréquence de résonance est accordée celle de l'harmonique de courant que l'on veut atténuer ou éliminer. Ainsi, plusieurs filtres passifs, connectés en parallèle, peuvent être nécessaires pour filtrer plusieurs composantes à

(Fig. IV.1)

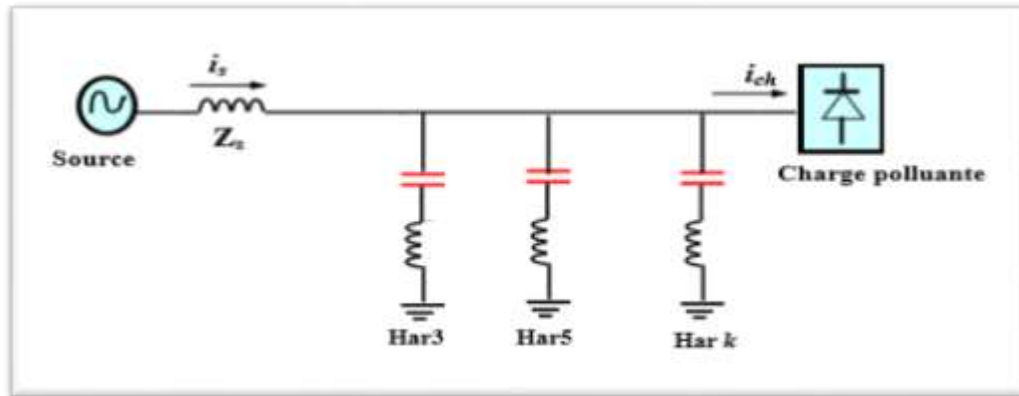


Figure (IV.1): Principe de filtrage passif en MASDE

IV.5.2. Filtrage Actif

Fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées. Les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles de dépollution ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage plus flexible, moderne et efficace appelée filtrage actif. Ce dernier est capable de s'adapter avec l'évolution de la charge. Ceci est rendu possible grâce à l'évolution de l'électronique de puissance, notamment en ce qui concerne les semi-conducteurs de puissance, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et des installations électriques.

IV.6. Alimentation avant filtrage

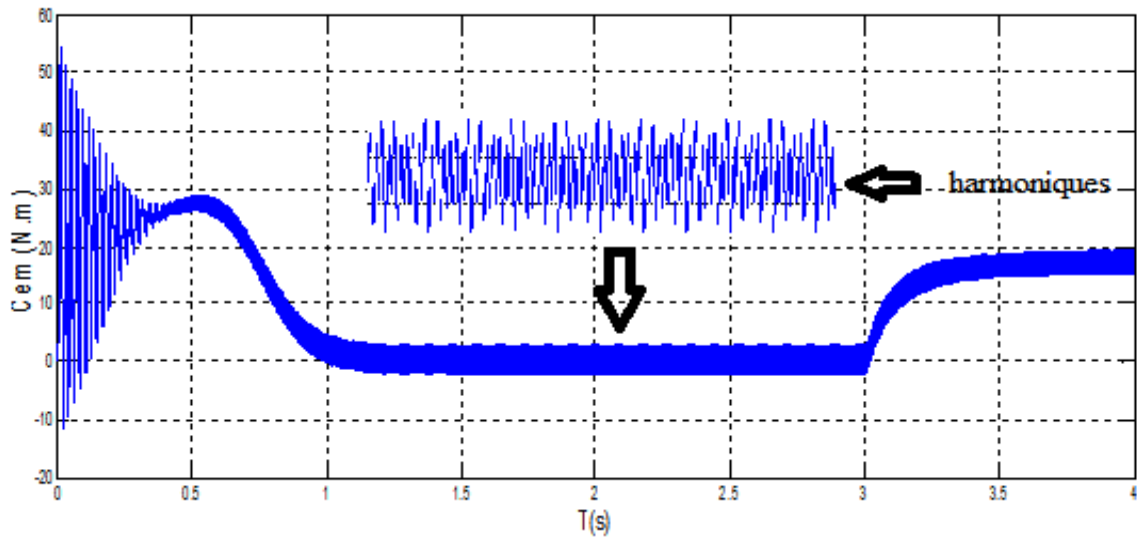


Figure (IV.2): Couple électromagnétique C_{em}

Commentaire Figure (IV.2): Notez les vibrations dans la première étape et s'installer au moment $T=3$ augmenter $C_{em}=15$ N.m mais l'existence de harmoniques.

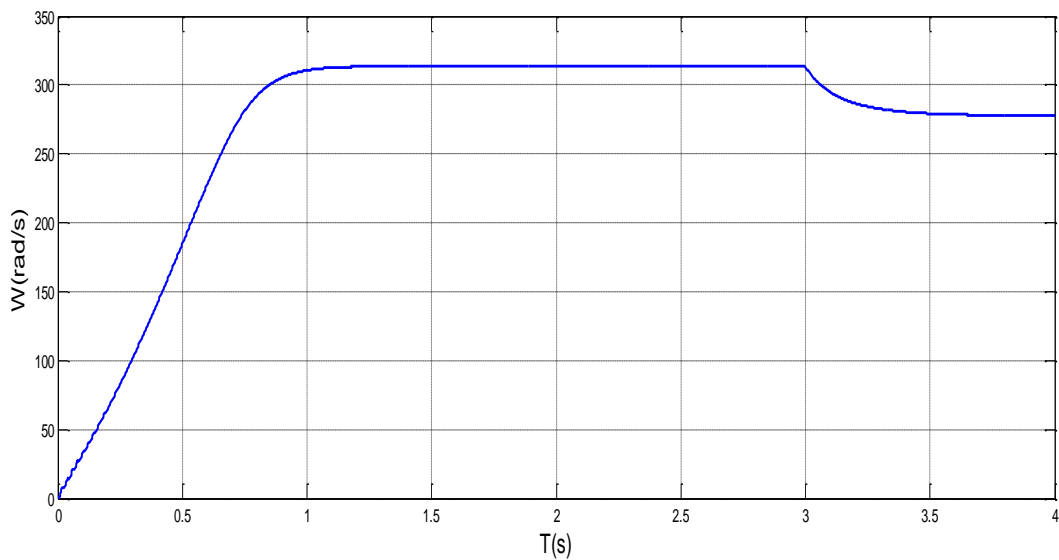


Figure (IV.3): Vitesse N (tr/min)

Commentaire Figure (IV.3): le même commentaire Figure(II.11) mais $T=3$ s Il y a une diminution

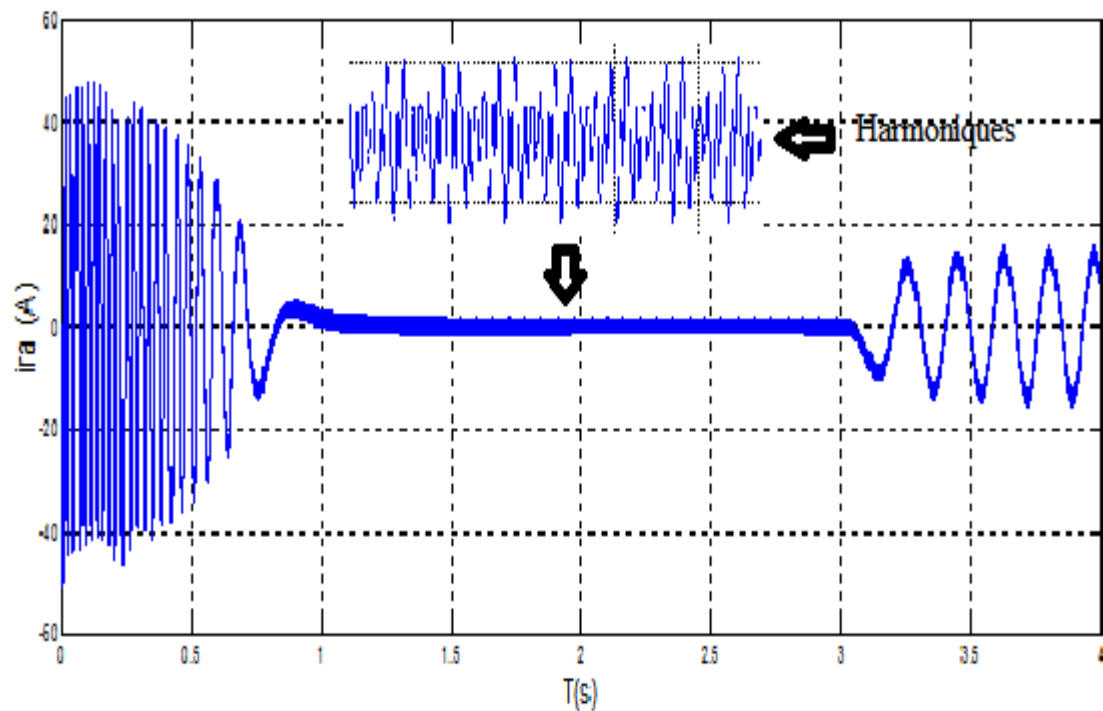


Figure (IV.4): Courant rotorique réel.

Commentaire Figure (IV.3): Nous notons une augmentation de la première étape de mon Courant rotorique réel et note de harmoniques .

IV.7 Alimentation après filtrage

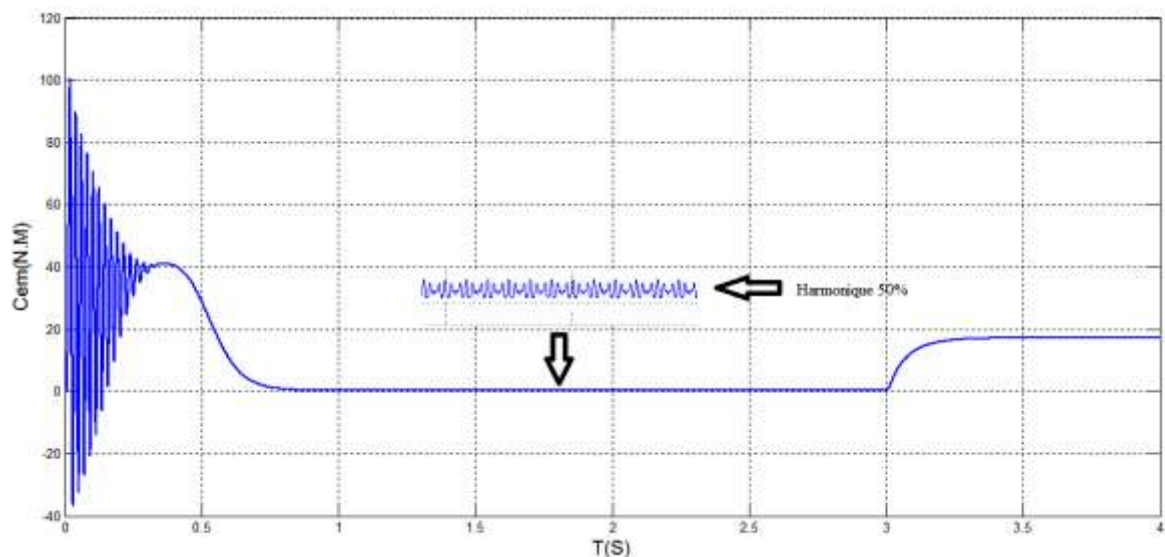


Figure (IV.5): Couple électromagnétique C_{em}

Commentaire Figure (IV.5): note Couple électromagnétique diminution de harmoniques partiel

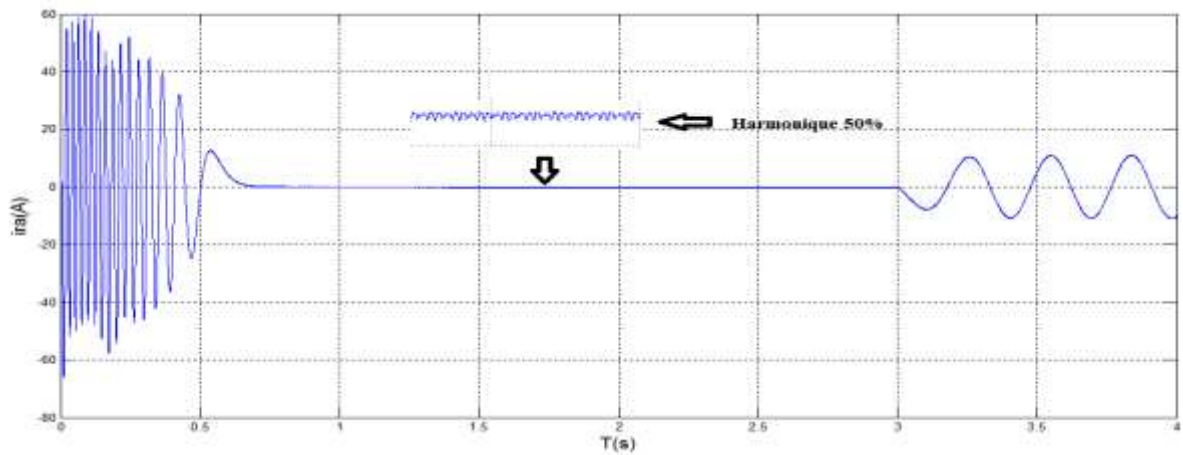


Figure (IV.6): Courant rotorique réel.

Commentaire Figure (IV.6): Notez les vibrations dans la première étape et s'installer au moment $T=3$ augmenter $i_{ra}=10A$ Diminution partielle de harmoniques

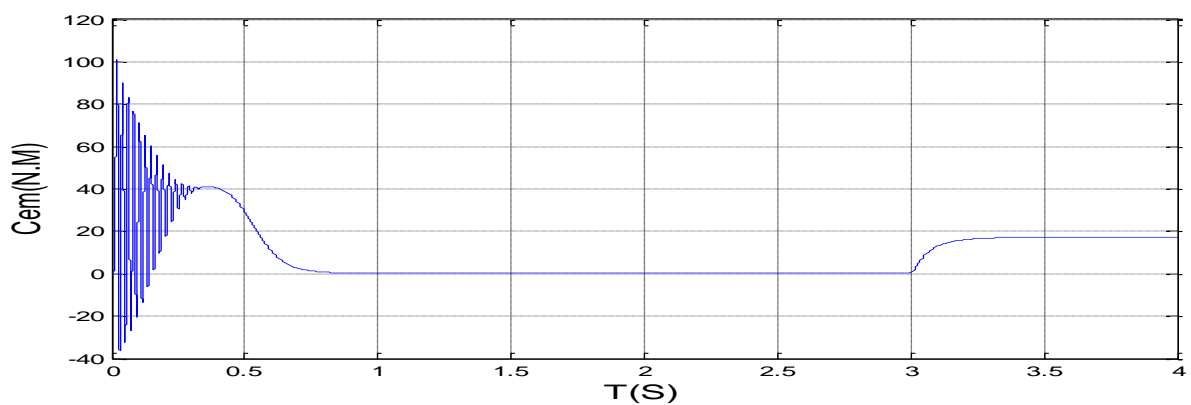


Figure (IV.7): Couple électromagnétique C_{em}

Commentaire Figure (IV.7): le même commentaire: Figure (IV.5) Mais notez la disparition de harmoniques .

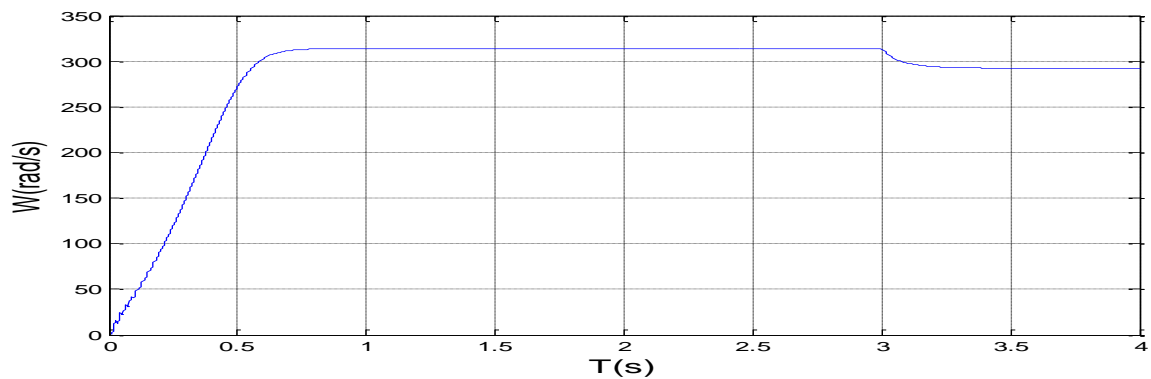


Figure (IV.8): Vitesse N (tr/min)

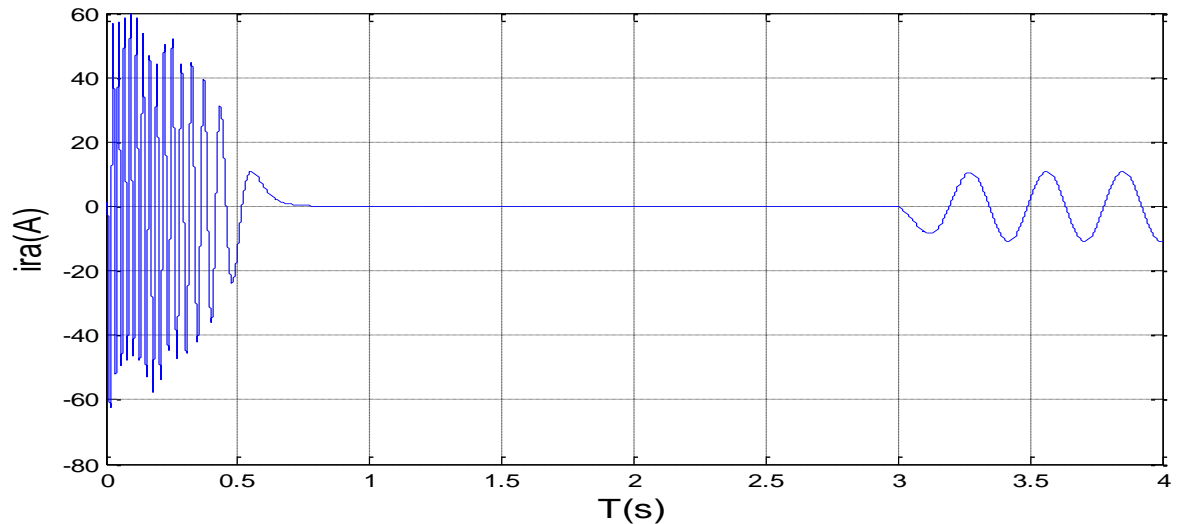


Figure (IV.9): Courant rotorique réel.

Commentaire Figure (IV.9): le même commentaire: Figure (IV.6) Mais notez la disparition de harmoniques .

commentaire

Nous notons qu'au stade avant le filtrage ,nous remarquons qu'il ya des oscillations surtout au niveau des caractéristiques mécaniques (couple ou vitesse) .

Par contre , nous notons aussi qu' au stade de l'alimentation avec

Filtrage passif des ondulations du couple par la compensation de $\sim P$ (cas de la MSDE).

On remarque que cette valeur est pratiquement deux fois plus faible que pour la méthode conventionnelle. Les figures (IV.9) et (IV.8) (IV.7) illustrent cette diminution en comparant les formes d'ondes obtenues par les deux méthodes

IV.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales perturbations qui peuvent prendre naissance dans l'alimentation du MASDE par onduleurs. Leurs origines et leurs conséquences sur les équipements essentiels existant surtout dans le domaine industriel, pour palier les oscillations nocives du couple électromagnétique qui va nous permettre d'avoir des caractéristiques mécaniques lisses. Pour cela, nous avons fait un système de filtrage qui nous a offert les améliorations recherchées.

Nous avons présenté la simulation de ce système de filtrage des harmoniques du filtrage passif. Finalement, les résultats obtenus nous ont montré l'importance vitale de ce type de filtrage au point de vue technique et surtout économique.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons mis en évidence les principes fondamentaux des machines multi phases. L'exemple type de ces machines est la machine asynchrone double étoile qui présente un bon compromis technico-économique.

Nous avons appliqué la transformation de Park, pour obtenir un modèle simple qui traduit fidèlement le fonctionnement de la MASDE

Cette machine a été alimentée par deux onduleurs de tension qui produisent des harmoniques dans le système d'alimentation qui provoque des harmoniques de couple(oscillations), mais restent faibles par rapport aux machines conventionnelles triphasées , Cette étude suivi par la modélisation et l'analyse de la machine en régime moteur afin de mieux maîtriser 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 ont été consacrés à la modélisation de la MASDE, le modèle a été développé décrivant les équations de la MASDE dans un système d'axes orthogonaux grâce à la matrice de transformation de Park que nous avons développée. IL a facilité l'étude des régimes dynamiques et de la simulation numérique (dans le cas de fonctionnement avide ou avec une charge appliquée) , nous rappelons que l'étude a été menée avec un décalage angulaire 30° entre les deux étoiles .

Le troisième chapitre, nous avons modélisé la machine asynchrone double étoile en utilisant la transformation de Park, de même que la modélisation de l'alimentation présentée par deux onduleurs de tension nous avons obtenu des résultats de simulation numérique.

L'objectif du quatrième chapitre est de filtrer l'alimentation du MASDE commandé par les onduleurs de tension pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques.

Puisque nous savons que le MASDE est utilisé beaucoup plus dans les applications de puissances élevées comme les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins du ciment,... etc.

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

- Reprendre l'étude de la commande flux adaptative à modèle de référence en changeant les onduleurs à deux niveaux par d'autres convertisseurs de puissance tels que, les onduleurs multi-niveaux, les convertisseurs matriciels ;
- L'application d'autres commandes telles que, la commande par retour d'état, DTC
- Implanter la GASDE dans un système de production d'énergie électrique d'origine éolienne.

Paramètre de la MASDE

$$Vs=220*\sqrt{2}$$

$$fs=50;$$

$$ws=2*\pi*fs;$$

$$rs1=2.4;$$

$$rs2=rs1;$$

$$rr=3;$$

$$ls1=0.0147;$$

$$ls2=ls1;$$

$$lr=0.0147;$$

$$lm=0.2;$$

$$l=1/ls2+1/ls2+1/lr+1/lm;$$

$$la=1/l;$$

$$beta=\pi/6;$$

$$p=3;$$

$$j=0.065;$$

$$f=0.001;$$

$$alpha=\pi/6;$$

Programme de simulation

Fichier M

```
clc;

clear all;

Vs=220*sqrt(2)

fs=50;

ws=2*pi*fs;

rs1=2.4;

rs2=rs1;

rr=3;

ls1=0.0147;

ls2=ls1;

lr=0.0147;

lm=0.2;

l=1/ls2+1/ls2+1/lr+1/lm;

la=1/l;

beta=pi/6;

p=3;

j=0.065;

f=0.001;

alpha=pi/6;

b=[1 0 0 0 0 0];
```

```
0 1 0 0 0 0;
```

```
0 0 1 0 0 0;
```

```
0 0 0 1 0 0;
```

```
0 0 0 0 0 0;
```

```
0 0 0 0 0 0];
```

```
a11=[(rs1*la/(ls1^2))-(rs1/ls1) (rs1*la)/(ls1*ls2) 0 0
(rs1*la)/(lr*ls1) 0;
```

```
(rs2*la)/(ls1*ls2) (rs2*la)/(ls2^2)-(rs1/ls1) 0 0
(rs2*la)/(lr*ls2) 0;
```

```
0 0 (rs1*la/(ls1^2))-(rs1/ls1) (rs1*la)/(ls1*ls2) 0
(rs1*la)/(lr*ls1);
```

```
0 0 (rs2*la)/(ls1*ls2) (rs2*la)/(ls2^2)-(rs1/ls1) 0
(rs2*la)/(lr*ls2);
```

```
(rr*la)/(lr*ls1) (rr*la)/(lr*ls1) 0 0 (rr*la/(lr^2))-
(rr/lr) 0;
```

```
0 0 (rr*la)/(lr*ls1) (rr*la)/(lr*ls2) 0 (rr*la/(lr^2))-
(rr/lr)];
```

```
a12=[0 0 1 0 0 0;
```

```
0 0 0 1 0 0;
```

```
-1 0 0 0 0 0;
```

```
0 -1 0 0 0 0;
```

```
0 0 0 0 0 0;
```

```
0 0 0 0 0 0];
```

```
a13=[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 0 0 0 0 1;
    0 0 0 0 -1 0];

h=[ls1+lm lm 0 0 lm 0;
   lm ls1+lm 0 0 lm 0;
   0 0 ls2+lm lm 0 lm;
   0 0 lm ls2+lm 0 lm;
   lm lm 0 0 lr+lm 0;
   0 0 lm lm 0 lr+lm];

b1=inv(h)

%% paramètres des onduleurs

m=60

fp=fs*m;

Vpm=1;

Vr=0.8%290

E=600;

%% Paramètre de regulateur

taur=lr/rr

tau=taur/6

Kp=ls1/tau

Ki=rs1/tau
```

Bibliographie

- ✚ [1] 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.
- ✚ [2] 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.
- ✚ [3] E. Merabet, '' *Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile* '', Mémoire de Magister, l'Université de Batna 2008.
- ✚ [4] HAKIM BENNANI '' *machine asynchrone a double alimentation les lois de commande en régime permanent* ''. pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.). UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, 2011.
- ✚ [5] L.Benalia, '' *commande en tension des moteurs à induction a double alimentation* '', Thèse doctorat, l'Université de Batna 2010.
- ✚ [6] M. Bernard, '' *Historique des machines électromagnétiques et plus particulièrement des machines à réluctance variable*'', Revue 3E.In°3. pp. 3–8, Juin 1995.
- ✚ [7] S. Eric, '' *Machines polyphasées pour application maritime. modélisation et contrôle*'', Journées d'Été à Lille., Juillet 2005.
- ✚ [8] R. Abdessemed, M. Kadjoudj, '' *Modélisation des machines électriques*'', Presses de l'Université de Batna, Algérie, 1997.
- ✚ [9] P.Vidal, '' *Commande non-linéaire d'une machine asynchrone a double alimentation* '', Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse France, Décembre 2004.
- ✚ [10] E.Merabet, R. Abdessemed, H. Amimeur, F. Hamoudi, L.Abdelhamid, '' *Influence de la charge sur une génératrice asynchrone double étoile (GASDE)* '', International Conference on Renewable Energy ICRE'07, University of Bejaia, pp. 63–68 (CDROM), 25–27 November 2007.
- ✚ [11] Z. Oudjebour, E. M. Berkouk, N. Sami, S. Belgasmi, S. Arezki, I. Messaif, '' *Indirect space vector control of a double star induction machine* '', fed by two five levels NPC VSI'', International Conference on Electric Machine, ICEM'04, Poland, 2004.
- ✚ [12] Rachide Abdessamade, '' *Modélisation et simulation des machines électriques* ''.
- ✚ [13] KHALED FERKOUS '' *Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne université Mentouri constantine* '', thèse magister, 2009.

- [14] Elkheir Merabet Mémoire de Magister en Electrotechnique "Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile", 04 /06 / 2008.
 - [15] HAFFAF Adil ; CHEBABHI Moqrane , '' Commande d'une Machine à Induction Par la Méthode H_{∞} ''; Année Universitaire : 2006/2007.
 - [16] Khoudir Marouani "contribution a la commande d'un entrainement électrique a base de moteur asynchrone double étoile ". These DE. Doctorat. Ecole Militaire Polytechnique. France. 17 juin 2010.
 - [17] Kercha Safia et Goubi Wissam " Etude et modélisation des machines électriques double étoile" Thème Master académique. Université kasdi merbah ouargla 27/06/2013.
 - [18] Etude et modélisation des machines électriques double étoile *KERCHA SAFIA GOUBI WISSAM* Université UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA 2012 /2013
 - [19] Adaptativité de la machine synchrone au filtrage actif des harmoniques de tension H. BOUKADOUM K.E. HEMSES UNIVERSITE DU 20 AOÛT 1955 SKIKDA 2005
 - [20] FILTRAGE ACTIF DU COUPLE DE MACHINES ELECTRIQUES DE FORTE PUISSANCE B. DAVAT P. LETELLIER Université de Batna (Algérie) 14 Novembre 1997
-

Résumé

Dans ce mémoire, nous avons mis en évidence les principes fondamentaux des machines multi phases. L'exemple type de ces machines est la machine asynchrone double étoile qui présente un bon compromis technico-économique.

Nos efforts ont été consacrés à la modélisation de la MASDE, le modèle a été développé décrivant les équations de la MASDE dans un système d'axes orthogonaux grâce à la matrice de transformation de Park que nous avons développée. Il a facilité l'étude des régimes dynamiques et de la simulation numérique (dans le cas de fonctionnement a vide ou avec une charge appliquée), nous rappelons que l'étude a été menée avec un décalage angulaire 30° entre les deux étoiles .

Notre objectif ,aussi, est de filtrer l'alimentation du MASDE commandé par les onduleurs de tension pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques et leurs rendements. Puisque nous savons que le MASDE est utilisé beaucoup plus dans les applications de puissances élevées comme les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins du ciment, ... etc.

Mots clés : Machine asynchrone double étoile- Machine asynchrone double Alimentation- Machine multi phasées – Auto Amorçage Simulation
- Matlab / Simulink

Summary

In this paper, we have highlighted the fundamental principles of multi-phase machines. The typical example of these machines is the double star asynchronous machine which presents a good technico-economic compromise.

Our efforts have been devoted to the modeling of MASDE, the model has been developed describing the equations of the MASDE in a system of orthogonal axes thanks to the transformation matrix of Park that we have developed. It has facilitated the study of dynamic regimes and numerical simulation (in the case of greedy operation or with an applied load), we recall that the study was conducted with an angle shift 30° between the two stars.

Our goal, too, is to filter the MASDE power supply controlled by the voltage inverters to improve their mechanical characteristics and yields. Since we know that the MASDE is used much more in high power applications such as pumps, fans, compressors, cement mills, etc. etc.

Keywords: multi-stage machines, non-synchronous double-star machines, asynchronous multiplexing machines, inductors, simulators, simulators, semiconductors