

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département d'électrotechnique



Projet de Fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commandes Electriques

Thème

***Commande vectorielle de la machine asynchrone
double étoile***

Présenté Par :

- 1) CHORFI Nadia
- 2) BENSALAH Abd Elaziz

Devant le jury composé de:

Dr. AYACHE Zouaoui	MAA	UAT.B.B(AinT'émouchent)	Président
Dr. ZEGAI Med El Amine	MCB	UAT.B.B(AinT'émouchent)	Examinateur
Dr. MENDAZKheira	MCA	UAT.B.B(AinT'émouchent)	Encadrant

Année Universitaire 2022/2023

Dédicace



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

Je dédie également ce travail :

À la lumière de ma vie, mes chers parents, exemple de courage et de sérieux qui m'ont tout donné pour me permettre de réaliser mes rêves. En ces quelques mots, je leurs exprime tout mon amour et mon respect pour tout ce qu'ils m'ont offert comme soutien, encouragement et aide. je leurs souhaite une bonne santé, que Dieu me les garde

À Mes chers sœurs, « Asmaa », « Imene », « Zineb » qui n'ont pas cessées de me encourager et soutenir tout au long de mes études .Que Dieu les protèges et leurs offres la chance et le bonheur.

À Mon cher neveu, « Rassim » Que Dieu la protège.

À toutes ma famille

À Ma Encadrante, qui doit voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

À Tous mes amies dont les noms n'ont pu être cités. Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

CHORFI NADIA

Dédicace



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

Je dédie également ce travail :

➤ A la lumière de ma vie, **MA MÈRE**, un exemple du courage et du sérieux que j'ai Tu as tout donné pour me permettre de réaliser mes rêves. Par ces quelques mots, je lui exprime tout mon amour et mon respect pour tout le soutien, les encouragements et l'aide qu'elle m'a apportés. Je lui souhaite une bonne santé, que Dieu la protège pour moi.

A tout membre de ma grande famille;

Mes frères;

Mes sœurs;

Mes patron de mon travaille (ALADIN, YOUCEF) qui n'ont pas cessées de me encourager et soutenir tout au long de mes études.

À Ma Encadrante, qui doit voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

Sans oublier mes chères amies de travaille

***A TOUS LES AMIS (ES) D'ÉTUDES CEUX D'ÉLECTROTECHNIQUE
PROMOTION 2023***

BENSALAH ABD ELAZIZ

Remerciements

*Nous tenons à exprimer la plus profonde reconnaissance à :
Allah, seigneur de l'univers, pour la volonté, la santé, qui nous a donnée
durant toutes ces longues années. A lui toute louange.*

*A notre encadrant Dr. **MENDAZ Kheira**, Vous Nous avons eu le privilège
de travailler et d'apprécier vos qualités et vos valeurs. Votre sérieux, votre
compétence et votre sens du devoir nous ont énormément marqués.
Veuillez trouver ici l'expression de notre respectueuse considération et
notre profonde admiration pour toutes vos qualités scientifiques et
humaines. Ce travail est pour nous l'occasion de vous témoigner notre
profonde gratitude.*

*A notre professeur et juge **ZEGAI Med El Amine**, Vous nous faites
l'honneur d'accepter avec une très grande amabilité de siéger parmi notre
jury de soutenance. Veuillez accepter ce travail, en gage de notre grand
respect et notre profonde reconnaissance.*

*A notre professeur et président des jurys **AYACHE Zouaoui**,
Vous nous avez honorés d'accepter avec grande sympathie de siéger
parmi notre jury de soutenance. Veuillez trouver ici l'expression de notre
grand respect et nos vifs remerciements.*

Notation

Symbole	Désignation	Unité
α	Angle de déphasage entre les deux stators	
$[V_{sabc1}], [V_{sabc2}]$	Vecteur de tension de l'étoile 1 et de l'étoile 2	[v]
$[i_{sabc1}]$	Vecteur de courant de l'étoile 1	[A]
$[i_{sabc2}]$	Vecteur de courant de l'étoile 2	[A]
$[\Phi_{sabc1}]$	Vecteurs de flux total de l'étoile 1	[Wb]
$[\Phi_{sabc2}]$	Vecteurs de flux total de l'étoile 1	[Wb]
R_{s1}	Résistance d'une phase de l'étoile 1	[Ω]
R_{s2}	Résistance d'une phase de l'étoile 2	[Ω]
R_r	Résistance d'une phase de rotor	[Ω]
L_{s1}	L'inductance propre de la stator1	[H]
L_{s2}	L'inductance propre de la stator2	[H]
L_r	L'inductance propre d'une phase du rotor.	[H]
L_{ms}	La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique.	[H]
L_{mr}	La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique.	[H]
L_m	Inductance mutuelle cyclique entre rotor et stator1 ou stator 2	[H]
s	Indice du Stator	
r	Indice du rotor	
σ	Le coefficient de Blondel.	
(d, q)	Système d'axes liés au champ tournant	
J	Le moment d'inertie de l'ensemble machine charge.	[Kg. m ²]
f_r	Coefficient de frottement	
C_{em}	Le couple électromagnétique	[N.m]

C_r	Le couple de charge (couple résistant)	[N.m]
Ω	Vitesse mécanique de rotation de rotor	[tr/min]
Ω_s	Vitesse de rotation de champs (vitesse synchronisme)	[tr/min]
θ	La position et la vitesse mécanique du rotor.	
P	Nombre de paires des pôles de la machine	
ω_{coord}	Vitesse de rotation du système d'axes biphasé par rapport au système d'axes triphasé	[rad/s]
ω_s	Pulsation électrique de stator	[rad/s]
ω_r	Pulsation électrique de rotor	[rad/s]
ω_{gl}	Pulsation électrique de glissement	[rad/s]
I_f	Le courant d'excitation de la MCC	[A]
I_a	Le courant d'induit de la MCC	[A]
τ	Constante de temps d'un système de premier ordre	[S]
τ_r	Constante de temps rotorique	[S]
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	Composantes directes et quadratiques des flux statoriques	[Wb]
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	Composantes directes et quadratiques des flux rotoriques	[Wb]
φ_m	Flux magnétisant	[Wb]
$V_{sd1.2}, V_{sq1.2}$	Composantes directes et quadratiques des tensions statoriques	[V]
$i_{sd1.2}, i_{sq1.2}$	Composantes directes et quadratiques des courants statoriques	[A]
P_{em}	La puissance électromécanique	
K_p	Gain proportionnel	
K_i	Gain intégral	
$K_{p\varphi}, K_{i\varphi}$	Gain proportionnel et intégrale du régulateur de flux	
S	Surface de glissement	
[X]	vecteur d'état	
[U]	Vecteur de commande	
[I]	Vecteur d'état	

Abréviations

MASDE	Machine asynchrone double étoile
FOC	Field Oriented Control (commande à flux orienté)
DFOC	Direct Field Oriented Control (la commande vectorielle directe)
PI	Proportionnel Intégral
MLI	Modulation par Largeur d'Impulsion
MCC	Machine à Courant Continu

Listes des figures

Chapitre I

Figure (I.1) : Représentation Spatiale des Enroulements de la Machine asynchrone double étoile.....	5
Figure (I.2) : transformation de Park.....	9
Figure (I.3) : Modèle généralisé de la MASDE dans le repère « dq ».....	9
Figure(I.4) : L'alimentation de MASDE sous réseaux triphasé équilibré sous Matlab Simulink.....	16
Figure(I.5) : schéma Bloc de la MASDE en modèle SIMULINK.....	17
Figure (I.6) : Résultats de la simulation d'une MASDE (vitesse, couple, courant et flux).....	18

Chapitre II

Figure (II. 1) Alimentation de la machine asynchrone double.....	22
Figure (II. 2) : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux.....	23
Figure (II. 3) : Stratégie de commande à MLI.....	26
Figure (II. 4) : Les instants d'impulsions.....	27
Figure (II.5) : Les tensions de sortie de l'onduleur.....	27
Figure (II. 6) : Schéma d'association de MASDE avec deux onduleurs de tension commande par sinusoïdale triangle.....	28
Figure (II.7) :L'alimentation de MASDE par un onduleur triphasé deux niveaux.....	28
Figure (II.8) : Association onduleur-MADA sous Matlab/Simulink.....	29
Figure (II.9) : Résultats de la simulation de MASDE alimenté par un onduleur triphasé deux niveaux commandé par MLI. (vitesse, couple, courant et flux)	30

Chapitre III

Figure (III.1) : Analogie de la commande de la MASDE avec celle de la MCC	34
Figure (III.2) : Orientation du flux rotorique.....	35
Figure (III.3) : Bloc orientation de flux rotorique.....	36

Figure (III.4) : Bloc de Découplage.....	38
Figure (III.5) : Boucle de régulation de courant.....	39
Figure (III.6) : Boucle de régulation de vitesse.....	40
Figure (III.7): Boucle de régulation du flux.....	41
Figure (III.8): Estimateur du flux	42
Figure (III.9): Représentation schématique de l'Estimateur du flux.....	43
Figure (III.10) : Schéma globale de la commande Vectorielle directe de la machine asynchrone double étoile	44
Figure(III.11) : les résultats de simulation vitesse, couple électromagnétique, courant et flux Commande vectorielle de MASDE.....	44
Figure(III.12) : les résultats de simulation vitesse, couple électromagnétique, courant et flux de la commande vectorielle directe de MASDE avec une variation de vitesse et couple charge.....	47

Table des Matières

<i>Dédicace</i>	
<i>Remerciement</i>	
<i>Liste des indices et symboles</i>	
<i>Liste des figures</i>	

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I: DESCRIPTION ET MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE	
I.1 INTRODUCTION :	4
I.2 Description du moteur asynchrone à double étoile	4
I.3 Modélisation MASDE.....	4
I.3.1Hypothèses simplificatrices.....	4
I.3.2Modèle triphasé de la MASDE	5
I.4 Modèle de Park.....	8
I.4.1Transformation de Park :	9
I.4.2Application de la transformation de Park.....	10
I.5 Choix du référentiel :.....	12
I.5.1Référentiel lié au stator :	12
I.5.2Référentiel lié au rotor :.....	13
I.5.3Référentiel lié au champ tournant :	13
I.6 Représentation sous forme d'équations d'état :.....	14
I.7 Résultats de simulation:	16
I.8 Conclusion :	20

CHAPITRE II: MODELISATION ONDULEUR TRIPHASEE DEUX NIVEAUX

II.1 Introduction:	22
II.2 Alimentation de la MASDE:	22
II.3 Modélisation de l'onduleur de tension à MLI :.....	22
II.4 Stratégie de commande par MLI sinusoïdale triangulaire :	25
II.5 Commande par modulation sinus-triangle :	25
II.6 Association de MASDE avec onduleur de tension de commande MLI.....	27
II.7 Résultats de simulation:	27
II.8 Conclusion :.....	31

CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE

III.1 Introduction :	33
III.2 Origines de la Commande Vectorielle :	33
III.3 Avantage de la commande Vectorielle :	33
III.4 Inconvénient de la commande Vectorielle :	33
III.5 Principe de la commande vectorielle :	33
III.6 Procède d'orientation du flux:.....	34
III.6.1 Découplage par compensation :.....	37
III.7 La commande vectorielle :	38
III.7.1 Méthode directe :	38
III.7.2 Méthode indirecte :.....	38
III.8 Commande Vectorielle directe de la MASDE (DFOC).....	38
III.8.1 Synthèse des régulateurs PI :.....	38
III.8.1.1 Régulateur de courant.....	38
III.8.1.2 Régulateur de vitesse	40
III.8.1.3 Régulateur du flux	41
III.8.1.4 Bloc de défluxage	42
III.8.1.5 Estimateur du flux	42

III.9 Résultats de simulation de la commande la commande vectorielle directe de MASDE:	43
III.10 Conclusion :	48
CONCLUSION GENERALE	50
BIBLIOGRAPHIE:	52
ANNEXE :	55

Introduction Générale

Introduction Générale :

En 1888 NIKOLA TESLA a inventé le premier moteur à courant alternatif, ce dernier a remplacé les moteurs à courant continu dans nombreuses applications en raison de le handicap du collecteur mécanique. Parmi les moteurs asynchrones on trouve le moteur à cage qui est le plus utilisé et qui a un rôle majeur dans le développement de l'industrie [28].

La première machine asynchrone triphasée fut réalisée par l'allemand MICHAEL DOLIVODOBROWLSKI en 1889. 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 [29].

L'une des machines multi-phases que nous allons l'étudier dans ce travail, est la Machine Asynchrone Double Etoile 'MASDE'. Ce type de machine possède deux enroulements statoriques triphasés identiques où se partagent le même stator et sont décalés d'un angle électrique de 30° . La structure du rotor reste identique à celle d'une machine triphasée, qui peut être soit à cage d'écureuil, soit à rotor bobiné. [13]

Dans le domaine de la commande des machines électriques, les travaux de recherche s'orientent de plus en plus vers l'application des techniques de commande modernes. Ces techniques évoluent d'une façon très rapide avec l'évolution des calculateurs numériques et de l'électronique de puissance. Ceci permet d'aboutir à des processus industriels de hautes performances. [15]

L'objectif principal de ce travail est l'étude par simulation numérique des performances d'une MASDE contrôlée par la commande vectorielle par orientation du flux rotorique par la méthode direct

Dans ce contexte, ce mémoire est scindé en trois chapitres comme suit :

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

Dans le deuxième chapitre, Nous présentons ensuite l'alimentation de la machine par onduleurs de tension à commande M.L.I

Le troisième chapitre traite la commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile par orientation du flux rotorique (FOC: Field Oriented Control) en utilisant la méthode directe. Cette technique de commande permet la linéarisation du modèle de la MASDE, avec un classiques PI seront présentés.

On terminera par une conclusion générale.

***Chapitre I Description et Modélisation de la machine
asynchrone double étoile***

I.1 Introduction :

Ce chapitre permettra d'une part de présenter le principe de fonctionnement la machine asynchrone double étoile (MASDE), et d'une autre part de modéliser cette machine électrique en basant sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques triphasé à deux axes perpendiculaires électriquement (direct et en quadrature) , les résultats de simulation présente le modèle biphasée de MASDE directement alimentée par des sources purement sinusoïdales et équilibrées en utilisant l'environnement Matlab Simulink. [1]

I.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 $\frac{2\pi}{3}$ dans l'espace. Ils sont logés dans des encoches du circuit magnétique [2].

Les deux enroulements statoriques sont alimentés chacun par un système triphasé de courant équilibré, d'où la création d'un champ tournant glisse 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 :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad (I.1)$$

Le rotor est constitué de manière à obtenir trois enroulements ayant un nombre de pair 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).

I.3 Modélisation MASDE

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 [3] :

I.3.1 Hypothèses simplificatrices

- La saturation, les effets d'hystérésis des circuits magnétiques, pertes fer (hystérésis et courants de Foucault) et l'effet de peau qui augmente les résistances et réduit les inductances sont négligés

- Les six phases statoriques ont les mêmes caractéristiques électriques
- Les enroulements créent une force magnétomotrice à répartition sinusoïdale et on ne tient compte que de la première harmonique
- L'effet d'amortissement au rotor est négligé
- Le stator est supposé lisse en admettant que les irrégularités de l'entrefer liées aux encoches statoriques ont une influence négligeable, le couple de détente, dû à l'interaction des aimants rotoriques et les dents statoriques, sont alors négligés.
- La répartition de l'induction le long de l'entrefer est supposée sinusoïdale
- L'entrefer est de largeur constante
- Les effets des encoches ne sont pas pris en compte

I.3.2 Modèle triphasé de la MASDE

La représentation schématique de la machine asynchrone à double étoile dans l'espace électrique est donnée sur la figure (I.1) suivante :

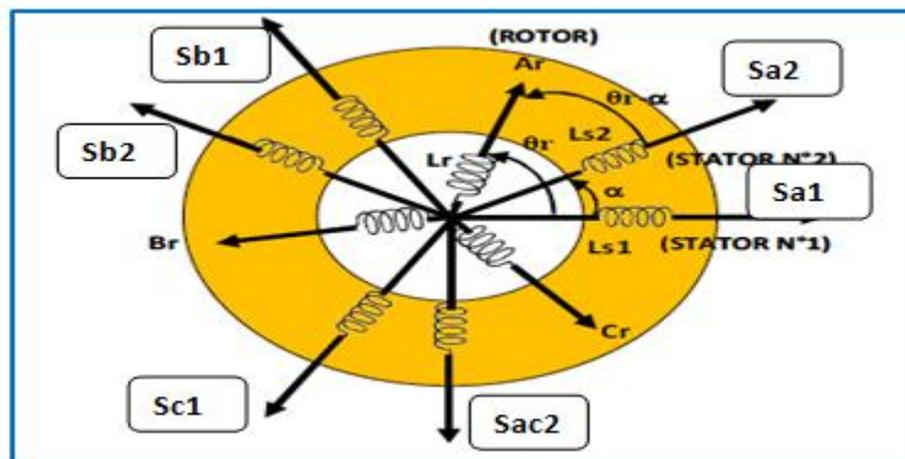


Figure (I.1) : Représentation Spatiale des Enroulements de la Machine asynchrone double étoile.[7]

a. 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 [2].

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa1} \\ V_{sb1} \\ V_{sc1} \\ V_{sa2} \\ V_{sb2} \\ V_{sc2} \end{bmatrix}, \quad [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa1} \\ i_{sb1} \\ i_{sc1} \\ i_{sa2} \\ i_{sb2} \\ i_{sc2} \end{bmatrix}, \quad [\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{sa1} \\ \phi_{sb1} \\ \phi_{sc1} \\ \phi_{sa2} \\ \phi_{sb2} \\ \phi_{sc2} \end{bmatrix} \quad (I.2)$$

On pose

$[V_{sabc1}]$: Vecteur de tension de l'étoile 1

$[V_{sabc2}]$: Vecteur de tension de l'étoile 2

$$[V_{sabc1}] = \begin{bmatrix} V_{sa1} \\ V_{sb1} \\ V_{sc1} \end{bmatrix}, \quad [V_{sabc2}] = \begin{bmatrix} V_{sa2} \\ V_{sb2} \\ V_{sc2} \end{bmatrix} \quad (I.3)$$

$[i_{sabc1}]$: Vecteur de courant de l'étoile1.

$[i_{sabc2}]$: Vecteur de courant de l'étoile2.

$$[i_{sabc1}] = \begin{bmatrix} i_{sa1} \\ i_{sb1} \\ i_{sc1} \end{bmatrix}, \quad [i_{sabc2}] = \begin{bmatrix} i_{sa2} \\ i_{sb2} \\ i_{sc2} \end{bmatrix} \quad (I.4)$$

$[\phi_{sabc1}]$ Vecteurs de flux total de l'étoile 1.

$[\phi_{sabc2}]$ Vecteurs de flux total de l'étoile 2.

$$[\phi_{sabc1}] = \begin{bmatrix} \phi_{sa1} \\ \phi_{sb1} \\ \phi_{sc1} \end{bmatrix}, \quad [\phi_{sabc2}] = \begin{bmatrix} \phi_{sa2} \\ \phi_{sb2} \\ \phi_{sc2} \end{bmatrix} \quad (I.5)$$

Vecteurs de tensions, courants et flux totaux rotorique :

$$[V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}, \quad [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}, \quad [\phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (I.6)$$

❖ Les équations de tensions :

$$\begin{bmatrix} V_{sabc1} \\ V_{sabc2} \\ V_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc1} \\ i_{sabc2} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sabc1} \\ \phi_{sabc2} \\ \phi_{rabc} \end{bmatrix} \quad (I.7)$$

Avec :

$$[R_{s1}] = \begin{bmatrix} R_{sa1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc1} \end{bmatrix}, [R_{s2}] = \begin{bmatrix} R_{sa2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc2} \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_{ra} & 0 & 0 \\ 0 & R_{rb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rc} \end{bmatrix}$$

$$R_{sa1} = R_{sb1} = R_{sc1} = R_{s1}$$

$$R_{sa2} = R_{sb2} = R_{sc2} = R_{s2}$$

$$R_{ra} = R_{rb} = R_{rc} = R_r$$

R_{s1} : Résistance d'une phase de l'étoile 1

R_{s2} : Résistance d'une phase de l'étoile 2

R_r : Résistance d'une phase de rotor

b. Equations magnétiques

Les équations des flux sont :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc1} \\ \Phi_{sabc2} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s1.s1} & L_{s1.s2} & L_{s1.r} \\ L_{s2.s1} & L_{s2.s2} & L_{s2.r} \\ L_{r.s1} & L_{r.s2} & L_{r.r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc1} \\ i_{sabc2} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (I.8)$$

Les sous- matrices des équations de flux sont :

$$L_{s1.s1} = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_{ms} & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_{s1} + L_{ms} & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_{s1} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (I.9)$$

$$L_{s2.s2} = \begin{bmatrix} L_{s2} + L_{ms} & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_{s2} + L_{ms} & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_{s2} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (I.10)$$

$$L_{r.r} = \begin{bmatrix} L_r + L_{mr} & L_{mr} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{mr} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{mr} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_r + L_{mr} & L_{mr} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{mr} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{mr} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_r + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (I.11)$$

$$L_{s1.s2} = L_{s2.s1}^T = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha + 4\pi/3) \\ \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha - 4\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (I.12)$$

$$L_{s1.r} = L_{r.s1}^T = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 4\pi/3) \\ \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r - 4\pi/3) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{I.13})$$

$$L_{s2.r} = L_{r.s2}^T = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \alpha) & \cos(\theta_r - \alpha - 2\pi/3) & \cos(\theta_r - \alpha - 4\pi/3) \\ \cos(\theta_r - \alpha - 2\pi/3) & \cos(\theta_r - \alpha) & \cos(\theta_r - \alpha - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r - \alpha - 4\pi/3) & \cos(\theta_r - \alpha - 2\pi/3) & \cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{I.14})$$

Avec $L_{ms} = L_{rm} = L_{sr}$

L_{s1} : L'inductance propre de la stator1.

L_{s2} : L'inductance propre de la stator2.

L_r : L'inductance propre d'une phase du rotor.

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

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

c. Expression du couple électromagnétique :

D'après les lois de l'électromagnétisme classique, le couple sur l'arbre s'exprime en fonction des courants et de la dérivée par rapport à θ de la matrice inductance globale

$$C_{em} = \frac{p}{2} \left([i_{s.abc1}]^T \frac{d}{dt} [L_{s1.r}] [i_{r.abc}] + [i_{s.abc2}]^T \frac{d}{dt} [L_{s2.r}] [i_{r.abc}] \right) \quad (\text{I.15})$$

d. Equation mécanique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad (\text{I.16})$$

J: Le moment d'inertie de l'ensemble machine charge.

C_r : Le couple de charge (couple résistant).

f_r : Coefficient de frottement

I.4 Modèle de Park

Afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système on utilise des transformations orthogonales. On obtient donc des équations simples par des changements de variables appropriés. Parmi les transformations les plus utilisées, on a celle de Park.

Le modèle de Park est basé sur la transformation d'un système triphasé d'axes (a, b, c) a un système équivalent biphasé d'axes (d, q) créant la même force magnétomotrice Une seconde transformation

de Park est appelée la transformation de Park modifiée. Cette modification permet de conserver la puissance lors de passage du système triphasé celui du biphasé ou inversement. [4]

La composante homopolaire ne participe pas à cette création de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan (od, oq). La (Fig. I.2) représente la transformation d'un système triphasé à un système biphasé.

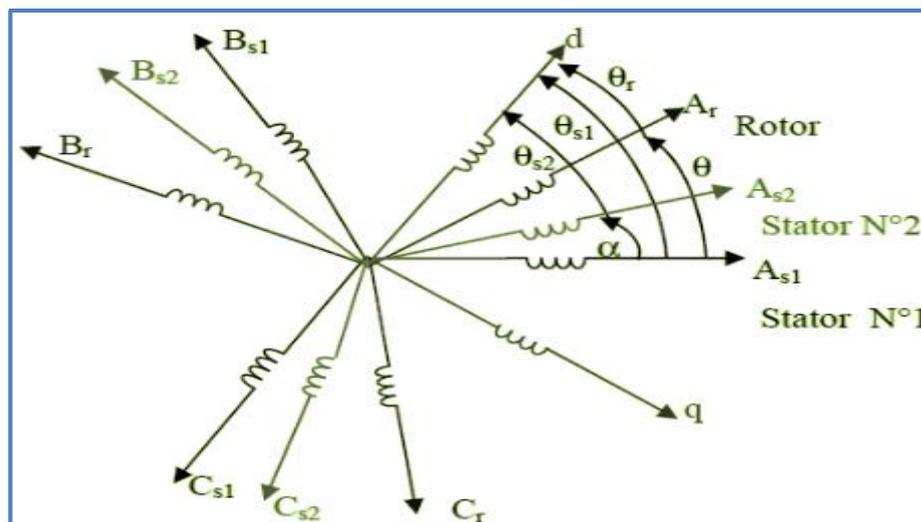


Figure (I.2) : transformation de Park. [1]

I.4.1 Transformation de Park :

Le modèle généralisé de la MASDE est représenté par la figure (I.3) dans le repère de Park.

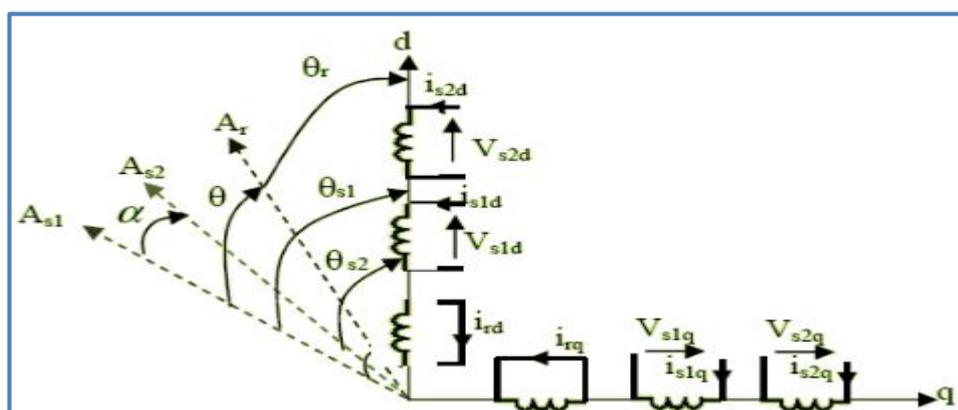


Figure (I.3): Modèle généralisé de la MASDE dans le repère « dq » [4].

La matrice de Park pour l'étoile 1 :

$$[P(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{I.17})$$

La matrice de Park pour l'étoile 2 :

$$[P(\theta_{s2})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos\left(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin\left(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{I.18})$$

La matrice de Park pour le rotor :

$$[P(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{I.19})$$

I.4.2 Application de la transformation de Park

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

a. Equations des tensions :

En appliquant la transformation ci- dessus aux équations de tensions on aura :

$$[P(\theta_{s1})] \cdot [V_{s,abc1}] = [P(\theta_{s1})] \cdot [R_s] \cdot [i_{s,abc1}] + [P(\theta_{s1})] \cdot \frac{d}{dt} ([P(\theta_{s1})]^{-1} \cdot [P(\phi_{s1})] \cdot [\phi_{s,abc1}]) \quad (\text{I.20})$$

$$[V_{sdq1}] = [R_s] \cdot [i_{sdq1}] + [P(\theta_{s1})] \cdot \frac{d[P(\theta_{s1})]^{-1}}{dt} \cdot [\phi_{sdq1}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sdq1}] \quad (\text{I.21})$$

$$[V_{sdq2}] = [R_s] \cdot [i_{sdq2}] + [P(\theta_{s2})] \cdot \frac{d[P(\theta_{s2})]^{-1}}{dt} \cdot [\phi_{sdq1}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sdq1}] \quad (\text{I.22})$$

$$[V_{dq}] = [R_r] \cdot [i_{dq}] + [P(\theta_r)] \cdot \frac{d[P(\theta_r)]^{-1}}{dt} \cdot [\phi_{dq}] + \frac{d}{dt} [\phi_{dq}] \quad (\text{I.23})$$

$$\frac{d\theta_{s1}}{dt} = \frac{d\theta_{s2}}{dt} = \frac{d(\theta_{s1}-\alpha)}{dt} = \omega_s, \frac{d(\theta_{s1}-\theta_r)}{dt} = \omega_s - \omega_r = \omega_{gl} \quad (\text{I.24})$$

ω_{gl} : vitesse de glissement

b. Équations des Tensions :

$$\begin{bmatrix} P(\theta_{s1}) \cdot \Phi_{s.abc1} \\ P(\theta_{s2}) \cdot \Phi_{s.abc2} \\ P(\theta_r) \cdot \Phi_{r.abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(\theta_{s1}) \cdot L_{s1.s1} P(\theta_{s1})^{-1} & P(\theta_{s1}) \cdot L_{s1.s2} P(\theta_{s2})^{-1} & P(\theta_{s1}) \cdot L_{s1.r} P(\theta_r)^{-1} \\ P(\theta_{s2}) \cdot L_{s2.s1} P(\theta_{s1})^{-1} & P(\theta_{s2}) \cdot L_{s2.s2} P(\theta_{s2})^{-1} & P(\theta_{s2}) \cdot L_{s2.r} P(\theta_r)^{-1} \\ P(\theta_r) \cdot L_{r.s1} P(\theta_{s1})^{-1} & P(\theta_r) \cdot L_{r.s2} P(\theta_{s2})^{-1} & P(\theta_r) \cdot L_{r.r} P(\theta_r)^{-1} \end{bmatrix} \quad (I.24)$$

$$\begin{cases} V_{sd1} = R_s i_{sd1} + \frac{d\Phi_{sd1}}{dt} - \frac{d\theta_{s1}}{dt} \Phi_{sq1} \\ V_{sq1} = R_s i_{sq1} + \frac{d\Phi_{sq1}}{dt} + \frac{d\theta_{s1}}{dt} \Phi_{sd1} \\ V_{sd2} = R_s i_{sd2} + \frac{d\Phi_{sd2}}{dt} - \frac{d\theta_{s2}}{dt} \Phi_{sq2} \\ V_{sq2} = R_s i_{sq2} + \frac{d\Phi_{sq2}}{dt} + \frac{d\theta_{s2}}{dt} \Phi_{sd2} \end{cases} \quad (I.25)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rd} \end{cases} \quad (I.26)$$

c. Les équations des flux seront :

$$\begin{cases} \Phi_{sd1} = L_{s1} i_{sd1} + L_m (i_{sd1} + i_{sd2} + i_{rd}) \\ \Phi_{sq1} = L_{s1} i_{sq1} + L_m (i_{sq1} + i_{sq2} + i_{rq}) \\ \Phi_{sd2} = L_{s2} i_{sd2} + L_m (i_{sd1} + i_{sd2} + i_{rd}) \\ \Phi_{sq2} = L_{s2} i_{sq2} + L_m (i_{sq1} + i_{sq2} + i_{rq}) \end{cases} \quad (I.27)$$

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m (i_{sd1} + i_{sd2} + i_{rd}) \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m (i_{sq1} + i_{sq2} + i_{rq}) \end{cases} \quad (I.28)$$

Avec :

$$L_m = \frac{3}{2} L_{sr} = \frac{3}{2} L_{rs} : \text{Inductance mutuelle cyclique entre rotor et stator1 ou stator 2}$$

d. Equation de puissance :

Pour calculer l'expression du couple instantané, il est nécessaire de déterminer la puissance instantanée. La puissance instantanée absorbée par la machine asynchrone double étoile est donnée par l'expression suivante. [5]

$$P_{abs} = [V_{sabc1}]^T [i_{sabc1}] + [V_{sabc2}]^T [i_{sabc2}] \quad (I.29)$$

$$P_{abs} = v_{as1} i_{as1} + v_{bs1} i_{bs1} + v_{cs1} i_{cs1} + v_{as2} i_{as2} + v_{bs2} i_{bs2} + v_{cs2} i_{cs2} \quad (I.30)$$

On peut écrire :

$$P_{abs} = v_{sd1}i_{sd1} + v_{sq1}i_{sq1} + v_{sd2}i_{sd2} + v_{sq2}i_{sq2} \quad (I.31)$$

$$P_{abs} = R_{s1}i_{sd1}^2 + R_{s1}i_{sq1}^2 + R_{s1}i_{sd2}^2 + R_{s1}i_{sq2}^2 + \omega_s(\Phi_{sd1}i_{sq1} - \Phi_{sq1}i_{sd1} + \Phi_{sd2}i_{sq2} - \Phi_{sq2}i_{sd2}) + \frac{d\Phi_{sd1}}{dt}i_{sd1} + \frac{d\Phi_{sq1}}{dt}i_{sq1} + \frac{d\Phi_{sd2}}{dt}i_{sd2} + \frac{d\Phi_{sq2}}{dt}i_{sq2} \quad (I.32)$$

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

➤ Premier terme: est identifiable aux pertes Joules.

$$P_J = R_{s1}i_{sd1}^2 + R_{s1}i_{sq1}^2 + R_{s1}i_{sd2}^2 + R_{s1}i_{sq2}^2 \quad (I.33)$$

➤ Deuxième terme: puissance électromagnétique emmagasinée.

$$P_m = \frac{d\Phi_{sd1}}{dt}i_{sd1} + \frac{d\Phi_{sq1}}{dt}i_{sq1} + \frac{d\Phi_{sd2}}{dt}i_{sd2} + \frac{d\Phi_{sq2}}{dt}i_{sq2} \quad (I.34)$$

➤ Troisième terme: puissance électrique transformée en puissance mécanique (les pertes fer sont supposées négligeables).

$$P_{em} = \omega_s(\Phi_{sd1}i_{sq1} - \Phi_{sq1}i_{sd1} + \Phi_{sd2}i_{sq2} - \Phi_{sq2}i_{sd2}) \quad (I.35)$$

e. L'équation mécanique:

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

$$P_{em} = \Omega_s \cdot C_{em} \quad (I.36)$$

Avec,

Ω_s : La vitesse de rotation mécanique du rotor ;

C_{em} : Le couple électromagnétique développé

Le couple électromagnétique est de la forme suivante:

$$C_{em} = P(\Phi_{sd1}i_{sq1} - \Phi_{sq1}i_{sd1} + \Phi_{sd2}i_{sq2} - \Phi_{sq2}i_{sd2}) \quad (I.37)$$

Avec p : est le nombre de paires de pôles de la machine.

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_m + L_r} [(i_{sq1} + i_{sq2})\Phi_{rd} - (i_{sd1} + i_{sd2})\Phi_{rq}] \quad (I.38)$$

L'équation mécanique est :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad (I.39)$$

I.5 Choix du référentiel :

Pour étudier la théorie des régimes transitoires de la machine asynchrone double étoile, on peut utiliser trois systèmes d'axes de coordonnées du plan d'axes (d, q) [4].

I.5.1 Référentiel lié au stator :

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

L'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif [5].

$$\begin{cases} V_{sd1} = R_s i_{sd1} + \frac{d\phi_{sd1}}{dt} \\ V_{sq1} = R_s i_{sq1} + \frac{d\phi_{sq1}}{dt} \\ V_{sd2} = R_s i_{sd2} + \frac{d\phi_{sd2}}{dt} \\ V_{sq2} = R_s i_{sq2} + \frac{d\phi_{sq2}}{dt} \end{cases} \quad (I.40)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (I.41)$$

I.5.2 Référentiel lié au rotor :

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au rotor tournant à une Vitesse ω_r donc ($\omega_s = \omega_r$)

L'utilisation de ce référentiel, permet d'étudier les régimes transitoires dans les machines alternatives synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor [5].

$$\begin{cases} V_{sd1} = R_s i_{sd1} + \frac{d\phi_{sd1}}{dt} + \omega_r \phi_{sq1} \\ V_{sq1} = R_s i_{sq1} + \frac{d\phi_{sq1}}{dt} + \omega_r \phi_{sd1} \\ V_{sd2} = R_s i_{sd2} + \frac{d\phi_{sd2}}{dt} + \omega_r \phi_{sq2} \\ V_{sq2} = R_s i_{sq2} + \frac{d\phi_{sq2}}{dt} + \omega_r \phi_{sd2} \end{cases} \quad (I.42)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} \end{cases} \quad (I.43)$$

I.5.3 Référentiel lié au champ tournant :

Dans ce référentiel les axes (d, q) sont immobile par rapport au champ électromagnétique créé par les deux étoiles du stator ($\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r$)

Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de pouvoir appliquer une commande de vitesse, de couple, etc. puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de forme continue [1].

Dans notre travail, on utilise le référentiel liée au champ tournant pour la modélisation et la commande de la MASDE. Dans ce cas, le modèle de la MASDE devient [6]

$$\begin{cases} V_{sd1} = R_s i_{sd1} + \frac{d\phi_{sd1}}{dt} + w_s \phi_{sq1} \\ V_{sq1} = R_s i_{sq1} + \frac{d\phi_{sq1}}{dt} + w_s \phi_{sd1} \\ V_{sd2} = R_s i_{sd2} + \frac{d\phi_{sd2}}{dt} + w_s \phi_{sq2} \\ V_{sq2} = R_s i_{sq2} + \frac{d\phi_{sq2}}{dt} + w_s \phi_{sd2} \end{cases} \quad (I.44)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - (w_s - w_r) \phi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (w_s - w_r) \phi_{rd} \end{cases} \quad (I.45)$$

I.6 Représentation sous forme d'équations d'état :

On peut représenter le modèle de la MASDE dans le repère d, q sous forme d'états avec plusieurs formes. Nous choisissons dans ce qui suit, le vecteur $[i_{sd1} i_{sd2} i_{sq1} i_{sq2} \phi_{rd} \phi_{rq}]^t$ comme vecteur d'état et les grandeurs $V_{sd1}, V_{sd2}, V_{sq1}, V_{sq2}$ comme variables de commande

La représentation d'état consiste à exprimer le modèle de la machine sous la forme :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU \quad (I.46)$$

Avec :

A : matrice d'évolution du système.

X : vecteur d'état.

B : Matrice de commande.

U : vecteur de commande.

On choisit dans tout ce qui suit, le vecteur d'état $[\phi_{sd1} \phi_{sd2} \phi_{sq1} \phi_{sq2} \phi_{rd} \phi_{rq}]^T$

A partir des systèmes d'équations (I.27) les différents courants s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} i_{sd1} = \frac{(\phi_{sd1} - \phi_{md})}{L_{s1}} \\ i_{sd2} = \frac{(\phi_{sd2} - \phi_{md})}{L_{s2}} \\ i_{sq1} = \frac{(\phi_{sq1} - \phi_{mq})}{L_{s1}} \\ i_{sq2} = \frac{(\phi_{sq2} - \phi_{mq})}{L_{s2}} \\ i_{rd} = \frac{(\phi_{rd} - \phi_{md})}{L_r} \\ i_{rq} = \frac{(\phi_{rq} - \phi_{mq})}{L_r} \end{cases} \quad (I.47)$$

Avec :

$$\Phi_{md} = L_m(i_{sd1} + i_{sd2} + i_{rd}) \quad (I.48)$$

$$\Phi_{mq} = L_m(i_{sq1} + i_{sq2} + i_{rq})$$

Sachant que :

$$\Phi_m = \sqrt{\Phi_{md}^2 + \Phi_{mq}^2} \quad (I.49)$$

Φ_m : Flux magnétisant.

$$\begin{cases} \Phi_{md} = \left(\frac{\Phi_{sd1}}{L_{s1}} + \frac{\Phi_{sd2}}{L_{s2}} + \frac{\Phi_{rd}}{L_r} \right) L_a \\ \Phi_{mq} = \left(\frac{\Phi_{sq1}}{L_{s1}} + \frac{\Phi_{sq2}}{L_{s2}} + \frac{\Phi_{rq}}{L_r} \right) L_a \end{cases} \quad (I.50)$$

Avec :

$$L_a = \frac{1}{\frac{1}{l_{s1}} + \frac{1}{l_{s2}} + \frac{1}{l_r} + \frac{1}{l_m}} \quad (I.51)$$

En remplaçant les courants du système d'équations (1.47) par leur expression dans le système d'équations (1.44) et (I.45) on aura

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Phi_{sd1} = V_{sd1} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}} (\Phi_{sd1} - \Phi_{md}) + \omega_s \Phi_{sq1} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{sd2} = V_{sd2} - \frac{R_{s2}}{L_{s2}} (\Phi_{sd2} - \Phi_{md}) + \omega_s \Phi_{sq2} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{sq1} = V_{sq1} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}} (\Phi_{sq1} - \Phi_{mq}) + \omega_s \Phi_{sd1} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{sq2} = V_{sq2} - \frac{R_{s2}}{L_{s2}} (\Phi_{sq2} - \Phi_{mq}) + \omega_s \Phi_{sd2} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{rd} = -\frac{R_r}{L_r} (\Phi_{rd} - \Phi_{md}) + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rq} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{rq} = -\frac{R_r}{L_r} (\Phi_{rq} - \Phi_{mq}) + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rd} \end{cases} \quad (I.52)$$

En remplaçant l'équation (I.50) dans l'équation (1.52) On aura :

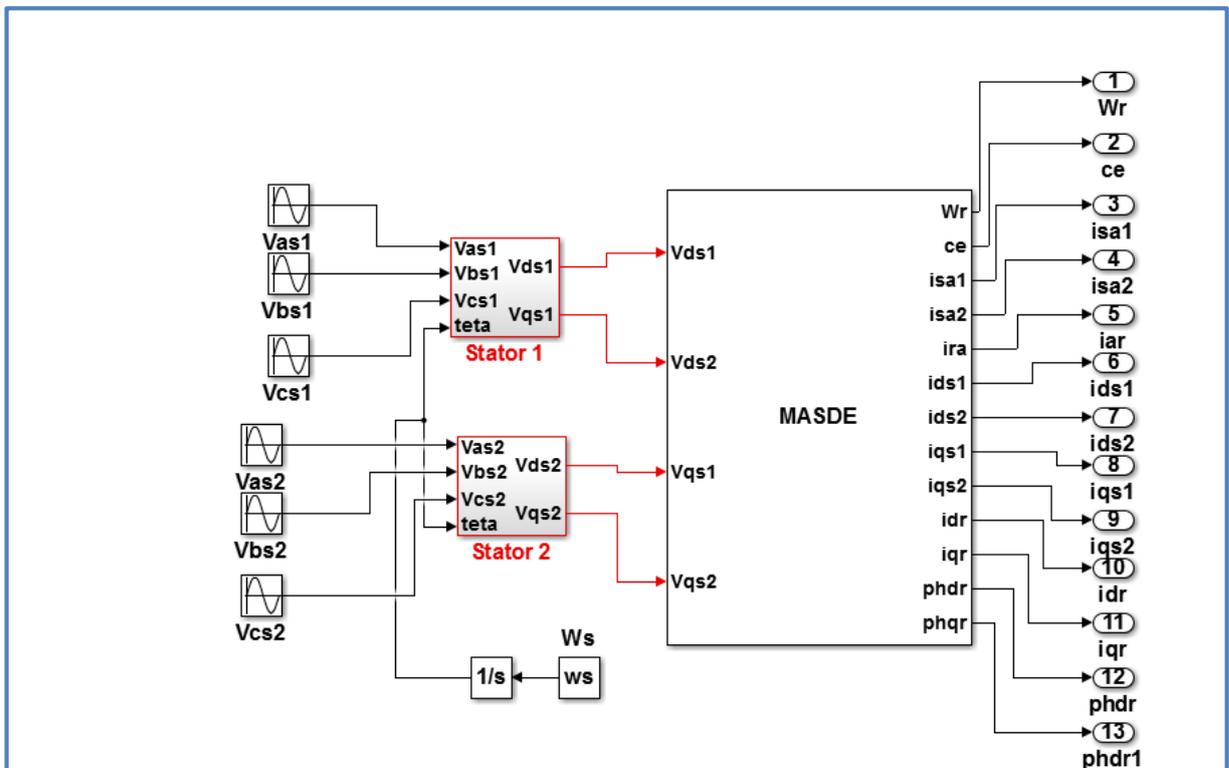
$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Phi_{sd1} = V_{sd1} - \left(\frac{R_{s1}}{L_{s1}} - \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}^2} \right) \Phi_{sd1} + \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_{s2}} \Phi_{sd2} + \omega_s \Phi_{sq1} + \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_r} \Phi_{rd} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{sd2} = V_{sd2} - \left(\frac{R_{s2}}{L_{s2}} - \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}^2} \right) \Phi_{sd2} + \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}L_{s1}} \Phi_{sd1} + \omega_s \Phi_{sq2} + \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}L_r} \Phi_{rd} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{sq1} = V_{sq1} - \left(\frac{R_{s1}}{L_{s1}} - \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}^2} \right) \Phi_{sd1} + \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_{s2}} \Phi_{sq2} + \omega_s \Phi_{sd1} + \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_r} \Phi_{rq} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{sq2} = V_{sq2} - \left(\frac{R_{s2}}{L_{s2}} - \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}^2} \right) \Phi_{sq2} + \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}L_{s1}} \Phi_{sq1} + \omega_s \Phi_{sd2} + \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}L_r} \Phi_{rq} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{rd} = -\left(\frac{R_r}{L_r} - \frac{R_rL_a}{L_r^2} \right) \Phi_{rd} + \frac{R_rL_a}{L_rL_{s1}} \Phi_{sd1} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rq} + \frac{R_rL_a}{L_rL_{s2}} \Phi_{sd2} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{rq} = -\left(\frac{R_r}{L_r} - \frac{R_rL_a}{L_r^2} \right) \Phi_{rq} + \frac{R_rL_a}{L_rL_{s1}} \Phi_{sq1} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rd} + \frac{R_rL_a}{L_rL_{s2}} \Phi_{sq2} \end{cases} \quad (I.53)$$

Avec:

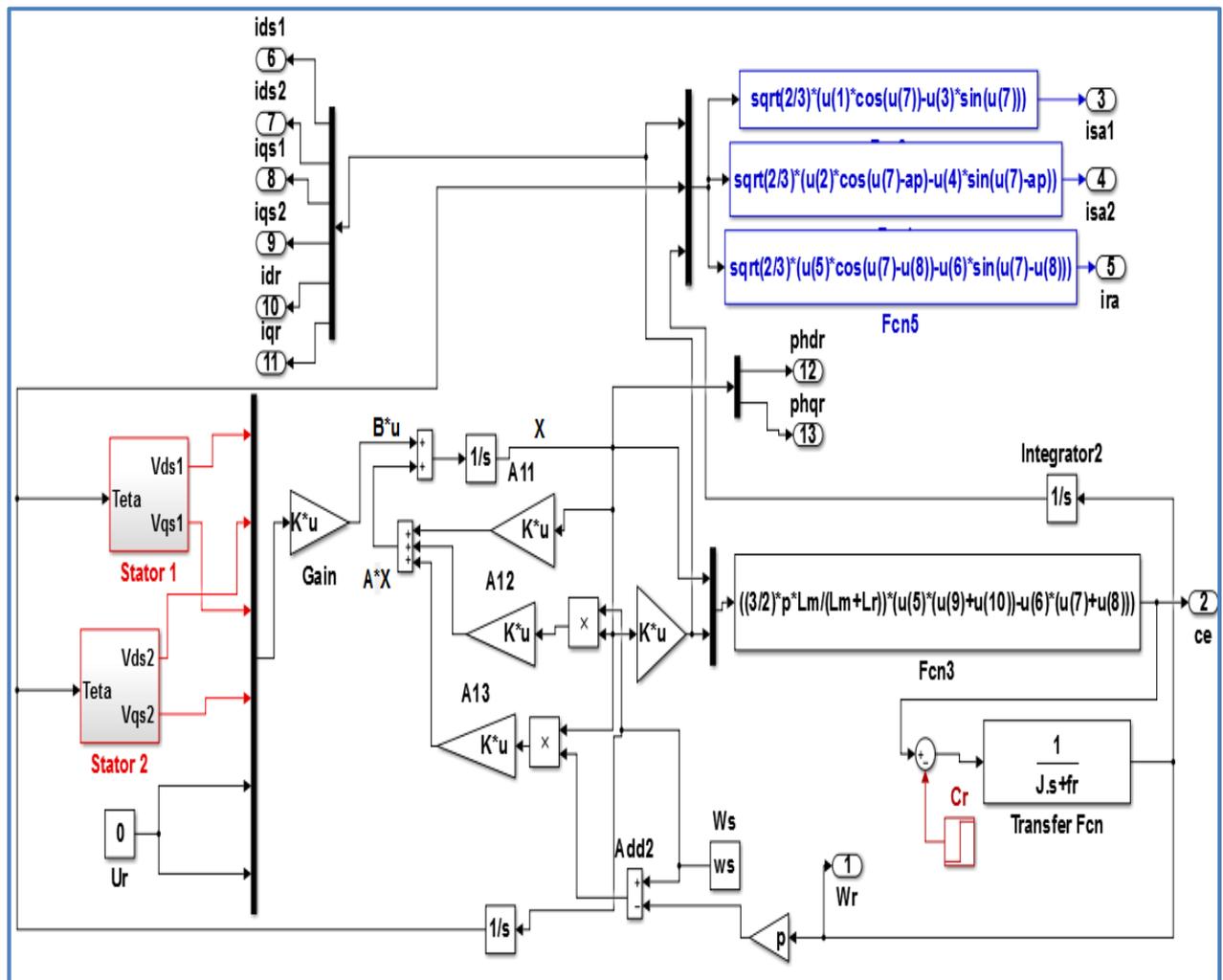
$$\begin{aligned}
 X &= \begin{pmatrix} \emptyset_{sd1} \\ \emptyset_{sd2} \\ \emptyset_{sq1} \\ \emptyset_{sq2} \\ \emptyset_{rd} \\ \emptyset_{rd} \end{pmatrix}, & U &= \begin{pmatrix} V_{sd1} \\ V_{sd2} \\ V_{sq1} \\ V_{sq2} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{pmatrix}, & B &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 00 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 00 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 A &= \begin{pmatrix} \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}^2} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}} & \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & \omega_s & 0 & \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_r} & 0 \\ \frac{R_{s2}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}^2} - \frac{R_{s2}}{L_{s2}} & 0 & \omega_s & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}L_r} & 0 \\ -\omega_s & 0 & \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}^2} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}} & \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & 0 & \frac{R_rL_a}{L_rL_{s1}} \\ 0 & -\omega_s & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}^2} - \frac{R_{s2}}{L_{s2}} & 0 & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}L_r} \\ \frac{R_rL_a}{L_rL_{s1}} & \frac{R_rL_a}{L_rL_{s2}} & 0 & 0 & \frac{R_rL_a}{L_r^2} - \frac{R_r}{L_r} & (\omega_s - \omega_r) \\ 0 & 0 & \frac{R_rL_a}{L_rL_{s1}} & \frac{R_rL_a}{L_rL_{s2}} & -(\omega_s - \omega_r) & \frac{R_rL_a}{L_r^2} - \frac{R_r}{L_r} \end{pmatrix} \quad (1.54)
 \end{aligned}$$

I.7 Résultats de simulation:

Les figures (I.4) et (I.5) présente l'alimentation de MASDE sous réseaux triphasé équilibré, comme il montre le modèle de MAS DE biphasée en utilisant Park.

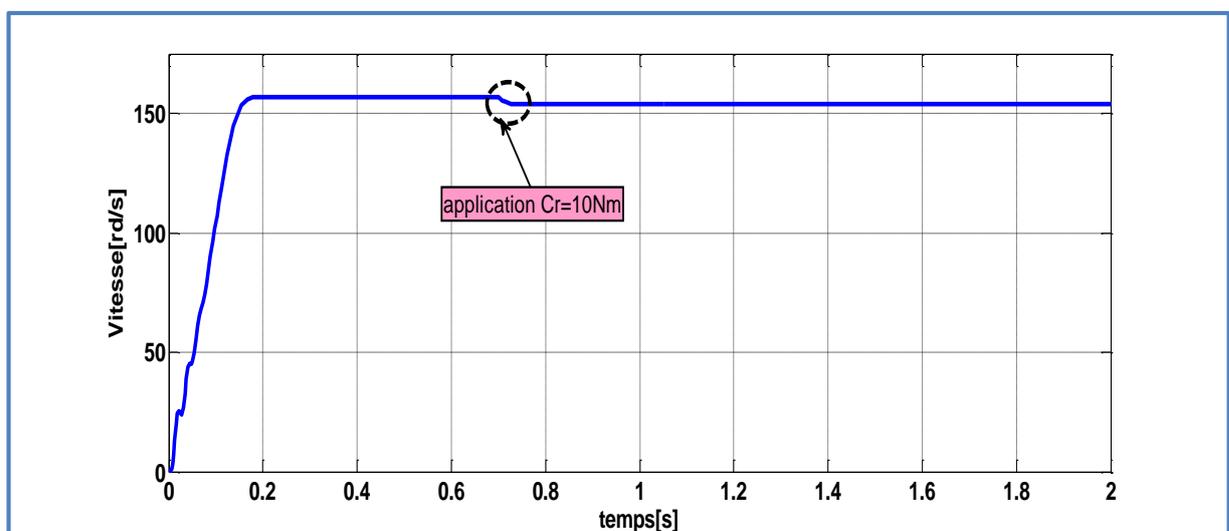


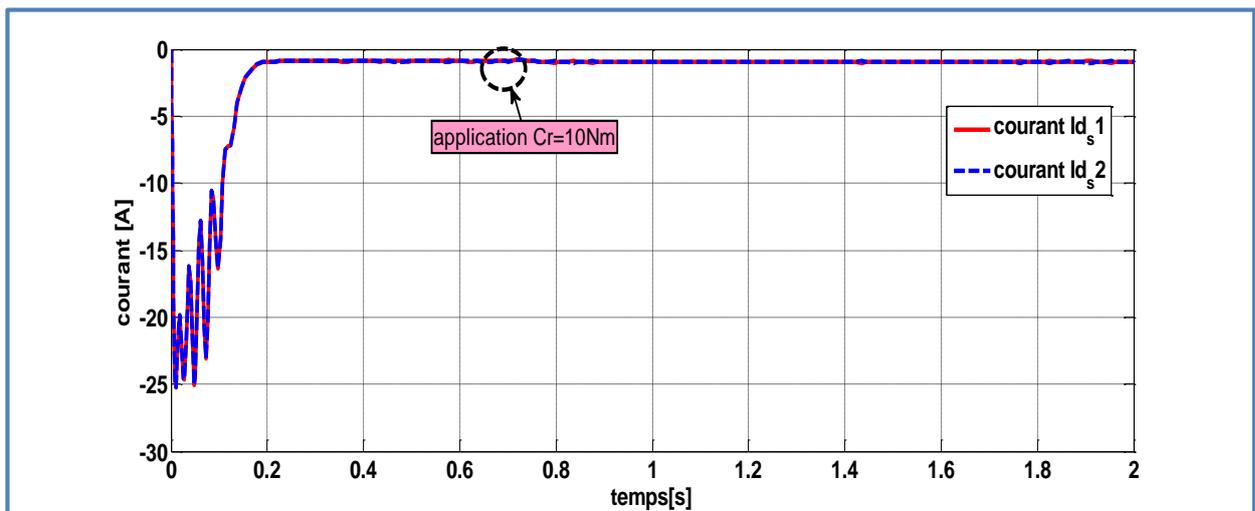
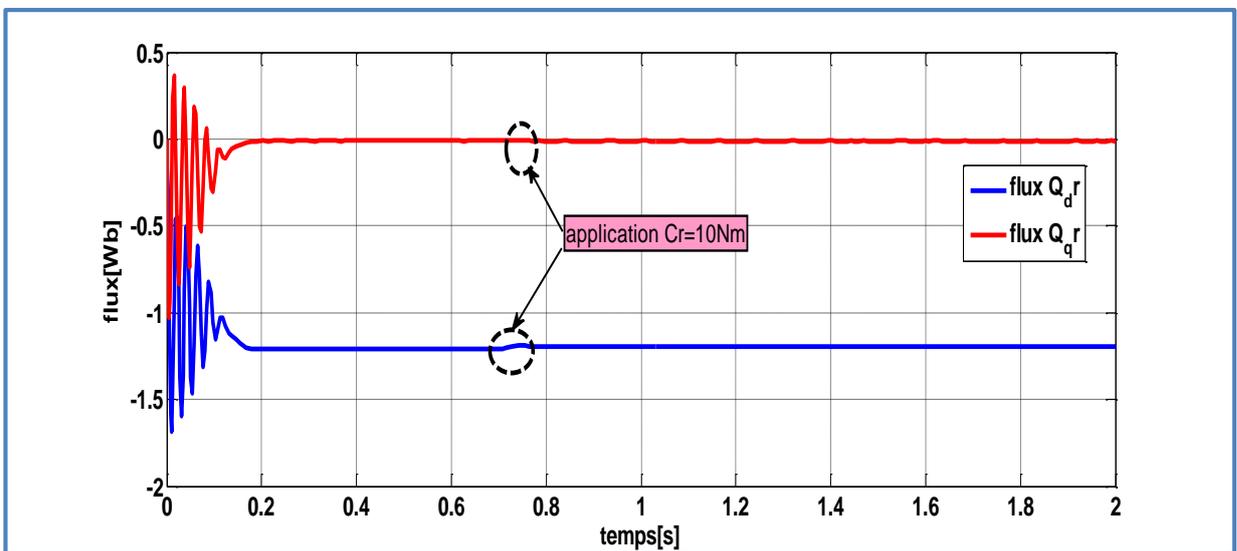
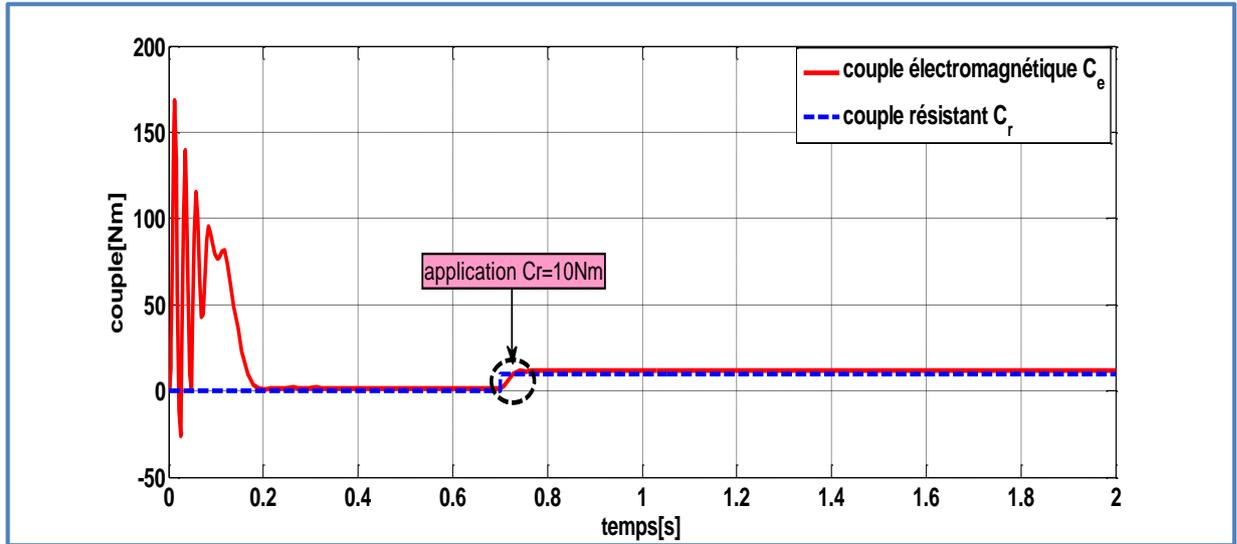
Figure(I.4) : L'alimentation de MASDE sous réseaux triphasé équilibré sous Matlab Simulink



Figure(I.5) : schéma Bloc de la MASDE en modèle SIMULINK.

La figure(I.6) présente les résultats de simulation vitesse, couple électromagnétique, courant et flux de MASDE alimenté au réseau triphasé équilibré.





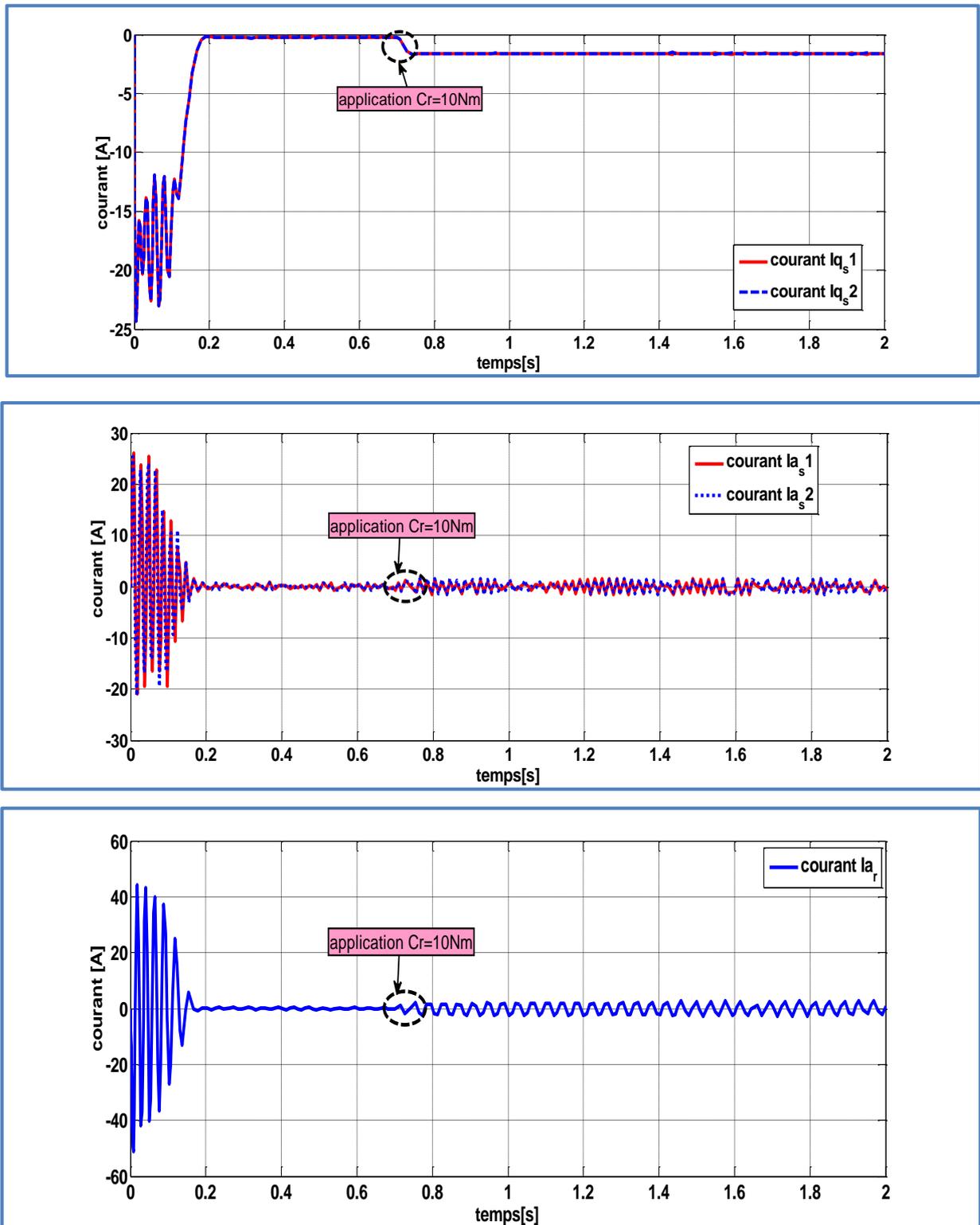


Figure (I.6) : Résultats de la simulation d'une MASDE (vitesse, couple, courant et flux)

❖ **Interprétation**

La figure I.5 a représenté l'évolution des caractéristiques de la MASDE alimentée directement par deux sources sinusoïdales et équilibrées, suivi de l'application des charges $C_r = 10$ [N.m]entre l'intervalle de temps $t = 0.7$ [s]

Cette dernière montre que :

Au démarrage et pendant le régime transitoire, la vitesse augmente et évolue d'une manière presque linéaire, et elle atteint 157 [rd/s]. Le couple électromagnétique, au début atteint sa valeur maximale de 160 [N.m]et présente des oscillations qui disparaissent où il rejoint 80 [N.m], puis il diminue d'une façon presque linéaire et se stable à sa valeur minimale de 10 [N.m]. Les courants statoriques (étoiles 1 et 2) et rotorique présentent des dépassements excessifs induisant de fort appel de courant lors de démarrage. L'application de la charge $C_r = 10$ [N.m] à l'instant $t = 0.7$ [s], engendre diminution aux niveaux de la vitesse et des courants statoriques quadratiques. Avec une application d'une charge de valeur 15[N.m] à $t=1.2$ [s], le couple électromagnétique tend vers la valeur du couple résistant en régime permanent

I.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone 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 par l'utilisation de transformation de Park en tenant compte certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Le système d'équation d'état de la machine nous avons validée à travers une simulation sous l'environnement Matlab Simulink, puis nous avons interprété les résultats obtenues.

Nous passerons dans prochaine chapitre à l'association de la MASDE par l'onduleur de tension à commande M.L.I.

Chapitre II Modélisation Onduleur Triphasée deux niveaux

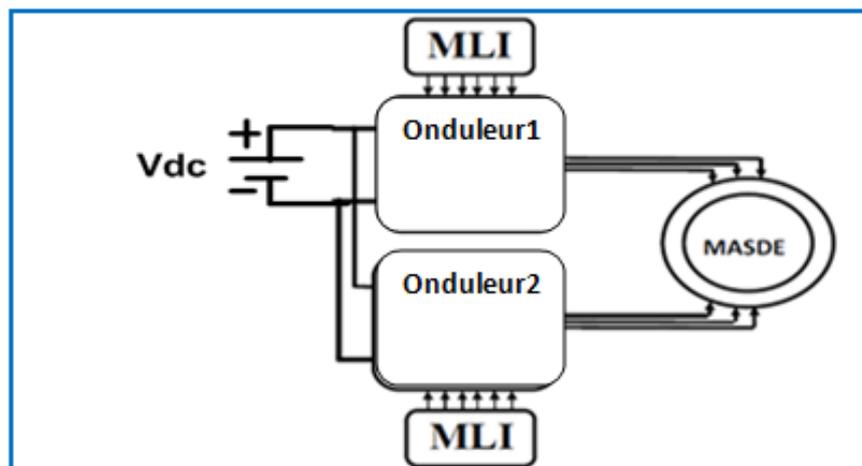
II.1 Introduction:

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. [13]

L'onduleur de tension à MLI triphasé permet l'échange d'énergie entre une source de tension continue et une charge triphasée (MASDE dans notre cas) et d'imposer à la machine des ondes de tension à amplitude et fréquence variables [8].

II.2 Alimentation de la MASDE:

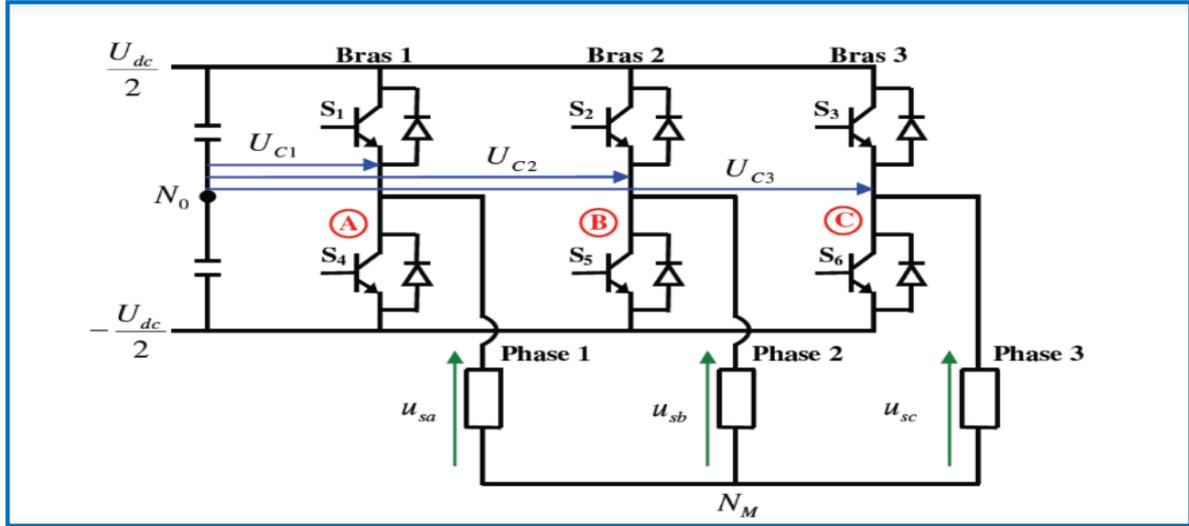
L'alimentation de la MASDE est connectée par deux onduleurs de tension à deux niveaux alimentés par une tension continue délivrant au système des tensions triphasées décalée entre eux par $\pi/6$, chaque étoile de la MASDE est connectée à un onduleur triphasé. La Figure (II. 1) présente l'association onduleur-MASDE. [9]



La Figure (II. 1) Alimentation de la machine asynchrone double étoile [9]

II.3 Modélisation de l'onduleur de tension à MLI :

L'onduleur de tension MLI est l'organe principal qui est le plus utilisé. Il est alimenté par une tension continue et délivre une tension triphasée de fréquence et amplitudes variables. L'onduleur de tension est constitué de trois bras dont chacun possède deux cellules de commutation (IGBT à titre d'exemple) montées en série et qui ne fonctionnent pas simultanément et d'une diode en antiparallèle de roue libre. [10] [11]



La Figure (II. 2) : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux. [10]

➤ Les tensions composées (tensions de ligne) sont données par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (II.1)$$

Où : V_{an}, V_{bn}, V_{cn} sont des tensions simples (tensions de phases)

$$U_{ca} - U_{ab} = V_{cn} - 2V_{an} + V_{bn} \quad (II.2)$$

Et comme le système est triphasé équilibré, on a :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (II.3)$$

Ce qui implique que :

$$V_{an} = -(V_{bn} + V_{cn}) \quad (II.4)$$

On remplace (II.3) dans (II.2) on aura :

$$U_{ca} - U_{ab} = -3V_{an} \quad (II.5)$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \quad (II.6)$$

$$\text{Donc : } \begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

La tension aux bornes des transistors s'écrit comme suit :

$$V_{T1} = \begin{cases} 0 & \text{si } S_1 = 1 \quad (\text{fermé}) \\ E & \text{si } S_1 = 0 \quad (\text{ouvert}) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

$$V_{T2} = \begin{cases} 0 & \text{si } S_2 = 1 \quad (\text{fermé}) \\ E & \text{si } S_2 = 0 \quad (\text{ouvert}) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

$$V_{T3} = \begin{cases} 0 & \text{si } S_3 = 1 \quad (\text{fermé}) \\ E & \text{si } S_3 = 0 \quad (\text{ouvert}) \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

On peut écrire donc :

$$\begin{cases} V_{T1} = E(1 - S_1) \\ V_{T2} = E(1 - S_2) \\ V_{T3} = E(1 - S_3) \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

On a :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{T2} - V_{T1} \\ U_{ca} = V_{T1} - V_{T3} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

On remplace V_{T1} et V_{T2} par leurs valeurs, on aura :

$$\begin{cases} U_{ab} = E(S_1 - S_2) \\ U_{ca} = E(S_3 - S_1) \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

On remplace (II.13) dans l'équation (II.6), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{E}{3}(2S_1 - S_2 - S_3) \\ V_{bn} = \frac{E}{3}(-S_1 + 2S_2 - S_3) \\ V_{cn} = \frac{E}{3}(-S_1 - S_2 + 2S_3) \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Donc on a le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{E}{3}(2S_1 - S_2 - S_3) \\ V_{bn} = \frac{E}{3}(-S_1 + 2S_2 - S_3) \\ V_{cn} = \frac{E}{3}(-S_1 - S_2 + 2S_3) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

La forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = E/3 \begin{pmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (\text{II.16})$$

II.4 Stratégie de commande par MLI sinusoïdale triangulaire :

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 appelée modulante et un signal triangulaire de haute fréquence, appelée la porteuse pour déterminer les instantes de commutations. [11]

II.5 Commande par modulation sinus-triangle :

La M.L.I sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire.

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [12]

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

$$\text{Pour étoile 1 : } \begin{cases} V_{réf_{sa1}} = \sqrt{2V_s} \cdot \sin(2\pi f t) \\ V_{réf_{sb1}} = \sqrt{2V_s} \cdot \sin\left(2\pi f t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{réf_{sc1}} = \sqrt{2V_s} \cdot \sin\left(2\pi f t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

$$\text{Pour étoile 2 : } \begin{cases} V_{réf_{sa2}} = \sqrt{2V_s} \cdot \sin(2\pi f t - \alpha) \\ V_{réf_{sb2}} = \sqrt{2V_s} \cdot \sin\left(2\pi f t - \frac{2\pi}{3} - \alpha\right) \\ V_{réf_{sc2}} = \sqrt{2V_s} \cdot \sin\left(2\pi f t - \frac{4\pi}{3} - \alpha\right) \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

f : La fréquence de référence.

❖ L'équation de la porteuse est donnée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} \left(4 \frac{t}{T_p} - 1\right) \text{ si } & 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ V_{pm} \left(-4 \frac{t}{T_p} + 3\right) \text{ si } & \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

$f_p = \frac{t}{T_p}$: La fréquence de modulation.

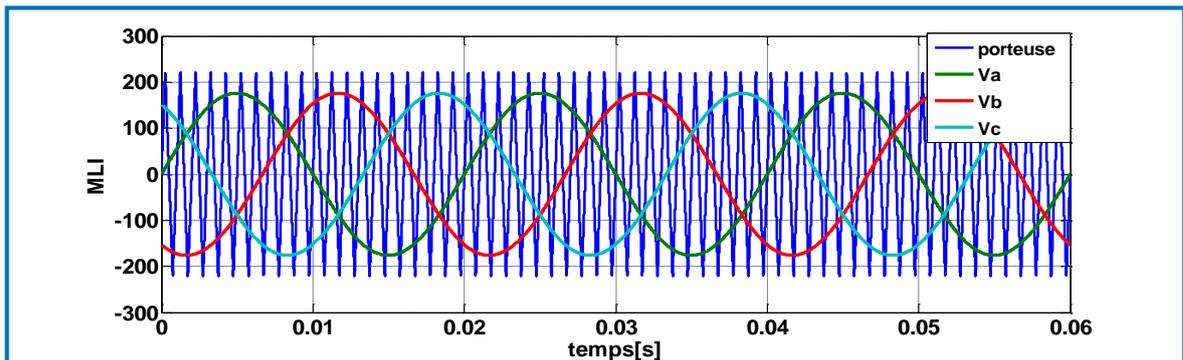
V_{pm} : La valeur crête de l'onde de modulation.

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

$$\text{Pour l'onduleur N}^\circ 1: \begin{cases} \text{si } V_{réf_{sa1}} > V_p \text{ alors } S_1 = 1 \text{ si non } S_1 = 0 \\ \text{si } V_{réf_{sb1}} > V_p \text{ alors } S_2 = 1 \text{ si non } S_2 = 0 \\ \text{si } V_{réf_{sc1}} > V_p \text{ alors } S_3 = 1 \text{ si non } S_3 = 0 \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

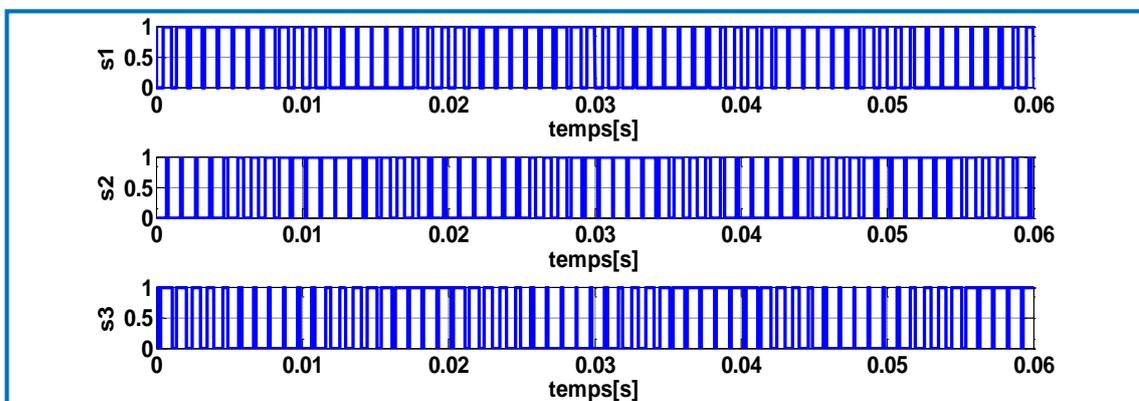
$$\text{Pour l'onduleur N}^\circ 2: \begin{cases} \text{si } V_{réf_{sa2}} > V_p \text{ alors } S_1 = 1 \text{ si non } S_1 = 0 \\ \text{si } V_{réf_{sb2}} > V_p \text{ alors } S_2 = 1 \text{ si non } S_2 = 0 \\ \text{si } V_{réf_{sc2}} > V_p \text{ alors } S_3 = 1 \text{ si non } S_3 = 0 \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

La figure (II.3) Présente la commande MLI, c'est l'intersection entre les signaux sinusoïdaux et la porteuse qui aura une forme triangulaire.



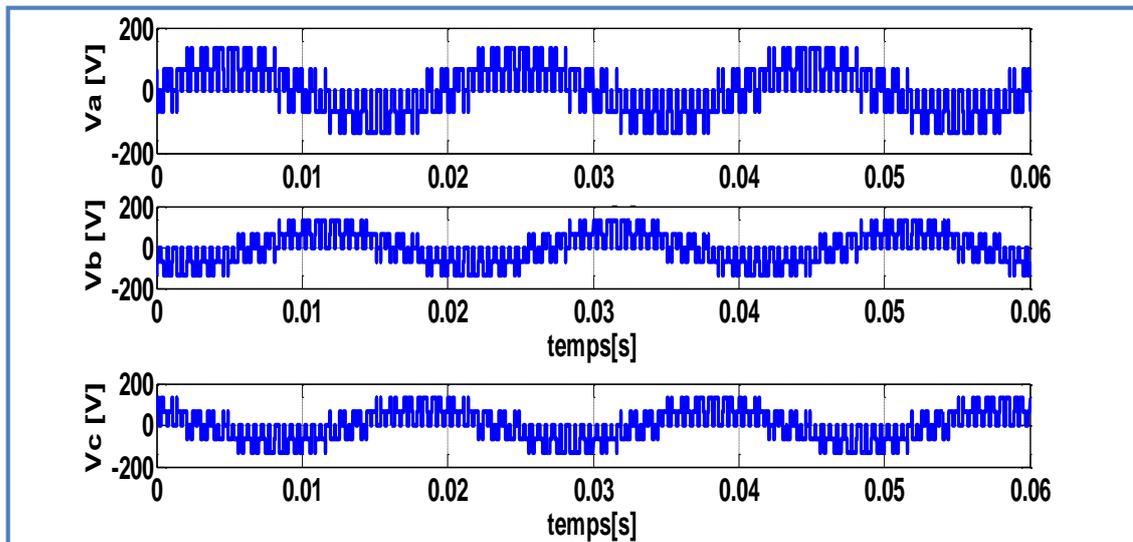
La Figure (II. 3) : Stratégie de commande à MLI

La figure (II.4) Présente les instants d'impulsions.



La Figure (II. 4) : Les instants d'impulsions.

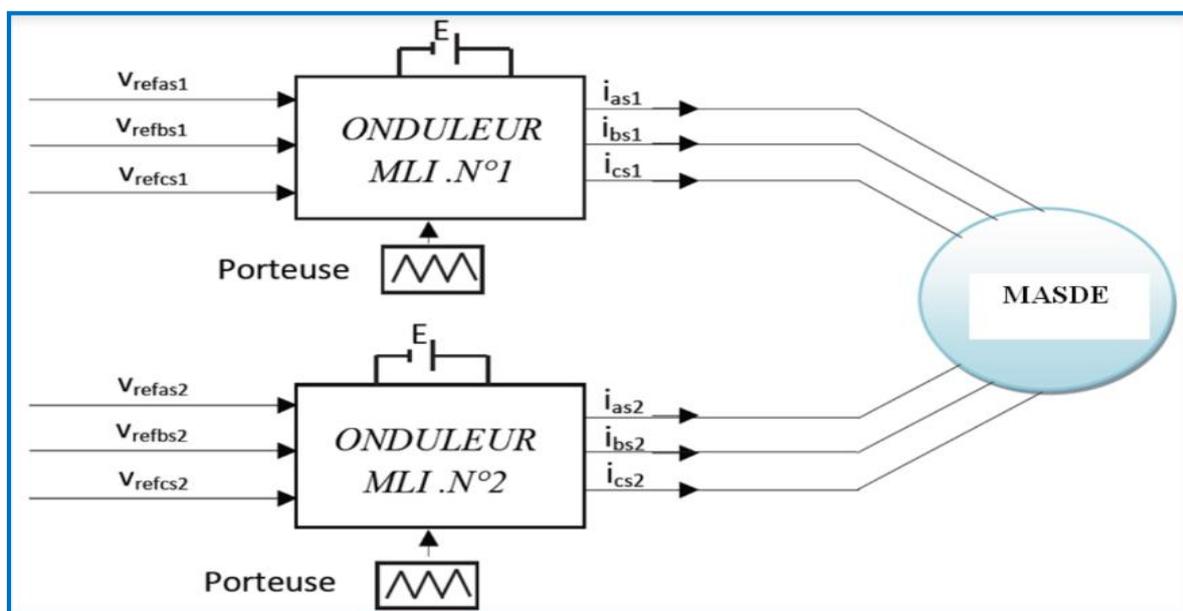
La figure (II.5) Présente la sortie de l'onduleur qui prend la forme créneaux (escalier).



La Figure (II.5) : Les tensions de sortie de l'onduleur

II.6 Association de MASDE avec onduleur de tension de commande MLI

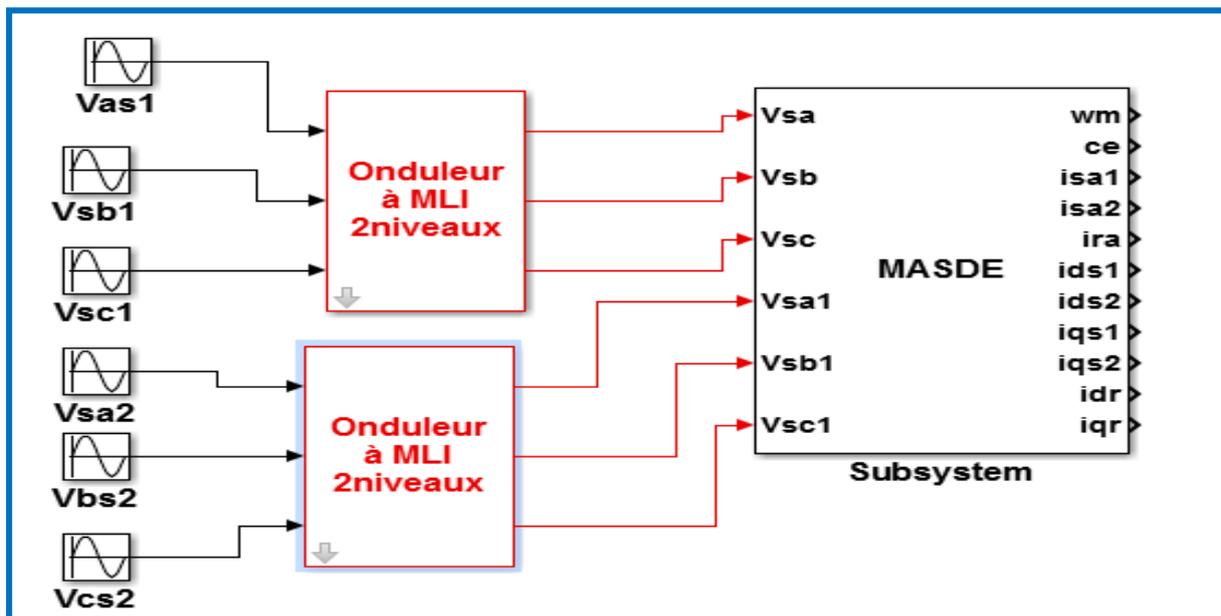
Le schéma d'association de MASDE avec deux onduleurs de tension commandée par MLI sinusoïdale triangle, est donné par la figure suivante (II.6).



La Figure (II. 6) : Schéma d'association de MASDE avec deux onduleurs de tension commandé par MLI [13]

II.7 Résultats de simulation:

La Figure (II.7) présente L'alimentation de MASDE par un onduleur triphasé deux niveaux commandé par MLI sous l'environnement Matlab Simulink.



La Figure (II.7) :L'alimentation de MASDE par un onduleur triphasé deux niveaux

La Figure (II.8) présente l'onduleur triphasé sous l'environnement Matlab Simulink:

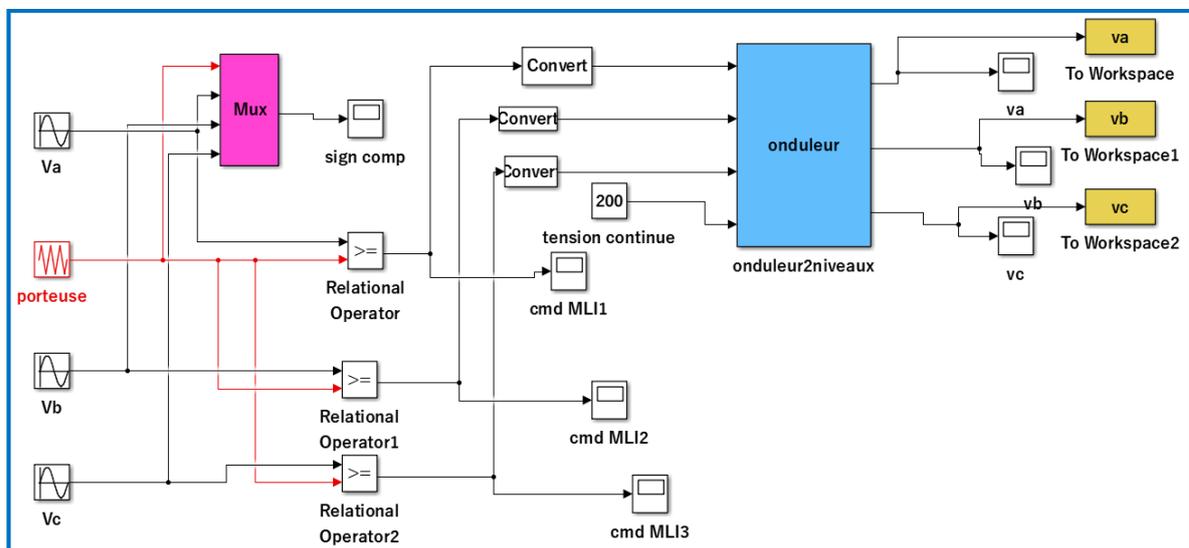
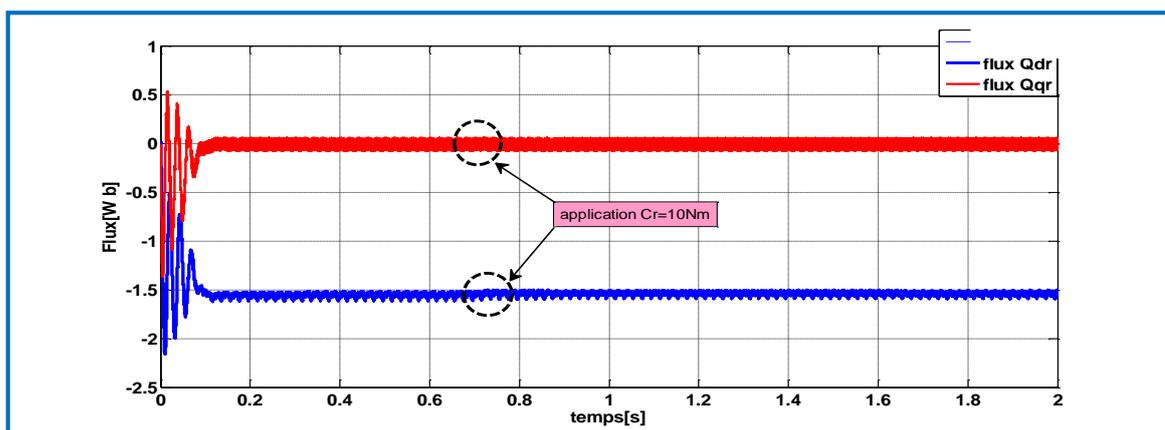
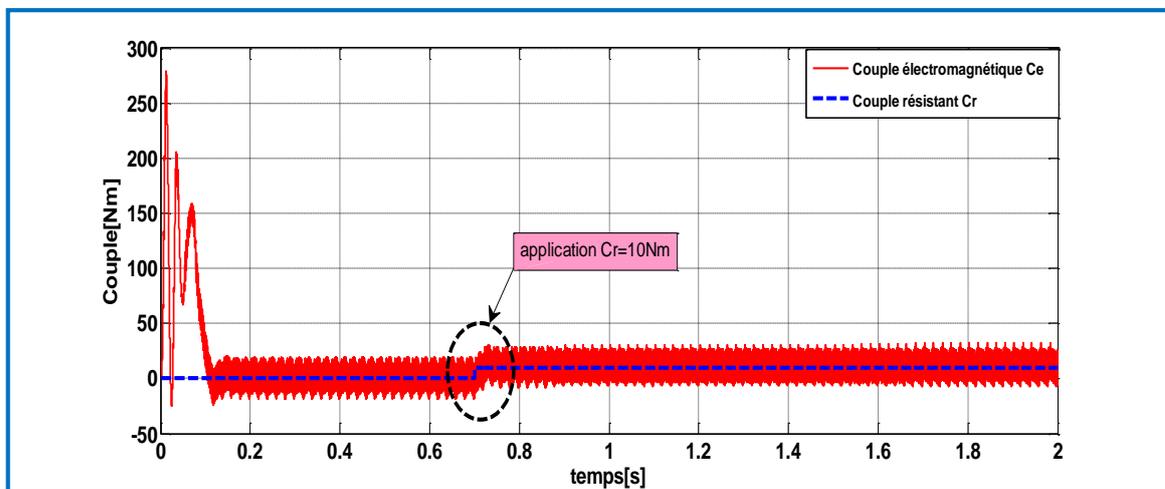
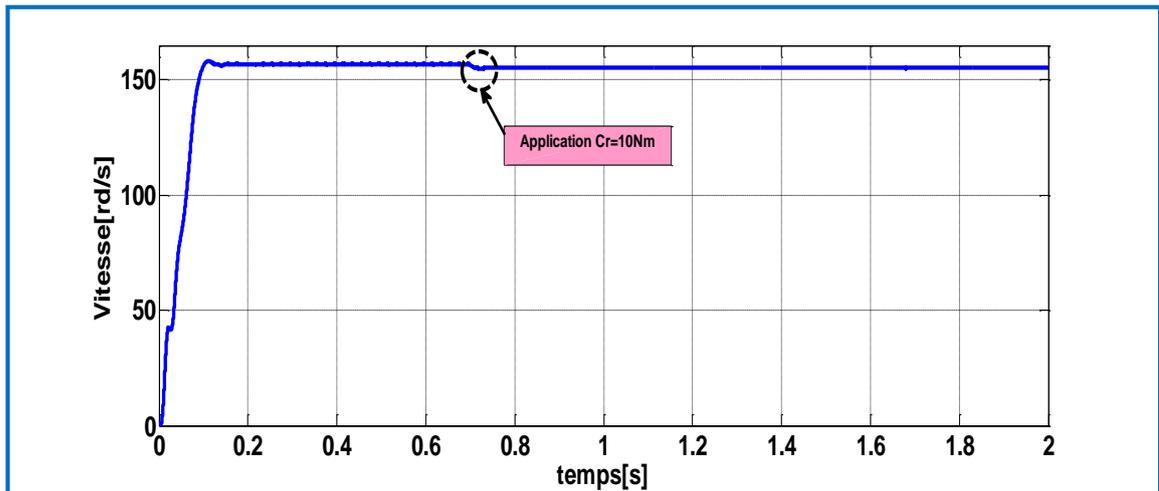


Figure (II.8) : Onduleur commandé par MLI sous Matlab/Simulink.

La figure(II.9) présente les résultats de simulation vitesse, couple électromagnétique, courant et flux de MASDE alimenté par un onduleur triphasé deux niveaux commandé par MLI.



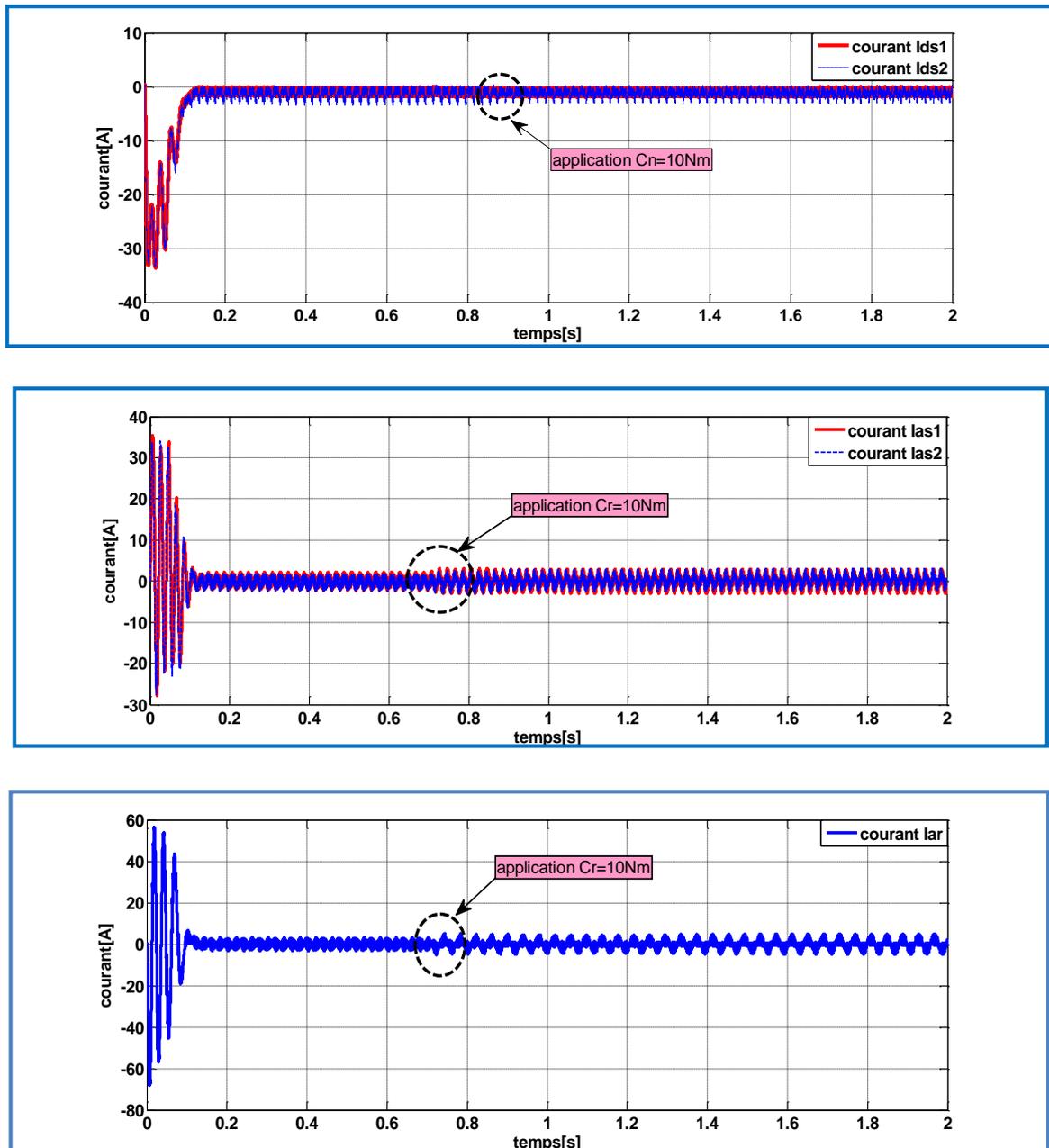


Figure (II.9) : Résultats de la simulation de MASDE alimenté par un onduleur triphasé deux niveaux commandé par MLI. (vitesse, couple, courant et flux)

❖ **Interprétation**

Au démarrage et pendant le régime transitoire, la vitesse augmente et évolue d’une manière presque linéaire, elle atteint 157 [rd/s] et durant l’application de la charge à l’instant $t=0.7[s]$ il se diminue. Le couple électromagnétique présente des oscillations durant le démarrage puis il diminue d’une façon presque linéaire et se stable à sa valeur minimale de 10 [N.m], Avec une application d’une charge de

valeur 10 [N.m] à $t=1.2$ [s], le couple électromagnétique tend vers la valeur du couple résistant en régime permanent

Les courants statoriques (étoiles 1 et 2) et rotorique présentent des dépassements excessifs induisant de fort appel de courant lors de démarrage. En remarque une augmentation d'amplitude de couple et des courants crée par MLI.

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons modélisé l'onduleur triphasé deux niveaux commandé par la stratégie MLI, comme nous avons présenté l'association onduleur-MASDE.

Les résultats de simulation montrent la nécessité de régler la vitesse du rotor indépendamment de la charge appliquée. L'objectif de chapitre suivant consacré sur la commande vectorielle qui permette d'avoir un contrôle indépendant du couple et du flux.

Chapitre III *Commande vectorielle de la machine
asynchrone double étoile*

III.1 Introduction :

De nos jours, de nombreux actionneurs associant des machines à courant alternatif et des convertisseurs statiques manifestent de nouvelles perspectives dans le domaine de l'entraînement à vitesse variable. Il existe plusieurs techniques pour commander les machines à courant alternatif. Parmi celles-ci, la commande scalaire, la vectorielle, la commande par retour d'état et la commande par le mode glissant etc. [14]

L'objectif de ce chapitre s'inscrit dans le fait de pouvoir appliquer la technique de la commande vectorielle à la machine asynchrone double étoile, en introduisant des régulateurs classiques proportionnels intégraux pour la régulation de vitesse et courant de la machine asynchrone double étoile. [15]

III.2 Origines de la Commande Vectorielle :

Les origines de la commande vectorielle, contrairement aux idées reçues, remontent à la fin du XIX^{ème} siècle et aux travaux de A. Blondel sur la théorie de la réaction des deux axes. Toutefois, compte tenu de la technologie utilisée à cette époque, il n'était pas question de transporter cette théorie à la commande des machines électriques. Ce n'est que vers la fin des années cinquante grâce à l'utilisation dans l'Europe de l'Est, de la méthode du phaseur temporel qui donnera l'idée de la commande vectorielle et qu'était appelée également contrôle par flux orienté [16].

III.3 Avantage de la commande Vectorielle : [17]

- ❖ Précision et stabilité en vitesse (avec capteur de vitesse)
- ❖ Contrôle dynamique du couple
- ❖ Performances équivalentes aux entraînements à courant continu

III.4 Inconvénient de la commande Vectorielle : [18] [17]

- ❖ Réglages et mise en service compliqués
- ❖ Nécessite la mise en place d'un capteur mécanique sur l'arbre de la MAS.
- ❖ Nécessite une modélisation de la machine

III.5 Principe de la commande vectorielle :

Le but de cette commande est d'assimiler le comportement de la machine asynchrone double étoile à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée [19] [20] [21]

La Figure (III.1) présente l'analogie entre la commande de machines à courant continu et la commande vectorielle à flux rotorique orienté de la MASDE

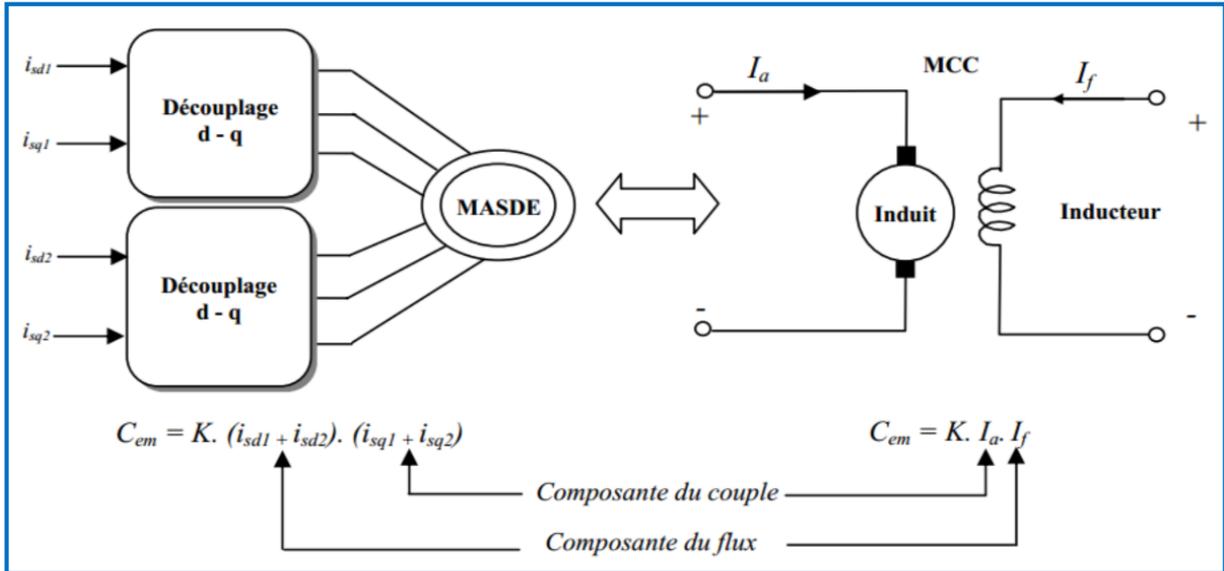


Figure (III.1): Analogie de la commande de la MASDE avec celle de la MCC [20] [21]

En effet dans une machine à courant continu le courant d’induit I_a contrôle le couple et le courant inducteur I_f contrôle le flux. L’expression du couple électromagnétique de la MCC est donné par :

$$C_{em} = K\phi I_a = K' I_a I_f \tag{III.1}$$

Avec :

ϕ : Flux imposé par le courant d’excitation.

I_a : Courant d’induit.

K, K' : Constants.

III.6 Procède d’orientation du flux:

Il existe trois types d’orientation du flux :

- Orientation du flux rotorique avec les conditions : $\phi_{dr} = \phi_r$, $\phi_{qr} = 0$
- Orientation du flux statorique avec les conditions : $\phi_{ds} = \phi_s$, $\phi_{qs} = 0$
- Orientation du flux d’entrefer avec les conditions : $\phi_{dm} = \phi_m$, $\phi_{qm} = 0$

Pour la MASDE, nous optons pour le choix d’orientation du flux rotorique, car cela permet d’obtenir un variateur de vitesse où le flux et le couple électromagnétique sont indépendamment commandés à travers les courants statoriques [22]

$$\phi_{dr} = \phi_r, \phi_{qr} = 0$$

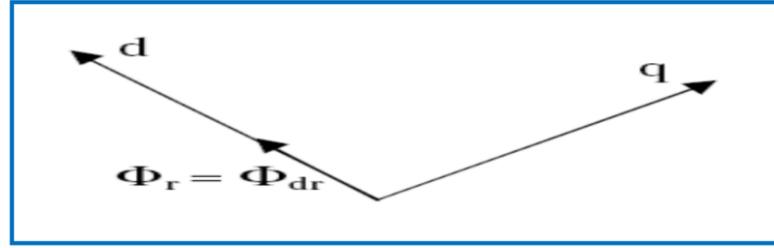


Figure (III.2) : Orientation du flux rotorique [22]

On aura la forme du couple électromagnétique suivante :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_m + L_r} \left(\Phi_{dr} (i_{qs1} + i_{qs2}) - \Phi_{qr} (i_{ds1} + i_{ds2}) \right) \quad (\text{III.2})$$

On appliquant la condition d'orientation de flux rotorique l'équation (III.2) devient :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_m + L_r} \Phi_{dr} (i_{qs1} + i_{qs2}) = K \Phi_{qr} (i_{ds1} + i_{ds2}) \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$$K = P \frac{L_m}{L_m + L_r}$$

D'après l'équation (III.3) nous constatons que le couple électromagnétique résulte de l'interaction d'un terme de flux et d'un terme de courant. Cette expression rassemble à l'expression de couple de la machine à courant continu à excitation séparée. On déduit donc que le fonctionnement de la machine asynchrone double étoile, avec sa l'application de condition de la commande vectorielle est similaire à celui de la machine à courant continu à excitation séparée. [22]

En prenant les systèmes d'équations (I.44), (I.45) en remplaçant Φ_{rd} par Φ_r et Φ_{rq} par 0 cela nous donne :

$$V_{sd1} = R_{s1} i_{sd1} + (L_{s1} + L_m) \sigma \frac{di_{sd1}}{dt} + \left(\frac{L_m L_r}{L_m + L_r} \right) \frac{di_{sd2}}{dt} + \left(\frac{L_m}{L_m + L_r} \right) \frac{d\Phi_r}{dt} \omega_s [(L_{s1} + L_m) \sigma i_{sq1} + \frac{L_m L_r}{L_m + L_r} i_{sq2}] \quad (\text{III.4})$$

$$V_{sq1} = R_{s1} i_{sq1} + (L_{s1} + L_m) \sigma \frac{di_{sq1}}{dt} + \left(\frac{L_m L_r}{L_m + L_r} \right) \frac{di_{sq2}}{dt} + \omega_s [(L_{s1} + L_m) \sigma i_{sd1} + \left(\frac{L_m}{L_m + L_r} \right) i_{sd2} + \left(\frac{L_m L_r}{L_m + L_r} \right) \Phi_r] \quad (\text{III.5})$$

$$V_{sd2} = R_{s2} i_{sd2} + (L_{s2} + L_m) \sigma \frac{di_{sd2}}{dt} + \left(\frac{L_m L_r}{L_m + L_r} \right) \frac{di_{sd1}}{dt} + \left(\frac{L_m}{L_m + L_r} \right) \frac{d\Phi_r}{dt} \omega_s [(L_{s2} + L_m) \sigma i_{sq2} + \frac{L_m L_r}{L_m + L_r} i_{sq1}] \quad (\text{III.6})$$

$$V_{sq2} = R_{s2} i_{sq2} + (L_{s2} + L_m) \sigma \frac{di_{sq2}}{dt} + \left(\frac{L_m L_r}{L_m + L_r} \right) \frac{di_{sq1}}{dt} + \omega_s [(L_{s2} + L_m) \sigma i_{sd2} + \frac{L_m}{L_m + L_r} i_{sd1} + \frac{L_m L_r}{L_m + L_r} \Phi_r] \quad (\text{III.7})$$

$$V_{rd} = 0 = \frac{L_m}{T_r} (i_{sd1} + i_{sd2}) + \frac{1}{T_r} \phi_r + \frac{d\phi_r}{dt} \quad (III.8) \quad V_{rq} = 0 = \frac{L_m}{T_r} (i_{sq1} + i_{sq2}) + (\omega_s - \omega_r)\phi_r \quad (III.9)$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad (III.10)$$

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_m + L_r} (\phi_r (i_{qs1} + i_{qs2})) \quad (III.11)$$

Nous avons à flux constant $\phi_r = C^{st} \Rightarrow \frac{d\phi_r}{dt} = 0$. Alors le système d'équations précédent devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd1} = R_{s1} i_{sd1} + (L_{s1} + L_m) \sigma \frac{di_{sd1}}{dt} - \omega_s \left(\frac{L_r}{R_r} \phi_r \omega_{gl} + L_{s1} i_{sq1} \right) \\ V_{sq1} = R_{s1} i_{sq1} + (L_{s1} + L_m) \sigma \frac{di_{sq1}}{dt} - \omega_s (\phi_r + L_{s1} i_{sd1}) \\ V_{sd2} = R_{s2} i_{sd2} + (L_{s2} + L_m) \sigma \frac{di_{sd2}}{dt} - \omega_s \left(\frac{L_r}{R_r} \phi_r \omega_{gl} + L_{s2} i_{sq2} \right) \\ V_{sq2} = R_{s2} i_{sq2} + (L_{s2} + L_m) \sigma \frac{di_{sq2}}{dt} - \omega_s (\phi_r + L_{s2} i_{sd2}) \\ \omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \frac{L_m}{T_r \phi_r} (i_{qs1} + i_{qs2}) \\ \phi_r + T_r \frac{d\phi_r}{dt} = L_m (i_{qs1} + i_{qs2}) \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - k_f \Omega \\ C_{em} = P \frac{L_m}{L_m + L_r} (\phi_r (i_{qs1} + i_{qs2})) \end{array} \right. \quad (III.12)$$

Avec :

$$T_r = \frac{L_m + L_r}{R_r}$$

La figure(III.3) présent la commande par orientation de flux rotorique de MASDE.

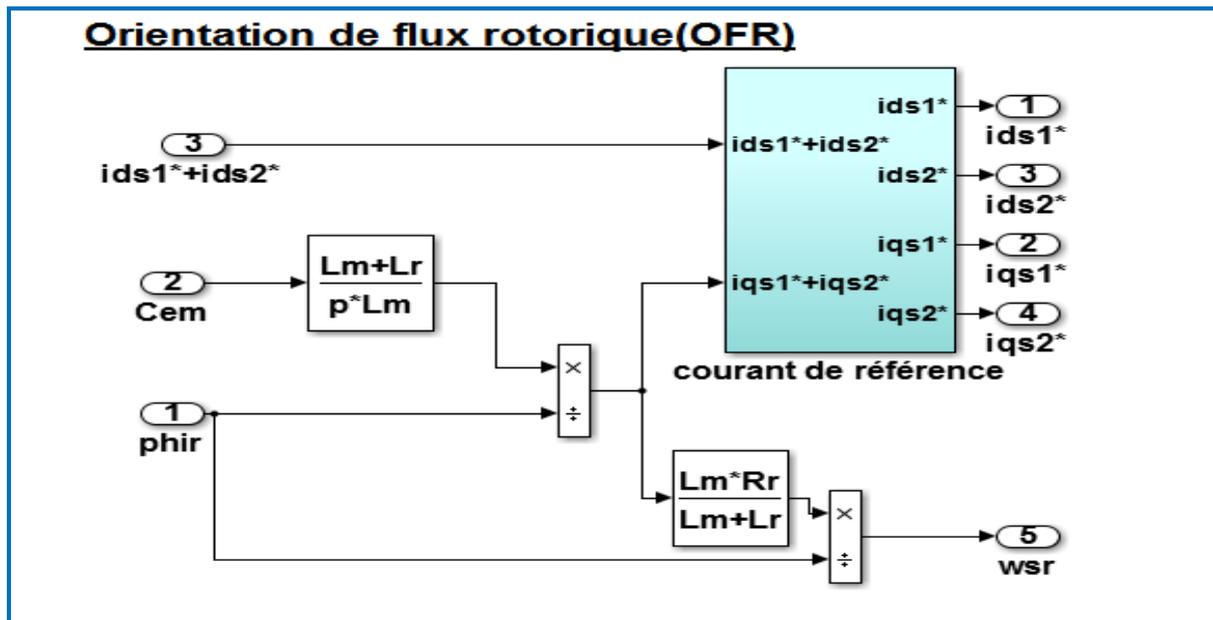


Figure (III.3) : Bloc orientation de flux rotorique

Le système d'équation (III.12) montre un mauvais couplage entre les tension V_{sd1} , V_{sq1} , V_{sd2} , V_{sq2} et les courants i_{sd1} , i_{sd2} , i_{sq1} , i_{sq2} , ce qui nécessite l'utilisation de circuits de découplage pour réaliser le contrôle

III.6.1 Découplage par compensation :

Le système d'équations (III.12) montre le couplage entre tension et courant statorique (entre flux et couple). Il est donc important de parvenir à un découplage.

Le but est de limiter l'effet d'une entrée à une seule sortie. Pour cela, on utilise un découplage compensateur.

On définit des nouvelles variables de commande V_{sd1} , V_{sd2} , V_{sq1} et V_{sq2}

$$\begin{cases} V_{sd1}^* = V_{sd1} - e_{sd1} \\ V_{sd2}^* = V_{sd2} - e_{sd2} \\ V_{sq1}^* = V_{sq1} - e_{sq1} \\ V_{sq2}^* = V_{sq2} - e_{sq2} \end{cases} \quad (III.13)$$

Avec

$$\begin{cases} e_{sd1} = \omega_s(L_{s1}i_{sq1}) + \frac{L_r}{R_r}\phi_r\omega_{gl} \\ e_{sd2} = \omega_s(L_{s2}i_{sq2}) + \frac{L_r}{R_r}\phi_r\omega_{gl} \\ e_{sq1} = \omega_s(L_{s1}i_{sd1}) \\ e_{sq2} = \omega_s(L_{s1}i_{sd2}) \end{cases} \quad (III.14)$$

On définit un nouveau système où les actions sur les axes d et q sont découplées :

$$\begin{cases} V_{sd1} = R_{s1}i_{sd1} + (L_{s1} + L_m)\sigma \frac{di_{sd1}}{dt} \\ V_{sd2} = R_{s2}i_{sd2} + (L_{s1} + L_m)\sigma \frac{di_{sd1}}{dt} \\ V_{sq1} = R_{s1}i_{sq1} + (L_{s2} + L_m)\sigma \frac{di_{sq1}}{dt} \\ V_{sq2} = R_{s2}i_{sq2} + (L_{s2} + L_m)\sigma \frac{di_{sq2}}{dt} \end{cases} \quad (III.15)$$

La figure (III.4) Présente Découplage par addition des termes de compensation.

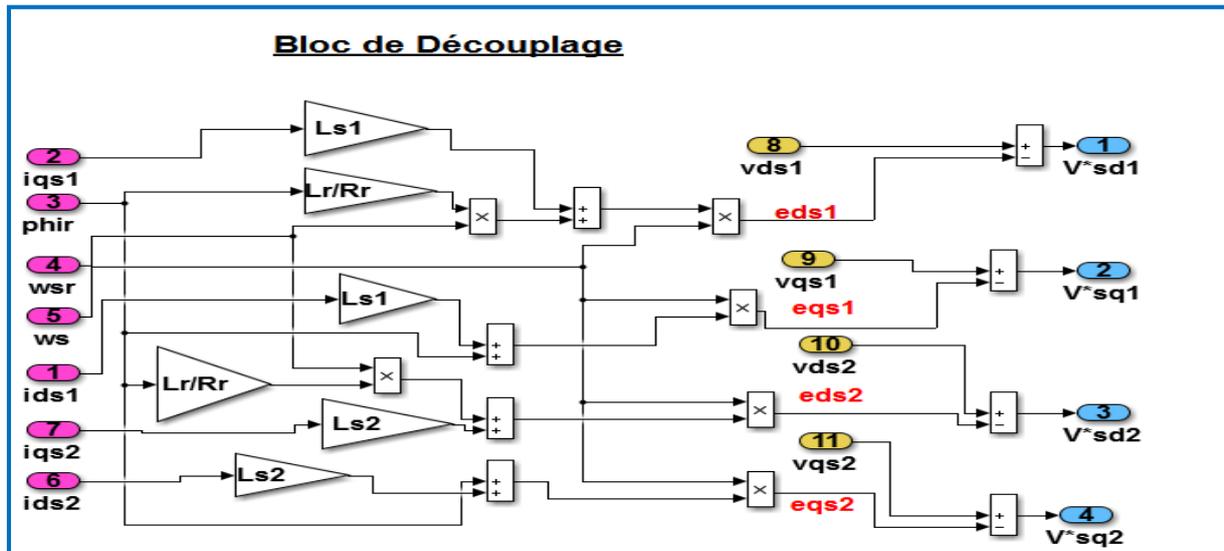


Figure (III.4) : Bloc de Découplage

III.7 La commande vectorielle :

Pour la réalisation de la commande vectorielle d'une machine asynchrone à double étoile, il existe deux méthodes :

- Méthode de la commande directe.
- Méthode de la commande indirecte.

III.7.1 Méthode directe :

Cette méthode consiste à déterminer la position et le module du flux quel que soit le régime de fonctionnement. Pour cela deux procédés sont utilisés : [23]

- La mesure du flux dans l'entrefer de la machine à l'aide de capteur. L'inconvénient principal de cette technique réside dans le fait que les capteurs du flux sont mécaniquement très fragiles et ne peuvent pas fonctionner dans les conditions sévères telles que les vibrations et les échauffements excessifs.
- L'estimation du flux à l'aide des méthodes mathématiques.

III.7.2 Méthode indirecte :

Le principe de cette méthode consiste à ne pas utiliser l'amplitude du flux rotorique mais seulement sa position. La descriptive "méthode indirecte" signifie qu'on peut éliminer un estimateur ou d'un capteur du flux mais elle exige la présence d'un capteur de position du rotor. [24]

III.8 Commande Vectorielle directe de la MASDE (DFOC)

Nous proposons dans notre étude la commande vectorielle directe avec application d'un régulateur classique Proportional Intégrale (PI) pour la régulation de vitesse et courant ainsi flux de la machine asynchrone double étoile alimentée par onduleur de tension, cette technique nécessite l'estimation de flux pour déterminer la position. [25]

III.8.1 Synthèse des régulateurs PI :

III.8.1.1 Régulateur de courant

L'utilisation d'un régulateur de courant a pour but d'assurer une meilleure robustesse vis-à-vis des perturbations internes ou externes. (Figure III.5) représente le schéma fonctionnel de la régulation du courant, valable selon les deux axes d et q

La fonction de transfert en boucle fermée de la (Figure III.5) est écrite comme suit :

$$FT = \frac{i_{sd1}}{V_{ds1ref}} = \frac{1}{R_{s1} + S(L_{s1} + L_m)\sigma} \quad (III.16)$$

$$F(PI) = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \left(\frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s} \right) \quad (III.17)$$

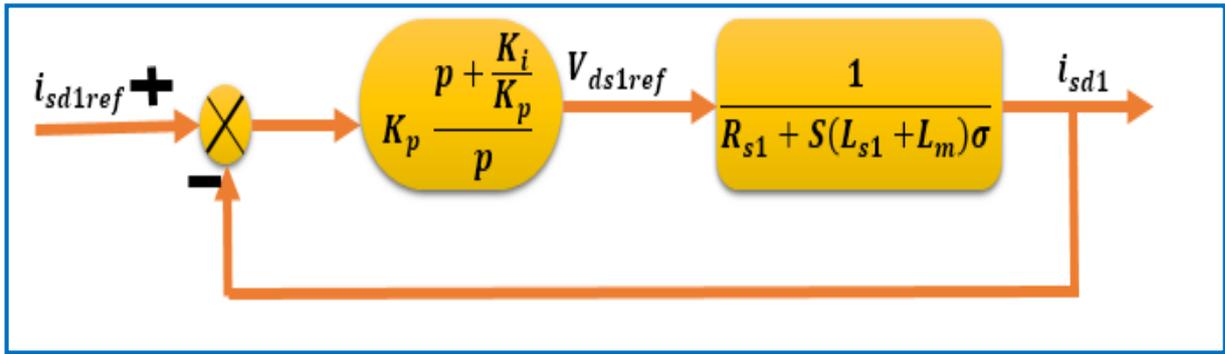


Figure (III.5) : Boucle de régulation de courant

$$FTBO = \left(\frac{1}{R_{s1} + P(L_{s1} + L_m)\sigma} \right) \left(K_p \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{p} \right) = \left(\frac{1}{\frac{(L_{s1} + L_m)\sigma}{R_{s1}} + P} \right) \left(K_p \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{p} \right) \quad (III.18)$$

Pour compenser le pôle du système avec le zéro: $\left(\frac{R_{s1}}{(L_{s1} + L_m)\sigma} + P \right) = p + \frac{K_i}{K_p}$, ce qui se traduit par la condition :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_{s1}}{(L_{s1} + L_m)\sigma} \quad (III.19)$$

Transfert en boucle ouverte s'écrit maintenant :

$$\frac{K_p}{p} \left(\frac{1}{(L_{s1} + L_m)\sigma} \right) = FTBO \quad (III.20)$$

$$FTBF = \frac{FTPO}{1 + FTPO} = \frac{\frac{K_p}{p} \left(\frac{1}{(L_{s1} + L_m)\sigma} \right)}{1 + \frac{K_p}{p} \left(\frac{1}{(L_{s1} + L_m)\sigma} \right)} \quad (III.21)$$

$$FTBF = \frac{\frac{K_p}{(L_{s1} + L_m)\sigma} \frac{1}{p}}{\left(\frac{p(L_{s1} + L_m)\sigma + K_p}{p(L_{s1} + L_m)\sigma} \right)} \quad (III.22)$$

$$FTBF = \frac{1}{p \frac{(L_{s1} + L_m)\sigma}{K_p} + 1} \quad (III.23)$$

L'équation peut être imposée de la forme $\frac{1}{1+PT}$ Par identifications on trouve :

$$T = \frac{(L_{s1}+L_m)\sigma}{K_p} \text{ donc } K_p = \frac{T}{(L_{s1}+L_m)\sigma}$$

En imposant le temps de réponse :

$$T_r = 3T \text{ (critere de } \pm 5\%)$$

$$\text{Donc : } K_p = \frac{T_r}{3(L_{s1}+L_m)\sigma}$$

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_{s1}}{(L_{s1}+L_m)\sigma} \tag{III.24}$$

$$K_i = \frac{R_{s1}}{(L_{s1}+L_m)\sigma} K_p = \frac{R_{s1}T_r}{3((L_{s1}+L_m)\sigma)^2} \tag{III.25}$$

Le même principe s'applique sur le régulateur de courant i_{sq1} , i_{sd2} et i_{sq2}

III.8.1.2 Régulateur de vitesse

Le schéma de régulation de la vitesse est présent sur la Figure(III.6) :

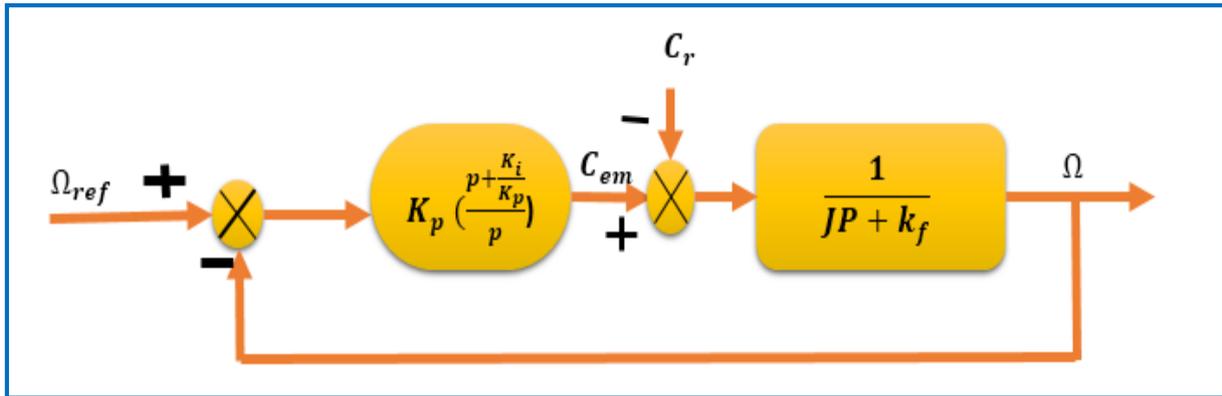


Figure (III.6) : Boucle de régulation de vitesse

Pour le réglage de la vitesse, plusieurs types peuvent être appliqués le régulateur PI est le plus simple, d'où la fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - k_f \Omega \tag{III.26}$$

$$(JP + k_f)\Omega = C_{em} - C_r \tag{III.27}$$

$$\Omega = \frac{C_{em}}{(JP+k_f)} - \frac{C_r}{(JP+k_f)} \tag{III.28}$$

$$\Omega = \frac{\Omega_{ref} - \Omega}{(JP+k_f)} \left(\frac{K_p p + K_i}{p} \right) - \frac{C_r}{(JP+k_f)} \tag{III.29}$$

$$\Omega + \frac{\Omega(K_p p + K_i)}{(JP+k_f)p} = \frac{\Omega_{ref}(K_p p + K_i)}{(JP+k_f)p} - \frac{C_r}{(JP+k_f)} \tag{III.30}$$

$$\frac{\Omega(JP+k_f)p}{(JP+k_f)p} + \frac{\Omega(K_p p+K_i)}{(JP+k_f)p} = \frac{\Omega_{ref}(K_p p+K_i)}{(JP+k_f)p} - \frac{C_r}{(JP+k_f)} \quad (III.31)$$

$$\Omega\left(\frac{(JP^2+k_f P)+(K_p p+K_i)}{(JP+k_f)p}\right) = \frac{\Omega_{ref}(K_p p+K_i)}{(JP+k_f)p} - \frac{C_r}{(JP+k_f)} \quad (III.32)$$

$$\Omega = \frac{\frac{\Omega_{ref}(K_p p+K_i)}{(JP+k_f)p}}{\frac{(JP^2+(k_f+K_p)P)+K_i}{(JP+k_f)p}} - \frac{\frac{C_r}{(JP+k_f)}}{\frac{(JP^2+(k_f+K_p)P)+K_i}{(JP+k_f)p}} \quad (III.33)$$

$$\Omega = \frac{\Omega_{ref}(K_p p+K_i)}{(JP^2+(k_f+K_p)P)+K_i} - \frac{C_r P}{(JP^2+(k_f+K_p)P)+K_i} \quad (III.34)$$

$$\Omega = \frac{\Omega_{ref} \frac{(K_p p+K_i)}{K_i}}{\left(\frac{J}{K_i} P^2 + \frac{(k_f+K_p)}{K_i} P\right)+1} - \frac{C_r \frac{P}{K_i}}{\left(\frac{J}{K_i} P^2 + \frac{(k_f+K_p)}{K_i} P\right)+1} \quad (III.35)$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique de 2^{ème} ordre.

En identifiant le dénominateur à la forme canonique $\frac{1}{1 + \frac{2\varepsilon}{w_n} P + \frac{P^2}{w_n^2}}$, nous avons à résoudre le système

d'équation suivant :

$$\frac{J}{K_i} = \frac{1}{w_n^2}, \quad \frac{(k_f+K_p)}{K_i} = \frac{2\varepsilon}{w_n}$$

Alors

$$K_i = \frac{1}{J w_n^2}, \quad K_p = \frac{2\varepsilon}{w_n} K_i - k_f = K_p = \frac{2\varepsilon}{J w_n^3} - k_f$$

III.8.1.3 Régulateur du flux :

Le schéma de régulation du flux est réalisé en admettant que : $i_{ds1ref} = i_{ds2ref}$ (la figure (III.7))

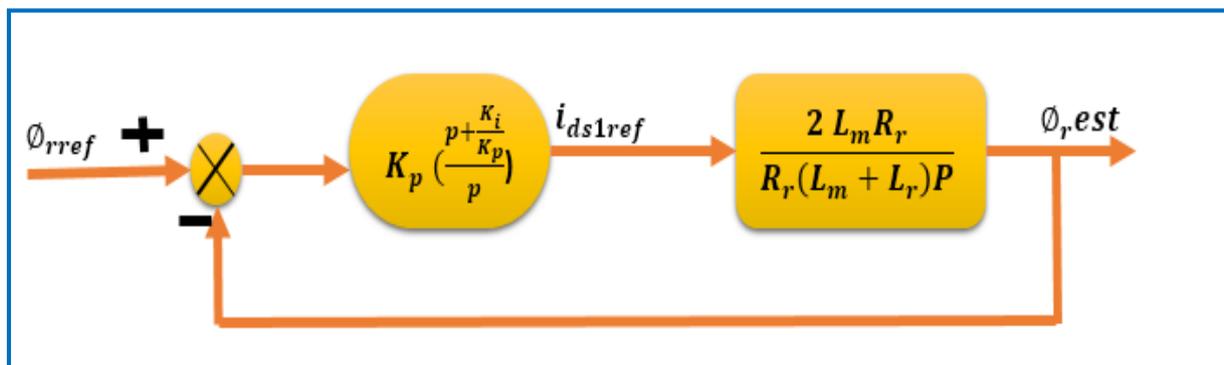


Figure (III.7): Boucle de régulation du flux

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$\frac{\phi_{rest}}{\phi_{rref}} = \frac{(K_i + K_p S) 2R_r L_m}{(L_r + L_m) S^2 + (R_r + 2K_p R_r L_m) S + (2K_i R_r L_m)} \quad (III.36)$$

Par principe d'imposition des pôles, on obtient :

$$\begin{cases} K_i = \frac{1}{2L_m \tau} \\ K_p = \frac{L_r + L_m}{2R_r L_m \tau} \end{cases} \quad (III.37)$$

On prend :

$$\tau = \tau_r$$

III.8.1.4 Bloc de défluxage :

Le principe de défluxage est de maintenir le flux rotorique égale à sa valeur nominale ϕ_{rn} lors du fonctionnement à vitesse inférieure ou égale à la vitesse de rotation nominale Ω_{rn} et on le faisant diminuer selon l'expression (III.38) lorsque la vitesse de rotation dépasse Ω_{rn} . [26]

$$\phi_r^* = \begin{cases} \phi_{rn} & \text{si } |\Omega_r| \leq \Omega_{rn} \\ \frac{\Omega_{rn}}{\Omega_r} * \phi_{rn} & \text{si } |\Omega_r| > \Omega_{rn} \end{cases} \quad (III.38)$$

III.8.1.5 Estimateur du flux :

Le système de contrôle DFOC de MASDE se compose de deux boucles de contrôle primordiales pour la régulation du flux et de la vitesse. La magnitude et la position angulaires du vecteur de flux du rotor sont déterminées par l'intermédiaire d'un bloc d'estimation.

L'estimation du flux peut être obtenue à partir du modèle machine. En particulier dans le cas de la machine asynchrone double étoile, l'estimation de flux se fait en utilisant les courants. [9]

Les Figure (III.8) et (III.9) c'est la Représentation schématique de l'Estimateur du flux

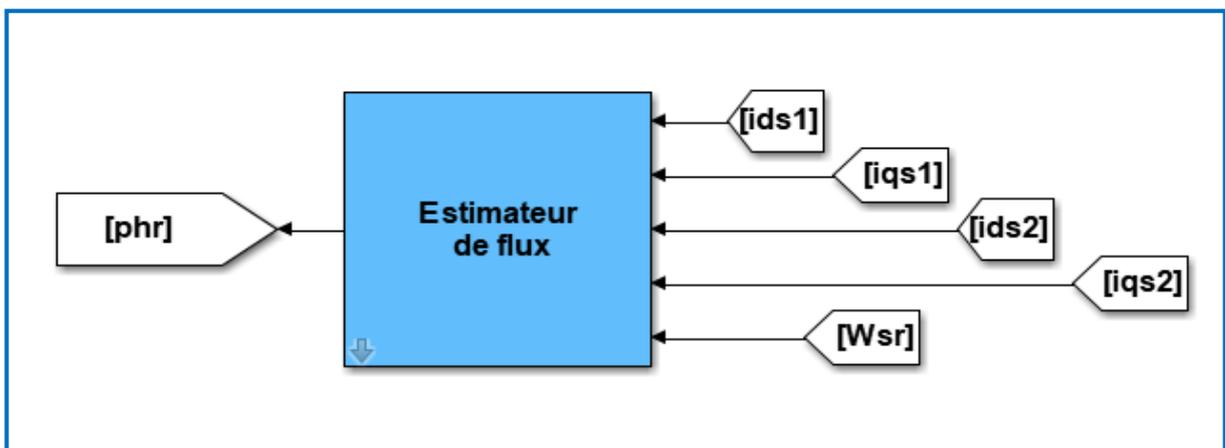


Figure (III.8): Estimateur du flux

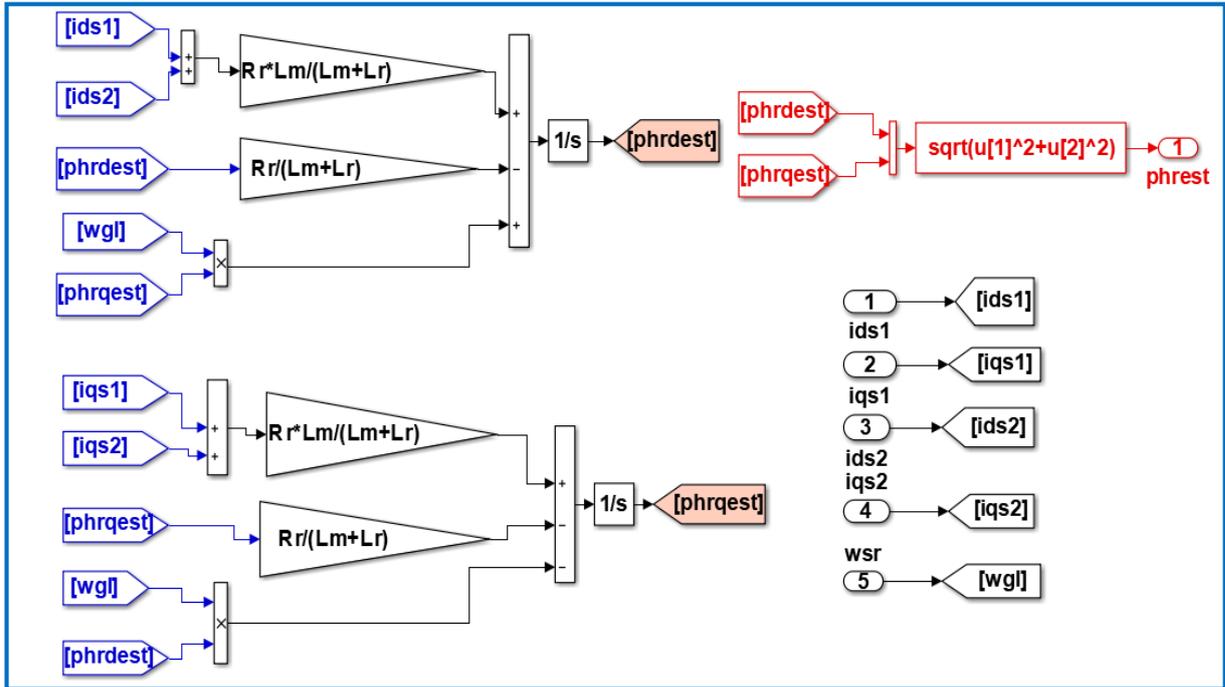


Figure (III.9): Représentation schématique de l'estimateur du flux

Cela constitue une forme d'estimateur, utilisant les équations dans le modèle de Park suivantes :

$$\begin{cases} \Phi_r + T_r \frac{d\Phi_r}{dt} = L_m (i_{ds1} + i_{ds2}) \\ C_{em} = P \frac{L_m}{L_m + L_r} (\Phi_r (i_{qs1} + i_{qs2})) \\ \omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \frac{L_m}{T_r \Phi_r} (i_{qs1} + i_{qs2}) \end{cases} \quad (III.16)$$

Le flux rotorique est estimé par les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{drest}}{dt} = \frac{R_r L_m}{L_r + L_m} (i_{ds1} + i_{ds2}) + \omega_{glref} \Phi_{qrest} - \frac{R_r}{L_r + L_m} \Phi_{drest} \\ \frac{d\Phi_{qrest}}{dt} = \frac{R_r L_m}{L_r + L_m} (i_{qs1} + i_{qs2}) + \omega_{glref} \Phi_{drest} - \frac{R_r}{L_r + L_m} \Phi_{qrest} \end{cases} \quad (III.17)$$

Le module du flux rotorique est calculé par :

$$\Phi_{rest} = \sqrt{\Phi_{drest}^2 + \Phi_{qrest}^2} \quad (III.18)$$

III.9 Résultats de simulation de la commande la commande vectorielle directe de MASDE:

La figure (III.10) présente le schéma global de la commande vectorielle directe de la machine asynchrone double étoile.

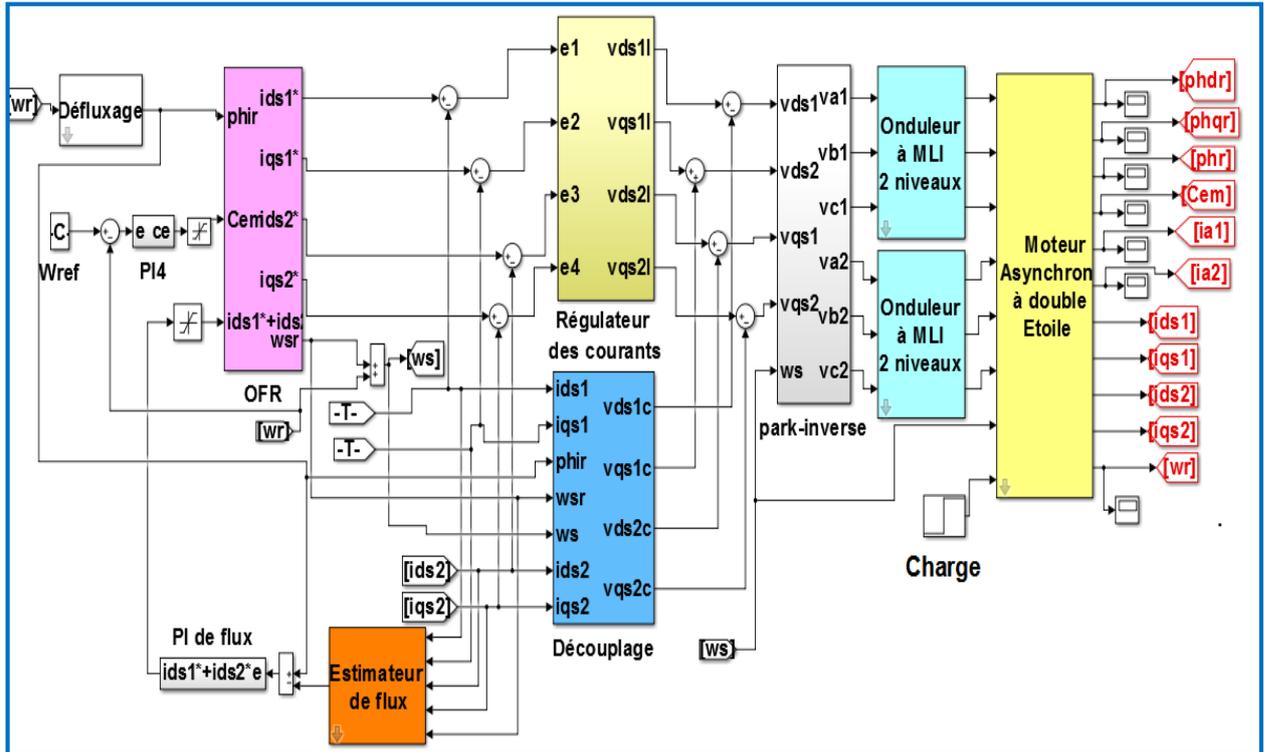
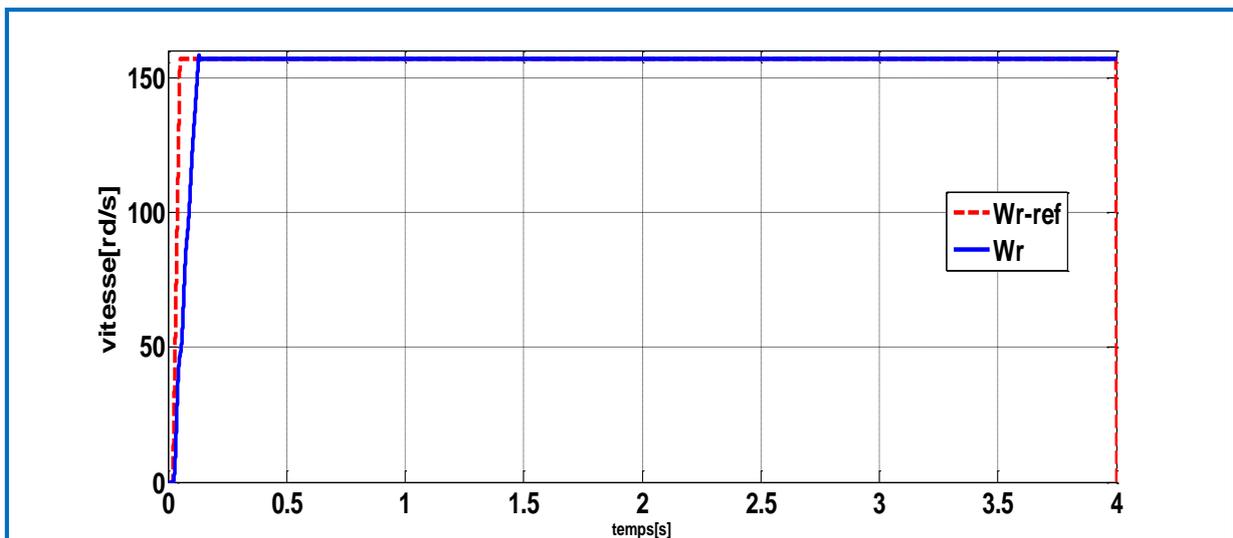
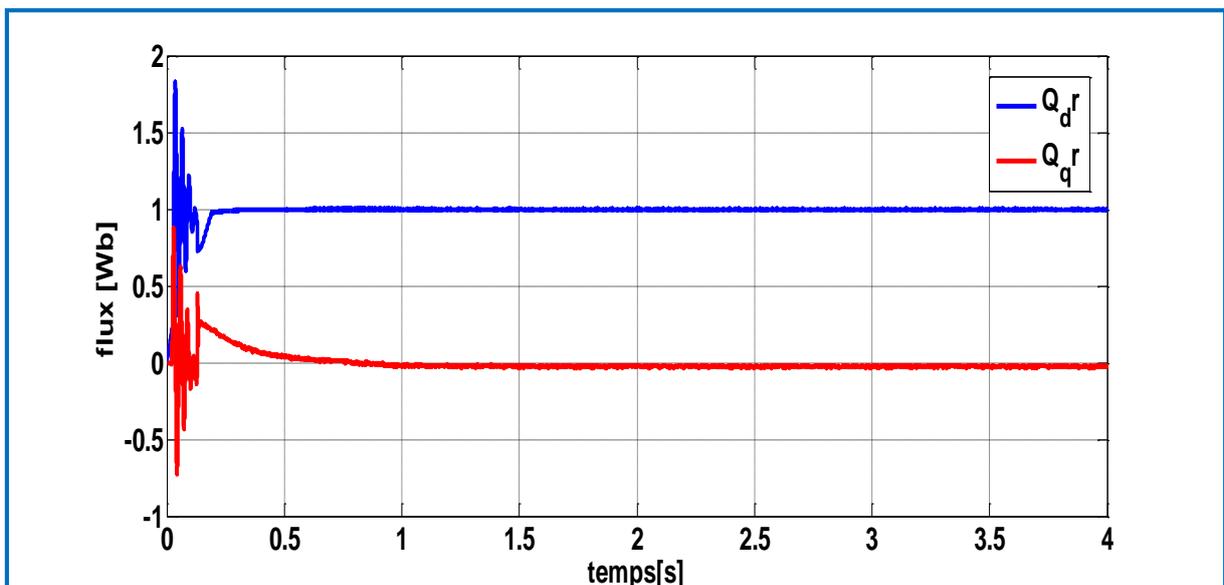
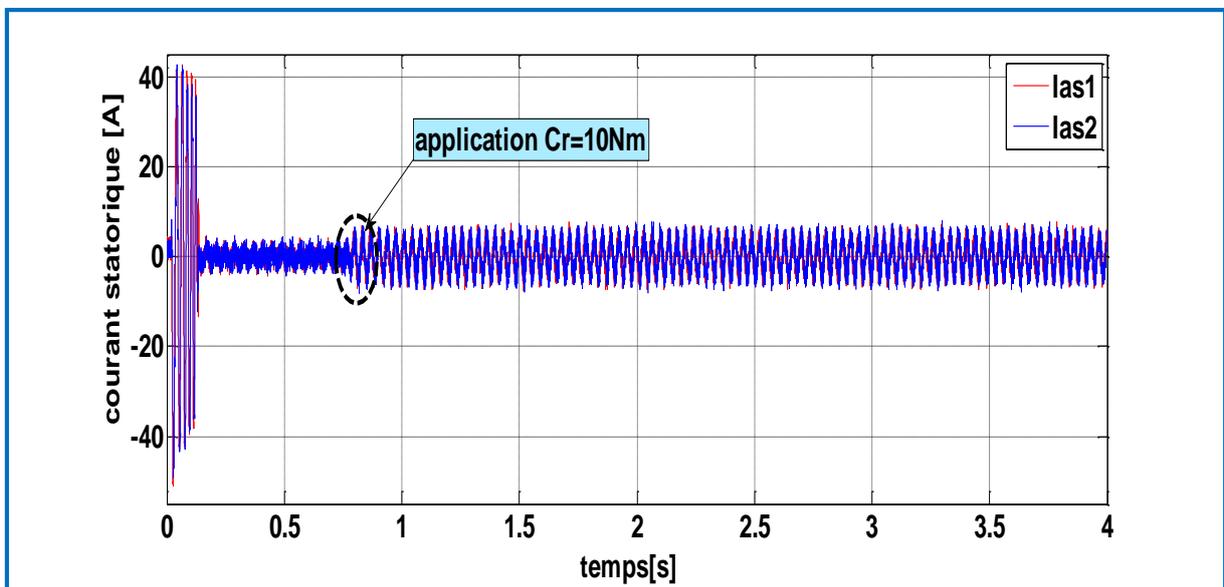
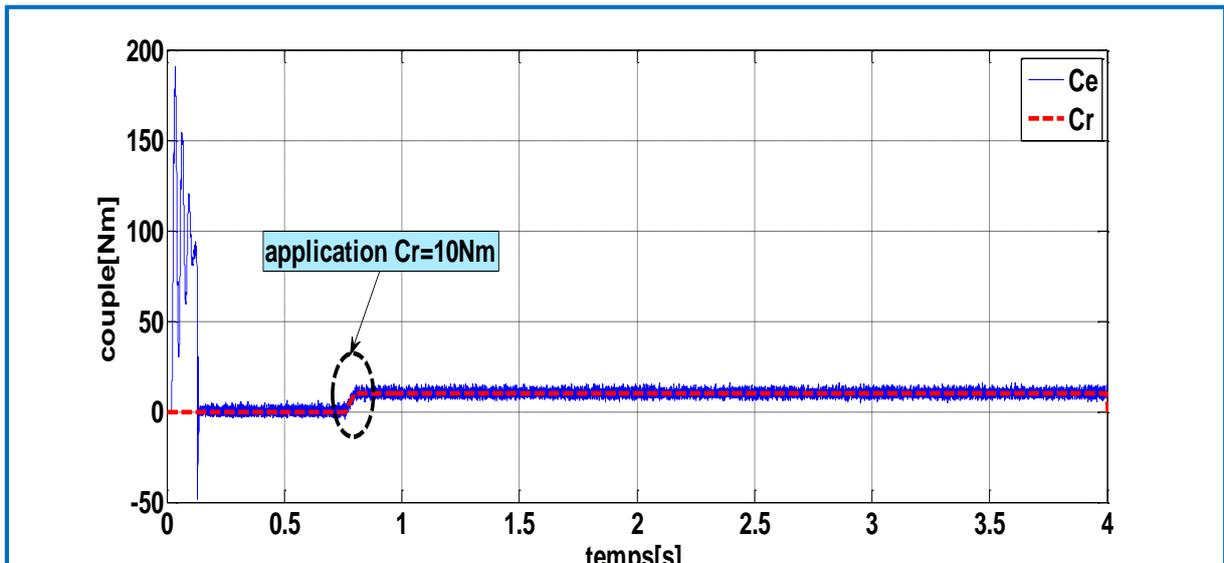
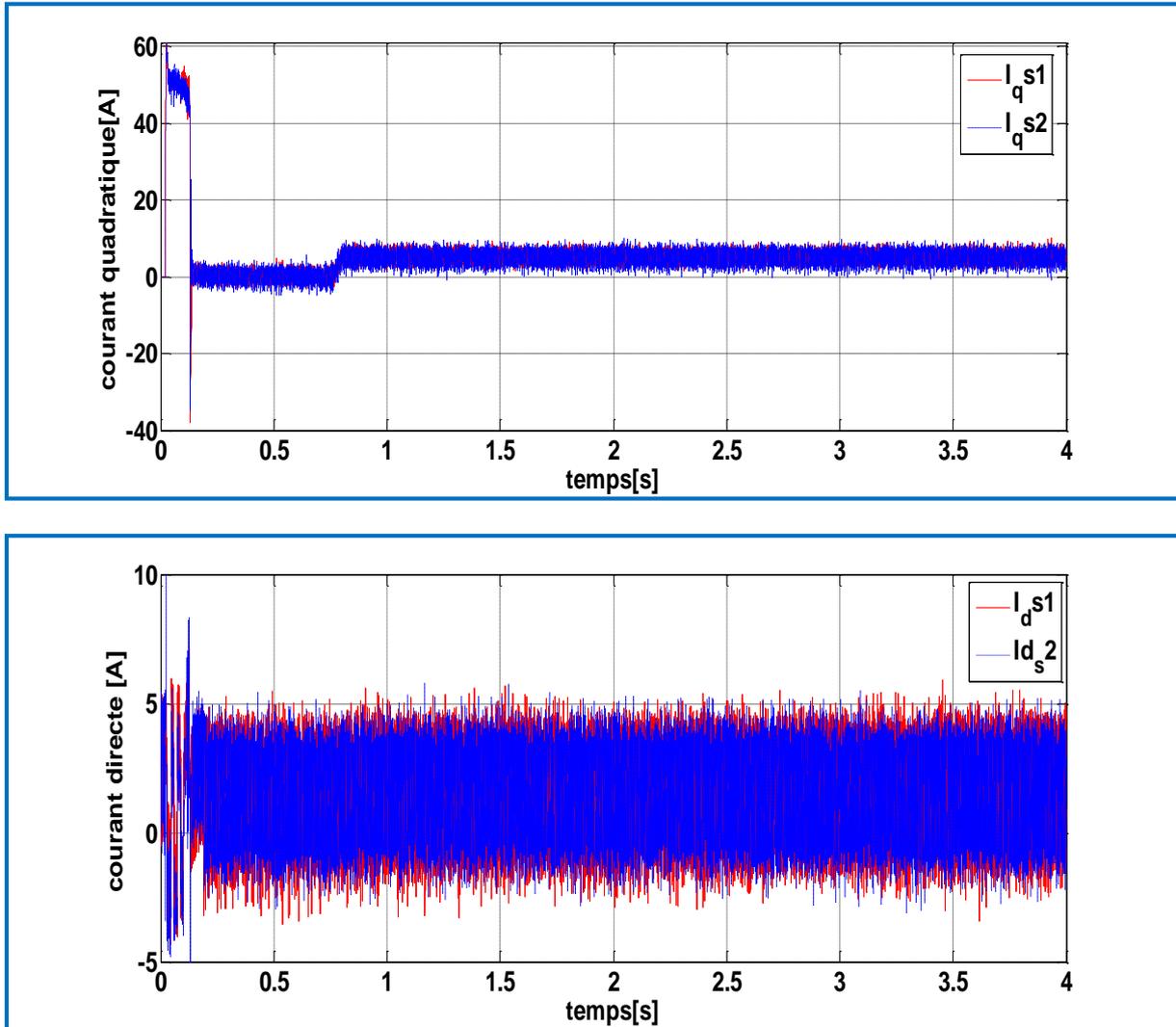


Figure (III.10) : Schéma global de la commande Vectorielle directe de la machine asynchrone double étoile

La figure(III.11) présente les résultats de simulation vitesse, couple électromagnétique, courant et flux Commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile







Figure(III.11) : les résultats de simulation vitesse, couple électromagnétique, courant et flux de la commande vectorielle directe de MASDE

❖ Interprétation :

La figure (III.10) présente les résultats de simulation de la commande vectorielle de la MASDE avec la régulation de vitesse par la méthode directe avec une application d'un couple de charge de 10[N.m] a $t=0.7[s]$, en imposant la vitesse de référence = 157[tr/mn].

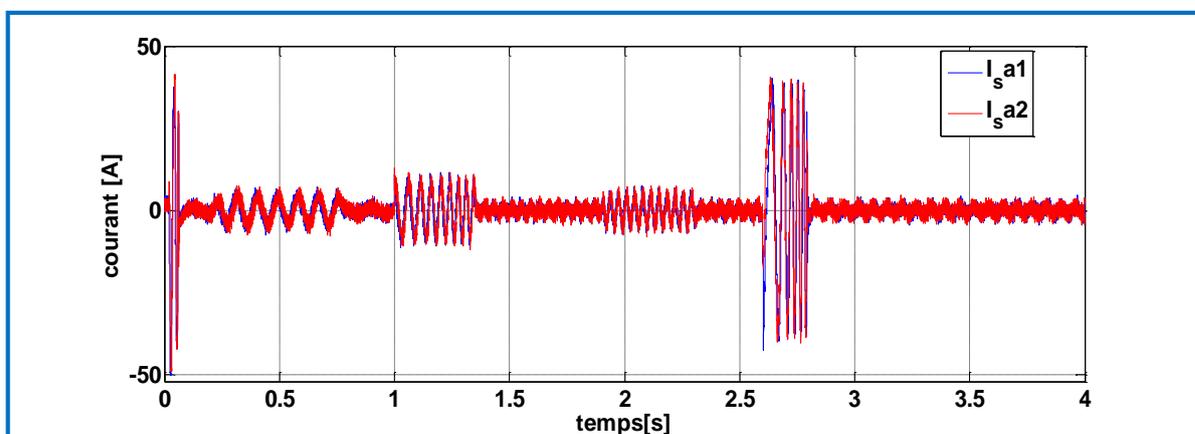
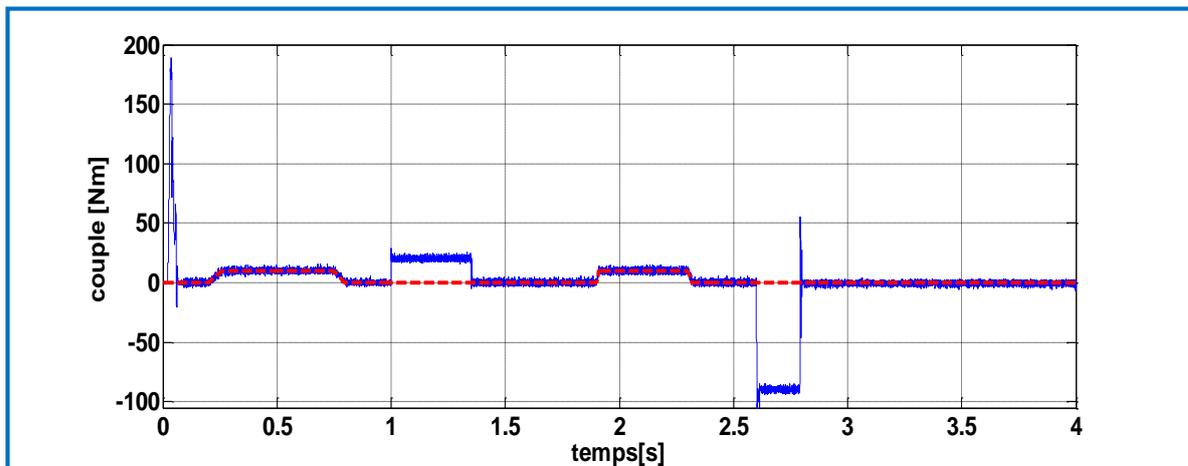
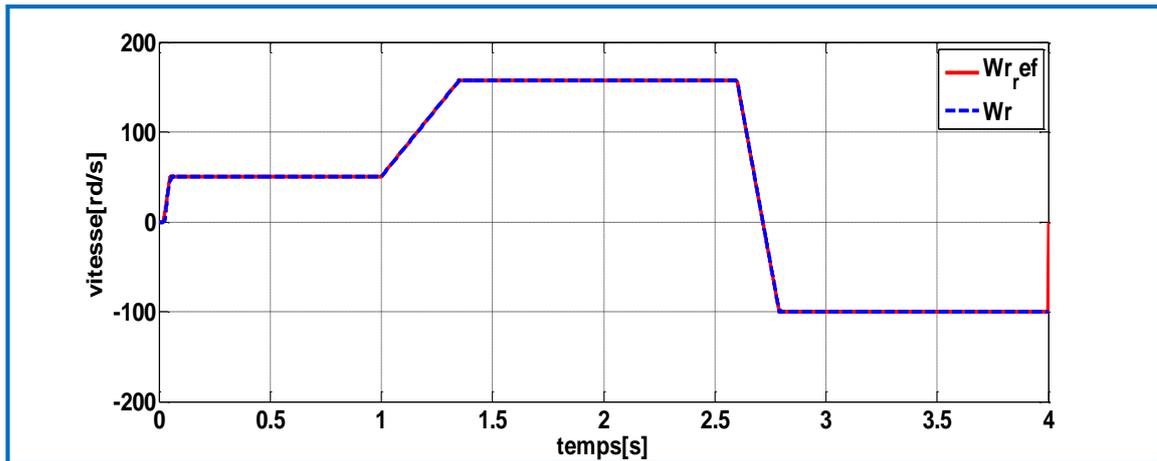
Les résultats de simulation montrent que la vitesse suit sa référence durant le regime permanent, concernant la couple électromagnétique en observe une augmentation durant le démarrage mais avec l'application de couple résistant à $t=0.7[s]$ le couple prend la valeur de charge.

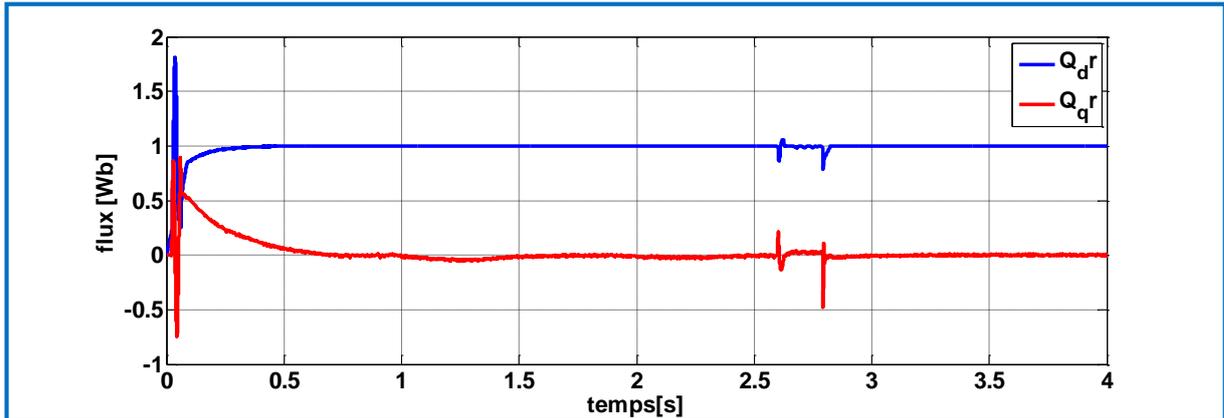
Le flux rotorique quadratique prend la valeur de $\Phi_{rq} = 0$ [Wb] qui montre l'application de la commande d'orientation flux rotorique.

Le courant quadratique c'est l'image de couple électromagnétique qui montre le découplage entre le couple et le courant quadratique.

a. Teste d'inversement de sens de rotation de la vitesse de référence, variation de la charge :

Nous avons effectué une simulation pour un changement de direction de rotation entre $t = 2.97$ [s] et $t = 4$ [s], où la vitesse est passée de $+157$ [rad/s] à -100 [rad/s]. Nous avons également appliqué une variation du charge de $C_r=10$ [Nm] à l'intervalle de temps $t = [0,26, 0.75]$ [s] et l'intervalle de temps $t = [1,91, 2,3]$ [s]. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures suivantes.





Figure(III.12) : les résultats de simulation vitesse, couple électromagnétique, courant et flux de la commande vectorielle directe de MASDE avec une variation de vitesse et couple charge

❖ Interprétation des résultats de simulation :

Nous débutons notre analyse en fixant la vitesse de référence à 50 [rd/s] entre $t = [0,05, 1]$ [s]. Nous observons que la vitesse suit sa référence. Ensuite, entre $t = [1,35, 2,6]$ [s], nous augmentons la vitesse de référence à 157 [rd/s] et constatons que la vitesse atteint cette référence.

Lorsque la vitesse de référence a été inversée de 157 [rad/s] à -100 [rad/s] à partir de $t = [2,79, 4]$ [s], nous avons observé que la vitesse a atteint sa consigne négative sans dépassement. De plus, nous avons remarqué que l'application de la charge à $t = [0,26, 0,75]$ [s] et $t = [1,91, 2,3]$ n'a pas eu d'influence sur la réponse de vitesse.

Pendant le démarrage, on observe une augmentation de couple électromagnétique et durant l'application de la charge $C_r = 10$ [Nm] durant l'intervalle de $t = [0,26, 0,75]$ [s] et $t = [1,91, 2,3]$, le couple prend la valeur de charge. L'augmentation et l'inversement de la vitesse de référence entraînent des pics sur la réponse du couple électromagnétique, qui revient ensuite à sa valeur en régime permanent.

En ce qui concerne le courant statorique, une augmentation est observée lors de l'inversion et de l'augmentation de la vitesse de référence, suivie d'un retour au régime permanent. Les flux en quadrature et en direct sont légèrement sensibles à l'inversion de la vitesse.

III.10 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié la commande vectorielle directe par orientation du flux rotorique appliqué à la MASDE qui nécessite la connaissance de module et de position de flux.

Grâce à l'utilisation de la commande vectorielle et l'application de la commande d'orientation de flux rotorique, nous avons pu avoir une commande de couple de la machine asynchrone double étoile similaire à celui d'une machine à courant continu.

Le résultat obtenu par la commande vectorielle sont satisfaisants en application de la régulateur classique PI en particulièrement les résultats de vitesse

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans ce mémoire, l'objectif principal est d'explorer comment la commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile peut être améliorée grâce à l'utilisation de deux onduleurs de tension contrôlés par la technique M.L.I. En outre, l'orientation du flux rotorique sera analysée et modélisée pour une meilleure compréhension et exploitation de la machine dans l'industrie lorsqu'elle fonctionne en régime moteur autonome.

Dans le premier chapitre de ce travail, nous avons présenté la Description et Modélisation de la machine asynchrone double étoile et la meilleure façon de la contrôler. Nous avons implémenté un modèle simple à l'aide de la transformation de Park et nous nous sommes assuré qu'il capturait fidèlement les fonctionnalités de MASDE, tout en tenant en compte des hypothèses simplificatrices. Nous avons ensuite exploité le logiciel MATLAB à des fins de simulation, recueillant des informations sur diverses caractéristiques des machines asynchrones à double étoile alimentées par des sources de tension.

Dans le deuxième chapitre, nous avons vu les performances de la conduite de la MASDE alimentée par deux onduleurs de tension de commande MLI en utilisant la stratégie Sinus-triangle, et avons obtenu des résultats montrant un fort couplage entre le flux magnétique et le couple électromagnétique.

Nous avons consacré le troisième chapitre à présentons les principes de base de la commande vectorielle par l'orientation de flux rotorique.

Dans ce cadre, nous avons utilisé la méthode de commande directe. Pour réaliser une commande performante de l'ensemble onduleur MASDE, un découplage entre la partie électrique (le flux) et la partie mécanique (le couple) est indispensable. Pour cela, on a introduit une technique de commande par orientation de flux rotorique qui permet de commander la machine asynchrone d'une façon semblable à une machine à courant continu à excitation séparée où le découplage entre le flux et le couple est naturel.

Bibliographie

Bibliographie:

- [1].**Hocine Amimeur**, " Contribution `a la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement », Mémoire Magister en Electrotechnique, Université El Hadj Lakhdar de Batna, 2008.
- [2].**Djaborebbi Amina**, "étude et commande d'machine Asynchrone double étoile ", mémoire Fin Etude, Ouargla 26/06/2013.
- [3].**R.Abdessamed, M. Kadjoudj**, "Modélisation des machines électriques", Edition université de Batna, Algérie, 1997.
- [4].**Lounes HAMA, Mounir KEKOUCHE**, « Etude et Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile», Projet Fin Etude, Univesité de Bejaia, 2013/2014.
- [5].**Elkheir Merabet**, "Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile", Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, 2008.
- [6].**Saadi Nour el houda, Bakhti btissam**, '' conception d'un observateur par mode glissant d'une machine à induction '' , Projet Fin Etude, Université de M'Sila, 2006 / 2007.
- [7].**Berrabah Salah Eddine**, « La commande non linéaire d'une machine asynchrone Double étoile « MASDE », Projet Fin Etude, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2018/2019
- [8].**HAMADACHE OUARET**, «Commande d'un système de pompage photovoltaïque», mémoire d'ingénieur, université de Bejaia, 2007.
- [9].**Brahim KIYYOUR**, «Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile» thèse doctorat, Université de Mohamed Khider – Biskra, 2020.
- [10].**Fateh Mehazzem**, «Contribution à la commande d'un moteur asynchrone destiné à la traction électrique», Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010
- [11].**Kheldoun Aissa**, «Amélioration des performances d'un variateur de vitesse par moteur asynchrone contrôlé par la méthode à flux orienté», thèse de doctorat, Université de Boumerdès, 2007.
- [12].**Torki Souad**, «Commande vectorielle sans capteur de vitesse de la MAS en utilisant le filtre de kalman étendu (EKF) », Projet Fin Etude, Université de M'sila, 2012.
- [13].**Boudiaf Mohammed**, «Etude et contrôle de la machine asynchrone double étoile», Projet Fin Etude, l'Université de Batna, 2012.
- [14].**MERABET** « Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, 2008.
- [15].**Smail AZZI, Belkacem AZZI**, «Etude et Modélisation de la Machine Asynchrone Double Etoile : Application à la Traction Electrique », mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2014

- [16].**L. Baghli**, «Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques», Thèse de Doctorat de, Université Henri Poincaré de Nancy I, France 1999.
- [17].**Toufouti Riad**, «Contribution à la commande directe du couple de la machine asynchrone», thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2008
- [18].**Guide Technique**, «La Variation de Vitesse au cœur des applications industrielles» Le magazine Schneider Electric de l'enseignement technologique et professionnel, 2005
- [19].**M. B. Michael, John K. Pedersen, FredeBlaabjerg**, «Field-oriented control of an induction motor using random pulse width modulation, » IEEE Trans on IndusAppl., vol. 37, no. 6, pp. 1777–1785, 2001
- [20].**G. A. Capolino, H. H'enaou V. T. Nguyen Phuoc**, « méthode de conception d'une commande vectorielle pour machine à induction, » SEE Journée d'études à Lille., pp. 1–19, Lille, 1992.
- [21].**Mr: Abdelkrim Ammar**, «Étude et Commande d'une Machine Asynchrone Double Étoile », Mémoire de Magister, Université SETIF 1, 2013
- [22].**Merabet. E, Belayali**. « Commande par la logique floue d'une machine asynchrone double stator », mémoire d'ingénieur d'état, Université de M'sila, 2005.
- [23].**Elkheir Merabet**, « Commande floue adaptative d'une machine asynchrone double étoile» mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 2008
- [24].**E. Merabet**, «Amélioration des Performances de Régulation d'une Machine Asynchrone Double Etoile par les Techniques de l'Intelligence Artificielle». Thèse de doctorat, Université de Batna. 2013.
- [25].**Ismail GUEZEI**, «Commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile par deux onduleurs à trois niveaux», mémoire de fin d'étude, école national polytechnique, Alger, 2017
- [26].**Boudiaf Mohammed**, «Etude et contrôle de la machine asynchrone double étoile », mémoire de fin d'étude, Université de M'SILA, 2013

ANNEXE

Annexe :

Paramètres de la machine Asynchrone à Double Etoile (MASDE)

Tension nominale	$V_n = 220\text{v}$
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 rotorique	$L_r = 0.006 \text{ H}$
Inductance mutuelle	$L_m = 0.662 \text{ H}$
Puissance	1.5KW
Moment d'inertie	$J = 0.0662 \text{ Kg. m}^2$
Nombre de paires de pôles	$p = 1$
Fréquence nominale	$f_n = 50 \text{ Hz}$

Résumé

Pour des applications de forte puissance, les machines multi-phases sont de plus en plus utilisées dans les domaines à grand puissance. Un des exemples les plus courants des machines multi-phases est la machine asynchrone double étoile (MASDE).

L'objectif du présent travail est l'étude de la commande vectorielle d'une MASDE alimentée par deux onduleurs triphasée commandés par la stratégie MLI triangulo_sinusoidal.

On a commencé par la modélisation de la machine à l'aide de la transformation de Park, après en passe à l'étude de la commande d'orientation de flux rotorique(OFR), qui assurant un découplage entre couple et flux. Pour avoir une similarité de MASDE comme MCC à excitation séparé nous avons introduire la commande vectorielle en utilisant des régulateurs classiques PI.

Les résultats de simulations obtenus sous MATLAB et sous SIMULINK ont montré un comportement très satisfaisant de cette commande appliqué à cette machine.

Mots clé : MASDE, OFR, commande vectorielle

Abstract

For high power applications, multiphase machines are increasingly used in high power areas. One of the most common examples of multiphase machines is the double star asynchronous machine (DSAM).

The objective of this work is the study of the vector control of a DSAM associated by two three-phase inverters controlled by PWM strategy.

We started by modeling the machine using the Park transformation, after moving on to the study of the field oriented control (FOC), which ensures a decoupling between torque and flux. To have a similarity of DSAM as DC machine we have introduced vector control using classical PI regulators.

The results of simulations obtained under MATLAB and under SIMULINK showed a very satisfactory behavior of this command applied to this machine.

Key words: DSAM, FOC, vector control

ملخص

للتطبيقات عالية الطاقة، يتم استخدام الآلات متعددة الأطوار بشكل متزايد في مناطق الطاقة العالية. أحد الأمثلة الأكثر شيوعاً للآلات متعددة الأطوار هي الآلة غير المتزامنة ذات النجم المزدوج (MASDE).

الهدف من هذا العمل هو دراسة التحكم في ناقلات الآلة غير المتزامنة ذات النجم المزدوج الذي يتم تغذيته من قبل اثنين من المحولات الجهد اللذان تسيطر عليهما استراتيجيية تعديل نبض العرض (MLI).

لقد بدأنا بنمذجة الآلة باستخدام تحويل Park، بعد الانتقال إلى دراسة التحكم في اتجاه تدفق الجزء الدوار (OFR)، والذي يضمن الفصل بين عزم الدوران والتدفق. للحصول على تشابه بين MASDE وMCC مع الإثارة المنفصلة، أدخلنا التحكم في النواقل باستخدام منظمات PI الكلاسيكية.

أظهرت نتائج عمليات المحاكاة التي تم الحصول عليها تحت MATLAB وتحت SIMULINK سلوكاً مرضياً جداً لهذا الأمر المطبق على هذا الجهاز.

الكلمات المفتاحية: الآلة غير المتزامنة ذات النجم المزدوج، التحكم في اتجاه تدفق الجزء الدوار، التحكم في النواقل