

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE**

SPECIALITE : COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUES

Proposé et dirige par : Mr. HERIZI Abdelghafour & Mr : ROUABHI Riyad

Présenté par : AZZEDDINE Faouzi & MERZOUGA Med Mehdi

Thème

**La commande par Backstepping de la MADA basée
sur le principe de l'orientation du flux statorique**

RESUME :

Actuellement, en raison des progrès énormes dans l'électronique de puissance, la machine à induction à double alimentation (MADA) est devenue l'une des meilleures solutions prometteuses pour nombreuses applications en particulier pour la conversion de l'énergie éolienne, l'application à vitesse variable, traction ferroviaire, propulsion marine, et les centrales hydroélectriques... etc. Malgré ces progrès, les entraînements électriques encore influencés par nombreuses contraintes telles que l'ondulation de couple, précision, robustesse, les variations des paramètres... etc. Pour surmonter les problèmes précédents, deux nouvelles stratégies hybrides de contrôle de la machine à induction à double alimentation (MADA) ont été développées dans cette mémoire. La première est la commande vectorielle (FOC) dont le contrôleur PI, la seconde combine la commande par Backstepping. La stratégie de contrôle par Backstepping proposées ont montré meilleures performances par rapport à la commande vectorielle (FOC) dans les deux états transitoires et stables, dont lesquels de nombreux avantages ont été confirmés, liés aux ondulations du couple et du flux, réduction du dépassement et du temps de réponse. En outre, l'analyse et des études comparatives des différentes stratégies de contrôle de la MADA ont été réalisées, compris la commande vectorielle FOC, commande par Backstepping.

MOTS CLES :

Machine Asynchrone à Double Alimentation MADA, régulateurs PI, commande vectorielle, Backstepping...

N° d'ordre : CSE-

Remerciements

A l'issue de cette fin de travail nous adressons nos remerciements premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années d'études.

Nos remerciements s'adressent à notre promoteur Mr : HERIZI ABDELGHAFOR et Mr : ROUABHI RIYADH pour la confiance qu'il nous a faite en nous proposant ce sujet. Qu'il soit remercié pour avoir dirigé nos travaux, pour la documentation qu'il a mis à notre disposition et ses expériences qui nous ont permis de mener ce projet.

Nous remercions :

- ❖ Messieurs les membres de jury pour avoir accepté d'examiner notre travail.
- ❖ Pour tous les enseignants qui nous ont orientés le long des cinq années de la graduation surtout monsieur S. BRKATI.
- ❖ Pour tous les personnes administratives du département génie électrique de l'université de M'sila.
- ❖ Pour toute la promotion électrotechnique 2019.

Azzeddine

Merzouga

Dédicaces

إلى أمي.

Faouzi Ben Aicha

أهدي عملي المتواضع هذا إلى من كانا سببا في وجودي، ... إلى من قرن الله تعالى
الإحسان إليهما بتوحيده،... وجعل طاعتها من طاعته، ... إلى من تعبنا من أجل نجاحي
وسعادتي،... وخاصة إلى من حملتني تسعة أشهر في بطنها وعشت
الطفولة في حضنها،... إلى من لو بقيت الدهر كله أعد محاسنها ما وفيتها حقها، ... عجز
البيان وجفت الأقلام

إليك يا قرة العين وبهجة البيت وبسمة الحياة ومصدر الحب و الأفراح أمي الغالية
إلى من علمني معنى الحياة ولم يبخل علي بما يملك وكان لي سندا وعونا طيلة حياتي، إلى القلب الطيب
وأعلى إنسان في الوجود أبي الحبيب.
إلى جميع إخوتي الأعزاء وجميع العائلة الفاضلة وجميع الصحب والأحباب.

Merzouga Med Mahdi

COMMANDE BACKSTEPPING D'UNE MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION A FLUX ORIENTE

F.AZZEDDINE¹ & M.M.MERZOUGA²

Université de M'sila, Département de génie Electrique

1. Faouzibenaicha95@gmail.com & 2. Medmahdi7@gmail.com

ملخص:

حاليا، وبسبب التقدم الهائل في مجال الكترونيات الطاقة، أصبح المحرك اللاتزامني مضاعف للطاقة واحد من أفضل الحلول الناجحة للعديد من التطبيقات وخاصة لتحويل طاقة الرياح، والتطبيقات ذات سرعات متغيرة، أنظمة الجر، والسكك الحديدية والدفع البحري، ومحطات توليد الطاقة الكهرومائية... الخ. وعلى الرغم من هذا التقدم لا يزال التحكم في المحركات الكهربائية يتأثر بالعديد من القيود مثل تموج عزم الدوران، الدقة، المتانة، تغير المعاملات... الخ. وللتغلب على المشاكل السابقة تقدم هذه المذكرة استراتيجيات التحكم الذكي للمحرك اللاتزامني مضاعف التغذية، حيث تتمثل الطريقة الأولى في التحكم الشعاعي FOC مع المعاملات، كما تمثلت الطريقة الثانية في التحكم بالباكستيبينغ. حيث أظهرت كل من استراتيجية التحكم المقترحة الباكستيبينغ أداء أفضل مقارنة مع تقنية التحكم الشعاعي FOC، وذلك من خلال تحسين زمن الاستجابة، والتجاوز، وكذا التقليل من تموجات التدفق والعزم الكهرومغناطيسي، وبالإضافة الى ذلك قمنا بالتحليل والمقارنة بين تقنية التحكم الشعاعي FOC وتقنية الباكستيبينغ.

RESUME :

Actuellement, en raison des progrès énormes dans l'électronique de puissance, la machine à induction à double alimentation (MADA) est devenue l'une des meilleures solutions prometteuses pour nombreuses applications en particulier pour la conversion de l'énergie éolienne, l'application à vitesse variable, traction ferroviaire, propulsion marine, et les centrales hydroélectriques... etc. Malgré ces progrès, les entraînements électriques encore influencés par nombreuses contraintes telles que l'ondulation de couple, précision, robustesse, les variations des paramètres... etc. Pour surmonter les problèmes précédents, deux nouvelles stratégies hybrides de contrôle de la machine à induction à double alimentation (MADA) ont été développées dans cette mémoire. La première est la commande vectorielle (FOC) dont le contrôleur PI, la seconde combine la commande par Backstepping. La stratégie de contrôle par Backstepping proposées ont montré meilleures performances par rapport à la commande vectorielle (FOC) dans les deux états transitoires et stables, dont lesquels de nombreux avantages ont été confirmés, liés aux ondulations du couple et du flux, réduction du dépassement et du temps de réponse. En outre, l'analyse et des études comparatives des différentes stratégies de contrôle de la MADA ont été réalisées, compris la commande vectorielle FOC, commande par Backstepping.

MOTS CLES : Machine Asynchrone à Double Alimentation MADA, régulateurs PI, commande vectorielle, Backstepping...

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOTATION ET SYMBOLES

INTRODUCTION GENERALE 1

1^{ER} CHAPITRE

ETAT DE L'ART DE LA MACHINE ASYNCHRONE

DOUBLE ALIMENTATION

I.1 Introduction.....	4
I.2 Description de la MADA.....	4
I.3 Principe de fonctionnement de la MADA.....	5
I.4 Classification de la MADA.....	7
I.4.1 Machine asynchrone double alimentation standard.....	7
I.4.2 Machine asynchrone double alimentation en cascade asynchrone.....	8
I.4.3 Machine asynchrone double alimentation sans collecteur.....	9
I.5 Les différents variantes de la MADA.....	10
I.6 Régimes de fonctionnement de la MADA.....	11
I.6.1 Régimes de fonctionnement synchrone.....	11
I.6.2 Régimes de fonctionnement asynchrone.....	11
I.7 Méthodes de variation de la vitesse de rotation.....	12
I.7.1 Par action sur le stator.	12
I.7.2 par action sur le rotor.....	12
I.8 Domaine d'application de la MADA.	13
I.8.1 Fonctionnement en alternateur.	13
I.8.2 Fonctionnement en moteur avec un convertisseur.....	14
I.8.3 Fonctionnement en moteur avec doux convertisseur.....	14
I.9 Les avantages et les inconvénients de la MADA.....	15
I.9.1 Les avantage de la MADA.....	15
I.9.2 Les inconvénients de la MADA.....	16
I.10 Conclusion.....	17

2^{EME} CHAPITRE

MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION

II.1 Introduction.....	19
II.2 Hypothèses simplificatrices et convention.....	19
II.3 Modèle mathématique de la MADA.....	20
II.3.1 Équations électriques.....	20
II.3.2 Équations magnétique.....	21
II.4 Modèle biphasé de la MADA.....	22
II.4.1 La transformation de PARK.....	22
II.4.2 Equation des tensions.....	23
II.4.3 Equation des flux.....	23
II.5 Equation du couple électromagnétique.....	24
II.6 Equation mécanique.....	24
II.7 Définition des différentes référentielles.....	24
II.8 Mise en équation d'état.....	26
II.9 Simulation de la MADA.....	27
II.9.1 résultats de simulation.....	28
II.9.1.1 teste sans alimentation rotorique et $C_r=0$	28
II.9.1.2 teste sans alimentation rotorique et $C_r= 10N.m$	29
II.9.1.3 teste avec alimentation rotorique $V_r=12 V$, $F_r=5 Hz$ et $C_r= 10N.m$	29
II.9.1.4 teste avec alimentation rotorique $V_r=12 V$, $F_r=15 Hz$ et $C_r= 10N.m$	31
II.9.2 Interprétation de résultats.....	31
II.10 Conclusion.....	32

3^{EME} CHAPITRE

COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA

III.1 Introduction.....	34
III.2 Théorie de la commande vectorielle de la MADA.....	34
III.2.1 Principe de la commande à flux orienté.....	34
III.2.2 Orientation de flux statorique.....	35
III.3 Commande vectorielle directe et indirecte.....	37
III.3.1 Commande vectorielle directe(CVD).....	37
III.3.2 Commande vectorielle indirecte(CVI).....	38

III.4 Bloc de defluxage.....	38
III.5 Calcule des correcteurs.....	38
III.5.1 Correcteurs des courants statoriques.....	39
III.5.2 Correcteurs des courants rotoriques.....	39
III.6 Schéma de simulation.....	40
III.7 Résultats de simulation.....	41
III.7.1 Fonctionnement nominal de la machine.....	41
III.7.2 test de robustes.....	42
III.7.2.1 Démarrage à vide suivi d'une introduction de variation du Cr.....	42
III.7.2.2Analyse de la robustesse de (CVD) lors la variation de la Rr.....	43
III.8 Conclusion.....	44

4^{EME} CHAPITRE

COMMANDE PAR BACKSTEPPING DE LA MADA

IV.1 Introduction.....	46
IV.2 Commande par Backstepping.....	46
IV.3 Commande par Backstepping de la MADA.....	47
IV.4 Structure générale du contrôle par Backstepping.....	50
IV.5 Résultats de simulation.....	51
IV.5.1 Fonctionnement nominal de la machine.....	51
IV.5.2 Fonctionnement à vide suivi d'une introduction de variation du Cr.....	52
IV.5.3 Fonctionnement de la machine lors de la variation de la résistance rotorique.....	53
IV.6 Etude comparative.....	54
IV.6.1 Comparaison au niveau de fonctionnement nominal de la machine.....	54
IV.6.2 Comparaison au niveau de variation du couple de la charge.....	55
IV.6.3 Comparaison au niveau de la variation de la résistance rotorique.....	56
IV.6.4 Interprétation de résultats de comparaison.....	57
IV.7 Conclusion.....	58
 CONCLUSION GENERALE.....	 60
REFERANCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	62
ANNEXE.....	

Liste des figures

CHAPITRE 1

Figure. (I.1) : Schéma d'une machine asynchrone double alimentation	4
Figure. (I.2) : Fréquences de la MADA en fonction de glissement	6
Figure. (I.3) : Tension mesurée du rotor de la MADA en fonction de glissement	6
Figure. (I.4) : Coupe d'une MDAS	8
Figure. (I.5) : Schéma de principe de MDAS	8
Figure. (I.6) : Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade asynchrone.	8
Figure. (I.7) : Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur.	9
Figure. (I.8) : Classification des machines électriques à double alimentation.	9
Figure. (I.9) : MADA utilisée en alternateur.	13
Figure. (I.10) : Schéma synoptique de la MADA avec un convertisseur AC/AC associé au Rotor	14
Figure. (I.11) : Schéma synoptique de la MADA avec deux convertisseurs AC/AC.	15

CHAPITRE 2

Figure. (II.1) : Représentation des enroulements d'une machine à induction.	20
Figure. (II.2) : Modèle de PARK de la MADA.	22
Figure. (II.3) : Représentation de la machine dans le repère diphasé.	23
Figure. (II.4) : Définition des axes réels du moteur asynchrone triphasé par rapport aux différents référentiels.	25
Figure. (II.5) : Schéma bloc de simulation de la MADA	27
Figure. (II.6) : Courbes de simulation de la MADA (teste sans alimentation rotorique et $C_r=0\text{N.m}$).	28
Figure. (II.7) : Courbes de simulation de la MADA (teste sans alimentation rotorique et $C_r=10\text{N.m}$)	29
Figure. (II.8) : Courbes de simulation de la MADA (teste avec alimentation rotorique $V_r=12\text{V}$, $F_r=5\text{ Hz}$ et $C_r=10\text{N.m}$)	30
Figure. (II.9) : Courbes de simulation de la MADA (teste avec alimentation rotorique $V_r=12\text{ V}$, $F_r=15\text{ Hz}$ et $C_r=10\text{N.m}$)	31

CHAPITRE 3

Figure. (III.1) : Principe de commande découplée pour la machine à CC à excitation séparée et la machine asynchrone à double alimentation.	35
Figure. (III.2) : Orientation du flux Statorique.	36
Figure. (III.3) : Profil du flux statorique de consigne (défluxage).	38
Figure. (III.4) : Schéma bloc de régulation des courants statoriques.	39
Figure. (III.5) : Schéma bloc de régulation des courants rotoriques.	40
Figure. (III.6) : Schéma de principe de la commande vectorielle directe à flux statorique orienté du MADA.	40
Figure. (III.7) : Fonctionnement nominal de la commande vectorielle de la MADA.	41
Figure. (III.8) : Résultats de simulation de la CVD lors du démarrage à vide suivi d'une introduction de variation de couple de charge.	42
Figure. (III.9) : Résultats de simulation de la CVD du MADA lors la variation de la résistance rotorique (+100%).	43

CHAPITRE 4

Figure. (IV.1) : Schéma bloc d'un système sous forme triangulaire d'ordre n.	47
Figure. (IV.2) : Principe de la commande par backstepping de la MADA.	51
Figure. (IV.3) : Fonctionnement nominal de la commande backstepping de la MADA	52
Figure. (IV.4) : Résultats de simulation de la commande backstepping lors du démarrage à vide suivi d'une introduction de variation du couple de la charge.	53
Figure. (IV.5) : Résultats de simulation de la commande backstepping du MADA lors de la variation de la résistance rotorique (+100%).	54
Figure. (IV.6) : Résultats de comparaison au niveau de fonctionnement nominal de la machine.	55
Figure. (IV.7) : Résultats de comparaison au niveau de variation du couple de la charge.	56
Figure. (IV.8) : Résultats de comparaison au niveau de la variation de la résistance rotorique.	57

Liste des tableaux

CHAPITRE 1

Tableau I.1 : Les Différentes Variantes De Machine Asynchrone A Double Alimentation	10
---	----

CHAPITRE 3

Tableau III.1 : Paramètres des correcteurs des courants statoriques.	39
Tableau III.2 : Paramètres des correcteurs des courants rotoriques.	40
Tableau III.3 : différent niveaux de couple de charge par le temps.	42

CHAPITRE 4

Tableau IV.1: différent niveaux du couple de charge par le temps.	49
---	----

Notation et Symboles

Notations & Acronymes :

(MADA) :	Machine Asynchrone à Double Alimentation.
(MDASC) :	Machine à double alimentation sans collecteur.
(MDAS) :	Machine à double alimentation standard à rotor bobiné.
(MDACA) :	Machine à double alimentation en cascade asynchrone.
(MADS) :	Machine asynchrone à double stator.
(MDARV) :	Machine à double alimentation à reluctance variable.
(MDACA-SA) :	Machine à double alimentation en cascade asynchrone avec un seul stator.
FOC :	Field Oriented Control (Commande vectoriel par orientation de flux).
DFIM:	doubly-fed induction machine.
MAS :	La machine asynchrone.
VVFC :	Vitesse variable et à fréquence constante.
Fmm:	Force magnétomotrice.
Fém.:	Force électromotrice.
MLI :	Modulation de largeur d'impulsion.

Symboles :

n_m :	vitesse mécanique.
n_s :	La vitesse de synchronisme.
s, r :	Indices d'axes correspondants au stator et rotor.
a, b, c :	Indice correspondants aux trois phases a, b, c.
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} :	Tensions d'alimentation des phases statoriques.
V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} :	Tensions d'alimentation des phases rotoriques.
I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} :	Courants statoriques.
I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} :	Courants rotoriques.
$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$:	Flux statoriques.
$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$:	Flux rotoriques.
$[L_s]$:	La matrice des inductances statoriques.

$[L_r]$:	La matrice des inductances rotoriques.
R_s, L_s :	Résistance et inductance propre d'une phase statorique.
R_r, L_r :	Résistance et inductance propre d'une phase rotorique.
M_{sr} :	Inductance mutuelle entre une phase de stator et une phase de rotor.
m_s :	L'inductance mutuelle entre phases statoriques.
m_r :	L'inductance mutuelle entre phases rotoriques.
θ :	Angle électrique.
(α, β) :	Axes fixés au stator.
θ_s, θ_r :	Déphasage du l'axe direct par rapport au stator et rotor.
ω_s :	Pulsation statorique.
ω_r :	Pulsation rotorique.
ω :	Pulsation mécanique du rotor.
P :	Nombre de paires de pôles.
C_r :	Couple résistant.
Ω :	Vitesse angulaire de rotation.
f :	Coefficient de frottement.
J :	Moment d'inertie de la partie tournante de la machine.
C_{em} :	Couple électromagnétique.
σ :	Coefficient de dispersion.
[A] :	Matrice de transition.
[B]:	Matrice de commande.
T_r :	Constante de temps rotorique.
T_s :	Constante de temps statorique.
V_s :	Valeur efficace de tension.
w_s :	Pulsation d'alimentation.
S_{abc} :	Grandeurs booléennes de commande des bras de l'onduleur.
K_p :	Facteur de proportionnalité.
K_i :	Facteur intégral.
P :	Correcteur à action proportionnelle.
I :	Correcteur à action intégrale.
PI :	Régulateur proportionnel-intégral.
IP :	Régulateur intégral-proportionnel.

INTRODUCTION
GENERALE

La machine asynchrone, très appréciée dans les applications industrielles pour sa grande robustesse électromécanique et son faible coût, requiert des structures de contrôles spécifiques et complexes, qui sont utilisées dans des systèmes d'entraînement à vitesse variable performants.

Dans le domaine d'utilisation des vitesses variables, il existe une solution nouvelle et originale utilisant une machine à courant alternatif fonctionnant dans un mode un peu particulier, il s'agit de la machine asynchrone à double alimentation « MADA », c'est une machine asynchrone triphasée avec un rotor bobiné qui peut être alimentée par deux sources de tensions. La machine asynchrone à double alimentation a fait l'objet de nombreuses recherches principalement pour son fonctionnement en génératrice dans les applications de l'énergie éolienne et l'application dans les entraînements de grande puissance. Nos travaux concernent le fonctionnement en moteur à vitesse variable, pour l'amélioration de la robustesse de la commande de la MADA [1,2].

Un intérêt de plus en plus croissant est accordé à cette machine. Cet intérêt est dû aux degrés de liberté qu'elle offre du fait de l'accessibilité de son rotor et donc de la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du côté du stator que du côté du rotor et un élargissement de la plage de vitesse (hypo synchrone, synchrone, hyper synchrone) [1,2].

Actuellement plusieurs recherches et études ont émergé dans le but de faire translater les performances de la machine à courant continu à excitation séparée à la machine à courant alternatif. Dans ce sens, Blaschk et Hasse ont introduit une nouvelle stratégie de contrôle : à savoir la commande vectorielle dite aussi commande à flux orienté. Ce dernier est d'une importance majeure puisqu'elle résout les problèmes du couplage des variables de la machine.

Afin d'obtenir avec la machine asynchrone à double alimentation des performances semblables à celle de la MCC, il est nécessaire d'appliquer la commande vectorielle par orientation du flux afin d'assurer le contrôle du flux et celui du courant générant le couple électromagnétique.

Mais cette évolution de réglage et l'augmentation des performances en dynamique, se payent chères. Le fait qui a conduit d'autres chercheurs à trouver des commandes grandes performantes et moins coûteuse, ces efforts en étaient récompensés par l'introduction de la commande par **backstepping**, conçue essentiellement pour concurrencer sa précédente, elle a fait ses preuves mais qui n'était pas sans inconvénients.

L'objectif de ce travail est d'effectuer une comparaison entre la commande vectorielle et la commande par **backstepping** de la machine asynchrone à double alimentation.

La disponibilité et l'accessibilité directes des résultats, à partir de simulateurs sont

nécessaires dans tous les travaux de recherche modernes. Ainsi, dans le cadre de cette étude nous avons choisi de travailler sous environnement **Matlab/Simulink**.

Notre mémoire est composé de quatre chapitres :

Le premier chapitre, aborde l'étude sous une forme assez descriptive. En effet, à travers une étude bibliographique. Nous présentons un état de l'art sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA), afin d'étudier son principe de fonctionnement et d'évaluer les avantages et les performances apportés par cette machine, dans les différents domaines d'application. En plus, une classification des différents types de cette machine sera présentée.

Le second chapitre sera consacré à l'étude et la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation(MADA), en se basant sur les équations électrique et mécanique qui régissent le comportement dynamique de la MADA et ses alimentations.

Le troisième chapitre, est l'objet de présenté le principe de la technique de commande vectorielle avec orientation au flux statorique de la MADA munie d'un réglage par un PI classique. Les performances de cette commande vectorielle seront validées par des résultats de simulation et des tests de robustesse seront présentés.

Au quatrième chapitre, nous présenterons le principe de la commande par **backstepping** de la MADA. Nous présentons à la fin de ce chapitre une étude comparative qui résume les principales différences entre la commande vectorielle et la commande par **backstepping**, ainsi les avantages et les inconvénients de ce dernier. On présentera les résultats de simulation obtenus.

Enfin, quelques remarques et perspectives seront données dans la conclusion.

CHAPITRE I

*Etat de l'art de la
Machine Asynchrone
Double Alimentation
MADA*

I.1 Introduction :

La machine à double alimentation porte un caractère qui permet à cette dernière d'occuper un large domaine d'application. Soit dans les entraînements à vitesses variables (fonctionnement moteur), soit dans les applications à vitesse variables et à fréquence constante (fonctionnement générateur).

L'objectif de ce chapitre est de mener une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant son principe de fonctionnement, les différentes stratégies de commande, ses avantages et inconvénients et évaluer les performances apportées par cette machine.

I.2 Description de la MADA :

La machine à double alimentation en anglo-saxon "doubly-fed induction machine (DFIM)" est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles, dans lesquels la puissance peut être fournie ou extraite de la machine à travers les enroulements rotoriques.

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation qui peut être alimentée les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction [3].

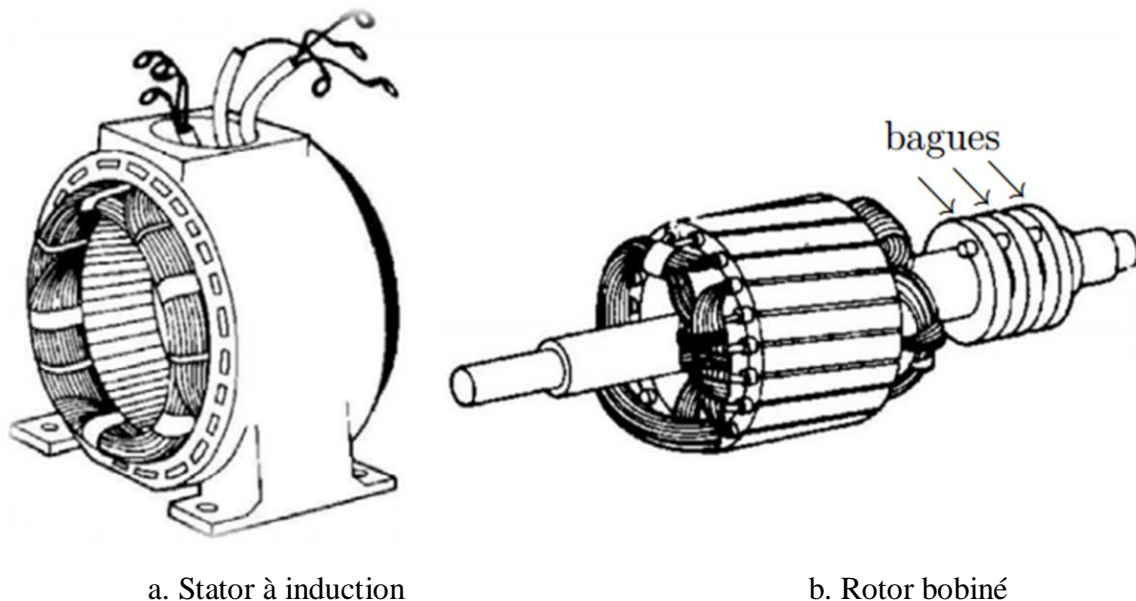


Fig. (I.1) : Schéma d'une machine asynchrone double alimentation.

I.3 Principe de fonctionnement de la MADA :

La MADA est une machine asynchrone à rotor bobiné avec l'enroulement du stator connecté directement au réseau. Le rotor à des enroulements triphasés reliés à un convertisseur de puissance bidirectionnel avec un système ballast bague [4]. Pour le fonctionnement de la machine en régime établi, il est nécessaire que les vecteurs forces magnétomotrices (*f.m.m*) du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre.

Du moment que le vecteur résultant de la *f.m.m* de l'enroulement statorique tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire, et que le rotor tourne à la vitesse ω_r , par conséquent, pour satisfaire à cette condition, il faut que le vecteur *f.m.m* de l'enroulement rotorique tourne par rapport au rotor avec la vitesse :

$$\omega_s = \omega_{0s} - \omega_r = \omega_{0s} - \omega_{0s}(1 - g) = \omega_{0s}g \quad (I.1)$$

Si la vitesse du moteur est inférieure à la vitesse synchronisme, les sens de rotation sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à celle du synchronisme, les sens seront opposés. Pour que la rotation du vecteur *f.m.m* par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence f_r , définie à partir de $\omega_{0s} \cdot g = 2\pi f$.

C'est-à-dire :

$$f_r = f_s \cdot g \quad (I.2)$$

Dans les machines synchrones dont l'excitation est assurée par une source continue, le courant dans l'enroulement possède une fréquence $f_r = 0$. A partir de (I.1) et (I.2), on voit qu'il n'y a qu'une seule vitesse synchrone ω_{0s} ; ($g = 0$).

Le stator désigné par "s" et le rotor par "r", et par " n_p " le nombre de paires de pôles de la machine, défini par la relation entre la fréquence du stator et du rotor, comme suit :

$$f_s = f_r + n_p f_m \quad (I.3)$$

Avec : f_m la fréquence de rotation du rotor.

Le glissement g est défini par :

$$g = (n_s - n_m)/n_s \quad (I.4)$$

n_m : est la vitesse mécanique du rotor.

n_s : La vitesse de synchronisme de la MADA donnée par :

$$n_s = 60 \cdot f_s / n_p \quad (I.5)$$

Les figures (I.2) et (I.3) représentent l'évolution de la fréquence et de la tension du rotor en fonction du glissement, où le circuit du stator est alimenté directement par le réseau et le rotor en circuit ouvert, ces grandeurs dépendent de la vitesse opérationnelle de la machine [5].

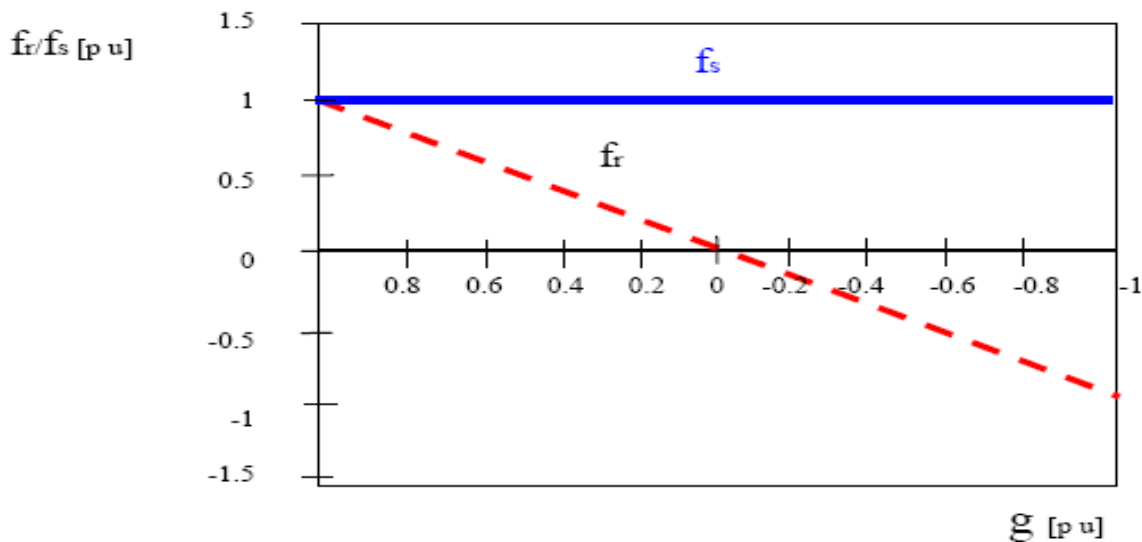


Fig. (I.2) : Fréquences de la MADA en fonction de glissement [5].

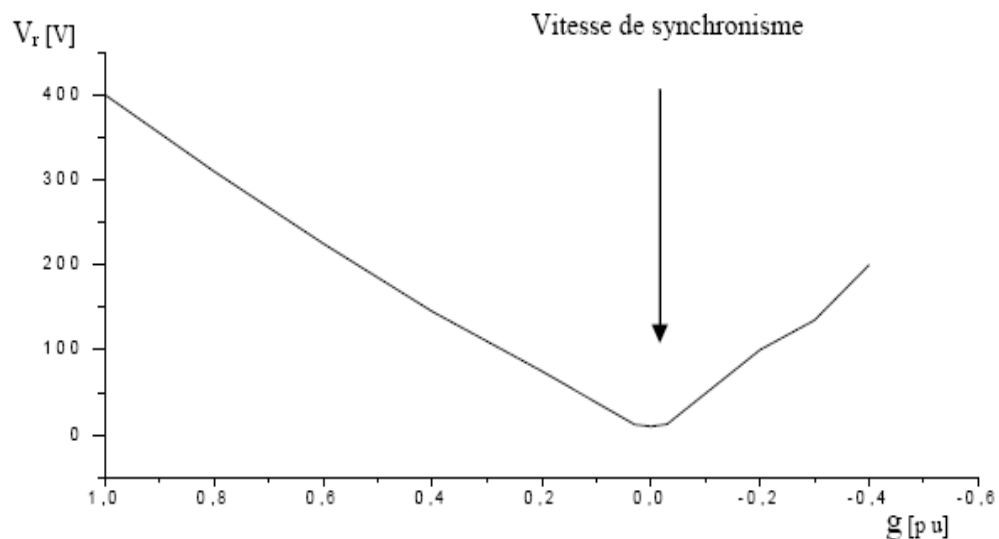


Fig. (I.3) : Tension mesurée du rotor de la MADA en fonction de glissement [5].

Les différents régimes de fonctionnement de la MADA, peuvent être divisés en fonction de glissement comme suit :

✓ **Stationnaire ($g = 1$) :**

Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s . Par conséquent, le rotor est le siège d'une *f.e.m* induite avec une fréquence f_r identique à f_s .

Dans ce cas la MADA se comporte simplement comme un transformateur.

✓ **Hypo synchrone ($0 < g < 1$) :**

En tournant le rotor dans la direction de flux du stator, la fréquence f_r du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor approche de celle du synchrone, plus f_r tend

vers 0, plus la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible qui correspond à la vitesse du synchronisme.

✓ **Synchrone ($g = 0$) :**

C'est le point, où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence f_r du rotor s'annule. Autrement dit, le rotor tourne avec la même vitesse que celle du flux statorique.

Donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier, par conséquent il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.

✓ **Hyper synchrone ($g < 0$) :**

Par d'avantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative selon les équations (I.3) et (I.4). Cette valeur négative signifie que l'ordre de phase du rotor " $(a_r; b_r; c_r)$ " s'inverse. L'augmentation de la vitesse relative du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor.

I.4 Classification de la MADA :

La classification de la machine asynchrone à double alimentation est obtenue à partir d'une recherche historique qui a été développée dans la littérature du domaine des machines à double alimentation [3].

- (MDASC) : Machine à double alimentation sans collecteur.
- (MDAS) : Machine à double alimentation standard à rotor bobiné.
- (MDACA) : Machine à double alimentation en cascade asynchrone.
- (MADS) : Machine asynchrone à double stator.
- (MDACA-SA) : Machine à double alimentation en cascade asynchrone avec un seul stator.
- (MDARV) : Machine à double alimentation à reluctance variable.

I.4.1 Machine à Double Alimentation Standard (MDAS) :

La machine à double alimentation standard, est une machine asynchrone à rotor bobiné occupée par un système balais-bague. La figure (I.4) illustre le schéma de principe de cette dernière, tel que le stator est alimenté directement par le réseau, ainsi que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur alternatif-alternatif de telle sorte que le glissement de la machine peut être contrôlé. Il faut noter que le convertisseur indiqué dans la figure (I.5) peut être composé par un redresseur et un onduleur (conversion indirecte) ou bien peut être un cyclo-convertisseur (conversion directe) [6].

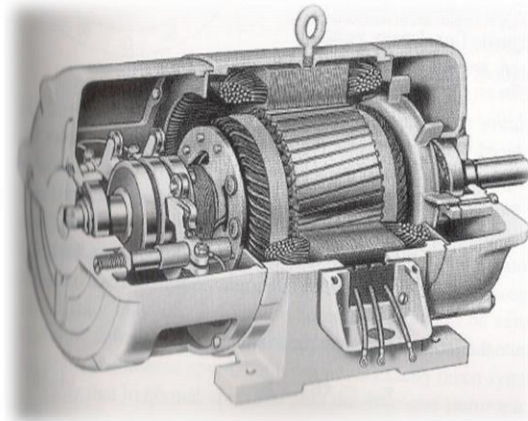


Fig. (I.4) : Coupe d'une MDAS.

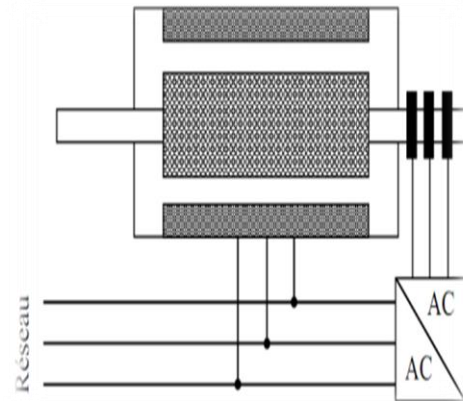


Fig. (I.5) : Schéma de principe de MDAS.

I.4.2 Machine à Double Alimentation en Cascade Asynchrone (DACA) :

La machine à double alimentation en cascade asynchrone consiste à deux machines asynchrones avec des rotors bobinés connectés mécaniquement et électriquement, comme il est montré par la figure (I.6), tel que le stator de l'une des deux machines est connecté directement au réseau alors que l'autre est connecté à celui-ci par l'intermédiaire d'un convertisseur alternatif-alternatif. Dans ce cas-là, et dès que les tensions rotorique dans les deux machines sont égales, il est également possible de piloter la machine qui est connecté directement au réseau par celle alimentée par le convertisseur [3].

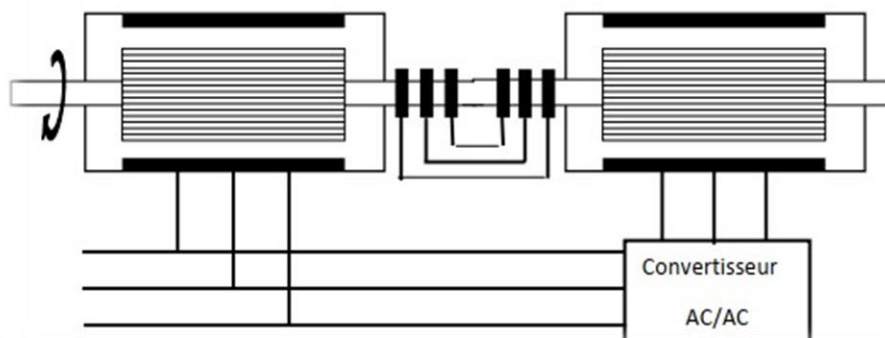


Fig. (I.6) : Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade asynchrone.

Ce type des machines offre la possibilité d'obtenir une commande découplée des puissances active et réactive similaire à celle de la machine à double alimentation standard.

Dans la pratique, il est possible de combiner deux machines asynchrones à double alimentation dans une seule machine avec un comportement identique à celui de la machine à double alimentation en cascade asynchrone, tel que les deux enroulements des stators sont prolongés dans une seule armature et le rotor soit à cage d'écureuil, comme dans le cas de la machine à double alimentation en cascade avec un seul stator.

I.4.3 Machine à Double Alimentation Sans Collecteur (MDASC) :

Cette machine est constituée par deux enroulements prolongés dans un seul stator. L'un des deux enroulements est alimenté directement par le réseau et l'autre par un convertisseur AC/AC (fig. I.7). Ce type des machines consiste à deux enroulements statoriques ayant des nombres de paires de pôles différents ; ainsi que celui du rotor doit être.

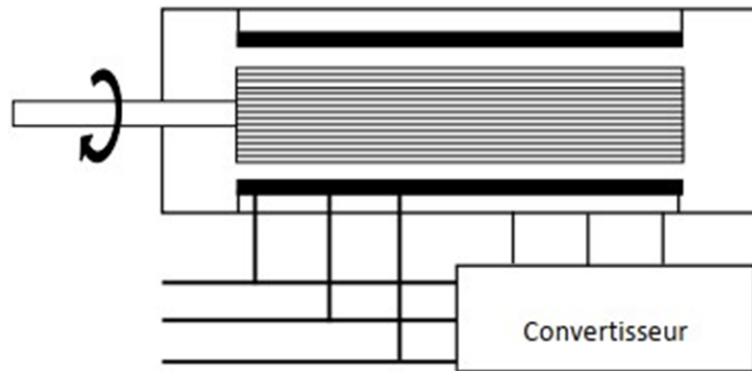


Fig. (I.7) : Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur.

Parmi les types les plus connus de machine à double alimentation sans collecteur, on trouve la machine à double alimentation à réluctance variable qui consiste à un stator identique à celui de la machine à double alimentation sans collecteur et un rotor basé sur le principe de la réluctance (entrefer variable). Cette dernière est caractérisée par un flux d'entrefer pulsatoire [3].

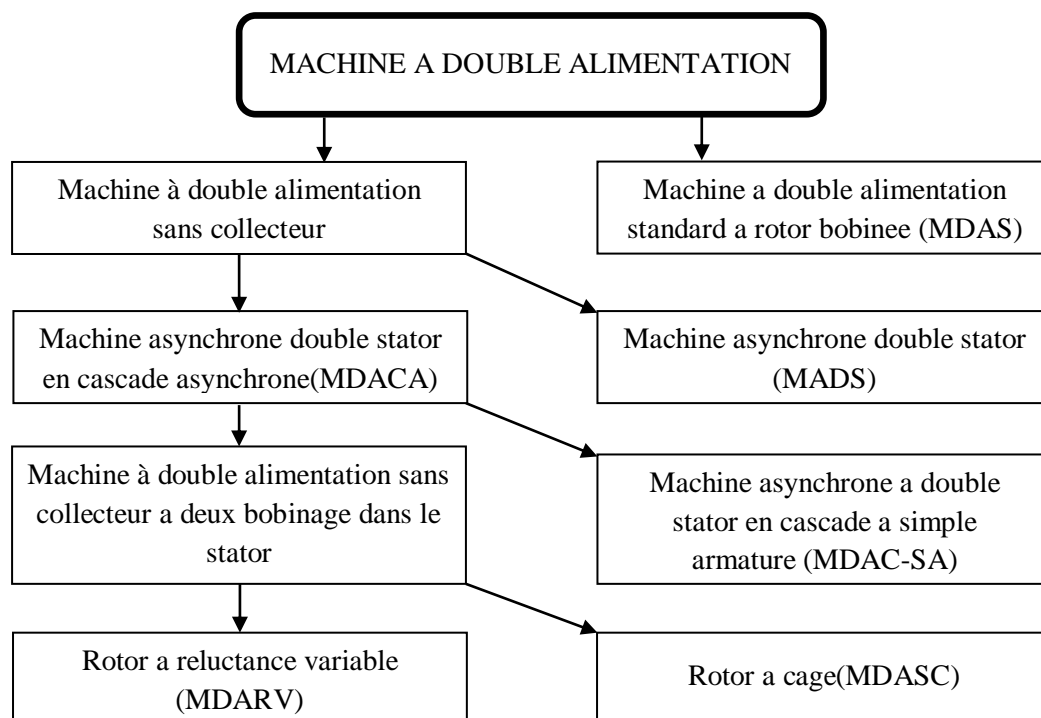


Fig. (I.8) : Classification des machines électriques à double alimentation.

I.5 Les différentes variantes de la MADA :

Le tableau suivant donne une brève comparaison et évaluation des variantes de la machine à double alimentation, selon la construction, le convertisseur associé, et la loi de commande adaptée à cette dernière.

Type de la MADA	Construction de la machine	Convertisseur de puissance	Loi de commande
MDAS	Etablie	Dépend de la vitesse opérationnelle	Orientation du flux statorique avec le découplage entre les puissances active et réactive
MDACA	Difficile	Identique à celle de la MDAS	Identique à celle de la MDAS
MDACA-SA	Spéciale.	Identique à celle de la MDAS	Identique à celle de la MDAS
MDASC	Spéciale, le prototype disponibles et toujours dans le progrès de recherches	Identique à celle de la MDAS	Orientation du flux rotorique et orientation simplifiée du flux rotorique comme la MDAS
MDARV	Spéciale, le prototype disponibles et toujours dans le progrès de recherches	Identique à celle de la MDAS	Identique à celle de la MDAS
MADS	Spéciale et difficile	Pas de convertisseur	Comparateur de puissance avec un moteur auxiliaire pour entraîner l'un des deux stators

Tableau I.1 : Les Différentes Variantes De Machine Asynchrone A Double Alimentation.

La MDAS, MDACA, MDASC, MDACA-SA, et la MDARV utilisent toutes un convertisseur bidirectionnel de puissance pour la commande de la vitesse désirée, qui doit être autour de la vitesse de synchronisme. Plus la gamme opérationnelle est mince plus la puissance traitée par le convertisseur est réduite.

Commercialement, il est difficile de prévoir quel type de machine à double alimentation sera finalement réussi. Cependant, la machine la plus attractive semble être la machine à double alimentation à réluctance variable (MDARV), qui est analogue à la machine à double alimentation standard (à rotor bobiné) par sa commande et son modèle. D'autre part, le courant réduit dans le rotor de la MDACA, MDA-SA, et le MDASC signifie un rendement élevé [3, 7].

D'après cette comparaison illustrée par le tableau, on constate que la machine à double alimentation standard (MDAS), représente une construction établie et simple par rapport aux autres types des machines. Sa commande se fait sur la base d'un convertisseur de puissance disponible (AC/AC), de plus cette machine possède une commande par orientation du flux statorique afin d'obtenir un découplage entre les puissances active et réactive.

L'évolution récente dans les domaines de l'électronique de puissance et de la micro-informatique rendre la machine à double alimentation plus attractive par de nombreux chercheurs, vu que cette dernière est bien adaptée dans plusieurs domaines d'application [7].

I.6 Régimes de fonctionnement de la MADA :

Dans le moteur à double alimentation, l'enroulement rotorique est couplé à une source de tension de fréquence variable. En fonction de type de régulation de fréquence on distingue deux régimes de fonctionnement : synchrone et asynchrone.

I.6.1 Régime de fonctionnement Synchrone :

Pour ce régime, la fréquence du glissement est donnée indépendamment de la vitesse angulaire. Alors à chaque signal de commande correspond une fréquence déterminée f_r et une vitesse de fonctionnement ω_r qui ne dépend pas de la charge. En faisant varier la fréquence f_r , on peut varier la vitesse. En régime synchrone, le moteur à double alimentation fonctionne comme une machine synchrone. Dans ce régime, on peut réguler la vitesse.

Cependant il est difficile de maintenir la stabilité du régime pour les variations rapides de vitesses, de charges brusques, ...etc.

I.6.2 Régime de fonctionnement asynchrone :

Pour ce régime de fonctionnement, la fréquence et la tension du réseau appliquée à l'enroulement rotorique de la machine à travers un système de régulation est toujours maintenue égale à la fréquence de glissement $f_s \cdot g$. Dans ce cas, on ne régule que la valeur et la phase de la tension du réseau [8].

Le moteur à double alimentation fonctionne toujours comme un moteur asynchrone même pour, $\omega_r = \omega_{0s}$ le glissement du moteur varie avec la variation de la charge.

Dans la MADA, il y a toujours deux sources de même fréquence dans les enroulements rotoriques f_s . g .

- La **f.é.m.** du rotor $E_{cc} \cdot g$ (*f. e. m* de court-circuit).
- La tension externe d'alimentation du côté rotorique U_r .

I.7 Méthodes de la variation de la vitesse de rotation :

La variation de la vitesse des moteurs asynchrones est assez difficile mais avec l'apparition de l'électronique de puissance, celle-ci est devenue plus facile. Les méthodes de variation de la vitesse agissant sur le stator et le rotor.

I.7.1 Par action sur de stator :

➤ **Modification du nombre de paires de pôles N_p :**

Ceci donne une variation non continue de la vitesse. Ce mode n'est donc pas envisagé pour un réglage fin du point de fonctionnement désiré [9].

➤ **Changement de la tension appliquée au moteur :**

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation statorique. Il est donc possible d'envisager un ajustement de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation statorique avec un gradateur triphasé. Cette solution est le plus souvent utilisée pour le démarrage des charges à caractéristique de couple quadratique ($C_r = K\Omega^2$) [9].

➤ **Changement de la fréquence du réseau :**

La fréquence de rotation de la machine étant au glissement près proportionnel à la fréquence d'alimentation des enroulements statoriques, on essaiera de créer pour ces enroulements un réseau à fréquence variable : ce sont les onduleurs de tension. On peut aussi chercher à injecter des courants dans les enroulements pour imposer le couple de la machine : ce sont les onduleurs de courant ou commutateurs de courant. On peut également convertir directement la fréquence du réseau industriel en une fréquence variable plus faible (de 0 à 1/3 de la fréquence réseau) à l'aide d'un cyclo-convertisseur à commutation naturelle piloté lui aussi en fréquence, en courant ou vectoriellement [9].

I.7.2 Par action sur le rotor :

➤ **Variation des résistances rotoriques (action sur le glissement) :**

L'utilisation de résistances rotoriques permet un réglage de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale mais avec un rendement déplorable. On essaiera donc de récupérer cette énergie transmise au rotor : c'est la cascade hypo synchrone réservée à la très forte puissance pour des machines à rotor bobiné [9].

L'une des solutions pour obtenir des vitesses variables est la double alimentation. Ce système est réversible en vitesse et en couple, dans tous les cas les vitesses hypo synchrones et hyper-synchrones sont possibles.

I.8 Domaine d'application de la MADA :

La machine synchrone à double alimentation offre des nombreux avantages par rapport à la machine asynchrone et synchrone et surtout en ce qui concerne la gamme de vitesse opérationnelle et de la puissance d'entraînement ou bien la puissance générée par cette dernière en mode génératrice. De plus, elle a un comportement souple à la commande, ce qui lui permet de trouver un domaine d'application très vaste. La MADA peut être utilisé dans des applications spécifiques avec une vitesse variable et à fréquence constante (VVFC), comme dans les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éoliennes et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales et navales, l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau [10].

La machine à double alimentation est une machine à rotor bobiné possédant des enroulements triphasés au stator et au rotor. Cette machine a fait l'objet de trois variantes de fonctionnement :

- La première fonctionne en alternateur.
- La seconde fonctionne en moteur, et elle est alimentée par un seul convertisseur.
- La troisième fonctionne aussi en moteur mais elle est alimentée par deux convertisseurs.

I.8.1 Fonctionnement en alternateur :

Dans ce type de fonctionnement, le stator est relié au réseau et un convertisseur alimente le rotor comme nous le montre la fig. (I.9). Cette solution permet de fournir une tension et une fréquence fixe même lors d'une fluctuation de la vitesse.

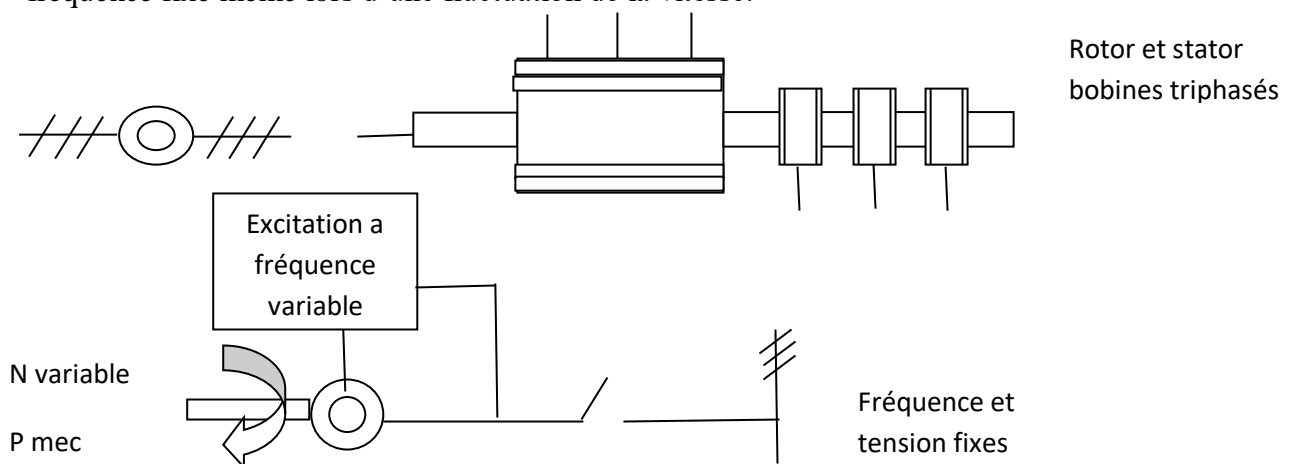


Fig. (I.9) : MADA utilisée en alternateur.

I.8.2 Fonctionnement en moteur avec un convertisseur :

Cette configuration qui est l'objectif de notre travail, est largement répandue dans les applications à vitesse variable. Elle consiste à connecter le stator de la MADA directement au réseau, alors que le rotor est alimenté par un convertisseur AC/AC (figure I.10). En plus, cette dernière offre la possibilité d'avoir une commande découplée des puissances active et réactive, de même qu'elle a un coût d'investissement réduit par rapport aux autres configurations.

Ces avantages expriment l'utilisation très vaste de cette configuration de la MADA dans l'industrie et surtout dans les domaines des éoliennes à vitesse variable.

La configuration considérée utilise des différents types des convertisseurs de puissances qui seront exposés par la suite. [11, 12]

Les travaux présentés dans la littérature de la MADA montrent les bonnes performances de cette dernière avec cette configuration. Ces travaux s'intéressent principalement aux stratégies de commande.

Dans notre travail nous nous intéressons non seulement aux stratégies de commande de la MADA mais aussi aux convertisseurs de puissances associés à cette dernière.

Un choix adéquat et convenable sera fait en fonction de notre problématique.

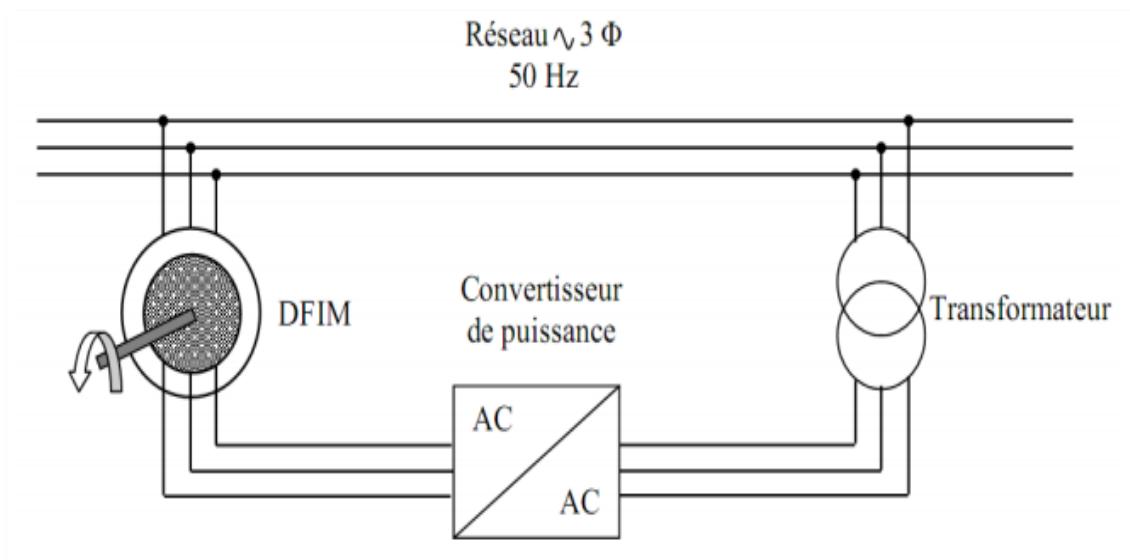


Fig. (I.10) : Schéma synoptique de la MADA avec un convertisseur AC/AC associé au rotor.

I.8.3 Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs :

Cette solution consiste à alimenter la MADA par deux convertisseurs AC/AC, l'un au stator et l'autre au rotor (figure I.11).

Cette dernière est généralement plus répandue dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable que ceux de génération.

Cette configuration offre une grande souplesse à la commande que celle précédente, ainsi qu'elle permet de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs, ce qui réduit les pertes fer dans la machine et par conséquent augmente le rendement [13].

En plus, elle présente dans les applications de grandes puissances de bonnes performances à très basses vitesses pour un fonctionnement sans capteur de vitesse, ainsi qu'elle offre la possibilité de fonctionner en survitesse sans démagnétisation. Cependant, cette configuration présente des inconvénients majeurs notamment : [14, 15]

- Elle est plus volumineuse. L'aspect multi-convertisseurs augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent, le prix.
- Le marché traditionnel est dominé par la première configuration qui est très étudié et très connue.
- Elle nécessite une commande plus ou moins compliquée par rapport à la première configuration.

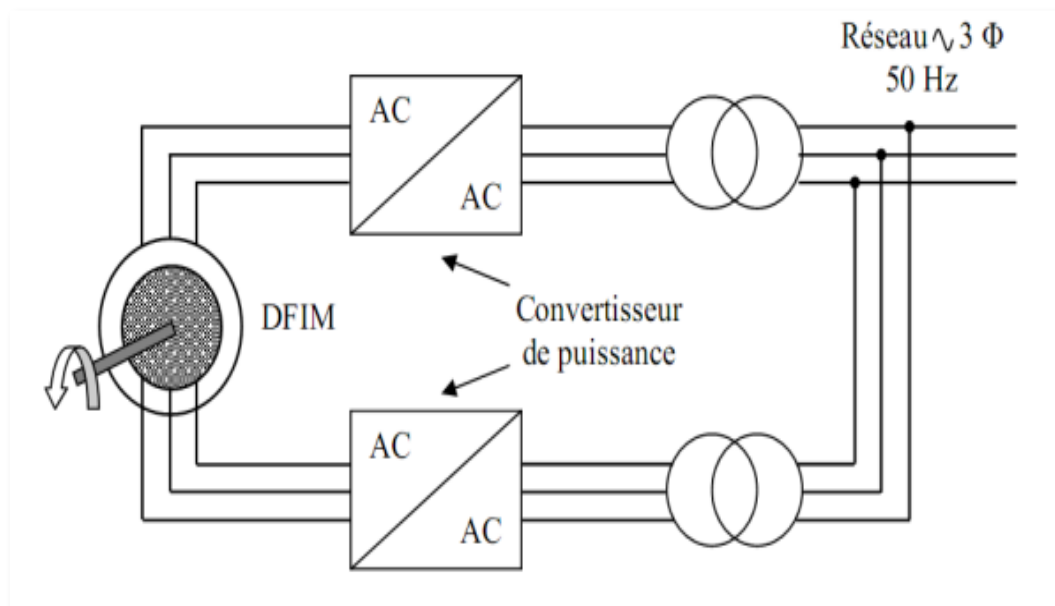


Fig. (I.11) : Schéma synoptique de la MADA avec deux convertisseurs AC/AC.

I.9 Les avantages et les inconvénients de la MADA :

Nous introduisons succinctement dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients de la Machine Asynchrone à Double Alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable.

I.9.1 Les Avantages de la MADA :

Comme avantages de la MADA, on peut citer :

- Dans la MADA, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur rotorique de haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement [16].
- L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur [17].
- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [18].
- Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau [19].
- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine [19].
- La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesse [16, 17].
- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation [20].

I.9.2 Les Inconvénients de la MADA :

Alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur) [21].
- Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle celle.
- Ci est garanti par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité à la machine [15].
- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi.
- Convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix.
- Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudiée et très connue, la nouveauté peut effrayer [19].

I.10 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu général sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui est la machine la plus utilisée dans le domaine de grandes puissances et conversion éolienne, dont une description de la MADA et les différents type, fonctionnement et leur avantages et inconvénients.

Dans le but d'appliquer des commandes non linéaires, on a choisi la machine asynchrone à double alimentation dont la modélisation sous forme d'équations mathématiques sera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE II

Modélisation de la Machine Asynchrone Double Alimentation MADA

II.1 Introduction :

Le système d'entraînement de la machine asynchrone intègre l'alimentation, le convertisseur statique, la machine et la commande indispensable au fonctionnement de l'ensemble. La modélisation d'une machine électrique est une phase intrinsèque de son développement. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques.

Notre objectif est de présenter mathématiquement une modélisation de la machine Asynchrone à double alimentation sous forme d'état selon le choix des différents repères. Généralement, ces modèles sont définis dans un référentiel diphasé, soit tournant (d, q), soit fixe au stator (α, β). Ces référentiels sont définis à partir du référentiel triphasé naturel de la MADA à l'aide de transformations mathématiques adaptées [26].

Pour obtenir le modèle d'un système ; trois taches doivent être accomplies :

- Choisir le modèle.
- Déterminer ses paramètres.
- Enfin vérifier sa validité [20]

Dans ce chapitre, sera présente la modélisation de PARK d'une machine asynchrone, suivi d'une validation par simulation numérique du modelé de la machine ainsi choisi dont les paramètres sont donnés dans l'annexe [A].

II.2 Hypothèse simplificatrice et convention :

On adopte les hypothèses simplificatrices qui tout en permettant de simplifier notablement les calculs, conduisent à des résultats suffisamment précis pour la plupart des applications ; ces hypothèses sont les suivantes :

- L'entrefer est d'épaisseur et de perméabilité constante, donc l'effet d'encoche est négligé ;
- La saturation du circuit magnétique est négligeable, et sa perméabilité constante.
- Les pertes ferromagnétiques dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault sont négligeables ;
- Les pertes mécaniques sont négligeables ;
- La composante homopolaire du courant est nulle ;
- On admet que la f.m.m créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale [26].

Comportement de la machine asynchrone à double alimentation.

- trois bobines statorique (S_a, S_b, S_c) décalées entre elles par un angle de $(2\pi/3)$.
- trois bobines rotorique (R_a, R_b, R_c) identique de répartition et similaire à celles du stator.

La figure (II.1) rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique (l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre (P) de paires de pôles par phase).

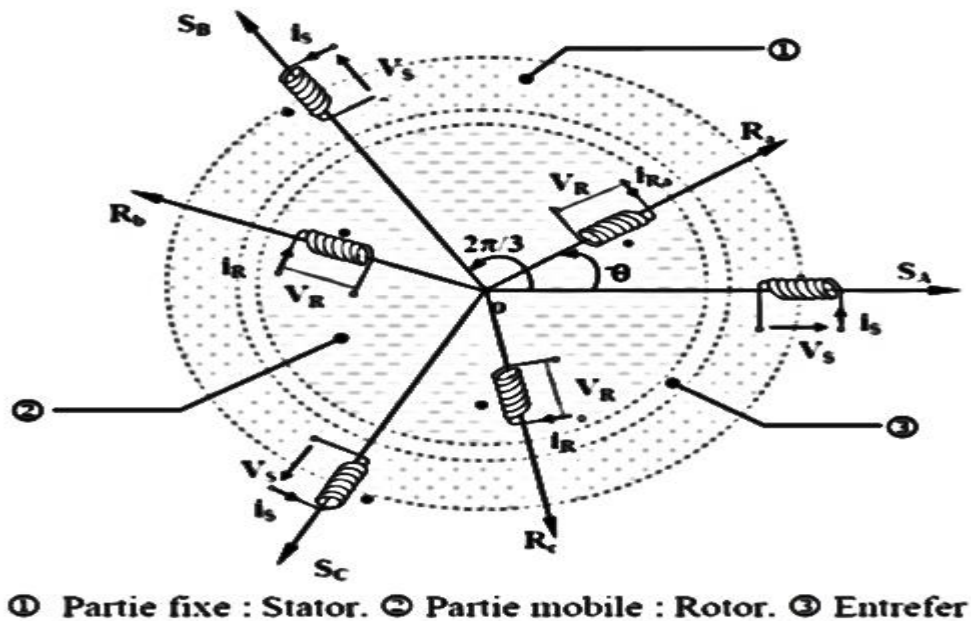


Fig. (II.1) : Représentation des enroulements d'une machine à induction.

II.3 Modèle mathématique de la MADA :

Mathématiquement, les machines électriques sont représentées par des modèles entres/sorties sous forme de fonction de transfert ou encore sous forme standard d'équations en variable d'état. Ce modèle mathématique a pour but de simplifier l'étude de la machine, il est basé sur la transformation des enroulements de la machine originale en des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique disposés selon des axes fictifs.

Cette transformation a pour effet de rendre les inductances propres et mutuelles du modèle indépendantes de la rotation.

II.3.1 Équations électriques :

En appliquant la loi de Faraday aux enroulements de la MADA, on obtient :

✓ Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} V_{as} = R_s \cdot I_{as} + \frac{d\varphi_{as}}{dt} \\ V_{bs} = R_s \cdot I_{bs} + \frac{d\varphi_{bs}}{dt} \\ V_{cs} = R_s \cdot I_{cs} + \frac{d\varphi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

✓ Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} V_{ar} = R_r \cdot I_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dt} \\ V_{br} = R_r \cdot I_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dt} \\ V_{cr} = R_r \cdot I_{cr} + \frac{d\varphi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

On note :

V, I et φ : sont respectivement la tension, le courant et le flux.

R_s : Résistance d'une phase statorique ; R_r : Résistance d'une phase rotorique.

II.3.2 Équations magnétique :

Dans le repère triphasé, on peut exprimer les flux en fonction des courants grâce à la relation matricielle suivante :

$$[\varphi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (\text{II.3})$$

$$[\varphi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$[\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} ; \quad [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} ; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} ; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} ; \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Avec :

L_s, L_r : Inductances propres d'une phase statorique et rotorique.

M_s, M_r : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et celles rotoriques.

M_0 : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

II.4 Modèle biphasé de la MADA :

II.4.1 La transformation de PARK :

Les transformations utilisées doivent conservées la puissance instantanée et la réciproité des inductances mutuelles. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de Park. (Figure II.2).

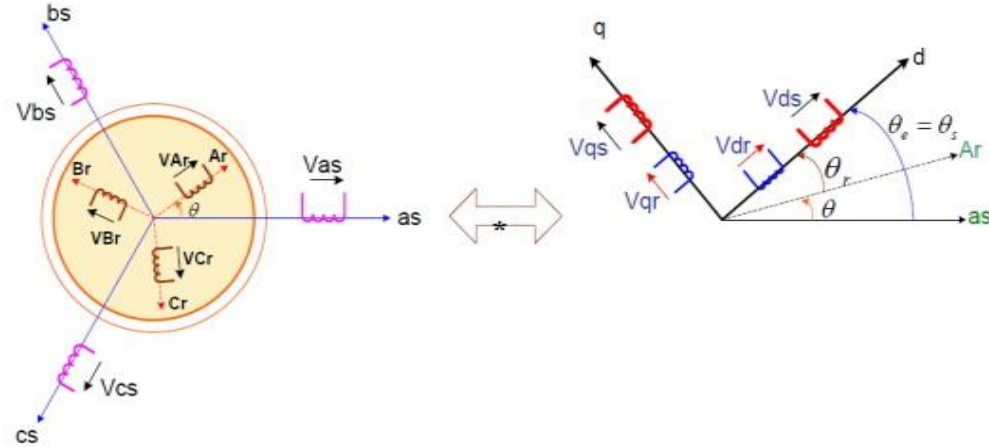


Fig. (II.2) : Modèle de PARK de la MADA.

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé ($d - q$) donné par la transformation de Park est alors utilisé. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par : [23]

$$[P(\theta)] = K \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Dans le cas de la conservation de la puissance nous avons $K = \sqrt{\frac{2}{3}}$.

Pour les grandeurs statoriques : $\theta = \theta_s$.

Et pour les grandeurs rotorique : $\theta = \theta_s - \theta_r$.

$$[P(\theta)]^{-1} = K \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Le changement de variables relatifs aux (courants, tensions et flux) est défini par la transformation suivant :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

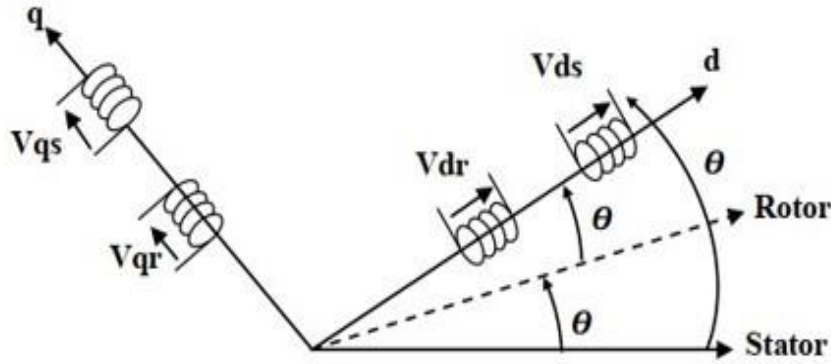


Fig. (II.3) : Représentation de la machine dans le repère biphasé.

II.4.2 Equation des tensions :

Après l'application de transformation de Park pour l'équation (II.1) du stator et l'équation (II.2) du rotor, les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d, q) sont données par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Pour les grandeurs statoriques :

$$\theta = \theta_s \rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad (\text{II.9})$$

Et pour les grandeurs rotorique :

$$\theta = \theta_s - \theta_r \rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\theta_s - \theta_r)}{dt} = \omega_s - \omega_r \quad (\text{II.10})$$

Talque :

ω_s : Pulsation du champ tournant d'axe (d, q).

ω_r : Pulsation électrique du rotor.

II.4.3 Equation des flux :

Cependant, c'est au niveau de l'écriture des flux que ça devient intéressant. Le système matriciel de flux peut également s'écrire sous la forme suivante :

➤ Au stator :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

➤ Au rotor :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Talque les inductances cycliques :

$$L_s = l_s - M_{sr} ; L_r = l_r - M_{rs} ; M = (3/2) M_{sr}$$

II.5 Equation du couple électromagnétique :

Après qu'ont effectué le changement de variable, l'expression du couple électromagnétique peut être exprimée sous différentes formes, on trouve celle-ci : [23]

$$\begin{cases} C_e = P(\varphi_{ds} \cdot i_{qs} - \varphi_{qs} \cdot i_{ds}) \\ C_e = P(\varphi_{qr} \cdot i_{dr} - \varphi_{dr} \cdot i_{qr}) \\ C_e = P \cdot M(i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \\ C_e = \frac{P \cdot M}{L_r} (\varphi_{dr} \cdot i_{qs} - \varphi_{qr} \cdot i_{ds}) \\ C_e = \frac{P \cdot M}{L_s} (\varphi_{qs} \cdot i_{dr} - \varphi_{ds} \cdot i_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

II.6 Equation mécanique :

L'étude du comportement de la machine asynchrone aux différents régimes de fonctionnement en particulier, le régime transitoire met en évidence l'équation du mouvement définie comme suit :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \cdot \Omega \quad (\text{II.14})$$

J : moment d'inertie.

f_r : Coefficient de frottement. ; C_r : Couple résistant imposé par la charge mécanique.

C_{em} : Couple électromagnétique.

Ω : Vitesse mécanique de rotation.

II.7 Définition des différentes référentielles :

Il existe différentes possibilités pour le choix de l'orientation du repère d'axe (u, v) qui dépendent généralement des objectifs de l'application. Le choix se ramène pratiquement à trois référentiels orthogonaux figure (II.4).

- Référence des axes (α, β) : système biphasé à axes orthogonaux ($\theta_a = 0$) (— — —)
- Référence des axes (d, q) : système biphasé à axes orthogonaux ($\theta_a = \theta_s$) (— — —)
- Référence des axes (x, y) : système biphasé à axes orthogonaux ($\theta_a = \theta_r$) (— . — . — .)

L'angle θ_a est une position quelconque d'observation que l'on peut choisir de trois manières différentes.

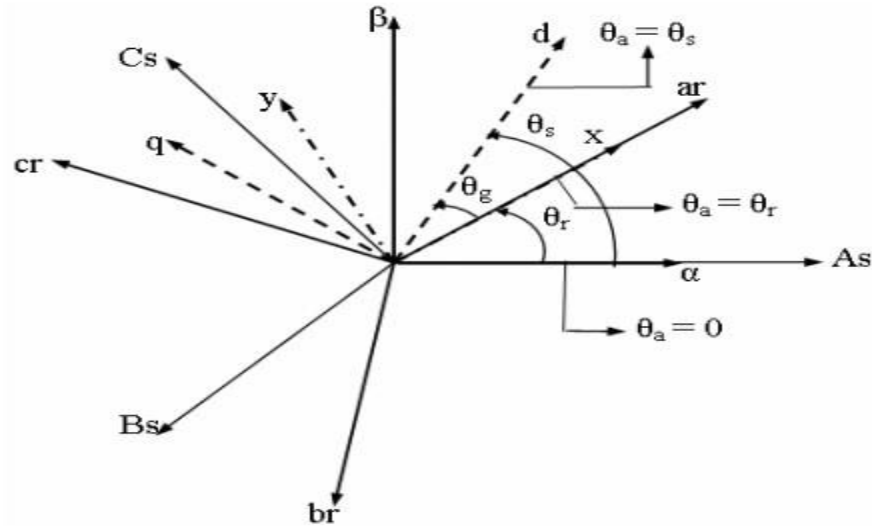


Fig. (II.4) : Définition des axes réels du moteur asynchrone triphasé par rapport aux différents référentiels.

$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$: Vitesse électrique de rotation du repère lié au champ tournant.

$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$: Vitesse électrique de glissement.

$\omega = \frac{d\theta}{dt}$: Vitesse électrique de rotation de rotor par rapport au stator.

➤ **Référence (α, β) :**

Il se traduit par les conditions : $\theta_a = 0 \leftrightarrow \begin{cases} u \rightarrow \alpha \\ v \rightarrow \beta \end{cases} \quad \frac{d\theta_a}{dt} = \omega_a = 0$

Les équations électriques prennent la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha s} \\ V_{\beta s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{\alpha s} \\ \varphi_{\beta s} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha r} \\ V_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{\alpha r} \\ \varphi_{\beta r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{\alpha r} \\ \varphi_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

➤ **Référence (x, y) :**

Il se traduit par les conditions : $\theta_a = \theta_r \leftrightarrow \begin{cases} u \rightarrow x \\ v \rightarrow y \end{cases} \quad \frac{d\theta_a}{dt} = \omega_a = \omega_r$

Les équations électriques prennent la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{x s} \\ V_{y s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{x s} \\ i_{y s} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{x s} \\ \varphi_{y s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{x s} \\ \varphi_{y s} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

$$\begin{bmatrix} V_{x r} \\ V_{y r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{x r} \\ i_{y r} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{x r} \\ \varphi_{y r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

➤ **Référence (d, q) :**

Il se traduit par les conditions: $\theta_a = \theta_s \leftrightarrow \begin{cases} u \rightarrow d \\ v \rightarrow q \end{cases} \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = \omega_a$

Avec : $\omega_s - \omega = \omega_r$

Les équations électriques prennent la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Ce référentiel est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs asynchrones à fréquences variables, comme il est utilisé notamment dans la commande des machines électriques dans les systèmes en boucle fermée ou les grandeurs à contrôler sont obligatoirement continues [24].

II.8 Mise en équation d'états :

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statoriques et rotoriques. En considérant les flux statoriques et les courants rotoriques comme des vecteurs d'état, alors le modèle de la MADA est décrit par l'équation d'état suivant :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

X : Vecteur d'état.

A : Matrice d'évolution d'état du système. B : Matrice de la commande.

U : Vecteur du système de commande.

Y : vecteur de sortie,

C : Matrice de sortie (matrice d'observation),

$$\text{Ou : } \dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{dr}}{dt} \\ \frac{di_{qr}}{dt} \end{bmatrix} ; \quad U = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} ;$$

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = \frac{M}{T_s} I_{dr} - \frac{1}{T_s} \varphi_{ds} + \omega_s \cdot \varphi_{qs} + V_{ds} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = \frac{M}{T_s} I_{qr} - \omega_s \varphi_{ds} - \frac{1}{T_s} \varphi_{qs} + V_{qs} \\ \frac{dI_{dr}}{dt} = -\delta I_{dr} + (\omega_s - \omega) I_{qr} + \alpha \varphi_{ds} - \beta \cdot \omega \cdot \varphi_{qs} - \beta \cdot V_{ds} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{dr} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} = -\delta I_{qr} - (\omega_s - \omega) I_{dr} + \beta \cdot \omega \cdot \varphi_{ds} - \alpha \cdot \varphi_{qs} - \beta \cdot V_{qs} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{qr} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} \left(P \frac{M}{L_s} (\varphi_{qs} I_{dr} - \varphi_{ds} I_{qr}) - C_r - f_r \Omega \right) \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s} ; \quad T_r = \frac{L_r}{R_r} ; \quad T_s = \frac{L_s}{R_s} ; \quad \alpha = \frac{M}{\sigma L_r L_s T_s} ; \quad \beta = \frac{M}{\sigma L_r L_s} ; \quad \delta = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{L_s T_s L_r} \right)$$

Par une représentation matricielle :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_s} & \omega_s & \frac{M}{T_s} & 0 \\ -\omega_s & -\frac{1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & -\beta \cdot \omega & -\delta & (\omega_s - \omega) \\ \beta \cdot \omega & -\alpha & -(\omega_s - \omega) & -\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\beta & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_s} & \omega_s & \frac{M}{T_s} & 0 \\ -\omega_s & -\frac{1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & -\beta \cdot \omega & -\delta & (\omega_s - \omega) \\ \beta \cdot \omega & -\alpha & -(\omega_s - \omega) & -\delta \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\beta & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

II.9 Simulation de la MADA :

Pour réaliser la simulation de la MADA ; on peut transférer le modèle représenté par les équations (II.21), (II.22) et (II.23) sous forme de structure en schéma bloc comme il est illustré sur la figure (II.5).

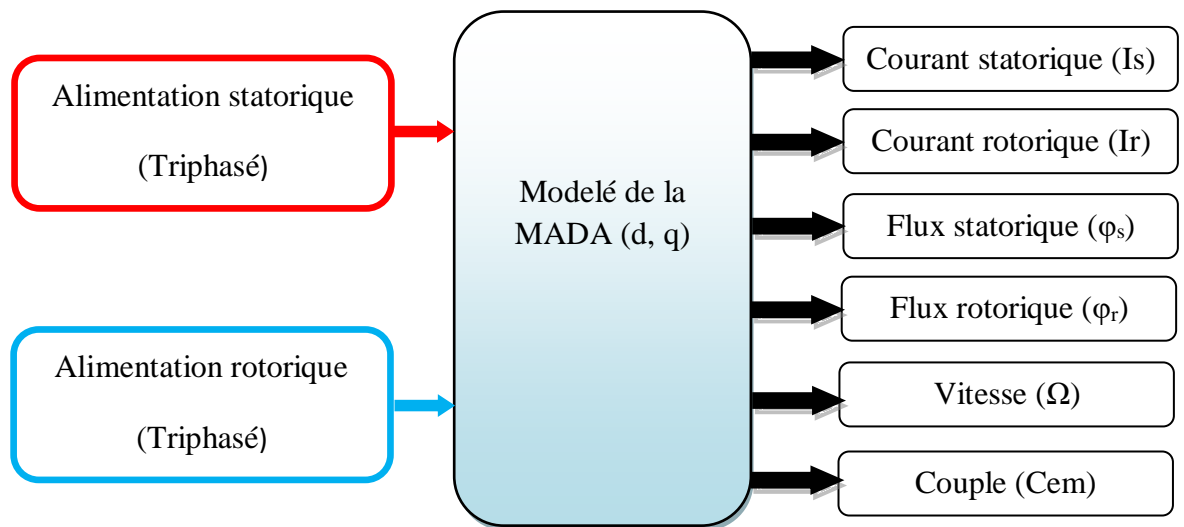


Fig. (II.5) : Schéma bloc de simulation de la MADA

II.9.1 Résultats de simulation :

Afin de simuler notre machine, on a fait appel au logiciel **MATLAB/Simulink**. Les paramètres de la machine sont donnés en annexe A. Pour faire un bon fonctionnement de la MADA, on préfère de suivre la procédure suivante :

A) Pour le premier fonctionnement, on a simulé le comportement dynamique de la MADA sans alimentation rotorique (rotor en court-circuit), le stator étant alimenté par un réseau triphasé équilibré, que signifie que la MADA fonctionne comme une machine asynchrone à rotor bobiné en court-circuit.

II.9.1.1 teste sans alimentation rotorique et $C_r=0$:

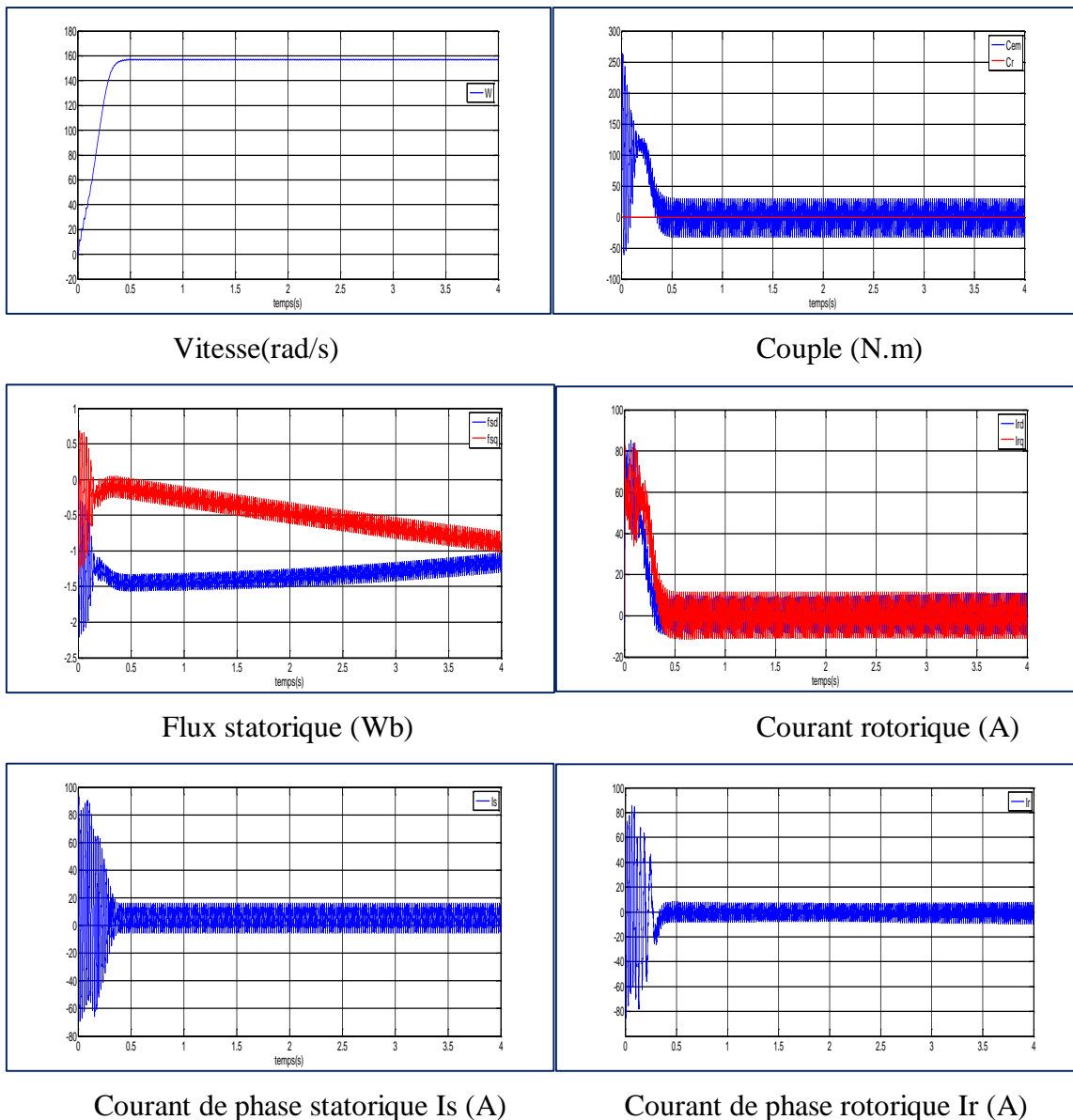


Fig. (II.6): Courbes de simulation de la MADA (teste sans alimentation rotorique et $C_r=0$ N.m).

II.9.1.2 teste sans alimentation rotorique et $Cr= 10N.m$:

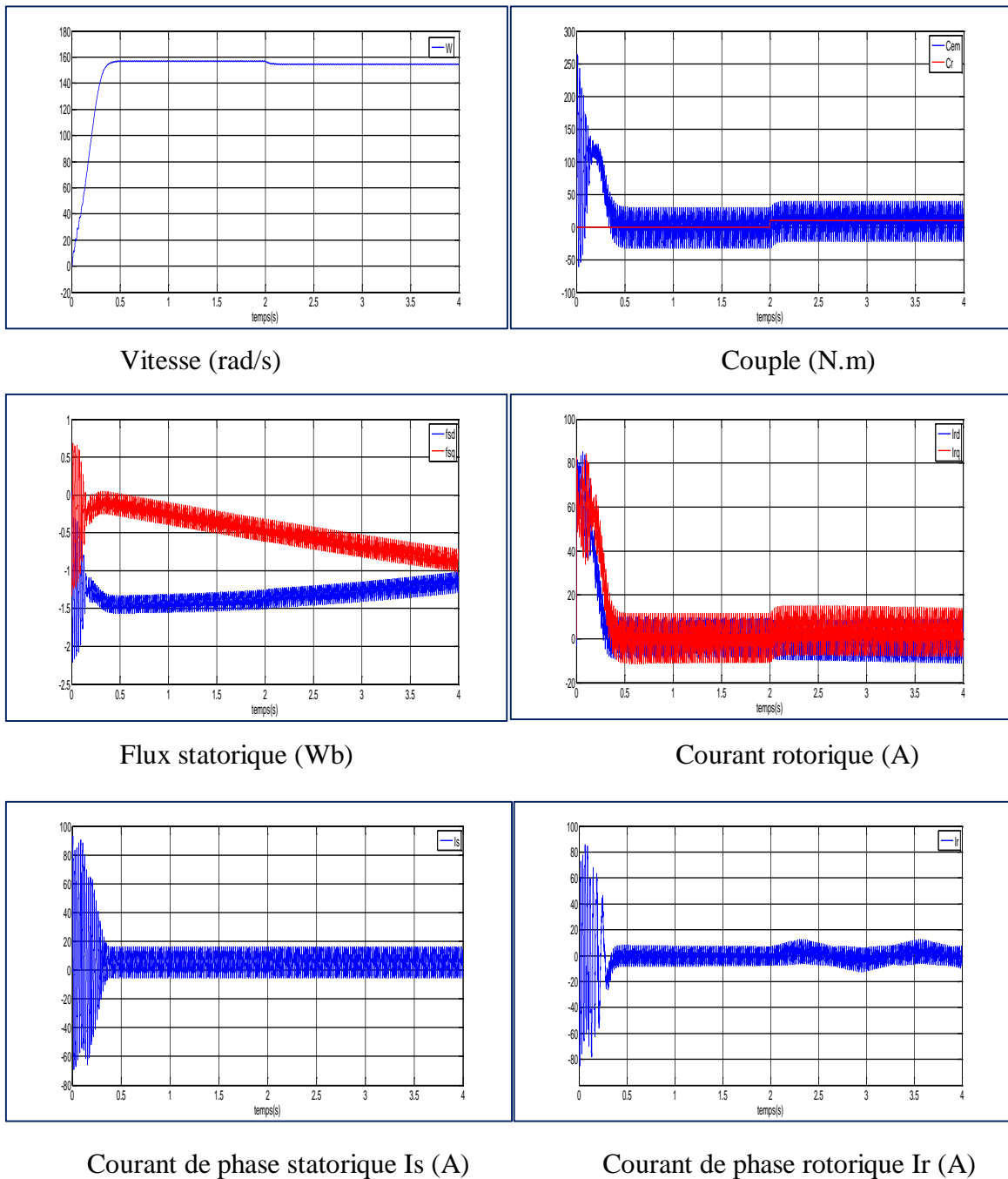


Fig. (II.7): Courbes de simulation de la MADA (teste sans alimentation rotorique et $Cr= 10N.m$)

B) Pour le deuxième mode de fonctionnement, on a simulé le comportement dynamique de la MADA avec une alimentation rotorique ($V_r=12v$, $Cr =10N.m$), (le stator étant alimenté par un réseau triphasé équilibré).

II.9.1.3 teste avec alimentation rotorique $V_r=12 V$, $Fr=5 Hz$ et $Cr= 10N.m$:

La simulation du modèle montre clairement les capacités de la MADA en fonctionnement en mode hyper-synchrone même si la fréquence statorique est fixée à 50Hz.

La MADA ne peut démarrer directement en mode double alimentée, elle doit être en rotor court-circuité pour sa mise en marche en asynchrone [22], [40].

A l'instant $t = 2$ sec, on applique aussi un couple de charge (10 N.m), on a la vitesse=157rad/s et le reste variable comme sinusoïdale avec une légère variation durant l'application de la charge (figure II.8).

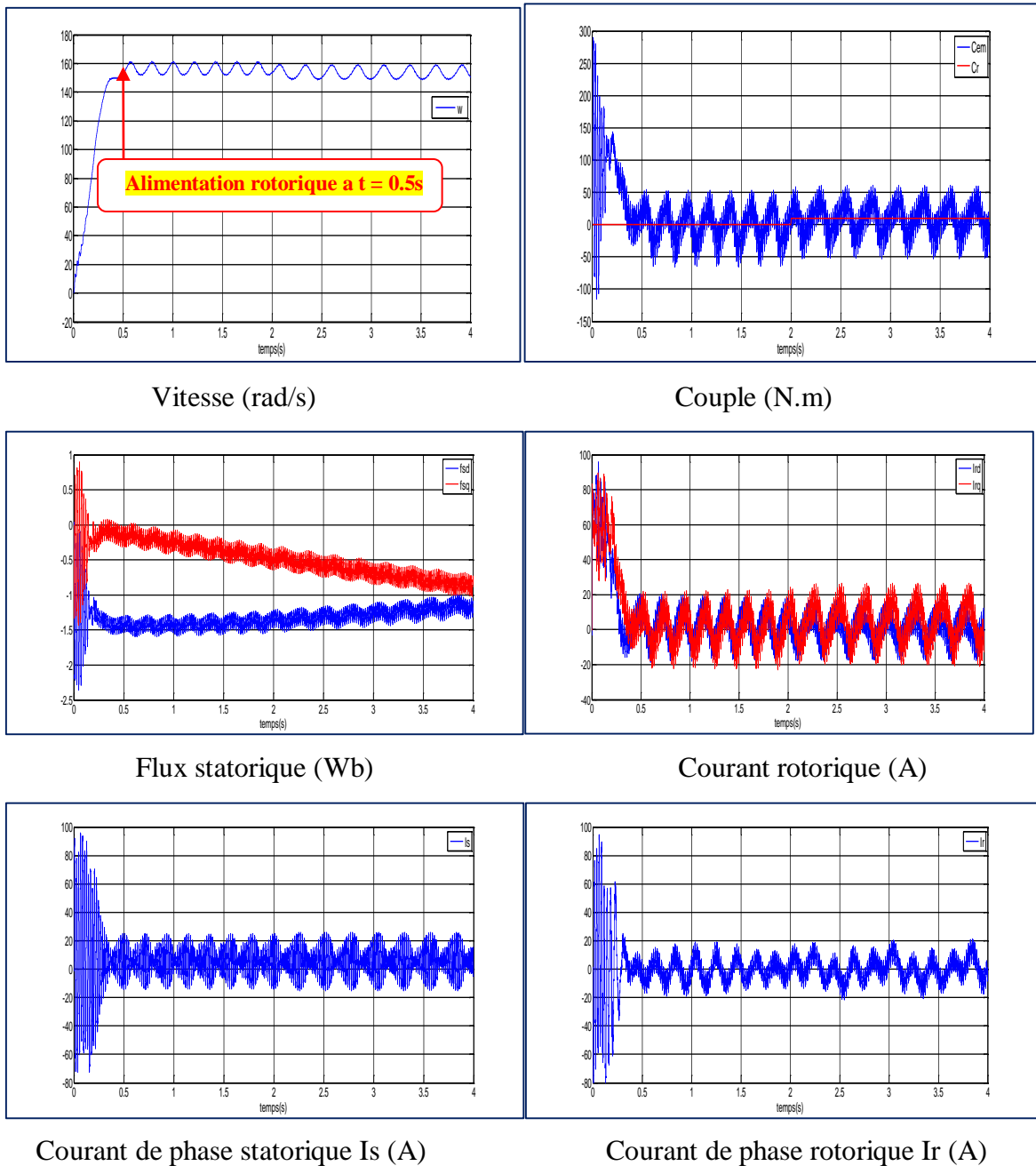


Fig. (II.8): Courbes de simulation de la MADA (teste avec alimentation rotorique et $V_r=12$ V, $F_r=5$ Hz et $C_r= 10$ N.m)

II.9.1.4 teste avec alimentation rotorique $V_r=12$ V, $F_r=15$ Hz et $C_r= 10$ N.m:

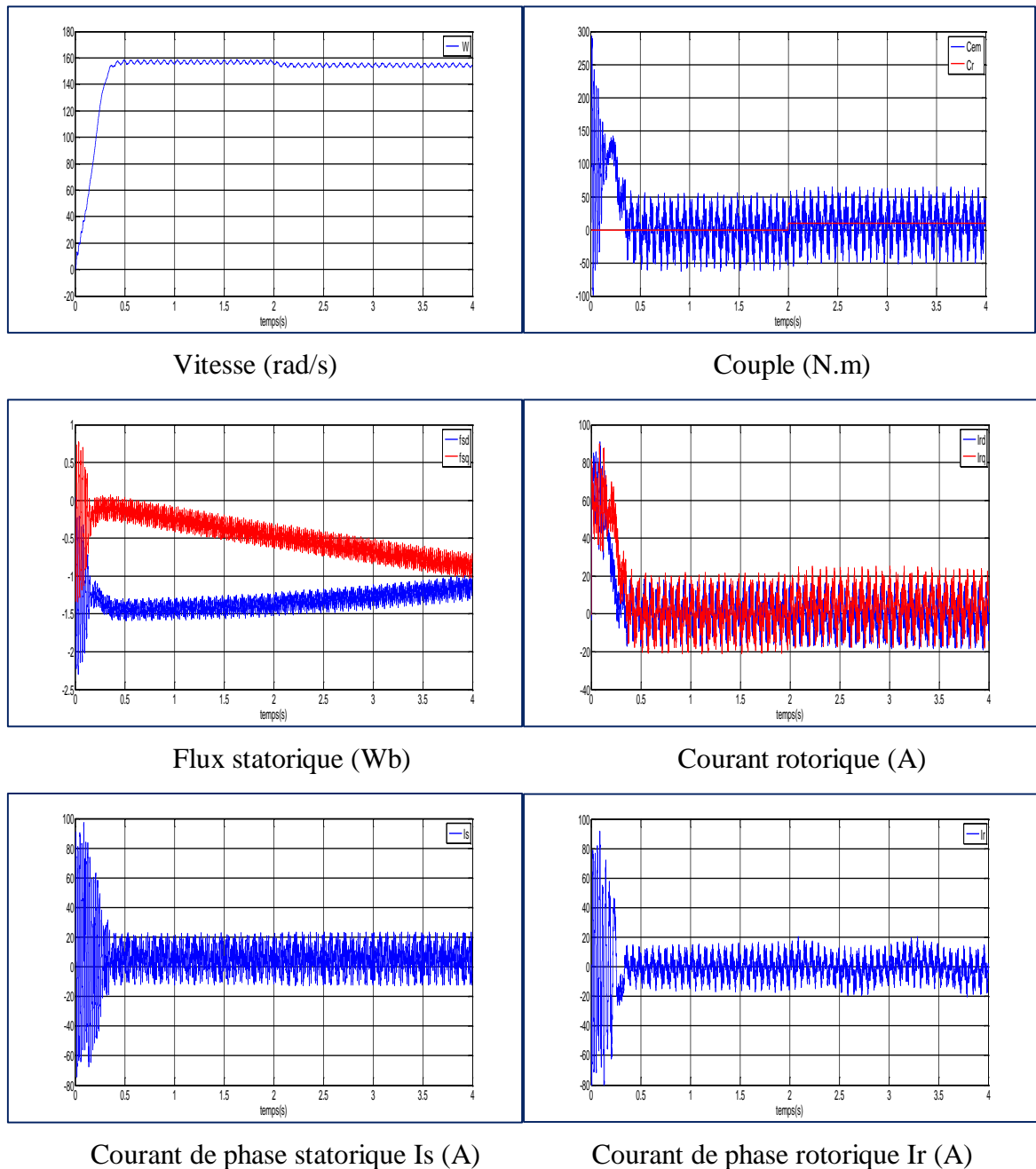


Fig. (II.9): Courbes de simulation de la MADA (teste avec alimentation rotorique $V_r=12$ V, $F_r=15$ Hz et $C_r= 10$ N.m)

II.9.2 Interprétation des résultats :

La modélisation et la simulation de la MADA ont permis de déterminer et d'analyser les différentes caractéristiques du couple, de la vitesse, du flux et des courants pour différentes valeurs de fréquence et couple résistant. La tension d'attaque de la MADA à $t = 0$ coté stator c'est la tension du réseau électrique à fréquence et tension constantes ($V=220$ v ; $f=50$ Hz). Du côté rotorique, on va étudier deux modes de fonctionnement (sans

alimentation rotorique et varier le couple résistant et le cas avec alimentation rotorique et on fait varier la fréquence).

Dans les différents tests réalisés, on remarque :

Les résultats obtenus par les figures (II.6), (II.7), (II.8) et (II.9), montrent bien le couplage existant entre les différentes variables de la machine, l'importance des pics de courant et du couple et les mauvaises performances dynamiques et statiques de la vitesse. Donc, pour améliorer la réponse dynamique de la machine et éliminer le couplage existant entre le couple et le flux, on a recours à la commande vectorielle qui permet d'avoir un contrôle indépendant du couple et du flux et un réglage de la vitesse.

II.10 Conclusion :

On a établi dans ce chapitre le modèle de la machine asynchrone à double alimentation MADA dans le repère de Park lié au champ tournant. Ce modèle a été développé dans le cadre de certaines hypothèses simplificatrices que nous devons respecter.

Les résultats de simulation de la MADA alimentée par le réseau et à travers un onduleur MLI, ont permis de déterminer et d'analyser les différentes caractéristiques du couple, de la vitesse, du flux et des courants pour différentes valeurs de fréquence et du couple résistant.

Le prochain chapitre sera consacré à la commande vectorielle de la MADA, qui permet d'avoir un comportement dynamique similaire à celui d'une machine à courant continu MCC.

CHAPITRE III

*Commande Vectorielle
de la Machine
Asynchrone Double
Alimentation MADA*

III.1 Introduction :

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur [27].

L'un des problèmes de la MADA réside dans la stabilité en boucle ouverte, par conséquent, sans le recours au contrôle strict de la position relative entre $f_{mm}'s$, le risque d'instabilité et le décrochage devient imminent. Pour solutionner ce problème, plusieurs stratégies ont été proposées, parmi elles établies sur le principe conventionnel de la commande vectorielle à flux orienté [28].

Pour réaliser un contrôle similaire à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, il est nécessaire d'orienter le flux en quadrature avec le couple d'où le nom de méthode à flux orienté. Cette orientation permet de transformer l'expression du couple électromagnétique en une forme similaire à celle de la machine à courant continu [29].

III.2 Théorie de la commande vectorielle de la MADA :

III.2.1 Principe de la commande vectorielle à flux orienté :

La commande vectorielle a été proposée en 1971 par Blashke. Elle consiste à séparer la commande du flux de celle du couple en orientant le flux selon l'axe direct du repère choisi. Cette méthode fait deux choix, le premier concerne les variables d'états, le second le choix du repère. Cela permet d'avoir une structure de commande découplée.

Cette dernière est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. Ou bien, elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui de la machine à courant continu, où le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit [30]. De nombreuses variétés de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer suivant la source d'énergie [31] :

- Commande en tension.
- Commande en courant

Suivant l'orientation du repère :

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux d'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement.

L'objectif pour une commande du MADA est de réaliser l'opération précédente à l'aide de variables de commande similaire comme le montre la Fig. (III.1).

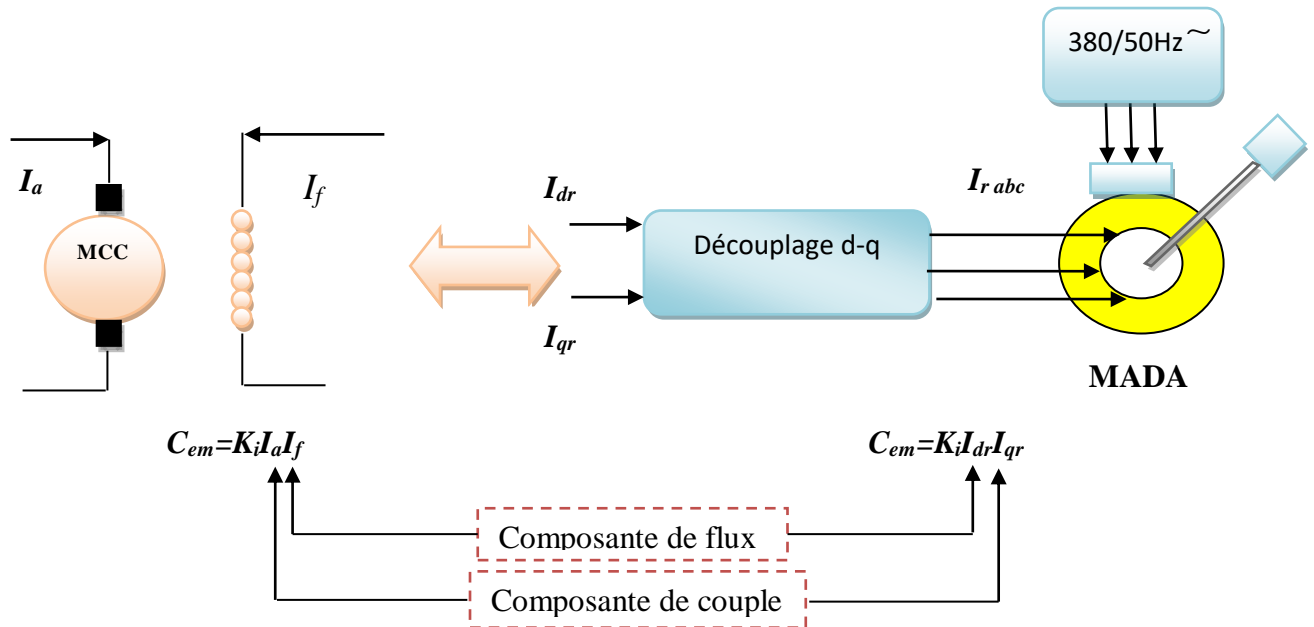


Fig. (III.1) : Principe de commande découplée pour la machine à CC à excitation séparée et la machine asynchrone à double alimentation.

III.2.2 Orientation de flux statorique :

On rappelle d'abord le système d'équations différentielles de la machine :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (III.1)$$

Les équations liant les flux sont :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (III.2)$$

Afin de réaliser la loi de commande nous choisissons d'orienter le flux statorique suivant l'axe q figure (III.2). Par conséquent nous obtenons :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (III.3)$$

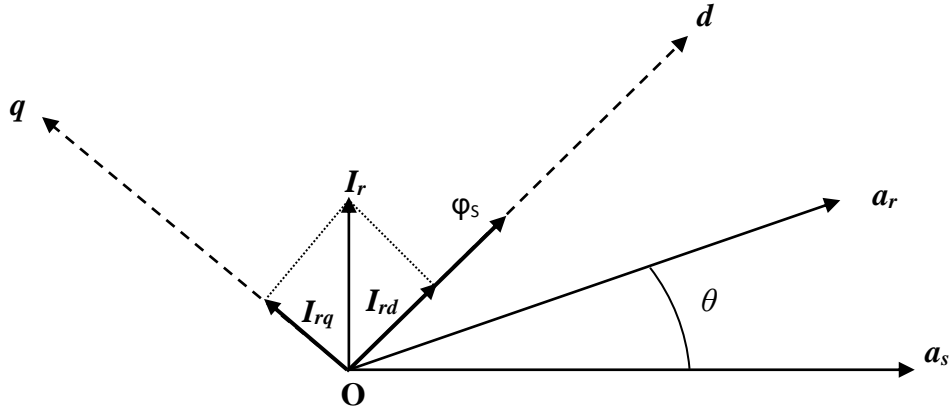


Fig. (III.2) : Orientation du flux Statorique.

Une simplification des équations (III.1) de la machine est obtenue alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + L_s \cdot \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \cdot \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

L'expression du flux statorique es donnée par :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \rightarrow \varphi_s = M \cdot I_{dr} \quad (I_{ds} = 0) \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statorique, on obtient les expressions suivantes des courants statoriques :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Ces courants statoriques sont remplacés dans les équations des composantes directes et en quadrature des flux rotoriques :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{ds} = L_r \cdot \sigma \cdot I_{dr} + \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} - \frac{M^2}{L_s} \cdot I_{qr} = L_r \cdot \sigma \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

σ : Est le coefficient de dispersion entre les enroulements d et q :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s} \quad (\text{III.9})$$

Dans l'hypothèse où le flux est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator), le choix de ce repère rend le couple électromagnétique Produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendants du courant rotorique d'axe q . L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} \varphi_{ds} \cdot I_{qr} \quad (\text{III.10})$$

En introduisant l'expression du flux statorique (III.6) dans l'expression du couple électromagnétique (III.10) on obtient :

$$C_{em} = p \frac{M^2}{L_s} \cdot I_{dr} \cdot I_{qr} \quad (\text{III.11})$$

L'expression (III.6) est analogue à celle du couple d'une machine à courant continu. Ceci permet d'obtenir une commande vectorielle découplée où la composante I_{rq} contrôle le couple et le flux φ_s étant imposé par la composante I_{rd} [37-39].

Puisque $\varphi_{ds} = \varphi_s$ et $\varphi_{qs} = 0$, on peut écrire les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} = V_{sd} + \frac{M}{T_s} I_{rd} - \frac{1}{T_s} \varphi_{sd} \\ \frac{d\varphi_{sq}}{dt} = V_{sq} + \frac{M}{T_s} I_{rq} - \omega_s \cdot \varphi_{sd} = 0 \\ \frac{dI_{rd}}{dt} = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{L_s T_s L_r} \right) I_{rd} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{sd} + \frac{M}{\sigma L_r L_s T_s} \varphi_{sd} + \omega_r \cdot I_{rq} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{rd} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{L_s T_s L_r} \right) I_{rq} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{sq} + \frac{M}{\sigma L_r L_s} \omega \cdot \varphi_{sd} - \omega_r \cdot I_{rd} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

III.3 Commande vectorielle directe et indirecte :

La première appelée méthode directe et la seconde connue sous le nom méthode indirecte.

Dans la commande directe, on effectue une régulation de flux qui nécessite la connaissance de celui-ci, tandis que dans la commande indirecte, on se libère de la connaissance de ce flux en faisant quelques approximations [32].

III.3.1 Commande vectorielle directe(CVD) :

Cette méthode a été proposée par Blaschke et rendue publique vers 1970 [32], (Feedback control), elle se base sur la connaissance exacte du flux (statorique dans notre cas) et de sa position. Il faut donc procéder à une série de mesures aux bornes du variateur. Une première possibilité est de placer des capteurs dans le bobinage statorique et de mesurer directement les composantes du flux de manière à en déduire l'amplitude et la phase. Les capteurs mécaniquement fragiles sont soumis à des contraintes sévères dues aux vibrations et à l'échauffement. En outre, ce mode nécessite l'utilisation d'un moteur équipé de capteurs de flux, ce qui augmente considérablement le coût de sa construction. Par conséquent, dans la grande majorité de cas, on fait appel à des estimateurs ou des observateurs à partir des mesures effectuées sur le variateur [32].

La méthode directe a l'avantage de prendre beaucoup moins les variations de paramètres de la machine [32].

III.3.2 Commande vectorielle indirecte(CVI) :

La méthode indirecte a été introduite par K. Hasse. Le principe de cette méthode consiste à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude de flux mais seulement sa position.

Elle consiste à estimer la position du vecteur de flux, et régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine.

Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [33].

III.4 Bloc de défluxage :

Ce bloc permet un fonctionnement à couple constant si la vitesse est inférieure à la vitesse nominale, il permet également d'affaiblir le flux inversement proportionnel à la vitesse pour le fonctionnement à puissance constante lorsque la vitesse excède la vitesse nominale (Figure III.3). Ce dernier est défini par la fonction non-linéaire suivante [35] :

$$\begin{cases} \varphi_s = \varphi_{nom} & \text{pour } |\Omega| \leq \Omega_{nom} \\ \varphi_s = \varphi_{nom} \frac{\Omega_{nom}}{|\Omega|} & \text{pour } |\Omega| \geq \Omega_{nom} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Avec :

φ_{nom} : flux statorique nominale.

Ω_{nom} : vitesse nominale.

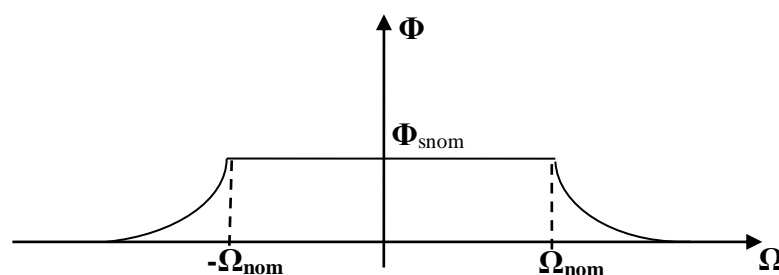


Fig. (III.3) : Profil du flux statorique de consigne (défluxage).

III.5 Calcul des correcteurs :

Pour le système de réglage des courants, nous choisissons d'utiliser des correcteurs de type Proportionnel-Intégral (PI), étant donné qu'ils sont simples à mettre en œuvre. Ce type de correcteur assure une erreur statique nulle grâce à l'action d'intégration, tandis que la rapidité de réponse est établie par l'action proportionnelle. Le calcul des correcteurs est effectué à l'aide du principe d'imposition des pôles [34].

III.5.1 Correcteurs des courants statoriques :

On rappelle la fonction de transfert reliant les composantes statoriques de chaque axe de la MADA : [34]

$$\frac{I_{qs}}{V_{qs}} = \frac{I_{ds}}{V_{ds}} = \frac{1/R_s}{1 + \sigma T_s S} \quad (\text{III.14})$$

Les composantes du courant statorique (I_{ds}, I_{qs}), ont la même boucle de régulation donnée par la figure (III.4).

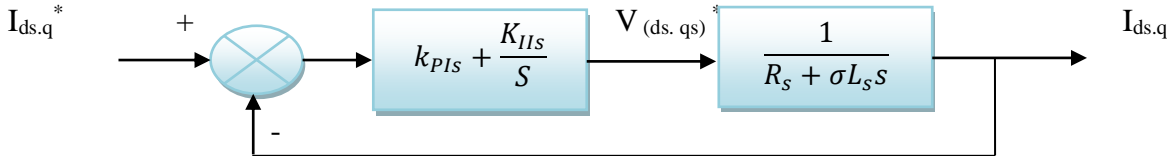


Fig. III.4 : Schéma bloc de régulation des courants statoriques.

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée comme suit :

$$H_{I_s}(s) = \frac{I_{ds,q}}{I_{ds,q}^*} = \frac{\frac{1}{\sigma T_s R_s} (K_{pI_s} s + K_{iI_s})}{s^2 + s \left(\frac{1 + K_{pI_s}/R_s}{\sigma T_s} \right) + \frac{K_{iI_s}}{\sigma T_s R_s}} \quad (\text{III.15})$$

Le dimensionnement des correcteurs est fait à l'aide du principe de l'imposition des pôles. Comme le polynôme caractéristique de l'équation (III.15) est du deuxième ordre, nous imposons deux pôles à partie réelle négative pour avoir plus de souplesse dans le choix des dynamiques de régulation

$$D(s) = S^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_0 \cdot S + \omega_0^2 \quad (\text{III.16})$$

Ainsi, nous obtenons les paramètres des correcteurs, en fonction de l'amortissement ξ et de la pulsation propre ω_0 .

Par identification entre les équations (II.15) et (II.16), nous obtenons les paramètres suivants du correcteur PI : [34]

	K_{pI_s}	K_{iI_s}
Correcteur PI	$(2\xi\omega_0\sigma T_s - 1)R_s$	$\omega_0^2\sigma T_s R_s$

Tableau III.1 : Paramètres des correcteurs des courants statoriques.

III.5.2 Correcteurs des courants rotoriques :

On rappelle la fonction de transfert reliant les composantes rotoriques de chaque axe de la MADA : [34]

$$\frac{I_{qr}}{V_{qr}} = \frac{I_{dr}}{V_{dr}} = \frac{1/R_r}{1 + \sigma T_r S} \quad (\text{III.17})$$

Les composantes du courant rotorique (I_{dr}, I_{qr}), ont la même boucle de régulation donnée par la figure (III.5).

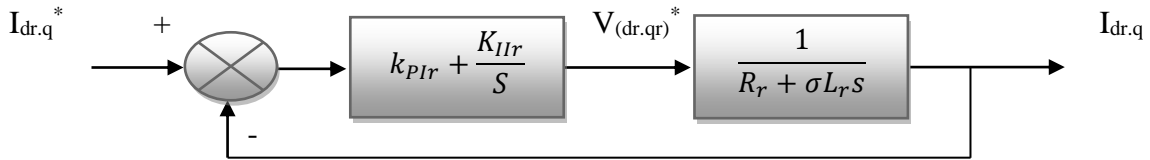


Fig. III.5 : Schéma bloc de régulation des courants rotoriques.

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée comme suit :

$$H_{Ir}(s) = \frac{I_{dr.q}}{I_{dr.q}^*} = \frac{\frac{1}{\sigma.T_r.R_r}(K_{pIr}.S+K_{ilr})}{s^2+s\left(\frac{1+K_{pIr}/R_r}{\sigma.T_r}\right)+\frac{K_{ilr}}{\sigma.T_r.R_r}} \tag{III.18}$$

La même procédure effectuée pour les correcteurs des courants statoriques est appliquée aux correcteurs des courants rotoriques. Les paramètres des correcteurs sont donc les mêmes. Ils sont donnés dans le tableau (III.2). [34]

	K_{pIr}	K_{ilr}
Correcteur PI	$(2\xi\omega_0\sigma T_r - 1)R_r$	$\omega_0^2\sigma T_r R_r$

Tableau III.2 : Paramètres des correcteurs des courants rotoriques.

III.6 Schéma de simulation :

La Figure (III.6) représente la structure sous MATLAB/SIMULINK de la commande vectorielle directe par orientation du flux statorique d’une machine asynchrone à double alimentation MADA avec l’onduleur alimentant le rotor.

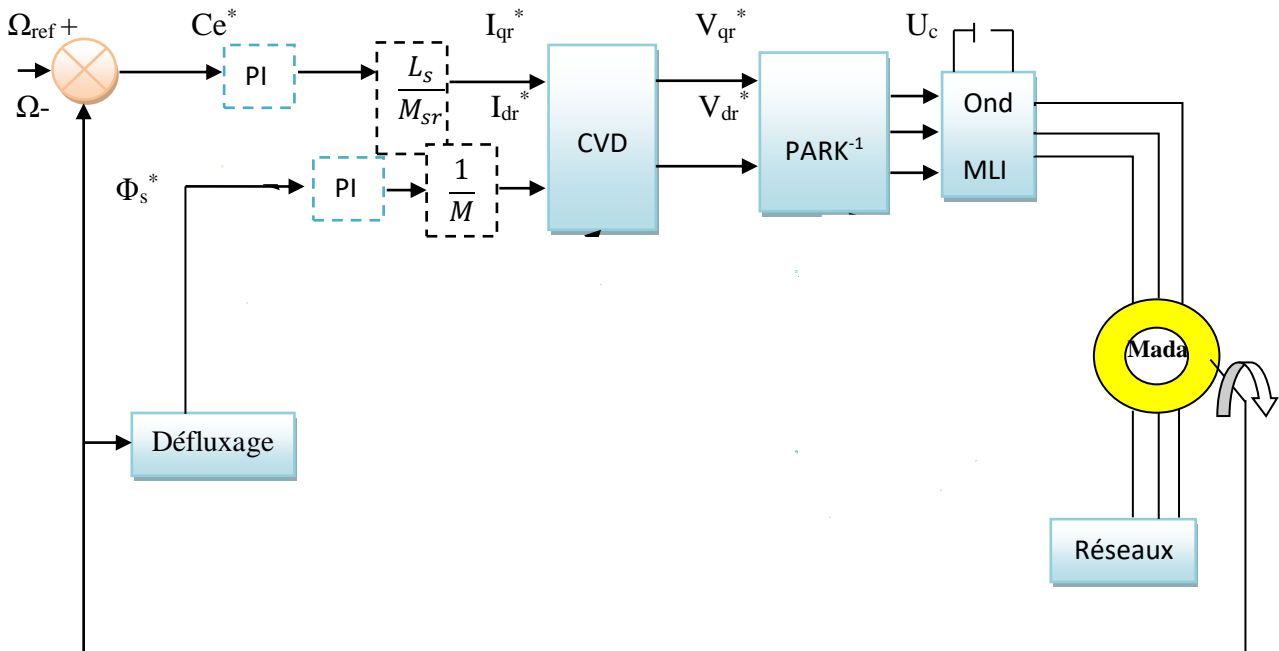


Fig. (III.6) : Schéma de principe de la commande vectorielle directe à flux statorique orienté du MADA.

III.7 Résultats de simulation :

Toutes les simulations des commandes présentées dans ce projet sont réalisées sur un moteur asynchrone à double alimentation (MADA) où le stator est connecté directement au réseau (220 V et 50 Hz) et le rotor est alimenté à travers un onduleur de tension commandé par la technique MLI et piloté par une commande vectorielle directe (CVD) par orientation du flux statorique, dont les paramètres du MADA sont mentionnés dans l'annexe.

III.7.1 Fonctionnement nominal de la machine :

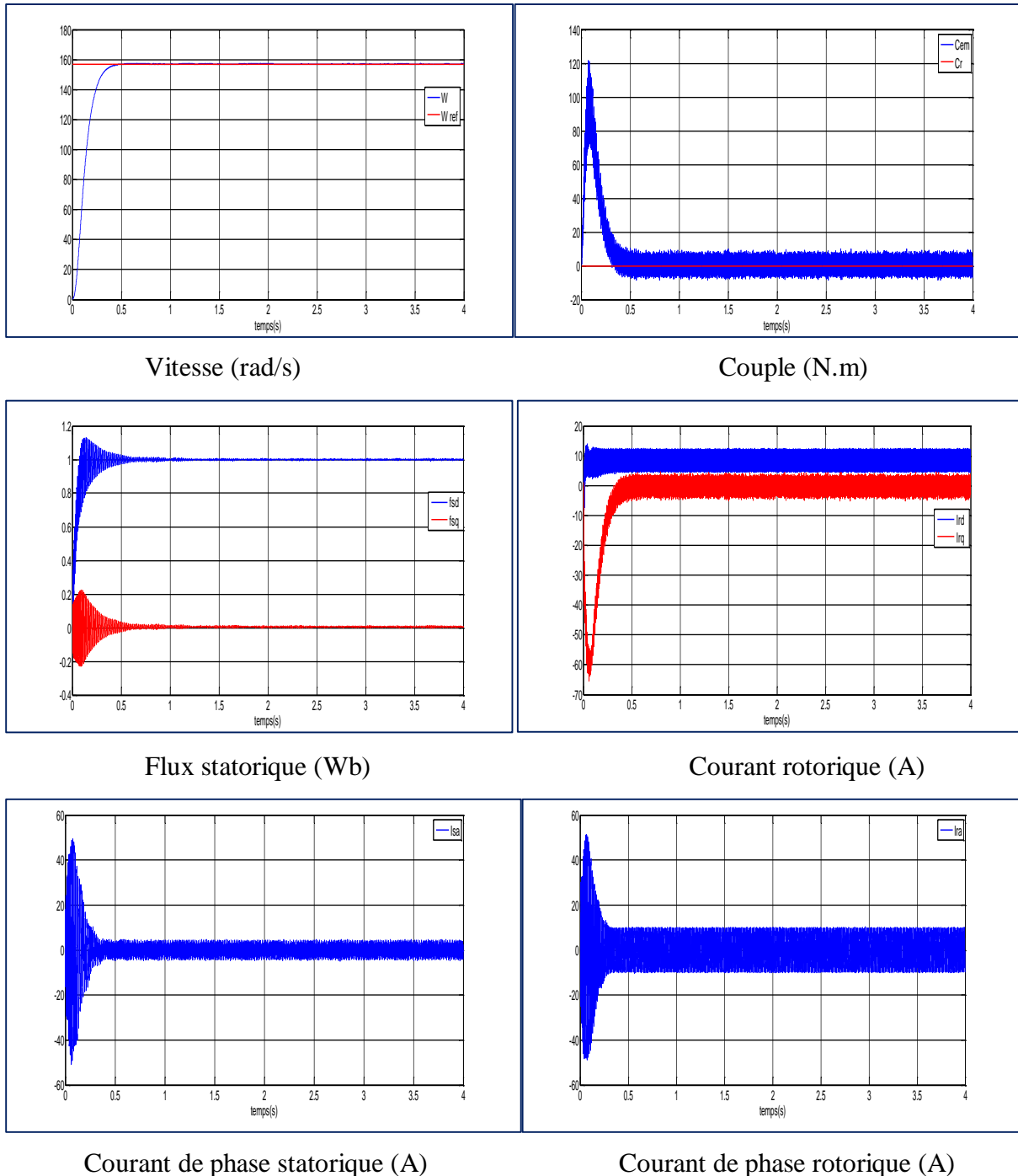


Fig. (III.7) : Fonctionnement nominal de la commande vectorielle de la MADA.

III.7.2 Tests de robustesse :

Dans le but de tester la robustesse de la commande vectorielle directe par orientation du flux statorique, deux tests sont effectués. Le premier est celui par variation du couple de charge, le deuxième par la variation de la résistance rotorique.

III.7.2.1 Démarrage à vide suivi d'une introduction de variation du couple de charge :

Dans ce cas, nous avons simulé un démarrage à vide pour une vitesse de référence de 157 rad/sec, puis un changement cyclique du couple de charge par le temps comme suit :

Temps(s)	0	0.6	0.6	1.1	1.1	1.4	1.4	1.8	1.8
Cr (N.m)	0	0	40	40	30	30	-20	-20	0

Tableau III.3 : Différent niveaux du couple de charge par le temps.

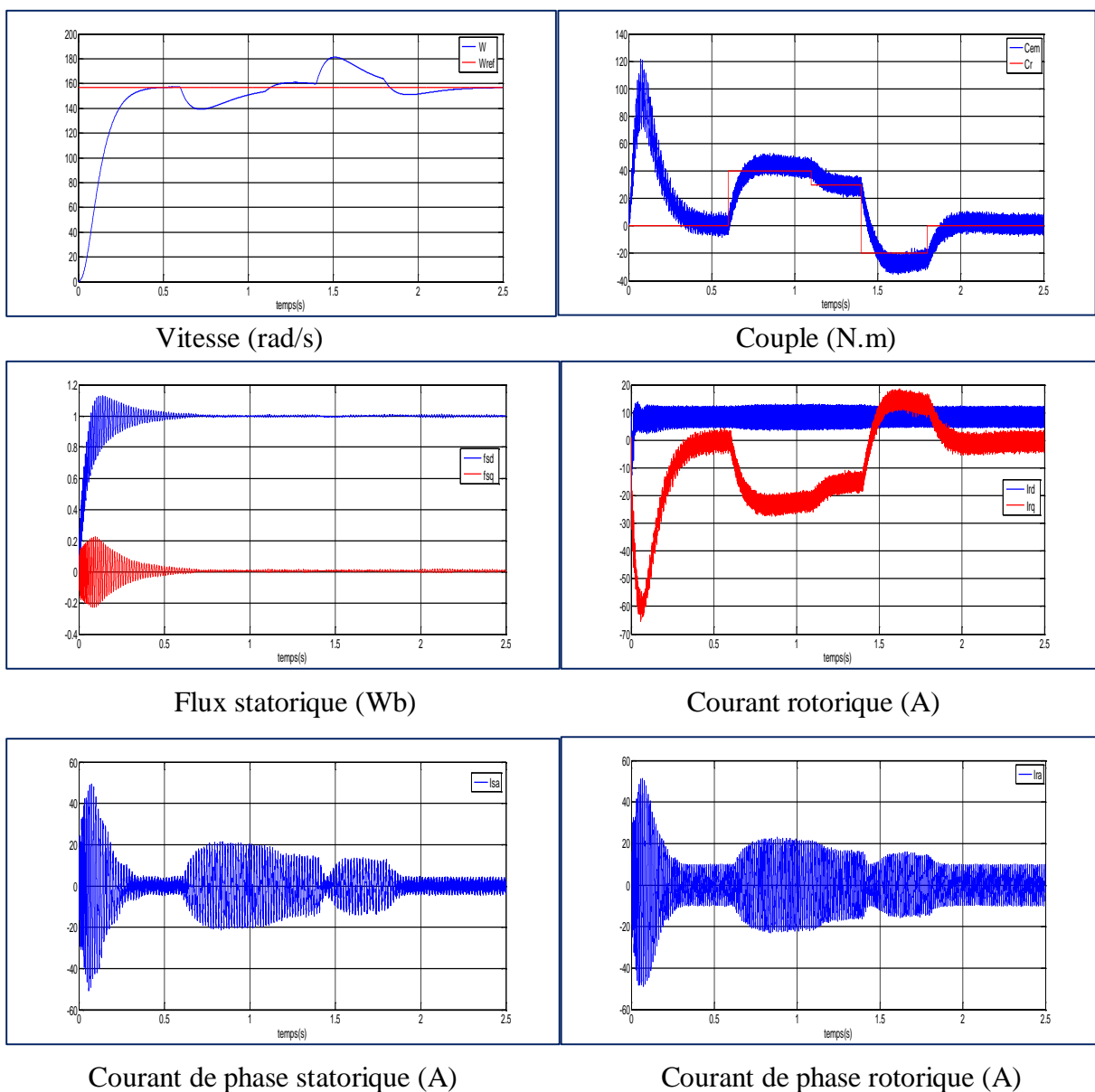


Fig. III.8 : Résultats de simulation de la CVD lors du démarrage à vide suivi d'une introduction de variation de couple de charge.

III.7.2.2 Analyse de la robustesse de (CVD) lors la variation de la résistance rotorique :

Le test de robustesse consiste à faire varier quelques paramètres clés de la machine afin de montrer la robustesse de la commande vectorielle face à ces variations au démarrage à vide du MADA suivi de l'introduction d'un couple de charge de 10 N.m à $t = 0.6$ sec et éliminé à $t = 1.6$ sec, tout en imposant la vitesse de référence $\Omega=157$ rad/sec.

Les performances du contrôle vectoriel direct de la machine asynchrone double alimentée contre les dérives paramétriques sont testées pour une variation de la résistance rotorique. Cependant une augmentation de 100% de la résistance rotorique R_r , fait engendrer des transitoires au niveau du flux, ce qui confirme la dépendance de la loi de commande de la FOC à la résistance rotorique, donc cette technique est non robuste vis à vis des variations paramétriques internes.

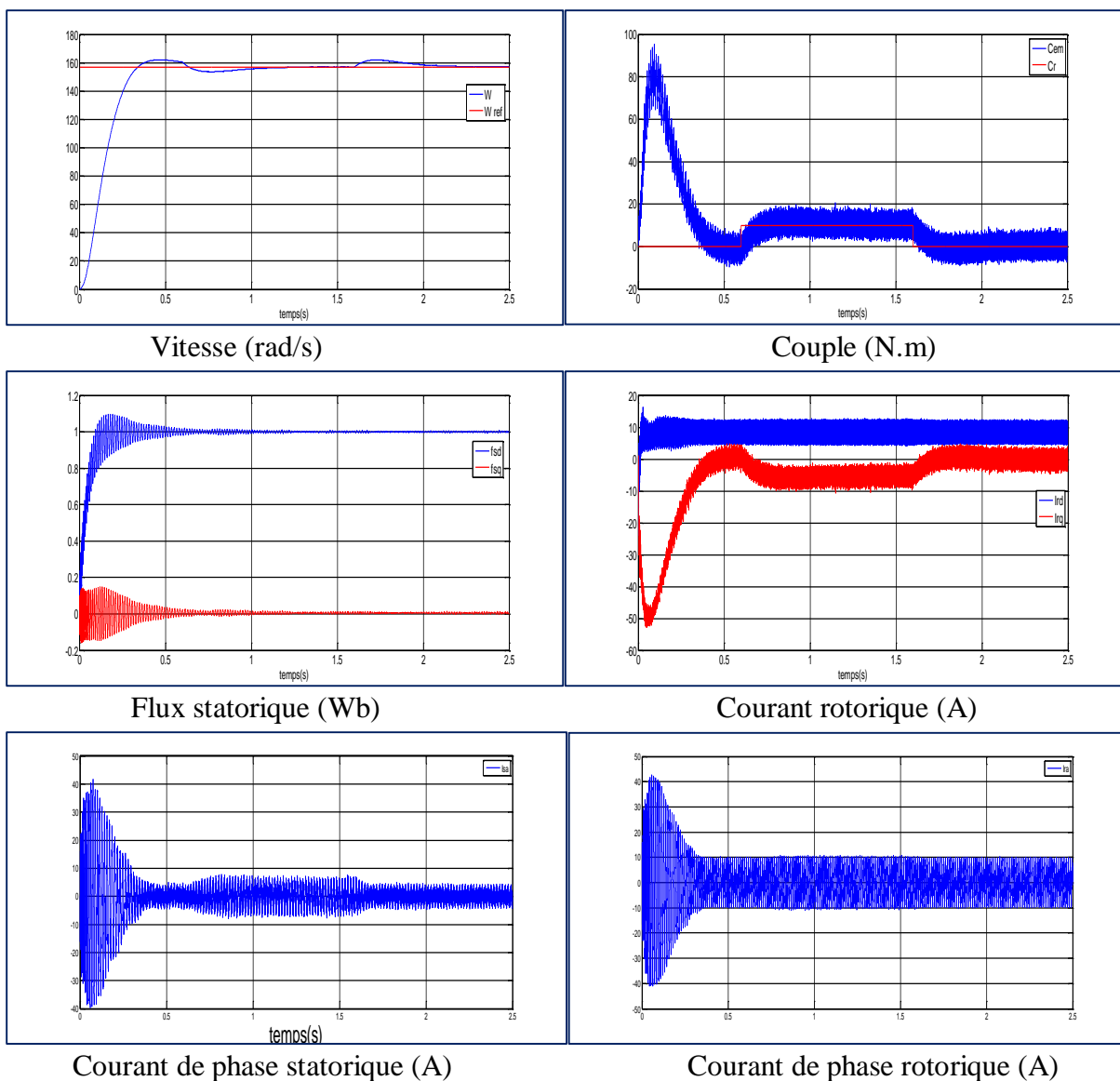


Fig. III.9 : Résultats de simulation de la CVD du MADA lors de la variation de la résistance rotorique (+100%).

III.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté en premier lieu une étude théorique concernant la commande vectorielle, il existe trois types d'orientation du flux, à savoir le flux rotorique, le flux statorique et le flux magnétisant. Ainsi on a choisi l'orientation du flux statorique car cette dernière permet d'obtenir un découplage total entre le flux et le couple électromagnétique. Aussi, on peut noter que la structure de la commande vectorielle directe du flux, qui consiste à déterminer directement le flux considéré par une mesure ou par estimation, pouvait s'exprimer comme une commande découplant.

La méthode du flux orienté appliquée depuis quelques années à la machine asynchrone reste la méthode la plus répandue. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux. Elle permet de rendre la forme du couple du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) similaire à celle de la machine à courant continu MCC.

Cette technique de commande possède un inconvénient majeur, car le comportement de la machine et de sa commande vectorielle est dégradé lors la variation des paramètres liés à la température, à la fréquence et à la saturation. Dans ce contexte et afin de pallier ce problème, on propose dans le chapitre suivant une technique de commande occupant une importante place parmi les commandes robustes, connues par son adaptation aux changements paramétriques et par sa stabilité qui se traduit par **backstepping**.

CHAPITRE IV

*Commande par
Backstepping de la
Machine Asynchrone
Double Alimentation
MADA*

IV.1 Introduction :

La machine asynchrone est difficilement commandable. La difficulté réside dans le fait que son modèle mathématique dans le repère de PARK est non linéaire multi variables et fortement couplé. Malgré tout ça, la communauté des chercheurs a donné un essor appréciable à la commande du moteur. Parmi les plusieurs méthodes principales de la commande de la machine asynchrone on peut citer :

- Commande scalaire.
- Commande vectorielle.
- Commande directe de couple.
- Commande non linéaire.
- Commande par mode glissant.
- Commande par Backstepping.

Ce chapitre est consacré à l'étude de la commande par Backstepping de la MADA basée sur le principe de l'orientation du flux statorique. Cette approche nous permet de déterminer les composantes des tensions d'alimentation de la machine en assurant la stabilité globale par la théorie de Lyapunov. La commande ainsi obtenue, permet d'assurer le suivi de vitesse, de flux et de courant en assurant à chaque fois des dynamiques stables pour les erreurs entre des grandeurs réelles et de références. Des résultats de simulation de cette commande avec une étude comparative qui résume les principales différences entre la commande vectorielle et la commande par **backstepping** seront présentés à la fin de ce chapitre.

IV.2 Commande par Backstepping :

La technique backstepping a été inspirée par les travaux de Feurer et Morse en 1978 et développée par Kanellako poulos (1991). Cette dernière propose une méthode de synthèse systématique destinée à une classe de systèmes non linéaires ayant une forme triangulaire. Elle est basée sur la décomposition du système entier de commande, qui est généralement multi variable (MIMO) et d'ordre élevé en une cascade de sous-systèmes de commande du premier ordre.

Par ailleurs, cette technique a l'avantage de conserver les non linéarités utiles pour la performance et la robustesse de la commande, contrairement aux méthodes de linéarisation.

La technique du backstepping est une approche relativement récente de commande des systèmes non linéaires [24]. C'est une technique permettant de manière séquentielle et systématique de construire une fonction de Lyapunov stabilisante.

L'idée principale du backstepping, est de concevoir d'une manière constructive une loi de commande pour le système non linéaire en considérant quelques variables d'états comme étant des commandes virtuelles, et leurs concevoir des lois de commandes intermédiaires [24].

Comme la majorité des méthodes de commande étudiées, l'application de la technique du backstepping est limitée à certaines classes de systèmes. Les systèmes dans ce cas doivent être sous forme triangulaire.

La forme générale du système à analyser est donnée par :

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 + \varphi_1(x_1)^T \cdot \theta \\ \dot{x}_2 &= x_3 + \varphi_2(x_1, x_2)^T \cdot \theta \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n + \varphi_{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1})^T \cdot \theta \\ \dot{x}_n &= \beta(x) \cdot u + \varphi_n(x)^T \cdot \theta\end{aligned}$$

Le schéma bloc représente un tel système non linéaire d'ordre n avec $\beta(x) = 1$ est donné par la figure (IV.1).

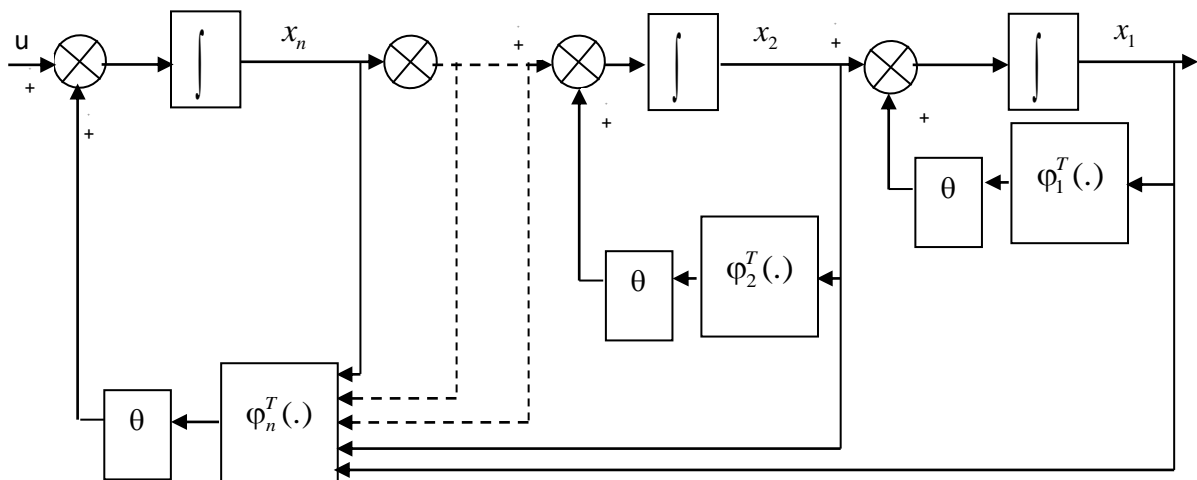


Fig. (IV.1) : Schéma bloc d'un système sous forme triangulaire d'ordre n.

Les variations des paramètres non mesurables et inconnues d'un système donné affectent les performances de sa commande utilisant un régulateur à paramètres fixes. Ces variations sont provoquées par des perturbations paramétriques agissant sur le procédé, en plus des perturbations agissant sur les variables à réguler.

L'utilisation d'un système de commande adaptative permet la mesure d'un certain indice de performance du système de commande, et à partir de l'écart entre l'indice de performance désiré et l'indice de performance mesuré, le mécanisme d'adaptation modifie les paramètres

du régulateur ajustable ou les signaux de commande, afin de maintenir l'indice de performance du système dans le voisinage des valeurs désirées [24].

IV.3 Commande par Backstepping de la MADA :

La technique du backstepping offre un outil efficace qui permet, pour les systèmes non linéaires de tout ordre, de construire récursivement, et d'une manière systématique et directe, la loi de commande et la fonction de Lyapunov qui assure la stabilité de la boucle. L'idée principale du Backstepping est de concevoir d'une manière constructive une loi de commande pour le système non linéaire en considérant quelques variables d'états comme étant des commandes virtuelles, et leurs concevoir des lois de commandes intermédiaires. Dans cette partie, on va développer un système de commande en lui appliquant la technique du Backstepping. L'objectif attendu est d'atteindre la convergence des erreurs vers zéros.

Le modèle de la machine dans le repère (d, q) est donné par :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = \frac{M}{T_s} \cdot I_{dr} - \frac{1}{T_s} \cdot \varphi_{ds} + V_{ds} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = \frac{M}{T_s} \cdot I_{qr} - \omega_s \cdot \varphi_{ds} + V_{qs} \\ \frac{dI_{dr}}{dt} = -\delta \cdot I_{dr} + (\omega_s - \omega) I_{qr} + \alpha \cdot \varphi_{ds} - \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot V_{ds} + \frac{1}{\sigma \cdot L_r} \cdot V_{dr} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} = -(\omega_s - \omega) \cdot I_{dr} - \delta \cdot I_{qr} + \beta \cdot \omega \cdot \varphi_{ds} - \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot V_{qs} + \frac{1}{\sigma \cdot L_r} \cdot V_{qr} \\ \frac{d\Omega}{dt} = -\frac{1}{J} \left(P \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{ds} \cdot I_{qr} + f \cdot \Omega + C_r \right) \end{cases} \quad (IV.1)$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s} ; T_r = \frac{L_r}{R_r} ; T_s = \frac{L_s}{R_s} ; \alpha = \frac{M}{\sigma L_r L_s T_s} ; \beta = \frac{M}{\sigma L_r L_s} ; \delta = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{L_s T_s L_r} \right)$$

L'application du Backstepping à la commande de la machine est divisée en trois étapes : [24]

➤ Etape 1:

Cette première étape consiste à identifier les erreurs z_1 et z_2 qui représentent respectivement l'erreur entre la vitesse réelle Ω et la vitesse de référence Ω_{ref} ainsi que le module du flux statorique φ_{ds} et celui de référence φ_{ds}^{ref} .

$$\begin{aligned} z_1 &= \Omega_{ref} - \Omega \\ z_2 &= \varphi_{ds}^{ref} - \varphi_{ds} \end{aligned} \quad (IV.2)$$

La dérivée de l'erreur est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \dot{\Omega}_{ref} - \dot{\Omega} = \dot{\Omega}_{ref} + \frac{1}{J} \left(P \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{ds} \cdot I_{qr} + f \cdot \Omega + C_r \right) \\ \dot{z}_2 &= \dot{\varphi}_{ds}^{ref} - \dot{\varphi}_{ds} = \dot{\varphi}_{ds}^{ref} - \left(\frac{M}{T_s} \cdot I_{dr} - \frac{1}{T_s} \cdot \varphi_{ds} + V_{ds} \right) \end{aligned} \quad (IV.3)$$

La première fonction de Lyapunov est définie par :

$$v_1 = \frac{1}{2} (z_1^2 + z_2^2) \quad (IV.4)$$

Alors, la dérivée de (IV.4) est calculée comme :

$$\dot{v}_1 = z_1 \left(\dot{\Omega}_{ref} + \frac{1}{J} \left(P \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{ds} \cdot I_{qr} + f \cdot \Omega + C_r \right) \right) + z_2 \left(\dot{\varphi}_{ds}^{ref} - \left(\frac{M}{T_s} \cdot I_{dr} - \frac{1}{T_s} \cdot \varphi_{ds} + V_{ds} \right) \right) \quad (IV.5)$$

On choisit les fonctions stabilisantes comme suit :

$$\begin{cases} I_{qr}^{ref} = -\frac{J \cdot L_s}{p \cdot M \cdot \varphi_{ds}} \left(k_1 z_1 + \dot{\Omega}_{ref} + \frac{f}{J} \Omega + \frac{C_r}{J} \right) \\ I_{dr}^{ref} = \frac{T_s}{M} \left(k_2 z_2 + \dot{\varphi}_{ds}^{ref} - V_{ds} + \frac{1}{T_s} \cdot \varphi_{ds} \right) \end{cases} \quad (IV.6)$$

Alors la dynamique des erreurs est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= -k_1 z_1 \\ \dot{z}_2 &= -k_2 z_2 \end{aligned} \quad (IV.7)$$

La dérivée de la fonction de Lyapunov par rapport au temps est :

$$\dot{v}_1 = -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 < 0 \quad (IV.8)$$

Avec :

$$k_1 > 0 \text{ et } k_2 > 0$$

➤ Etape 2:

Dans cette étape, on définit deux nouvelles erreurs des composantes du courant statorique données par :

$$\begin{aligned} z_3 &= I_{qr}^{ref} - I_{qr} = -\frac{J \cdot L_s}{p \cdot M \cdot \varphi_{ds}} \left(k_1 z_1 + \dot{\Omega}_{ref} + \frac{f}{J} \Omega + \frac{C_r}{J} \right) - I_{qr} \\ z_4 &= I_{dr}^{ref} - I_{dr} = \frac{T_s}{M} \left(k_2 z_2 + \dot{\varphi}_{ds}^{ref} - V_{ds} + \frac{1}{T_s} \cdot \varphi_{ds} \right) - I_{dr} \end{aligned} \quad (IV.9)$$

Alors :

$$\begin{aligned} I_{qr} &= -\frac{J \cdot L_s}{p \cdot M \cdot \varphi_{ds}} \left(k_1 z_1 + \dot{\Omega}_{ref} + \frac{f}{J} \Omega + \frac{C_r}{J} \right) - z_3 \\ I_{dr} &= \frac{T_s}{M} \left(k_2 z_2 + \dot{\varphi}_{ds}^{ref} - V_{ds} + \frac{1}{T_s} \cdot \varphi_{ds} \right) - z_4 \end{aligned} \quad (IV.10)$$

On remplace l'expression des courants dans l'équation (12) on trouve :

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= -k_1 z_1 - \frac{p \cdot M \cdot \varphi_{ds}}{J \cdot L_s} z_3 \\ \dot{z}_2 &= -k_2 z_2 + \frac{M}{T_s} z_4 \end{aligned} \quad (IV.11)$$

La dérivée de (IV.9) nous donne :

$$\begin{aligned} \dot{z}_3 &= \dot{i}_{qr}^{ref} - \dot{i}_{qr} = \dot{i}_{qr}^{ref} - \left(\eta_1 + \frac{1}{\sigma L_r} \cdot V_{qr} \right) \\ \dot{z}_4 &= \dot{i}_{dr}^{ref} - \dot{i}_{dr} = \dot{i}_{dr}^{ref} - \left(\eta_2 + \frac{1}{\sigma L_r} \cdot V_{dr} \right) \end{aligned} \quad (IV.12)$$

Où :

$$\begin{aligned} \eta_1 &= -(\omega_s - \omega) I_{dr} - \delta \cdot I_{qr} + \beta \cdot \omega \cdot \varphi_{ds} - \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot V_{qs} \\ \eta_2 &= -\delta \cdot I_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot I_{qr} + \alpha \cdot \varphi_{ds} - \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot V_{ds} \end{aligned}$$

➤ **Etape 3:**

Pour définir les lois de commande, on adopte une nouvelle fonction de Lyapunov décrite par l'expression suivante :

$$v_2 = \frac{1}{2}(z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 + z_4^2) \quad (\text{IV.13})$$

Ainsi la dérivée de la fonction de Lyapunov finale est :

$$\dot{v}_2 = z_1\dot{z}_1 + z_2\dot{z}_2 + z_3\dot{z}_3 + z_4\dot{z}_4 \quad (\text{IV.14})$$

Sa dérivée est donnée par :

$$\dot{v}_2 = -k_1z_1^2 - k_2z_2^2 - k_3z_3^2 - k_4z_4^2 + z_3 \left(k_3z_3 + i_{qr}^{ref} - \eta_1 - \frac{1}{\sigma.L_r} \cdot V_{qr} \right) + z_4 \left(k_4z_4 + i_{dr}^{ref} - \eta_2 - \frac{1}{\sigma.L_r} \cdot V_{dr} \right) \quad (\text{IV.15})$$

Où :

$$k_3 > 0 \text{ et } k_4 > 0$$

Ont choisi la commande comme suit :

$$\begin{aligned} V_{rq}^{ref} &= \sigma.L_r(k_3z_3 + i_{qr}^{ref} - \eta_1) \\ V_{dr}^{ref} &= \sigma.L_r(k_4z_4 + i_{dr}^{ref} - \eta_2) \end{aligned} \quad (\text{IV.16})$$

Ce qui rend $\dot{v}_2 < 0$.

La dérivée de l'erreur z_3 et z_4 sera comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{z}_3 &= -k_3z_3 \\ \dot{z}_4 &= -k_4z_4 \end{aligned} \quad (\text{IV.17})$$

Donc à partir de l'équation (IV.11) et (IV.17) on peut écrire :

$$\dot{Z} = A.Z \quad (\text{IV.18})$$

Avec :

$$[A] = \begin{bmatrix} -k_1 & 0 & \frac{PM\phi_{ds}}{JL_s} & 0 \\ 0 & -k_2 & 0 & \frac{M}{T_s} \\ 0 & 0 & -k_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_4 \end{bmatrix} \text{ et } [Z] = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix}$$

La stabilité de la commande est obtenue si et seulement si un bon choix des gains k_1, k_2, k_3, k_4 [24].

IV.4 Structure générale du contrôle de la commande par Backstepping :

La figure (IV.2) représente le principe de la commande par backstepping de la MADA. La première étape de la commande par backstepping consiste à générer les courants de $i_{dr\ ref}$ et $i_{qr\ ref}$ représentant la commande fictive.

L'erreur entre ces références et les grandeurs réelles des courants résulte de nouvelles erreurs z_3 et z_4 . Enfin on adapte la loi de commande V_{dr} et V_{qr} à partir de l'équation (IV.16) pour assurer la stabilité de la machine.

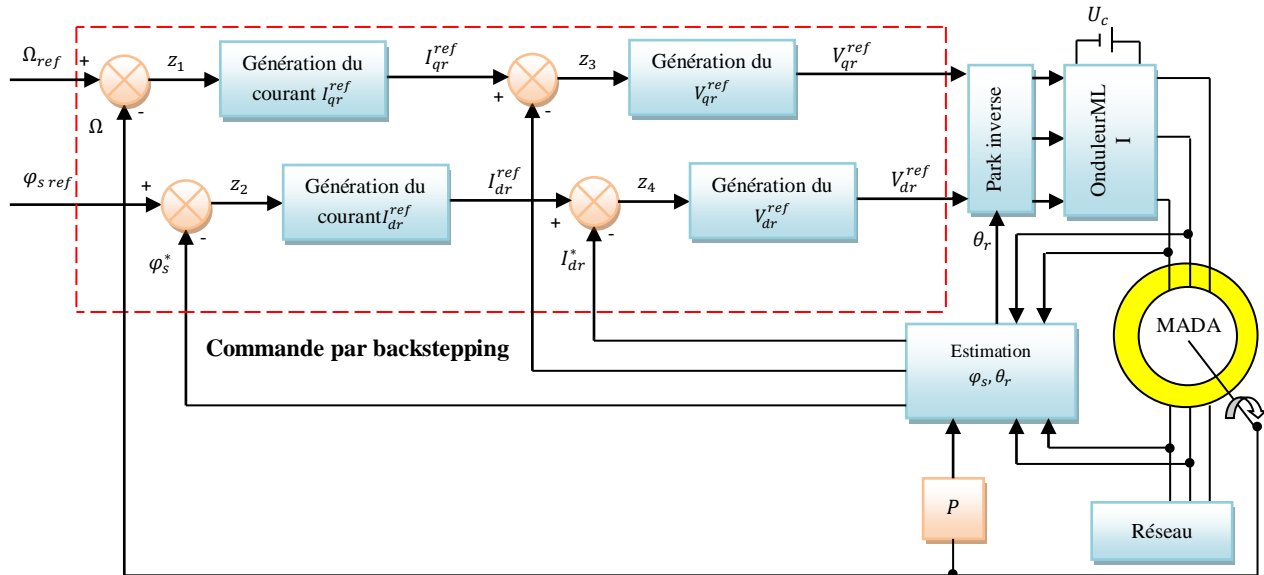
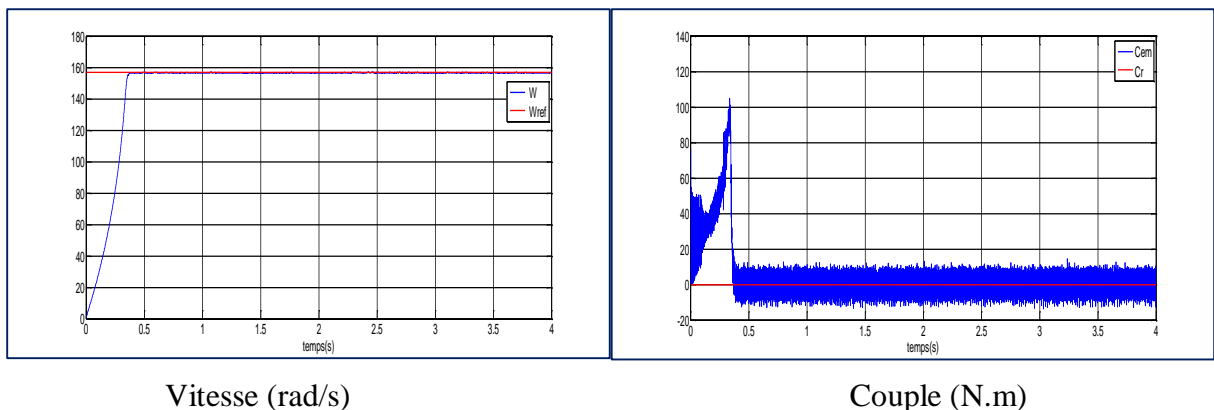


Fig. (IV.2) : Principe de la commande par backstepping de la MADA.

IV.5 Résultats de simulation :

Dans cette étape on va tester la commande par Backstepping de la machine asynchrone basée sur le principe du contrôle vectoriel. Pour arriver à cet objectif, on a appliqué différents tests pour montrer les performances de cette commande et pour démontrer que cette technique offre un outil efficace qui permet, pour les systèmes non linéaires de tout ordre, de construire une loi de commande à base d'une fonction de Lyapunov en assurant la stabilité. Nous avons simulé le système dans les conditions de fonctionnement variable à savoir, la variation de la vitesse, de couple et la variation paramétrique en l'occurrence la résistance rotorique et statorique.

IV.5.1 Fonctionnement nominal de la machine :



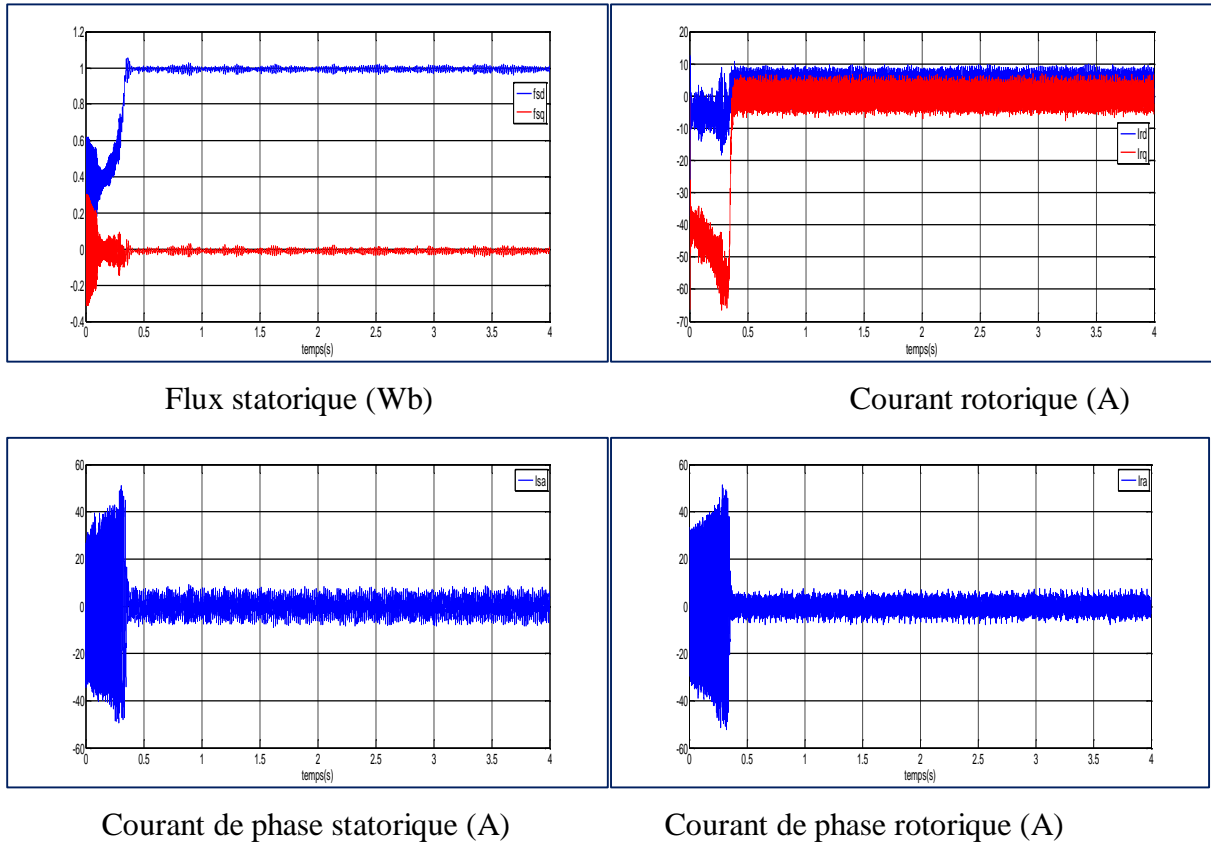


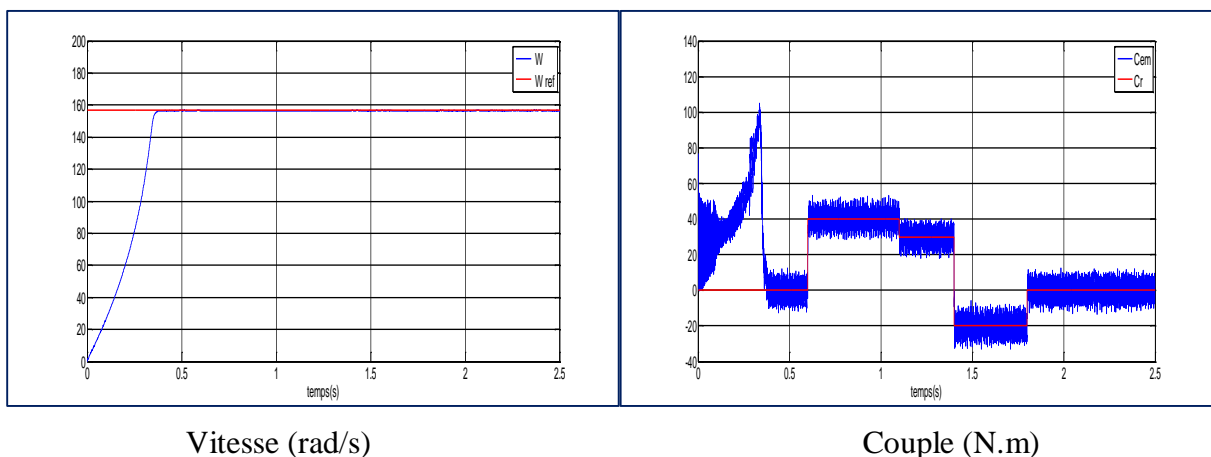
Fig. (IV.3) : Fonctionnement nominal de la commande backstepping de la MADA.

IV.5.2 Fonctionnement à vide suivi d’une introduction de variation du couple de charge :

Pour tester la robustesse de la régulation, nous avons simulé un démarrage à vide pour une vitesse de référence de 157 rad/sec, puis un changement cyclique des différents niveaux de couple de charge qui sont appliqués au MADA par le temps comme suit :

Temps(s)	0	0.6	0.6	1.1	1.1	1.4	1.4	1.8	1.8
Cr(N.m)	0	0	40	40	30	30	-20	-20	0

Tableau IV.1: différent niveaux du couple de charge par le temps.



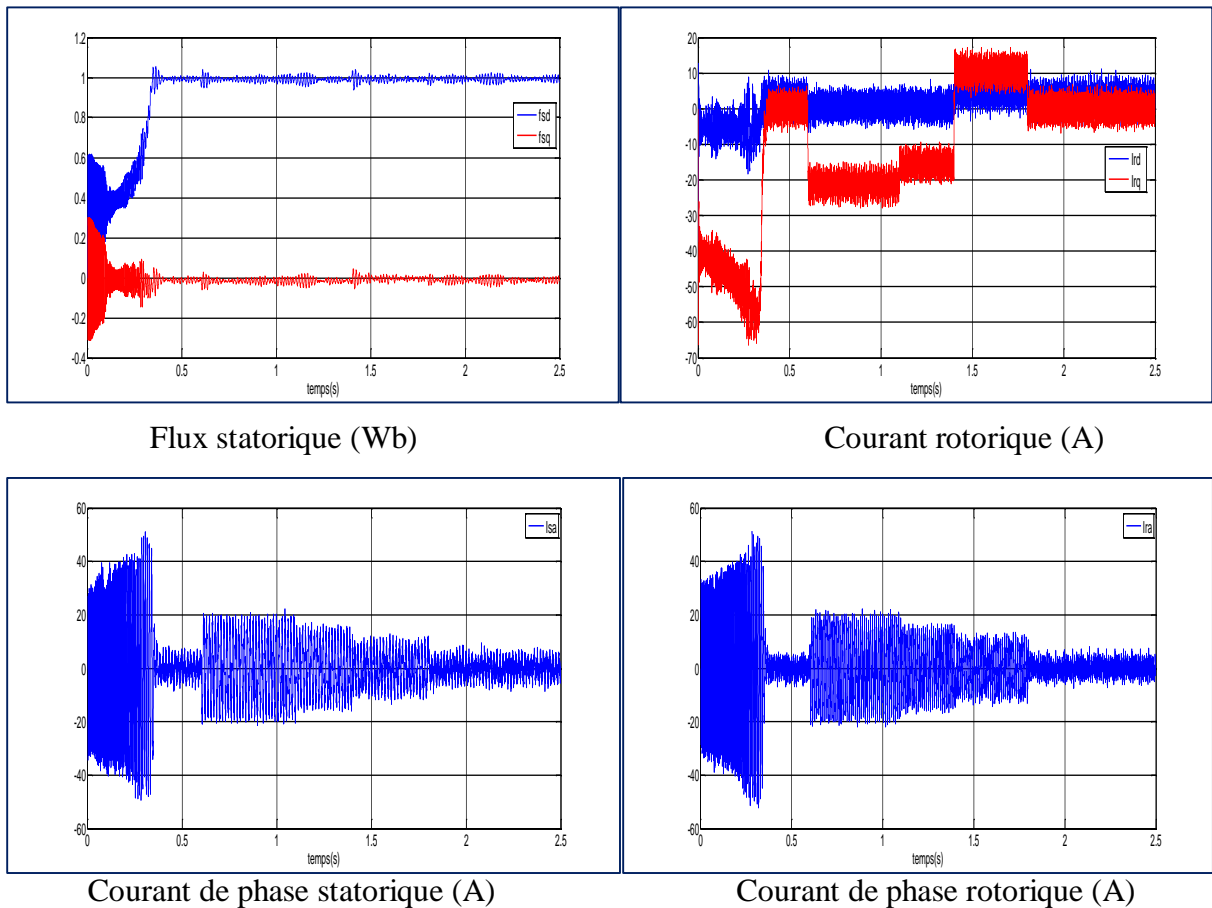
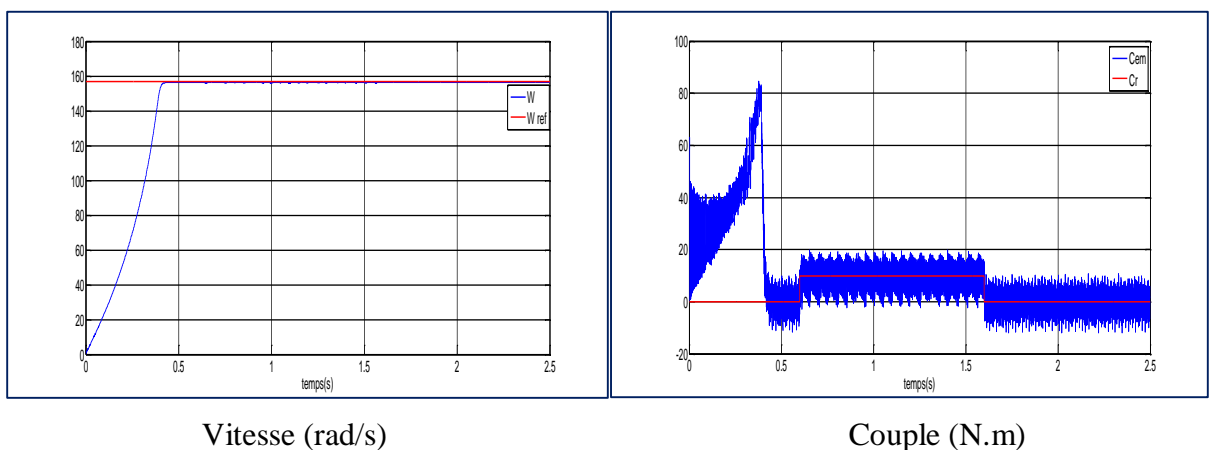
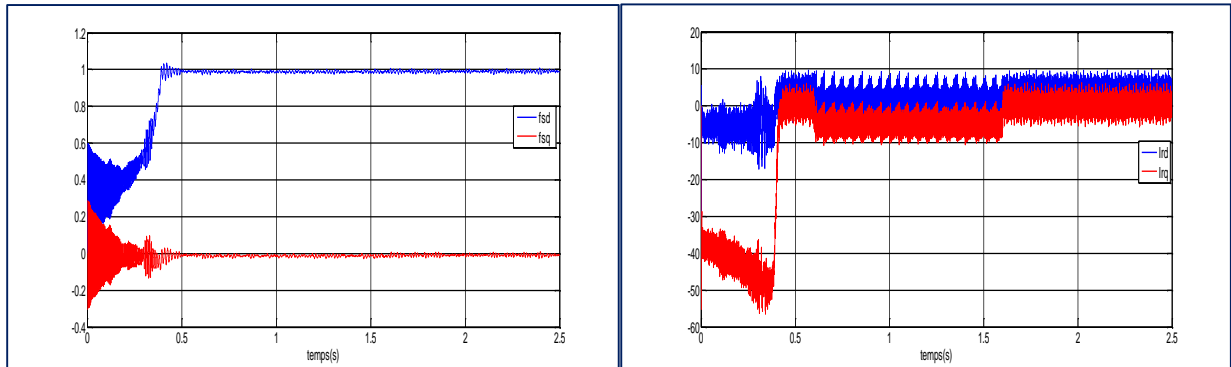


Fig. (IV.4) : Résultats de simulation de la commande backstepping lors du démarrage à vide suivi d'une introduction de variation du couple de la charge.

IV.5.3 : Fonctionnement de la machine lors de la variation de la résistance rotorique :

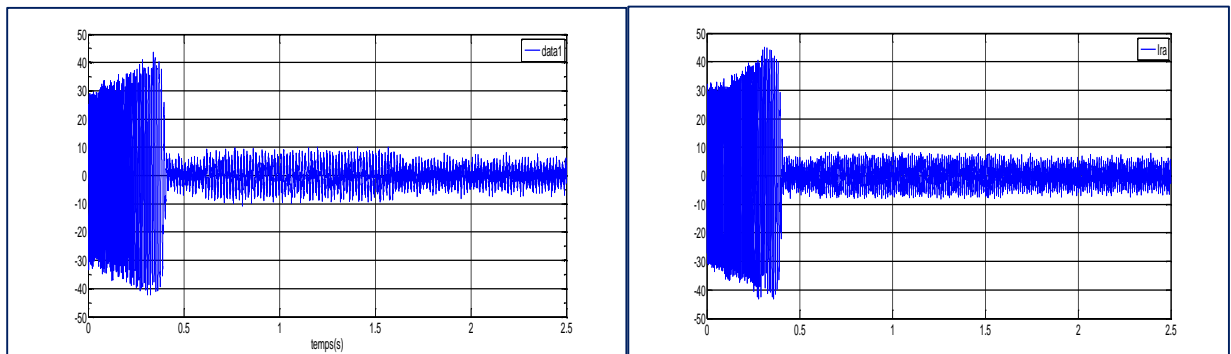
Le test de robustesse consiste à faire varier quelques paramètres clés de la machine afin de montrer la robustesse de la commande backstepping face à ces variations au démarrage à vide du MADA suivi de l'introduction d'un couple de charge de 10 N.m à $t = 0.6$ sec et éliminé à $t = 1.6$ sec, tout en imposant la vitesse de référence =157 rad/sec.





Flux statorique (Wb)

Courant rotorique (A)



Courant de phase statorique (A)

Courant de phase rotorique (A)

Fig. (IV.5) : Résultats de simulation de la commande backstepping du MADA lors de la variation de la résistance rotorique (+100%).

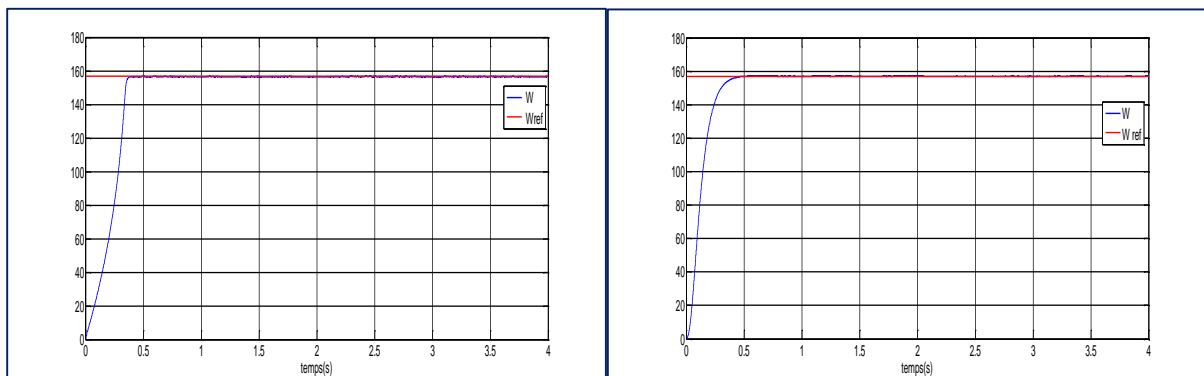
IV.6 Etude comparative :

Les résultats obtenus dans le chapitre 3 et 4 par simulation de la MADA, nous permettent d'effectuer une comparaison entre la commande vectorielle à flux orienté statorique et la commande par **backstepping** d'une machine asynchrone à double alimentation.

Donc, le but attendu est d'évaluer la commande qui répond mieux aux exigences telle que :

- ❖ Meilleure réponse du système.
- ❖ Robustesse vis-à-vis des variations rapides des consignes.

IV.6.1 Comparaison au niveau de fonctionnement nominal de la machine :



C B

Vitesse (rad/s)

C V

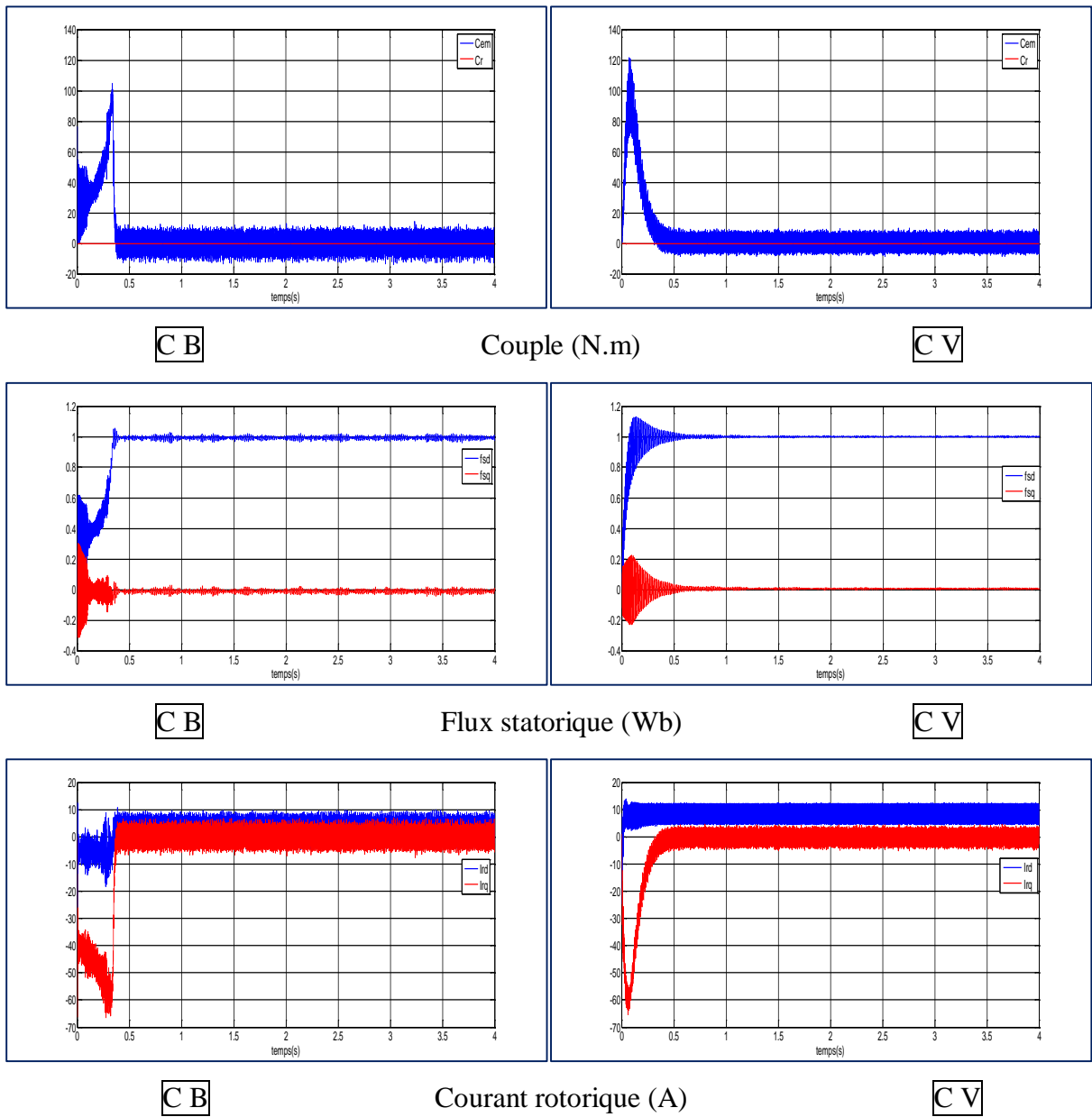
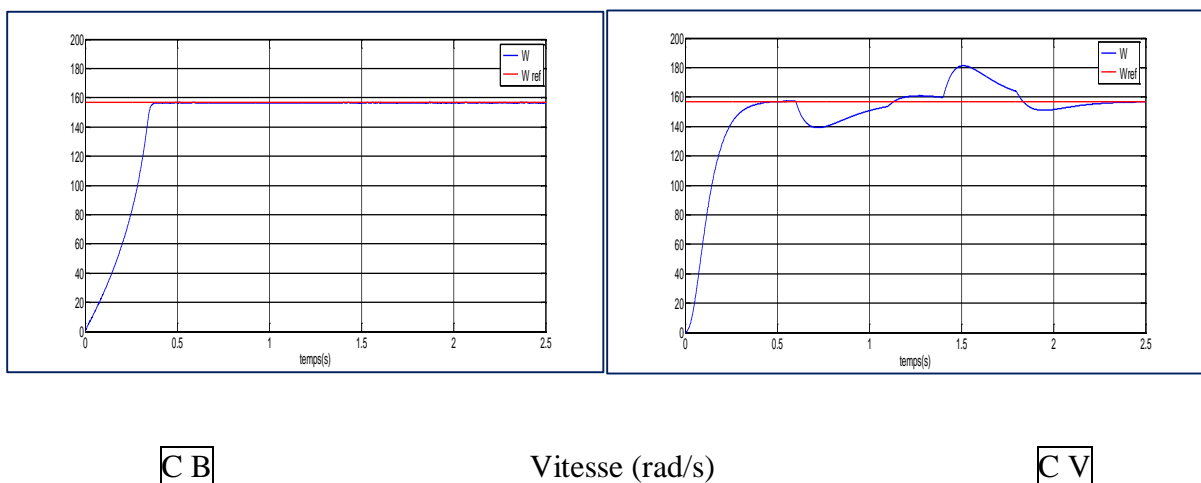
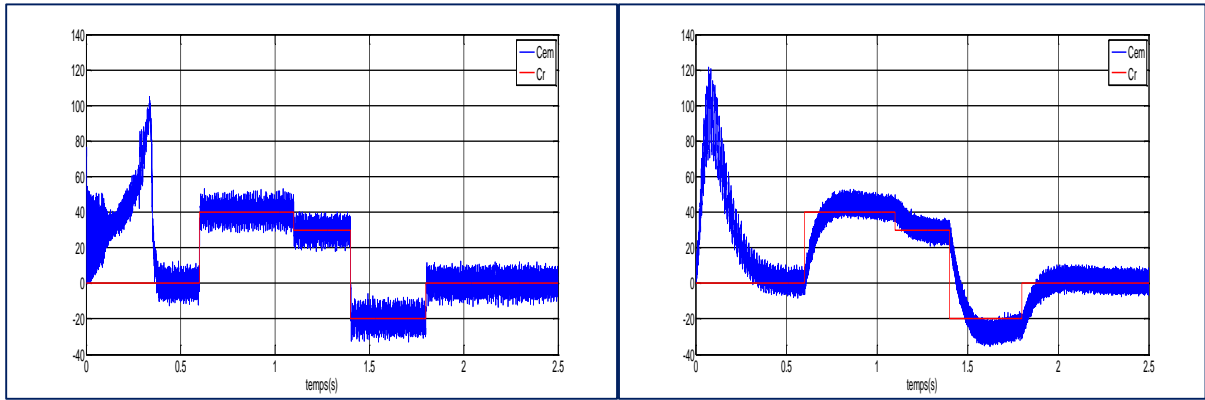


Fig. (IV.6) : Résultats de comparaison au niveau de fonctionnement nominal de la machine.

IV.6.2 : Comparaison au niveau de variation du couple de la charge :

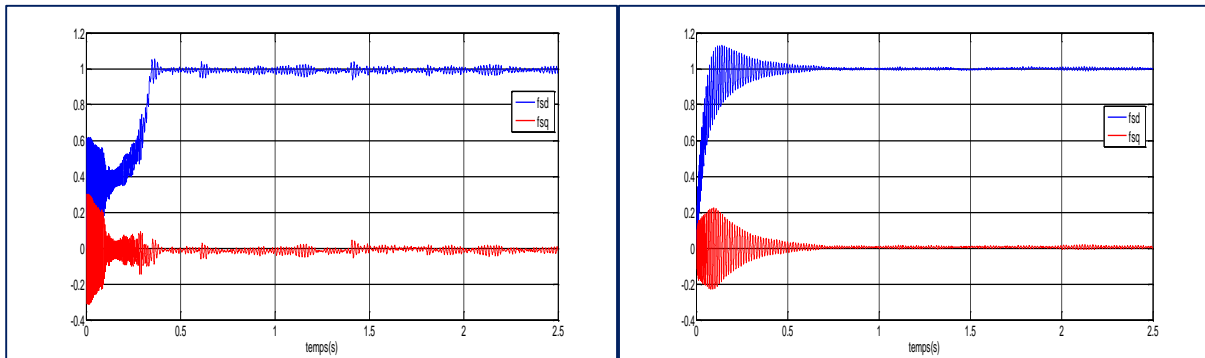




CB

Couple (N.m)

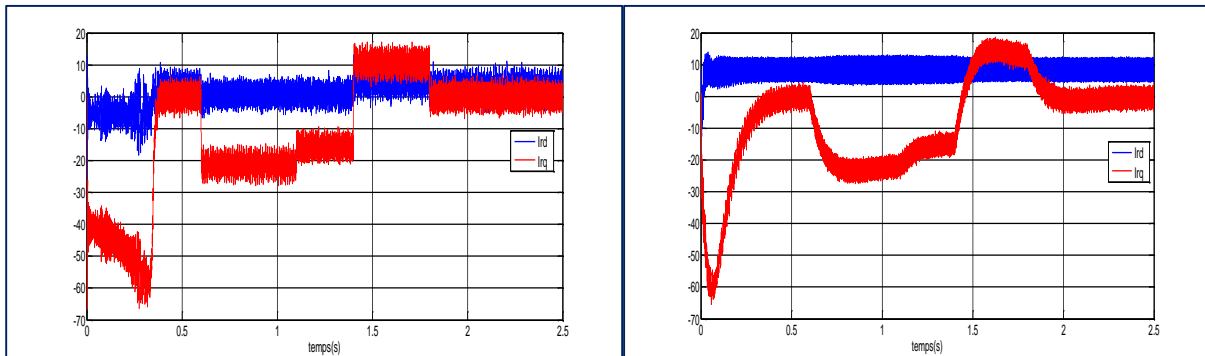
CV



CB

Flux statorique (Wb)

CV



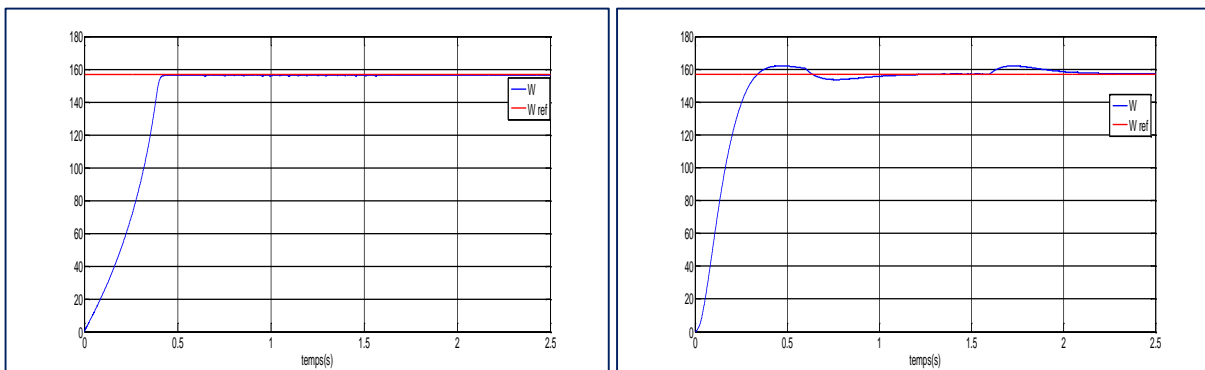
CB

Courant rotorique (A)

CV

Fig. (IV.7): Résultats de comparaison au niveau de variation du couple de la charge.

IV.6.3 : Comparaison au niveau de la variation de la résistance rotorique :



CB

Vitesse (rad/s)

CV

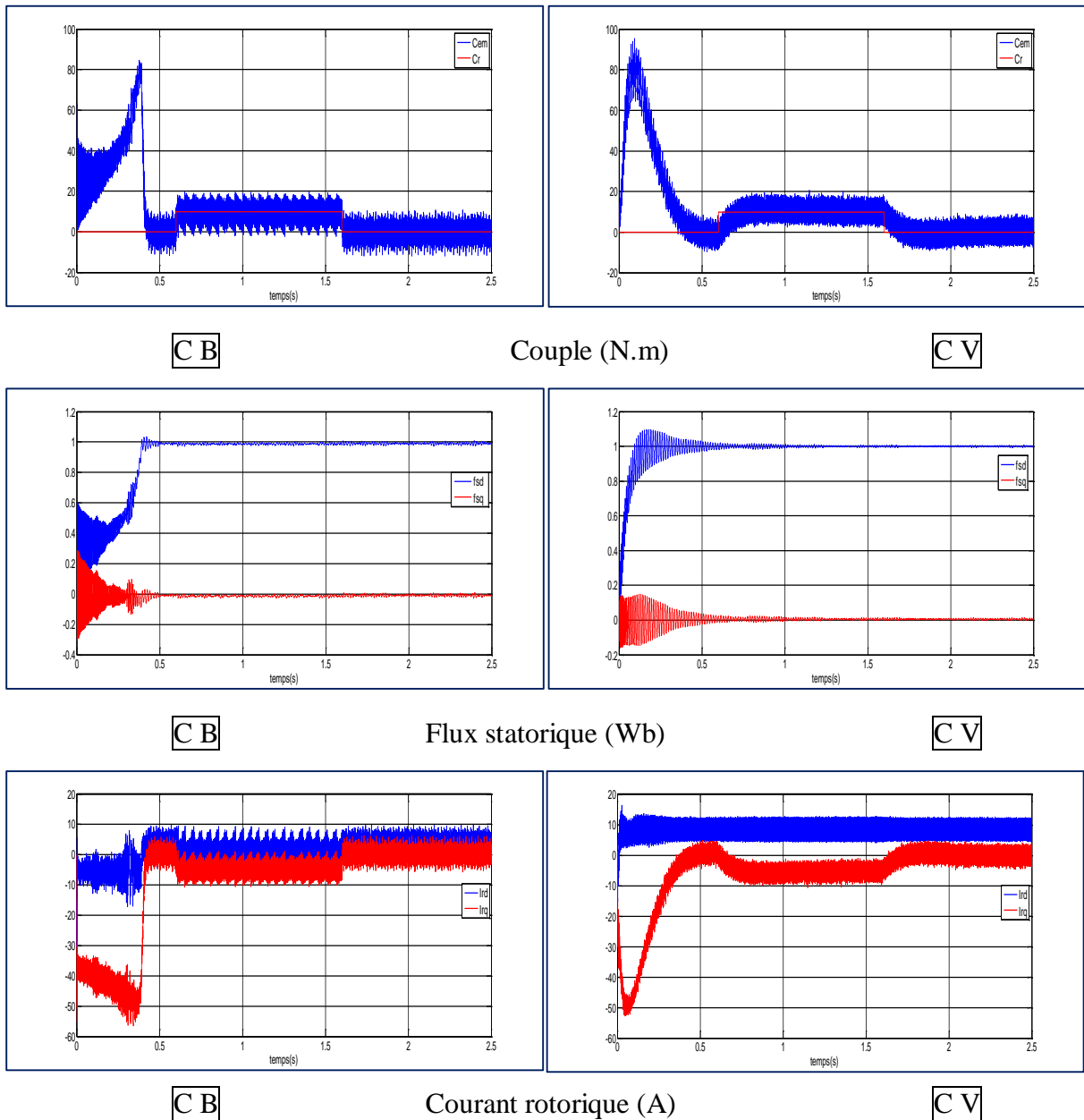


Fig. (IV.8): Résultats de comparaison au niveau de la variation de la résistance rotorique.

IV.6.4 Interprétation de résultats de comparaison :

Les résultats de simulation montrent que à l'instant de l'application de la charge la vitesse subit à une diminution rejetée par la suite dans le cas de la commande vectorielle, par contre dans la commande par backstepping la vitesse ne subit à aucune chute, on remarque aussi que le couple électromagnétique est fortement ondulé dans le cas de la commande vectorielle.

Donc on peut dire que la commande par backstepping rejette la perturbation et minimise les ondulations du couple électromagnétique mieux comparativement avec la commande vectorielle.

IV.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, une nouvelle loi de commande par backstepping à la MADA basée sur le principe de la commande vectorielle par orientation de flux statorique, l'annulation de sa composante en quadrature nous a permis d'avoir un modèle mathématique simplifiée de la machine. L'application du contrôle par backstepping permet de corriger les quatre grandeurs vitesse, flux et les deux composants des courants rotoriques. En remplaçant les régulateurs PI présentés dans la commande vectorielle classique par des fonctions de Lyapunov garantissant la stabilité à tout instant

Des tests de robustesse de cette commande ont été appliqués à la machine telle que la variation de la charge et la variation paramétriques. Les résultats de simulation obtenus montrent une bonne poursuite de la vitesse et du flux aux valeurs de références correspondantes, ainsi le découplage entre flux et couple est toujours maintenu ce qui prouve la robustesse de la commande par backstepping.

L'étude comparative qui fait entre la commande vectorielle et la commande par backstepping montre que ce dernier présente de haute performance comparativement avec la commande vectorielle.

CONCLUSION
GENERALE

Les systèmes industriels qui requièrent une structure de commande, ont souvent un comportement significativement non linéaire, par conséquent il est important de développer des méthodes de commande pour les systèmes non linéaires. L'objectif principal de ce mémoire est de synthétiser un algorithme robuste pour une commande efficace de la MADA.

Le premier chapitre de ce travail (état de l'art), a été consacré à la présentation d'une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant ses modes de fonctionnement, ses avantages et inconvénients et évaluer les performances apportées par cette machine et la domaine d'application de la MADA.

Dans le chapitre deux, on a présenté la modélisation de la MADA à partir des équations mathématiques dans le repère diphasé en utilisant la transformation de Park, tout en tenant en compte des hypothèses simplificatrices. Les résultats de simulation obtenus ont montré l'effet de l'application de la charge.

Dans le chapitre trois, on a présenté la commande vectorielle à orientation statorique. Les résultats obtenus par la commande vectorielle directe montrent bien un découplage parfait ; mais ce dernier est affecté par les variations de la charge, ce qui représente l'inconvénient majeur de la commande vectorielle.

Dans le dernier chapitre, on a appliqué la technique de commande par backstepping basée sur la théorie de l'orientation du flux statorique à la commande de la machine asynchrone à double alimentation. Cette commande élimine l'utilisation des régulateurs en les remplaçant par des fonctions de Lyapunov qui doivent être vérifiées en tout moment. Des tests de robustesse vis-à-vis des variations de la charge et la vitesse ont montré la qualité de ce type de contrôle.

Cependant, la conception de nouvelles méthodes de commandes robustes reste un sujet ouvert pour obtenir de très bonnes performances. En définitive, on propose quelques perspectives à notre travail, qui se traduisent par :

- Appliquer la commande par backstepping pour d'autres systèmes non linéaires et comparer les résultats.
- Etude comparative de la commande du backstepping de la MADA avec d'autres commandes utilisées auparavant.
- L'introduction des observateurs pour remplacer les capteurs (capteur de vitesse, de position ou de flux).

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. Zemmit, « Commandes en Tension d'un Moteur Asynchrone à Double Alimentation (MADA) », Mémoire D'ingénieur En Electrotechnique, Université De M'sila 2013.
- [2] Y. Elbia, « Commande floue optimisée d'une machine asynchrone a double alimentation et a flux orienté », Mémoire De Magistère En Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2009.
- [3] A. Dendouga, « Commande par mode glissant de la machine à double alimentation par un onduleur de tension », Thèse de Magister, Université de Batna, 2004.
- [4] Y. A. Chapuis, D. Roys et S. Courtine, " Commande directe du couple d'une Machine asynchrone par le contrôle direct de son flux statorique, ". Journal Physique III. pp. 863-880, France, Mai 1995.
- [5] B. Hopfenspeger et D.J. Atkinson, "Doubly-fed a.c. machines : classification and comparaison", Européen Conférence on Power Electronics and Applications(EPE), Gras, 2001.
- [6] Z. Gzdouche, C. Belfedal, T. Allaoui, B. Belabbes, «Commande De Puissance Active Et Réactive D'une MADA Utilisée Dans Un Système Eolien », The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014.
- [7] HAMZA OUI ihssen, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur ", thèse de magister, école nationale polytechnique Alger, promotion, 2008.
- [8] K. Azouz, " Contribution à l'étude du comportement de la MADA commandée par un Onduleur de tension MLI ", Mémoire d'ingénieur d'Electromécanique, Université de M'sila, juin 2004.
- [9] A. Zemmit, "Contribution à la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) par les techniques intelligentes", thèse doctorat, université de m'sila 2017.
- [10] BOLDEA I., " The electric generators Handbook: variable speed generators", CRC press Taylor & Francis group, 2006, New York, U.S.A.
- [11] VIDAL P. E., "Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation", thèse de doctorat, I.N.P. de Toulouse, 2004, France.
- [12] DRID S. "Contribution à la modélisation et à la commande d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation : Théorie et expérimentation", thèse de doctorat, Université de Batna, 2005, Algérie.

- [13]SALLOUM G."Contribution a la commande robuste de la machine asynchrone a doublé alimentation", Thèse de doctorat, I.N.P de Toulouse 2007, France.
- [14]MERRAHI Farid," Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application `a l'Energie Eolienne)", thèse de magister automatique, école nationale polytechnique, 2007.
- [15]Frédéric POITIERS, «Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'énergie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 2003.
- [16]Y. Elbia, "Commande Floue Optimisée d'une Machine asynchrone a Double Alimentation à Flux Orienté". Mémoire de Magister de l'université de Batna, 2009.
- [17]S. Sarray, "Etude et Simulation d'une Commande Directe du Couple pour l'Entrainement Electrique d'une Machine Electrique". Maitrises-en Génie de la Production Automatisée de l'université de Québec, 2000.
- [18]B. Sid, "Optimisation Topologique de Structure par Algorithmes Génétiques".
- [19]Carlos C, "Modélisation contrôle vectoriel et DTC, Commande des moteurs asynchrones". Edition Hermès Science Europe Ltd, 2000.
- [20] « Commande vectorielle et adaptative de la MADA » Mémoire d'un d'ingénieur. Université de Batna, 2002.
- [21]B. Toual, "Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation Application à un Système Eolien à Vitesse Variable". Mémoire de Magister de l'université de Batna, 2010.
- [22]G. Salloum, « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.
- [23]L. BAGHLI, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", notes de cours del'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005.
- [24]A. herizi et H. Serrai, « COMMANDE DES SYSTEMES NON LINEAIRES PARBACKSTEPPING Application à la machine asynchrone », Mémoire d'ingénieur d'état. Université de m'sila, 2006.
- [25]ABBAS. M-MECHENTEL. M, « Modélisation et commande d'une MADA Alimentée par Cascade à Trois Niveaux Application à l'Energie Eolienne ». Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Ecole Nationale polytechnique, Alger- Algérie 2010.

- [26] K. LOUKAL, « Commande Robuste des Machines Asynchrones à Double Alimentation à Base des systèmes Flous Type Deux » Thèse de doctorat. Université de M'sila, 2017.
- [27] CHAIBA Azeddine, "Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle", Thèse de Doctorat de l'université de Batna, 2010.
- [28] BOUDJEMAA Zine Laabidine, "Commande Vectorielle sans capteur de vitesse de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par régulateur pi-flou", Mémoire de Magister de l'école normale supérieure de l'enseignement technologique d'Oran, 2009.
- [29] BOUABDALLAH Fares Eddine, "Commande en P et Q de la MADA Alimentée par une Cascade à Trois Niveaux pour La Production de l'Energie Eolienne", Mémoire de Master de l'école nationale polytechnique, Septembre 2012.
- [30] MELLOUL Ahmed, "Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne", Mémoire de Magister de l'Université Ferhat Abbas, Setif, 2011.
- [31] BENNOUR Cherif, "Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation", Mémoire de Magister de l'Université Mohamed Khider, Biskra, 2012.
- [32] A. L. Nemmour ; "Contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation," Thèse de magister de l'université de Batna 2002.
- [33] A. Kheldoun, "Amélioration des Performances d'un Variateur de Vitesse par Moteur Asynchrone Contrôlé par la Méthode à Flux Orienté," Thèse de doctorat de l'université de Boumerdès, 2007.
- [34] AMOUCHAS Nabil et BOUTALEB Amine, "Commande vectorielle d'une machine asynchrone à double alimentation par régulateur PI", Mémoire d'un master académique, Université de Boumerdes, 2016.
- [35] F. Nacéri, N. Lakhdari et S. Sellami. « Théorie de la commande adaptative », Presses de l'Université de Batna, Algérie, 1998.
- [36] Bensetti Nour_el_islam et Boukhachba Mimouna, "Commande par backstepping de la machine asynchrone alimenté par un onduleur à trois niveaux", Mémoire d'un master académique université Kasdi Merbah de Ouargla, 2017.
- [37] A. Merabet, « Commande non linéaire à modèle prédictif pour une machine Asynchrone », Thèse de doctorat, Université de Québec à Chicoutimi, Canda, 2007.
- [38] L. Benalia. « Commande en tension des moteurs à induction double alimentés », Thèse de doctorat, Université de Batna, Algérie, 2010.

- [39]F. Boumaraf. « Commande intelligente d'une association convertisseur statique machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de magister, Université de Batna, Algérie, 2009.
- [40]R. Abdessemed, « Modélisation et simulation des Machines Electriques », Livre, Edition TECHNOSUP, Univ Batna, 2012.

ANNEXE

PARAMETRES DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

1. PARAMETRES NOMINALES

$P_n = 4 \text{ KW}$	Puissance nominale.
$v/U = 220/380V - 50\text{Hz}$	Tension nominale.
$i/I = 15/8.6A$	Courant nominale.
$\Omega_n = 1440 \text{ tr/min}$	Vitesse nominale.
$P = 2$	Nombre de paires de pôles.

2. PARAMETRES ELECTRIQUES

$R_s = 1.2 \Omega$	Résistance du stator.
$R_r = 1.8 \Omega$	Résistance du rotor.
$L_s = 0.1554 \text{ H}$	Inductance du stator.
$L_r = 0.1568 \text{ H}$	Inductance du rotor.
$M = 0.15 \text{ H}$	Inductance Mutuelle.

3. PARAMETRES MECANIQUES

$J = 0.2 \text{ Kg.m}^2$	Moment d'inertie.
$f = 0.001 \text{ N.m.s/rd}$	Coefficient de frottement.