

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHESCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT:GENIE ELECTRIQUE

N° :



DOMAINE:SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE: ELECTROTECHNIQUE

OPTION: COMMANDE ELECTRIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de

Master Académique

Par : NAOUI NEDJOU
BEN AICHE AMINA

Intitule:

**Commande Sans Capteur D'un Actionneur
Electrique**

Soutenu devant le jury composé de :

	Université Mohamed Boudiaf_M'sila	Président
Mr. ROUBACHE Toufik	Université Mohamed Boudiaf_M'sila	Rapporteur
	Université Mohamed Boudiaf_M'sila	Examineur

Année universitaire: 2021/ 2022.

Remerciement

Nous remercions dieu de nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous remercions notre encadreur

Pour son aide, son encouragement et sa patience.

Et nous n'oublions pas tous les enseignants de département Génie électrique.

J'adresse aussi mes remerciements à tous les amis et collègues surtout ceux qui m'ont apporté un soutien moral, patience et une amitié inoubliable.

Enfin, je ne saurais terminer ces remerciements sans remercier les parents, qui m'ont accompagné tout au long de mes études par leur amour inconditionnel et leur soutien constant.

Dédicace

Avec l'expression de ma connaissance.

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient mes termes
embrassés, je n'arrivai jamais à leur exprimer*

*A l'homme qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect mon cher
père*

*A la femme qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a
épargné aucun effort pour me rendre heureuse mon*

Chère mère.

A mes sœurs.

A toutes mes familles.

A mon binôme, Ben aiche Amina.

Je dédie tous les professeurs.

*A tous mes amis et mes collègues de mestre (ST) de la promo 2021-
2022.*

NEDOU

Dedicase :

Je dédie ce travail :

A la mémoire de ma chère mère,

A mon cher père,

A mon cher mari OKBA ,

A mes chères sœurs HANOUNA et ZOZZOU ,

A ma chère amie CHAIMA AICHA,

*A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux
qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*

AMINA



SOMMAIRE

SOMMAIRE.....
LISTE DES FIGURES.....
LISTE DES SYMBOLES
INTRODUCTION GÉNÉRALE..... **1**

CHAPITRE 1 : ETAT DE L’ART SUR LA CONVERSION ELECTROMECHANIQUE.

1.1.INTRODUCTION..... 4
1.2. DESCRIPTION DE LA MADA 4
1.3. CLASSIFICATION..... 5
 1.3.1MACHINE A DOUBLE ALLIMENTATION SIMPLE..... 5
 1.3.2 MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION EN CASCADE 6
 1.3.3 MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION EN CASCADE A UN REPERE 6
 1.3.4 MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION SANS COLLECTEUR 7
1.4. DOMMAINE D’APPLICATION DE LA MADA..... 7
1.5. ETUDE DE FONCTIONEMENT DE LA MADA 8
 1.5.1 FONCTIONEMENT EN MODE MOTEUR HYPO synchrone 8
 1.5.2 FONCTIONEMENT EN MODE MOTEUR HYPER synchrone 9
 1.5.3 FONCTIONEMENT EN MODE GENERATEUR HYPO synchrone..... 9
 1.5.4 FONCTIONEMENT EN MODE GENERATEUR HYPER synchrone 10
1.6. CONFIGURATION DE MADA 10
 1.6.1 FONCTIONEMENT POUR APPLICATION MOTEUR..... 11
 1.6.1.1 PREMIERE CONFIGURATION : STATOR ALIMENTE PAR LE RESEAU, LE ROTOR ALIMENTE PAR UN ONDULER..... 11
 1.6.1.2 DEUXIEME CONFIGURATION : STATOR RELIE AU RESEAU, ROTOR ALIMENTE PAR UN CYCLOCONVERTISSEUR..... 11
 1.6.1.3 TROISIEME CONFIGURATION : MADA EN CASCADE HYPO SYNCHRONE 12
 1.6.1.4 QUATRIEME CONFIGURATION : MADA ALIMENTE PAR DEUX CONVERTISSEUR INDEPENDANTS 13
 1.6.2.FONCTIONNEMENT EN GENERATRICE 14
1.7. LES AVANTAGES DE LA MADA..... 15
1.8. LES INCONVENIENTS DE LA MADA 15
1.9. CONCLUSION 16

CHAPITRE 2 : MODELISATION ET ETUDE DE L’ALIMENTATION DE LA MADA

2.1 INTRODUCTION 18
2.2PRINCIPE DE FONCTIONEMENT DE MADA..... 18
2.3 HYPOTHESE SIMPLIFICATRICES 19
2.4. MODELISATION DE LA MADA 20
 2.4.1. REPRESENTATION DE LA MADA DANS LE SYSTEME TRIPHASE ET BIPHASE..... 20
 2.4.1.1. EQUATIONS ELECTRIQUE..... 21
 2.4.1.2. EQUATIONS MECANIQUE 21

2.4.1.3. EQUATIONS MAGNETIQUE.....	22
2.5. TRANSFORMATION DE PARK	23
2.6. APPLICATION DE LA TRANSFORMATION DE PARK A LA MADA.....	23
2.7. MODELE DE LA MADA EN REPRESENTATION D'ETAT	25
2.8. ETUDE PAR SIMULATION NUMERIQUE.....	28
2.9. RESULTAT DE SIMULATION.....	29
2.10. CONCLUSION	34
CHAPITRE3 : COMMANDE NON LINEAIRE SANS CAPTEUR MECANIQUE	
3.1. INTRODUCTION.....	36
3.2. THEORIE DE LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT	36
3.2.1 CHOIX DES SURFACES DE GLISSEMENT.....	37
3.2.2 CONDITION DE GLISSEMENT	38
3.2.3 CALCUL DE LA COMMANDE.....	39
3.2.4 PHENOMENE DU CHATTERING	39
3.3. APPLICATION DE LA COMMANDE A MODE GLISSANT DANS LA MADA.....	41
3.3.1 SURFACE DE REGULATION DE LA VITESSE 3.3.2 SURFACE DE REGULATION DU FLUX ROTORIQUE	42
3.3.2 SURFACE DE REGULATION DU FLUX ROTORIQUE	43
3.4. COMMANDE MODE GLISSANT PAR SUPER TWISTING.....	44
3.5. RESULTATS DE SIMULATION.....	45
3.5. 1. TEST DE VARIATION DES PARAMETRES.....	45
3.5. 2. TEST DE VARIATION DE LA CONSIGNE.....	46
3.5. 3. TEST DE VARIATION DE LA CHARGE.....	48
3.6. UTILISATION D'UN OBSERVATEUR MODE GLISSANT.....	50
3.6.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	50
3.6.2 RESULTATS DE SIMULATION	52
3.6.2.1 TEST DE VARIATION PARAMETRIQUE.....	53
3.6.2.2 TEST DE VARIATION DE LA VITESSE.....	55
3.6.2.3 TEST DE VARIATION DE LA CHARGE	56
3.7. UTILISATION D'UN OBSERVATEUR DE LUENBERGER.....	57
3.7.1 RESULTATS DE SIMULATION.....	58
3.7.1.1. TEST DE VARIATION PARAMETRIQUE.....	58
3.7.1.2. TEST AVEC INVERSION DU SENS DE ROTATION DE LA VITESSE.....	59
3.7.1.3. TEST DE VARIATION DE LA CHARGE.....	60
3.8. TABLEAU DE COMPARAISON DES RESULTATS	61
3.9. CONCLUSION	61

CONCLUSION GENERALE.....63

ANNEXE.....

BIBLIOGRAPHIE.....

RESUME.....



LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART SUR LA CONVERSION ELECTROMECHANIQUE

Figure (1-1) : structure du stator et des contact rotorique de la MADA 5

Figure (1-2) : Schéma de principe de la machine a double alimentation simple 6

Figure (1-3) : Schéma de principe de la machine a double alimentation en cascade 6

Figure (1-4) : Schéma de principe de la machine a double alimentation en cascade a un repère 7

Figure (1-5) : Schéma de principe de la machine a double alimentation sans collecteur 7

Figure (1-6) : fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone 9

Figure (1-7) : fonctionnement en mode moteur hypersynchrone 9

Figure (1-8) : fonctionnement en mode generateur hypo-synchrone 10

Figure (1-9) : fonctionnement en mode generateur hyper-synchrone 10

Figure (1-10) : Schéma synoptique propose pour la premiere configuration 11

Figure (1-11) : Schéma synoptique propose pour la deuxieme configuration 12

Figure (1-12) : Schéma synoptique propose pour la troisieme configuration 12

Figure (1-13) : Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cycloconvertissur 13

Figure (1-14) : Schéma synoptique pour un fonctionnement en generatrice de la MADA 14

CHAPITRE 2: MODELISATION ET ETUDE DE L'ALIMENTATION DE LA MADA

Figure(2.1): Schéma de principe de la machine a double alimentation simple 19

Figure (2-2) : representation de la MADA dans le système triphase 20

Figure (2-3) : representation de la MADA dans le système biphasé et triphasé 21

Figure (2-4) : Réponses du système avec $V_r = 15V$, $f_r = 5$ Hz, $C_r = 10$ N.m 31

Figure (2.5): Réponses du système avec $V_r = 15V$, $f_r = 20$ Hz, $C_r = 10$ N.m.....34

CHAPITRE 3 : COMMANDE NON LINEAIRE SANS CAPTEUR MECANIQUE

Figure (3.1) : Convergence du système glissant.....36

Figure (3.2) Représentation de la fonction sign.....40

Figure (3.3) : Fonction SAT avec un seuil et deux seuils (zone morte).....40

Figure (3.4) : Fonction «smooth ».....41

Figure (3.5) : Schéma de principe de la commande par mode glissant du MADA.....41

Figure (3.6) : Résultats de simulation de la commande du MADA vis-à-vis la variation de la résistance statorique et la résistance rotorique.....46

Figure (3.7) : Réponse du système de commande lors de l'inversion du sens de rotation.....48

Figure (3.8) : Résultats de simulation de la commande du MADA vis-à-vis la variation de la charge.....49

Figure (3.9) : Schéma fonctionnel d'un observateur mode glissant.....52

Figure (3.10) : Test de variation de la résistance statorique et la résistance rotorique de la machine.....54

Figure (3.11) : Test de variation de la vitesse de la machine.....55

LISTE DES FIGURES

Figure (3.12) : Test de variation de la charge appliqué à la machine.....	56
Figure (3.13) : Structure de l'observateur de Luenberger.....	57
Figure (3.14) : Test de variation paramétrique de la machine.....	58
Figure (3.15) : Réponses dynamiques de la commande avec inversion du sens de la vitesse.....	59
Figure (3.16) : Réponses dynamiques de la commande avec variation de la charge.....	60



LISTE DES TABLEAUX

Tableau (3.1) : Comparaison entre l'observateur mode glissant et l'observateur de Luenberger.....61



LISTE DES SYMBOLES

ABREVIATIONS

<i>MADA</i>	: Machine Asynchrone à Double Alimentation
<i>MAS</i>	: Machine Asynchrone
<i>MLI</i>	: modulation de largeur d'impulsion

SYMBOLES

<i>s, r</i>	: Indice du stator et du rotor .
<i>Rs</i>	: Résistance d'une phase statoriques [Ω].
<i>Rr</i>	: Résistance d'une phase rotoriques [Ω].
<i>Ls</i>	: Inductance propre d'une phase statorique [H].
<i>Lr</i>	: Inductance propre d'une phase rotorique [H]
<i>fr</i>	: Fréquence des grandeurs rotoriques
<i>fs</i>	: Fréquence des grandeurs statoriques
<i>a, b, c</i>	: Indices correspondants aux trois phases a, b, c
α, β	: Indices des composantes orthogonales directs et en quadrature
<i>Tr, Ts</i>	: Constantes de temps rotorique et statorique
<i>Ms</i>	: Inductance mutuelle entre les enroulements du stator
<i>Mr</i>	: Inductance mutuelle entre les enroulements du rotor
Φ_s, Φ_r	: Respectivement flux statorique et rotorique
$\Phi_{s\alpha}, \Phi_{s\beta}$: Les flux statoriques direct et en quadrature
$\Phi_{r\alpha}, \Phi_{r\beta}$: Les flux rotoriques direct et en quadrature
<i>Is, Ir</i>	: Les courants de phase statorique et rotorique
<i>Isα, Isβ</i>	: Les courants statoriques directe et en quadrature dans le repère de PARK
<i>Irα, Irβ</i>	: Les courants rotoriques directe et en quadrature dans le repère de PARK
<i>Vs, Vr</i>	: Tensions simples' respectivement statorique et rotorique
<i>Vsα, Vsβ</i>	: Les tensions statoriques directe et en quadrature
<i>Vrα, Vrβ</i>	: Les tensions rotoriques directe et en quadrature
θ_s, θ_r	: Angles électriques statorique et rotorique
<i>Wm</i>	: Pulsation mécanique
<i>P</i>	: Nombre de paires de poles

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

g	: Glissement
cem	: Couple électromagnétique
Cr	: Couple résistant
PI	: Proportionnel – Intégrale.
Kp	: Gain de l'action proportionnel du régulateur PI
Ki	: Gain de l'action intégrale du régulateur PI
t	: Variable de temps
e	: Erreur de poursuite
\dot{x}	: La dérivée de la variable x par rapport au temps



INTRODUCTION

GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. Dans un premier temps, cette énergie n'a été exploitée que dans les domaines mécaniques. L'exemple le plus connu est le moulin à vent utilisé par le meunier pour la transformation du blé en farine. On peut citer le nombreux moulin à l'assèchement des polders en Hollande [1]. Par la suite, ce type d'énergie a servi à produire l'électricité. Au 16^{ème} siècle, elle a été utilisée pour pomper de l'eau et couper le bois [2], et c'est en 1891 que le danois Poul La Cour construit pour la première fois une turbine à vent de générant de l'électricité [3].

L'éolienne à vitesse variable à base de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) est très appréciée et largement utilisée actuellement. Elle a des avantages par rapport aux autres types des éoliennes à vitesse variable (machines synchrones à aimants permanents). En effet, les convertisseurs statiques triphasés de puissance dimensionnées pour une partie de la puissance nominale de la MADA impliquent moins de pertes par commutation, et un coût de production du convertisseur moins élevé. La MADA permet aussi un fonctionnement sur une plage de vitesse de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme pour les deux modes hypo- synchrone et hyper-synchrone, assurant ainsi un dimensionnement réduit des convertisseurs statiques de puissance, c'est pour ces raisons que la MADA est particulièrement utilisée pour les applications à haute puissance [4],[5].

La présente thèse décrit les stratégies de commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans une chaîne de conversion éolienne par commande sans capteur mécanique par utilisation de deux types d'observateurs sont mode glissant et Luenberger. La structure du mémoire est organisée en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous entamerons un rappel théorique et la description détaillée, la classification et la configuration de la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement moteur. On donnera aussi l'étude de fonctionnement, le domaine d'application de MADA et ses avantages et ses inconvénients.

Le second chapitre, consacré à principe de fonctionnement de MADA et hypothèse simplificatrices et a modélisation de cette machine. Ensuite, nous présentons la transformation de PARK et le model de la MADA en représentation d'état. A fin de ce chapitre, des résultats de simulation de la MADA auront présentés.

Le troisième chapitre de ce mémoire présente l'aspect théorique de la commande par mode glissant et ses applications dans les systèmes de commande. La commande sans capteur à base de deux types d'observateurs par mode glissant et de Luenberger. Ces derniers sont comparés en termes de poursuite de trajectoire, de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations.

Enfin, on terminera ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherches futures.

CHAPITRE 1

ETAT DE L'ART SUR LA CONVERSION ELECTROMECHANIQUE

1.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter une introduction sur la machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation et son intérêt dans les applications requérant de la vitesse variable. Nous allons décrire à travers les concepts physiques de base régissant le fonctionnement de tout type de machine électrique le principe de fonctionnement de la MADA, nous expliquerons comment les grandeurs de contrôle accessibles au rotor peuvent contrôler le couple électromagnétique, la vitesse et le facteur de puissance lorsque la MADA fonctionne en mode moteur (hypo et hypersynchrone) et en mode générateur (Hypo et Hypersynchrone).

Ainsi dans cet état de l'art, nous nous intéressons à deux thèmes différents :

Le premier thème, qui fait l'objet de nos travaux, s'intéresse au fonctionnement du moteur où la MADA est alimentée par deux convertisseurs, l'un au stator et l'autre au rotor. En effet, les travaux présents dans la littérature montrent les bonnes performances de cette machine dans ce mode de fonctionnement. Ces travaux concernent principalement les stratégies de commande.

Le deuxième thème est consacré à la sûreté du fonctionnement de la commande. Cet axe de recherche est très important parce qu'il s'intéresse à la continuité du fonctionnement des systèmes de commande même en présence des variations dans les paramètres de la machine. Ce domaine est largement traité en bibliographie par les chercheurs.

1.2. Description de la MADA (à rotor bobiné) :

Une machine asynchrone à double alimentation (MADA) est une machine triphasée à courant alternatif. Elle est constituée d'un stator fixe équipé de trois enroulements identiques répartis d'une manière symétrique dans les encoches de ce stator, et d'un rotor tournant autour de l'axe de la machine. Elle contient trois enroulements identiques et symétriques couplés en étoile et reliés à un collecteur constitué de trois bagues figure (1.1) [6].

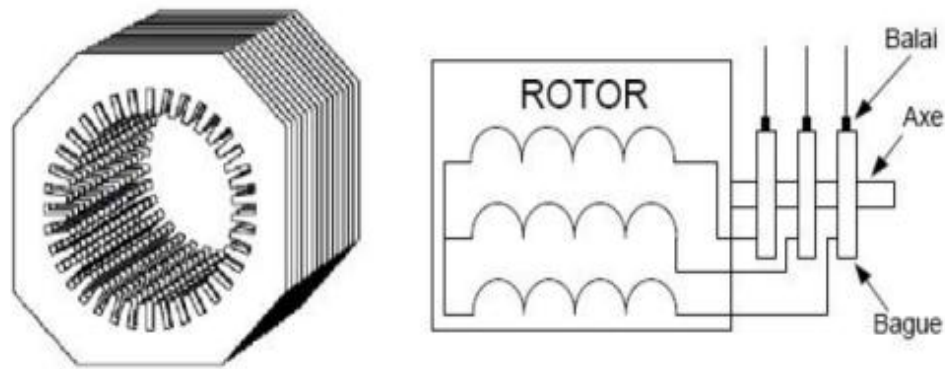


Figure (1.1): Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

Les trois enroulements rotoriques sont reliés à travers des balais glissants sur les bagues du rotor à un convertisseur à base d'électronique de puissance pour assurer une deuxième alimentation par le rotor. L'ensemble machine asynchrone, convertisseur et éventuellement un transformateur a soit un mode appelé hypo ou hyper synchrone [7].

1.3. Classification :

Dans la littérature du domaine des machines asynchrone à double alimentation, on trouvera la classification suivante [8], [9], [10], [11], [12] :

1.3.1. Machine à double alimentation simple :

La machine à double alimentation simple (MADAS), est une machine asynchrone à rotor bobiné occupée par un système balais-bague (Single Doubly Fed Induction Machine). La figure (1.2) 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 de telle sorte que le glissement de la machine peut être contrôlé.

Il faut noter que le convertisseur indiqué dans la figure peut être composé par un redresseur et un onduleur (conversion indirecte) ou bien peut être un cycloconvertisseur (conversion directe) [8],[11],[12]

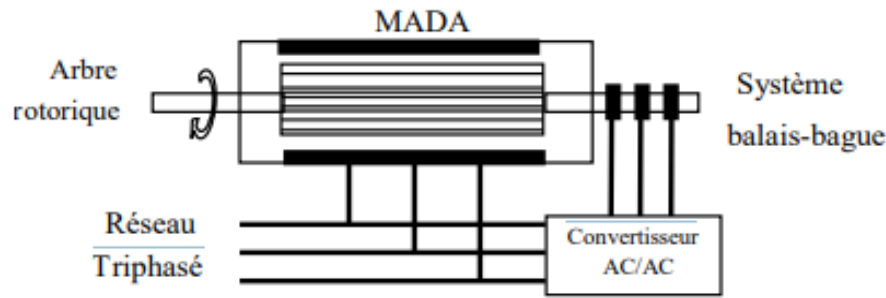


Figure (1.2) : Schéma de principe de la machine à double alimentation simple.

1.3.2. Machine à double alimentation en cascade :

Cette machine est constituée de deux MADA dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement, (Cascaded Doubly Fed Induction Machine). La figure (1.3) présente le schéma de principe de deux machines asynchrones à rotor bobiné permettant d'obtenir un système à double alimentation. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tensions triphasées [9].

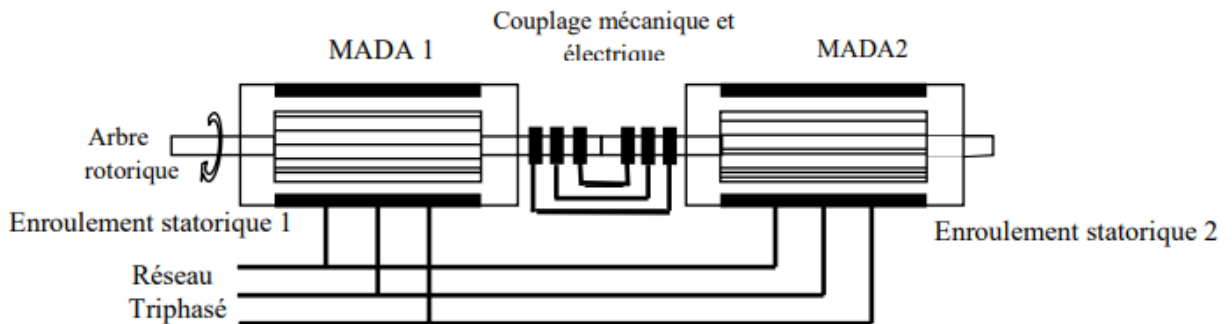


Figure (1.3): Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade.

1.3.3. Machine à double alimentation cascade à un repère :

La machine à double alimentation cascade à un repère consiste de deux machines asynchrones à cage connectés mécaniquement, (Single Frame Cascaded Doubly Fed Induction Machine). La figure (I.4) présente le schéma de principe, 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 [9].

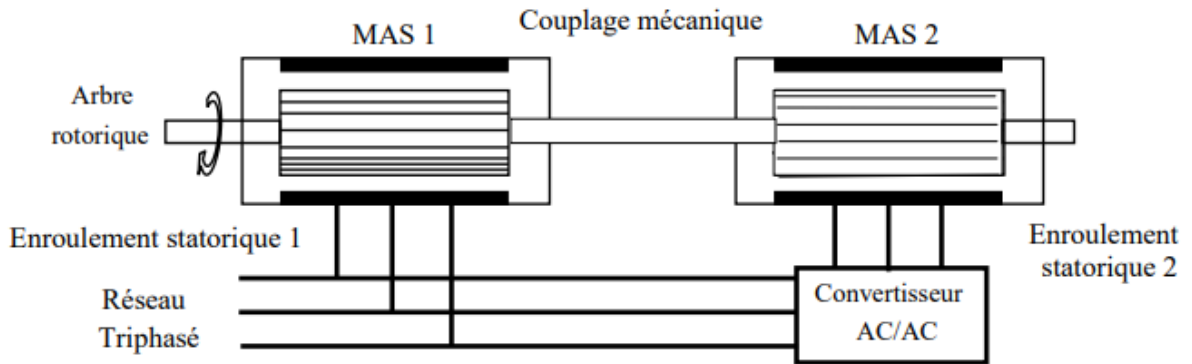


Figure (1.4) : Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un repère.

1.3.4. Machine à double alimentation sans collecteur :

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, figure (1.5). Ce type de machine consiste de deux enroulements statoriques ayant des nombres de paires de pôles différents ; ainsi que celui du rotor doit être la somme de ces deux nombres de paires de pôles [10].

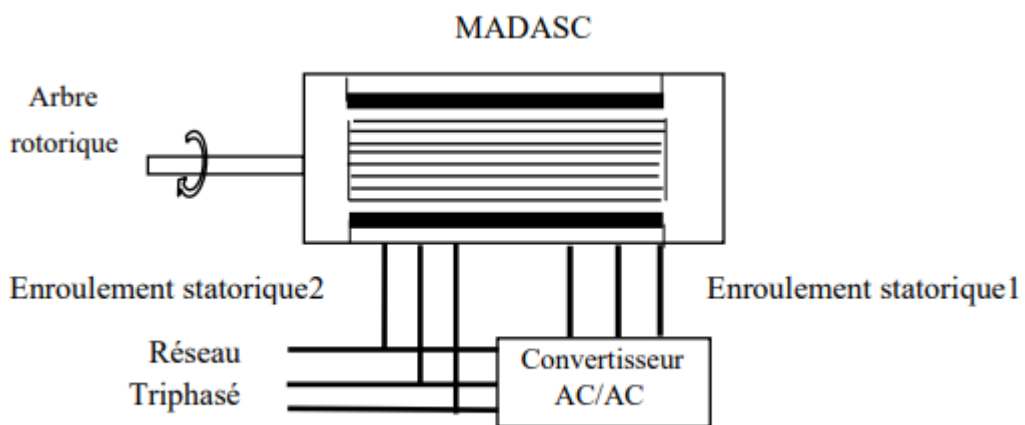


Figure (1.5): Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur.

1.4. Domaines d'application de la MADA :

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ses nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens [13].

De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée telle que [14] :

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variables.
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que [12] :

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc... .

Nous notons que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci nous trouvons principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage.

1.5. Etude de fonctionnement de la MADA :

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur [15].

1.5.1 Fonctionnement en mode moteur Hypo-Synchrone :

La figure (1.6) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme.

La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [16].

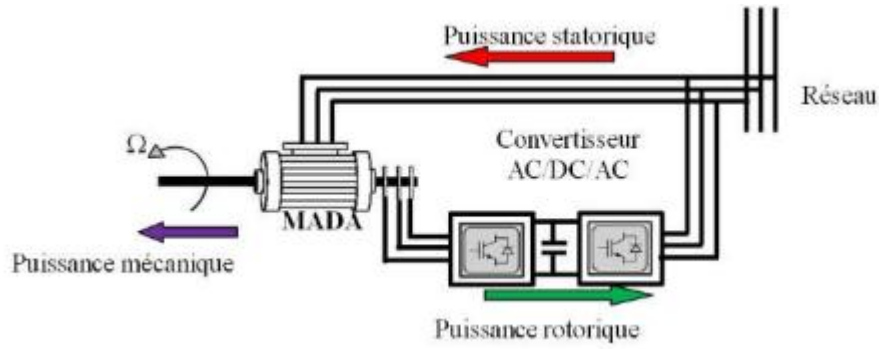


Figure (1.6) Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.

1.5.2 Fonctionnement en mode moteur Hypersynchrone :

La figure (1.7) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement [16].

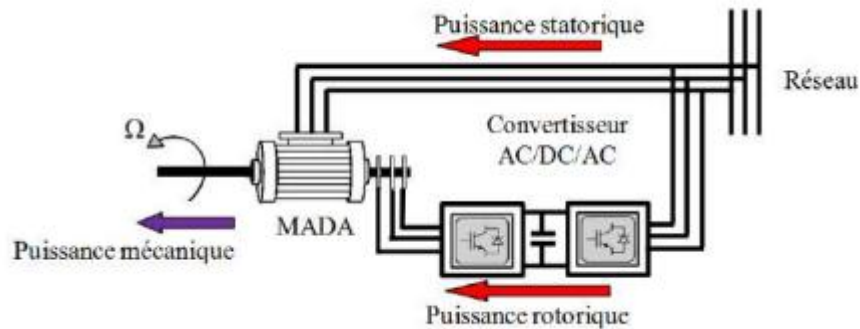


Figure (1.7) Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone.

1.5.3 Fonctionnement en mode générateur Hypo-Synchrone:

La figure (1.8) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est alors absorbée par le rotor. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [16].

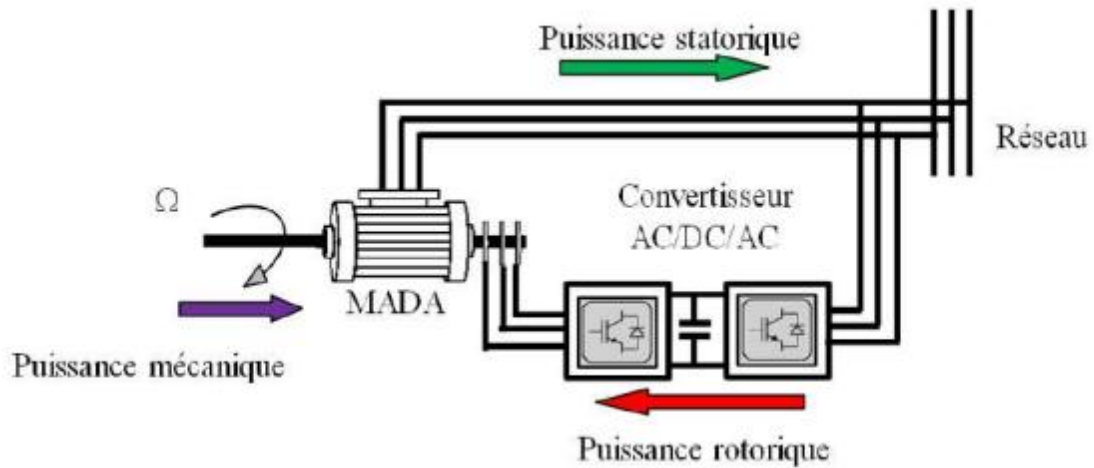


Figure (1.8) Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.

1.5.4 Fonctionnement en mode générateur Hypersynchrone :

La figure (1.9) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor [16].

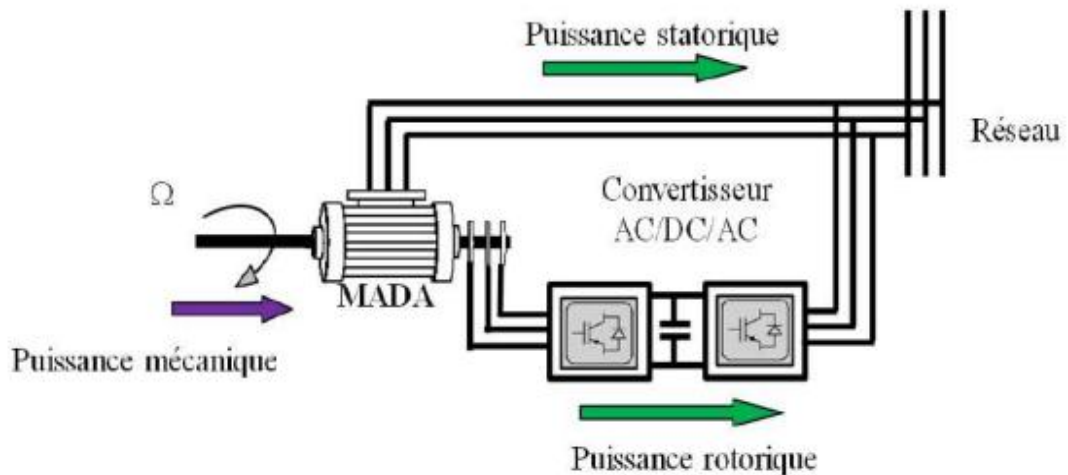


Figure (1.9) Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone.

1.6. Configurations de MADA :

La littérature atteste du grand intérêt accordé à la Machine Asynchrone Doublement Alimentée. En tant que génératrice, dans le domaine des énergies renouvelables, Pour les applications moteur, la MADA alimentée par deux convertisseurs présente pour certaines applications de grandes puissances de bonnes performances.

1.6.1. Fonctionnement pour application moteur :

1.6.1.1. 1^{ère} configuration : Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur :

Cette classe est dite MADA simple. Les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé fixe tandis que le rotor est relié à son propre onduleur (Single Doubly Fed Induction Machine). La figure (1.10) présente un schéma de principe de cette catégorie de MADA.

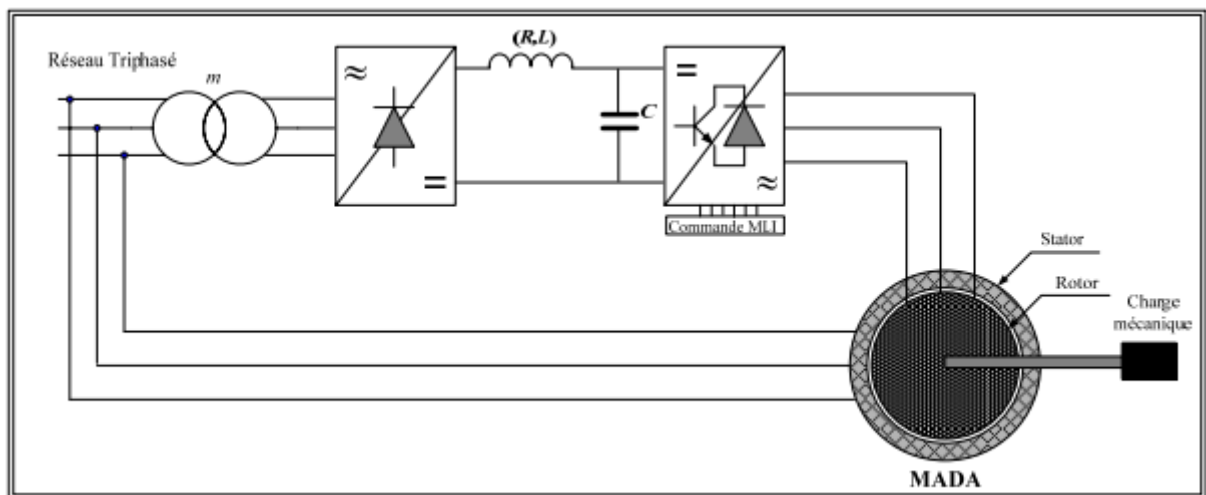


Figure (1.10) : Schéma synoptique proposé pour la première configuration.

Dans leurs articles, qui sont d'ailleurs très proches, DIN et WANG, [17] [18], retiennent la stratégie de contrôle basée sur le champ orienté. Ils introduisent un courant magnétisant proportionnel au flux d'entrefer. Le repère tournant est aligné avec le flux d'entrefer. Les simulations effectuées montrent des fortes oscillations du flux lors des variations de charge. Pour y remédier, les auteurs ajoutent une compensation de l'oscillation du flux basée sur une estimation de ce dernier. Des nouvelles simulations prouvent une nette amélioration de la réponse du flux et du couple aussi.

Afin d'améliorer les performances dynamiques du système, les auteurs définissent une relation liant la dérivée du flux d'entrefer au courant rotorique suivant l'axe d. Comme la dynamique de ce courant influence la dynamique du flux, c'est là qu'ils centrent leur action afin de compenser les oscillations du flux observées.

1.6.1.2. 2^{ème} configuration : Stator relié au réseau, rotor alimenté par un cycloconvertisseur :

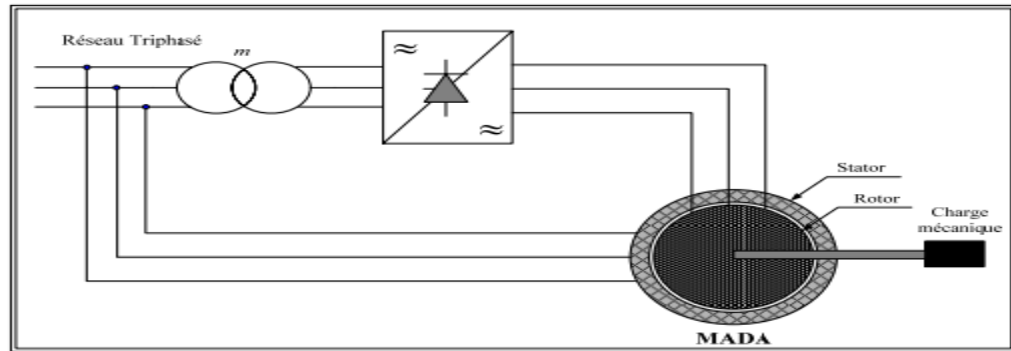


Figure (1.11) : Schéma synoptique proposé pour la deuxième configuration.

WALCZYNA, [19], cherche à rendre le couple dépendant uniquement des courants rotoriques et non de la vitesse. Les variables de contrôle sont le couple et la puissance réactive. L'auteur s'intéresse aux régimes transitoires. Quelques résultats expérimentaux viennent confirmer les simulations.

1.6.1.3. 3^{ème} configuration : MADA en cascade hypo synchrone :

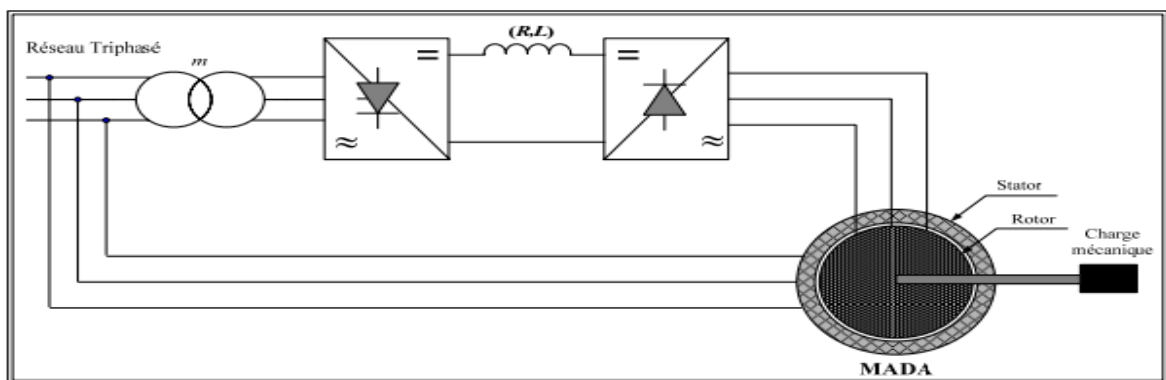


Figure (1.12): Schéma synoptique proposé pour la troisième configuration.

Dans [20] [21] [22], ASMAR effectue une étude générale des machines symétriques à double alimentation en régime permanent. Il présente par la suite quelques montages particuliers comme étant des applications de cette étude : cascade hypo synchrone, machine bi synchrone à fréquence variable et association de plusieurs machines en différentiel électrique. Les résultats expérimentaux obtenus mettent en évidence l'intérêt et les diverses possibilités de fonctionnement de la MADA.

1.6.1.4. 2^{ème} configuration : MADA alimenté par deux convertisseurs indépendants :

Ce type d'alimentation peut prendre différentes formes :

- Deux cycloconvertisseur comme le montre la figure (1.12).
- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs conformément.
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun.

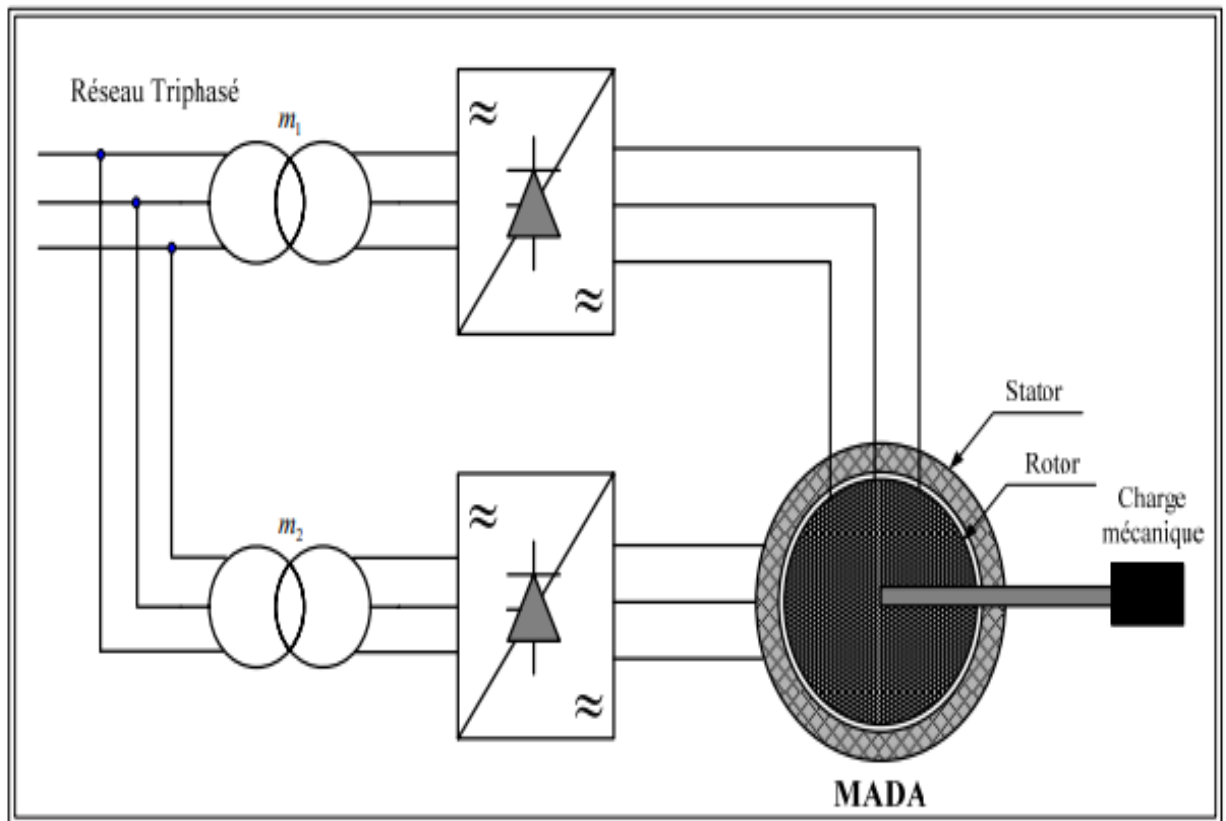


Figure (1.13) : Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cycloconvertisseurs.

BROWN dans [23] [24] étudie une MADA alimentée par deux cycloconvertisseurs, figure (1.12). Il présente un fonctionnement dans les quatre quadrants en précisant le fonctionnement hypo et hypersynchrone. Il adopte le contrôle vectoriel pour la commande. Ses objectifs consistent à minimiser les harmoniques du couple en agissant sur la fréquence du stator et à assurer un synchronisme des champs tournants en contrôlant les phases des tensions statoriques et rotoriques.

1.6.2. Fonctionnement en génératrice :

Avec le regain d'intérêt pour les énergies renouvelables, les systèmes éoliens à vitesse variable avec MADA connaissent un grand essor et un grand nombre de publications accompagne ce développement. La littérature est abondante dans ce domaine et les thèmes abordés sont très variés :

- Modélisation, zones limites de fonctionnement et stabilité de la MADA.
- Qualité de l'énergie fournie et qualité des courants et tensions notamment en présence des défauts au niveau du réseau
- . • Stratégies de commande de la MADA avec ou sans capteur de vitesse et de position.
- Dimensionnement du convertisseur au rotor
- . • Un stator relié au réseau ou sur charge indépendante.

Dans cet état de l'art, et sauf contre-indication, nous nous limitons au stator connecté directement au réseau. Le schéma de principe pour une telle application est donné par la figure (1.14).

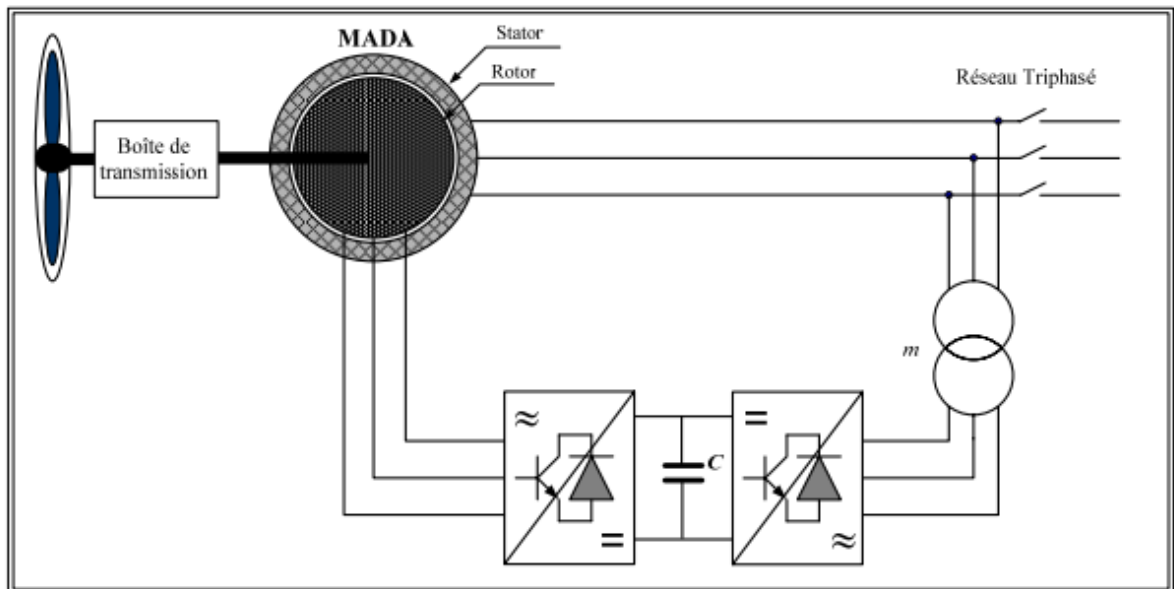


Figure (1.14) : Schéma synoptique pour un fonctionnement en génératrice de la MADA.

Parmi les premiers à s'intéresser à la MADA en génératrice, nous citons HOLMES qui étudie dans [25] une machine à deux enroulements rotoriques alimentés par un cycloconvertisseur. Cette machine fonctionne en génératrice entraînée par une éolienne. Les résultats obtenus sont satisfaisants lorsque le couple est proportionnel au carré de la vitesse.

1.7. Les avantages de la MADA :

La MADA présente plusieurs avantages :

- La mesure des courants au stator et rotor, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique [26].
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale [27].
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6) [27].
- 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 [28].

1.8. Les inconvénients de la MADA :

Les principaux inconvénients de la MADA sont :

- La machine à double alimentation nécessite un collecteur à trois bagues au rotor. Donc pour une même puissance, ce générateur est un peu plus long et à peine plus lourd que le générateur asynchrone à cage équivalent [29].
- L'utilisons d'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) [30].
- La MADA est plus volumineuse que la machine à cage d'écureuil à cause du système balais bagues [31].
- Elle nécessite une maintenance périodique. [31].

1.9. 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, dans une description de la MADA et classification, domaine d'application, fonctionnement et leur avantages et inconvénients. En fin, les différentes configurations de l'association machine – convertisseur.

CHAPITRE 2

MODELISATION ET ETUDE DE L'ALLIMENTATION DE LA MADA

2.1. Introduction :

La modélisation est un passage obligatoire pour concevoir des systèmes de commande performants, elle nous permet de simuler la machine et d'en déduire les lois de commande en manipulant les équations décrivant le comportement de la machine. Le modèle mathématique d'une machine électrique est un mode de représentation de la machine idéal permettant de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement, elle apporte une aide appréciable dans la résolution des problèmes techniques.

2.2. Principe de fonctionnement de MADA :

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de f_{mms} des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse Angulaire $\omega_S = 2 \cdot \pi \cdot f_s$, et le rotor tourne avec la vitesse ω_r , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des f_{mms} des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse ω_{gl} telle que : [32]

$$\omega_{gl} = \omega_S - \omega_r = P \cdot \Omega \quad (2.1)$$

Où : g est le glissement et ω_{gl} est la vitesse angulaire de glissement.

Pour $\omega_r = \omega_S$ le rotor est à l'arrêt. Dès que ω_r est légèrement différents de ω_S , la machine se met en rotation dans un sens ou dans l'autre selon que ω_r soit $<$ ou $>$ à ω_S . Par contre, si ω_r est très différents de ω_S la machine ne peut pas démarrer [33].

Pour que la rotation du vecteur résultant des f_{mms} par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement rotorique doit avoir une fréquence, définie par : [33]

$$\omega_{gl} = 2. \pi. ; \text{c-à-dire : } f_r = g.f_s$$

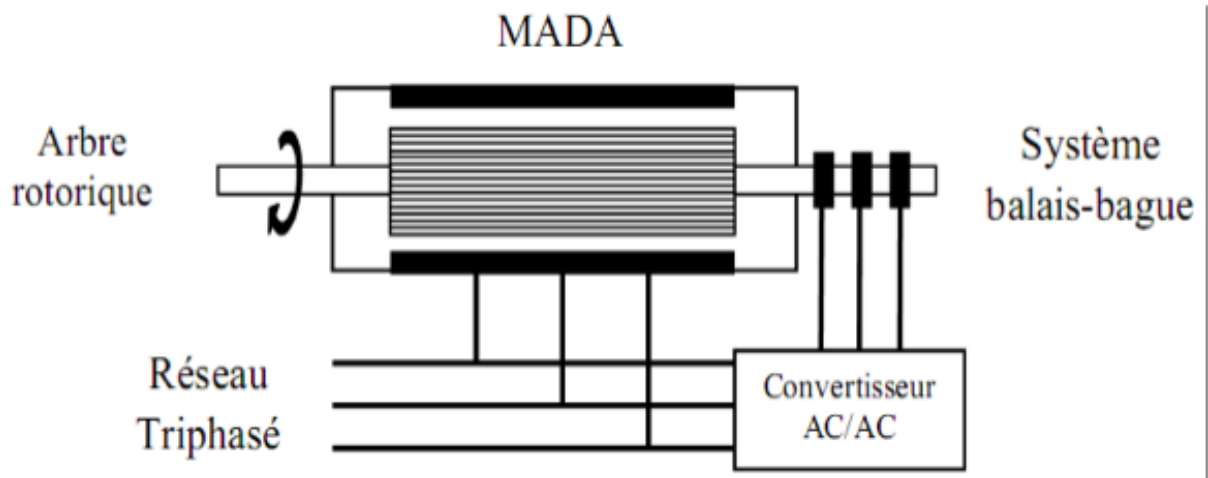


Figure (2.1) : Schéma de principe de la machine à double alimentation simple.

2.3. Hypothèses simplificatrices :

Afin de modéliser la MADA, nous soumettons aux hypothèses simplificatrices classiques : [34] [16] [14] [30]

- Entrefer constant.
- Effet des encoches négligées.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Influences de l'effet de peau et de l'échauffement non prises en compte.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Pas de régime homopolaire puisque le neutre n'est pas connecté.

La représentation schématique d'une machine à double alimentation dans le repère triphasé est donnée par la figure (2.2).

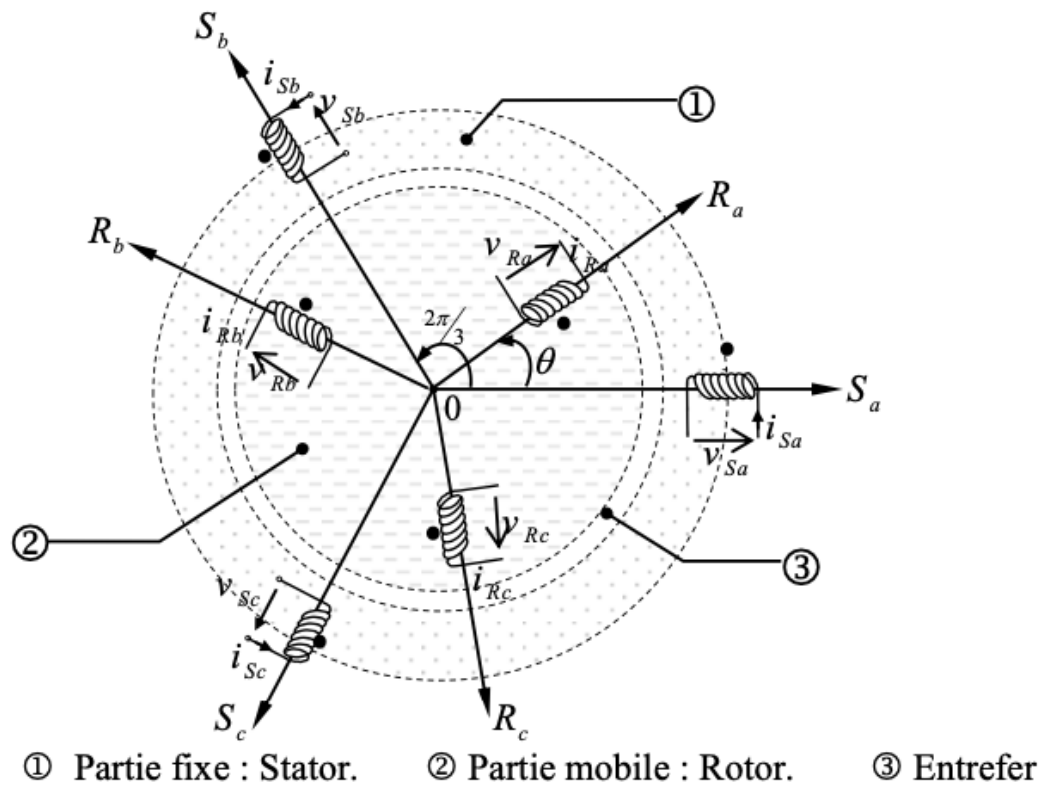


Figure (2.2) : Représentation de la MADA dans le système triphasé.

2.4. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation :

2.4.1. Représentation de la MADA dans le système triphasé et biphasé

[35] :

La machine asynchrone à double alimentation est formée d'un stator fixe, et d'un rotor cylindrique mobile. Le stator a trois enroulements couplés en étoile ou en triangle et qui sont alimentés par un système triphasé de tensions, il en résulte alors la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, (THEOREME DE FERRARIS). La vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est $\Omega_s = \omega_s / p$, où ω_s désigne la pulsation de réseau d'alimentation statorique triphasée et p le nombre de paires de pôles. Le rotor de la machine supporte un bobinage triphasé avec un même nombre de paires de pôles que celui du stator couplé en étoile. La machine asynchrone à double alimentation doit être représentée dans le système triphasé et biphasé par la figure (2.3).

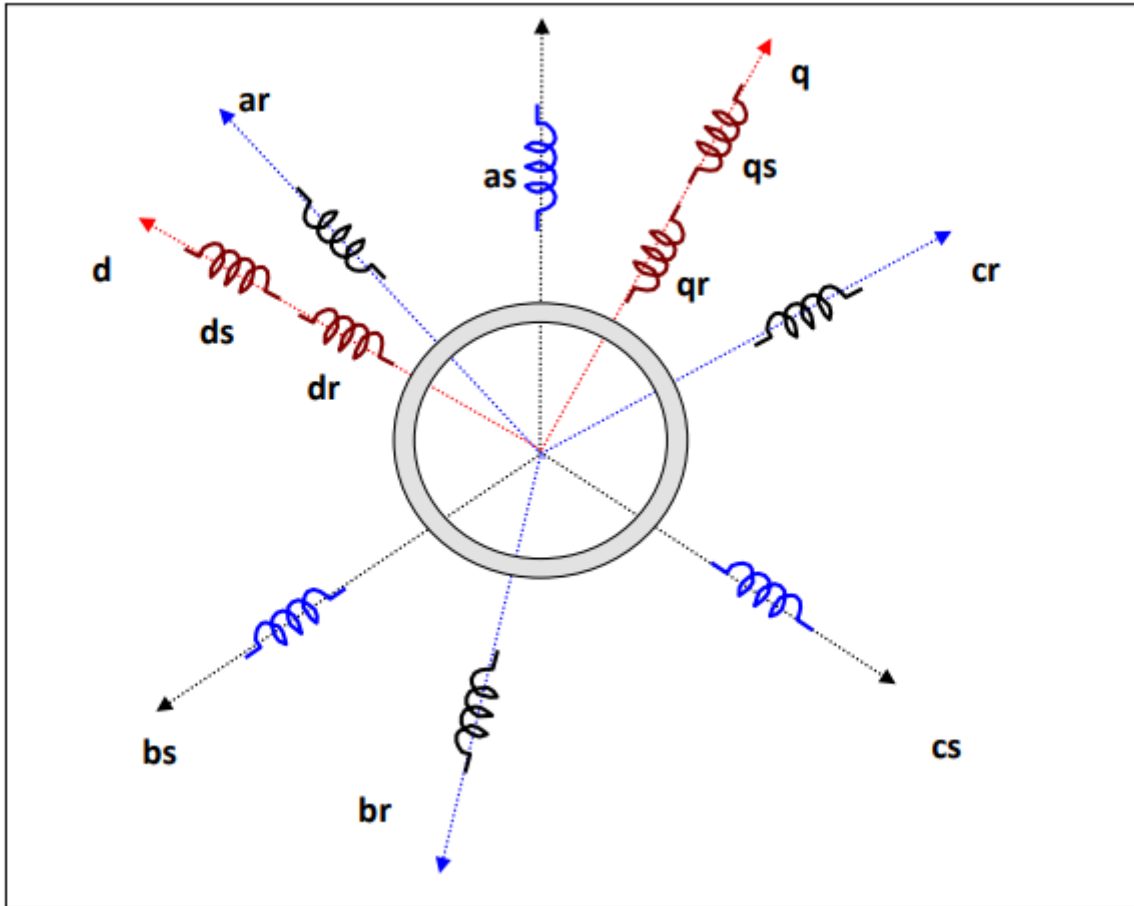


Figure (2. 3) : Représentation de la MADA dans le système biphasé et triphasé

2.4.1.1. Equations électriques :

Dans les conditions précédentes les équations sous forme matricielle s'écrivent

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2.4.1.2. L'équation mécanique :

L'étude des régimes transitoires fait intervenir, en plus des grandeurs électriques, les grandeurs mécaniques. Ainsi, pour compléter le modèle, nous devons ajouter l'équation mécanique déduite à partir du théorème des moments.

$$C_e - C_r - C_f = J \frac{d\Omega}{dt} \tag{2.4}$$

$$C_f = f \cdot \Omega \tag{2.5}$$

Avec :

J : Est le moment d'inertie du moteur.

f : C'est le coefficient de frottement visqueux.

C_e : C'est le couple électromagnétique délivré par le moteur.

C_r : C'est le couple résistant, ou de charge.

2.4.1.3. Equations magnétiques :

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne.

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \\ \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s & M_1 & M_2 & M_3 \\ M_s & L_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & L_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & L_r & M_r & M_r \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_r & L_r & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \\ I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

Avec :

$$M_1 = M \cos(\theta)$$

$$M_2 = M \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$M_3 = M \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right)$$

2.4. Transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère α, β, o) continu, donc elle permet d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution[36].

Les grandeurs statoriques et rotoriques seront alors exprimées dans un même repère (axe direct d et axe en quadrature q). La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$ est donnée sous la forme suivante :

$$[X_{\alpha\beta o}] = [P(\theta)] \cdot [X_{abc}] \quad (2.7)$$

Les nouvelles variables dx et qx sont appelées respectivement composantes directe et en quadrature.

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$[P(\theta)^{-1}] = [P(\theta)]^T \quad (2.9)$$

On vérifie que la matrice de passage obtenue est bien orthogonale afin que la puissance instantanée soit invariante :

$$[P(\theta)] \cdot [P(\theta)^T] = [1] \quad (2.10)$$

La composante homopolaire (o) ne participe pas à la création du champ tournant de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi arbitrairement orthogonal au plan (α, β) [37] [38].

2.6. Application de la Transformation de Park à la MADA :

En appliquant la transformée de Park pour chaque vecteur défini précédemment (tension, courant, flux), en remplaçant dans la matrice de Park θ par θ_s pour les équations du stator et θ par θ_r pour celles du rotor, on obtient :

- pour le stator :

$$[\mathbf{I}_{\alpha\beta o}]_s = [P(\theta_s)] \cdot [I_s] ; [I_s] = [P(\theta_s)]^{-1} [\mathbf{I}_{\alpha\beta o}]_s \quad (2.11)$$

$$[\mathbf{V}_{\alpha\beta o}]_s = [P(\theta_s)] \cdot [V_s] ; [V_s] = [P(\theta_s)]^{-1} [\mathbf{V}_{\alpha\beta o}]_s \quad (2.12)$$

$$[\boldsymbol{\varphi}_{\alpha\beta o}]_s = [P(\theta_s)] \cdot [\varphi_s] ; [\varphi_s] = [P(\theta_s)]^{-1} [\boldsymbol{\varphi}_{\alpha\beta o}]_s \quad (2.13)$$

- pour le rotor :

$$[\mathbf{I}_{\alpha\beta o}]_r = [P(\theta_r)] \cdot [I_r] ; [I_r] = [P(\theta_r)]^{-1} [\mathbf{I}_{\alpha\beta o}]_r \quad (2.14)$$

$$[\mathbf{V}_{\alpha\beta o}]_r = [P(\theta_r)] \cdot [V_r] ; [V_r] = [P(\theta_r)]^{-1} [\mathbf{V}_{\alpha\beta o}]_r \quad (2.15)$$

$$[\boldsymbol{\varphi}_{\alpha\beta o}]_r = [P(\theta_r)] \cdot [\varphi_r] ; [\varphi_r] = [P(\theta_r)]^{-1} [\boldsymbol{\varphi}_{\alpha\beta o}]_r \quad (2.16)$$

Avec :

$$[\mathbf{I}_{\alpha\beta o}]_s = [I_{s\alpha} \ I_{s\beta} \ I_{so}]^T ; [\mathbf{I}_{\alpha\beta o}]_r = [I_{r\alpha} \ I_{r\beta} \ I_{ro}]^T \quad (2.17)$$

$$[\mathbf{V}_{\alpha\beta o}]_s = [V_{s\alpha} \ V_{s\beta} \ V_{so}]^T ; [\mathbf{V}_{\alpha\beta o}]_r = [V_{r\alpha} \ V_{r\beta} \ V_{ro}]^T \quad (2.18)$$

$$[\boldsymbol{\varphi}_{\alpha\beta o}]_s = [\varphi_{s\alpha} \ \varphi_{s\beta} \ \varphi_{so}]^T ; [\boldsymbol{\varphi}_{\alpha\beta o}]_r = [\varphi_{r\alpha} \ \varphi_{r\beta} \ \varphi_{ro}]^T \quad (2.19)$$

Les flux dans le système d'axes s'écrivent:

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha} = L_s I_{s\alpha} + M I_{r\alpha} \\ \varphi_{s\beta} = L_s I_{s\beta} + M I_{r\beta} \\ \varphi_{r\alpha} = L_r I_{r\alpha} + M I_{s\alpha} \\ \varphi_{r\beta} = L_r I_{r\beta} + M I_{s\beta} \end{cases} \quad (2.20)$$

Et les tensions

:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{s\alpha} = R_s I_{s\alpha} + \frac{d\varphi_{s\alpha}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_s I_{s\beta} + \frac{d\varphi_{s\beta}}{dt} \\ V_{r\alpha} = R_r I_{r\alpha} + \frac{d\varphi_{r\alpha}}{dt} - \omega r \varphi_{r\beta} \\ V_{r\beta} = R_r I_{r\beta} + \frac{d\varphi_{r\beta}}{dt} + \omega r \varphi_{r\alpha} \end{array} \right. \quad (2.21)$$

Nous avons exprimé les équations de la machine mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier peut être dérivé de l'expression de la Co-énergie ou obtenu à l'aide d'un bilan de puissance [39].

$$p_e = M \omega \times \text{img}[I_r \times I_s] \quad (2.22)$$

Le couple électromagnétique alors :

$$C_e = \frac{P_e}{\Omega} = pM \times \text{img}[I_r \times I_s] \quad (2.23)$$

Alors :

$$C_e = p (\varphi_{s\alpha} I_{s\beta} - \varphi_{s\beta} I_{s\alpha}) \quad (2.24)$$

$$C_e = p (-\varphi_{r\beta} I_{r\alpha} - \varphi_{s\alpha} I_{r\beta}) \quad (2.25)$$

$$C_e = p M (I_{s\beta} I_{r\alpha} - I_{s\alpha} I_{r\beta}) \quad (2.26)$$

$$C_e = p \frac{M}{L_r} (\varphi_{r\alpha} I_{s\beta} - \varphi_{r\beta} I_{s\alpha}) \quad (2.27)$$

$$C_e = p \frac{M}{L_r} (\varphi_{s\beta} I_{r\alpha} - \varphi_{s\alpha} I_{r\beta}) \quad (2.28)$$

2.7. Modèle de la machine en représentation d'état :

La représentation d'état de la MADA dépend du repère et du choix des variables d'état pour les équations électriques. On écrit les équations dans le repère (α, β) car c'est la solution la plus générale [40].

Le choix des variables d'état, dépend des objectifs soit pour la commande soit pour l'observation. On choisit pour notre cas le vecteur d'état suivant [40]: $[I_{s\alpha}, I_{s\beta}, \varphi_{r\alpha}, \varphi_{r\beta}]^T$. On écrit le modèle de la machine utilisée pour la commande sous forme d'un système d'équations d'état:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (2.29)$$

Avec :

X : vecteur d'état du système,

A : matrice d'état du système,

B : matrice de commande,

U : vecteur de commande $[V_{s\alpha} \ V_{s\beta} \ V_{r\alpha} \ V_{r\beta}]^T$.

Y : vecteur de sortie,

C : matrice d'observation.

On déduit les équations des courants rotorique à partir des équations du flux rotoriques [40] [41].

$$\begin{cases} I_{r\alpha} = \frac{1}{L_r} \varphi_{r\alpha} - \frac{M}{L_r} I_{s\alpha} \\ I_{r\beta} = \frac{1}{L_r} \varphi_{r\beta} - \frac{M}{L_r} I_{s\beta} \end{cases} \quad (2.30)$$

On remplace les courants rotoriques dans les équations des flux statoriques on obtient:

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha} = L_s \sigma I_{s\alpha} + \frac{M}{L_r} \varphi_{r\alpha} \\ \varphi_{s\beta} = L_s \sigma I_{s\beta} + \frac{M}{L_r} \varphi_{r\beta} \end{cases} \quad (2.31)$$

Avec :

$$\sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) \quad (2.32)$$

En remplaçant $\varphi_{s\alpha}$ et $\varphi_{s\beta}$ en fonction de $I_{s\alpha}$ et $I_{s\beta}$ dans les équations des tensions statoriques, on aboutit aux équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = R_s \cdot I_{s\alpha} + L_s \sigma \frac{dI_{s\alpha}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_{r\alpha}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_s \cdot I_{s\beta} + L_s \sigma \frac{dI_{s\beta}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_{r\beta}}{dt} \end{cases} \quad (2.33)$$

On détermine la dérivée de flux rotorique à partir les équations des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{r\alpha}}{dt} = V_{r\alpha} - R_r I_{r\alpha} - \omega_r \varphi_{r\alpha} \\ \frac{d\varphi_{r\beta}}{dt} = V_{r\beta} - R_r I_{r\beta} + \omega_r \varphi_{r\beta} \end{cases} \quad (2.34)$$

On remplace le dernier système d'équation dans le système d'équation des tensions statoriques on trouve :

$$\begin{cases} \frac{dI_{s\alpha}}{dt} = -\gamma I_{s\alpha} + \frac{K}{T_r} \varphi_{r\alpha} + K \omega_r \varphi_{r\beta} + \frac{1}{L_s \sigma} V_{r\alpha} \\ \frac{dI_{s\beta}}{dt} = -\gamma I_{s\beta} + K \omega_r I_{s\alpha} + \frac{K}{T_r} \varphi_{r\beta} + \frac{1}{L_s \sigma} V_{r\beta} - K V_{r\beta} \end{cases} \quad (2.35)$$

Et :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{r\alpha}}{dt} = \frac{M}{T_r} I_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \varphi_{r\alpha} - \omega_r \varphi_{r\beta} + V_{r\alpha} \\ \frac{d\varphi_{r\beta}}{dt} = \frac{M}{T_r} I_{s\beta} + \omega_r \varphi_{r\alpha} - \frac{1}{T_r} \varphi_{r\beta} + V_{r\beta} \end{cases} \quad (2.36)$$

Donc :

$$A = \begin{bmatrix} -\gamma & 0 & \frac{K}{T_r} & \omega_r K \\ 0 & -\gamma & -\omega_r K & \frac{K}{T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega_r \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -\omega_r & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Et :

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s \sigma} & 0 & -K & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s \sigma} & 0 & -K \\ 0 & 0 & K & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Avec :

$$\begin{cases} \frac{R_s}{L_s} = \frac{1}{T_s} \\ \frac{R_r}{L_r} = \frac{1}{T_r} \\ K = \frac{M}{L_r L_s \sigma} \\ \gamma = \left(\frac{1}{T_s \sigma} + \frac{MK}{T_r} \right) \end{cases} \quad (2.39)$$

L'équation mécanique régissant la partie tournante de la machine est donnée par : [40] [41]

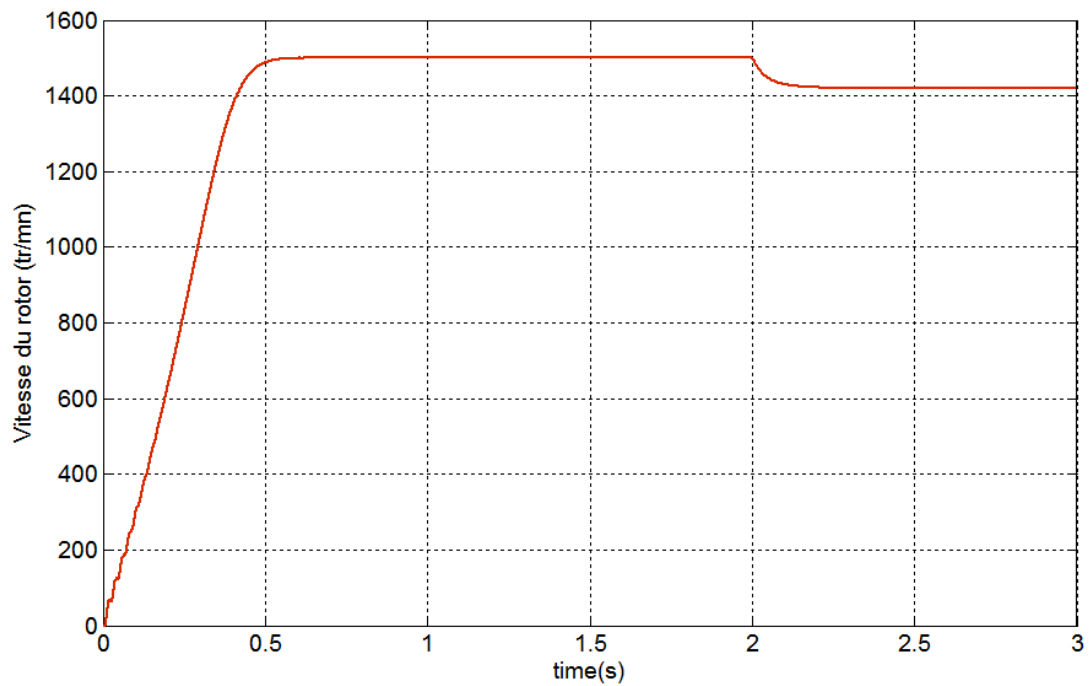
$$C_{em} = -\frac{3}{2} p \cdot \frac{M}{L_r} (\varphi_{r\alpha} \cdot I_{s\beta} - \varphi_{r\beta} \cdot I_{s\alpha}) \quad (2.40)$$

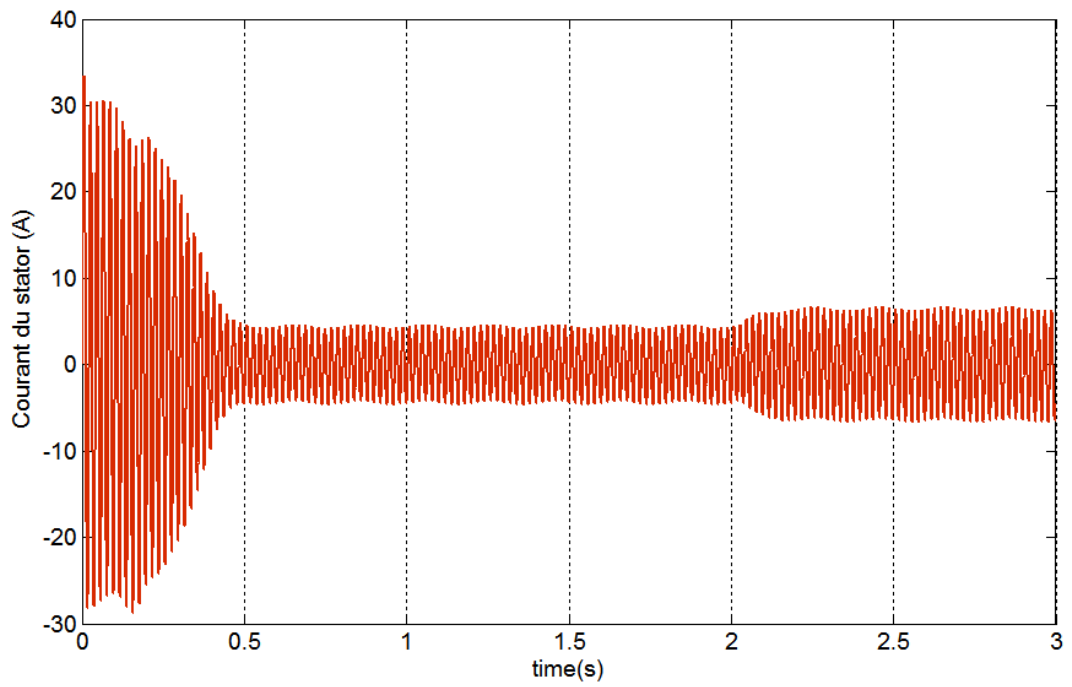
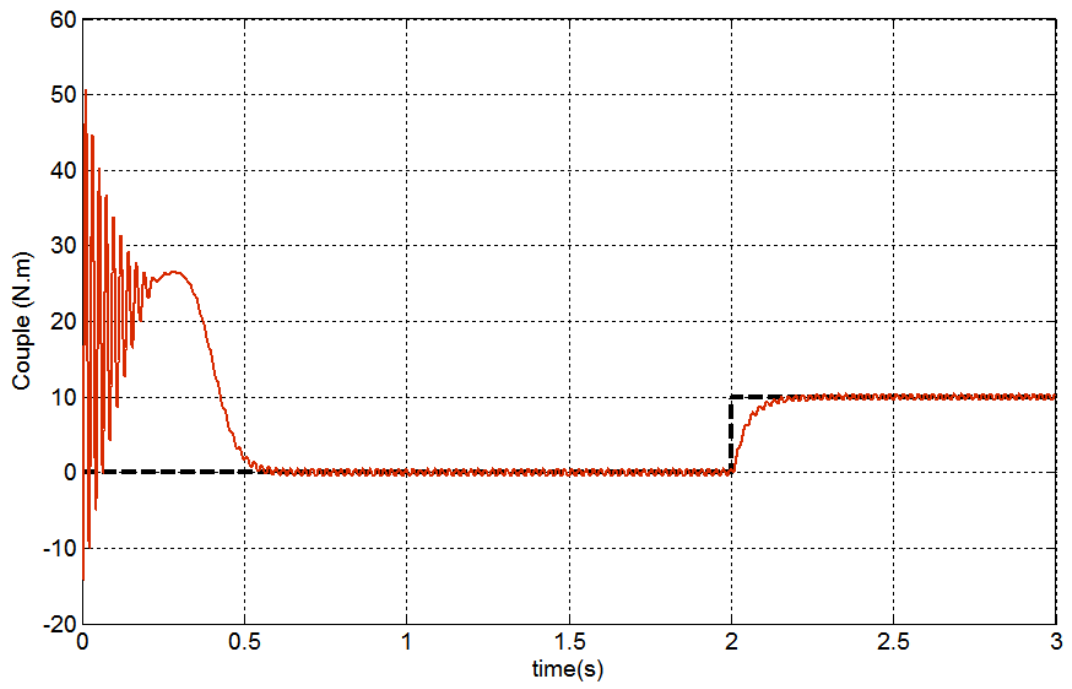
2.8. ETUDE PAR SIMULATION NUMERIQUE :

La modélisation des différentes parties de l'alimentation de la MADA, nous avons opté pour le logiciel MATLAB/SIMULINK. Le modèle du redresseur, l'onduleur MLI et le filtre RC, avec des résultats de simulation sont présentés en annexe (B).

2.9. Résultats de simulation :

Les figure (2.4) ;(2.5) représentent les réponses de simulation dans le cas où la tension rotorique $V_r = 12$ V, les fréquences rotoriques ($f_r = 5$ Hz, $f_r = 20$ Hz) et $Cr = 10$ N.m.





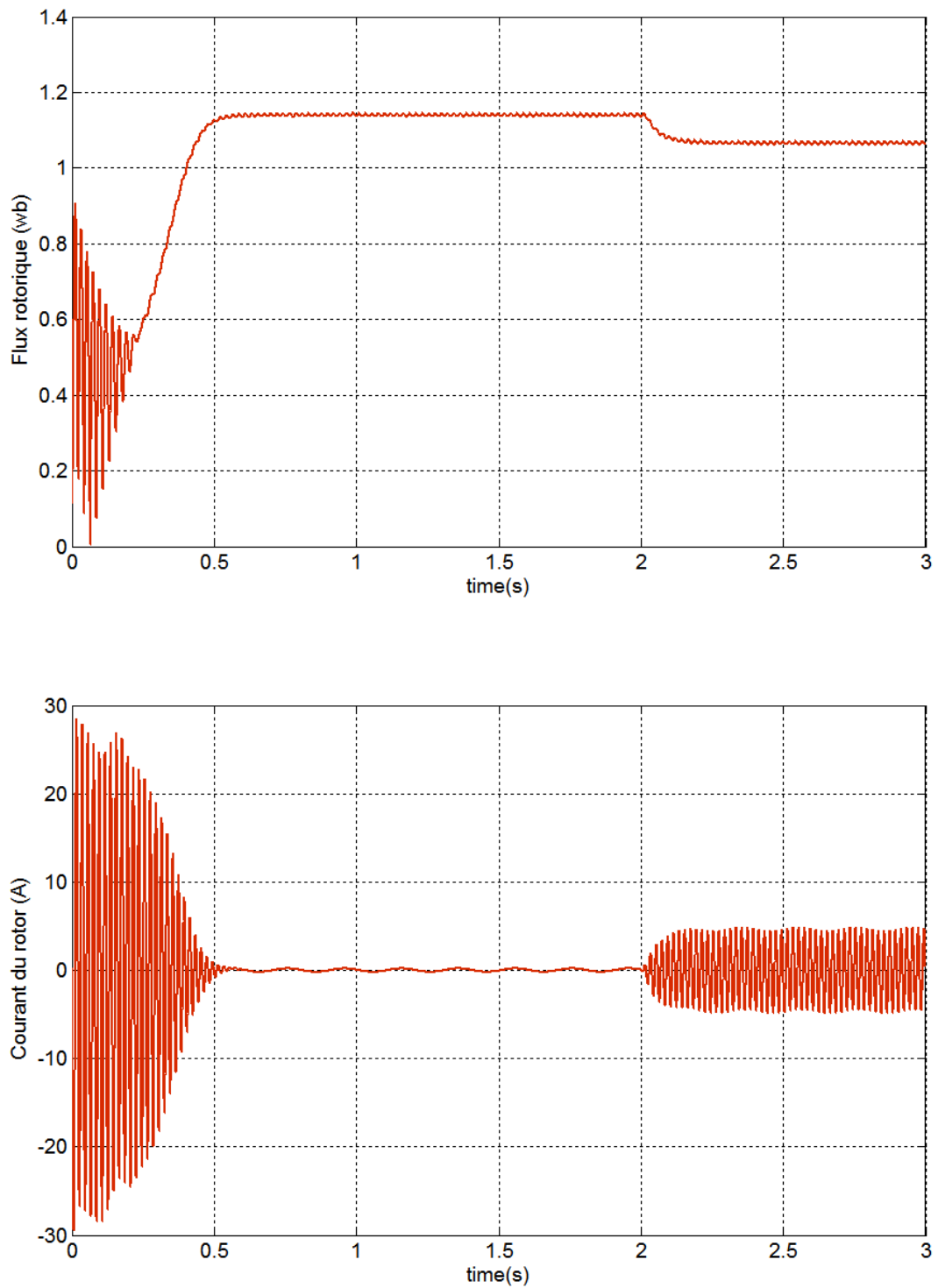
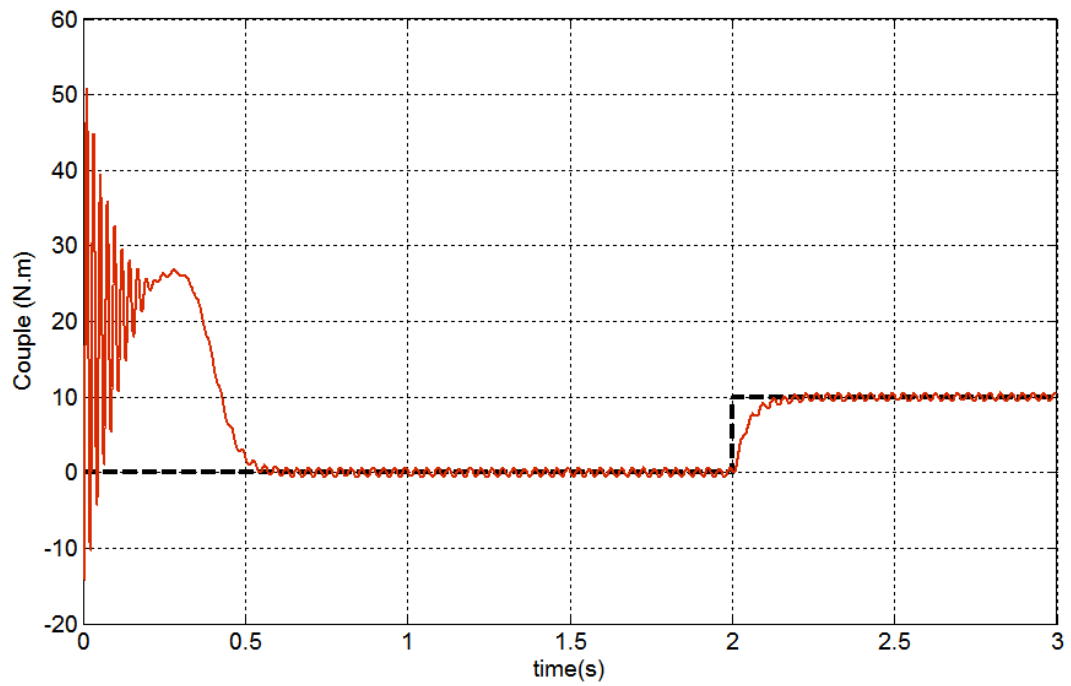
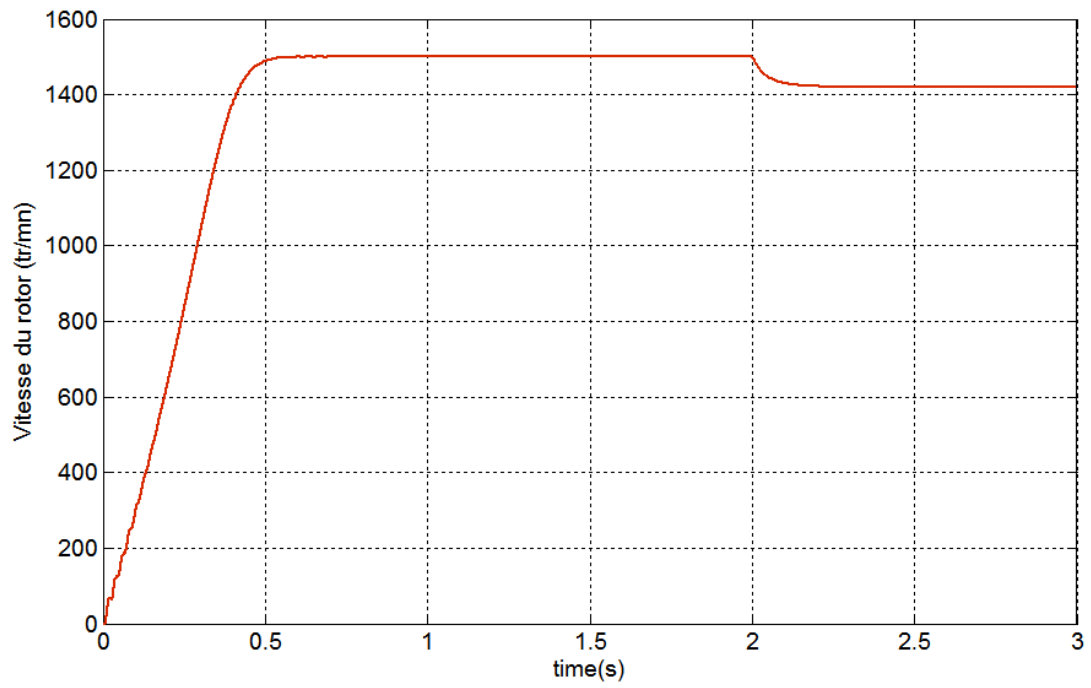
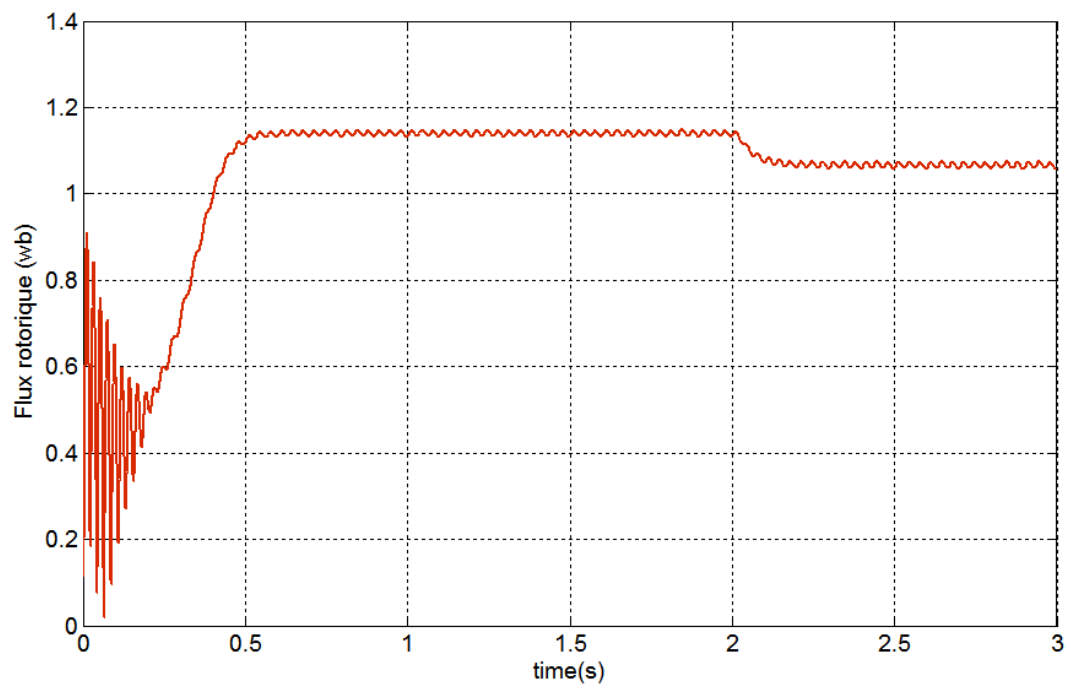
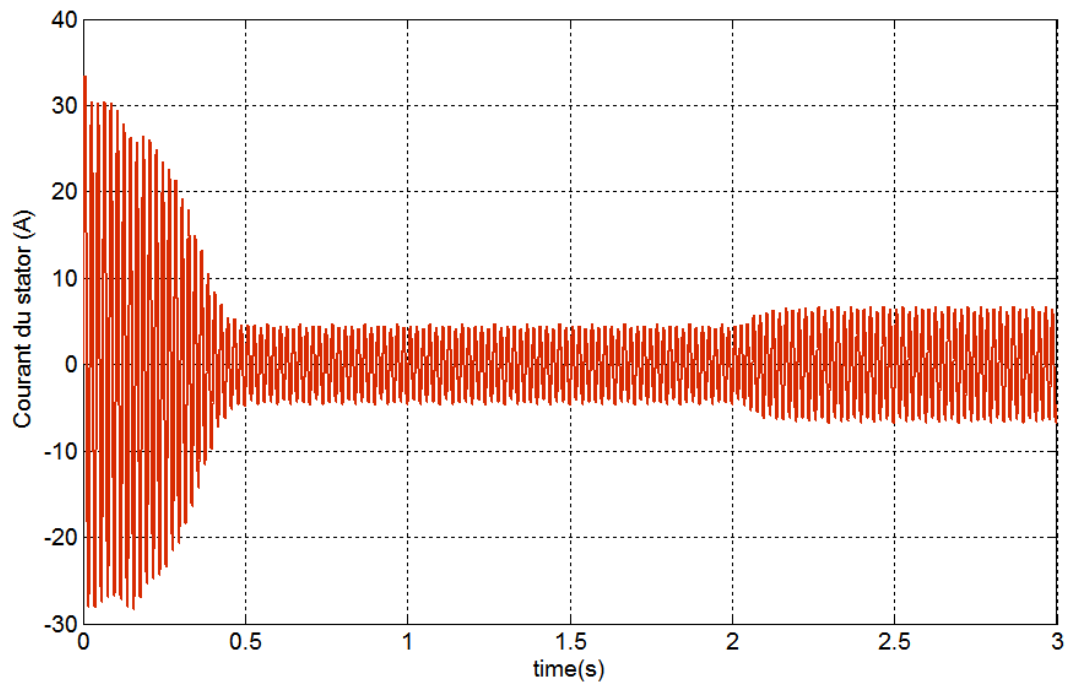


Figure (2.4): Réponses du système avec $V_r = 15V$, $f_r = 5$ Hz, $C_r = 10$ N.m

D'après les résultats obtenus on observe que l'amplitude des ondulations est sensible aux variations du couple de charge.





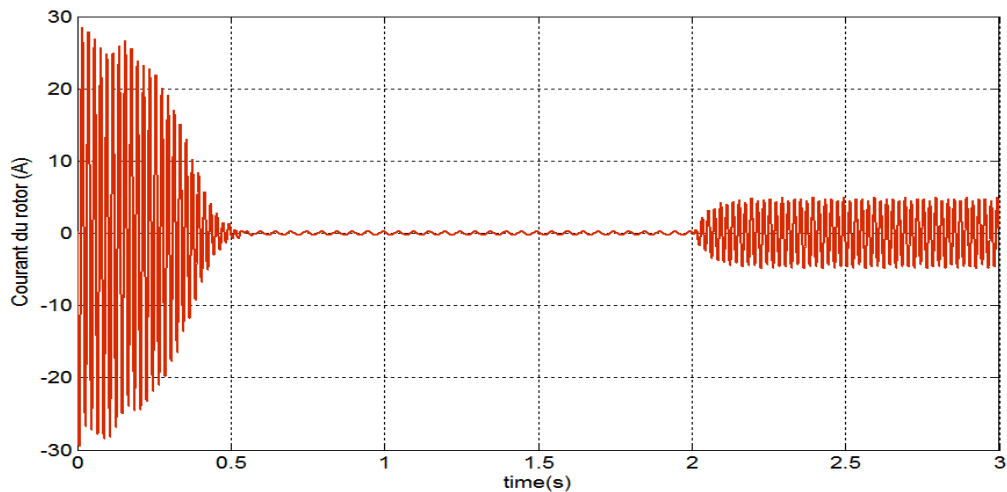


Figure (2.5): Réponses du système avec $V_r = 15V$, $f_r = 20$ Hz, $C_r = 10$ N.m

2.10. CONCLUSION:

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation et l'alimentation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement en moteur. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, nous avons constaté que le modèle du MADA est un système à équations différentielles. Pour simplifier le modèle de la machine nous avons établi le modèle de la machine dans un système d'axe biphasé (α , β) à l'aide de la transformation de PARK.

Aussi, nous avons représentés la simulation de la machine asynchrone à double alimentation qui le stator connecte directement avec le reseau, et le rotor alimente par un onduleur commande par MLI avec l'utilisation de deux modes d'alimentation du rotor de la machine.

Comme nous avons pu le voir dans les résultats de simulation, et vu son caractère spécifique, la modélisation de la machine asynchrone double alimentée pose de sérieux problèmes de stabilité en boucle ouverte, dans ce cas, le recours aux commandes bouclés, et spécialement les commandes de type non-linéaire devient indispensable. Ainsi, le chapitre suivant sera consacré à la commande non-linéaire sans capteur par mode glissant d'ordre supérieur de la MADA.

CHAPITRE 3

COMMANDE NON LINEAIRE SANS CAPTEUR MECANIQUE

3.1. Introduction :

La commande de la machine asynchrone est devenue un domaine de recherche très actif. Durant, ces dernières décennies, cet intérêt est motivé par le besoin de rendre sa structure d'état non linéaire. La commande vectorielle introduite dès 1971 par Blaschke est basée sur l'électromagnétisme, elle est définie par : « une force exercée sur un conducteur parcouru par un courant placé dans un champ magnétique est égale au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ ». Il en résulte évidemment que l'amplitude de cette force sera maximale pour des intensités du courant et du champ donnés quand le vecteur courant sera en quadrature avec le vecteur champ.

Dans ce chapitre, on va étudier la commande sans capteur d'une machine asynchrone à double alimentation et de présenter les résultats de simulation de cette commande avec deux types d'observateurs, l'observateur mode glissant et luenberger.

3.2. Théorie de la Commande par Mode Glissant :

La commande à structure variable est une commande de nature non linéaire et de type discontinu. Elle implique une modification intentionnelle de la topologie du système forçant ainsi la trajectoire d'état du système (la dynamique du système) à commuter autour d'une hyper surface prédéfinie (ou désirée), dite de glissement, et à glisser sur elle jusqu'au point d'équilibre grâce à un dispositif et une logique de commutation [42].

Lorsque le point représentatif du mouvement du système est maintenu sur la surface de glissement (Figure 3.1), le système est dit en régime glissant et il est alors plongé dans la dynamique d'un système réduit et libre. Ainsi, tant que les conditions de glissement sont assurées, la dynamique du système reste insensible aux incertitudes de modélisation, aux variations des paramètres du système et à certaines perturbations externes.

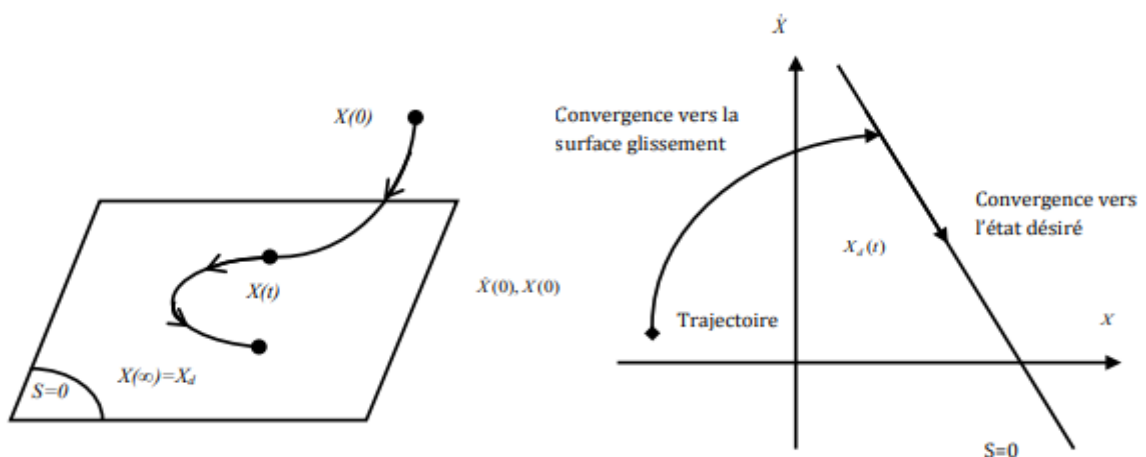


Figure (3.1) : Convergence du système glissant.

3.2.1 Choix des Surfaces de Glissement:

En général, concernant la forme de la surface, deux possibilités se présentent, soit dans le plan de phase ou dans l'espace d'état :

- Espace d'état :

$$s(x) = \sum_{i=1}^r c_i c_x \quad (3.1)$$

Avec : $c_r = 1$

- Dans l'espace de phase :

J.J Slotine et al [3] ont proposé une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable x à sa valeur de consigne.

$$s(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{r-1} \check{x} \quad (3.2)$$

Avec :

$$\check{x} = x_\alpha - x = [\check{x} \ \dot{\check{x}} \ \dots \ \check{x}^{(r-1)}]^T \quad (3.3)$$

Où :

x : Le variable.

\check{x} : L'erreur de réglage.

λ : Une constante positive qui interprétera la bande passante du contrôle désiré.

r : Degré relatif (égal au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande). On aura donc :

Pour $r=1$ à réguler.

$$S(x) = \check{x} \quad (3.4)$$

Pour $r=2$

$$s(x) = \lambda \check{x} + \dot{\check{x}} \quad (3.5)$$

3.2.2 Condition de Glissement :

Soit le système dynamique non linéaire décrit par l'équation d'état suivante :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) + g(x, t). U \quad (3.6)$$

Où $x \in X$ un ouvert de $n \mathbb{R}$ est le vecteur d'état, $f(x)$ et $g(x)$ sont des fonctions définies sur $n \mathbb{R}$, avec :

$$g(x) \neq 0 \forall x \in X, f(x) = [f_1, f_2 \dots \dots f_n]^T, g(x) = [g_1, g_2 \dots \dots g_n]^T \quad (3.7)$$

La condition de glissement peut être formulée en déterminant une fonction scalaire de Lyapunov $V(x) : \mathfrak{R} \rightarrow \mathfrak{R}$ qui soit positive $V(x) > 0$ pour tout x de \mathfrak{R} . La fonction de Lyapunov est choisie de façon à décroître dans le temps. L'idée est de trouver une commande qui assure cette décroissance en rendant négative la dérivée de la fonction de Lyapunov. Soit :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (3.8)$$

Où $S(x)$ décrit la distance du point x de la surface de glissement $S(x) = 0$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, nous devons assurer que :

$$\dot{V}(x) = S(x)\dot{S}(x) < 0 \quad (3.9)$$

Cette condition assure que la surface S est attractive pour la trajectoire de phase : sous certaines conditions, le point représentatif de l'évolution du système dans l'espace de phase peut être maintenu sur la surface $S(x) = 0$ qui est choisie à priori. L'état du système bouclé est alors plongé dans l'état d'un système "réduit" de dimension inférieure et libre appelé système équivalent, dont les coefficients de son équation caractéristique sont identiques à ceux de cette surface [1, 2, 4, 5].

3.2.3 Calcul de la Commande :

Il existe dans la littérature trois méthodes pour fixer la structure et les paramètres de la commande à structure variable telles que la commande par relais, la commande par retour d'état linéaire à gains commutés et la commande équivalente augmentée que nous présentons ci-après. Dans la réalité pratique, on est confronté à la présence de seuils, retards et hystérésis. Avec la seule commande équivalente (commande par mode glissant équivalente U_{eq}) qui est déduite de la condition $S(x) = 0$ durant le régime glissant permanent, telle que la trajectoire du système reste sur la surface de glissement $S(x) = 0$, le point $x(t)$ reste seulement au voisinage de la surface $S(t) = 0$. Cette commande est alors augmentée pour constituer une combinaison de deux composantes : une composante de basse fréquence qu'est cette commande de linéarisation proposée par Philippov et Utkin [6, 7], et une autre composante de haute fréquence U_s qui est ajoutée en tant que commande auxiliaire pour garantir l'attractivité de la surface de glissement. Ces deux composantes (équation (3.10)) contribuent ensemble à la vérification de la condition (3.9) :

$$U = U_{eq} + u_s \quad (3.10)$$

En portant l'expression de U dans l'équation (3.8), on obtient l'équation d'état du système commandé par la commande équivalente augmentée :

$$\frac{dx}{dy} = \left\{ I - g(x, t) \left[\left(\frac{\partial s}{\partial x} \right)^T g(x, t) \right]^{-1} \left(\frac{\partial s}{\partial x} \right)^T \right\} f(x, t) + g(x, t) U_s \quad (3.11)$$

L'équation d'état du système en mode glissant est obtenue lorsqu'on est en régime glissant (c.à.d. $U_s = 0$ pour $S(x) = 0$) [6, 7].

La commande U_s est déterminée de manière à vérifier la condition d'attractivité. La forme généralement utilisée de u_s est une commande par relais (Figure 3.2) :

$$U_s = K \operatorname{sign}(S(x)) = \begin{cases} +K & \text{si } S(x) > 0 \\ -K & \text{si } S(x) < 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

Où K est un gain positif.

3.2.4 Phénomène du Chattering :

L'un des principaux inconvénients du réglage par mode de glissement est le phénomène du chattering, car il peut endommager les actionneurs par des sollicitations trop fréquentes et nuire au fonctionnement et aux performances du système. Dans le but de réduire

ces oscillations plusieurs solutions ont été apportées, comme par exemple remplacer la fonction sign Figure (3.2) par une fonction de saturation caractérisée par un ou deux seuils (atténuation des amplitudes des ondulations) Figure (3.3) :

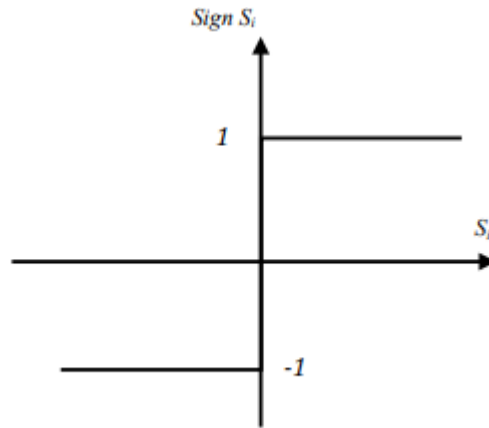


Figure (3.2) Représentation de la fonction sign.

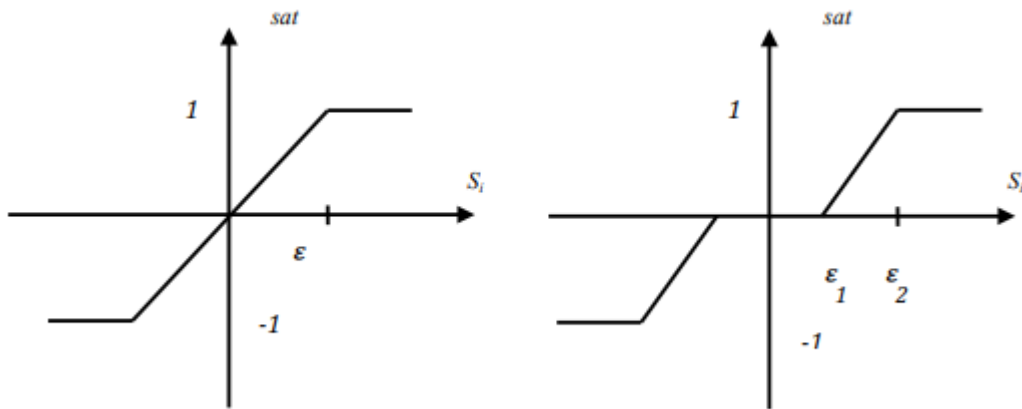


Figure (3.3) : Fonction SAT avec un seuil et deux seuils (zone morte).

Ces deux fonctions sont respectivement définies par :

$$\text{Sat}(S) = \begin{cases} -1, & \text{si } S < -\varepsilon \\ \frac{S}{\varepsilon}, & \text{si } |S| < \varepsilon \\ 1, & \text{si } S > \varepsilon \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\text{Sat}(S) = \begin{cases} 0, & \text{si } S < |\varepsilon_1| \\ \frac{S - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, & \text{si } \varepsilon_1 < |S| < \varepsilon_2 \\ \text{sign}(S), & \text{si } S > \varepsilon_3 \end{cases} \quad (3.14)$$

On peut aussi donner la fonction de smooth (Figure. 3.4) :

$$\text{Smooth}(S) = \frac{s}{|s| + \mu} \tag{3.15}$$

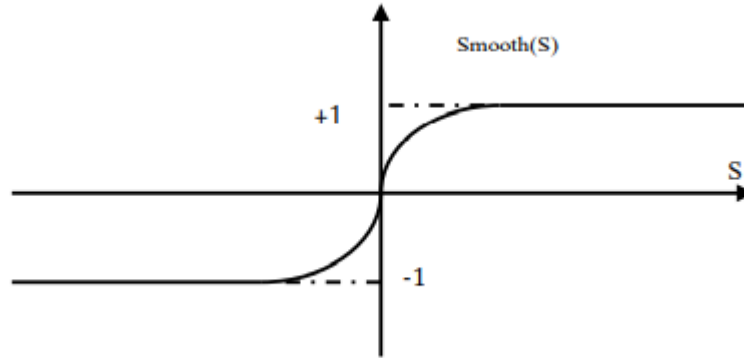


Figure (3.4) : Fonction «smooth ».

3.3. Application de la commande à mode glissant dans la MADA :

Ces dernières années, beaucoup d'effort de recherches a été consacré aux applications des techniques de commande par les modes glissants aux équipements électroniques et aux commandes électriques [8]. L'intérêt pour cette approche de commande est du à sa robustesse aussi, elle est apte à éliminer les effets des variations paramétriques même en régime dynamiques avec un minimum de complexité de la loi de commande [4, 8, 9]. En utilisant la structure de commande en cascade, le schéma de principe pour la commande du MADA est donné à la Figure (3.5) :

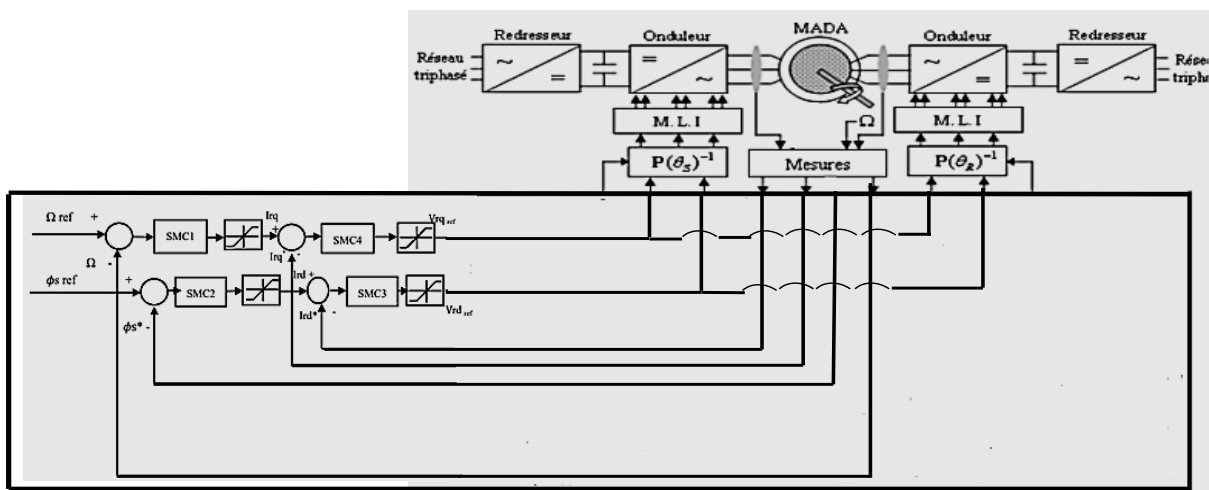


Figure (3.5) : Schéma de principe de la commande par mode glissant du MADA.

Le système d'équations d'états de la MADA est suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{r\alpha}}{dt} = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{L_s T_s L_r} \right) i_{r\alpha} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{s\alpha} + \frac{M}{\sigma L_r L_s T_s} \phi_{s\alpha} + (\omega_s - \omega) i_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{r\alpha} \\ \frac{di_{r\beta}}{dt} = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{L_s T_s L_r} \right) i_{r\beta} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{s\beta} + \frac{M}{\sigma L_r L_s} \omega \phi_{s\alpha} - (\omega_s - \omega) i_{r\alpha} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{r\beta} \end{array} \right\} \quad (3.16)$$

$$i_{r\alpha} = \frac{\dot{\phi}_s}{M} \quad (3.17)$$

$$\frac{d\phi_{s\alpha}}{dt} = V_{s\alpha} + \frac{M}{T_s} i_{r\alpha} - \frac{1}{T_s} \phi_{s\alpha} \quad (3.18)$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = -\frac{1}{J} \left(\frac{p.M}{L_s} (i_{r\beta} \cdot \phi_{s\alpha}) \right) + f\Omega + C_r \quad (3.19)$$

3.3.1 Surface de régulation de la vitesse :

L'erreur de vitesse est définie par [8, 9]:

$$e = \Omega_{ref} - \Omega \quad (3.20)$$

Pour $r=1$, l'équation diverse de commande de vitesse peut être obtenue à partir de l'équation (3.2) comme suit :

$$S(\Omega) = \Omega_{ref} - \Omega \quad (3.21)$$

$$\dot{S}(\Omega) = \dot{\Omega}_{ref} - \dot{\Omega} \quad (3.22)$$

En substituant l'expression de $\dot{\Omega}$ de l'équation (3.19) dans l'équation (3.22), on obtient :

$$\dot{S}(\Omega) = \dot{\Omega}_{ref} - \frac{1}{J} \left(-\frac{p.M}{L_s} (i_{r\beta} \cdot \phi_{s\alpha}) \right) - f\Omega - C_r \quad (3.23)$$

On prend:

$$I_{r\beta}^{ref!} = I_{r\beta}^{eq} + I_{r\beta}^s \quad (3.24)$$

Pendant le mode glissant et dans le régime permanent, on a :

$$S(\Omega) = 0, \quad \dot{S}(\Omega) = 0, \quad I_{r\beta}^s = 0 \quad (3.25)$$

Où la commande équivalente est donnée par :

$$I_{r\beta}^{e\beta} = -\frac{J \cdot L_s}{p \cdot M \cdot \varphi_{s\alpha}} \left(\dot{\varphi}_{ref} + \frac{f}{J} \Omega + \frac{C_r}{J} \right) \quad (3.26)$$

Et :

$$I_{r\beta}^s = -K_{i_{r\beta}} \cdot \text{sat}(S(\Omega)) \quad (3.27)$$

Avec: $K_{i_{r\beta}}$ constante négative.

3.3.2 Surface de régulation du flux rotorique :

On a:

$$S(\varphi_{r\alpha}) = \varphi_{r\alpha}^{ref} - \varphi_{r\alpha} \quad (3.28)$$

$$\dot{S}(\varphi_{r\alpha}) = \dot{\varphi}_{r\alpha}^{ref} - \dot{\varphi}_{r\alpha} \quad (3.29)$$

En substituant l'expression de $\dot{\varphi}_{r\alpha}$ de l'équation (3.18) dans l'équation (3.29), on obtient :

$$\dot{S}(\varphi_{r\alpha}) = \dot{\varphi}_{r\alpha}^{ref} - \left(V_{r\alpha} + \frac{M}{T_r} i_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \varphi_{r\alpha} \right) \quad (3.30)$$

On prend :

$$I_{s\alpha}^{ref} = I_{s\alpha}^{e\beta} + I_{r\alpha}^r \quad (3.31)$$

Pendant le mode glissant et dans le régime permanent, on a :

$$S(\varphi_{r\alpha}) = 0, \dot{s}(\varphi_{r\alpha}) = 0, I_{r\alpha}^r = 0 \quad (3.32)$$

Où la commande équivalente est donnée par :

$$I_{r\alpha}^{e\beta} = \frac{T_r}{M} (\varphi_r^{ref} - V_{r\alpha} \dot{} + \frac{1}{T_r} \varphi_{r\alpha}) \quad (3.33)$$

Et

$$I_{s\alpha}^r = K_{I_{s\alpha}} \cdot \text{sat}(S(\Omega)) \quad (3.34)$$

Avec : $K_{I_{s\alpha}}$ constante positive.

3.4. Commande mode glissant par super twisting :

La convergence de cet algorithme est régie aussi par les rotations autour de l'origine du diagramme de phase. La loi de commande Super Twisting $u(t)$, est formée de deux parties. La première est définie par sa dérivée par rapport au temps (u_1), tandis que la deuxième est donnée par la fonction continue de la variable de glissement (u_2) :

$$u = u_1 + u_2 \quad (3.35)$$

$$\dot{u}_1 = \begin{cases} -u & \text{si } |u| > 1 \\ -W \text{sign}(s) & \text{si } |u| \leq 1 \end{cases} \quad (3.36)$$

$$u_2 = \begin{cases} -\lambda_1 |s_0|^{\rho^1} \text{sign}(s) & \text{si } |s| > s_0 \\ \lambda_1 |s|^{\rho^1} \text{sign}(s) & \text{si } |s| \leq s_0 \end{cases} \quad (3.37)$$

Les conditions suffisantes de convergence en temps fini sont :

$$W > \frac{\phi}{\tau_M}$$

$$\lambda_1^2 \geq \frac{4\phi \tau_M (w + \phi)}{\tau_m^2 \tau_m (w - \phi)} \quad (3.38)$$

$$0 < \rho^1 \leq 0.5$$

Ce contrôleur peut être simplifié si le système de contrôle est linéairement dépendant de la commande, ainsi la loi de commande est donnée par :

$$u = \lambda |s|^{1/2} \sin(s) + u_1 \quad , \quad \dot{u}_1 = -w \sin(s) \quad (3.39)$$

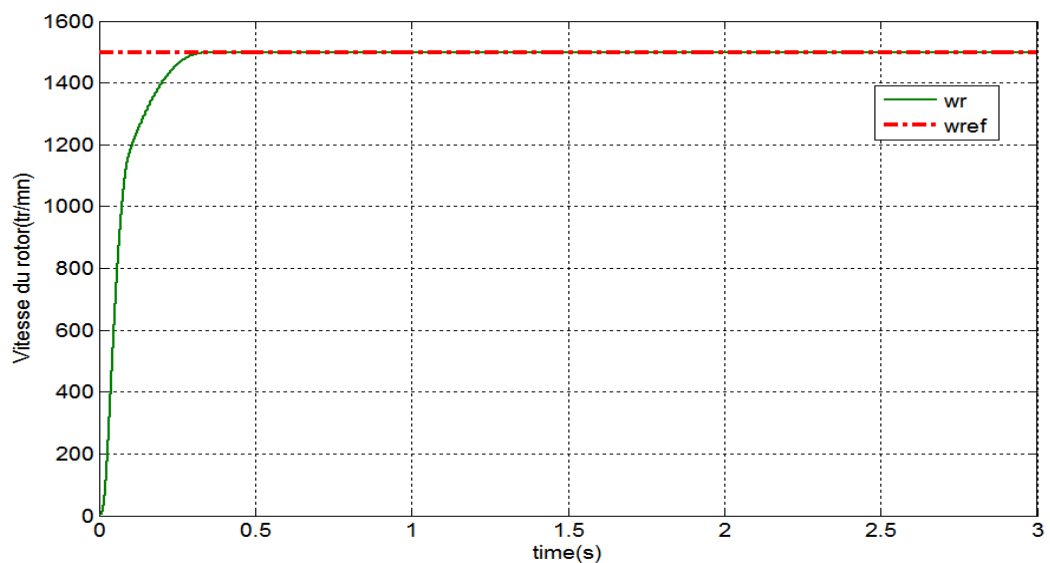
L'intérêt de cet algorithme est qu'il très robuste, elle n'a pas besoin d'information sur la dérivée de s . A cause de cette caractéristique on peut réduire les nombres de capteurs du système, ainsi que le temps de calcul. [10]

3.5. RESULTATS DE SIMULATION

Pour mettre en évidence l'importance de la technique de commande non-linéaire, on va effectuer des tests de simulation pour différents cas possibles.

3.5. 1. Test de variation des paramètres

Nous avons simulé le système pour une augmentation de +50% de la résistance rotorique (R_r), ensuite pour une valeur nominale de R_r , on fait augmenter la résistance statorique R_s de +50% de sa valeur nominale. La figure (3.6) illustre les résultats du test de simulation.



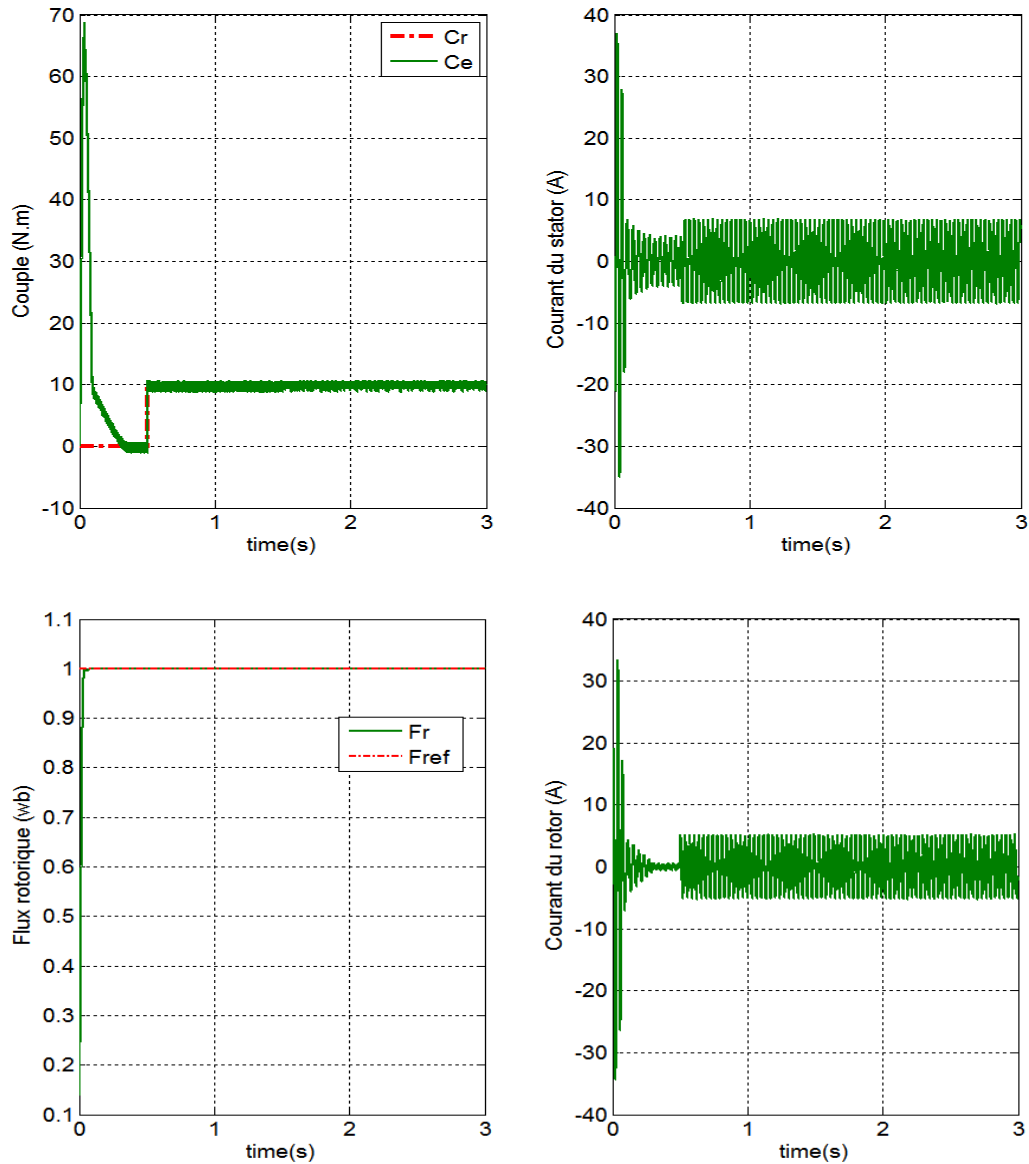
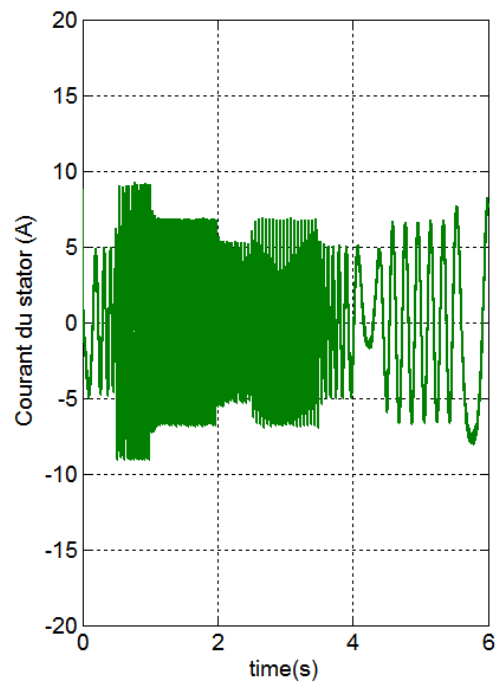
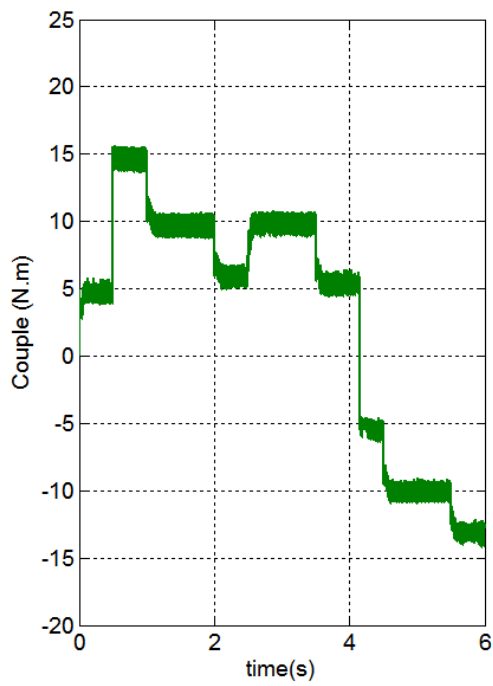
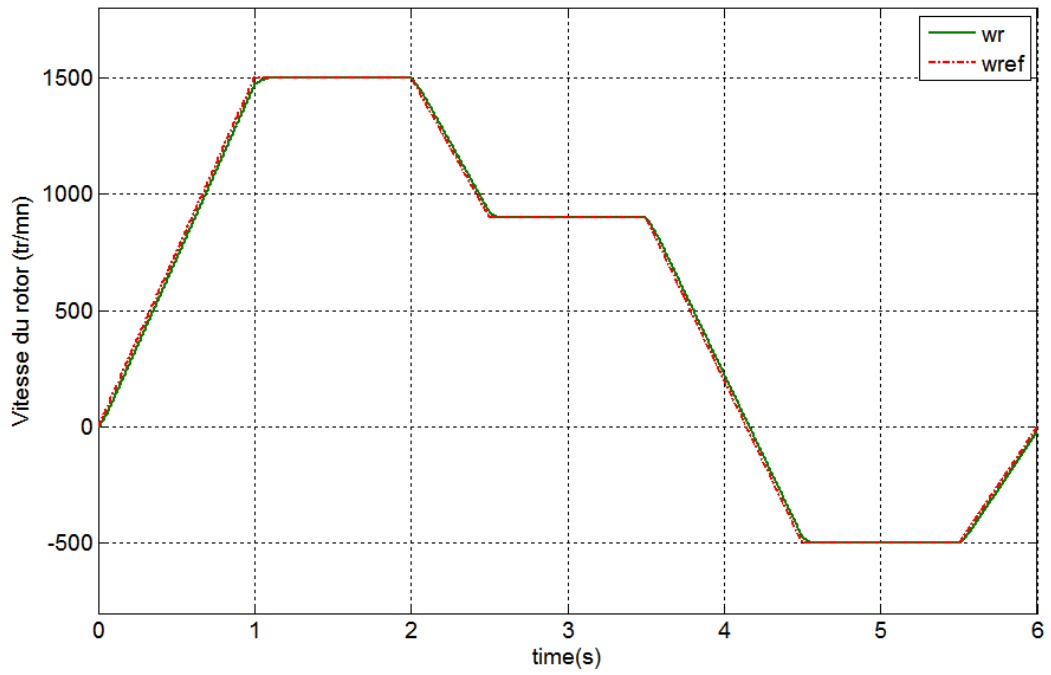


Figure (3.6) : Résultats de simulation de la commande du MADA vis-à-vis la variation de la résistance statorique et la résistance rotorique.

Ces figures montrent que ces variations paramétriques introduites n'influent carrément pas sur les performances de la commande; aucun changement n'existe surtout sur les flux rotoriques ce qui montre l'efficacité de la commande et la validité des lois imposées.

3.5. 2. Test de variation de la consigne

Pour le test de l'inversion de la vitesse sur le MADA, on introduit un changement de consigne de vitesse (157 rad/sec) à (-157 rad/sec), avec un couple de charge nominale. Les résultats des simulations sont représentés par la figure (3.7).



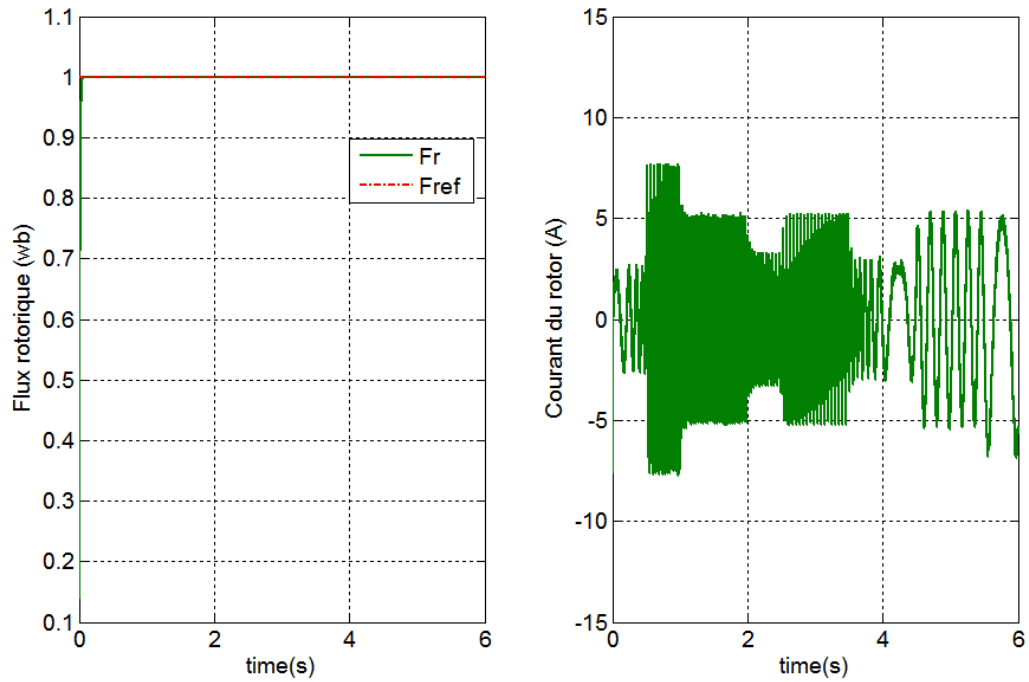
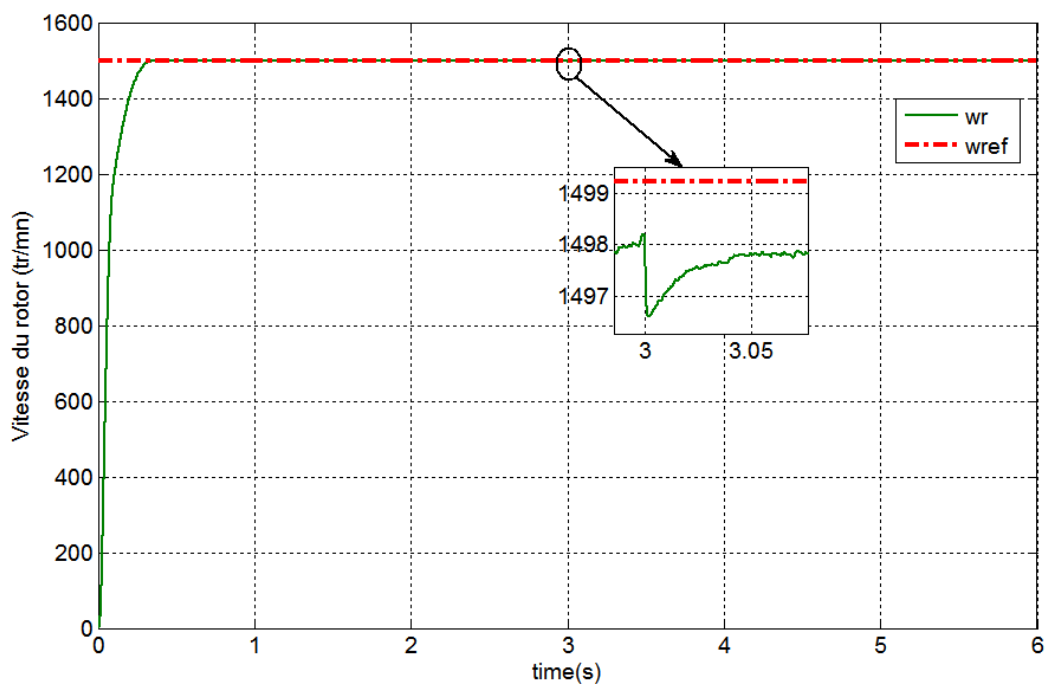


Figure (3.7) : Réponse du système de commande lors de l'inversion du sens de rotation.

3.5.3. Test de variation de la charge :

Les résultats de simulation représentés par la figure 3.8 sont obtenus pour une variation de 100 % de la valeur nominale du couple résistant.



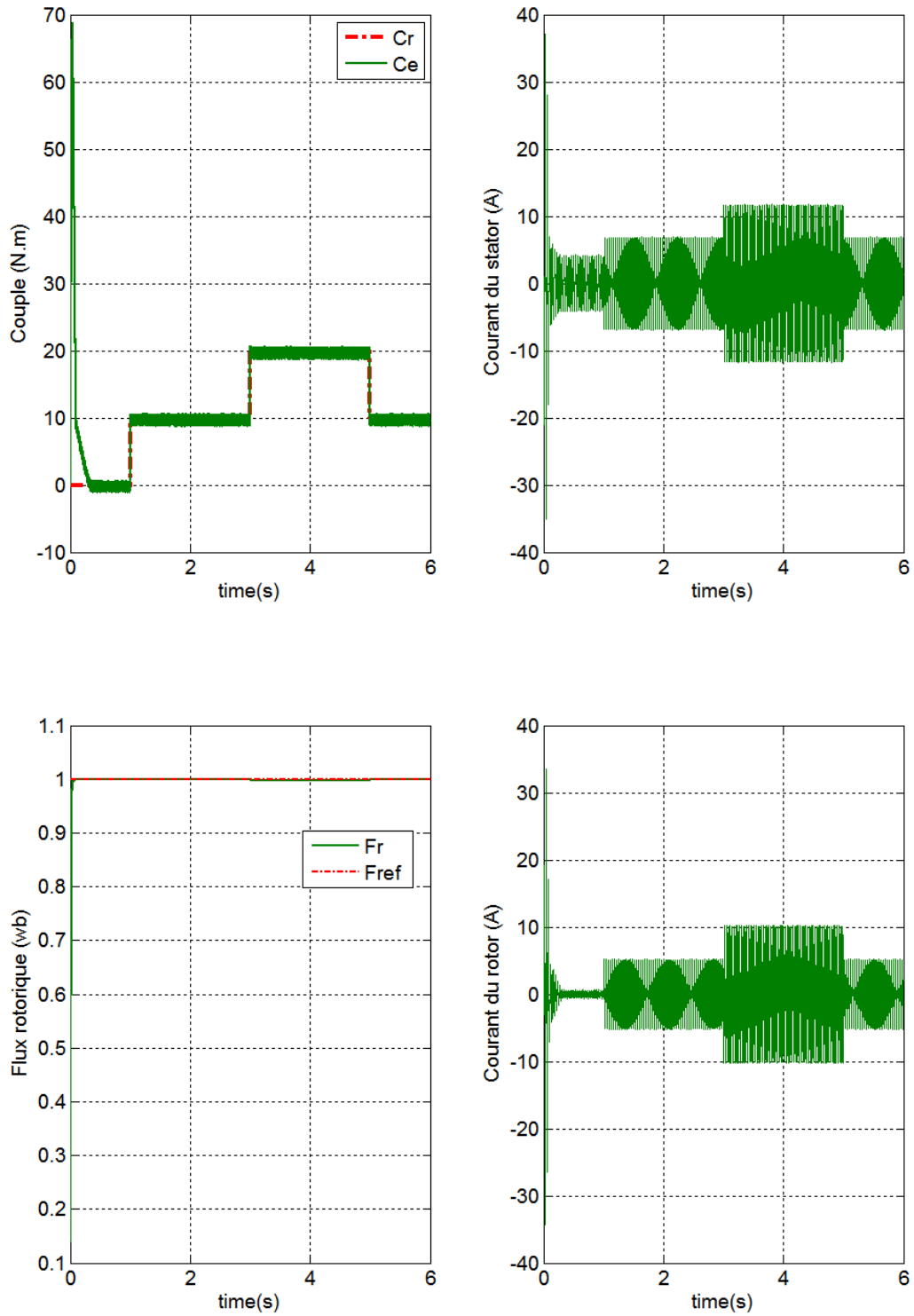


Figure (3.8) : Résultats de simulation de la commande du MADA vis-à-vis la variation de la charge.

3.6. Utilisation d'un observateur mode glissant:

3.6.1 Principe de fonctionnement :

Le principe des observateurs mode glissant consiste à contraindre, à l'aide des fonctions discontinues, les dynamiques d'un système d'ordre n à converger vers une variété s de dimension $(n-p)$ dite surface de glissement (p étant la dimension du vecteur de mesure) [11].

L'attractivité de cette surface est assurée par des conditions appelées conditions de glissement. Si ces conditions sont vérifiées, le système converge vers la surface de glissement et y évolue selon une dynamique d'ordre $(n-p)$.

Dans le cas des observateurs mode glissant, les dynamiques concernées sont celles des erreurs d'observation : $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$.

A partir de leurs valeurs initiales $e(0)$, ces erreurs convergent vers les valeurs d'équilibre en deux étapes :

Dans une première phase, la trajectoire des erreurs d'observation évolue vers la surface de glissement sur laquelle les erreurs entre la sortie de l'observateur et la sortie du système réel (les mesures) $e_y = y - \hat{y}$ sont nulles.

Cette étape qui est généralement très dynamique est appelée mode d'atteinte.

Dans la seconde phase, la trajectoire des erreurs d'observation glisse sur la surface de glissement avec des dynamiques imposées de manière à annulé toutes les erreurs d'observation.

Ce dernier mode est appelé mode de glissement.

Considérons un système d'état non linéaire d'ordre n :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y) \\ y = h(x) \end{cases} \quad (3.40)$$

Où :

$x \in R^n$ représente le vecteur d'état.

$U \in R^m$ est le vecteur d'entrée ou la commande.

$Y \in R^p$ dénote le vecteur de sortie.

Les fonctions f et h sont des champs de vecteurs supposés suffisamment continument dérivables sur x . L'entrée u est localement bornée et mesurable.

L'observateur mode glissant est défini avec la structure suivante [12] :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) - K \text{sign}(\hat{y} - y) \\ \hat{y} = h(\hat{x}) \end{cases} \quad (3.41)$$

Où :

K est la matrice de gain de dimension $(n-p)$.

On remarque que l'observateur obtenu est une copie du modèle du système plus un terme correcteur qui établit la convergence de \hat{x} vers x .

La surface de glissement dans ce cas est donnée par :

$$S(x) = y - \hat{y} \quad (3.42)$$

Le terme de correction utilisé est proportionnel à la fonction discontinue sign appliquée à l'erreur de sortie où la fonction $\text{sign}(x)$ est définie par [12] :

$$\text{Sign}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x = 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases} \quad (3.43)$$

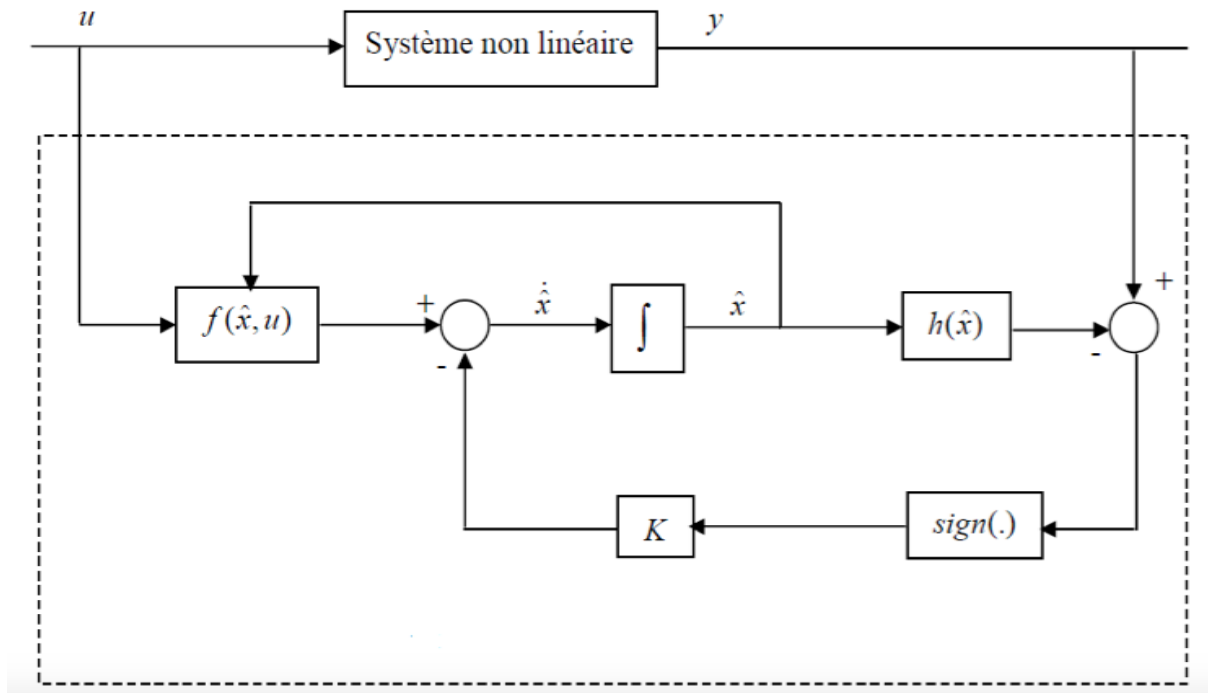


Figure (3.9) : Schéma fonctionnel d'un observateur mode glissant.

Pour que l'état estimé converge vers l'état réel, l'observateur mode glissant doit respecter deux conditions:

- La première condition concerne le mode d'atteinte et garantit l'attractivité de la surface de glissement $S=0$ de dimension p .

La surface de glissement est attractive si la fonction de Lyapunov $V(x)=S^T \times S$ vérifie la condition : $\dot{V}(x) < 0$ si $S \neq 0$.

- La deuxième concerne le mode glissant, durant cette étape, la matrice des gains correctifs agit de manière à satisfaire la condition d'invariance suivante :

$$\begin{cases} \dot{S} = 0 \\ S = 0 \end{cases}$$

Durant ce mode, les dynamiques du système sont réduites et le système d'ordre n devient un système équivalent d'ordre $(n-p)$. Ces critères permettent la synthèse de l'observateur mode glissant et déterminent son fonctionnement [13].

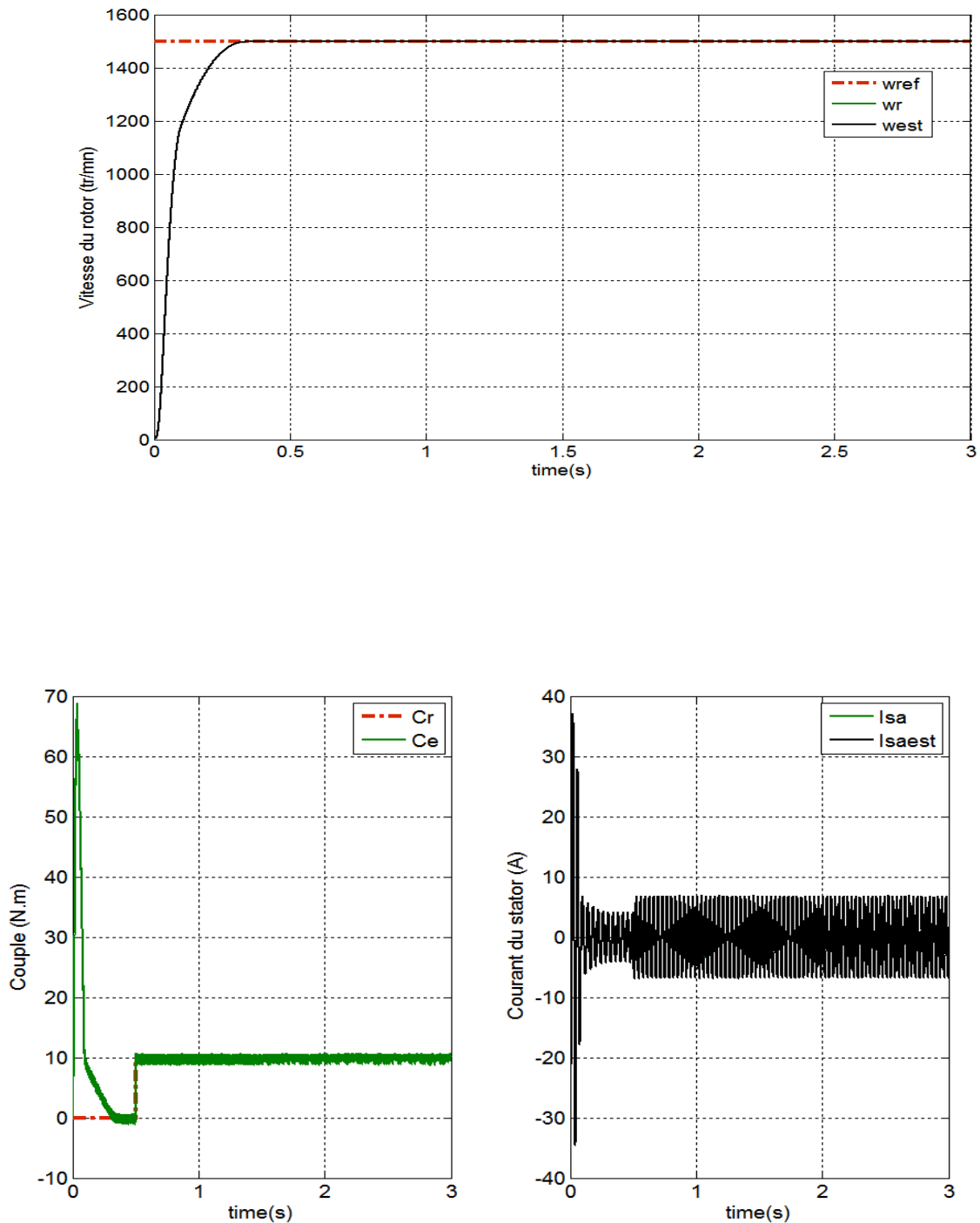
3.6.2 Resultats de simulation:

Pour montrer les performances de la commande par observateur mode glissant, la MADA est soumise à des tests de robustesse pour des conditions de fonctionnement variables

sous charge nominale à savoir régime nominal, variation de vitesse, de paramètres de la machine.

3.6.2.1 Test de variation paramétriques

Le test est fait pour montrer la robustesse de la commande pour une variation de la résistance statorique et rotorique. Pour ce faire, on augmente la résistance statorique de 50% de sa valeur nominale à l'instant 1.5 s, puis la résistance statorique de 50% de sa valeur nominale à l'instant 2 s. Les résultats de simulation sont donnés sur la figure (3.10).



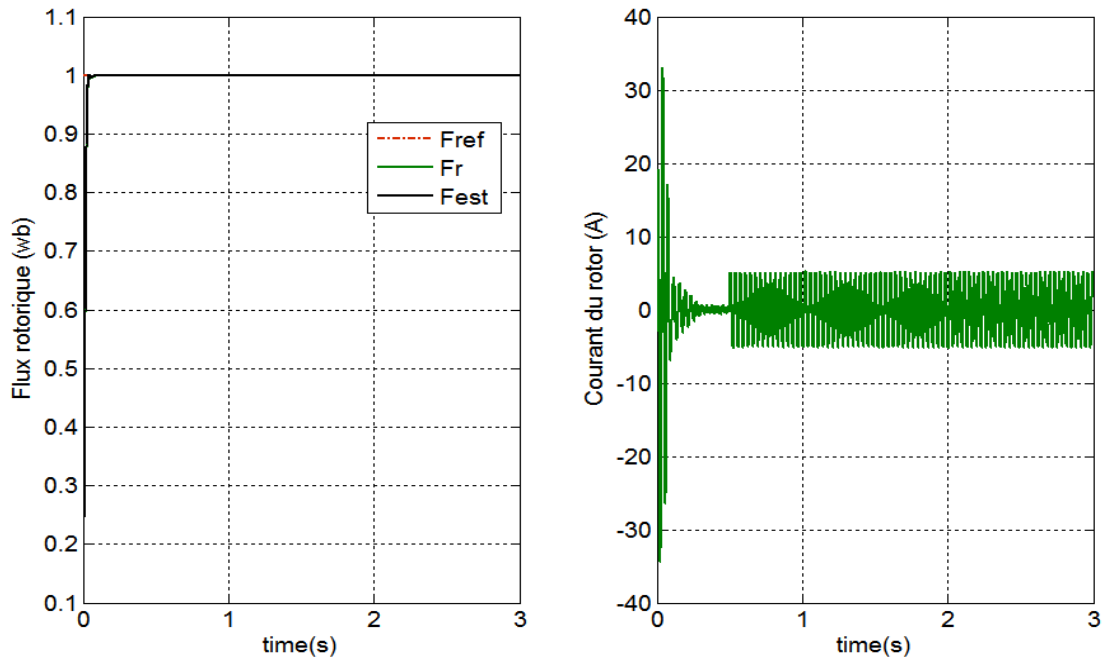


Figure (3.10) : Test de variation de la résistance statorique et la résistance rotorique de la machine.

Daprès les résultats obtenus, on constate que la vitesse suit pratiquement la référence sans dépassement, les autres grandeurs couple, flux rotorique, courants statoriques et courants rotoriques ne sont pas affectés par cette variation.

3.6.2.2 Test de variation de la vitesse :

Dans ce test, on introduit un changement de consigne de vitesse de (120 rad/sec) à (40 rad/sec) rad/sec) à (-120 rad/sec), avec un couple de charge de 10 N.m appliqué à l'instant $t = 0.5$ sec.

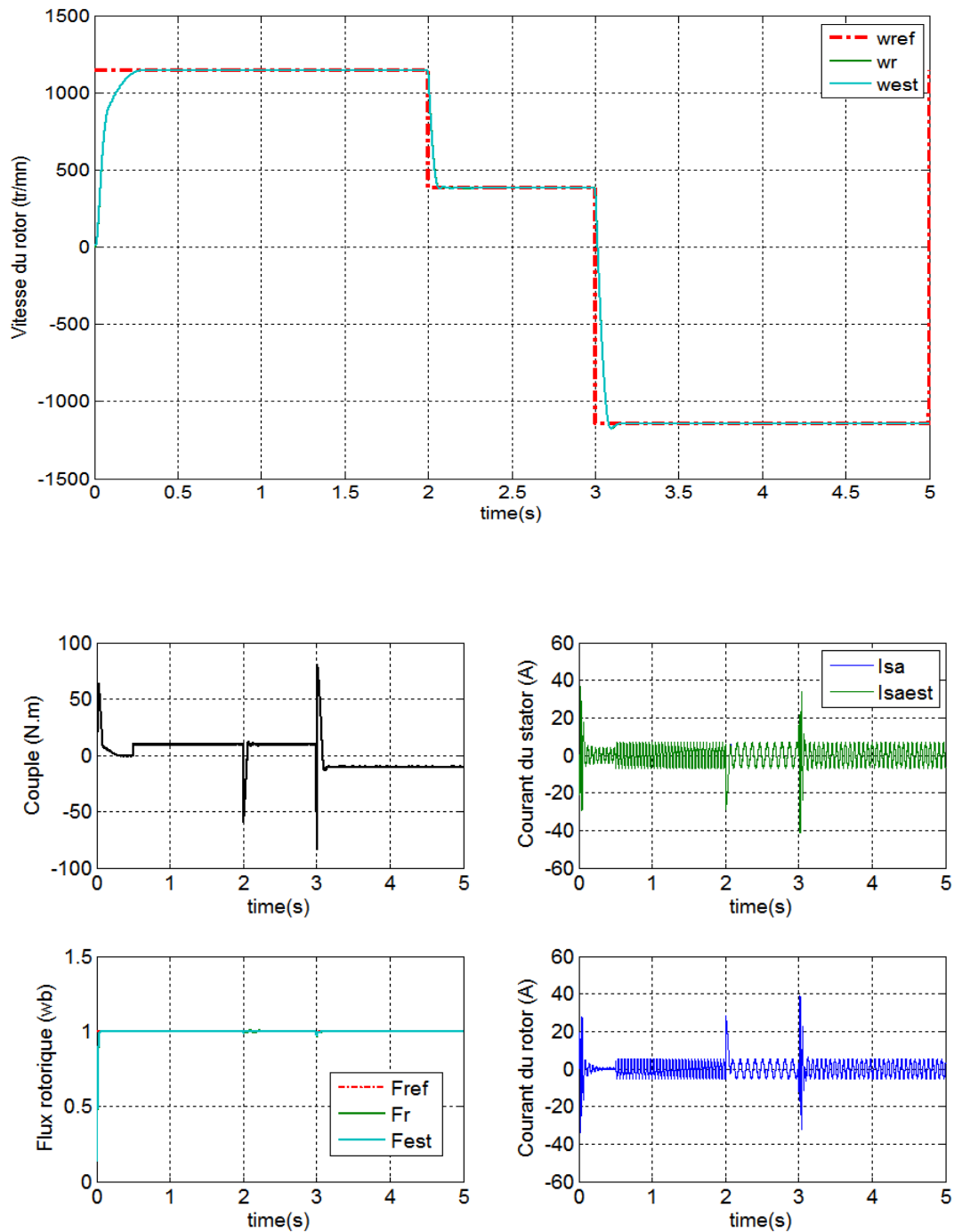


Figure (3.11) : Test de variation de la vitesse de la machine.

La vitesse dans ce cas, suit la grandeur de référence sans dépassement de même que pour le couple mais avec un dépassement lors de chaque changement de consigne. Le courant statorique et le flux rotorique estimés suivent leurs valeurs réelles, avec des petites perturbations au moment de changement de consigne.

3.6.2.3 Test de variation de la charge :

La figure (3.12) montre les performances de la commande, avec un démarrage à vide, suivi d'une application de différents niveaux de couple de charge ([0 10 20 10]) qui sont appliqués au MADA par le temps.

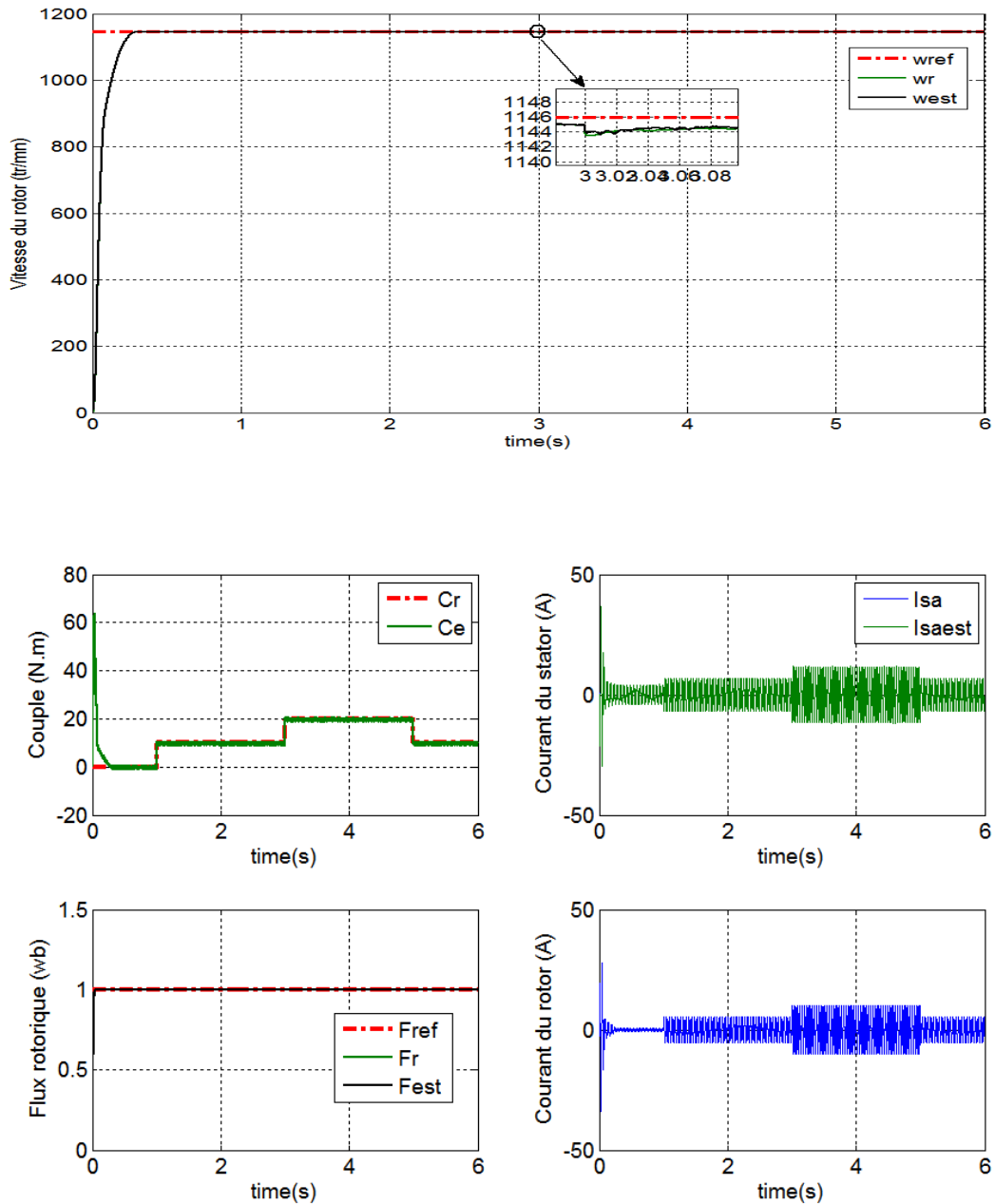


Figure (3.12) : Test de variation de la charge appliqué à la machine.

Dans la figure (3.12), la consigne de couple varie à partir de 0 N.m à 10 N.m et de 10 N.m à 20 N.m avec une consigne de flux = 1 Wb, on remarque que le couple suit toujours les nouvelles consigne.

3.7. Utilisation d'un observateur de luenberger:

La théorie de l'observation de Luenberger repose essentiellement sur des techniques de placement de pôles. En se place dans le cas déterministe, où les bruits w et v sont nuls, Luenberger propose l'observateur suivant :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + B U(t) + K (y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C \hat{x}(t) \end{cases} \quad (3.44)$$

La dynamique de l'erreur d'estimation ; $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ a pour expression :

$$\dot{e}(t) = (A - KC)e(t) \quad (3.45)$$

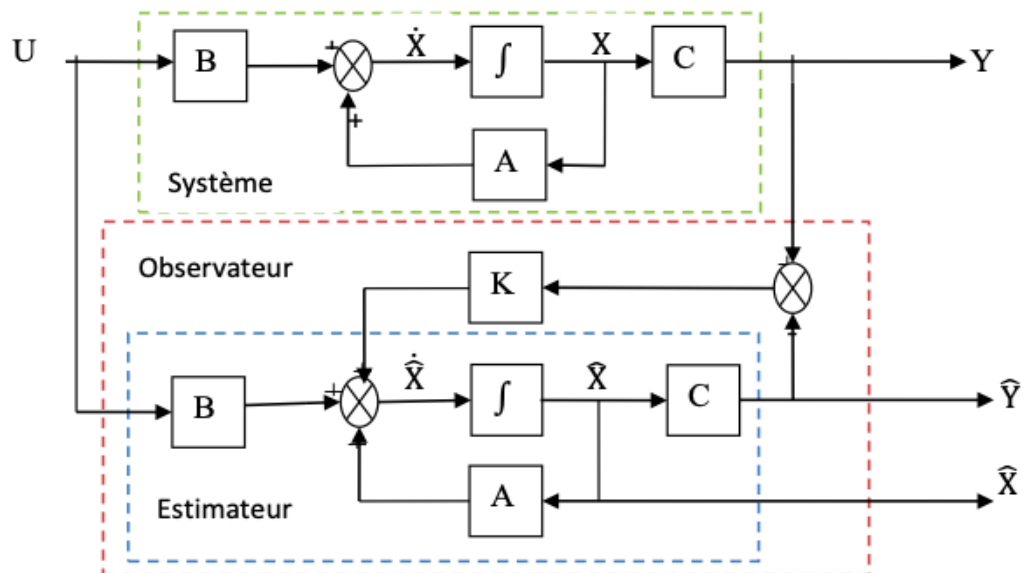


Figure (3.13) : Structure de l'observateur de Luenberger.

En utilisant une technique de placement de pôles, il suffit alors de choisir le gain K de l'observateur de telle sorte que les valeurs propres de la matrice $(A - KC)$ soient dans le demi-plan complexe gauche.

Pour ce type d'observateur, une grande liberté est laissée au choix des valeurs propres, mais en pratique on choisit une dynamique d'erreur plus rapide que celle du processus.

Cependant, on ne peut les prendre infiniment grandes parce que on ne peut utiliser que des gains réalisables et l'augmentation de la bande passante du reconstructeur ne permet plus de négliger les bruits qui deviennent prépondérants en hautes fréquences [14].

3.7.1 Resultats de simulation:

3.7.1.1. Test de variation paramétrique :

Les résultats de simulations présentés par les figures (3.14) sont donnés pour tester la robustesse à la variation de la résistance statorique et rotorique $R_s=50\%$ R_{sn} , $R_r=50\%$ R_{rn} respectively.

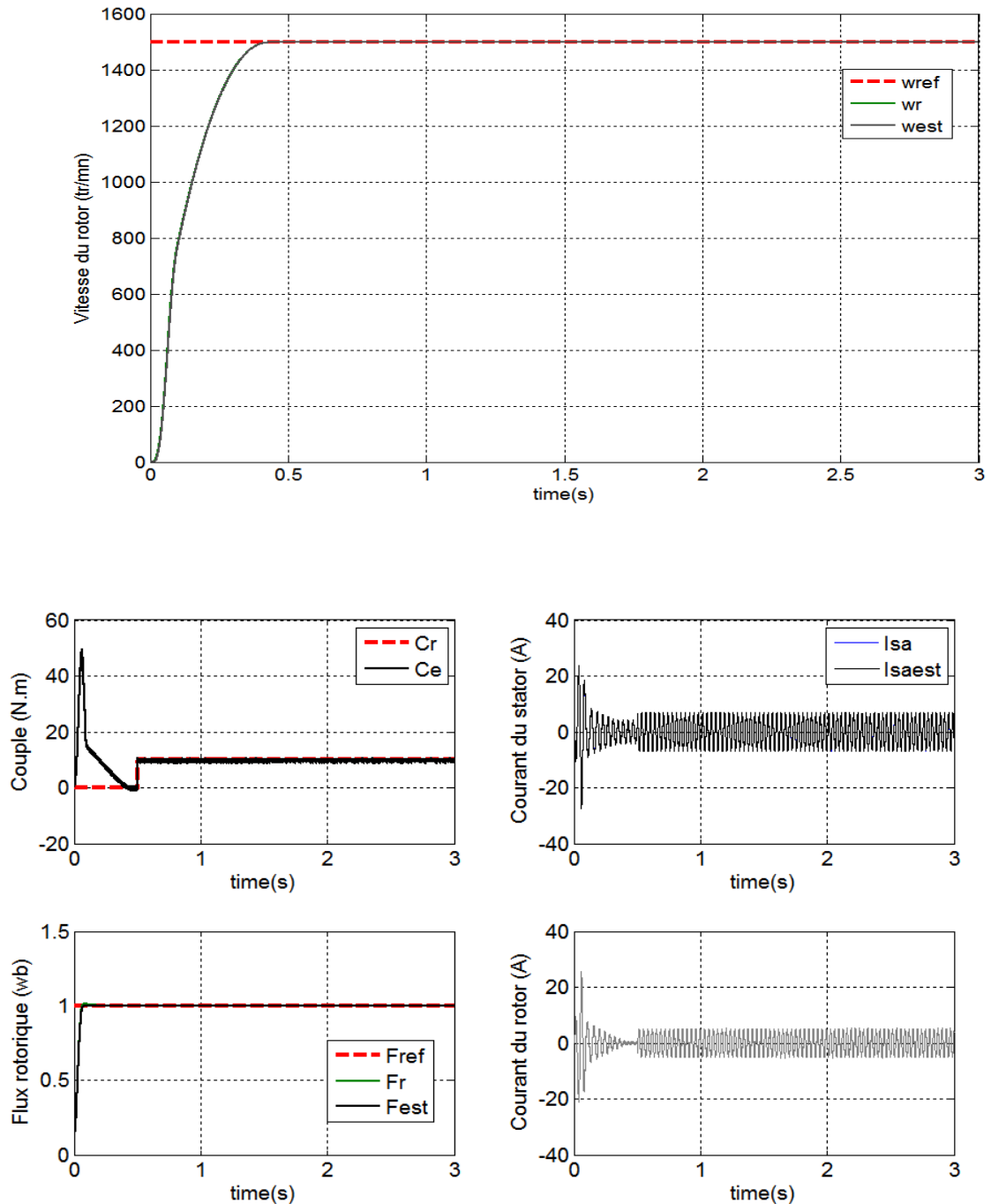


Figure (3.14) : Test de variation paramétrique de la machine.

D'après ces résultats on remarque que la vitesse suit pratiquement la référence sans dépassement, les autres grandeurs couple, courants statoriques, flux rotorique et courants rotoriques ne sont pas affectés par cette variation paramétrique.

3.7.1.2. Test avec inversion du sens de rotation de la vitesse :

Afin de tester la robustesse de la commande par l'utilisation de l'observateur de Luenberger, vis-à-vis à une variation importante de la référence de la vitesse, on introduit un changement de consigne de vitesse (120 rad/sec) à (-120 rad/sec), avec un couple de charge de 10 N.m appliqué à l'instant $t = 0.5$ sec.

La figure 3.15 représente l'évolution des caractéristiques du MADA avec inversion de la vitesse à partir de l'instant $t = 3$ sec, avec une charge nominale.

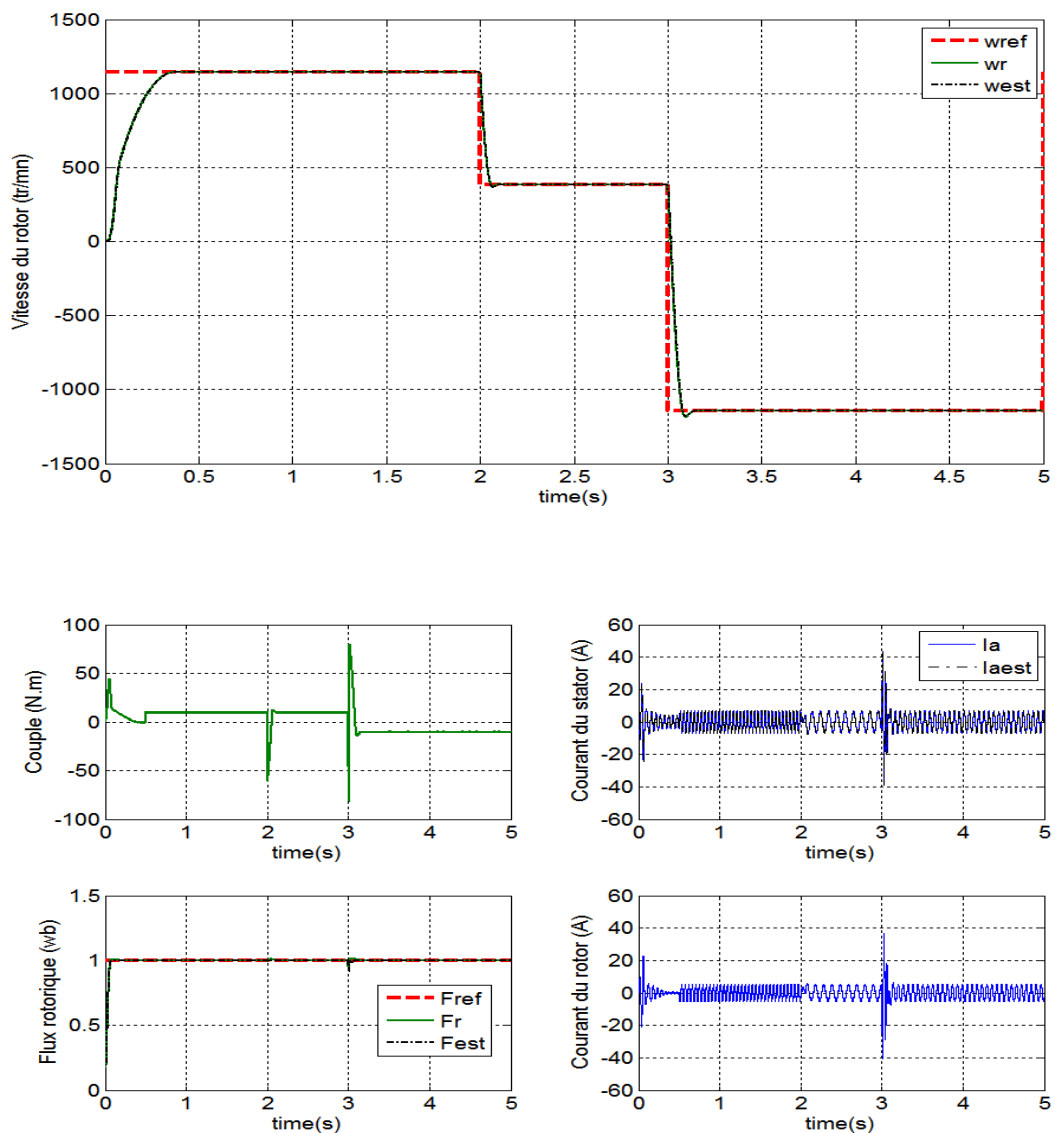


Figure (3.15) : Réponses dynamiques de la commande avec inversion du sens de la vitesse.

3.7.1.3. Test de variation de la charge :

Dans ce test, un couple de charge de 10 N.m a été appliqué à l'instant $t = 1$ s puis augmenté à 20 N.m à l'instant $t = 3$ s.

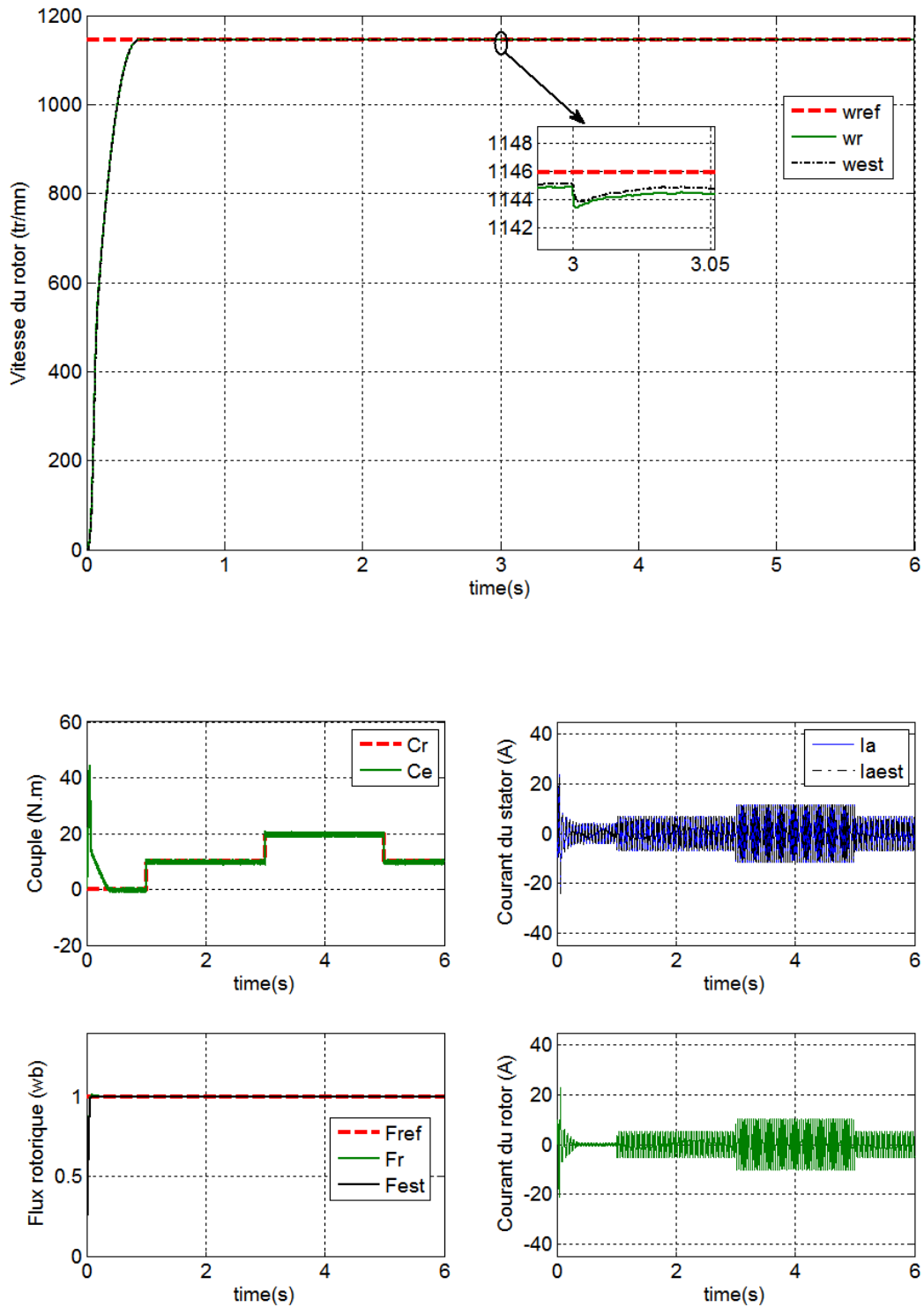


Figure (3.16) : Réponses dynamiques de la commande avec variation de la charge.

3.8. Tableau de comparaison des résultats :

	Observateur-mode glissant	Observateur-Luenberger
Temps de réponse	++	+
Application d'un couple de charge	+	++
Inversion du sens de rotation	+	+
Inversion de couple de charge à faible vitesse	+	++
Variation des paramètres électriques	+	+

Tableau (1) : Comparaison entre l'observateur mode glissant et l'observateur de Luenberger

3.9. Conclusion :

Ce chapitre a fait l'objet de l'application de la commande non linéaire sans capteur mécanique par la commande mode glissant à la MADA dont l'objectif principal étant la régulation de la vitesse. Dans ce contexte nous avons présenté tout d'abord un rappel théorique sur la commande par mode glissant, mais l'inconvénient majeur de cette commande est le problème de chattering causé par sa nature commutant non linéaire.

Dans ce chapitre, on a utilisé deux techniques de la commande sans capteur mécanique soit :

- ✓ Utilisation d'un observateur par mode glissant.
- ✓ Utilisation d'un observateur de luenberger.

D'après les résultats de simulation obtenus, on peut conclure que la technique de commande le plus estimier c'est la technique de commande sans capteur par l'utilisation de l'observateur de Luenberger.



CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE:

Ce travail du mémoire traite la commande non linéaire sans capteur d'un actionneur électrique par des observateurs non linéaires à base d'une machine asynchrone à double alimentation.

Dans le premier chapitre, nous avons entamé ce travail par un état de l'art sur la machine asynchrone à double alimentation où on a présenté les modes de fonctionnement, les avantages et inconvénients de cette dernière.

Dans le deuxième chapitre, on introduit la modélisation de la MADA et de son alimentation. Le modèle de la MADA repose sur les équations différentielles décrites dans le référentiel biphasé.

Ensuite dans le troisième chapitre, on expose les bases théoriques et les fondements de la commande non linéaire de la MADA à base de la commande mode glissant d'ordre supérieur, puis on effectue la synthèse d'un observateur non linéaire en mode glissant et Luenberger dans l'objectif de l'intégrer dans la structure de la commande non linéaire précédemment conçue. Grâce aux simulations, qui nous ont permis de montrer la supériorité du régulateur glissant, aussi bien dans ses comportements en poursuite que ceux en régulation. Nous avons également observé sa robustesse surtout vis-à-vis des perturbations de la charge traduite par des changements du couple résistant et des variations paramétriques. Ce qui nous a permis d'affirmer que l'approche à mode glissant offre une excellente robustesse au contrôle non linéaire.

Les résultats de simulations obtenus montrent que la commande sans capteur de la MADA donne des résultats satisfaisants et de bonnes performances face aux variations paramétriques. L'approche de la commande sans capteur par des observateurs non linéaires proposé a été justifiée par les résultats de simulation et les performances obtenus. Une comparaison avec les résultats obtenus par les deux observateurs a montré l'amélioration des performances dynamiques. Ce qui rend le régulateur glissant un choix acceptable pour les systèmes d'entraînement nécessitant des réglages rapides, précis et moins sensibles aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques électriques et mécaniques.

Le travail, présenté dans ce mémoire, amène à soulever les perspectives de recherche suivantes:

- Validation des résultats obtenus par des essais pratiques.
- Utiliser d'autres types de convertisseurs de fréquence, tel que les cycloconvertisseurs et les convertisseurs matriciels adaptés aux grandes puissances.
- Étudier la MADA associée à d'autres stratégies de commande.

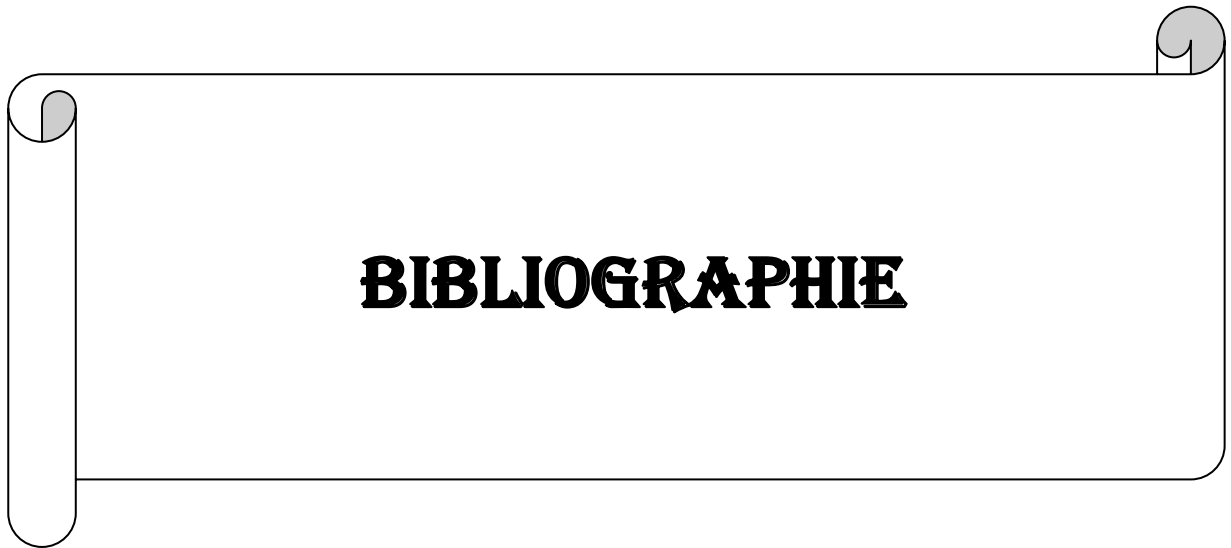


ANNEXES

Annexe A

Parametres du moteur asynchrone double alimentation utilisé

Parametres	Valeurs
$U_{sn}(\text{étoile})$	380 V
$U_{rn}(\text{triangle})$	225 V
R_s	4.85 Ω
R_r	3.80 Ω
L_s	0.27 H
L_r	0.27 H
L_m	0.25 H
J	0.031 Nm/Rad/s ²
f_t	0.0027 mNs/Rad
N_p	2
w_n	1500 ir/mn



- [1] **A. Tamaarat**, «Modélisation et Commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA», Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2015.
- [2] **S. Boudai**, «Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie», Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 2013.
- [3] **H. Camblong**, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse », Thèse de Doctorat, Bordeaux, 2003.
- [4] **E.G. Shehata, G.M. Salama**, «Direct power control of DFIGs based wind energy generation systems under distorted grid voltage conditions», *puissance électrique et systèmes énergétiques*, 53 (2013) 956–966.
- [5] **V.N. Pande, U.M. Mate, S. Kurode**, «Discrete sliding mode control strategy for direct real and reactive power regulation of wind driven DFIG», *systèmes d'alimentation électrique*, 100 (2013) 73– 81.
- [6] **M. MALKI, S. ALI BELARBI**, « Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret », Thèse de Master, université Aboubakar Belkaid, Tlemcen, 2014.
- [7] **A. MELLOUL**, «Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne », Mémoire de magister, université Farhat Abbas Stif, 2011.
- [8] **B. Hopfenspeger, D.J. Atkinson**, « Doubly-fed a.c. machines: classification and comparaison », Conférence européenne sur Pouvoir, Electronique et Applications (EPE), Gras, 2001.
- [9] **P-E. Vidal**, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [10] **S. Drid**, « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation : théorie et expérimentation », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2005.
- [11] **A. Dendouga**, « Contrôle des puissances actives et réactive de la machine asynchrone à double alimentation (DFIM) », Thèse De Doctorat En Science En Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2010.
- [12] **A. Meroufel**, « Contrôle De La Machine Asynchrone ». Polycopie De Cours, Université Djillali Liabes De Sidi Bel-Abbès, Algérie, 2009.
- [13] **D. CEREZO, A. Modeling**, «Simulation and Control of a Doubly-Fed Induction Machine Controlled by a Back-to-Back Converter», PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2006.

- [14] **F. POITIERS**, «Étude et Commande de Génératrices asynchrones pour l'Utilisation de l'Énergie Éolienne», Thèse de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Nantes, France, 2003.
- [15] **D. FORCHTTEI, G. GARCIA et M. Valla**, « Vector control strategy for a doubly-fed standalone induction generator vector», IEEE Trans .conversion de l'energie, pp: 991-995, 2002.
- [16] **A. Boyette**, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone a double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2006.
- [17] **B. Youcef**, « Contribution à l'étude et à la commande robuste d'un aérogénérateur asynchrone à double alimentation», Thèse de doctorat en Electrotechnique, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 2014.
- [18] **Y. DIN –S WANG**, «Stability Analysis of Field Oriented Doubly-Fed Induction Machine Based on Computer Simulation Proc», ICEM, pp. 361-366, Boston, 1990.
- [19] **X. Based**, «Simulation Electric Machines and Power System »,21, pp. 11-24, 1993.
- [20] **A.Walczyna**, «Simulation Study of Dynamics of Current-Controlled Doubly-Fed Induction Machine », Proc. EPE, Vol. 2, pp. 876-88, Aachen, 1989.
- [21] **C.ASMAR**, «Contribution à une Etude Générale des Machines à Double Alimentation– Application Thèse de Doctorat d'Etat», Institut National Polytechnique, Toulouse, 1987.
- [22] **C.EL ASMAR, K. HADDAD et L. DESSAINT**, «Contribution à l'Etude de la Cascade Hypo synchrone en Régime Permanent», Canadian Conférence on Industrial Automation, Montréal, 1992.
- [23] **C.EL ASMAR, K. HADDAD et L. DESSAINT**, « Modeling of Subsynchronous Cascade in Steady State Using Doubly Fed Machine Theory IMACS-TC1», Ecole Polytechnique de Montréal, pp.177-181, 1993.
- [24] **G. Brown**, « Dual Cycloconverter Traction Drive for Double Fed Motors Thesis for the degree doctor of Philosophy», McMaster Universite, Hamilton, Ontario, 1989.
- [25] **G. BROWN, B. SZABADOS, G. OOLBOOM, M. POULOUJADOFF**, « High-Power Cycloconverter Drive for Double Fed Induction Motor», IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 39, N° 3, pp. 230-240, 1992.
- [26] **P.G HOLMES, N.A ELSONBATY**, « Cycloconverter-Excited Divided-Winding Doubly-Fed Machine as a Wind Power Converter IEE Proceedings», energie électrique applications, Vol. 131, Part B, N° 2, pp. 61-69, 1984.
- [27] **N. Akkari**, « contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine Asynchrone a Double Alimentation », thèse de doctorat en électrotechnique, université de Batna, Algérie, 2014.

- [28] **A.Zemmit Abderrahim**, «Contribution à la commande de la machine asynchrone à double alimentation», universite de M'sila,2017.
- [29] **Y.Elbia**, «Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orien», universite de Batna, 2009.
- [30] **S. Georges**, «Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation», 2007.
- [31] **R. ABDESSEMED**, «Modélisation et simulation des machines électriques», Éditions ellipses, 2011.
- [32] **A. Allali**, « Application des techniques avancées pour le contrôle de la Machine asynchrone Doublement Alimentée », mémoire de magister, université Djilali liables, sidi bel-Abbes, Algérie, 2013.
- [33] **M. Marty D. Dix-neuf et D. G. Gilbert**, «principes D'électrotechnique», DUNOD, Paris, 2005.
- [34] **A. Gaillard**, «Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service», Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 2010.
- [35] **A.Dendouga**, «commande par mode glissant de la machine à double alimentation alimenté par un onduleur», Thèse Magistère, Université de Batna.
- [36] **M. Pinard**, « Commande Electronique des Moteurs Electriques ». DUNOD, Série EEA, 2004.
- [37] **Z. Boudjemaa**, «Commande vectorielle sans capteur de vitesse d'une machine asynchrone a double alimentation par régulateur PI-Flou », Mémoire de Magister, Université d'Oran, Algérie, 2010.
- [38] **P. Debiprasad, E.L. Benedict, G. venkataramanan et D T.A. Lipo**, « A Novel Control Strategy for the rotor Side Control of a Doubly-Fed Induction Machine », Actes Conference Annuelle de l'IAS IEEE, Vol.3, 30, Sept- 4Oct 2001, pp. 1695-1702.
- [39] **L. Benalia**, « Commande en tension des moteurs à induction double alimentés », Thèse de doctorat, Université de Batna, Algérie, 2010.
- [40] **D. Youcef**, « Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolienne», MÉMOIRE Magister en Électrotechnique, SIDI BEL-ABBÈS, 2009.
- [41] **B. Meriem**, «Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation MADA», Mémoire De Magister En Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2014.
- [42] **H. Bühler**, « Réglage par Mode de Glissement », Presses Polytechniques Romandes, EFL, Ecublens, CH-1015 Lausanne, Suisse, 1986.

- [42] **M. A. Kjaer**, « Sliding Mode Control », Departement de control Automatique, 2004.
- [43] **J. J. E Slotine ET W. LI**, « Applied Nonlinear Control », Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- [44] **S. Zeghlache**, «Commande non linéaire d'un appareil à vol vertical », Thèse de doctorat, Université de M'sila, Algérie, 2014.
- [45] **M. Hamerlain**, « Commande Hiérarchisée à Modèle de Référence et à Structure Variable d'un Robot Manipulateur à Muscle Artificiel », Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse, France, 1993.
- [46] **V. Utkin, J. Guldner et J. Shi**, « Sliding Mode Control in Electromechanical Systems », Taylor & Francis, 1999.
- [47] **M. Ali-Bey**, « Commande en Effort des Robots Manipulateurs », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique ENP, Algérie, 2005.
- [48] **Y. Bekakra et Dj. Ben attous**, « Speed and Flux Control for DFOC of Doubly Fed Induction Machine using Sliding Mode Controller ». Acta Electrotechnique et Informatique, Vol. 10, No. 4, 2010, pp. 75-81.
- [49] **R. Abdessemed, A.L.Nemmour et VF.Tomachevitch**, « Cascade Sliding Mode Control of a Stator Field Oriented Double Fed Asynchronous Motor Drive (DFAM) », Archives de l'electrotechnique, Vol. LI, No. 03, 2002, pp. 371-387, Poland.
- [50] **L.Fridman et A. Levan**, «Higer order sliding modes»,Chapitre 3,Chihuahua Institute Technologie, Chihuahua, Mexico.
- [51] **J.J.E. Slotine, J.K. Hedrick, et E.A. Misawa**, «Nonlinear state estimation using sliding observers», 25th IEEE Conf. pages 332.339. Greece, 1986.
- [52] **H. Sira-Ramirez**, «On the sliding mode control of nonlinear systems», Syst & Cont. Lett 19. 303. 312. 1992.
- [53] **S. Solvar** «Observateur à mode glissant d'ordre 2 appliqué à la MAS sans capteur mécanique», réunion GDR CE2, E.N.S.A.M. 2010.
- [54] **B. Hanane**, «Observateur non linéaire mode glissant », mémoire de magister, Université Ferhat Abbas -Sétif, 2013.

Résumé

Ce mémoire présente une étude par simulation de la commande sans capteur d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Le système d'alimentation de cette machine comporte deux parties identiques, l'une reliée au stator et l'autre au rotor. Cette commande est élaborée et testée en synthetisant deux types d'observateurs : observateur à mode glissant et observateur de Luenberger. Les performances de la commande sont analysées et comparées par simulation en termes performances et robustesse face aux variations paramétriques et perturbations extérieures de la machine.

Mots clés : Machine asynchrone à double alimentation (MADA), Réseau triphasé, Onduleur de tension triphasé, Commande mode glissant, Observateur à mode glissant, Observateur de Luenberger, Commande sans capteur de vitesse, Robustesse de la commande.

Abstract

This thesis presents a simulation study of the sensorless control of a double-fed asynchronous machine (MADA). The power system of this machine has two identical parts, one connected to the stator and the other to the rotor. This control is developed and tested by synthesizing two types of observers: Sliding mode observer and Luenberger observer. The performance of the control is analyzed and compared by simulation in terms of performance and robustness in the face of parametric variations and external disturbances of the machine.

Keywords: Double-fed asynchronous machine (DFIM), Three-phase network, Three-phase voltage inverter, Sliding mode control, Sliding mode observer, Luenberger observer, Speed sensorless control, Control robustness.

ملخص

تقدم هذه المذكرة دراسة محاكاة للتحكم بدون أجهزة استشعار في آلة غير متزامنة ذات تغذية مزدوجة يتكون نظام تغذية الآلة من جزأين متطابقين ، أحدهما متصل بالجزء الثابت والآخر بالدوار. تم تطوير هذا النظام واختباره من خلال توليف نوعين من المراقبين: مراقب الوضع المنزلق ومراقب Luenberger. تم بعد ذلك تحليل أداء التحكم ومقارنته بالمحاكاة من حيث الأداء والمتانة في مواجهة التغيرات الإحصائية والاضطرابات الخارجية للآلة.

الكلمات الرئيسية: آلة غير متزامنة مزدوجة التغذية ، شبكة ثلاثية الطور ، عاكس جهد ثلاثي الأطوار ، التحكم في الوضع الانزلاقي ، مراقب وضع الانزلاق ، مراقب Luenberger ، التحكم في السرعة بدون استشعار ، التحكم في المتانة.