



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



Projet de Fin d'Étude

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Machines Électriques

Thème

**Simulation et optimisation du contrôle
PI de MADA avec PSO**

Présenté par :

- RACHID Farhati
- FRIDJAT Abderrazzak
- MAALOUL Walid

Devant le jury composé de :

Président :

Examineur :

Encadreur : LABBI Yacine

Année universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

D'emblée, nous remercions Dieu qui nous a donné la volonté, le courage, la santé tout au long de ces années et la capacité de mener à bien cette thèse. Nous remercions également le professeur superviseur "Yacine Labbi " qui a joué le rôle du père, et nous adressons nos remerciements à notre ami 'Mohrem Lazhar' pour son soutien.

Nous remercions également les professeurs et le chef du département de génie électrique qui pour leurs efforts et leurs conseils et grâce à eux, nous sommes là où nous en sommes aujourd'hui.

Et n'oublions pas les membres du jury qui nous ont honorés de leur jugement sur cet ouvrage.

Nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés à.

الإهداء

الحمد لله حمدا كثيرا مبارك فيه الذي من علينا بإتمام

هذا البحث المتواضع، أما بعد

أهدي هذا العمل المتواضع

لأم الغالية بكل حبه

إلى والدي العزيز بكل امتنان

وإلى اخوتي واختي

ولجميع افراد العائلة

وجميع اصدقائي

وكل استاذ ساندنا للوصول إلى هذه الشهادة.

رشيد

الإهداء

الحمد لله الذي وفقنا لهذا. اما بعد أهدي
هذا العمل المتواضع الى امي وابي الغاليين
والى جميع أفراد أسرتي واحبابي وأصدقائي
والى استاذي المؤطر الفاضل ياسين اللبي
كل المعلمين في قسم الهندسة الكهربائية
من أجل ترقيةي الى درجة الماجستير.

محمد الرزاق.

الإهداء

إلى من أفضلها على نفسي، ولم لا؛ فلقد ضحّت من أجلي
ولم تدخر جهدًا في سبيل إسعادي على الدوام (أمّي
الحبيبة). نسير في دروب الحياة، ويبقى من يُسيطر على
أذهاننا في كل مسلك نسلكه صاحب الوجه الطيب،
والأفعال الحسنة. فلم يبخل عليّ طيلة حياته (والدي
العزیز). إلى أصدقائي، وجميع من وقفوا بجواري
وساعدوني بكل ما يملكون، وفي أصدّة كثيرة أقدم
لكم هذا البحث، وأتمنّى أن يجوز على رضاكم.

وليد.

Résumé

En raison des avancées considérables dans le domaine de l'électronique de puissance, le moteur asynchrone à double alimentation (MADA) est devenu l'une des meilleures solutions réussies pour de nombreuses applications telles que la conversion de l'énergie éolienne, les chemins de fer, la propulsion marine et les centrales hydroélectriques.

L'objectif de ce travail est de proposer des outils de contrôle intelligents pour le MADA en utilisant différents types de contrôleurs et en appliquant des techniques d'intelligence artificielle visant à améliorer les performances de la machine.

Dans les simulations, nous avons utilisé le logiciel MATLAB/Simulink afin de préserver la puissance de contrôle sans compromettre les performances du système. De nombreuses techniques de contrôle différentes ont été développées pour obtenir les meilleures performances.

Mots clés : - Intelligence artificielle – MADA - Contrôle des rayonnements - MATLAB.

Abstract

Due to the significant advancements in power electronics, the doubly-fed induction motor (DFIM) has become one of the most successful solutions for various applications such as wind energy conversion, railways, marine propulsion, and hydroelectric power plants.

The aim of this work is to propose intelligent control tools for DFIM by utilizing different types of controllers and applying artificial intelligence techniques to enhance the machine's performance.

MATLAB/Simulink software was employed for simulation purposes in order to maintain control power while preserving system performance. Several different control techniques have been developed to achieve optimal performance.

Keywords: - Artificial intelligence – DFIM - Radiation control - MATLAB.

المخلص

نظرًا للتقدم الهائل في مجال الإلكترونيات القوية، أصبح المحرك اللازم للطاقة المضاعفة (MADA) أحد أفضل الحلول الناجحة للعديد من التطبيقات مثل تحويل طاقة الرياح والسكك الحديدية والدفع البحري ومحطات توليد الطاقة الكهرومائية.

هدف هذا العمل هو اقتراح أدوات تحكم ذكية لـ MADA باستخدام أنواع من وحدات التحكم وتطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي التي تسهم في تحسين أداء الماكينة.

تم استخدام برنامج MATLAB/Simulink في عمليات المحاكاة للحفاظ على قوة التحكم دون التضحية بأداء النظام، وتم تطوير العديد من تقنيات التحكم المختلفة لتحقيق أفضل أداء.

الكلمات المفتاحية: الذكاء الاصطناعي - MADA - التحكم الإشعاعي - MATLAB.

Sommaire

Sommaire

Remerciements.....	I
Résumé.....	II
Sommaire.....	VI
Liste des figures	VIII
Liste des symboles.....	IX
Introduction générale	1
Chapitre I : Description et Modélisation de la Machine Asynchrone Double	
Alimentation.....	2
I.1. Introduction:	3
I.2. Présentation de la machine asynchrone à double alimentation:	3
I.3. Classification des machines à double alimentation :	4
I.4. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) :	5
I.4.1 Hypothèses simplificatrices :	5
I.4.2. Alimentation de la MADA :	5
I.4.3. Equations électriques de la machine asynchrone à double alimentation	6
I.5. Avantages et inconvénients de la MADA:	7
I.5.1. Avantages de la MADA:.....	7
I.5.2. Inconvénients de la MADA:	7
I.6. Régimes de fonctionnement de la MADA	8
I.7. Variation de vitesse de la MADA	8
I.8. Modélisation mathématique de la machine asynchrone :	9
I.9. Transformation de Park:	11
I.9.1. Modèle de la machine asynchrone dans le repère de Park:	12
I.9.2. Modèle de la MADA sous forme d'équation d'état :	14
I.10. Simulation de la machine asynchrone à double alimentation:	16
I.10.1. SIMULATION DE LA MADA.....	16
I.10.2. RÉSULTATS DE LA SIMULATION DE LA MADA	17
I.11. Conclusion :	20

Chapitre II : Commande Vectorielle de la MADA

II.1 Introduction	22
II.2 Commande Vectorielle de la MADA.....	22
II.2.1 Généralités sur la commande vectorielle.....	22
II.2.2 Principe de la commande vectorielle.....	23
II.3. Procédé d'orientation du flux	23
II.4. Contrôle du courant par MLI :	23
II.5. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :.....	24
II.6. Modélisation de l'onduleur :	27
II.6.1 Onduleur de tension à deux niveaux :	27
II.6.2 Onduleur de tension à 3 niveaux:	28
II.7. Méthode directe de la commande vectorielle :.....	29
II.8. Méthode indirecte de la commande vectorielle :	30
II.9. Simulation de l'association MADA avec onduleur à MLI	31
II.9.1. Seul onduleur du côté rotorique.....	31
II.9.2.Résultats de simulation.....	32
II.9. Conclusion :	34

Chapitre III : Simulation, et Interprétation de Résultats

III.1 Introduction:.....	36
III.2. Implémentation de l'algorithme PSO pour l'optimisation des paramètres PI de la commande vectorielle de la MADA	36
II.2.1. L'approche PSO : Principes et Méthodologie.....	37
II.2.2. Implémentation de l'approche PSO pour l'optimisation des paramètres PI de la commande vectorielle de la MADA avec MATLAB	41
II.2.3. Optimisation et accordage d'un contrôleur flou avec PSO : Application aux systèmes MADA et résultats obtenus.....	42
III.3. Conclusion	48
Conclusion générale.....	50
Références bibliographique	52
Annexe	57

Liste des figures

Figure I.1 Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.	4
Figure I.2 : Classification des machines à double alimentation.	4
Figure I.3 Schéma de l'association MADA-Onduleur de tension.	6
Figure 1.4 : Schéma simplifié de la machine asynchrone à double alimentation (MADA).	10
Figure. I.5: Passage du triphasé au biphasé.....	11
Figure .1.6: Modèle de la machine après transformation de Park.....	12
Figure I.7 : Représentation de la machine dans le repère {d;q}.....	14
Figure I.8 : Structure de simulation de la MADA.	16
Figure I.9 .Schéma bloc de simulation de la MADA.....	17
Figure I.10 : Le couple électromagnétique de la MADA.....	18
Figure I.11 : Le courant rotorique direct I_r [A] de la MADA.....	18
Figure I.12 : Le courant rotorique en quadrature i_{rq} [A] de la MADA.	18
Figure I.13 : La vitesse mécanique de la MADA.....	19
Figure 2.1 : Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la machine à courant continu.	23
Figure 2.2 : Schéma de principe de la commande MLI.	24
Figure 2.3 : Orientation du repère de Park.	25
Figure.2.4: Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA.....	26
Figure 2.5 : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux.	27
Figure 2.6: schéma d'un Onduleur à trois niveaux.....	29
Figure 2.7 : Diagramme vectoriel pour la commande vectorielle directe.....	30
Figure II.8. : Schéma bloc de simulation de la MADA avec onduleur à MLI (seul onduleur du côté rotorique).....	31
Figure 2.9 Démarrage de la MADA avec alimentation côté statorique, onduleur côté rotorique et charge de 5N.m.....	33
Figure III.1. Schéma bloc de l'optimisation des paramètres PID de la commande vectorielle de la MADA à l'aide de PSO.....	44
Figure III.2. Amélioration de la convergence de la fonction objectif avec les itérations grâce à l'algorithme PSO.....	46
Figure III.3. performances du couple électromécanique avec variation de 20 N.M a $t=1$ s.....	47
Figure III.4. Comparaison des performances de la vitesse entre le contrôle PI conventionnel et le contrôle PI optimisé par PSO.....	47

Liste des symboles

MADA: Machine asynchrone à double alimentation.
MS: Machine synchrone.
CC: Courant continue.
MAS: Machine asynchrone .
RL: Résistance filtre.
MAC :model algorithmique contrôle.
MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion ;
(d, q) : Axes correspondants au référentiel lié au champ tournant
f : fréquence imposée par le réseau électrique Hz
R_r : résistance rotorique
R_s : résistance statorique
L_r : inductance cyclique rotorique de la MADA H
L_s : inductance cyclique rotorique de la MADA H
m : rapport de transformation rotor/stator de la MADA -
p : nombre de paires de pôles -
R_r : résistance du bobinage rotorique de la MADA Ω
R_s : résistance du bobinage statorique de la MADA Ω
U_s : valeur efficace des tensions composées statoriques V
V_s : valeur efficace des tensions simples statoriques V
φ : valeur efficace du flux statorique de la MADA Wb
σ : coefficient de dispersion de la MADA
ω_s : pulsation statorique de la MADA rad/s
C_{em}: couple électromagnétique de la MADA Nm
g : glissement de la MADA
i_{abc_r} : courants rotoriques de la MADA dans le repère triphasés A
i_{abc_s} : courants statoriques de la MADA dans le repère triphasés A
i_{dq_r} : courants rotoriques de la MADA dans le repère biphasé A
i_{dq_s}: courants statoriques de la MADA dans le repère biphasé A
P_s : puissance active statorique de la MADA W
P_r : puissance active rotorique de la MADA W
Q_s : puissance réactive statorique de la MADA Var
v : vitesse du vent m/s
v_{ds}, v_{qs} : tensions statoriques de la MADA dans le repère de Park V.

Introduction générale

Introduction générale

Il existe divers types de moteurs électriques, chacun ayant ses propres caractéristiques correspondant à l'application dans laquelle il est utilisé. Parmi ceux-ci, la machine asynchrone à double alimentation, également appelée MADA, est l'objet principal de notre recherche. Ce type de moteur est plus coûteux qu'un moteur à cage d'écurie en raison de son bobinage en cuivre plus massif.

La MADA joue un rôle crucial dans de nombreux domaines, notamment le leadership et la production d'énergie, notamment dans l'énergie éolienne. Les chercheurs ont accordé une grande attention à cette machine en raison de la flexibilité qu'elle offre, notamment la possibilité d'accéder à son rotor et de le doter d'un transformateur côté stator et côté rotor. Cela est considéré comme un avantage, permettant d'élargir la plage de vitesses. Pour un fonctionnement à vitesse variable et à plusieurs vitesses, un convertisseur PWM doit être inséré entre l'appareil et le réseau, afin de corriger la tension quelle que soit la vitesse de rotation de l'appareil.

Le plan de ce mémoire est composé de trois chapitres organisés comme suit :

Dans le premier chapitre, nous abordons la présentation de la MADA, en en définissant ses équations mathématiques et en modélisant le réflecteur. Nous examinons également les déviations du modèle de Park.

Le deuxième chapitre traite de la commande vectorielle directe basée sur l'orientation du flux statorique de la machine asynchrone à double alimentation.

Dans le troisième chapitre, nous nous concentrons sur l'application de la commande vectorielle MADA optimisée par PSO (Optimisation par Essaim Particulaire). Nous commençons par expliquer les principes de base de l'algorithme PSO, suivi de l'intégration de PSO dans la commande vectorielle MADA. Nous présentons les résultats des simulations numériques réalisées à l'aide de MATLAB/SIMULINK pour évaluer les performances de cette approche optimisée.

En résumé, ce mémoire vise à présenter une étude approfondie de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et à proposer une méthode de commande vectorielle optimisée par l'algorithme PSO, en mettant l'accent sur les performances et l'efficacité énergétique.

**Chapitre I: Description et
Modélisation de la Machine
Asynchrone Double
Alimentation**

I.1. Introduction:

La machine asynchrone à double alimentation, comme son nom l'indique, est une machine asynchrone triphasée avec deux enroulements triphasés accessibles. Ce type de machine nécessite une source d'alimentation alternative capable de la faire fonctionner. Le glissement de la machine à double alimentation peut être modifié en combinant des transducteurs. Pour assurer un bon contrôle, nous devons passer par trois étapes :

- Sélection du modèle
- Identification de ses critères
- Validation de sa validité

Mathématiquement, ces machines sont représentées par des modèles d'entrée et de sortie sous forme de fonction de transfert, ou encore des modèles généraux qui nécessitent souvent des calculs importants, mais qui expliquent correctement le comportement des machines tournantes dans la plupart des cas. Dans ce chapitre, nous étudierons la modélisation des machines asynchrones à double flux. Nous introduirons les équations électriques, MADA et les transformations de Park pour faciliter la modélisation .[1.1]

Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur la modélisation des machines asynchrones à double flux. Nous aborderons les équations électriques, la commande vectorielle directe (MADA) et les transformations de Park afin de faciliter la modélisation.

I.2. Présentation de la machine asynchrone à double alimentation:

La machine asynchrone à double alimentation a été initialement introduite en 1899 [1.2]. Il ne s'agit pas d'une nouvelle structure, mais plutôt d'un nouveau mode d'alimentation [1.3].

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator similaire à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone). Il est généralement composé de tôles magnétiques empilées avec des encoches pour les enroulements [1.4][1.5]. Ce qui rend cette machine unique, c'est que le rotor diffère considérablement. Il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil, mais plutôt d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements du stator (rotor bobiné). Le rotor bobiné comprend un bobinage triphasé, semblable à celui du stator, connecté en étoile. Chaque extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague, permettant une connexion externe des bobinages au rotor. Cette connexion externe permet de contrôler les grandeurs du rotor [1.6]. La figure I.1 ci-dessous illustre la structure de la machine asynchrone à double alimentation [1.7].

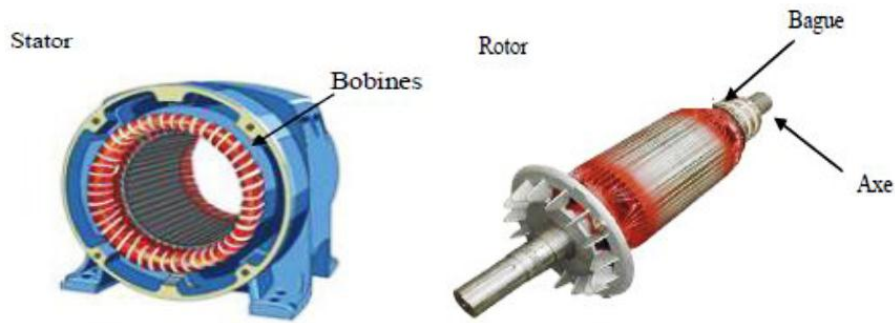


Figure I.1 Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

Dans ce dispositif, les deux enroulements sont alimentés par deux transformateurs généralement indépendants. Autrement dit, les bobinages du stator sont alimentés par le réseau électrique, tandis que les bobinages du rotor sont alimentés par un convertisseur de fréquence.

I.3. Classification des machines à double alimentation :

La classification de la machine asynchrone à rotor bobiné est basée sur une recherche bibliographique effectuée dans la littérature spécialisée sur les machines à double alimentation.

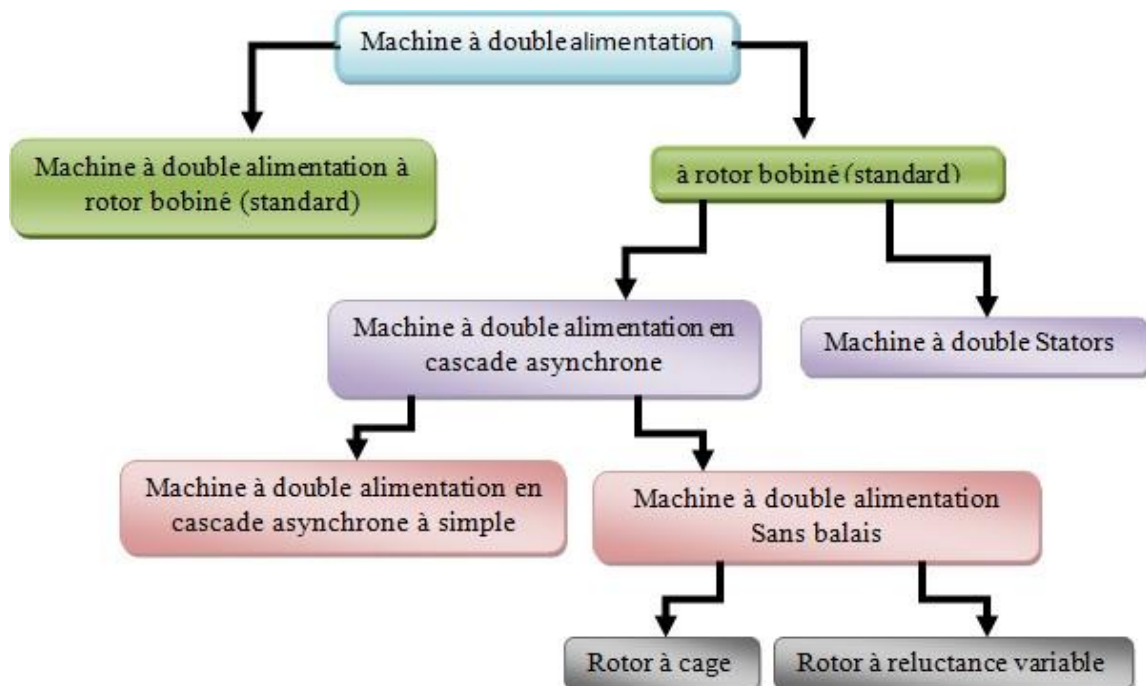


Figure I.2 : Classification des machines à double alimentation.

Différentes variantes de la MADA, qui sont les plus attrayantes et les plus développées dans la littérature, sont classées à l'aide d'un organigramme. Le schéma de principe et la description de chaque variante seront détaillés ci-dessous [1.8].

I.4. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) :

Tout comme la machine asynchrone classique, la MADA peut fonctionner en tant que moteur ou générateur. Cependant, la grande différence réside dans le fait que, pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui détermine le mode de fonctionnement moteur ou générateur [1.9].

En effet, une machine asynchrone à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour fonctionner en tant que moteur, et au-dessus pour fonctionner en tant que générateur. Dans le cas de la MADA, c'est le contrôle des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en sur-synchronisme ou en sous-synchronisme, que ce soit en mode moteur ou en mode générateur. Nous présenterons successivement ces différents modes de fonctionnement [1.10].

I.4.1 Hypothèses simplificatrices :

Pour simplifier l'étude de cette machine, nous faisons les hypothèses simplificatrices suivantes [1.11][1.12]:

- La machine présente une symétrie parfaite de construction.
- L'entrefer est constant.
- Les effets d'encochage et de peau sont négligeables.
- Le nombre de phases est le même entre le stator et le rotor.
- La force magnétomotrice créée par chaque bobinage est répartie de manière sinusoïdale le long de l'entrefer.
- Nous ne considérons que les pertes joules dans la machine, et nous négligeons les pertes fer.
- Il n'y a pas de saturation dans le circuit magnétique.
- Les pertes ferromagnétiques sont négligeables.

I.4.2. Alimentation de la MADA :

Dans notre étude, le stator de la MADA est directement connecté au réseau électrique, tandis que le rotor est connecté via un onduleur de tension (Figure I.3). La tension de cet onduleur est contrôlée à l'aide d'une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI), qui permet d'ajuster simultanément la fréquence et la tension de sortie de l'onduleur [1.13].

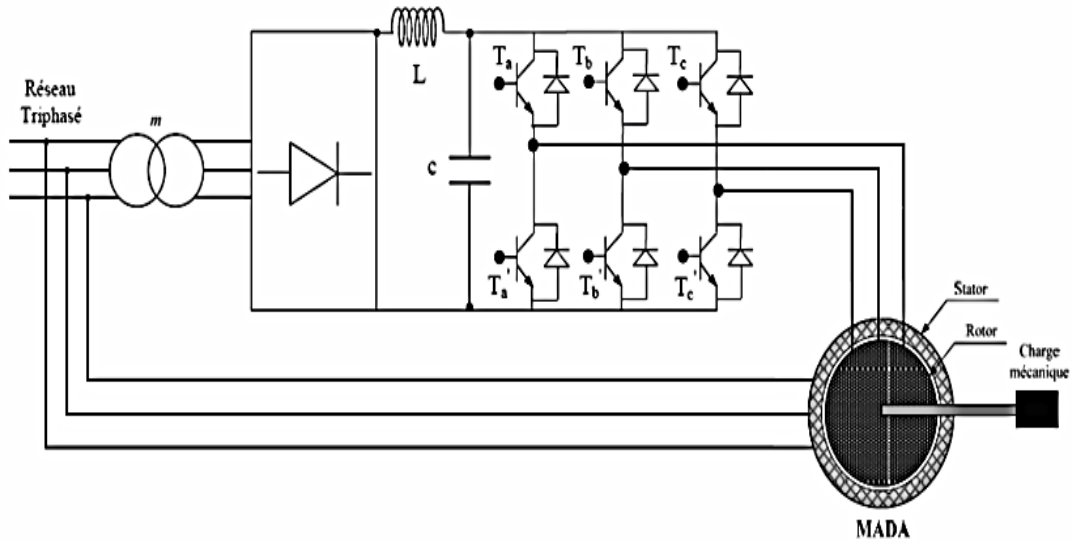


Figure I.3 Schéma de l'association MADA-Onduleur de tension.

I.4.3. Equations électriques de la machine asynchrone à double alimentation

Les enroulements représentés par la figure (I.6) suivent les équations électriques qui sont exprimées sous la forme matricielle suivante [1.14]:

- pour les enroulements statoriques

$$v_{as} = R_s i_{as} + \frac{d\varphi_{as}}{dt} \quad (1.1)$$

$$v_{bs} = R_s i_{bs} + \frac{d\varphi_{bs}}{dt} \quad (1.2)$$

$$v_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d\varphi_{cs}}{dt} \quad (1.3)$$

Forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{dy}{dx} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

D'où les formes matricielles condensées :

$$v_s = R_s i_s + \frac{d\varphi_s}{dt} \quad (1.5)$$

- pour les enroulements rotoriques :

$$v_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dt} \quad (1.6)$$

$$v_{br} = R_r i_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dt} \quad (1.7)$$

$$v_{cr} = R_r i_{cr} + \frac{d\varphi_{cr}}{dt} \quad (1.8)$$

forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{dy}{dx} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

D'où les formes matricielles condensées :

$$v_r = R_r i_r + \frac{d\varphi_r}{dt} \quad (1.10)$$

I.5. Avantages et inconvénients de la MADA:

Dans la suite, nous présenterons quelques avantages et inconvénients de la MADA lors de son fonctionnement à vitesse variable, qui sont liés à plusieurs facteurs tels que sa structure, sa stratégie de commande et ses applications [1.15].

I.5.1. Avantages de la MADA:

Dans son ouvrage intitulé "Modélisation et simulation des machines électriques", Rachid ABDESSEMED a énuméré les avantages de cette machine comme suit:

- L'accessibilité au rotor et au stator permet la mesure des courants, offrant ainsi une grande flexibilité et précision dans le contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- Les possibilités de reconfiguration grâce à sa double alimentation, ce qui lui permet de trouver un large domaine d'application.
- Une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines de grande puissance.
- L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en variant la vitesse par l'action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est donc économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur [1.16].
- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour contrôler efficacement le transfert de puissance et le facteur de puissance, avec toutes les possibilités de récupération ou d'injection d'énergie dans les enroulements de la machine [1.17].

I.5.2. Inconvénients de la MADA:

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone, ce qui signifie que sa structure est non linéaire, ce qui entraîne la complexité de sa commande. De plus, on peut citer les inconvénients suivants:

- La MADA est plus volumineuse que la machine à cage d'écureuil en raison du système balais-bagues.
- Elle est plus longue en raison des balais [1.18].

- Elle est plus encombrante qu'une machine asynchrone à cage de puissance équivalente. L'aspect multi-convertisseurs augmente le nombre de convertisseurs et, par conséquent, le coût. Cependant, certaines études prétendent le contraire [1.19].

I.6. Régimes de fonctionnement de la MADA

Les différents régimes de fonctionnement de la MADA peuvent être classés en fonction du glissement de la manière suivante :

1. Régime stationnaire ($g=1$):

Dans ce régime, le stator est directement alimenté par le réseau avec une fréquence f_s . Par conséquent, le rotor génère une f.é.m induite avec une fréquence f_r identique à f_s . Dans cette condition, la MADA se comporte simplement comme un transformateur.

2. Régime hypo synchrone ($0 < g < 1$):

En faisant tourner le rotor dans le sens du flux du stator, la fréquence f_r du rotor commence à diminuer. Plus la vitesse du rotor se rapproche de la vitesse de synchronisme, plus f_r tend vers 0 et la tension induite dans le rotor diminue linéairement pour atteindre une valeur très faible correspondant à la vitesse de synchronisme [1.20].

3. Régime synchrone ($g=0$):

À ce point, lorsque la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence f_r du rotor devient nulle. Dans ce cas, les enroulements du rotor tournent à la même vitesse que le flux statorique, ce qui signifie que le rotor ne présente aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier. Par conséquent, aucune tension induite n'est présente dans les enroulements du rotor. On observe que la puissance du stator est égale à celle du réseau, tandis que celle du rotor est nulle (le transfert de puissance entre le réseau et le rotor s'arrête) [1.20].

4. Régime hyper synchrone ($g < 0$):

En accélérant davantage, le flux du rotor rattrape le flux du stator et la fréquence du rotor devient négative. L'augmentation de la vitesse des enroulements du rotor par rapport à celle du flux statorique entraîne une augmentation de la tension induite dans le rotor.

I.7. Variation de vitesse de la MADA

La variation de vitesse des moteurs asynchrones est généralement assez difficile car ces moteurs sont déjà préconfigurés. Cependant, avec l'avènement de l'électronique de puissance, il est désormais possible d'agir et de modifier la vitesse. Pour effectuer une variation de vitesse sur une machine asynchrone, deux actions sont possibles : l'action sur le stator ou l'action sur le rotor [1.21].

Côté stator :

- **Modification de la tension appliquée au moteur :**

Le couple électromagnétique du moteur asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation du stator [1.22]. Il est donc possible de régler la vitesse en dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation du stator à l'aide d'un gradateur triphasé. Cette solution est couramment utilisée pour le démarrage des charges ayant une caractéristique de couple quadratique ($C_r = K \Omega^2$)(1.11).

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

La fréquence de rotation de la machine est proportionnelle, avec un glissement, à la fréquence d'alimentation des enroulements du stator. On peut envisager de créer un réseau à fréquence variable pour ces enroulements en utilisant des onduleurs de tension. Il est également possible d'injecter des courants dans les enroulements pour contrôler le couple du moteur en utilisant des onduleurs de courant ou des commutateurs de courant. Une autre approche consiste à convertir directement la fréquence du réseau industriel en une fréquence variable plus basse (de 0 à 1/3 de la fréquence du réseau) à l'aide d'un cycloconvertisseur à commutation naturelle, également piloté en fréquence, en courant ou de manière vectorielle [1.22].

- **Modification du nombre de paires de pôles (NP) :**

Cela permet une variation de vitesse non continue. Ce mode n'est donc pas envisagé pour un réglage précis du point de fonctionnement souhaité.

Côté rotor :

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

L'utilisation de résistances rotoriques permet de régler la vitesse en dessous de la vitesse nominale, mais cela entraîne une baisse d'efficacité. Par conséquent, des efforts sont faits pour récupérer cette énergie transmise au rotor, notamment grâce à la cascade hyposynchrone, qui est utilisée pour des machines à rotor bobiné à très haute puissance [1.22]. Une des solutions pour obtenir des vitesses variables est l'utilisation de la double alimentation. Ce système permet une réversibilité en termes de vitesse et de couple, ce qui signifie que des vitesses hypo synchrones et hyper synchrones sont possibles dans tous les cas.

I.8. Modélisation mathématique de la machine asynchrone :

La machine asynchrone à double alimentation, avec la répartition de ses enroulements et sa propre géométrie, est très complexe pour permettre une analyse précise de sa configuration [1.23]. Par conséquent, il est nécessaire d'adopter les hypothèses simplificatrices suivantes

Chapitre I Description et Modélisation de la Machine Asynchrone Double Alimentation

afin de développer un modèle simplifié, appelé modèle de Park (voir Figure 1.4) [1.24].

- Le circuit magnétique n'est pas saturé et est parfaitement feuilleté, ce qui signifie que les pertes fer et par hystérésis sont négligeables, et que seuls les enroulements sont pris en compte.

- La force électromotrice (f.e.m.) créée dans une phase du stator et du rotor est répartie de manière sinusoïdale le long de l'entrefer.

- L'effet de la température n'est pas pris en compte, ce qui signifie que tous les coefficients d'inductance propres sont constants, tandis que les coefficients d'inductance mutuelle dépendent de la position de leurs axes magnétiques.

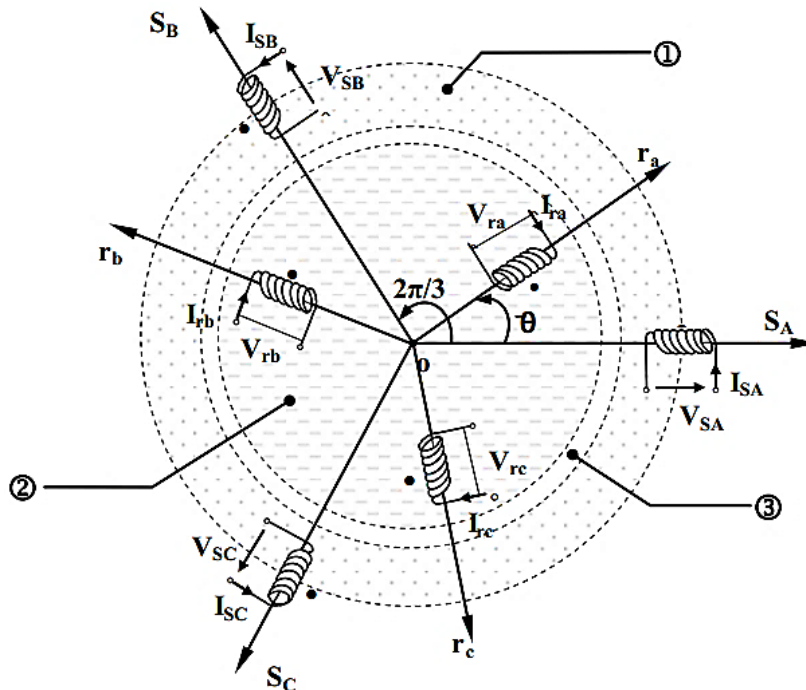


Figure 1.4 : Schéma simplifié de la machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques s'expriment par:

$$V_{a,b,c_s}(t) = R_s \cdot i_{a,b,c_s}(t) + \frac{d\varphi}{dt} a,b,c_s(t) \quad . \quad (1.12)$$

$$V_{a,b,c_r}(t) = R_r \cdot i_{a,b,c_r}(t) + \frac{d\varphi}{dt} a,b,c_r(t) . \quad (1.13)$$

avec :

R_s, R_r : résistance statorique et rotorique respectivement.

$i_{a,b,c_s}(t), i_{a,b,c_r}(t)$: courants statoriques et rotoriques des phases a, b et c respectivement .

$V_{a,b,c_s}(t)$: tensions d'alimentation pour le stator imposées par le réseau électrique (d'amplitude et de fréquence fixe dans les conditions).

Chapitre I Description et Modélisation de la Machine Asynchrone Double Alimentation

$V_{a,b,c_r}(t)$: tensions du rotor imposées par la commande a partir du convertisseur de puissance.

$\Phi_{a,b,c_s}(t)$; $\Phi_{a,b,c_r}(t)$: flux statoriques et rotoriques.

Si l'on néglige la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui constitue une hypothèse réaliste pour les génératrices de fortes puissances utilisées dans les systèmes éoliens [1.25],

l'équation précédente devient :

$$V_{a,b,c_s}(t) \approx \frac{dv}{dt} a,b,c_s(t). \quad (1.14)$$

Cette équation démontre que la tension statorique et le flux statorique tournent tous les deux à la même vitesse. Cependant, la tension est en avance de $\pi/2$ radians sur le flux statorique.

I.9. Transformation de Park:

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasé-diphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer des référentiels (A, B, C) vers (α, β, O) , puis

(d, q, O) . Le référentiel (α, β, O) est toujours fixe, par rapport à (A, B, C), par contre le référentiel (d, q, O) est mobile. Il forme avec le repère fixe (α, β, O) un angle qui est appelé angle de la transformation de Park, ou angle de Park (Figure. I.4)[1.26].

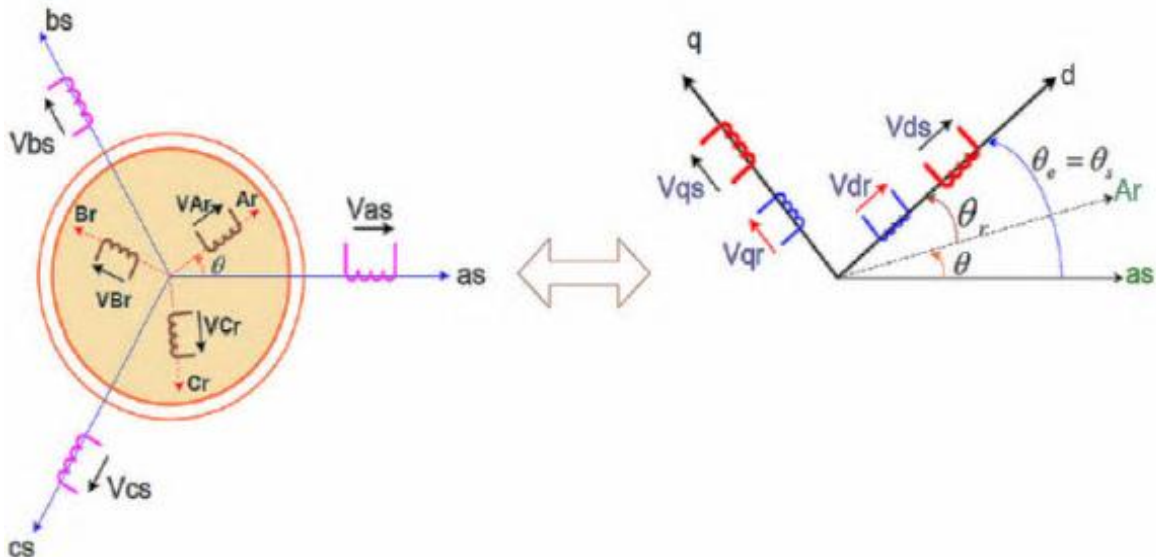


Figure. I.5: Passage du triphasé au biphasé.

La transformation de R.H. Park appelée aussi transformation des deux axes, donnée sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} Xd \\ Xq \\ X0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{bmatrix} . \quad (1.15)$$

Xd : est la composante directe.

Xq : est la composante quadratique.

E : est la composante homopolaire (et elle est nulle).

$[P(\theta)]$: est la matrice de Park.

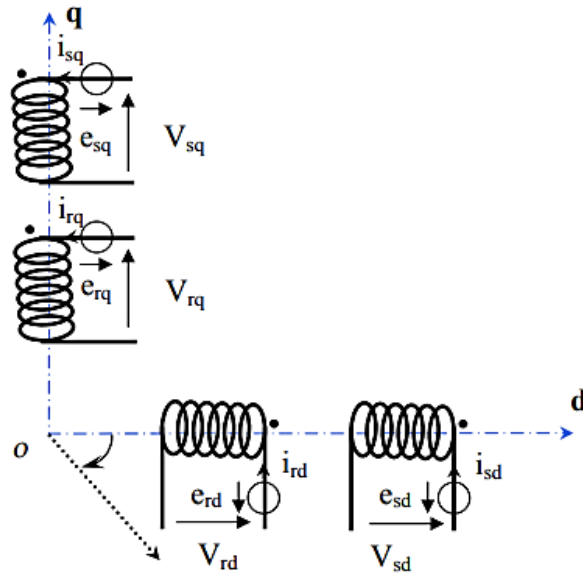


Figure .1.6: Modèle de la machine après transformation de Park.

La composante homopolaire (O) ne contribue pas à la création du champ tournant, ce qui permet de choisir arbitrairement l'axe homopolaire orthogonal au plan (d, q) [1.27].

Les équations de la machine asynchrone triphasée peuvent être exprimées dans différents référentiels, et le choix d'un référentiel dépend du problème étudié.

Il existe trois choix possibles pour le référentiel (d, q) :

- Au niveau du stator.
- Au niveau du rotor.
- Au niveau du champ tournant.

I.9.1. Modèle de la machine asynchrone dans le repère de Park:

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\alpha)]$ permet de ramener les variables du repère triphasé (a;b;c) sur les axes d'un repère diphasé tournant (d;q;0). Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère. Le produit matriciel définissant la transformation de Park est donné par [1.28] :

$$[p(\alpha)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}. \quad (1.16)$$

Avec α : angle entre l'axe d et l'axe as pour une transformation au stator ou l'angle entre d et As pour une transformation au rotor, avec $\alpha = \theta_s$.

Les grandeurs (courants, tensions et flux) transformées, du système diphasé (d;q) sont égales à la matrice de Park $[P(\alpha)]$ multipliée par les grandeurs du système du repère triphasé (a;b;c) [1.28] :

$$[X_s \text{ dq}] = [P(\theta_s)][X_s \text{ abc}] . \quad (1.17)$$

$$[X_r \text{ dq}] = [P(\theta_s - \theta)][X_r \text{ ABC}] . \quad (1.18)$$

Equations électrique dans le nouveau repère de Park (d;q).

- Au stator:

$$V_{ds} = r_s I_{ds} + \frac{d}{dt} [\varphi_{ds}] - W_s \varphi_{qs}. \quad (1.19)$$

$$V_{qs} = r_s I_{qs} + \frac{d}{dt} [\varphi_{dq}] - W_s \varphi_{ds}. \quad (1.20)$$

- Au rotor:

$$V_{dr} = r_r I_{dr} + \frac{d}{dt} [\varphi_{dr}] - W_r \varphi_{qr} \quad . \quad (1.21)$$

$$V_{qr} = r_r I_{qr} + \frac{d}{dt} [\varphi_{dr}] - W_r \varphi_{dr} . \quad (1.22)$$

Equations magnétiques dans le nouveau repère de Park (d;q) :

- u stator :

$$\varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M i_{dr}. \quad (1.23)$$

$$\varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M i_{qr}. \quad (1.24)$$

- u rotor :

$$\varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M i_{ds}. \quad (1.25)$$

$$\varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M i_{qs}. \quad (1.26)$$

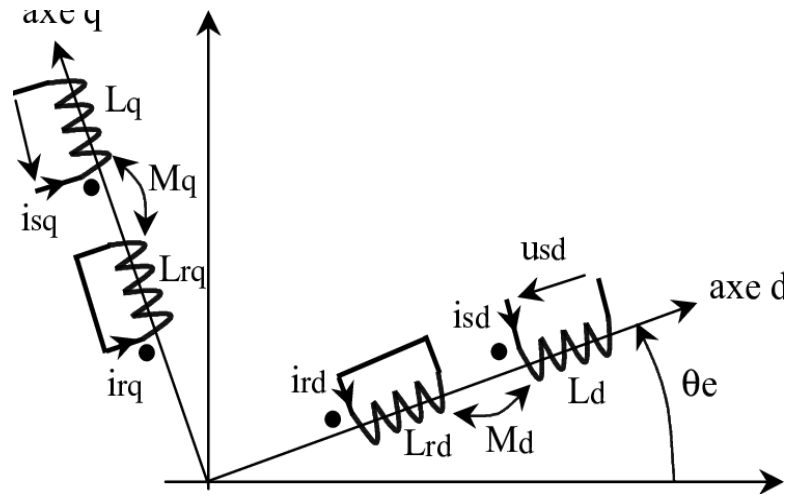


Figure I.7 : Représentation de la machine dans le repère {d;q}.

Le couple électromagnétique :

$$C_{EM} = P[\varphi_{ds}I_{qs} - \varphi_{qs}I_{ds}]. \quad (1.27)$$

$$\frac{PM}{Lr} [\varphi_{ds}I_{qs} - \varphi_{qs}I_{ds}]. \quad (1.28)$$

Cette relation met en évidence le fait que le couple résulte de l'interaction de composantes des courants statorique et rotorique en quadrature.

Les expressions des puissances active et réactive statorique et rotorique sont données par

$$P_s = [V_d s i_{ds} + V_q s]. \quad (1.29)$$

$$q_s = [V_q s i_{ds} - V_d s i_{qs}]. \quad (1.30)$$

$$P_r = [V_d r i_{ds} + V_q r]. \quad (1.31)$$

$$q_r = [V_q s i_{dr} + V_d r i_{qr}]. \quad (1.32)$$

La transformation triphasée - diphasée de Park n'est qu'une transformation de Concordia composée avec celle de rotation des axes données par :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}. \quad (1.33)$$

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \csc \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_a \\ x_\beta \end{bmatrix}. \quad (1.34)$$

Ou θ l'angle de transformation qui représente θ_s pour les grandeurs statoriques et θ_r pour les grandeurs rotoriques.

I.9.2 Modèle de la MADA sous forme d'équation d'état :

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statoriques et rotoriques. En considérant les courants statoriques et rotoriques comme

des vecteurs d'état, alors le modèle de la MADA est décrit par l'équation d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{X} = \frac{dX}{dt} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad . (1.35)$$

Avec :

X : Vecteur d'état.

A : Matrice d'évolution d'état du système.

B : Matrice de la commande.

U : Vecteur du système de commande.

Y : Vecteur de sortie,

$$X = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . (1.36)$$

Par une représentation matricielle

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_s & (\omega_s - \omega) L_r \\ (\omega_s - \omega) M & 0 & (\omega_s - \omega) L_r & -R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad . (1.37)$$

Et

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_s & (\omega_s - \omega) L_r \\ (\omega_s - \omega) M & 0 & (\omega_s - \omega) L_r & -R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} . (1.38) \end{aligned}$$

On pose :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \text{ et } [Z] = \begin{bmatrix} R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega)M & -R_s & (\omega_s - \omega)L_r \\ (\omega_s - \omega)M & 0 & (\omega_s - \omega)L_r & -R_s \end{bmatrix} \quad . (1.39)$$

Alors l'équation () devient :

$$\frac{dX}{dt} = [L]^{-1} \cdot [Z] \cdot X + [L]^{-1} \cdot U \quad . (1.40)$$

Par analogie de l'équation (II.26) avec l'équation (II.23) on trouve :

$$A = [L]^{-1} \cdot [Z] \text{ et } B = [L]^{-1} . (1.41)$$

Dans le but de simplifier la réalisation par **Simulink /MATLAB** la matrice Z peut être décomposée de la forme suivante :

$$[Z] = -[Z_1] - \omega_s \cdot [Z_2] + \omega_s \cdot [Z_3] . (1.42)$$

Avec :

$$[Z] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, [Z] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & -L_r \\ -M & 0 & -L_r & M \end{bmatrix}, [Z] = \begin{bmatrix} 0 & L_s & 0 & M \\ -L_s & 0 & -M & 0 \\ 0 & M & 1 & L_r \\ -M & 0 & L_r & 1 \end{bmatrix} \quad . (1.43)$$

I.10.Simulation de la machine asynchrone à double alimentation:

Pour simuler la MADA, on peut utiliser le modèle représenté par les équations sous forme de structure en schéma bloc, comme illustré dans la Figure (I.8).

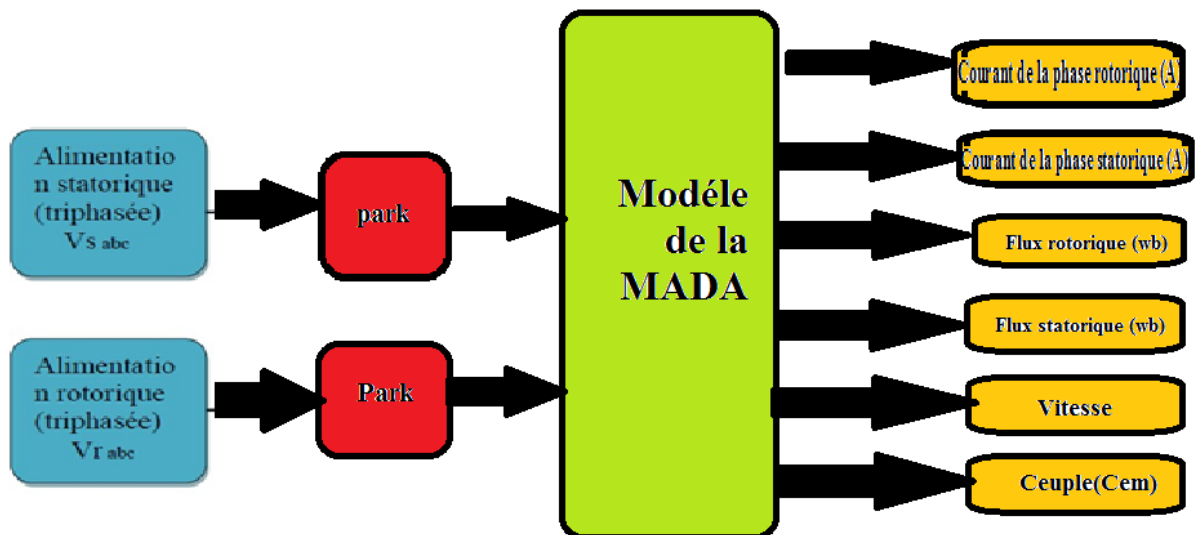


Figure I.8 : Structure de simulation de la MADA.

I.10.1. SIMULATION DE LA MADA

Dans le but de simplifier l'étude de la MADA, nous avons opté pour une représentation sous forme de schéma bloc dans SIMULINK sous MATLAB, comme le montre la Figure

(I.9).

Ce schéma bloc met en œuvre logiquement le réglage de la vitesse du rotor d'une machine asynchrone à double alimentation en agissant de manière synchrone sur la fréquence du rotor. Ainsi, afin de fournir les moyens nécessaires à cette action, il est nécessaire de disposer d'une source d'alimentation capable de fournir une tension ajustable en amplitude et en fréquence avec une valeur instantanée.

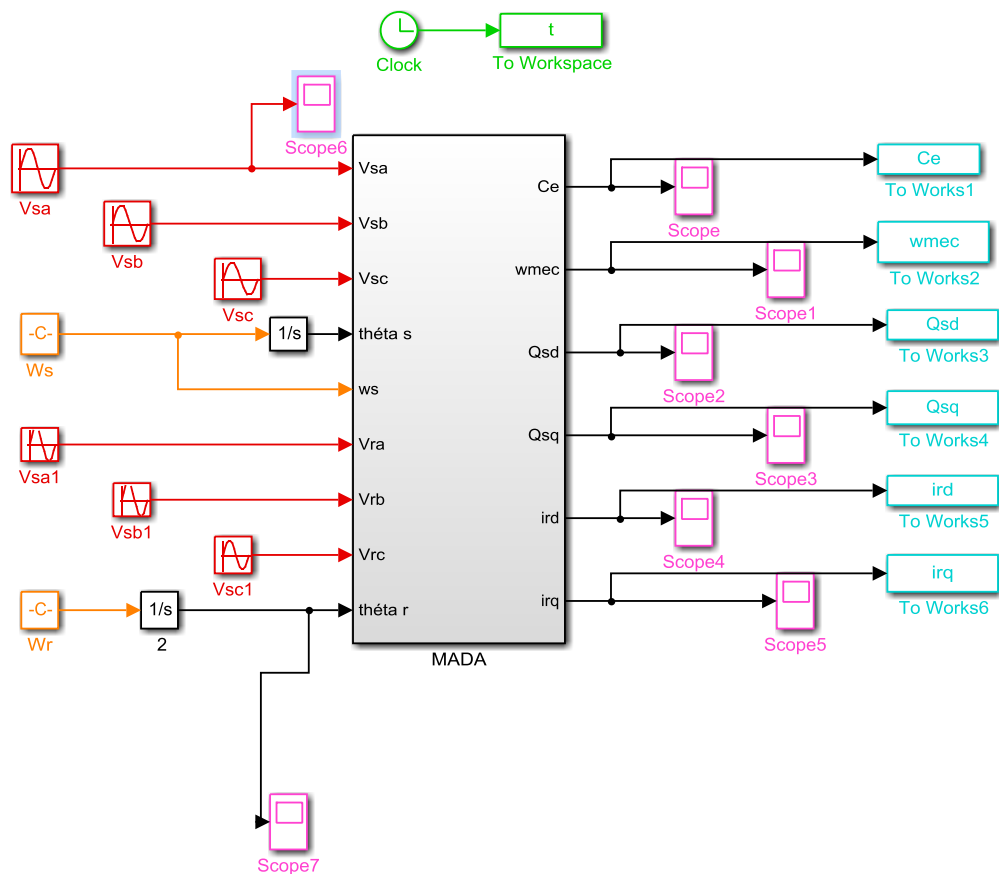


Figure I.9 .Schéma bloc de simulation de la MADA

I.10.2. RÉSULTATS DE LA SIMULATION DE LA MADA

Les résultats de la simulation avec les paramètres suivants de la MADA sont illustrés dans les figures : $v_r=12V$, $f_r=50Hz$, $C_r=9N.m$, et $t=1s$.

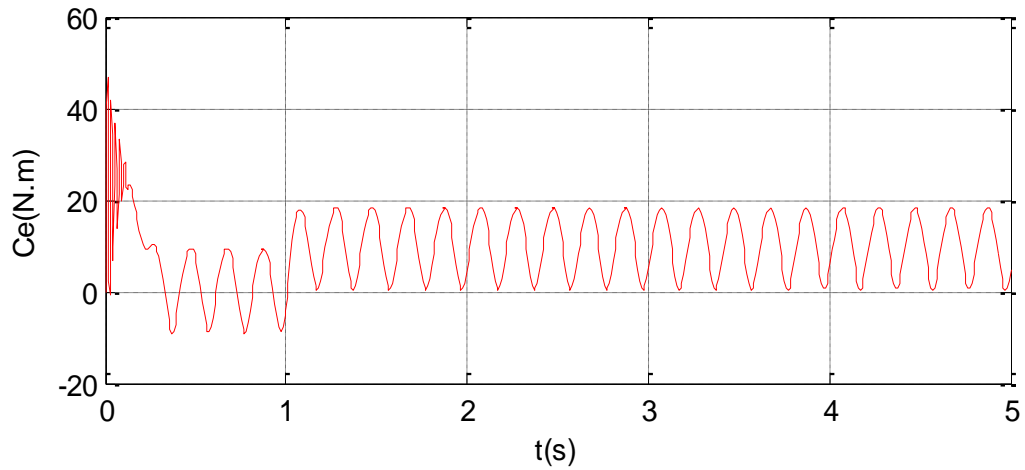


Figure I.10 : Le couple électromagnétique de la MADA.

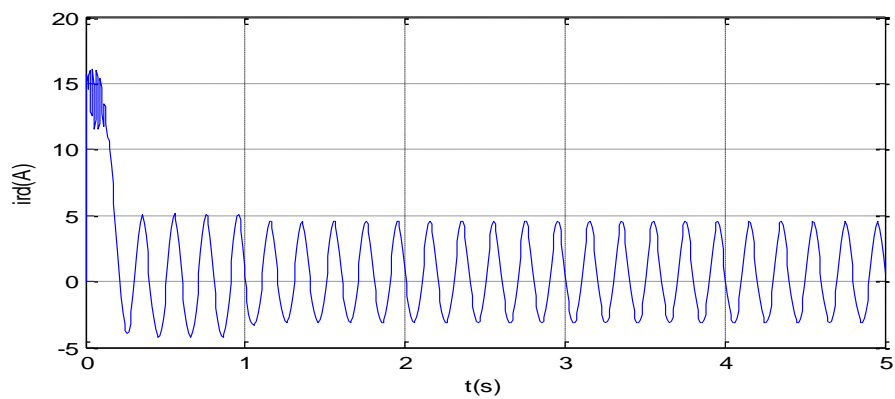


Figure I.11 : Le courant rotorique direct I_r [A] de la MADA.

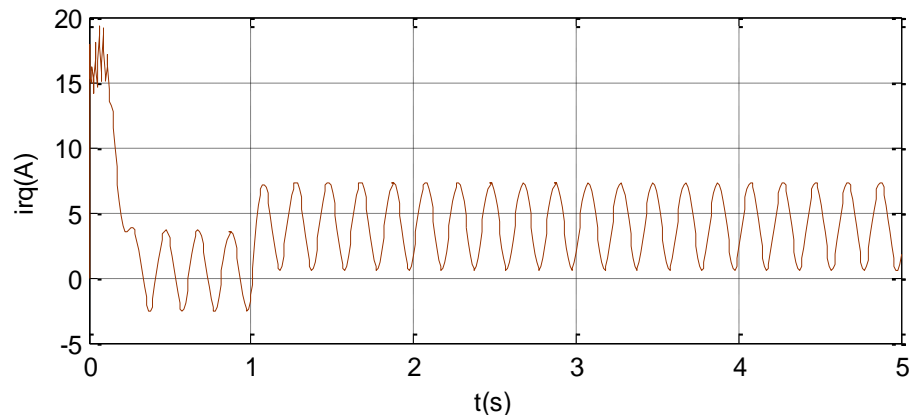


Figure I.12 : Le courant rotorique en quadrature i_{rq} [A] de la MADA.

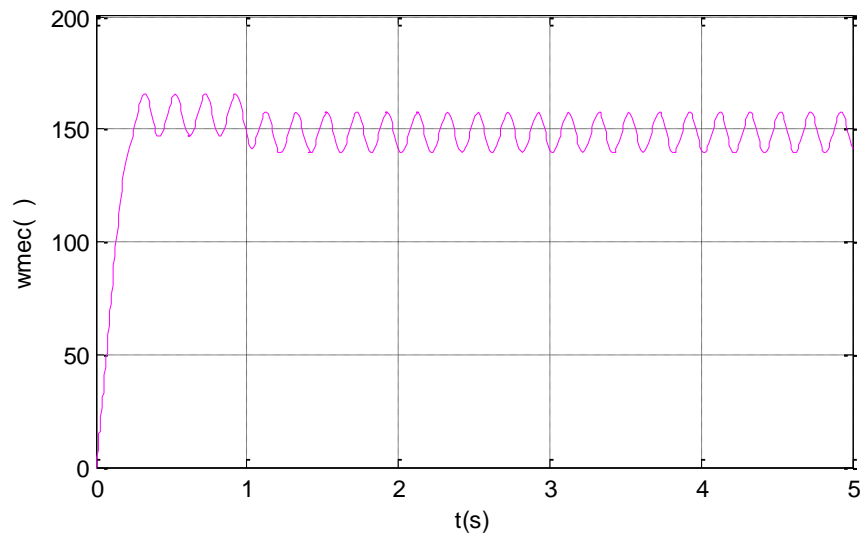


Figure I.13 : La vitesse mécanique de la MADA.

Les figures I.10 à I.13 présentent différents paramètres et caractéristiques de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui ont été obtenus par simulation. La Figure I.10 représente le couple électromagnétique de la MADA. Ce graphique montre l'évolution du couple généré par la machine en fonction du temps. Il permet d'analyser la capacité de la MADA à produire un couple stable et suffisant pour entraîner une charge.

La Figure I.11 présente le courant rotorique direct I_r [A] de la MADA. Ce courant correspond au courant circulant dans le rotor de la machine. Il est mesuré en ampères et représente l'intensité du courant électrique alimentant le rotor. Cette mesure est importante pour évaluer la performance et l'efficacité de la machine.

La Figure I.12 affiche le courant rotorique en quadrature i_{rq} [A] de la MADA. Ce courant est également mesuré en ampères et représente le composant du courant rotorique perpendiculaire au courant rotorique direct. Il est utilisé pour analyser les caractéristiques de charge et de régulation de la machine.

Enfin, la Figure I.13 illustre la vitesse mécanique de la MADA. Ce graphique montre comment la vitesse de rotation du rotor varie au fil du temps. La vitesse mécanique est une donnée essentielle pour évaluer les performances et la stabilité de la machine, ainsi que sa capacité à maintenir une vitesse constante malgré les variations de charge.

Ces différentes figures permettent d'analyser et de comprendre le comportement de la MADA en fonction de différents paramètres tels que le couple, le courant rotorique et la vitesse mécanique. Elles sont utilisées pour évaluer les performances de la machine et optimiser son fonctionnement.

I.11. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude approfondie sur le moteur asynchrone à double alimentation (MADA) et ses applications. Nous avons décrit le processus ainsi que les principes et les méthodes de fonctionnement de ce type de moteur. Les équations électriques, magnétiques et mécaniques régissant son comportement ont été présentées en détail. Nous avons utilisé le formalisme de Park pour formuler ces équations, ce qui nous a permis de mettre en œuvre une commande vectorielle pour faciliter l'étude et la simulation du MADA dans l'environnement Matlab-Simulink. Cette approche nous a permis de valider notre modèle.

En résumé, cette étude nous a fourni une compréhension approfondie des caractéristiques et du fonctionnement du moteur asynchrone à double alimentation. Nous avons pu développer un modèle fiable basé sur des équations bien établies, ce qui nous permettra d'approfondir davantage notre compréhension de cette technologie et d'explorer de nouvelles possibilités d'optimisation et de contrôle.

Chapitre II :
Commande Vectorielle de
la MADA

II.1 Introduction

La machine à courant continu a joué un rôle prépondérant dans la production d'énergie par le passé. Cependant, avec les avancées dans le domaine de l'énergie, la machine asynchrone a progressivement supplanté la machine à courant continu en raison de sa puissance et de son coût réduits. Toutefois, la machine asynchrone présente une complexité accrue.

C'est pourquoi les études scientifiques, académiques et les recherches ont mis l'accent sur le contrôle de la machine asynchrone, cherchant à établir une analogie avec la machine à courant continu et à résoudre le défi fondamental du couplage entre les variables d'entrée et de sortie ainsi que les variables internes de la machine, telles que le débit, le couple et la vitesse. Les anciennes méthodes de contrôle ne sont plus adaptées, car la plupart des applications industrielles requièrent un couple élevé à basse vitesse. C'est pourquoi une technique de contrôle vectoriel, également connue sous le nom de contrôle par sens d'écoulement, a été proposée pour résoudre ces difficultés.

Dans cette partie, nous aborderons l'étude du contrôle de la MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation), qui fonctionne en tant que moteur asynchrone à double alimentation. Les phases statoriques sont alimentées par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales à fréquence et amplitude constantes, tandis que les phases rotoriques sont alimentées par un onduleur de tension à fréquence et amplitude variables.

II.2 Commande Vectorielle de la MADA

II.2.1 Généralités sur la commande vectorielle

La commande de la vitesse d'une machine asynchrone présente une difficulté majeure due à l'étroite relation entre le couple et le flux, où toute action sur l'une de ces variables a un impact sur l'autre. Pour résoudre ce problème, plusieurs stratégies ont été proposées, dont certaines sont basées sur le principe conventionnel de la commande vectorielle à flux orienté. Les premiers travaux sur la commande vectorielle de la MADA avec deux onduleurs, l'un au stator et l'autre au rotor, ont été réalisés à la VUB de VIDAL par Lecoq, et complétés par les travaux de L. MOREL et D. RAMUZ, ainsi que R. GHOSN et P.E. [2.1], [2.2].

Cette approche présente de nombreux avantages [2.3], notamment une réponse rapide du couple, une large plage de commande de vitesse et une grande efficacité pour une gamme étendue de charges en régime permanent. La machine asynchrone est alors commandée de manière similaire à une machine à courant continu à excitation indépendante. Deux méthodes générales de commande vectorielle sont utilisées [2.4] : la méthode directe (méthode de F. Blaschke) et la méthode indirecte (méthode de K. Hasse).

La différence entre ces méthodes réside dans la façon dont les signaux du vecteur unitaire $\cos(\omega st)$ et $\sin(\omega st)$ sont générés.

II.2.2 Principe de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle vise à contrôler la machine asynchrone de manière similaire à une machine à courant continu à excitation indépendante, où il existe un découplage naturel entre la variable commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit) [2.5]. Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple.

Contrairement à la machine asynchrone à cage, où seuls les courants statoriques sont mesurés, la machine asynchrone à bagues doublement alimentée offre l'avantage de permettre la mesure des courants des deux côtés et donc de pouvoir les contrôler, offrant ainsi une plus grande flexibilité dans la commande de cette machine [2.6].

L'objectif de la commande de la MADA est de réaliser cette opération à l'aide de variables de commande similaires, comme illustré dans la figure 2.1.

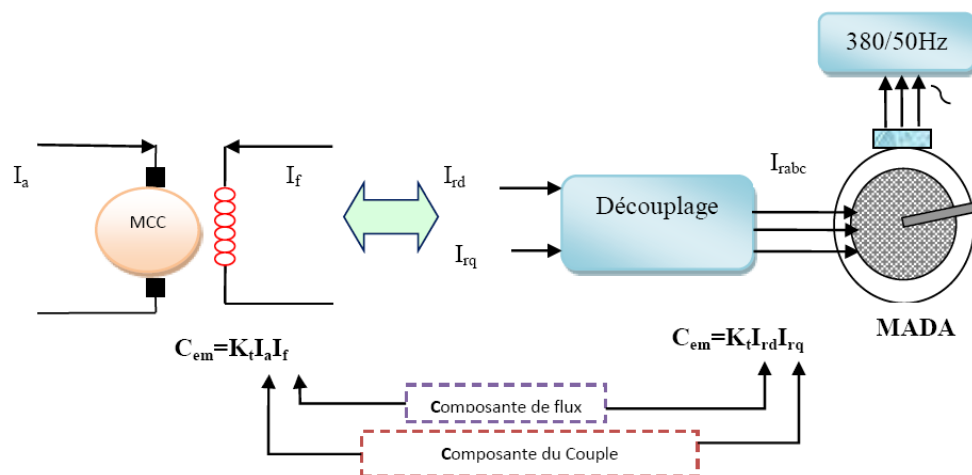


Figure 2.1 : Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la machine à courant continu.

II.3. Procédé d'orientation du flux

- L'orientation du flux rotorique avec les conditions $0 r_q r_d r$
- L'orientation du flux statorique avec les conditions $0 s_q s_d s$
- L'orientation du flux d'entrefer avec les conditions $0 g_q g_d g$

Dans notre cas, l'orientation du flux statorique est la méthode choisie.

II.4. Contrôle du courant par MLI :

La méthode de contrôle des courants par modulation de largeur d'impulsion (MLI) à partir d'une source de tension continue consiste à appliquer des créneaux de tension aux

bornes de la machine de manière à ce que le fondamental de la tension soit le plus proche de la référence de la tension sinusoïdale.

La MLI est obtenue en comparant deux signaux : un signal triangulaire de haute fréquence (F_p) appelé "porteuse" et un signal de référence appelé "modulatrice" de fréquence $F_m \ll F_p$. Les intersections de ces deux signaux déterminent les instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur (Figure 2.2).

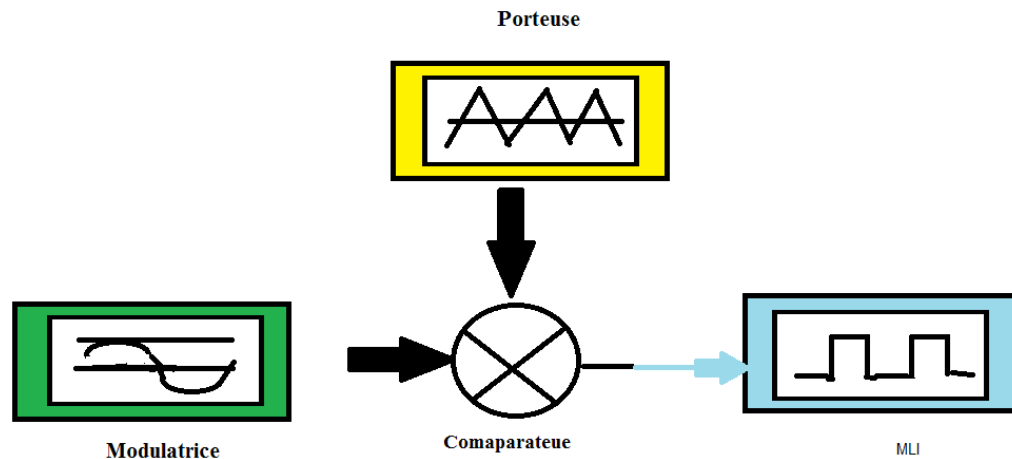


Figure 2.2 : Schéma de principe de la commande MLI.

Ces deux signaux sont définis comme suit :

1. L'onde porteuse : il s'agit d'un signal à haute fréquence, généralement une onde triangulaire.
2. L'onde modulatrice : il s'agit d'un signal qui représente l'image de la forme d'onde de sortie souhaitée, généralement une onde sinusoïdale.

Deux paramètres principaux caractérisent la modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

1. L'indice de modulation (M_L) : il est défini comme le rapport entre l'amplitude de l'onde modulatrice et celle de l'onde porteuse.

$$M_L = \frac{v_m}{v_p}. \quad (2.1)$$

2. Le rapport de modulation (M_r) : il est défini comme le rapport entre la fréquence de l'onde porteuse et celle de l'onde modulatrice.

$$M_r = \frac{f_p}{f_m}. \quad (2.2)$$

II.5. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :

Afin d'obtenir une commande découplée des puissances active et réactive statoriques, nous choisissons un référentiel diphasé d-q lié au champ tournant statorique et plaçons le vecteur de flux statorique (Φ_s) sur l'axe d (figure 2.3). Nous supposons que la résistance statorique (R_s) est négligeable par rapport à la réactance statorique pour les machines de

puissance moyenne et élevée. Ainsi, nous pouvons définir les composantes du flux statorique comme suit :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \quad (2.3)$$

$$\varphi_{qs} = 0 \rightarrow \varphi \frac{Vs}{\omega_s} \quad (2.4)$$

Où :

- φ_{ds} représente la composante du flux statorique sur l'axe d.
- φ_{qs} représente la composante du flux statorique sur l'axe q.
- V_s est la tension statorique.
- ω_s est la vitesse angulaire du champ magnétique statorique.

Il est important de noter que l'approximation de la résistance statorique (R_s) comme étant négligeable est valide dans le cas des machines de puissance moyenne et élevée.

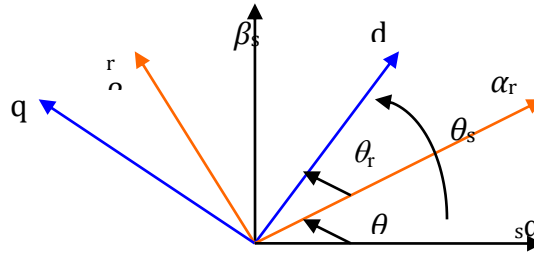


Figure 2.3 : Orientation du repère de Park.

$$V_{ds} = 0$$

$$V_{qs} = U_s = V_s \sqrt{3}. \quad (2.5)$$

Le modèle de la MADA devient.

$$v_{ds} = 0$$

$$v_{qs} = U_s = \omega_s \varphi_s. \quad (2.6)$$

$$V_{d_r} = R_r i_{d_r} + \frac{d\varphi_{d_r}}{dt} - \omega_r \varphi_{q_r}. \quad (2.7)$$

$$V_{q_r} = R_r i_{q_r} + \frac{d\varphi_{q_r}}{dt} - \omega_r \varphi_{d_r}. \quad (2.8)$$

Les nouvelles expressions des courants statoriques en fonction des courants rotoriques sont décrites par :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s = L_s i_{d_s} + M i_{d_r} \rightarrow i_{d_s} = \varphi_s L_s - M L_s i_{d_r}. \quad (2.9)$$

$$\varphi_{qs} = 0 = L_s i_{q_s} + M i_{q_r} \rightarrow i_{q_s} = -M L_s i_{q_r}. \quad (2.10)$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} : \text{ est le coefficient de dispersion de la MADA.}$$

Les nouvelles expressions des tensions rotoriques sont décrites alors par :

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_r \cdot \sigma L_r \cdot i_{qr} + M L_s \cdot \frac{d\phi_s}{dt}. \quad (2.11)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} - \omega_r \cdot \sigma L_r \cdot i_{dr} + \omega_r M L_s \phi_s. \quad (2.12)$$

statorique et la puissance active / réactive rotorique sont réécrites comme suit:

$$P_s = C_{em} = p \phi_{ds} i_{qs} = -p \left[\frac{M}{L_s} \right] \phi_{ds} i_{qs}. \quad (2.13)$$

$$V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} = - \left[\frac{U_s M}{L_s} \right] i_{qr}. \quad (2.14)$$

$$Q_s = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} = \frac{U_s \phi_s}{L_s} - \left[\frac{U_s M}{L_s} \right] i_{dr}. \quad (2.15)$$

$$p_r = V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr} = s \left[\frac{U_s M}{L_s} \right] i_{qr}. \quad (2.16)$$

$$Q_r = V_{qr} i_{dr} + V_{dr} i_{qr} = s [M U_s L_s] i_{dr}. \quad (2.17)$$

En examinant les équations, nous pouvons établir le schéma bloc simplifié de la MADA, tel qu'illustré dans la figure 2.4. Ce schéma bloc comprend les tensions rotoriques en tant qu'entrées et les puissances active et réactive statoriques ainsi que le couple électromagnétique en tant que sorties [1.27].

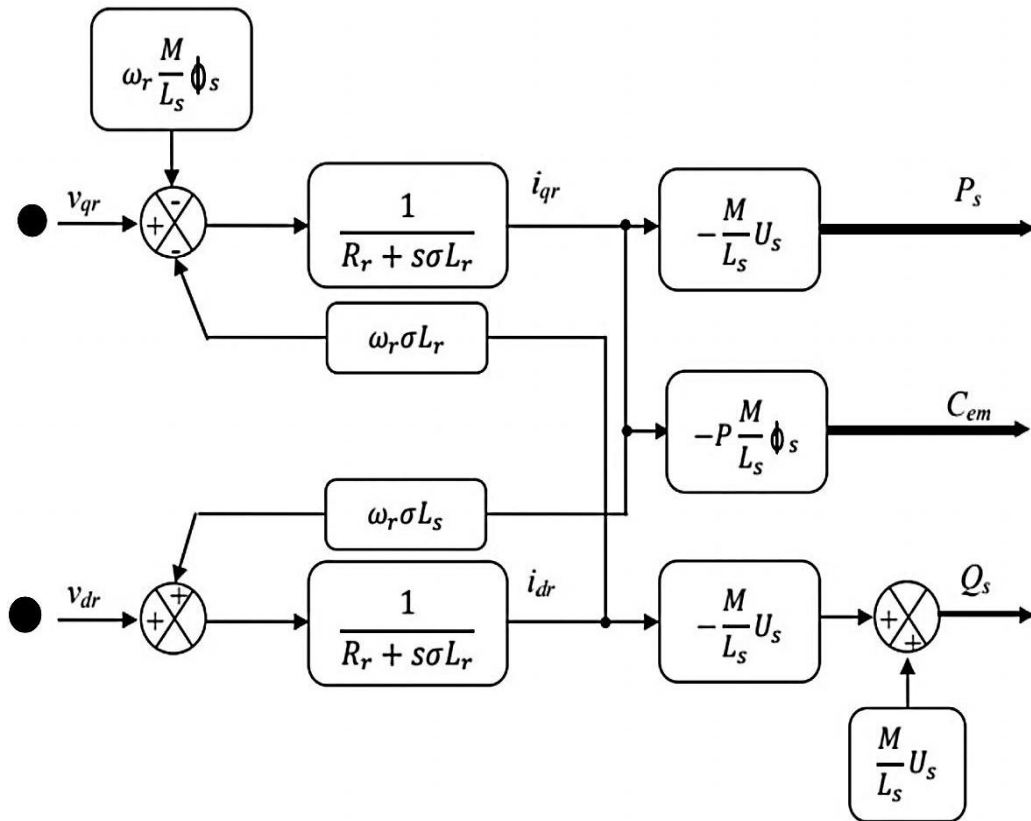


Figure.2.4: Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA.

II.6. Modélisation de l'onduleur :

L'onduleur de tension est un convertisseur statique qui permet d'imposer à la machine des ondes de tension à amplitude et fréquence réglables à partir d'un réseau standard de 220/380V, 50 Hz. Après redressement, la tension filtrée U_{dc} est appliquée à l'onduleur.

Les composants de l'électronique de puissance (interrupteurs) sont déterminés en fonction de la puissance et de la fréquence de commutation. En général, plus les composants sont rapides, plus la puissance commutée est faible, et vice versa. À titre indicatif, les transistors MOSFET sont considérés comme des composants très rapides mais de puissance relativement faible. Les transistors bipolaires sont moins rapides que les transistors MOSFET mais sont plus puissants (de quelques kHz à une dizaine de kW). Les transistors IGBT sont des composants de gamme standard (jusqu'à 20 kHz à plusieurs dizaines de kW). Les thyristors GTO sont destinés aux applications de grandes puissances et commutent très lentement. Ils sont commandables à l'ouverture et à la fermeture, ce qui n'est pas le cas pour le thyristor classique [2.7].

II.6.1 Onduleur de tension à deux niveaux :

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques capables de transformer l'énergie d'une source continue en une source alternative. La forme d'onde de tension de sortie d'un onduleur est périodique mais non sinusoïdale et contient des harmoniques, ce qui nécessite un réglage pour bien filtrer. Cependant, cette onde peut être très proche de la forme d'onde désirée avec une fréquence souhaitée. La partie mobile de notre générateur est alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux équipé de dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Afin d'éviter le court-circuit de la source de tension continue, les commandes des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires. (Figure 2.5).

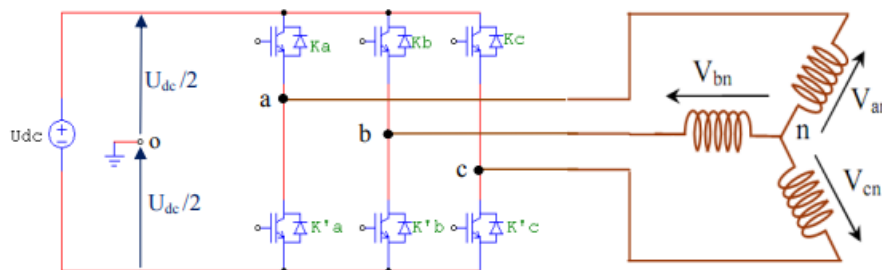


Figure 2.5 : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

composées sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_A - V_B \\ U_{BC} = V_B - V_C \\ U_{CA} = V_C - V_A \end{cases} \quad (2.18)$$

Les tensions simples en fonction des tensions mesurées entre les points A, B, C et le point milieu fictif O sont alors donnée par :

$$\begin{cases} V_A = \frac{1}{3}(2V_{A0} - V_{B0} - V_{C0}) \\ V_B = \frac{1}{3}(-V_{A0} + 2V_{B0} - V_{C0}) \\ V_C = \frac{1}{3}(-V_{A0} - V_{B0} + 2V_{C0}) \end{cases} \cdot (2.19)$$

On obtient enfin sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{B0} \\ V_{C0} \end{bmatrix} \cdot (2.20)$$

Chaque bras de l'onduleur est constitué de deux interrupteurs, on peut par conséquent associer à chacun deux une valeur binaire de commande avec

(i = A, B, C) et telle que :

- Si = +1 : si l'interrupteur du haut est fermé et l'interrupteur du bas ouvert.
- Si = -1 : si l'interrupteur du haut est ouvert et l'interrupteur du bas fermé.

Ce qui nous permet d'écrire.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{U_{CC}}{2} \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \cdot (2.21)$$

Enfin le convertisseur est modélisé par la matrice de connexion suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \frac{U_{CC}}{2} \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \cdot (2.22)$$

II.6.2 Onduleur de tension à 3 niveaux:

La(**figure 2.7**). montre la structure d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC. On commence par définir la fonction de connexion F_{ki} de l'interrupteur. Elle vaut 1 si l'interrupteur est fermé et 0 dans le cas contraire.

En mode commandable, les fonctions de connexion de l'onduleur sont liées par la relation (1).

$$\begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{k4} \\ F_{k2} = 1 - F_{k3} \end{cases} \cdot (2.23)$$

Avec , k = 1 , 2 ou 3 , représente le numéro du bras.

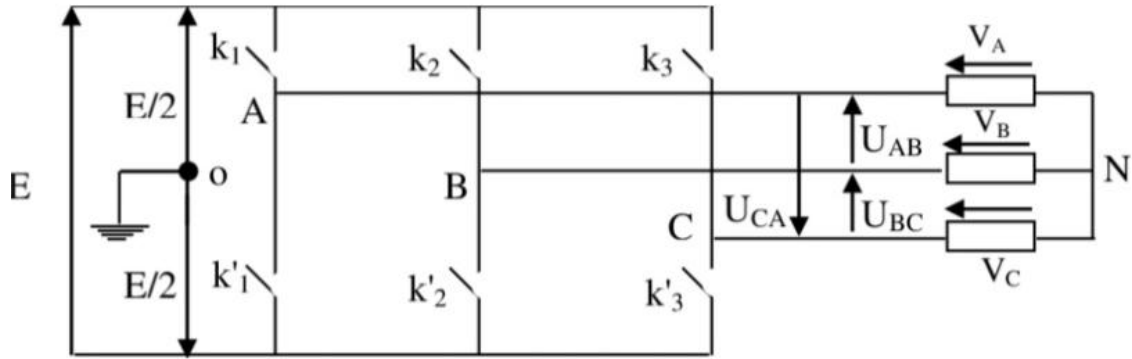


Figure 2.6: schéma d'un Onduleur à trois niveaux.

On définit la fonction de connexion F_{bkm} du demi- bras comme suit:

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{K1} \times F_{K2} \\ F_{K0}^b = F_{K3} \times F_{K4} \end{cases} \cdot (2.24)$$

On désigne par: $m = 1$: le demi- bras du haut et $m = 0$: le demi- bras du bas. Les potentiels des noeuds A, B et C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point M s'expriment comme suit:

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^b \times U_{c1} - F_{10}^b \times U_{c2} \\ V_{BM} = F_{21}^b \times U_{c1} - F_{20}^b \times U_{c2} \\ V_{CM} = F_{31}^b \times U_{c1} - F_{30}^b \times U_{c2} \end{cases} \cdot (2.25)$$

Les tensions simples de sortie s'écrivent:

$$\begin{bmatrix} XA \\ Xq \\ X0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{c2} \right) \cdot (2.26)$$

II.7. Méthode directe de la commande vectorielle :

La méthode directe de la commande vectorielle a été proposée par Blaschke et rendue publique vers 1970 [2.8], [2.9] (contrôle en boucle fermée). Dans cette méthode, la connaissance du flux rotorique (module et argument) est nécessaire pour assurer le découplage entre le couple et le flux. En effet, la position du flux rotorique θ_s est calculée algébriquement à partir des informations sur le flux rotorique (figure 2.7).

Considérons le diagramme vectoriel suivant :

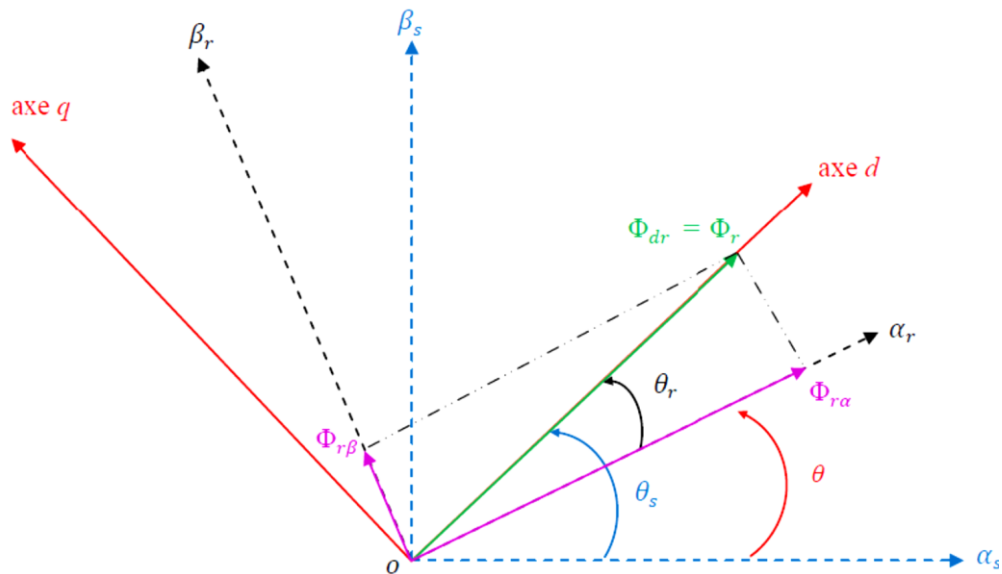


Figure 2.7 : Diagramme vectoriel pour la commande vectorielle directe.

II.8. Méthode indirecte de la commande vectorielle :

Le principe de la méthode indirecte consiste à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux, mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur de flux et à régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs et elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée par rapport à la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [2.10].

II.9. Simulation de l'association MADA avec onduleur à MLI.

II.9.1. Seul onduleur du côté rotorique

Schéma bloc de simulation sous MATLAB :

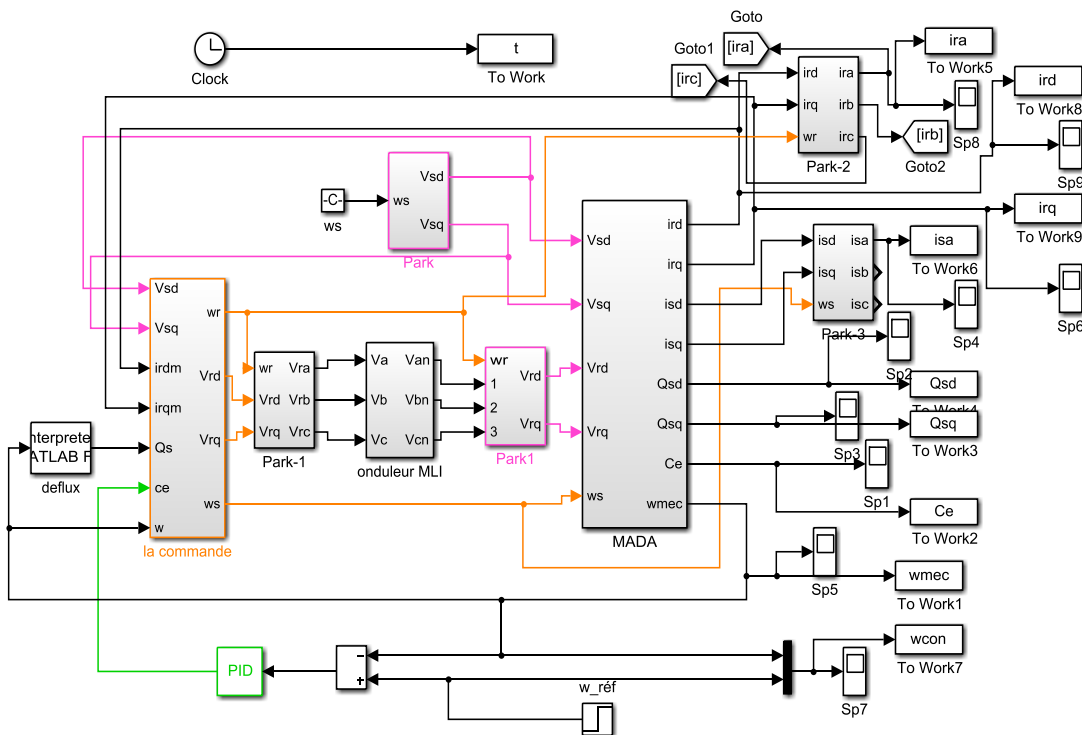


Figure II.8. : Schéma bloc de simulation de la MADA avec onduleur à MLI (seul onduleur du côté rotorique).

La Figure II.8 représente le schéma bloc de simulation de l'association MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation) avec un onduleur à MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) du côté rotorique.

Le schéma bloc montre les différentes étapes de la simulation, qui sont réalisées à l'aide de MATLAB. On peut identifier les éléments suivants :

1. Bloc "Modèle de la MADA" : C'est le modèle de la machine asynchrone à double alimentation. Il représente les caractéristiques électriques et mécaniques de la machine, et permet de simuler son comportement dans différentes conditions.

2. Bloc "Onduleur à MLI" : C'est l'onduleur utilisé du côté rotorique de la MADA. Il convertit la tension continue en ondes de tension à amplitude et fréquence réglables, en utilisant la modulation de largeur d'impulsion. Cet onduleur permet de contrôler la vitesse et le couple de la machine.

3. Bloc "Commande de l'onduleur" : Ce bloc est responsable de la génération des signaux de commande pour l'onduleur à MLI. Il prend en compte les consignes de vitesse et de couple, ainsi que les informations du modèle de la MADA, pour générer les signaux de

commande appropriés.

4. Bloc "Mesure" : Ce bloc représente les capteurs utilisés pour mesurer les grandeurs électriques et mécaniques de la MADA, telles que la vitesse, le courant, et le flux. Les mesures sont utilisées pour la rétroaction et le contrôle de la machine.

L'objectif de cette simulation est de tester et d'évaluer les performances de l'association MADA avec un onduleur à MLI. Elle permet de comprendre le fonctionnement global du système et d'optimiser les paramètres de commande pour obtenir un contrôle précis de la machine.

II.9.2. Résultats de simulation

La Figure (2.9) illustre les résultats de simulation de la MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation) avec une alimentation du côté statorique de 220V et 50Hz, ainsi qu'un seul onduleur du côté rotorique. Dans cette simulation, les paramètres suivants ont été utilisés : $V_r=12V$, $f_r=3Hz$, $t=1s$. De plus, un couple de charge de 5N.m a été appliqué à $t=3s$.

Les résultats de simulation représentés dans la figure montrent le démarrage de la MADA. On peut observer les réponses de différentes grandeurs électriques et mécaniques de la machine au cours du temps. Ces grandeurs peuvent inclure la vitesse de rotation, le courant, le flux magnétique, etc.

La figure fournit une visualisation graphique des performances de la MADA lors du démarrage, ce qui permet d'analyser le comportement de la machine dans les conditions spécifiées. Ces résultats de simulation peuvent être utilisés pour évaluer et ajuster les paramètres de contrôle de la MADA afin d'optimiser ses performances.

Il est important de noter que les détails précis des résultats de simulation ne sont pas spécifiés dans la demande. Pour une analyse plus détaillée, il serait nécessaire de se référer aux valeurs numériques et aux courbes spécifiques présentées dans la figure.

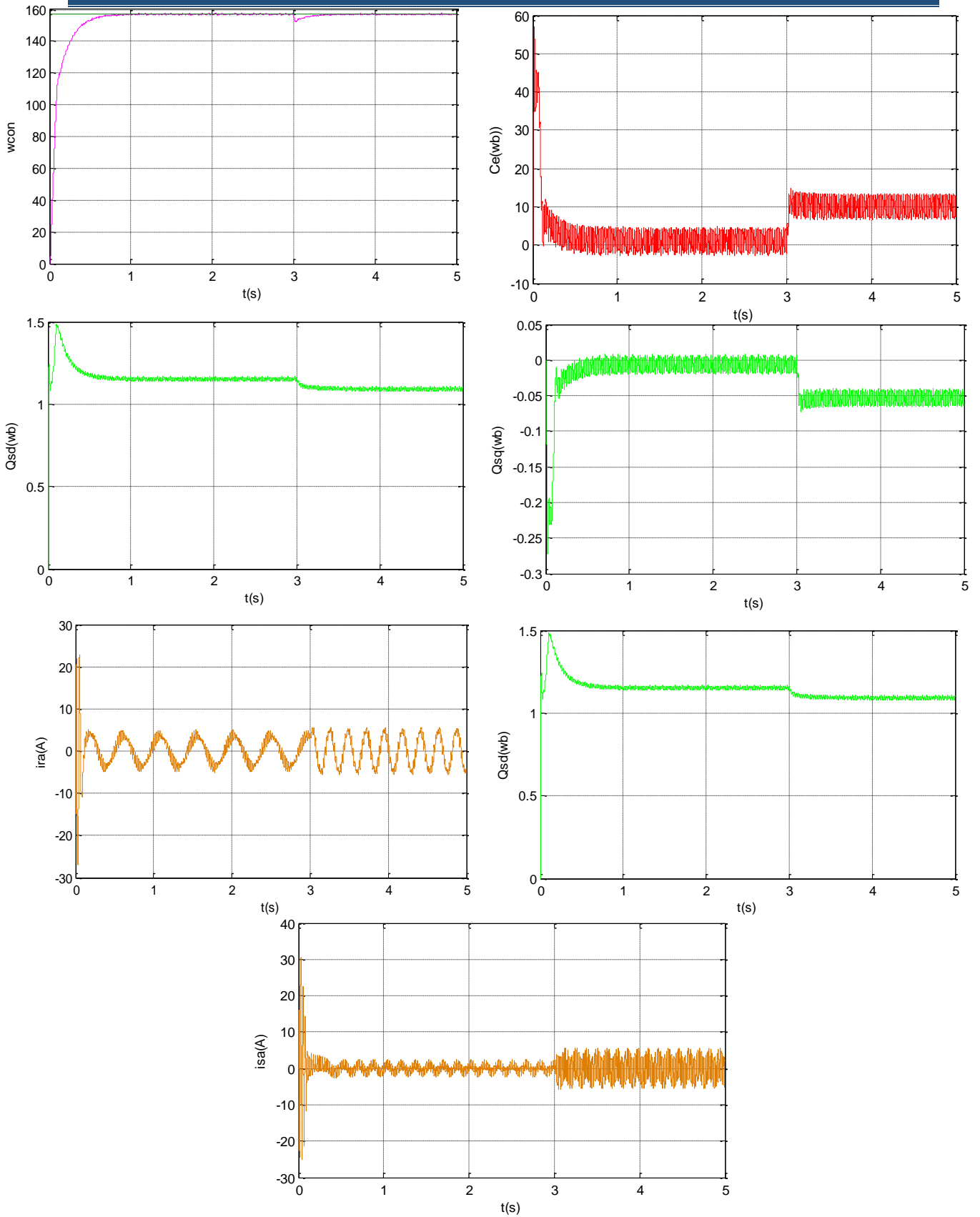


Figure 2.9 Démarrage de la MADA avec alimentation côté statorique, onduleur côté rotorique et charge de 5N.m.


II.9. Conclusion :

Dans cette partie, nous avons abordé le principe de commande de transmission de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Comparée à la machine asynchrone à cage et à la machine synchrone, la MADA offre une plus grande flexibilité grâce à ses degrés de liberté plus étendus, ce qui facilite sa commande.

Nous avons brièvement présenté deux méthodes au début du chapitre : la commande directe et la commande vectorielle indirecte. La première nécessite un contrôle de flux en boucle fermée, tandis que la seconde effectue ce contrôle en boucle ouverte.

Parmi ces méthodes, la méthode des flux est l'une des plus dominantes et largement utilisées. Elle permet de simplifier le modèle de la machine et de réguler à la fois le couple et le débit. Ainsi, le comportement du couple de la MADA devient similaire à celui des machines à courant alternatif et à courant continu.

En conclusion, la commande de la MADA est une approche prometteuse pour la transmission d'énergie. Elle offre des avantages en termes de flexibilité et de régulation, ce qui en fait une option attrayante dans diverses applications industrielles. Des recherches supplémentaires peuvent être entreprises pour améliorer encore les performances et l'efficacité de cette technologie.



Chapitre III :
Simulation, et
Interprétation de
Résultats

III.1 Introduction:

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la simulation de la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en utilisant l'algorithme d'optimisation PSO (Particle Swarm Optimization). L'objectif est d'améliorer les performances du contrôleur PI (Proportionnel Intégral) utilisé dans la commande vectorielle.

Tout d'abord, nous expliquerons brièvement le principe de l'algorithme PSO et son fonctionnement. L'algorithme PSO est une méthode d'optimisation basée sur l'inspiration du comportement de vol des oiseaux en groupe. Il utilise un ensemble de particules qui se déplacent dans l'espace de recherche pour trouver la meilleure solution.

Ensuite, nous décrivons comment les paramètres du contrôleur PI de la commande vectorielle peuvent être améliorés à l'aide de l'algorithme PSO. Ces paramètres incluent les gains proportionnels (K_p) et intégraux (K_i) du contrôleur, qui influencent la réponse du système.

Nous procéderons ensuite à la simulation de la commande vectorielle de la MADA en utilisant les valeurs optimisées des paramètres PI. Nous présenterons les résultats obtenus sous forme de graphiques et d'indicateurs de performance tels que le temps de réponse, l'erreur de suivi de consigne, etc.

Enfin, nous interpréterons les résultats de simulation pour évaluer l'efficacité de l'algorithme PSO dans l'amélioration de la commande vectorielle de la MADA. Nous discuterons des avantages et des limitations de cette approche, ainsi que des pistes possibles pour des améliorations futures.

Ce chapitre vise à fournir une compréhension approfondie des performances de la commande vectorielle de la MADA avec l'utilisation de l'algorithme PSO pour l'optimisation des paramètres PI. Les résultats de simulation et leur interprétation permettront de déterminer l'efficacité de cette approche et son potentiel dans l'amélioration des performances du système.

III.2. Implémentation de l'algorithme PSO pour l'optimisation des paramètres PI de la commande vectorielle de la MADA

Dans cette section, nous nous penchons sur l'application de l'algorithme PSO (Optimisation par Essaim de Particules) pour l'optimisation des paramètres PI de la commande vectorielle de la MADA. Après avoir discuté des principes de base de l'algorithme PSO et de son inspiration dans le comportement social des oiseaux en groupe, nous nous

concentrons maintenant sur son implémentation spécifique pour améliorer la commande vectorielle de la MADA.

Nous commençons par définir les objectifs de l'optimisation des paramètres PI dans la commande vectorielle de la MADA. Ces paramètres jouent un rôle crucial dans la performance et la stabilité du système, et leur optimisation peut conduire à une amélioration significative des performances de la machine.

Ensuite, nous détaillons les étapes de l'implémentation de l'algorithme PSO pour l'optimisation des paramètres PI. Cela comprend la configuration des paramètres de l'algorithme, tels que la taille de l'essaim, les coefficients d'inertie et les limites des variables. Nous expliquons également comment initialiser les positions et les vitesses des particules, ainsi que comment mettre à jour ces valeurs à chaque itération pour rechercher la meilleure solution.

Nous présentons ensuite les résultats de la simulation obtenus à l'aide de l'approche PSO. Nous comparons ces résultats avec ceux obtenus avant l'optimisation des paramètres PI, mettant en évidence les améliorations apportées par l'algorithme PSO en termes de performance du système et de suivi des consignes.

Enfin, nous discutons des avantages et des limitations de l'approche PSO dans l'optimisation des paramètres PI de la commande vectorielle de la MADA. Nous abordons également les possibilités d'amélioration et les perspectives futures de recherche dans ce domaine.

En résumé, cette section présente une approche innovante pour l'optimisation des paramètres PI de la commande vectorielle de la MADA en utilisant l'algorithme PSO. Les résultats obtenus démontrent les avantages de cette approche en termes de performance du système et ouvrent la voie à de nouvelles possibilités d'amélioration de la commande de la MADA.

II.2.1. L'approche PSO : Principes et Méthodologie

Dans ce chapitre, nous nous penchons en détail sur l'approche PSO (Optimisation par Essaim de Particules) pour l'optimisation des paramètres PI de la commande vectorielle de la MADA.

Nous commençons par présenter les principes fondamentaux de l'algorithme PSO. Cette approche s'inspire du comportement social des essaims d'oiseaux, où chaque particule représente une solution potentielle dans l'espace de recherche. Nous expliquons comment ces particules se déplacent et interagissent pour rechercher la meilleure solution.

Ensuite, nous détaillons la méthodologie de l'approche PSO pour l'optimisation des paramètres PI de la commande vectorielle de la MADA. Nous expliquons comment

l'algorithme est adapté à notre contexte spécifique, en prenant en compte les caractéristiques des systèmes photovoltaïques et les objectifs de performance de la commande.

Nous discutons également de la sélection des paramètres de l'algorithme, tels que le nombre de particules, les coefficients d'inertie et les limites des variables. Ces paramètres jouent un rôle essentiel dans le bon fonctionnement de l'algorithme et leur ajustement approprié est crucial pour obtenir de bons résultats.

II.2.1.1. Principes de l'algorithme PSO

L'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) repose sur certains principes mathématiques fondamentaux qui ont inspiré son développement. Ces principes fournissent le cadre pour la mise en œuvre de l'approche PSO et permettent aux particules de trouver des solutions optimales dans l'espace de recherche. Avant de plonger dans les détails mathématiques, il est intéressant de retracer l'historique de la méthode PSO et de comprendre son inspiration biologique.

L'algorithme PSO a été initialement proposé par le chercheur en informatique James Kennedy et le chercheur en ingénierie Russell Eberhart en 1995. Ils se sont inspirés du comportement de vol des oiseaux et de l'intelligence collective observée dans les essaims d'insectes et les bancs de poissons pour développer cette approche d'optimisation. En observant la manière dont les oiseaux se déplacent en groupe de manière coordonnée, Kennedy et Eberhart ont réalisé que les mouvements individuels des oiseaux étaient influencés par les positions des autres membres du groupe, leur permettant de s'adapter rapidement à leur environnement.

En s'inspirant de ce phénomène naturel, Kennedy et Eberhart ont développé l'algorithme PSO pour résoudre des problèmes d'optimisation. L'idée centrale de l'algorithme est d'utiliser un essaim de particules qui se déplacent dans l'espace de recherche, cherchant à trouver la meilleure solution possible en se basant sur les informations partagées entre les particules.

En utilisant des principes mathématiques et des formules spécifiques, les particules dans l'algorithme PSO peuvent ajuster leur position et leur vitesse en fonction des meilleures positions individuelles et globales trouvées jusqu'à présent. Ce processus itératif permet aux particules de converger progressivement vers des solutions optimales, simulant ainsi le comportement adaptatif des essaims d'oiseaux ou d'autres formes de vie collective dans la nature.

En résumé, l'algorithme PSO tire son inspiration de l'observation du comportement collectif des animaux dans la nature, et son développement repose sur des principes mathématiques qui permettent aux particules de coopérer et de s'ajuster pour trouver des solutions optimales. Maintenant que nous avons une compréhension de ces principes inspirés,

nous allons examiner les étapes d'implémentation de l'approche PSO dans le contexte du suivi du point de puissance maximale.

II.2.1.2. Principes mathématiques de l'algorithme PSO

L'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) repose sur des principes mathématiques qui permettent aux particules de se déplacer dans l'espace de recherche de manière à trouver la meilleure solution possible. Ces principes mathématiques constituent la base de l'approche PSO et guident les mises à jour des positions et des vitesses des particules.

Le fonctionnement de l'algorithme PSO repose sur deux composantes principales : la mise à jour de la vitesse des particules et la mise à jour de leur position. Ces mises à jour sont basées sur des formules mathématiques spécifiques, qui prennent en compte les informations locales et globales des particules.

La mise à jour de la vitesse des particules est régie par l'équation suivante :

$$V_i(t+1) = w \cdot V_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_i(t) - X_i(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (P_g(t) - X_i(t))$$

où:

$V_i(t+1)$ est la nouvelle vitesse de la particule

à l'itération $t+1$.

w est le poids d'inertie qui contrôle l'influence de la vitesse précédente.

$V_i(t)$ est la vitesse actuelle de la particule

i à l'itération t .

c_1 et c_2 sont des coefficients d'accélération qui régulent l'impact des meilleures positions locales et globales.

r_1 et r_2 sont des nombres aléatoires entre 0 et 1.

$P_i(t)$ est la meilleure position trouvée par la particule i jusqu'à l'itération t .

$P_g(t)$ est la meilleure position trouvée parmi toutes les particules jusqu'à l'itération t .

$X_i(t)$ est la position actuelle de la particule i à l'itération t .

Une fois que la vitesse des particules est mise à jour, leurs positions sont mises à jour selon l'équation suivante :

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1)$$

où

$X_i(t+1)$ est la nouvelle position de la particule i à l'itération $t+1$.

Ces formules mathématiques permettent aux particules de se déplacer dans l'espace de recherche de manière à converger vers des solutions optimales. Les paramètres tels que le poids d'inertie w , les coefficients d'accélération c_1 et c_2 , ainsi que la génération de nombres

aléatoires r_1 et r_2 , influencent la vitesse et la convergence de l'algorithme PSO.

En comprenant ces principes mathématiques de l'algorithme PSO, nous sommes en mesure de mieux appréhender son fonctionnement et d'analyser ses performances. Ces principes mathématiques offrent une approche flexible et efficace pour résoudre des problèmes d'optimisation dans divers domaines.

II.2.1.3. Étapes de l'implémentation de l'approche PSO

L'implémentation de l'approche PSO se déroule généralement en plusieurs étapes. Dans cette section, nous allons présenter les principales étapes impliquées dans la mise en œuvre de l'algorithme PSO.

1. Initialisation :

- Définir le nombre de particules dans l'essaim.
- Définir les dimensions de l'espace de recherche.
- Initialiser les positions et les vitesses des particules de manière aléatoire dans l'espace de recherche.
- Évaluer les performances initiales de chaque particule en calculant la valeur de la fonction objectif correspondante.

2. Boucle principale :

- Pour chaque itération, mettre à jour la vitesse et la position de chaque particule en utilisant les équations de mise à jour décrites précédemment.
- Évaluer la performance de chaque particule mise à jour en calculant la valeur de la fonction objectif.
- Mettre à jour les meilleures positions locales et globales de chaque particule.
- Vérifier les critères d'arrêt (par exemple, atteinte du nombre maximal d'itérations ou convergence des solutions) et terminer la boucle principale si nécessaire.

3. Résultats :

- Sélectionner la meilleure solution trouvée parmi toutes les particules.
- Fournir la solution optimale et la valeur de la fonction objectif correspondante.

Il est important de noter que l'implémentation de l'algorithme PSO peut être adaptée en fonction des besoins spécifiques du problème d'optimisation. Par exemple, des techniques telles que l'adaptation des paramètres, la variation de la topologie de l'essaim ou l'utilisation de mécanismes de recherche locale peuvent être intégrées pour améliorer les performances de l'algorithme.

II.2.1.4. Avantages et limites de l'approche PSO

L'approche PSO présente plusieurs avantages et limites qu'il est important de prendre en compte lors de son utilisation. Voici un aperçu des principaux avantages et limites de l'approche PSO :

- Avantages de l'approche PSO :

1. Simplicité d'implémentation : L'algorithme PSO est relativement simple à mettre en œuvre, ce qui facilite sa compréhension et son utilisation.

2. Adaptabilité : L'approche PSO peut être utilisée pour résoudre une large gamme de problèmes d'optimisation, qu'ils soient linéaires, non linéaires, continus ou discrets.

3. Exploration de l'espace de recherche : L'algorithme PSO est capable d'explorer efficacement l'espace de recherche, ce qui permet de trouver des solutions optimales ou proches de l'optimal.

4. Capacité à éviter les optimums locaux : Grâce à la communication et à la coopération entre les particules, l'approche PSO peut échapper aux optimums locaux et rechercher des solutions plus globales.

5. Parallélisme : L'approche PSO peut être parallélisée, ce qui permet d'accélérer le processus d'optimisation en utilisant plusieurs processeurs ou cœurs de calcul.

- Limites de l'approche PSO :

1. Sensibilité aux paramètres : Les performances de l'approche PSO dépendent fortement des valeurs attribuées aux paramètres tels que le poids d'inertie, les coefficients d'accélération et les facteurs aléatoires. Trouver les bonnes valeurs peut être difficile et nécessite souvent des ajustements empiriques.

2. Risque de stagnation : L'approche PSO peut parfois rester piégée dans une région de l'espace de recherche sans progresser vers une solution optimale, ce qui peut ralentir ou empêcher la convergence.

3. Complexité des problèmes multi-objectifs : Bien que l'approche PSO puisse être utilisée pour des problèmes multi-objectifs, sa performance peut être limitée en raison de la difficulté de l'équilibrage entre les différents objectifs.

4. Dépendance à l'espace de recherche : L'efficacité de l'approche PSO peut varier en fonction de la topologie et de la dimension de l'espace de recherche. Certains problèmes peuvent nécessiter des adaptations spécifiques de l'algorithme pour obtenir de bons résultats.

Il est important de considérer ces avantages et limites lors de l'utilisation de l'approche PSO et de les évaluer en fonction du problème d'optimisation spécifique.

II.2.2. Implémentation de l'approche PSO pour l'optimisation des paramètres PI de la commande vectorielle de la MADA avec MATLAB

Dans cette section, nous nous concentrons sur l'implémentation concrète de l'approche PSO pour l'optimisation des paramètres PI de la commande vectorielle de la MADA. Nous utilisons l'environnement de programmation MATLAB pour réaliser cette implémentation.

Nous commençons par décrire les étapes nécessaires à la mise en œuvre de l'algorithme PSO dans MATLAB. Cela comprend la création de la fonction objectif qui évalue les performances de la commande vectorielle en utilisant les paramètres PI, la définition des limites des variables, ainsi que la configuration des paramètres de l'algorithme PSO tels que la taille de l'essaim, les coefficients d'inertie et le nombre d'itérations.

Ensuite, nous expliquons comment initialiser l'essaim de particules, en attribuant des positions et des vitesses aléatoires à chaque particule. Nous détaillons également comment mettre à jour les positions et les vitesses des particules à chaque itération, en utilisant les équations du PSO.

Nous présentons également la boucle principale de l'algorithme PSO, où les particules sont mises à jour itérativement jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt prédéfini soit atteint. Nous discutons de l'importance de l'équilibre entre l'exploration de l'espace de recherche et l'exploitation des meilleures solutions trouvées.

Enfin, nous mettons en évidence l'utilisation de MATLAB comme outil de simulation pour évaluer les performances de la commande vectorielle de la MADA avec les paramètres PI optimisés par l'approche PSO. Nous présentons les résultats obtenus, tels que la réponse en régime permanent, la stabilité du système et l'amélioration des performances par rapport aux paramètres initiaux.

II.2.3. Optimisation et accordage d'un contrôleur flou avec PSO : Application aux systèmes MADA et résultats obtenus

Ce programme est un programme d'optimisation et d'accordage d'un contrôleur PI en utilisant l'algorithme Particle Swarm Optimization (PSO). L'objectif du programme est d'améliorer les performances du contrôleur flou en ajustant les paramètres du contrôleur PI à l'aide de l'algorithme PSO.

Le programme est implémenté sous forme de script MATLAB. Certaines variables et paramètres sont définis au début, tels que le temps d'échantillonnage (T_s), la durée de la simulation (t_{ims}), la taille de l'essaim (n), le nombre maximum d'étapes de l'essaim ($bird_setp$), et la dimension du problème (dim).

Les limites inférieures et supérieures de chaque paramètre PI dans le contrôleur sont définies, et un ensemble initial de positions et de vitesses est généré pour les particules de l'essaim.

Ensuite, une boucle principale (Main Loop) est exécutée, où les performances de chaque

particule de l'essaim sont évaluées à l'aide de la fonction objectif (fitness), et les meilleures solutions sont déterminées à la fois au niveau de l'essaim et au niveau de chaque particule individuellement.

Les vitesses et positions de chaque particule sont mises à jour en utilisant les paramètres PSO et en se basant sur les meilleures solutions locales et globales. La boucle principale se poursuit jusqu'à ce qu'un certain nombre d'étapes (bird_setp) soit atteint.

Finalement, les meilleures solutions identifiées au niveau de l'essaim et de la particule gagnante sont utilisées pour déterminer les valeurs optimales des paramètres du contrôleur PI. Les résultats sont affichés sous la forme d'un graphique montrant l'évolution des meilleures solutions au fil des étapes.

Description technique du programme d'optimisation du contrôleur PI à l'aide de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) :

1. Principes de base :

- Le programme utilise l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) pour optimiser les paramètres du contrôleur flou.

- Le programme est implémenté à l'aide de l'environnement MATLAB.

2. Initialisation :

- Les paramètres initiaux du programme sont définis, notamment :

- tims : durée de la simulation.

- n : taille de l'essaim, c'est-à-dire le nombre de particules dans l'essaim.

- bird_setp : nombre maximal d'étapes par particule.

- dim : dimension du problème, c'est-à-dire le nombre de paramètres à optimiser.

- c2, c1 et w : paramètres de l'algorithme PSO.

3. Limites et contraintes :

- Les limites inférieures et supérieures de chaque paramètre à optimiser sont définies.

- La variable "limit" est définie comme une matrice contenant les limites de chaque paramètre.

- Des positions initiales aléatoires sont générées dans ces limites pour chaque

4. Boucle principale :

- La boucle principale comprend bird_setp étapes et itérations.

- La performance de chaque particule est évaluée en fonction des valeurs actuelles des paramètres.

- Les meilleures valeurs de chaque particule et la meilleure valeur globale sont enregistrées à chaque itération.

- La vitesse et la position de chaque particule sont mises à jour selon les équations de

l'algorithme PSO.

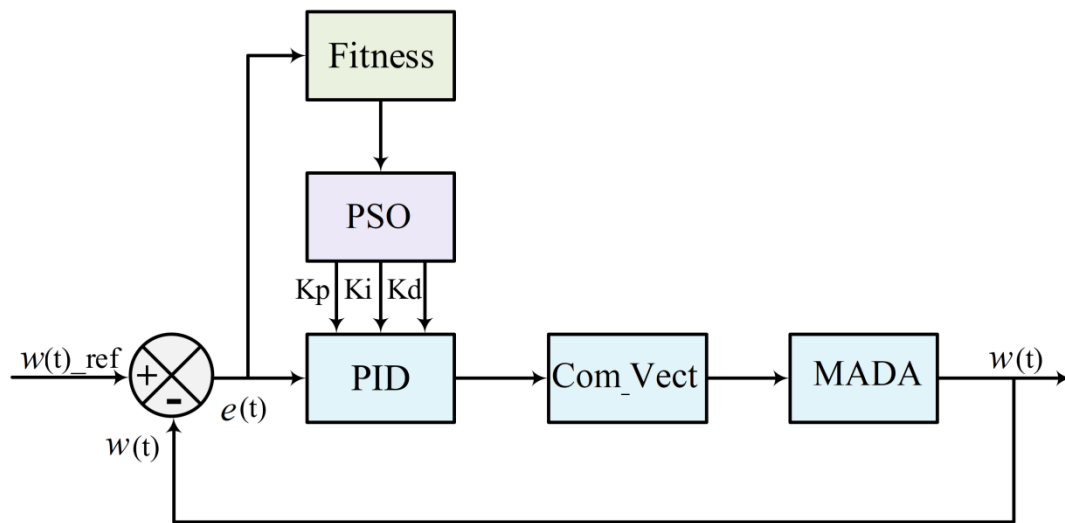


Figure III.1. Schéma bloc de l'optimisation des paramètres PID de la commande vectorielle de la MADA à l'aide de PSO

La Figure III.1 présente le schéma bloc de l'optimisation des paramètres PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) de la commande vectorielle de la MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation) à l'aide de l'algorithme PSO (Optimisation par Essaim de Particules).

1. Capteurs : Les capteurs mesurent les grandeurs électriques et mécaniques de la MADA, telles que le courant, la tension et la vitesse de rotation.

2. Régulateur PID : Le régulateur PID est utilisé pour réguler les courants dans les axes d-q de la MADA. Il ajuste les commandes de tension en fonction des signaux de rétroaction des capteurs, en utilisant les termes proportionnel, intégral et dérivé pour obtenir une réponse de régulation optimale.

3. Algorithme PSO : L'algorithme PSO est utilisé pour optimiser les paramètres du régulateur PID. Il explore de manière efficace l'espace des paramètres à l'aide d'un essaim de particules, afin de trouver les valeurs optimales qui permettent d'obtenir de meilleures performances de régulation.

4. Générateur de commandes de tension : Ce bloc génère les commandes de tension appropriées pour alimenter la MADA en fonction des sorties du régulateur PID.

Grâce à l'optimisation des paramètres PID à l'aide de PSO, la commande vectorielle de la MADA bénéficie d'une amélioration significative des performances de régulation. Cela se traduit par une réduction des dépassements, des oscillations transitoires et une meilleure précision du contrôle. L'utilisation de l'algorithme PSO permet d'obtenir une adaptation plus

efficace aux variations des charges et des conditions de fonctionnement, offrant ainsi des performances optimales pour les applications industrielles de la MADA.

5. Analyse et résultats :

Dans cette section, nous présentons une analyse détaillée des résultats obtenus à partir de l'application de l'optimisation des paramètres PID de la commande vectorielle de la MADA à l'aide de l'algorithme PSO. La MADA utilisée dans nos expériences est un modèle standard avec des caractéristiques spécifiques, telles que sa structure, sa capacité de charge et ses performances nominales. Les données relatives à la MADA comprennent les spécifications électriques, les valeurs nominales des courants et des tensions, ainsi que les caractéristiques mécaniques telles que le couple maximal et la vitesse de rotation maximale.

En ce qui concerne le régulateur PID, nous détaillons les paramètres spécifiques qui ont été optimisés à l'aide de l'algorithme PSO. Ces paramètres comprennent les coefficients proportionnel, intégral et dérivé, qui sont ajustés pour obtenir une réponse de régulation optimale en fonction des performances souhaitées. Les valeurs utilisées pour les paramètres de l'algorithme PSO sont les suivantes :

- Taille de l'essaim (Swarm Size): $n = 10$
- Nombre de dimensions (Dimensions): $\text{dim} = 9$
- Constante cognitive (Cognitive Constant): $c1 = 0.912$
- Constante sociale (Social Constant): $c2 = 1.2$
- Poids d'inertie (Inertia Weight): $w = 0.9$

Le programme de base utilisé pour l'optimisation est également expliqué en détail. Nous décrivons les différentes étapes et algorithmes impliqués dans le processus, y compris la conversion Park inverse, le calcul des signaux de commande de tension et l'implémentation de l'algorithme PSO pour l'optimisation des paramètres PID.

Grâce à cette analyse détaillée, nous pouvons évaluer les performances du système de commande vectorielle de la MADA optimisé par PSO. Nous présentons les résultats sous forme de figures afin de mieux visualiser les améliorations obtenues. Cela inclut la convergence de la fonction objectif avec les itérations dans la Figure III.2, les performances du couple électromécanique en réponse à une perturbation dans la Figure III.3, et la comparaison des performances de la vitesse entre le contrôle PI conventionnel et le contrôle PI optimisé par PSO dans la Figure III.4.

Ces résultats fournissent des informations essentielles sur l'efficacité de l'optimisation des paramètres PID à l'aide de PSO pour la commande vectorielle de la MADA. Ils démontrent les avantages de cette approche en termes de temps de réponse, de stabilité et de précision du contrôle.

- La performance finale des paramètres optimisés est calculée pour la meilleure particule.

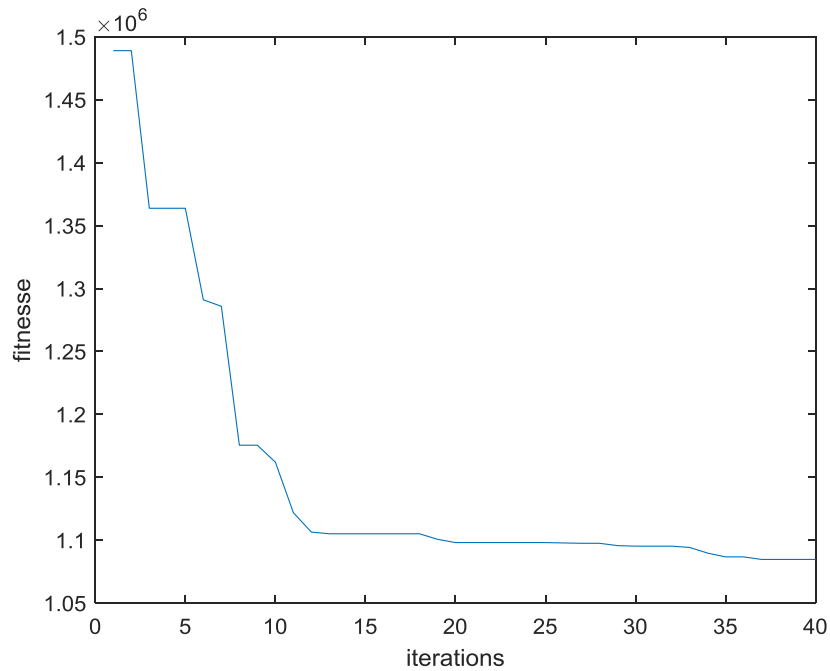


Figure III.2. Amélioration de la convergence de la fonction objectif avec les itérations grâce à l'algorithme PSO

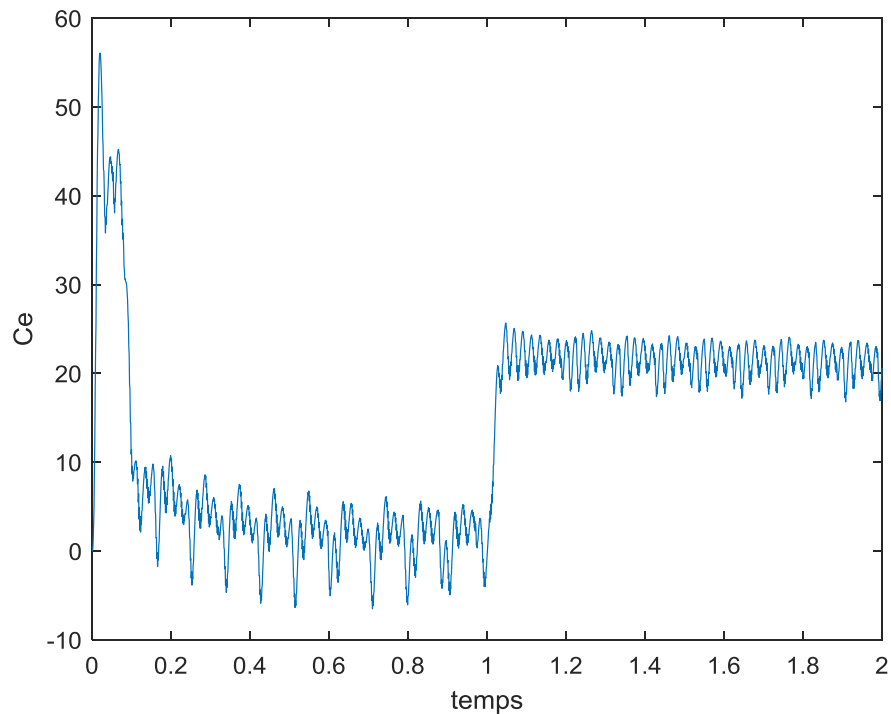


Figure III.3. performances du couple électromécanique avec variation de 20 N.M a t=1 s

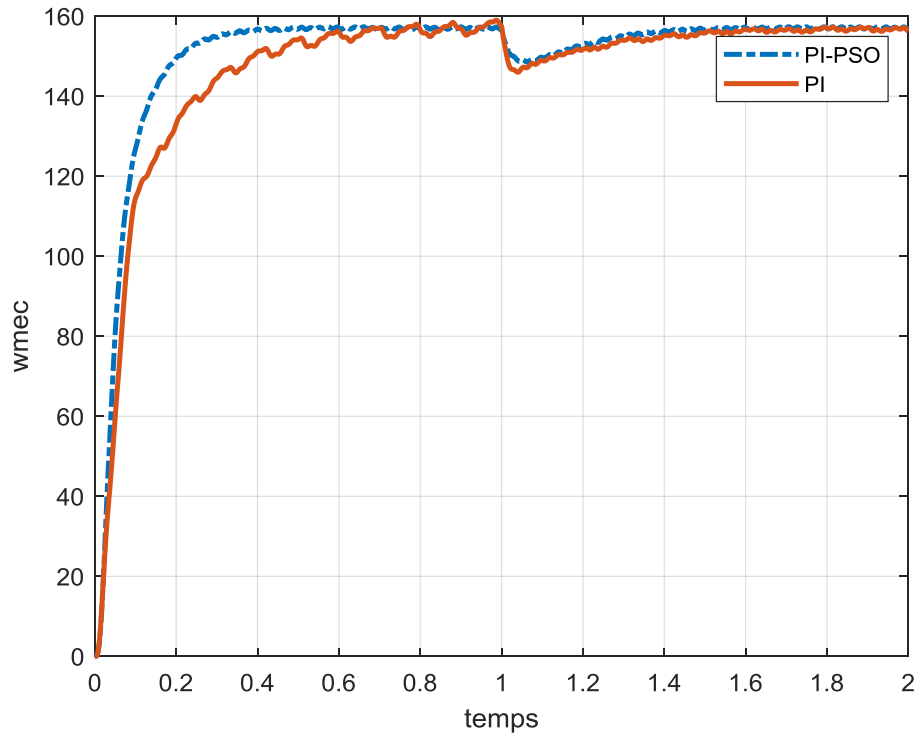


Figure III.4. Comparaison des performances de la vitesse entre le contrôle PI conventionnel et le contrôle PI optimisé par PSO

Dans la Figure III.1, on peut observer l'amélioration de la convergence de la fonction objectif avec les itérations grâce à l'utilisation de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO). La figure montre comment la valeur de la fonction objectif diminue progressivement à mesure que les itérations avancent, ce qui indique une meilleure performance du contrôleur flou optimisé.

Dans la Figure III.2, on présente les performances du couple électromécanique lorsqu'une variation de 20 N.M est appliquée à $t=1$ s. Cette figure permet d'évaluer la réponse du couple électromécanique face à une perturbation et d'observer comment il atteint un nouvel équilibre après la perturbation.

La Figure III.3 présente une comparaison des performances de la vitesse entre le contrôle PI conventionnel et le contrôle PI optimisé par PSO. Cette comparaison permet d'évaluer l'efficacité de l'optimisation du contrôleur PI par PSO en termes de réponse en vitesse. La figure met en évidence les améliorations obtenues en termes de temps de réponse, de stabilité et de précision entre les deux méthodes de contrôle.

III.3. Conclusion

En conclusion, cette étude nous a permis d'explorer les différentes facettes du système électromécanique étudié et de mettre en évidence les avantages du contrôle vectoriel direct et de l'optimisation par essaim de particules (PSO). Nous avons réalisé une simulation numérique approfondie en utilisant Matlab - Simulink pour analyser les performances du système et évaluer l'efficacité des différentes approches de contrôle.

L'utilisation de l'algorithme PSO pour l'optimisation du contrôleur PI a également été explorée. La Figure III.1 illustre l'amélioration de la convergence de la fonction objectif avec les itérations grâce à l'utilisation de PSO. Cette approche a permis d'optimiser le contrôleur flou et d'améliorer ses performances par rapport à la méthode conventionnelle.

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, cette étude nous a permis d'explorer en détail le système électromécanique étudié et d'évaluer différentes approches de contrôle pour améliorer ses performances. Nous avons utilisé la simulation numérique et l'optimisation par essaim de particules (PSO) pour analyser le comportement du système et optimiser les paramètres du contrôleur.

Dans la première partie de notre étude, nous avons analysé l'interaction entre le transformateur et la machine, mettant en évidence l'effet du transformateur sur les performances du système. Les résultats ont confirmé l'importance de prendre en compte cet élément dans la conception du contrôleur.

Dans la deuxième partie, nous avons étudié le contrôle vectoriel direct et son efficacité dans la régulation du couple électromécanique. Les résultats de la simulation ont montré les avantages de cette approche en termes de précision, de stabilité et de réponse dynamique.

L'utilisation de l'algorithme PSO pour l'optimisation du contrôleur PI a été explorée dans la troisième partie. Les résultats ont démontré l'amélioration de la convergence de la fonction objectif avec les itérations, ce qui témoigne de l'efficacité de PSO dans l'optimisation des paramètres du contrôleur.

En résumé, cette étude nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement du système électromécanique et de proposer des améliorations significatives en termes de contrôle. Les résultats obtenus ont confirmé l'importance de choisir la bonne approche de contrôle et d'optimiser les paramètres du contrôleur pour garantir des performances optimales.

Ces travaux ouvrent la voie à de futures recherches et développements dans le domaine du contrôle des systèmes électromécaniques, en utilisant des techniques avancées d'optimisation et de modélisation. L'objectif ultime est d'améliorer l'efficacité énergétique, la fiabilité et les performances globales de ces systèmes, contribuant ainsi à l'avancement de la technologie dans divers secteurs industriels.



Références
bibliographiques

Références bibliographique

Bibliographie Chapitre I

[1.1]: A . Chaiba , “Commande par logique floue de la machine asynchrone à double alimentation en tension,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2004.

[1.2]: DRID, S. 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 électrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2005.

[1.3]: BENALIA, L. *Contribution à l'étude du comportement de la Machine Asynchrone à Double Alimentation*. Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2003.

[1.4]: M. S. Vicatos et A. J. Tegopoulos, « A doubly - fed induction machine differential drivemodel for automobiles », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, No. 2, pp. 225-230, June 2003.

[1.5]: F. Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne: machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.

[1.6]: A. Boyette, « Contrôle-commande d “un générateur asynchrone a double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat en génieélectrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 11, France, 2006.

[1.7]: FORCHTTEI, D, GARCIA, G et VALLA, MI. *Vector control strategy for a doubly-fed standalone induction generator vector*. IEEE Trans .Energy conversion, pp: 991-995, 2002.

[1.8]: F. Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne: machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique ,Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003

[1.9]: P. É. Vidal, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double Alimentation » (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse), (2004).

[1.10]: BOYETTE, A. Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne. Thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 11, France, 2006.

Références bibliographique

[1.11]: Belkacem, T. O. U. A. L. (2010). Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).

[1.12]: G. Salloum, "Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation," Thèse de doctorat de l'université de Toulouse Mars 2007.

[1.13] A. Chaiba, "Commande par logique floue de la machine asynchrone à double alimentation en tension," Thèse de magister de l'université de Batna, 2004

[1.14] Y. Elbia, commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et a flux oriente, Mémoire de magistère, université, 2009.

[1.15]: A MIRECKI, "Etude comparative de chaines de conversion d'énergie dédiées à une éo- lienne de petite puissance", thèse de Doctorat, l'institut national polytechnique de Tou- louse, 2005

[1.16]: F. Poitiers: « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne: machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.

[1.17]: 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.

[1.18]: G. Salloum: « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.

[1.19]: P-E. Vidal: « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.

[1.20] A. ZEMMIT «Commandes en Tension d'un Moteur Asynchrone à Double Alimentation (MADA)», mémoire Master de l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila, Algérie, Juin 2013.

[1.21]. T. Wildi et G. Sybille: « *Électrotechnique* », 4ème édition, Canada 2005.

[1.22]. M. Marty, D. Dixneuf et D. G. Gilbert, « *Principe De L'électrotechnique* », DUNOD, Paris, 2005.

[1.23] A. Boyette, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double

Références bibliographique

alimentation avec système de stockage pour la production éolienne,» Thèse de doctorat de l'université de Henri Poincaré, Nancy I Décembre 2006.

[1.24]: Rodriguez JL, Arnaltes S, Rodriguez MA. "Operation and coordinated control of fixed and variable speed wind farms". *Renew Energy* 2008; 33:406-14.

[1.25]: Niknam T. "A new HBMO algorithm for multi objective daily Volt/Var control in distribution systems considering distributed generators". *Appl Energy* 2011; 88: 778-88.

[1.26]: L Bilal, « Commande vectorielle et transfert des puissances de la machine asynchrone à double alimentation », Mémoire De Magistère En Electrotechnique, UNIVERSITE de SKIKDA,2011..

[1.27]: Mr. Abderrahim ZEMMIT , « Commandes en Tension d'un Moteur Asynchrone à Double Alimentation (MADA) », MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE,Msila.

[1.28]: AKEL Fethi: « Etude et Réalisation d'un Emulateur de Turbine Eolienne », Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, École militaire polytechnique, Alger, 2009.[1.29]: M. Bouharkat, "Etude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone à cage en régime dynamique,» Thèse de doctorat de l'université de Batna, 2006.

Bibliographie Chapter II

[2.1]. WALCZYNA, A. M. *Comparison of dynamics of doubly-fed induction machine controlled in field and rotor-oriented axes Proc. EPE*, Vol. 2, pp. 231-236, Firenze, 1991.

[2.2] DRID, S. *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 électrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2005.

[2.3]. MERABET, E. *Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile*. Thèse de magister de l'université de Batna, 2008.

[2.4]. BOSE, B.K. *Power Electronics and AC Drives*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1986.

[2.5] B. Toual, Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable, Mémoire de magister, Université de Batna,, 2010.

[2.6] G. Salloum, Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation, Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Mars 2007

Références bibliographique

[2.7]: F.LABRIQUE, G.SEGUIER et R.BAUSIERE, "Les convertisseurs de l'électronique de puissance", Editions Lavoisier. 1998

[2.8] KHELDOUN, A. *Amélioration des Performances d'un Variateur de Vitesse par Moteur Asynchrone Contrôlé par la Méthode à Flux Orienté*. Thèse de doctorat de l'université de Boumerdès, 2007

[2.9] KUMAR, V, JOSHI, R.R. *Hybrid Controller based Intelligent Speed Control of Induction Motor*. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, pp 71-75, 2005.

[2.10] H. Amimeur, Contribution au Contrôle de la Machine Asynchrone Double Étoile, Thèse de doctorat de l'université de Batna, juin 2012.



Annexe

Annexe

Annexe A

Données du moteur asynchrone à double alimentation (MADA).

Valeurs nominales : 0.8 kW ; 220/380 V-50 Hz ; 3.8/2.2 A

Connexion du rotor-étoile : 3×120 V; 4.1 A ; 1420 tr/min

Paramètres :

R_s (Résistance du stator) = 11.98 R_r (Résistance du rotor) = 0.904

L_s (Inductance du stator) = 0.414 H L_r (Inductance de rotor) = 0.0556 H

M (Inductance mutuelle) = 0.126 HP = 2

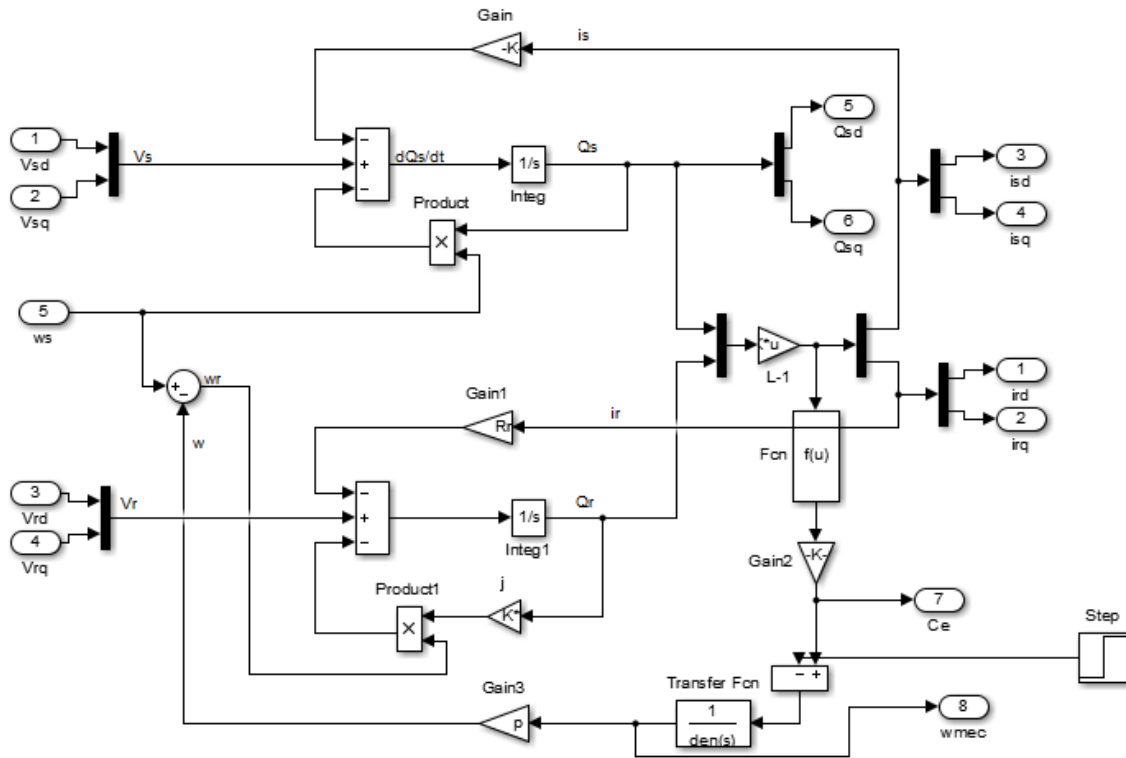
Constantes mécaniques :

J (Inertie de rotor) = 0.01 kg.m²

f (Coefficient de frottement) = 0.00 l.S

Annexe B

Le modèle de la MADA sous SIMULINK/MATLAB.



Le modèle de la commande vectorielle (au rotor) par orientation du flux statorique du MADA sous SIMULINK/MATLAB.

