

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة البليدة 1
Université de BLIDA 1

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

HAMZAOUI FAROUK

&

BAGHA ABDERRAHMANE

pour l'obtention du diplôme Master en Électrotechnique option Machine Electrique

Thème

Analyse des performances d'une chaine éolienne

Proposé par : Mr KOUCHIH DJILALI

Année Universitaire 2013-2014



*Je dédie ce modeste travail à
Mes chères parents, pour leurs soutient moral et d'être la lumière
de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour terminer mes études
dans des bonnes conditions, en leurs espérant une longue vie et que
الله les gardes.*

© Je dédie ce modeste travail à :

+ A ma mère, à ma mère, à ma mère et mon père

+ A mes chères sœurs

+ A toute ma famille

© A tous mes amis surtout :

+ Boukhatem hichem, Maidi Abdel Illeh, Babaci Mohamed,
Ramdan Abdelkader, Hamidouche Walid, Messai Abdennabi,
Masseoudi Omar.

+ A mes chers amis de mon quartier.

+ A mes chers amis de l'université.

+ A mon promoteur **Mr. Dj. Kouchih**, et mon binôme
Hamzaoui Farouk

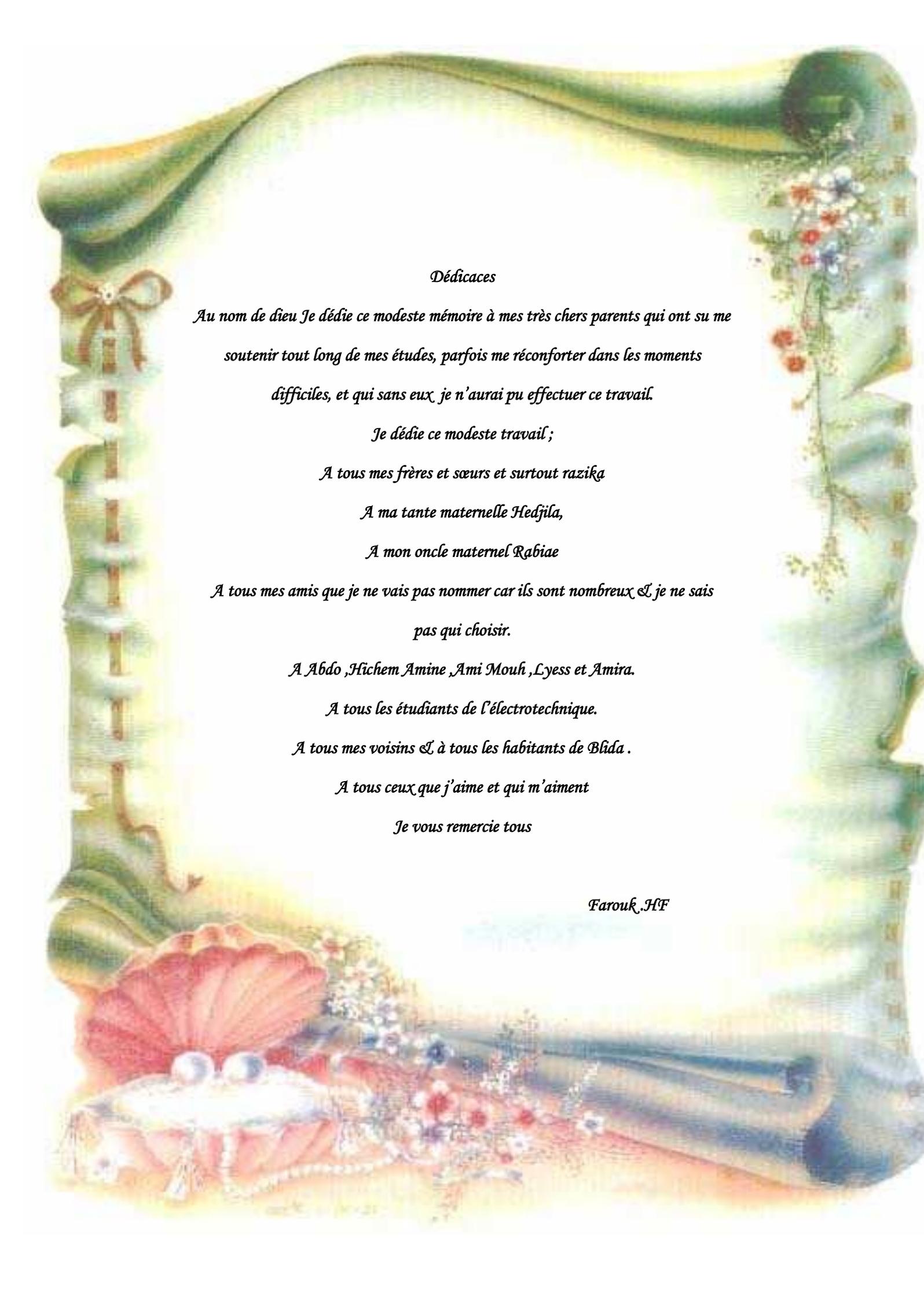
+ A toute la promotion 2013-2014 machine électrique sans
exception.

+ A toute la promotion 2011-2012 électrotechnique sans
exception.

+ A tous ceux que j'aime

Abderrahmane





Dédicaces

Au nom de dieu Je dédie ce modeste mémoire à mes très chers parents qui ont su me soutenir tout long de mes études, parfois me réconforter dans les moments difficiles, et qui sans eux je n'aurai pu effectuer ce travail.

Je dédie ce modeste travail ;

A tous mes frères et sœurs et surtout razika

A ma tante maternelle Hedjila,

A mon oncle maternel Rabiae

A tous mes amis que je ne vais pas nommer car ils sont nombreux & je ne sais pas qui choisir.

A Abdo ,Hichem Amine ,Ami Mouh ,Lyess et Amira.

A tous les étudiants de l'électrotechnique.

A tous mes voisins & à tous les habitants de Blida .

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment

Je vous remercie tous

Farouk HF

Remerciements

Nos remerciements vont premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé, et la patience, qu'il nous a données durant toutes ces années d'étude.

*Nos remerciements tout d'abord Monsieur **Dj. Khochif**, Chargé de Cours à l'Université de Blida, d'avoir proposé ce sujet de mémoire. Nos souhaite lui témoigner nos profonde reconnaissance, toute magratitude et nos respect pour l'intérêt qu'il a porté à nos travail, pour les discussions enrichissantes et instructives qui ont été très motivantes et la confiance qu'il m'a constamment témoignée.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre co-promoteur Mr **N.Boumalha**, pour l'aide et les précieux conseils dont j'ai bénéficiés tout au long de la préparation de ce mémoire.*

Nos sincères remerciements à messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'électronique, et notamment durent les 3 dernières années d'étude, particulièrement **M.Belaazoug** et **Mme Elmaraoui** qui ont été pour nos si riche en conseils judicieux et informations pertinentes.*

Nous adressons des remerciements très sincères pour tous nos collègues de classe .

Enfin, nos n'oublierions pas l'ensemble des personnes qui ont contribue de prés ou de loin a la réalisation de ce travail .

Conclusion générale

Conclusion générale

Lors de cette étude nous avons modélisé un système global de génération d'électricité à partir d'énergie éolienne dans l'objectif d'atteindre des meilleures performances.

On a présenté l'ensemble de l'éolienne, ainsi que la modélisation et la simulation de la turbine éolienne. La clarté des résultats de la simulation nous laisse à conclure que la vitesse du vent influe directement sur la puissance de l'éolienne.

Puis nous allons fait une étude sur la machine asynchrone double alimentation (MADA), avec une bref définition suivie par ça modélisation en tenant compte des hypothèses de simplification, en suite ça représentation dans le repère de Park, nous a permis de faire une simulation et la validation de ceux model, ainsi conclure que la MADA fonctionne d'une façon efficace dans les conditions auxquelles nous l'avons soumise. Cela prouve la fiabilité de son application dans un système éolien.

Pour cela, une commande vectorielle directe en puissance active et réactive statoriques a été élaborée. Dans cette partie, on a présenté l'étude théorique de la commande vectorielle, ou on a exprimé les grandeurs statoriques de la Machine Asynchrone à Double Alimentation en fonction des grandeurs rotoriques ayant pour but le pilotage de la MADA par le rotor. Le bon suivi des consignes pour les deux puissances actives et réactives statoriques ont montré l'efficacité de la commande appliquée à priori la stratégie de régulation en MLI par un onduleur et redresseur à deux niveaux.

Pour couronné notre travail, on a regroupé et synthétisé une chaine éolienne, nous a permis de reflété la qualité des tensions et courants et puissance injecté au réseau.

Tables des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1:Généralités sur les systèmes éliens	
1.1 Introduction	4
1.2 Principes et éléments constitutifs de l'éolien	4
1.2.1. Définition de l'énergie éolienne	4
1.2.2. Principaux composants d'une éolienne	5
1.3. Les différents types d'éoliennes	12
1.3.1. Eoliennes à axe vertical	12
1.3.1.1 Avantages des éoliennes à axe vertical	14
1.3.1.2 Inconvénients des éoliennes à axe vertical	14
1.3.2 Eoliennes à axe horizontal	14
1.3.2.1 Avantages des éoliennes à axe horizontal	15
1.3.2.2 Inconvénients des éoliennes à axe horizontal.....	16
1.4 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique.....	16
1.4.1 Loi de Betz	16
1.4.2 Coefficient de puissance	16
1.4.3 Production d'énergie mécanique	17
1.5. Utilité de la vitesse variable	20
1.6 Modes de régulation.....	20
1.6.1. Système à décrochage aérodynamique « stall ».....	21
1.6.2. Système d'orientation des pales « Pitch ».....	21
1.7 Conversion électromécanique	22
1.7.1. Systèmes de génération d'électricité	22

Tables des matières

1.7.1.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone	22
1.7.1.2 Systèmes utilisant la machine synchrone	23
1.7.1.3 Systèmes utilisant des machines spéciales.....	23
1.7.2 Utilisation de MADA dans la conversion électromécanique	23
1.7.2.1 Principe de fonctionnement	23
1.7.2.1.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	24
1.7.2.1.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	25
1.7.2.1.3 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone	25
1.7.2.1.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.....	25
1.7.2.2 Différentes topologies de la MADA	26
1.7.2.2.1 Machine asynchrone à double alimentation type « Brushless »	26
1.7.2.2.2 Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné.....	27
1.7.2.2.2.1 Machine asynchrone à double alimentation Structure Scheibius avec - cycloconvertisseur.....	28
1.7.2.2.2.2 Machine asynchrone à double alimentation Structure Scheibius avec -convertisseur_MLI	28
1.7.3 Application de la MADA dans le domaine éolien.....	29
1.8 Conclusion	30
Chapitre 2 : Modélisation de la MADA	
2.1 Introduction.....	31
2.2 D'application des Domaine machines asynchrones à double alimentation.....	31
2.3 Avantages et inconvénients de la MAD	32
2.3.1 Avantages de la MADA	32

Tables des matières

2.3.2 Inconvénients de la MADA	32
2.4 Description du fonctionnement de la MADA.....	33
2.4.1 Structure de la machine.....	33
2.4.2 Modes de fonctionnement de la MADA.....	34
a. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	34
b-Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	35
c. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.....	35
d. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.....	36
2.5 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le plan – abc.....	36
2.5.1 Hypothèses simplificatrices.....	38
2.5.2 Equations électriques de la machine.....	38
2.5.3 Equations mécaniques de la machine.....	40
2.6 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le plan – d-q.....	40
2.6.1 La transformation de Park	40
2.6.2 Modélisation de la MADA dans le repère de PARK.....	41
2.6.3 Choix du référentiel.....	42
2.6.3.1 Référentiel lié au stator.....	42
2.6.3.2 Référentiel lié au rotor.....	42
2.6.3.3 Référentiel lié au champ tournant.....	42
2.7 Mise sous forme d'équations d'état.....	43
2.8 Simulation et interprétation.....	44

Tables des matières

2.9 Conclusion.....	47
---------------------	----

Chapitre 3 : Cascade MADA -redresseur N.P.C à deux niveaux- Onduleur N.P.C à deux niveaux

3.1 Cascade redresseur à deux niveaux –onduleur à deux niveaux- MADA.....	48
---	----

3.2 Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI.....	49
---	----

3.3 Contrôle du convertisseur coté réseau.....	50
--	----

3.4 Modélisation.....	50
-----------------------	----

3.4.1 Partie puissance.....	50
-----------------------------	----

3.4.2 Source d'alimentation.....	51
----------------------------------	----

3.4.3 Redresseur à MLI.....	52
-----------------------------	----

3.4.4 La charge.....	53
----------------------	----

3.5 Commande du redresseur en courant par hystérésis.....	54
---	----

3.6 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux.....	54
---	----

3.6.1 Définition.....	54
-----------------------	----

3.6.2 Principe de la MLI	57
--------------------------------	----

3.7 Simulation et interprétation.....	59
---------------------------------------	----

3.8 Modélisation d'une turbine éolienne	60
---	----

3.8.1 Modélisation de la turbine.....	60
---------------------------------------	----

3.8.1.1 La puissance d'une éolienn.....	61
---	----

3.8.1.2 La puissance aérodynamique.....	61
---	----

3.8.1.3 Le coefficient de puissance.....	62
--	----

3.8.2 Modèle du Multiplicateur.....	63
-------------------------------------	----

3.8.3 Equation dynamique de l'arbre.....	63
--	----

Tables des matières

3.8.4 Schéma bloc du modèle de la turbine.....	64
3.9 Fonctionnement d'une centrale éolienne.....	65
3.10 Simulations et Interprétations des Résultats.....	66
3.11 Conclusion.....	67
 <u>Chapitre 4</u> : La commande des puissances active et réactives de la -MADA par des régulateurs PI	
4.1 Introduction.....	68
4.2 Principe de la commande vectorielle de la MADA.....	68
4.2.1 Procède d'orientation du flux.....	70
4. 2.2 Commande indirecte de la MADA	73
4.2.3. Schéma synoptique du dispositif étudié.....	75
4.3 Simulations et Interprétations des Résultats.....	75
4.4Conclusion	79
Conclusion générale.....	80
Annexe	81
Bibliographie	84

Liste des figures

Figure 1.1 :	Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur.....	05
Figure 1.3 :	La nacelle.....	06
Figure 1.4 :	Les composants de la nacelle.....	07
Figure 1.5 :	Montage de rotor.....	08
Figure 1.6 :	Les Pales.....	09
Figure 1.7 :	Chaîne de fabrication de générateurs d'éoliennes.....	09
Figure 1.8 :	Le multiplicateur.....	10
Figure 1.9 :	L'arbre de transmission.....	10
Figure 1.10 :	Système d'orientation de la nacelle.....	11
Figure 1.11 :	Système de contrôle (commande).....	11
Figure 1.12 :	La Fondation.....	12
Figure 1.13 :	Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable.....	13
Figure.1.14 :	Eoliennes à axe horizontal.....	15
Figure 1.15 :	Principe de la théorie de Betz.....	16
Figure 1.16 :	Coefficient de puissance.....	17
Figure 1.17 :	Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....	18
Figure 1.18 :	Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.....	19
Figure 1.19 :	Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.....	20
Figure 1.20 :	Flux d'air sur un profil de pale " stall ".....	21
Figure 1.21 :	Variation de l'angle de calage d'une pale.....	21
Figure 1.22 :	Variation de l'angle de calage d'une pale.....	22

Liste des figures

Figure 1.23 :	Bilans simplifiés des transferts d'énergie dans une machine à double alimentation lorsque la vitesse varie de la moitié au double de Ω	24
Figure 1.24 :	MADA à double stator.....	26
Figure 1.25 :	Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.....	27
Figure 1.26 :	Machine asynchrone à rotor bobiné (document "Joliet Equipement")....	27
Figure 1.27 :	Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	28
Figure 1.28 :	structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	29
Figure 1.29 :	Puissance produite par la MADA en fonction de la vitesse du vent.....	30
Figure.2.1 :	Principe du rotor bobiné.....	33
Figure.2.2 :	Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	34
Figure.2.3 :	Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	35
Figure.2.4 :	Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.....	35
Figure.2.5 :	Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.....	36
Figure.2.6 :	MADA avec des bagues collectrices.....	37
Figure.2.7 :	Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation.....	37
Figure.2.8 :	Passage du triphasé au biphasé.....	40
Figure.2.9:	Couple électromagnétique de la MADA.....	44
Figure.2.10 :	La vitesse de la MADA.....	44
Figure.2.11 :	Les flux statoriques de PARK de la MADA.....	45
Figure.2.12:	Les caurants rotorique de PARK de la MADA.....	45
Figure.2.13:	La puissance active et réactive de la MADA.....	46

Liste des figures

Figure.3.1 :	Structure de la cascade du redresseur du courant à MLI à deux niveaux - Onduleurs de tension à deux niveaux –MADA.....	48
Figure.3.2:	Schéma du circuit de puissance.....	50
Figure.3.3 :	Schémas de la source d'alimentation.....	51
Figure.3.4 :	Représentation des interrupteurs d'un convertisseur AC/DC – triphasé.....	52
Figure.3.5 :	Schéma du bloc de la charge.....	53
Figure. 3.6 :	Onduleur de tension à deux niveaux.....	55
Figure. 3.7 :	Principe de la MLI triangle-sinusoïdale.....	58
Figure.3.9:	Signes de commande de l'onduleur.....	59
Figure.3.10:	Tensions simples l'onduleur.....	59
Figure.3.11 :	Principe de la MLI sinus –triangle.....	59
Figure.3.12 :	Tension redressé.....	60
Figure.3.13 :	Schéma de la turbine éolienne.....	60
Figure.3.14:	Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne - (angle de calage fixe).....	62
Figure.3.15:	Schéma bloc du modèle de la turbine.....	66
Figure .3.16 :	Structure générale d'un système de conversion de l'énergie -éolienne.....	66
Figure 3.17 :	Simulation de la turbine mode sous MATLAB.....	67
Figure 4.1 :	Commande d'une MCC et commande vectorielle d'une MADA.....	68
Figure.4.2 :	position du référentiel par rapport au flux.....	69
Figure.4.3:	Schéma bloc de la MADA.....	72
Figure 4.4 :	Schéma bloc de la commande directe.....	73

Liste des figures

Figure 4.5 :	Schéma bloc de la commande indirecte.....	73
Figure 4.6 :	Schéma bloc de la régulation du courant.....	74
Figure 4.7 :	Schéma global du système étudié.....	75
Figure 4.8 :	Résultats de simulation suit à une application de profile du vent.....	76
Figure 4.9 :	Couple électromagnétique	78
Figure 4.10 :	La sortie de l'onduleur	78
Figure 4.11 :	Schéma bloc d'un système réglé par un PI.....	82

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة البليدة 1
Université de BLIDA 1

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

HAMZAOUI FAROUK

&

BAGHA ABDERRAHMANE

pour l'obtention du diplôme Master en Électrotechnique option Machine Electrique

Thème

Analyse des performances d'une chaine éolienne

Proposé par : Mr KOUCHIH DJILALI

Année Universitaire 2013-2014

ملخص:

التطور التكنولوجي للناعورة الهوائية في تقدم مستمر هذه السنوات الأخيرة. الهدف من هذا العمل هو محاولة خطوة لتطوير هذا النموذج لتوليد الطاقة الكهربائية التي تحتوي على إيجابيات مناخية ملحوظة إدماج هذا النظام الذي استعملناه, هو نموذج متكون من توربينة هوائية مجمعة مع الماكنة اللاتزامنية ذات التزويد المضاعف و هي التي تم اختيارنا لها لهذه الدراسة. الهدف من هذه الدراسة, هو الحصول على مردود طاقي أقصى. **كلمات مفتاحية:** التربينات الهوائية, الماكنة اللاتزامنية ذات التزويد المضاعف , النموذج

Résumé :

L'évolution de la technologie éolienne s'est fortement accélérée ces dernières années. L'objectif de ce travail est d'essayer d'ajouter un pas au développement de cette filière de production d'énergie qui présente un avantage environnemental considérable.

Pour notre système, le modèle de la turbine est associé au convertisseur statique (onduleur + redresseur à deux niveaux) et le modèle de la MADA qui est le type de machine choisi pour cette étude. L'objectif de cette étude c'est d'être obtenir un rendement énergétique maximal.

Mots clés : Eolien - MADA- Modélisation

Abstract :

The development of wind turbine technology has greatly accelerated in recent years. The purpose of this work is to try to add a step in the development of this sector of energy production that presents a significant environmental benefit.

For our system, the model of turbine is associated with the model of the DFIG which is the type of machine chosen for this study. The objective of this study, to optimize the energetic behavior.

Keywords: Wind turbine - DFIG- Model

2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de mener une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant son principe de fonctionnement, les différentes stratégies de commande, et évaluer les performances apportées par cette machine. On présentera aussi sa modélisation dans le repère de Park avec ses deux alimentations, l'une alimente le stator avec un couplage direct au réseau et l'autre alimente le rotor à fréquences variables.

2.2 D'application des Domaine machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation a été conçue pour fonctionner en moteur sur une grande plage de variation de vitesse comme première application. L'utilisation d'une MADA permet de varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques, ce dispositif sera donc économique quand on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d'environ 70% [24] [25]. Pour le fonctionnement de la MADA en génératrice, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [25]:

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation du carburant.

2.3 Avantages et inconvénients de la MADA

Nous allons aborder dans ce paragraphe quelques avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable.

2.3.1 Avantages de la MADA

- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- La mesure des courants au stator et rotor, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor: en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement[16], [13].

2.3.2 Inconvénients de la MADA

- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.
- Machine plus volumineuse que celle à cage, à causes des balais [25][24].

Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que les autres types de MADA. Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la fiabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable. La bi-directionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance.

Chapitre 2 : Modélisation de la MADA

De plus, le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau. La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des dv/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements [26].

2.4 Description du fonctionnement de la MADA

2.4.1 Structure de la machine

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écuréuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques.

On peut voir sur la (Figure.2.1) que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor.

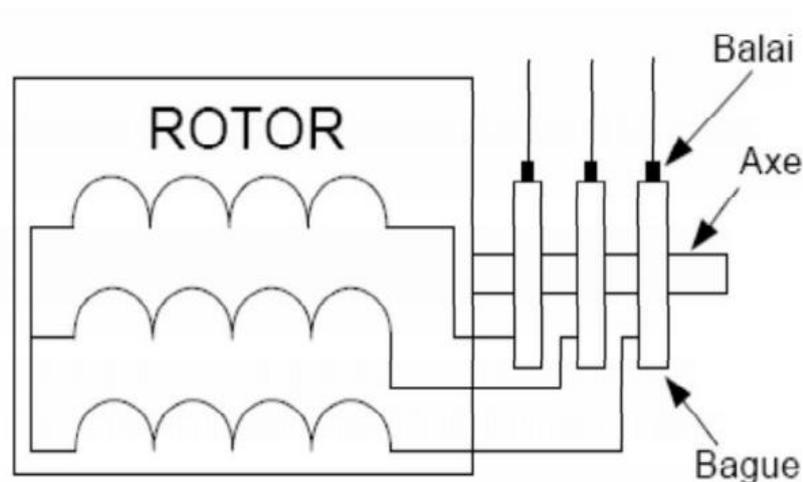


Figure.2.1.Principe du rotor bobiné.

Chapitre 2 : Modélisation de la MADA

2.4.2 Modes de fonctionnement de la MADA

Seul le mode de fonctionnement avec le stator directement connecté au réseau et le rotor alimenté par un onduleur nous concerne dans cette étude.

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [27].

2.4.2.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

La (Figure 2.2) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme.

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

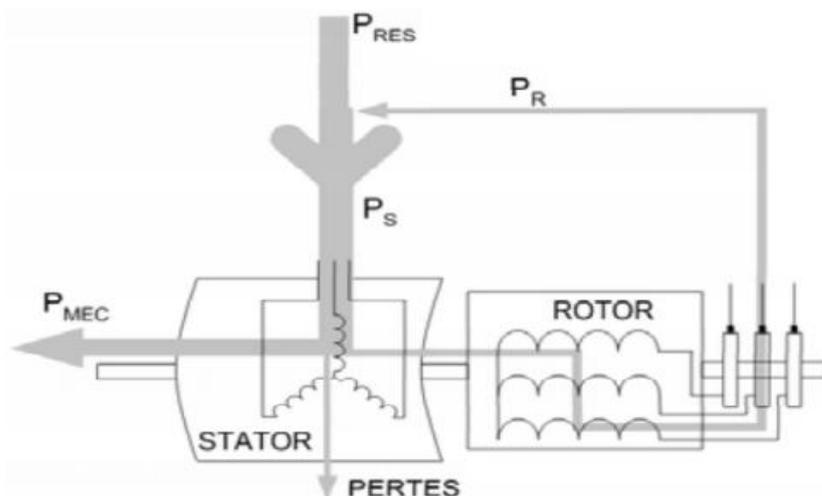


Figure.2.2. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.

Chapitre 2 : Modélisation de la MADA

2.4.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

La (Figure 2.3) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor .On a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme .La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

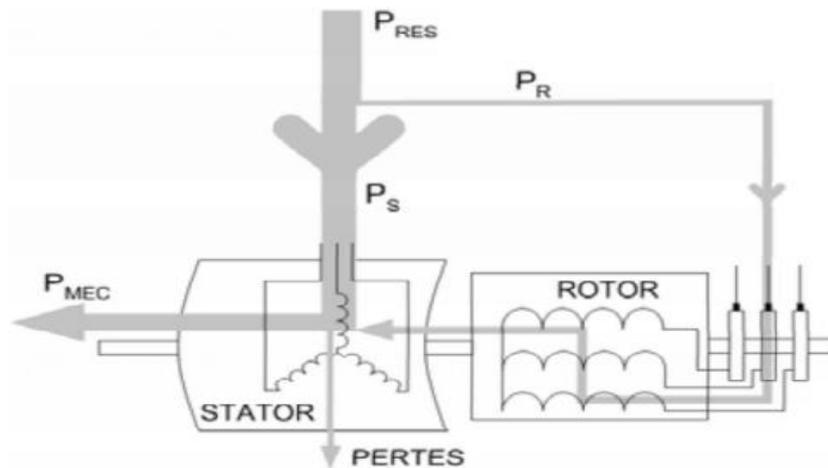


Figure.2.3.Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

2.4.2.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

La (Figure 2.4) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator .La puissance de glissement est aussi fournie par le stator.

On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut avoir ce mode de fonctionnement.

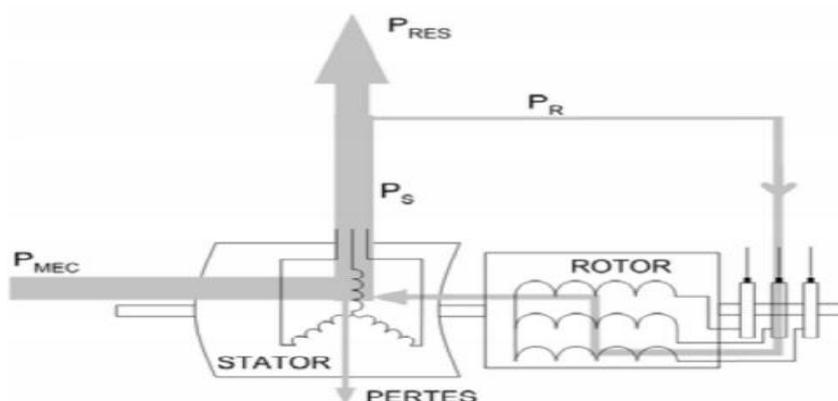


Figure.2.4.Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.

Chapitre 2 : Modélisation de la MADA

2.4.2.4 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

La (Figure 2.5) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

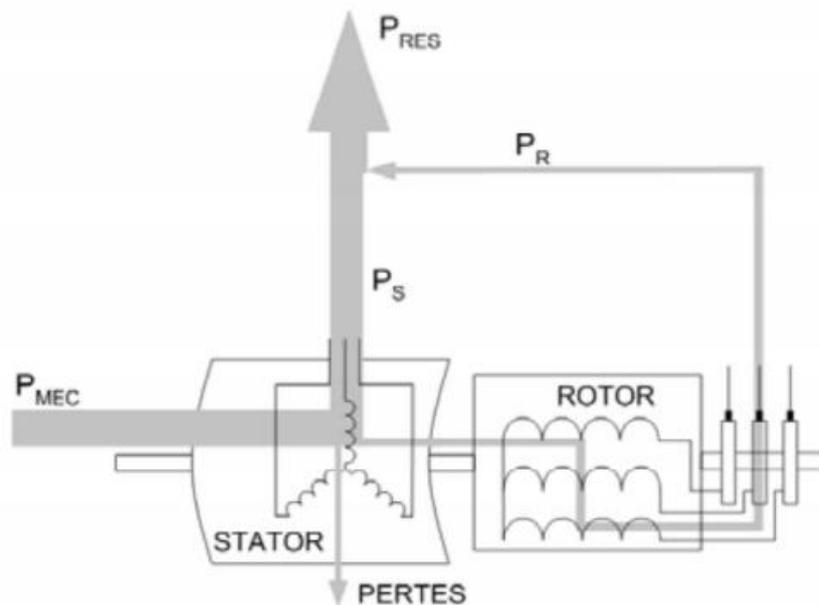


Figure.2.5. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique : la production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement.

2.5 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le plan abc

Cette section décrit le modèle dynamique d'une machine asynchrone à double alimentation. La machine asynchrone à double alimentations se compose principalement de deux parties, stator et rotor (Figure.2.6). Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par un entrefer.

En principe les circuits électriques du stator et du rotor sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui

Chapitre 2 : Modélisation de la MADA

du rotor relié à trois ou quatre bagues sur lesquelles glissent des balais. Les trois enroulements du stator (A, B et C) sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoidalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre. La (Figure.2.7) illustre la distribution des enroulements dans une machine asynchrone à rotor bobiné à une paire de pôle $P=1$. Souvent la machine sera construite avec plusieurs paires de pôles en reliant les enroulements en parallèle et les bobines seront décalées de $120/P$. Dans ce cas la machine donne un couple plus grand et une vitesse de rotation réduite. [28]

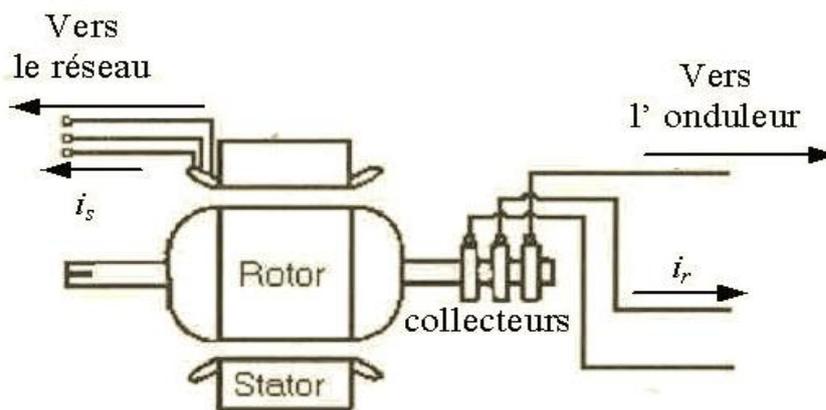


Figure.2.6.MADA avec des bagues collectrices.

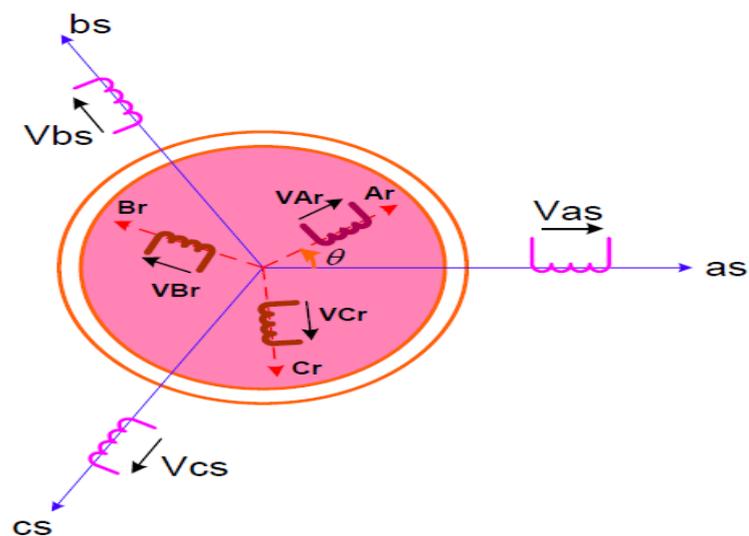


Figure.2.7.Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation.

as, bs, cs : phase du stator.

Ar, Br, Cr : phase du rotor.

Chapitre 2 : Modélisation de la MADA

2.5.1 Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. De ce fait, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, dans le but d'établir un modèle simple, qui sont [29] :

- La machine est de constitution symétrique.
- On suppose que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor (seuls les enroulements sont parcourus par des courants) et que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (absence d'effet pelliculaire).
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, condition nécessaire pour considérer les flux comme fonction linéaire des courants.
- On considère que la force magnétomotrice créée par chacune des phases statoriques et rotoriques est à répartition sinusoïdale.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligé, les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques.

2.5.2 Equations électriques de la machine

Avec les hypothèses citées ci dessus, les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \end{cases} \quad (2.1)$$

$$[V_r] \neq 0$$

Les flux sont donnés par :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (2.2)$$

Chapitre 2 : Modélisation de la MADA

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} v_{Ar} \\ v_{Br} \\ v_{Cr} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} i_{Ar} \\ i_{Br} \\ i_{Cr} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

R_s, R_r : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

Les flux sont donnés par:

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

l_s, l_r : Inductances de fuites des statoriques et rotoriques.

M_s, M_r : Inductances mutuelles.

la matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) \\ \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) \\ \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

En remplaçant (I.2) dans (I.1), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [I_s]) + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [I_r]) \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \cdot [I_r]) + \frac{d}{dt} ([M_{rs}] \cdot [I_s]) \end{cases} \quad (2.4)$$

2.5.3 Equations mécaniques de la machine

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante

$$C_{em} = p[I_s]^t \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}] \cdot [I_r]) \quad (2.5)$$

Donc, l'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_{em} - C_r - f_r \cdot \omega \quad (2.6)$$

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation de la machine).

2.6 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le plan d-q

2.6.1 La transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système [30].

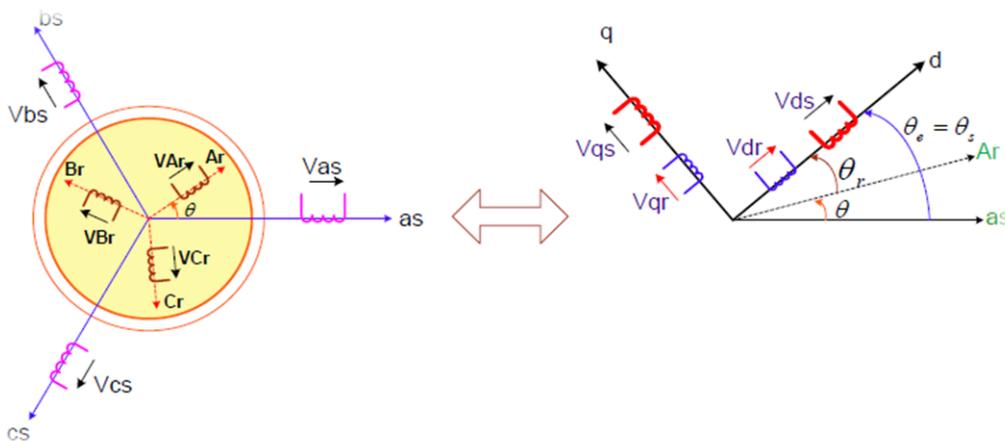


Figure.2.8. Passage du triphasé au biphasé.

Chapitre 2 : Modélisation de la MADA

La matrice de transformation est définie par :

$$P(\alpha) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha - 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\alpha - 4\frac{\pi}{3}) \\ -\sin(\alpha) & -\sin(\alpha - 2\frac{\pi}{3}) & -\sin(\alpha - 4\frac{\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

L'angle α est au choix de l'utilisateur et peut dépendre du temps. Le fait que $[P(\alpha)]$ soit orthonormée implique que son inverse est égale à sa transposée.

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

2.6.2 Modélisation de la MADA dans le repère de PARK

Les tensions, courants et les flux se transforment de la manière suivante :

$$\begin{cases} [V_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [V_{s,abc}] \\ [V_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [V_{r,abc}] \end{cases} \quad \begin{cases} [i_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [i_{s,abc}] \\ [i_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [i_{r,abc}] \end{cases}$$

$$\begin{cases} [\Phi_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [\Phi_{s,abc}] \\ [\Phi_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [\Phi_{r,abc}] \end{cases}$$

Les relations entre les flux et les courants sont données par :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} \quad \begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (2.8)$$

tel que :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr} = \frac{3}{2} M_{rs}$ Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

Les équations électriques sont :

Avec : $\omega_s = \omega_e$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_e \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_e \Phi_{ds} \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_e - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_e - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.10)$$

Avec :

$$\begin{cases} \omega_e = \frac{d}{dt} \theta_e \\ \omega = \frac{d}{dt} \theta \end{cases} \quad \text{avec : } \theta_e = \theta_s = \theta + \theta_r$$

2.6.3 Choix du référentiel

2.6.3.1 Référentiel lié au stator

$$\frac{d\theta_e}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega$$

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées.

2.6.3.2 Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_e = \omega$. Il est intéressant dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante.

Il se traduit par la condition :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_e}{dt} = \omega$$

2.6.3.3 Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_e = \omega_s$. Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines. [31]

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_e \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_e \Phi_{ds} \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_e - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_e - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.12)$$

Avec :

$$\begin{cases} C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \\ \frac{J}{p} \frac{d\omega_m}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \end{cases} \quad (2.13)$$

2.7 Mise sous forme d'équations d'état

Vu la nécessité de représenter le modèle non linéaire de la machine asynchrone à double alimentation sous forme d'équation d'état. Nous allons choisir dans tout ce qui suivra, le vecteur $[\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, i_{dr}, i_{qr}]^t$ comme vecteur d'état et les grandeurs V_{dr}, V_{qr} comme variable de commande. [3].

Après le calcul, nous aboutissons au système suivant:

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} + \alpha_s M i_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \Phi_{qs} - \omega_s \Phi_{ds} + \alpha_s M i_{qr} + V_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r i_{dr} + (\omega_s - \omega) i_{qr} + \alpha_s \beta \Phi_{ds} - \beta \omega \Phi_{qs} - \beta V_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} V_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r i_{qr} - (\omega_s - \omega) i_{dr} + \alpha_s \beta \Phi_{qs} + \beta \omega \Phi_{ds} - \beta V_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} V_{qr} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p\mu}{J} (\Phi_{qs} i_{dr} - \Phi_{ds} i_{qr}) - \frac{1}{J} C_r - \frac{f_r}{J} \omega \end{cases} \quad (2.14)$$

Avec :

$$\begin{cases} \alpha_s = \frac{R_s}{L_s} \\ \sigma_r = L_r \cdot \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) \\ \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{L_s^2 \sigma_r} \end{cases} \quad \begin{cases} \beta = \frac{M}{L_s \sigma_r} \\ \mu = \frac{3M}{2L_s} \end{cases}$$

2.8 Simulation et interprétation

A l'aide de logiciel MATLAB, nous allons simuler la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement générateur. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park lié au champ tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 4 KW.

Les figures ci dessous sont obtenus pour le modèle de MADA, entraînée à une vitesse fixe égale à 1440 tr/min, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence de 50Hz et d'amplitude $V = 690V$, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 16 V et une fréquence égale à la fréquence rotorique ($g \cdot \omega_s$).

Nous avons simulé la MADA pour trois types de fonctionnement :

Durant la première étape, le temps compris entre 0s et 0.8s démarrage a vide .dans le deuxième étape a l'intervalle du temps 0.8s jusqu'a 1.3s la machine fonctionnée en charge d'un couple résistant de 26.52 (N.m), et avec application d'un couple résistant de 60 (N.m) entre deux instants 1.3s et 2s la machine fonctionnée sur charge. Les résultats sont représentés dans les figures suivantes :

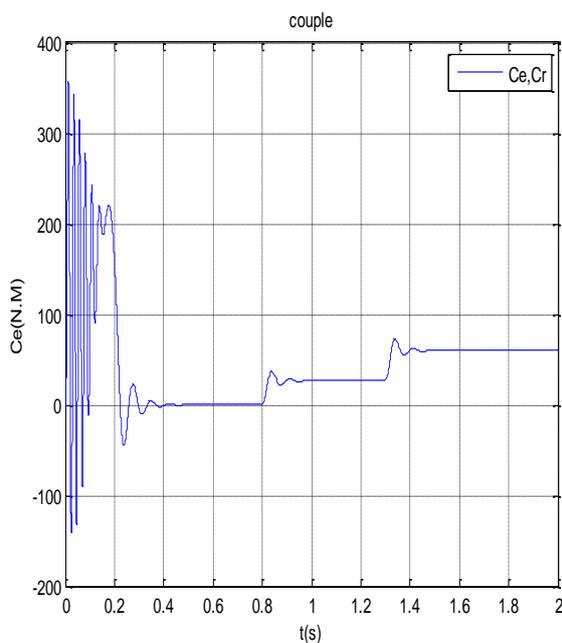


Figure.2.9:Couple électromagnétique de la MADA.

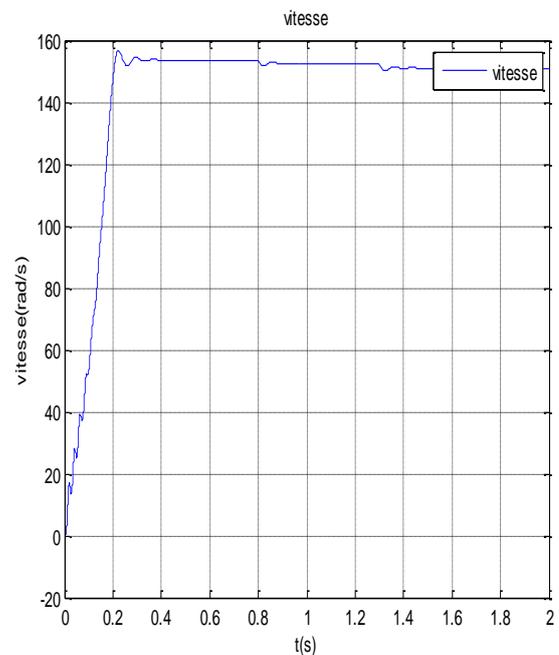


Figure.2.10:La vitesse de la MADA.

Chapitre 2 : Modélisation de la MADA

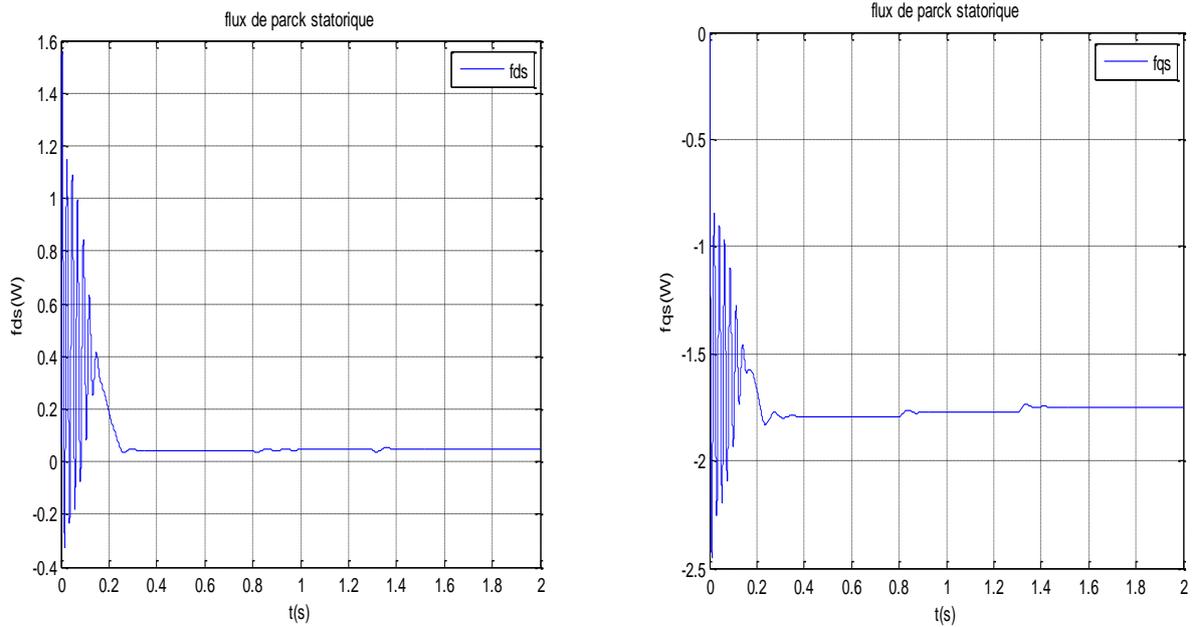


Figure.2.11: Les flux statoriques de PARK de la MADA

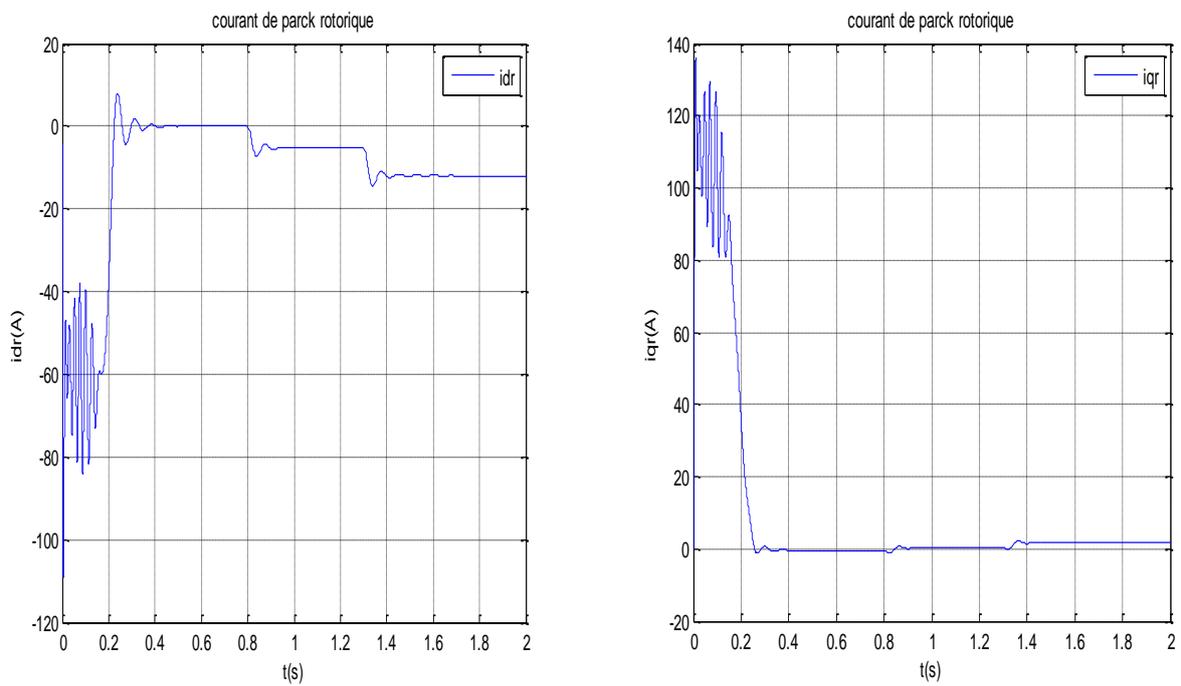


Figure.2.12: Les caurants rotorique de PARK de la MADA

Chapitre 2 : Modélisation de la MADA

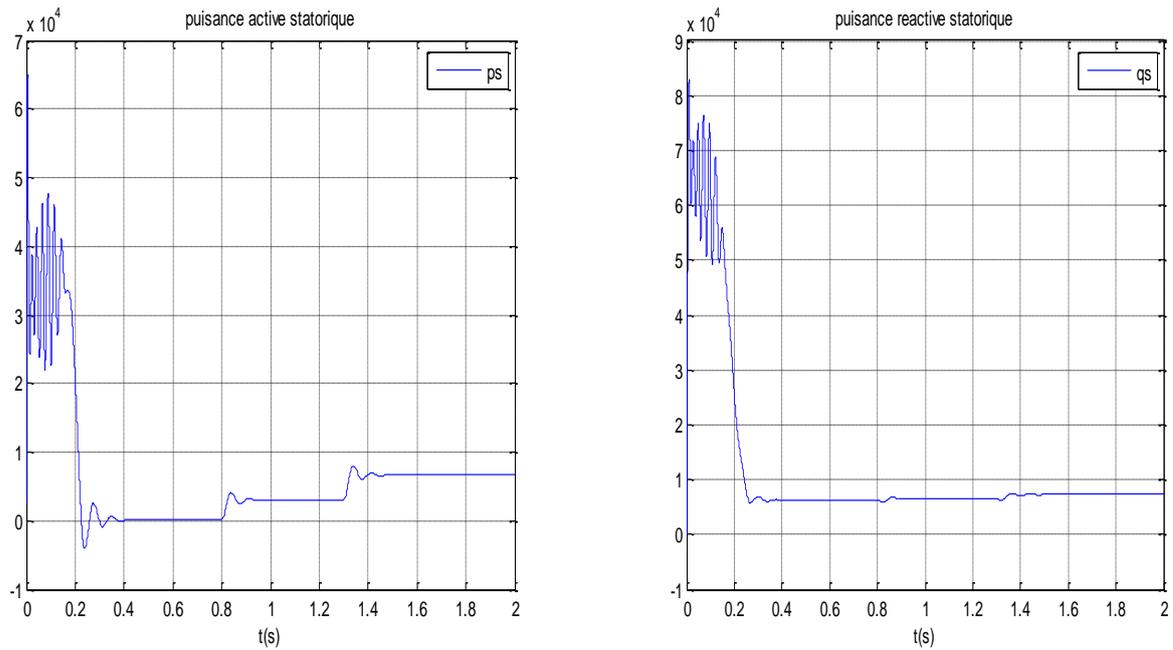


Figure.2.13:La puissance active et réactive de la MADA

On constate que les grandeurs de la machine en régime transitoire sont oscillatoires pendant une durée courte 0.2 s.

On remarque aussi que la vitesse de rotation à vide atteint une valeur proche de 150 rad/s, et l'hors d'application d'un couple résistant de 26.52 Nm et 60 Nm, la vitesse diminue et le couple électromagnétique augmente.

Les résultats montrent aussi que les flux statoriques Φ_{ds} , Φ_{qs} augmentent légèrement à l'instant de l'application de la charge.

2.9 Conclusion

Nous avons commencé ce chapitre par la présentation d'un domaine d'application des machines asynchrones à double alimentation, précisant ainsi sa constitution, sa structure et son principe de fonctionnement. Ensuite, nous allons présenter le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation. Le modèle triphasé, obtenu sous certaines hypothèses simplificatrices, est réduit en un modèle biphasé à l'aide de la transformation de PARK. Après avoir déduit les équations d'état de la machine, on a simulé la (MADA) pour un démarrage à vide avec une application d'une couple résistant, donc on a pu valider notre modèle.

3.1 Cascade redresseur à deux niveaux –onduleur à deux niveaux- MADA

La cascade présentée à la (Figure 3.1), comporte deux convertisseurs à MLI, chaque convertisseur à six interrupteurs (transistors IGBT) qui peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture. L'utilisation de ce type de convertisseurs permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsion dont la modularité permet de limiter les perturbations.

Plusieurs études récentes montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable [1], [32], [33]. La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise le fonctionnement en hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance coté réseau. Le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine si le glissement reste inférieur a+30% autour du synchronisme.

De plus, le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie de stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau. On trouve ainsi la puissance totale produite alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire [34].

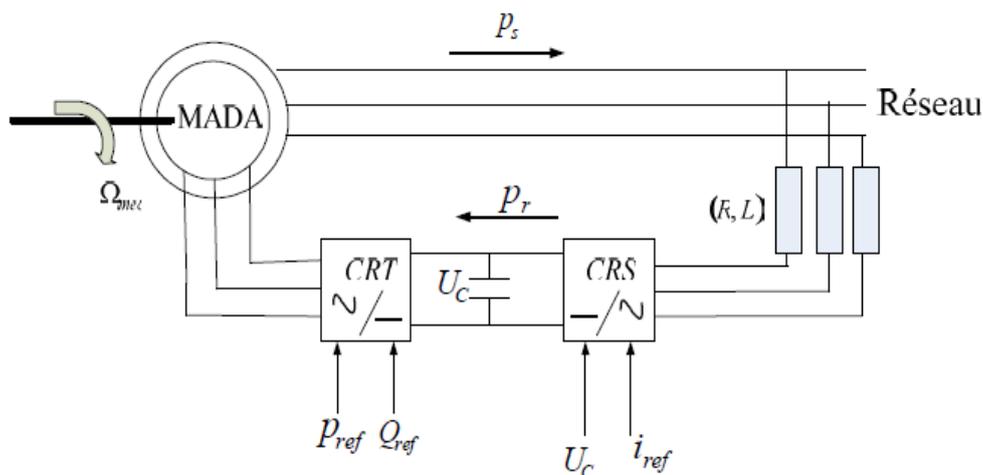


Figure.3.1 : Structure de la cascade du redresseur du courant à MLI à deux niveaux-Onduleurs de tension à deux niveaux –MADA.

Dans notre étude la machine est entraînée par une vitesse en régime hypo synchrone ($N < N_s$), la puissance rotorique est donc absorbée. Le convertisseur coté rotor (CRT) fonctionne en onduleur à MLI à deux niveaux. L'onduleur règle l'amplitude et la

fréquence du signal à envoyer vers le rotor de la MADA. Le convertisseur coté réseau (CRS) fonctionne comme redresseur. Il transforme le signal fourni par le réseau en signal continu. Le passage par le bus continu est indispensable pour permettre à l'onduleur de régler amplitude et la fréquence.

3.2 Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI

La structure de la cascade est celle représentée sur la (Figure 3.1). Les deux convertisseurs interposés entre le rotor de la MADA et le réseau sont de type MLI à deux niveaux, bidirectionnels en puissance. Le modèle du convertisseur connecté au rotor a été déjà présenté dans le deuxième chapitre où les signaux de commande sont déterminés en appliquant la commande vectorielle à la MADA. Le convertisseur coté réseau aura le même modèle que l'autre, sauf que les signaux de commande seront déterminés en faisant un asservissement de la tension du bus continu.

Le redresseur à MLI a le même principe de fonctionnement qu'un hacheur élévateur. La tension de sortie d'un redresseur à MLI est toujours supérieure à sa tension d'entrée, pour cela il faut régler cette tension de sortie suite à la nécessité de la charge utilisée. Pour accomplir cette tâche, la tension de sortie du redresseur est mesurée et comparée à une référence. Ce type de convertisseur peut opérer en redresseur ou en onduleur. Quand le courant I_{ch} est positif (Opération redresseur), le condensateur C est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande plus d'énergie à partir du réseau, le bloc de commande prend l'énergie d'alimentation en produisant des signaux appropriés à l'amorçage des transistors. De cette façon l'écoulement de courant du coté alternatif vers le coté continu, et la tension de condensateur est récupérée. Inversement, quand I_{ch} devient négatif (Opération Onduleur), le condensateur C est surchargé, et le signal d'erreur demande à la commande la décharge du condensateur et renvoyé l'énergie vers le réseau [35].

L'avantage de la commande MLI ne s'arrête pas au contrôle de la puissance active, mais la puissance réactive également, permettant à ce type de convertisseur de corriger le facteur de puissance du réseau. Ainsi, la commande MLI nous permet d'avoir une bonne qualité de signal (formes sinusoïdales), ramenant le contenu harmonique vers des fréquences élevées et par la suite la facilité de filtrage.

3.3 Contrôle du convertisseur coté réseau

L'objectif de ce convertisseur est de maintenir la tension du bus continu constante quelle que soit l'amplitude et le sens de la puissance.

Le principe de fonctionnement de ce convertisseur consiste à mesurer la tension de bus continu et de la comparée à une valeur de référence désirée. Après une correction par un régulateur PI (Proportionnel Intégral), on obtient la puissance active de référence qui va nous fixer par la suite la valeur du courant de référence.

Le réglage de la tension du bus continu est réalisé par une boucle externe (les courants transités sont eux réglés par une boucle interne).

3.4 Modélisation

3.4.1 Partie puissance

La (Figure.3.2) montre la structure du redresseur de courant triphasée à deux niveaux, se compose de trois étages du circuit de puissance, le réseau, le convertisseur MLI, et la charge.

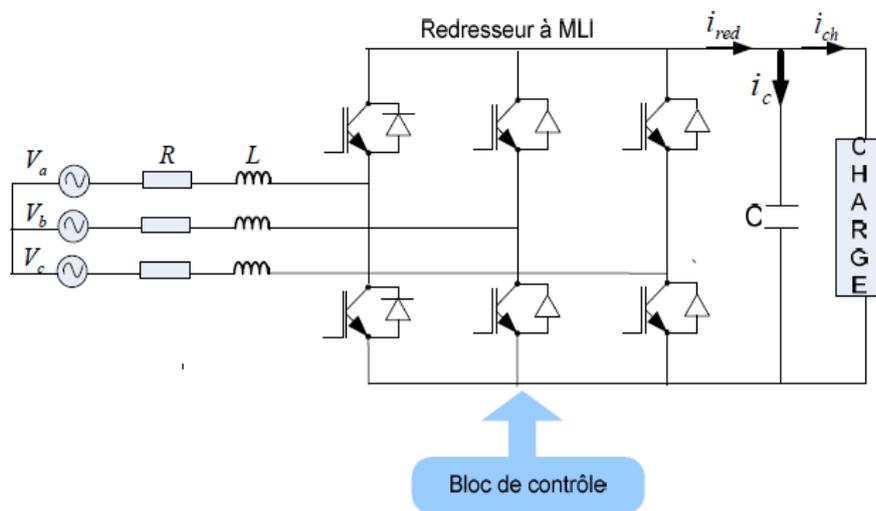


Figure.3.2: Schéma du circuit de puissance.

3.4.2 Source d'alimentation

La source est modélisée par une f. é. m triphasée sinusoïdale en série avec une inductance L et une résistance R qui représentent l'impédance totale de la ligne (Figure.3.3).

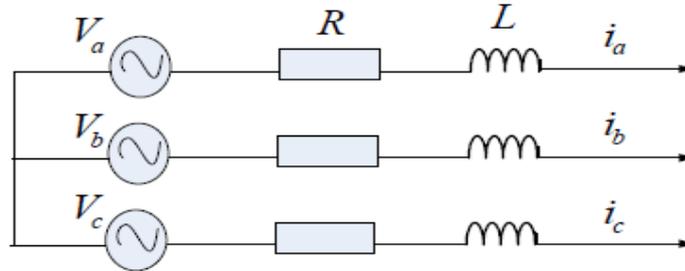


Figure.3.3 : Schémas de la source d'alimentation.

A l'équilibre, avec des impédances des trois phases identiques, les tensions de ligne et les courants fondamentaux sont exprimés comme suit :

$$V_{resj} = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}(j - 1)) \quad (3.1)$$

$$i_{resj} = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}(j - 1) + \varphi) \quad (3.2)$$

- V_m : L'amplitude de la tension ;
- i_m : L'amplitude du courant ;
- ω : La fréquence angulaire ;
- φ : Déphasage entre le courant et la tension.

On s'assure que :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (3.3)$$

Les équations de tension pour un système triphasé équilibré, sans raccordement du fil neutre, peuvent être écrites comme suit figure (3.3):

$$V_{res} = V_{ind} + V_{an} \quad (3.4)$$

$$V_{res} = R \cdot i_L + L \frac{di_L}{dt} + V_{an} \quad (3.5)$$

$$C \frac{dU_c}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{ch} \quad (3.6)$$

Le système d'équations différentielles, donnant le courant (i_a, i_b, i_c) dans chaque phase est donné par l'équation (3-7) :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_a - V_{an} \\ V_b - V_{bn} \\ V_c - V_{cn} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Ou :

$V_a; V_b; V_c$: Les tensions de lignes

$V_{an}; V_{bn}; V_{cn}$: Les tensions à l'entrée du convertisseur

3.4.3 Redresseur à MLI

Le redresseur à MLI donné par la (Figure.3.2) est constitué de six IGBT avec six diodes antiparallèles pour assurer la continuité du courant. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux. Il est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique selon la (Figure.3.2) [36].

On définit les fonctions logiques de connexion par :

$S_j = 1$ Si T_i est fermé et T_i' est ouvert

$S_j = -1$ Si T_i est ouvert et T_i' est fermé

Avec :

$j = a, b, c$ Et $i = 1, 2, 3$

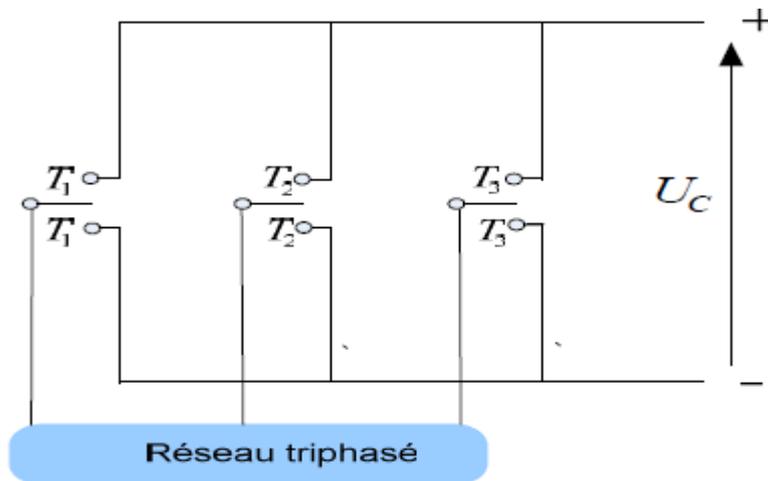


Figure.3.4 : Représentation des interrupteurs d'un convertisseur AC/DC triphasé.

Ainsi les tensions entre lignes sont données par :

$$\begin{aligned} U_{ab} &= U_c \cdot (S_a - S_b) \\ U_{bc} &= U_c \cdot (S_b - S_c) \\ U_{ca} &= U_c \cdot (S_c - S_a) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Connaissant l'état de chaque interrupteur, on peut définir la matrice de conversion du convertisseur. Les tensions simples V_a, V_b et V_c s'expriment par la relation (3-9) :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Le courant redressé est donné par :

$$i_{red} = [S_a \quad S_b \quad S_c] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.4.4 La charge

Ce bloc est constitué d'une capacité C (pour diminuer les ondulations de la tension redressée) placée en parallèle avec une résistance R , modélisant la charge continue (Figure.3.5).

La tension U_c aux bornes de la charge et le courant redressé, est donnée par les deux expressions (3.11) et (3.12) :

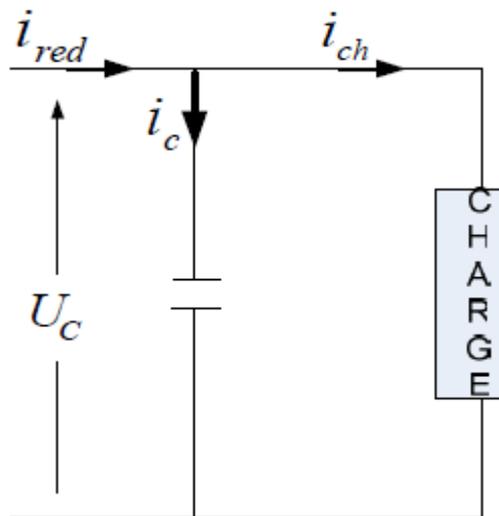


Figure.3.5 : Schéma du bloc de la charge.

L'équation de i_{red} dépend de la nature de la charge :

- A vide : $i_{ch} = 0$
- Pour une charge résistive R:

$$i_{ch} = \frac{U_c}{R} \quad (3.12)$$

3.5 Commande du redresseur en courant par hystérésis

Ce type de commande permet de fixer un courant de référence dans les lignes du réseau électrique avec deux degrés de liberté, l'amplitude et la fréquence. Le principe de cette stratégie est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de références [37].

En utilisant la commande par hystérésis en courant dont l'algorithme est le suivant :

$$\begin{aligned} \text{Si } \varepsilon_k \geq \Delta_i & \Rightarrow B_{ki}=0 \\ \text{Si } \varepsilon_k \leq -\Delta_i & \Rightarrow B_{ki} = 1 \\ \varepsilon_k & = i_{resk} - i_{refk} \end{aligned}$$

Δ_i : La largeur de la bande d'hystérésis

3.6 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux

3.6.1 Définition

L'onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui permet la conversion continue alternative. Il fonctionne en commutation forcée et conçu généralement à base de transistors (IGBT, GTO, MOSFET...). Sa commande peut être réalisée par la technique classique ou par la technique de Modulation de Largeurs d'Impulsions (MLI). Dans ce travail, on commande l'onduleur de tension par la technique à MLI.

L'onduleur est le cœur du système d'alimentation. Il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Il permet d'imposer à la machine des tensions ou des courants à amplitude et fréquence variables [38]. La (Figure.3.6), représente le schéma de principe d'un onduleur triphasé qui alimente la machine.

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfaits [39].

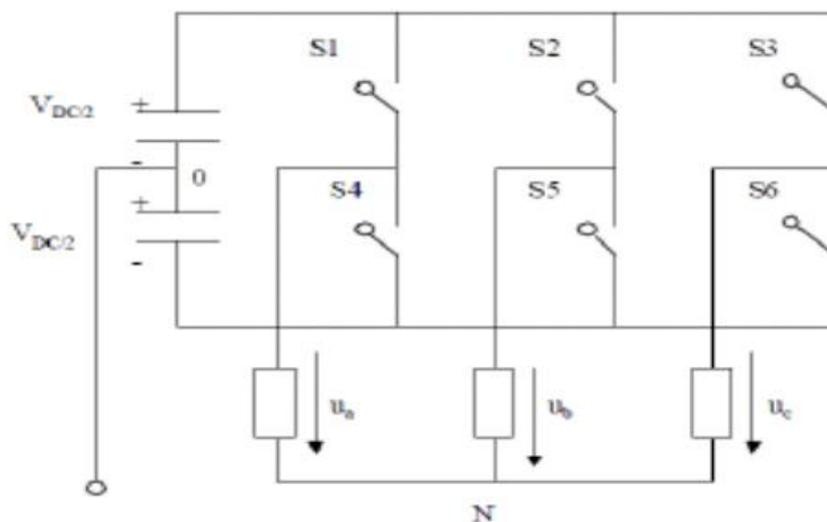


Figure. 3.6 : Onduleur de tension à deux niveaux

On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables (S_a, S_b, S_c) en fonction de l'état des commutations dans les trois branches du convertisseur.

- **Branche1**

$S_a = 0$ si S_1 est en position off et S_4 est à on.

$S_a = 1$ si S_1 est en position on et S_4 est à off.

- **Branche2**

$S_b = 0$ si S_2 est en position off et S_5 est à on.

$S_b = 1$ si S_2 est en position on et S_5 est à off.

• **Branche3**

$S_c = 0$ si S_3 est en position off et S_6 est à on.

$S_c = 1$ si S_3 est en position on et S_6 est à off.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{aligned} U_{ab} &= V_{DC} - (S_a - S_b) \\ U_{bc} &= V_{DC} - (S_b - S_c) \\ U_{ca} &= V_{DC} - (S_c - S_a) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Si on prend en compte l'équilibre des tensions :

$$u_a + u_b + u_c = 0 \quad (3.14)$$

On en déduit les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées comme suit :

$$\begin{aligned} u_a &= \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ u_b &= \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ u_c &= \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

D'où on obtient :

$$\begin{aligned} u_a &= \frac{V_{DC}}{3}(2.S_a - S_b - S_c) \\ u_b &= \frac{V_{DC}}{3}(-S_a + 2.S_b - S_c) \\ u_c &= \frac{V_{DC}}{3}(-S_a - S_b + 2.S_c) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangle-sinusoidale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie [39].

3.6.2 Principe de la MLI

La MLI consiste à former chaque alternance de la tension de sortie de l'onduleur par un ensemble d'impulsions sous forme de créneaux rectangulaires de largeurs modulées de telle sorte à rapprocher cette tension vers la sinusoïde. En effet, la MLI permet de reconstituer ces tensions (ou courants) à partir d'une source à fréquence et à tension fixe (en général une tension continue). Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement [40]. Le principe de la MLI sinus-triangle repose sur la comparaison entre un signal triangulaire de haute fréquence appelé la modulante et un signal de référence appelé la porteuse. La valeur du rapport de fréquence entre la porteuse et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur [12]

La (Figure.3.6) représente un onduleur triphasé de tension commandé par MLI. Celui-ci alimente une charge triphasée de type R L E à partir d'un générateur de tension continue.

En contrôlant les états des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur, on fixe les valeurs des tensions de sortie de l'onduleur U_{ao} , U_{bo} et U_{co} à $+0.5 \mu_F$ ou $-0.5 \mu_F$.

ou $\mu_F = 800V$. L'emploi de la technique MLI pour déterminer les intervalles de conduction des interrupteurs permet de régler de manière indépendante les valeurs moyennes de chacune des tensions U_{ao} , U_{bo} et U_{co} sur chaque période de commutation. Dans ce cas, les instants de commutation sont déterminés par la comparaison de trois ondes de référence avec une onde porteuse qui fixe la fréquence de commutation. Cette comparaison fournit trois signaux logiques f_a , f_b , f_c qui valent 1 quand les interrupteurs du côté haut sont en conduction et ceux de côté bas sont bloqués et valent 0 dans le cas contraire. A partir de ces signaux l'électronique de commande élabore les signaux de commande des interrupteurs.

Si les références forment un système triphasé équilibré de grandeurs sinusoïdales on obtient à la sortie de l'onduleur des ondes de tensions dont les valeurs moyenne forment elle aussi un système triphasé équilibré. On parle dans ce cas ci d'une modulation sinus triangle, par les phases du récepteur ne sont pas directement égales à celles fournies à la sortie de l'onduleur

et se déduisent de celles-ci par la relation suivante, si on admet que la somme des tensions aux bornes des phases du récepteur est nulle.

Cette relation est valable tant au niveau des valeurs instantanées des tensions que de leurs valeurs moyennes sur une période MLI. Il suffit de prendre comme valeurs de référence pour $u_{a0} + u_{b0} + u_{c0}$ les valeurs de référence souhaitées pour $u_a + u_b + u_c$ pour que ces tensions suivent en moyenne leurs références sur chaque période MLI.

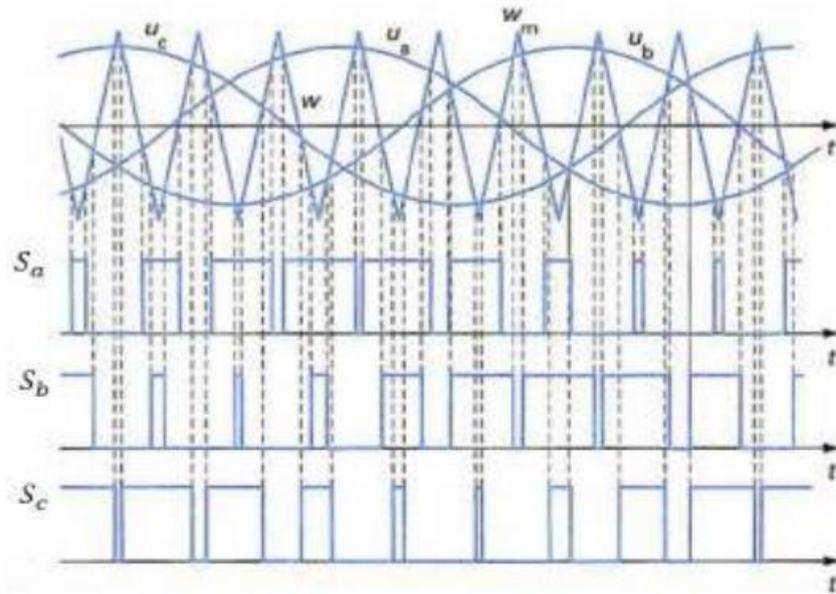


Figure. 3.7 Principe de la MLI triangle-sinusoïdale

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

- L'indice de modulation (m) qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence (f) :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (3.18)$$

- Taux de modulation (r) qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_p) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (3.19)$$

Le choix d'un indice de modulation (m) multiple de trois nous permet d'éliminer les harmoniques d'ordre trois qui représente un handicap de cette technique. Cependant, le taux de modulation (r) varie suivant la référence imposée.

3.7 Simulation et interprétation

Pour cette stratégie de commande, on visualise les tensions de phase u_a, u_b, u_c pour une fréquence $f_s = 50\text{Hz}$ et un rapport d'amplitude $r=0.9$, et cela pour une valeur de $m = 27$. Les résultats de simulation sont représentés par les figures suivantes.

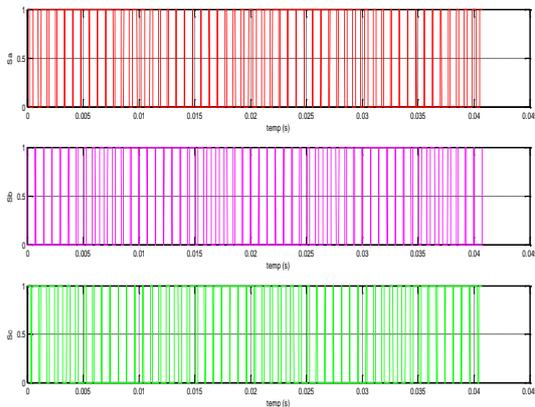


Figure.3.9:signes de commande de l'onduleur.

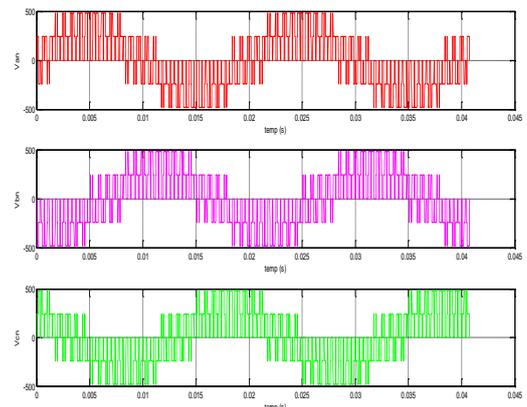


Figure.3.10:Tensions simples l'onduleur.

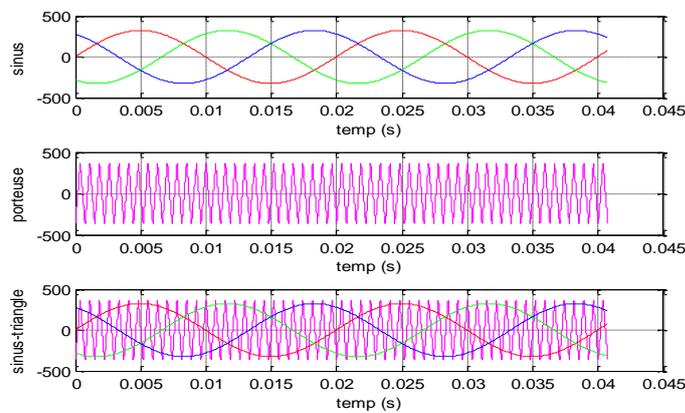


Figure.3.11.Principe de la MLI sinus –triangle.

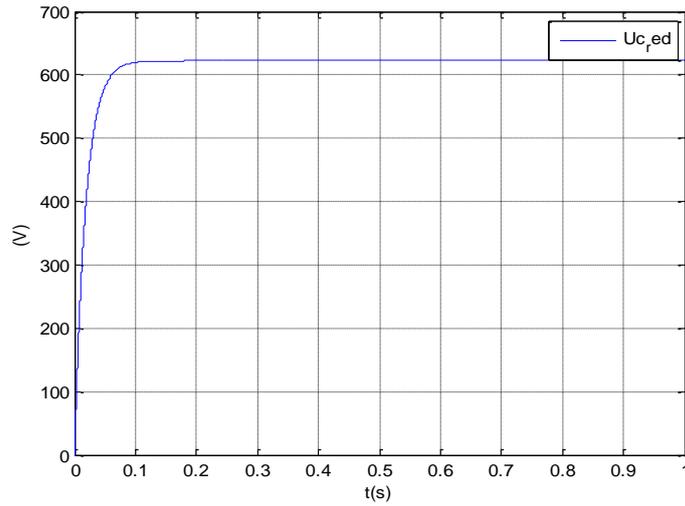


Figure.3.12. Tension redressé

3.8 Modélisation d'une turbine éolienne

3.8.1 Modélisation de la turbine

La turbine qui sera modélisé comporte trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_{turbine} , qui entraînera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G .

La (Figure 3.13) montre le schéma d'une turbine éolienne.

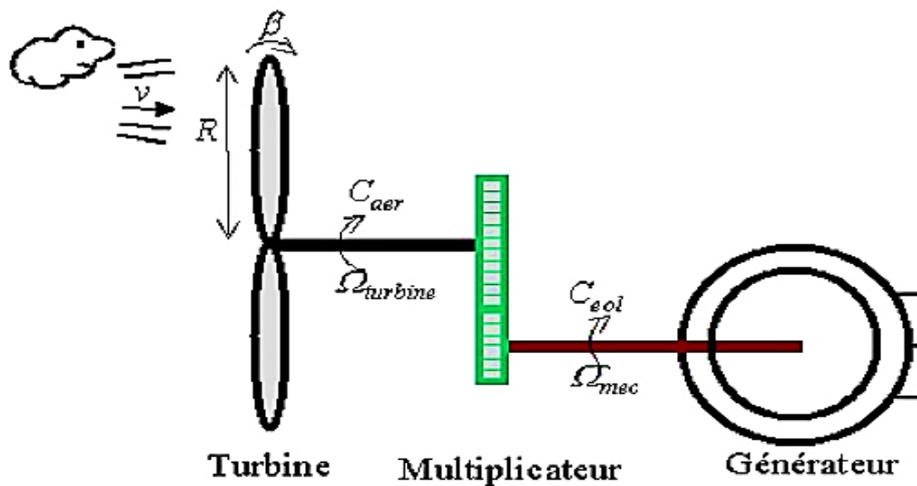


Figure.3.13. Schéma de la turbine éolienne.

3.8.1.1 La puissance d'une éolienne

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R , est donnée par la relation suivante [33] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 V_{vent}^3 \quad (3.20)$$

- ρ : Masse volumique de l'air (celle-ci est de 1,25 Kg/m en atmosphère normale) ;
- S : C'est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.
- R : correspond pratiquement à la longueur de la pale ;
- V_{vent} : est la vitesse du vent (en m/s).

Nous remarquons que la puissance est directement proportionnelle à la surface balayée par le rotor, mais surtout au cube de la vitesse du vent.

3.8.1.2 La puissance aérodynamique

Toutefois, toute l'énergie ne peut être captée, car la vitesse du vent n'est pas nulle après l'éolienne. On introduit alors un coefficient C_p appelé coefficient de performance, qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pales. Ce coefficient correspond au rendement du rotor de l'éolienne [1], [32], [33]. La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_{aéro} = C_p P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (3.21)$$

- C_p : Coefficient de puissance défini comme suit :

$$C_p = (0.5 - 0.0167(\beta - 2)) \cdot \sin\left[\frac{\pi(\lambda+0.1)}{18.5-0.3(\beta-2)}\right] - 0.00184(\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (3.22)$$

- β : Angle d'orientation des pales ;
- λ : est le ratio de vitesse défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales $\Omega_{turbine} \cdot R$, et la vitesse du vent V .

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (3.23)$$

- $\Omega_{turbine}$: Vitesse de la turbine

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est déterminé directement par :

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (3.24)$$

3.8.1.3 Le coefficient de puissance

Le C_p représente le rapport de la puissance récupérée sur la puissance récupérable. Ce coefficient présente un maximum de $16/27$ soit $0,59$ [32] [42]. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ .

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la (Figure 3.14).

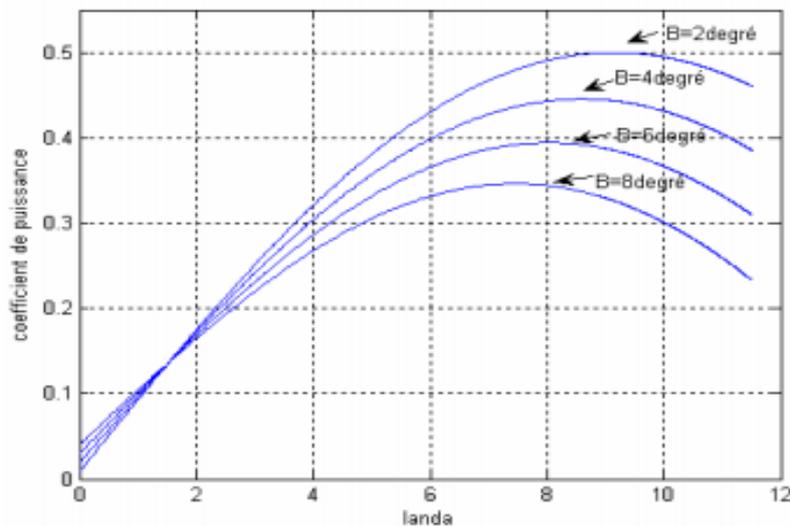


Figure.3.14. Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle de calage fixe).

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure.1.17) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche

rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique.

Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur de plus leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s[41].

3.8.2 Modèle du Multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (Figure.3.13), elle est modélisée mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (3.25)$$

- C_g : Couple issu du multiplicateur ;
- $C_{aéro}$: Couple aérodynamique
- G : Gain du multiplicateur

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (3.26)$$

3.8.3 Equation dynamique de l'arbre

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit [5]:

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_{mec} \quad (3.27)$$

- J_t : C'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice

– C_{mec} : C'est le couple mécanique, ce dernier prend en compte :

Le couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em} ;

Le couple de frottement visqueux C_{vis} ;

Et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (3.28)$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f C_{mec} \quad (3.29)$$

3.8.4 Schéma bloc du modèle de la turbine

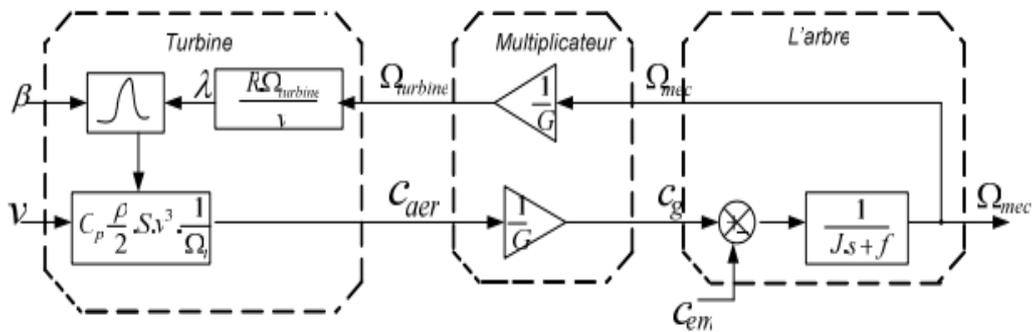


Figure.3.15. Schéma bloc du modèle de la turbine.

La turbine génère le couple aérodynamique (équation (3.24)) qui est appliquée au multiplicateur.

Les entrées de la turbine sont :

- La vitesse du vent.
- L'angle d'orientation des pales.
- La vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur (équation (3.25), (3.26))

Le modèle de l'arbre d'écrit la dynamique de la vitesse mécanique il a donc deux entrées :

- Le couple du multiplicateur
- Le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

La vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées :

- L'angle de la pale
- Le couple électromagnétique de la génératrice

La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

3.9 Fonctionnement d'une centrale éolienne

A la hauteur de la nacelle souffle un vent de vitesse vent V . Tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces derniers est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt. A la vitesse seuil détectée par l'anémomètre, un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement, le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent, les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage éolien et commence à tourner.

Une puissance de vent P_{vent} est alors captée est transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Au rendement du multiplicateur près, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice

Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine (*Figure.3.16*). On distingue alors deux cas, soit l'éolienne reliée au réseau de distribution (directement ou à travers des convertisseurs statiques), soit elle alimente en autonome une charge isolée travers ou sans les convertisseurs statiques [24].

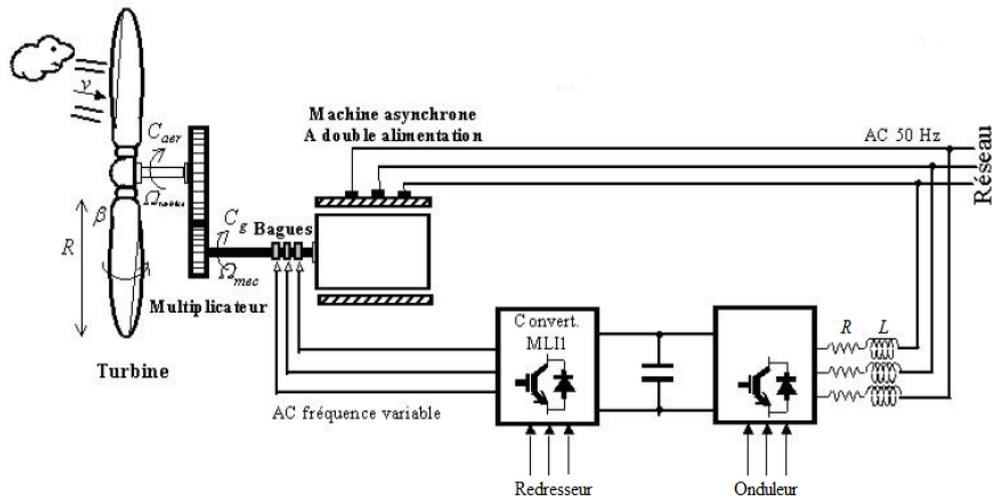


Figure 3.16 .Structure générale d'un système de conversion de l'énergie éolienne.

3.10 Simulations et interprétations des résultats

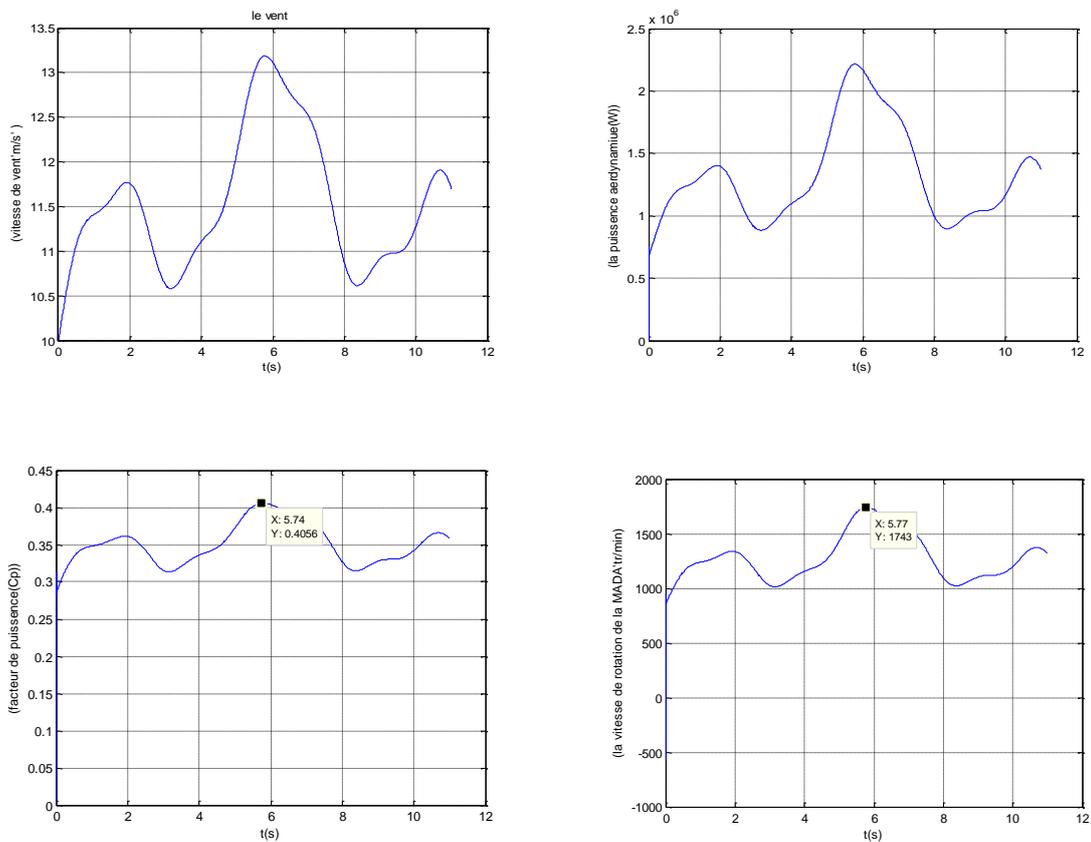


Figure 3.17. Simulation de la turbine mode sous MATLAB.

La figure (3.18) montre que la puissance au niveau de la turbine dépend de la variation de la vitesse du vent, et présente le vent qui est appliqué pour la turbine de l'éolienne pour voir les changements de la vitesse et la puissance de la turbine par rapport au vent.

Elle présente aussi le coefficient de puissance obtenu, on remarque qu'il ne dépasse pas la valeur max (0.45) malgré l'augmentation de la vitesse de la turbine (1700 tr/min).

3.11 Conclusion

On a présenté dans ce chapitre, la modélisation et l'application du redresseur à MLI nous a permis la régulation de la tension du bus continu qui est utilisée pour alimenter l'onduleur connecté au rotor de la MADA, et deuxième partie nous avons présenté le modèle de l'onduleur, son principe de fonctionnement et la technique de commande MLI. Ensuite on a décrit la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz), et nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques. Et enfin La modélisation et la simulation de la turbine éolienne a montré que la variation de la vitesse du vent influe considérablement sur la vitesse mécanique et sur la puissance électrique fournie du fait que l'énergie produite varie proportionnellement au cube de cette vitesse.

Chapitre 4 : La commande des puissances actives et réactives de la MADA par des régulateurs PI

4.1 Introduction

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur [43].

Dans cette optique, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [33].

4.2 Principe de la commande vectorielle de la MADA

Dans la commande vectorielle, la MADA est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée. Cette analogie est représentée par la (Figure 4.1).

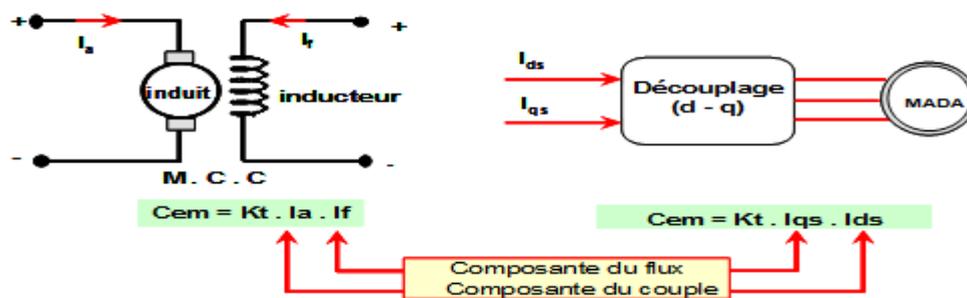


Figure 4.1. Commande d'une MCC et commande vectorielle d'une MADA.

Couple électromagnétique de la machine à courant continu:

$$\begin{cases} C_{em} = K\Phi_f \cdot I_a \\ \Phi_f = KI_f \end{cases}$$

Cette relation rappelle la relation du couple électromagnétique de la MCC à excitation séparée donc le fonctionnement de la MADA est similaire à celui de la MCC (Machine à Courant Continu).

La commande par flux orienté est une expression qui apparaît de nos jours dans la littérature traitant les techniques de contrôle de moteurs électriques, et dont l'étymologie nous ramène à une notion élémentaire, mais très importante de l'électromagnétisme. A savoir la force exercée sur un conducteur parcouru par un courant et placé dans une région où

Chapitre 4 : La commande des puissances actives et réactives de la MADA par des régulateurs PI

règne un champ magnétique est égale au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ. Il en résulte évidemment que l'amplitude de cette force sera maximale pour des intensités du courant et du champ donnés quand le vecteur courant sera perpendiculaire au vecteur champ.

Appliquée aux moteurs électriques, cette propriété est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courant et les vecteurs flux résultants. Si le principe est naturellement appliqué pour les MCC, ce n'est pas le cas pour les machines à courant alternatif; par conséquent, le contrôle par flux orienté des machines à courant alternatif est une commande par orientation de ces deux grandeurs. [46][38].

De nombreuses variétés ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer, suivant la source d'énergie :

- Commande en tension.
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère :

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

Suivant la détermination de la position du flux :

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

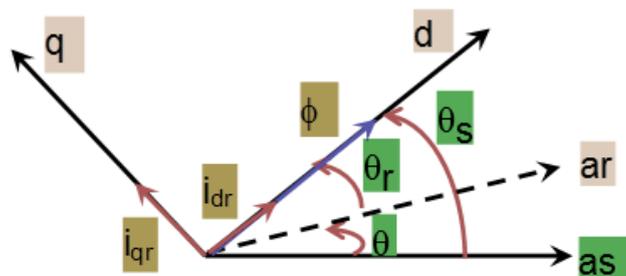


Figure.4.2 : position du référentiel par rapport au flux.

Chapitre 4 : La commande des puissances actives et réactives de la MADA par des régulateurs PI

4. 2.1 PROCEDE D'ORIENTATION DU FLUX :

La méthode du flux orienté est basée sur le choix du repère de référence. Par le choix du repère lié au champ tournant, il découle que le flux à orienter statorique, rotorique ou d'entrefer doit coïncider avec l'axe « **d** ». Afin d'obtenir un couple maximal, nous devons imposer l'une des conditions suivantes [45] :

- Orientation du flux rotorique :
$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \Phi_r \\ \Phi_{qr} = 0 \end{cases}$$
- Orientation du flux statorique :
$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s \\ \Phi_{qs} = 0 \end{cases}$$
- Orientation du flux magnétisant :
$$\begin{cases} \Phi_{dm} = \Phi_m \\ \Phi_{qm} = 0 \end{cases}$$

On utilise dans notre étude la commande vectorielle en puissance active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère (d, q) suivant le flux statorique.

L'équation du flux statorique :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (4.1)$$

L'équation du couple électromagnétique :

$$C_{em} = -p \frac{M}{L_s} (\Phi_{ds} \cdot I_{qr}) \quad (4.2)$$

L'équation de la tension :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\Phi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \cdot \Phi_s \end{cases}$$

Dans l'hypothèse où le flux Φ_s est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator) et si l'on néglige la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \cdot \Phi_{ds} \end{cases} \quad (4.3)$$

Chapitre 4 : La commande des puissances actives et réactives de la MADA par des régulateurs PI

A l'aide de l'équation (4.1) on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques:

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_{ds}}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (4.4)$$

Les puissances active et réactive statoriques d'une MADA s'écrivent:

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (4.5)$$

En appliquant les hypothèses simplificatrices à l'équation (4.5) on obtient:

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (4.6)$$

En remplaçant I_{ds} et I_{qs} par leurs expressions (4.4) dans l'équation (4.6) on obtient:

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = V_s \frac{\Phi_{ds}}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (4.7)$$

En approximant Φ_s par $\frac{V_s}{\omega_s}$, l'expression de la puissance réactive Q devient alors:

$$Q = \frac{1}{\omega_s L_s} V_s^2 - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \quad (4.8)$$

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il est nécessaire d'établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.

En remplaçant dans l'équation des flux de model de la MADA les courants statoriques par l'expression (4.4) on obtient:

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} - \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (4.9)$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente (4.9) par leurs expressions dans l'équation (2.10) on obtient :

Chapitre 4 : La commande des puissances actives et réactives de la MADA par des régulateurs PI

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{d}{dt} I_{dr} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{d}{dt} I_{qr} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + g \cdot \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (4.10)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent. Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + g \cdot \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (4.11)$$

La représentation sous forme de schéma-blocs de la MADA est donnée par la figure ci-dessous (Figure 4.3)

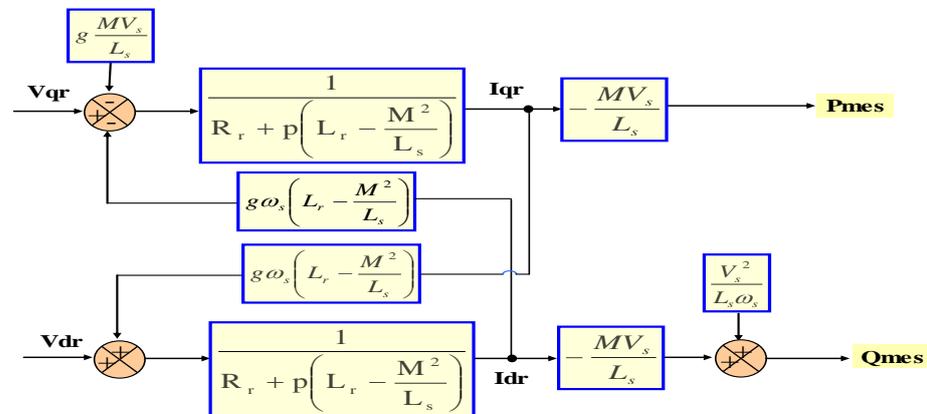


Figure 4.3. Schéma bloc de la MADA.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine :

➤ La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée **méthode directe** car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine [46].

Chapitre 4 : La commande des puissances actives et réactives de la MADA par des régulateurs PI

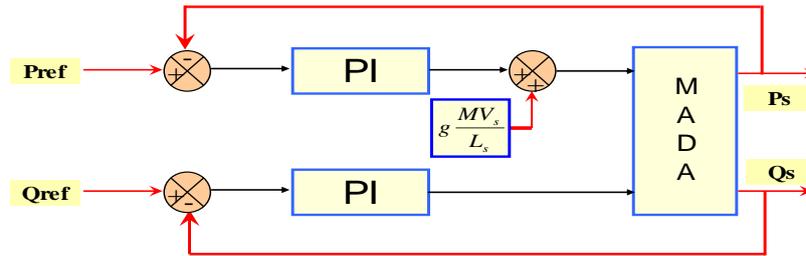


Figure 4.4. Schéma bloc de la commande directe.

➤ La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques.

4. 2.2 Commande indirecte de la MADA

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler est présenté dans la (Figure 4.5). En combinant les différentes équations des flux, des tensions rotoriques, des courants et des puissances, nous pouvons exprimer les tensions en fonction des puissances. On construit ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens [46].

Pour obtenir une bonne stabilité du système on introduit une boucle de régulation des courants rotoriques (Figure 4.6) dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine.

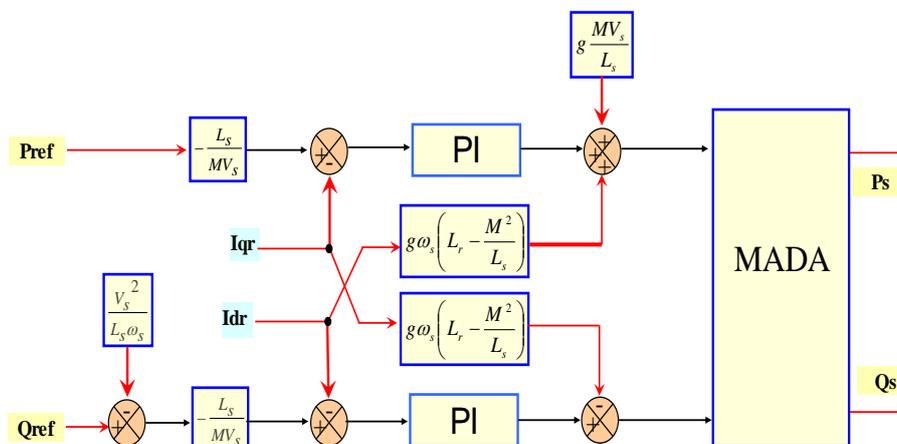


Figure 4.5. Schéma bloc de la commande indirecte.

Chapitre 4 : La commande des puissances actives et réactives de la MADA par des régulateurs PI

L'asservissement des courants joue un rôle très important dans la commande. En effet, plus cet asservissement est efficace plus la puissance rotorique (active, réactive) produite par la machine est proche de celle désirée.

Pour cela, pour conserver l'orientation du flux exigé par la commande vectorielle, on doit étudier une boucle de régulation de courant.

Ainsi, nous allons mettre en place une boucle de régulation en puissance indépendante, tout en compensant les termes de perturbations ($g \frac{MV_s}{L_s}$ et $\frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s}$) afin d'obtenir un bon fonctionnement avec amélioration des performances du système.

Le régulateur utilisé pour commander la MADA en génératrice est un régulateur de type proportionnel-Intégral (PI) qui permet d'avoir une bonne précision, une rapidité et stabilité du système. La fonction de transfert du régulateur est donnée par : $R(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$.

La détermination des paramètres K_p et K_i du régulateur fait intervenir des méthodes classiques de calcul des régulateurs continus. Cette stratégie permet l'application de l'ensemble des outils de l'automatique linéaire au problème de régulation.

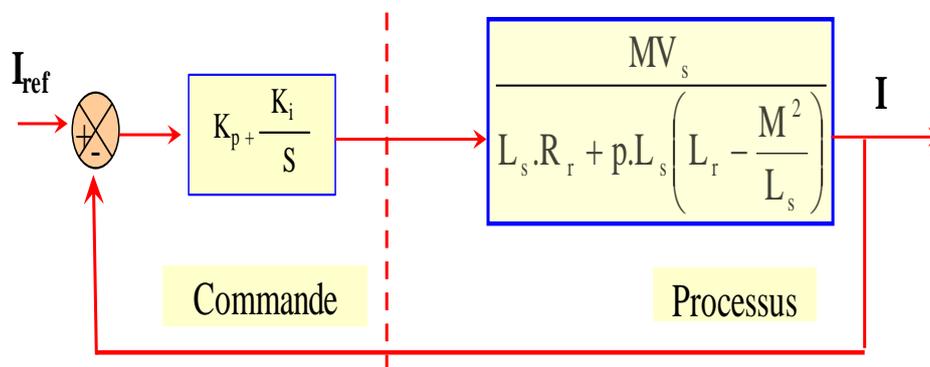


Figure 4.6. Schéma bloc de la régulation du courant.

Chapitre 4 : La commande des puissances actives et réactives de la MADA par des régulateurs PI

4.2.3. Schéma synoptique du dispositif étudié

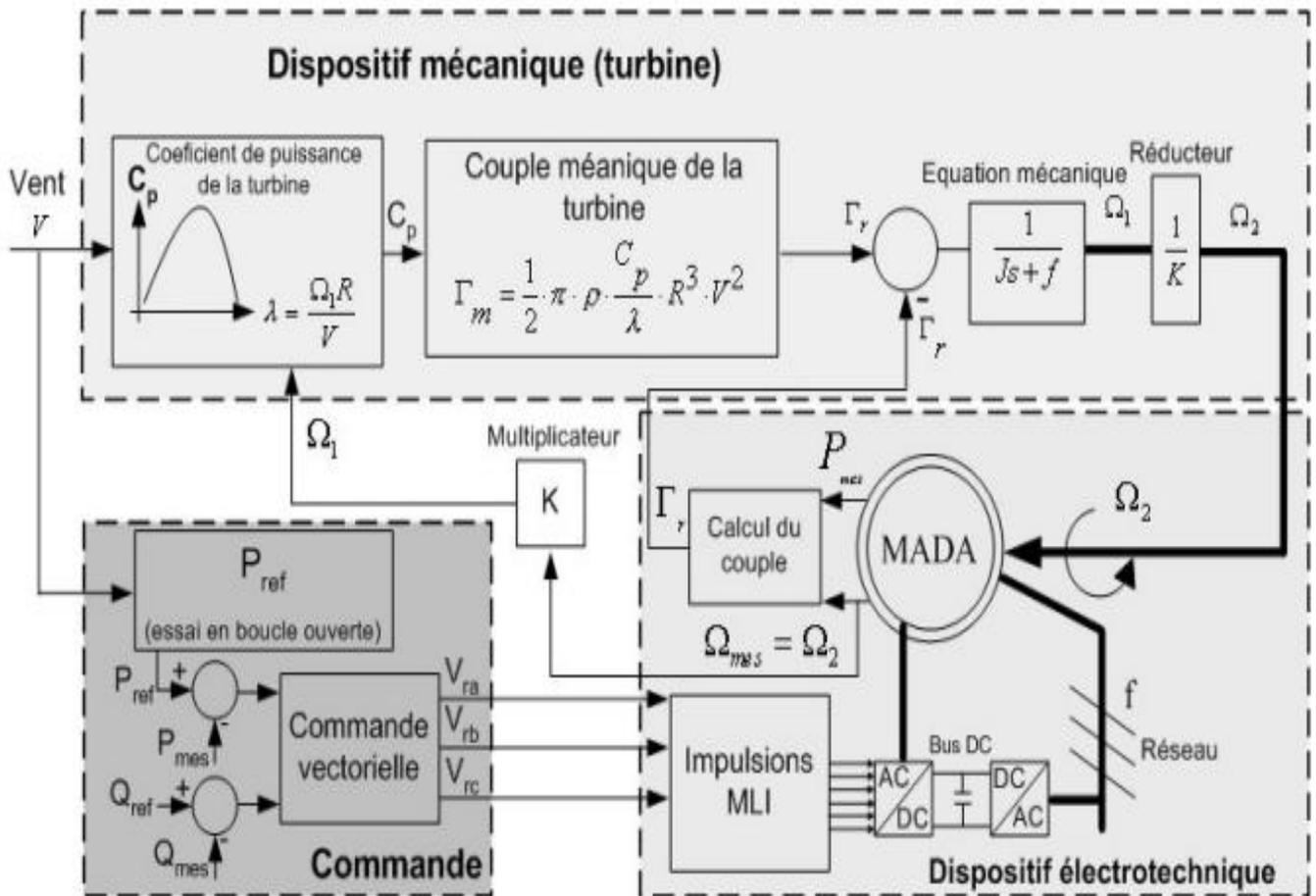


Figure 4.7. Schéma global du système étudié.

Dans cet simulation nous bassons sur la méthode directe :

4.2.3 Simulations et interprétations des résultats

Dans cette partie on à simuler la chaîne pour voir les variations des différentes grandeurs des différentes parties de la chaîne éolienne.

Chapitre 4 : La commande des puissances actives et réactives de la MADA par des régulateurs PI

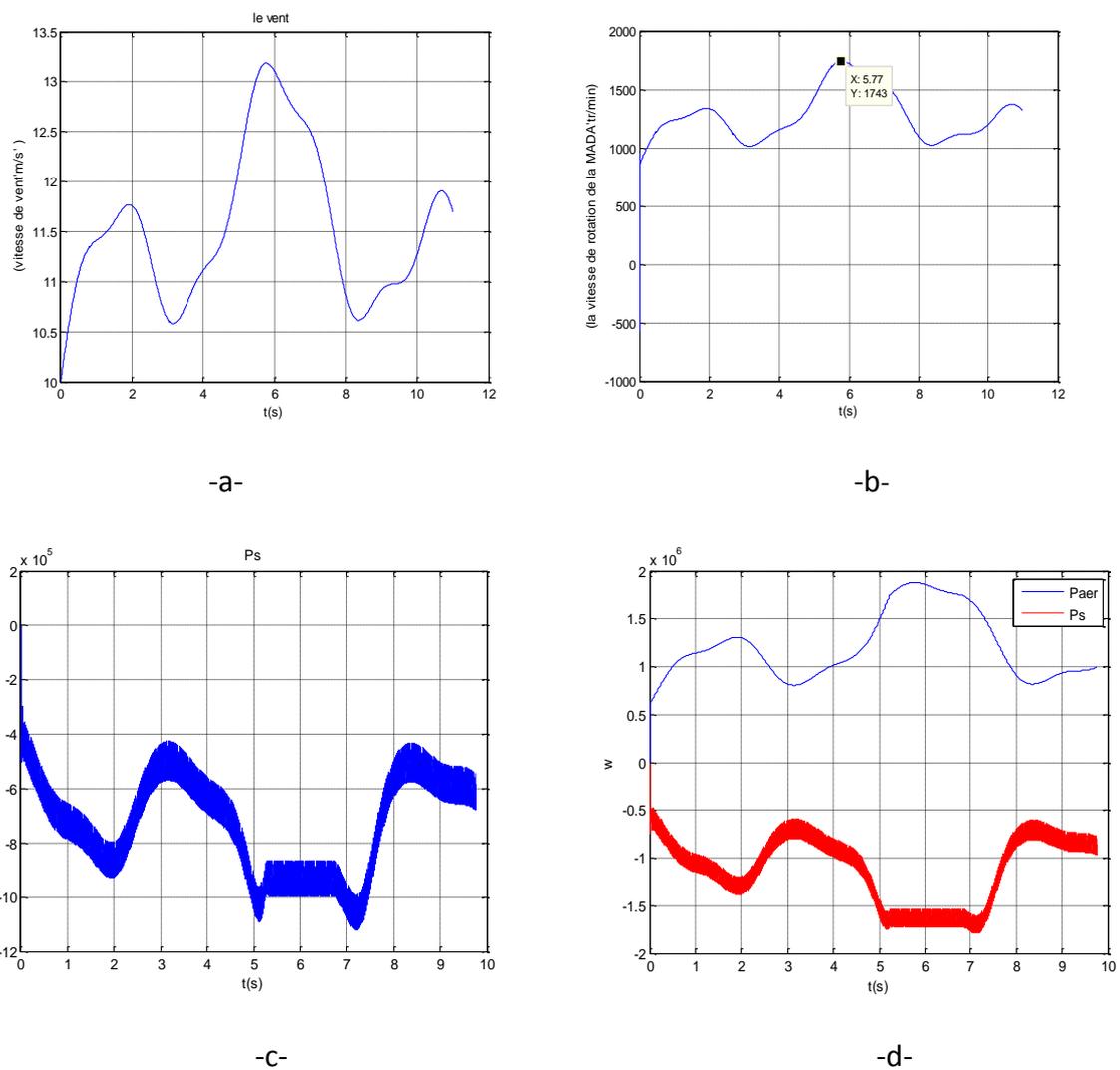
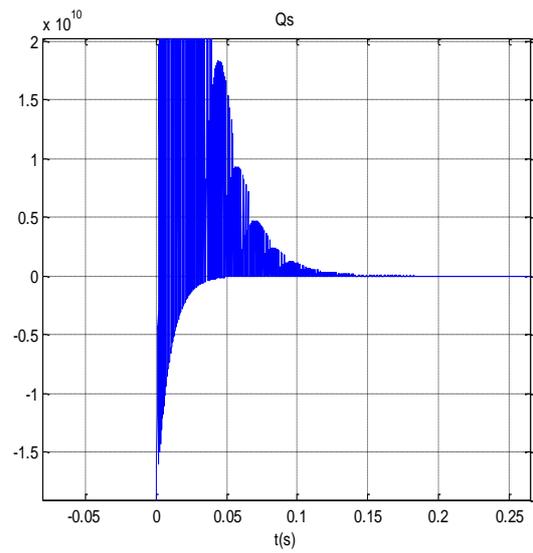
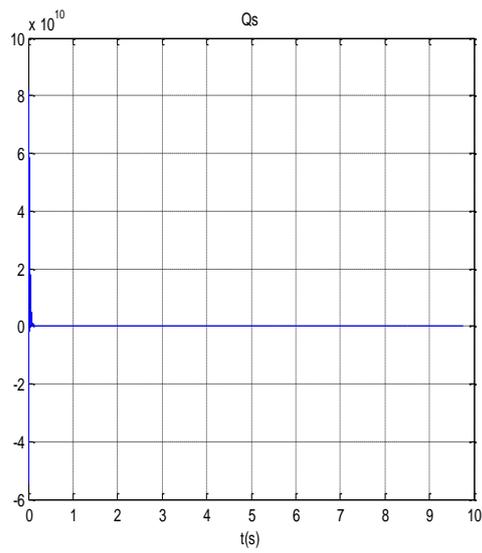


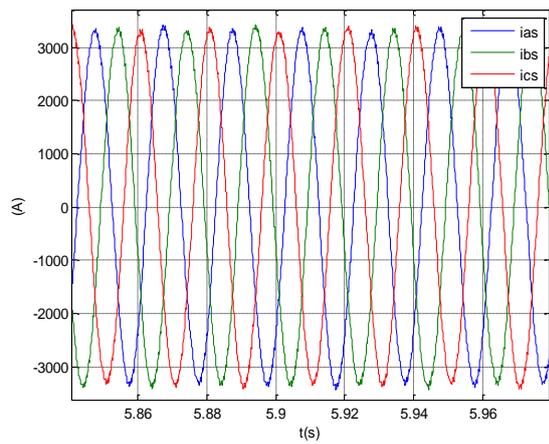
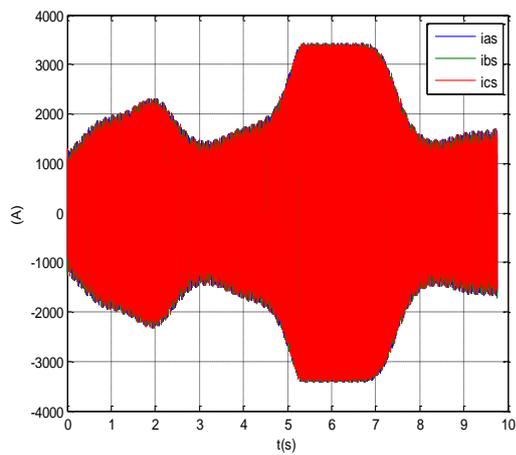
Figure 4.8. Résultats de simulation de la vitesse mécanique et la puissance électrique produit suit à un application de profile du vent.

- a- Profil du vent appliqué
- b- La vitesse mécanique
- c- Puissance active
- d- la puissance active dépend la puissance aérodynamique

Chapitre 4 : La commande des puissances actives et réactives de la MADA par des régulateurs PI

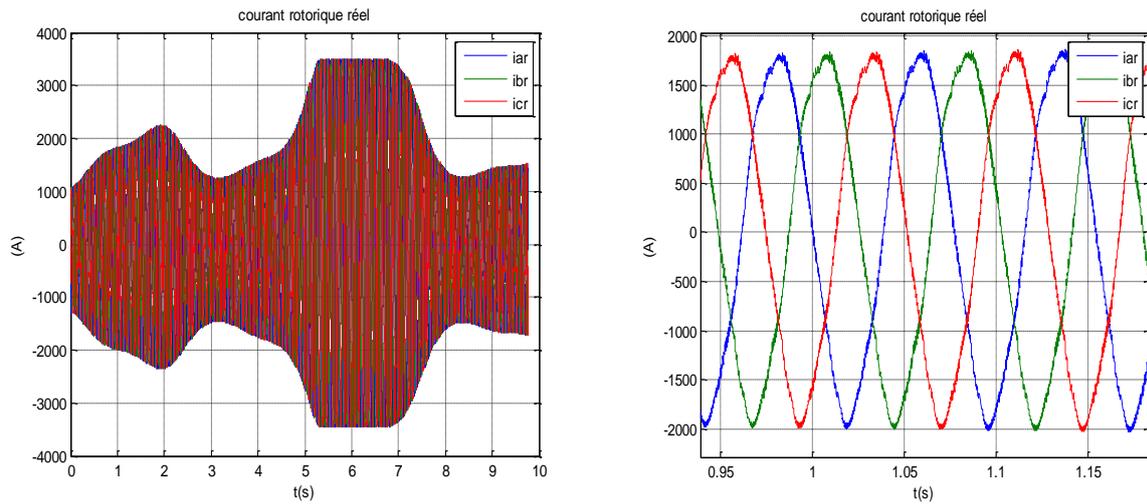


-a-



-b-

Chapitre 4 : La commande des puissances actives et réactives de la MADA par des régulateurs PI



-c-

Figure 4.9. Résultats de simulation suite à une application de profil du vent.

- a- La puissance réactive statorique avec un zoom.
- b- Le courant statorique avec un zoom.
- c- Le courant rotorique avec un zoom.

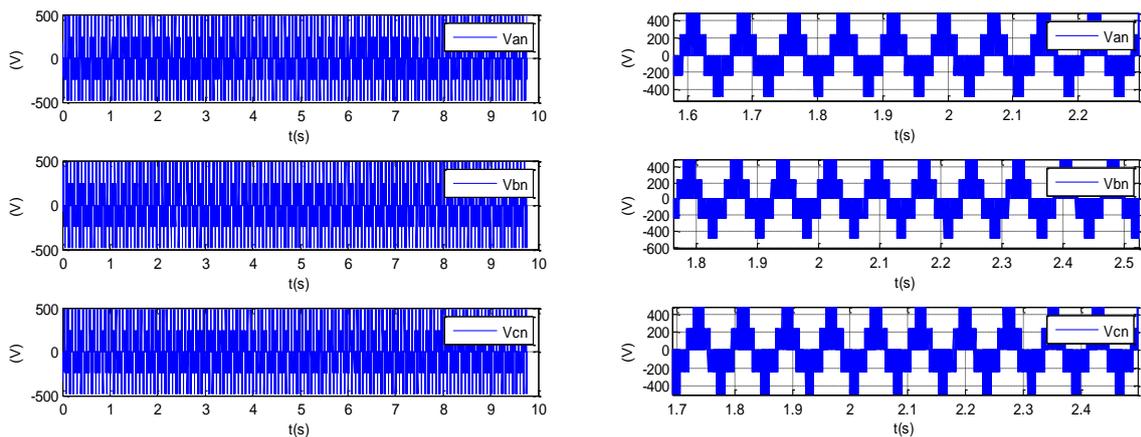


Figure 4.10. La sortie de l'onduleur avec un zoom.

La figure (4.8.a) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne. Les résultats de simulation montrent que la variation de la puissance active figure (4.8.c) est adaptée à la variation de la vitesse de la génératrice figure (4.8.b), et cette dernière est adaptée à la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la variation

Chapitre 4 : La commande des puissances actives et réactives de la MADA par des régulateurs PI

de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite (active). on remarque aussi que la puissance active dépend de la puissance de référence (aérodynamique).

On constate aussi sur les résultats de simulation une bonne suivi de consigne pour la puissance active ainsi que la puissance réactive statorique qui est maintenue nulle par les puissances réelles débitées par la MADA. La fréquence rotorique dépend de la vitesse de rotation de l'éolienne.

4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié la chaîne éolienne composée de deux convertisseurs à deux niveaux (redresseur, onduleur) associés à une Machine Asynchrone Double Alimentation ainsi qu'une turbine connectée au rotor de cette machine, et présenter les résultats de simulation avec des commentaires pour chaque courbe obtenue. L'utilisation de l'onduleur commandé par la modulation vectorielle à une porteuses bipolaires permet d'avoir un taux d'harmoniques minime.

Introduction générale

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie, ou sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle plus important. Ces modes de production ainsi que les moyens de production associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies [1].

Face à ce dilemme, il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement utilisant des sources renouvelables comme l'éolienne, le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique,... Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important participant pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante. Plusieurs pays se sont tournés vers l'énergie éolienne en construisant de grandes centrales éoliennes fournissant de l'électricité à un prix concurrentiel à celui de l'énergie produite par les installations conventionnelles [2].

Pendant des siècles, l'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique. L'exemple le plus connu est le moulin à vent. En 1888, Charles F. Brush construit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batteries. La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est développée par le danois Poul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il aura vendu 72 exemplaires en 1908.

Actuellement, plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. L'Espagne est aujourd'hui le premier producteur mondial avec une production de 6.4 GW en 2003, les USA au deuxième rang avec 6.3 GW, L'Allemagne est au troisième rang 4.6 GW, et L'Union Européenne rang quatrième avec 4,15 GW, et le Danemark au rang avec 3.1 GW.

En Algérie, on a un régime de vent modéré (2 à 6 m/s, voir carte des vents). Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux [3].

Pour le développement des sources de production d'électricité par des systèmes éoliens, différentes machines électriques sont utilisées à savoir les machines asynchrones et les

Introduction générale

machines synchrones. la Machine Asynchrone en Double Alimentation (MADA) .En anglais « double Field induction machine DFIM » est utilisée comme génératrice dans les systèmes éoliens, considérée comme une solution écologique intéressante pour la génération de l'électricité. La génératrice asynchrone double alimentée (DFIG) est davantage adaptée à cette application parce qu'elle reçoit une vitesse variable sur son arbre due à la vitesse variable du vent et elle peut produire au stator une énergie électrique à tension et fréquence constantes [4].

Grâce au progrès de l'électronique de puissance, diverses applications de la MADA sont alors devenues possibles dont l'intérêt réside principalement dans les possibilités de contrôle du flux et des puissances pour les régimes caractéristiques hypo et hyper synchrones, cela étant aussi bien dans les fonctionnements moteur que générateur. Dans ce contexte, la théorie de l'orientation du flux, apparue dans le début des années 70 appliquée à la machine asynchrone avec succès a donné lieu à un outil puissant pour son contrôle.

Le développement de la micro-informatique et des systèmes programmés ouvre la voie au contrôle en temps réel des machines électriques. Néanmoins, la difficulté pour commander la machine asynchrone réside dans le fait que son modèle mathématique est non linéaire, multi variable et fortement couplé vu l'existence d'un couplage complexe entre les deux armatures statoriques et rotoriques. Afin d'obtenir avec la machine asynchrone à double alimentation, des performances semblables à celle de la MCC, il est nécessaire de séparer le contrôle du flux et le contrôle du courant générant le couple électromagnétique. L'apparition de la commande vectorielle constitue une évolution. Par cette technique, et pour la machine asynchrone à double alimentation (MADA), en effectuant un découplage artificiel entre le flux et le couple électromagnétique [5].

On est ainsi passé de la petite machine isolée pour le pompage de l'eau aux grands parcs d'aérogénérateurs de multi mégawatts connectés sur le réseau.

Les progrès technologiques et scientifiques réalisés dans différents domaines de l'ingénieur, dont l'aérodynamique, les structures, les matériaux, l'électrotechnique, la météorologie et le contrôle, ont permis d'améliorer l'efficacité et la fiabilité de ces machines.

Introduction générale

Les éoliennes à axe horizontal se sont progressivement imposées et représentent la quasi-totalité du marché actuel.

Ce modeste travail permet de donner une vision globale des aspects liés à l'éolien, d'appréhender, sans être exhaustif, les thématiques impliquées et ses spécificités. Il s'attache en particulier à exploiter le potentiel de l'énergie du vent au maximum, que l'on peut obtenir grâce à l'orientation des pales de éolienne, dont les principes sont issus à varié l'angle de calage β , afin de limiter l'excès de la puissance du vent.

Dans le cadre de notre travail, nous allons étudier un système éolien basé sur le générateur asynchrone à double alimentation (MADA) à vitesse variable de 1.5 MW.

Pour cette étude le présent mémoire est composé de quatre parties :

Le premier chapitre est consacré à des rappels sur les systèmes éoliens à travers les équations et les concepts physiques régissant leur fonctionnement. Ces rappels sont suivis par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs qui leur sont associés.

Le deuxième chapitre concernera la modélisation du fonctionnement et la validation du modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Dans le troisième chapitre on va aborder la modélisation des convertisseurs deux niveaux à structure NPC (onduleur-redresseur) qui permettent l'échange d'énergie entre le rotor de la machine et le réseau.

Enfin dans le dernier chapitre nous allons étudier les performances de la chaîne (turbine, MADA, redresseur, onduleur, réseau), grâce à la simulation de cette dernière.

Nous terminerons ce présent travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

Listes des acronymes et abréviations

MADA	Machine asynchrone double alimentation.
F.O.C	Commande à flux orienté
s,r	Indices correspondants respectivement au enroulement statorique et au rotor.
sa, sb, sc	Phases du enroulement statorique.
Ar, Br, Cr	Phases rotoriques.
d,q	Axes correspondant au référentiel lié au champ tournant.
θ	Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor.
θ_s	Angle entre l'axe de la première phase de l' enroulement statorique et l'axe d.
θ_r	Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d.
g	Le glissement.
$V_{abc,s}$	Tensions des trois phases de l'enroulement statorique.
$i_{abc,s}$	Courants des trois phases de l'enroulement statorique.
$i_{ABC,r}$	Courants des trois phases rotoriques.
$\Phi_{abc,s}$	Flux des trois phases de l'enroulement statoriques.
$\Phi_{abc,r}$	Flux des trois phases rotoriques.
L_s, L_r	Inductances de fuite respectivement de l'enroulement statorique et du rotor.
M_s, M_{sr}, M_r	Inductances de fuite mutuelles.
c_{em}	Couple électromagnétique.
f_r	Coefficient de frottement.
C_r	Couple résistant.
p	Nombre de paire de pôles.

Listes des acronymes et abréviations

$V_{dq,s}$	Tensions de l'enroulement statorique dans l'axe d,q.
$i_{dq,s}$	Courants de l'enroulement statorique dans l'axe d,q.
$i_{dq,r}$	Courants rotoriques dans l'axe d,q.
$\Phi_{dq,s}$	Flux de l'enroulement statorique dans l'axe d,q.
$\Phi_{dq,r}$	Flux rotorique dans l'axe d,q.
Φ_r	Flux rotorique résultant.
$P(\theta_s)$	Matrice de PARK correspondant au enroulement statorique.
$P(\theta_r)$	Matrice de PARK correspondant au rotor.
$C_{aéro}$	Couple aérodynamique
f	Coefficient de frottement visqueux
J	Inertie de la machine
P_{vent}	Puissance du vent
ρ	Masse volumique du vent
V_{vent}	Vitesse du vent
C_p	Coefficient de puissance
β	Angle de calage
P_t	Puissance de la turbine
S	Surface balayée par la turbine
λ	Facteur d'avance
Ω_t	Vitesse de la turbine
Ω_r	Vitesse du rotor de la génératrice
G	Multiplicateur mécanique
C_m	Coefficient du couple
C_{vis}	Couple des frottements visqueux
C_g	Couple issu du multiplicateur
C_t	Couple de la turbine
R	Rayon de la turbine

Bibliographique :

- [1] H.Camblong, "Minimisation de l'impact des perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à vitesse variable", Thèse de Doctorat d'Etat en Automatique. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2003
- [2] A. Graeurs, « Design of direct-driven permanent-magnet generators for wind turbines », Chalers university of technology, school of electrical and computing engineering, technical report, N° 292, Göteborg, Sweden, 1996, doctoral thesis.
- [6] D.BENACHOUR, El Watan, 30 novembre 2006.
- [7] <http://tpeeoliennefoucauld20092010.wifeo.com/3-la-structure-externe-des-eoliennes.php>.
- [8] Site Internet de l'Association Daniose de l'industrie Eolienne.
"http://www.windpower.org/fr/core.htm".
- [9] <http://eolienne.comprendrechoisir.com/comprendre/pale-d-eolienne>
- [10] BOUKHARI.H et GUERMACHE.S «Étude d'une éolienne à vitesse variable avec génératrice asynchrone pilotée par le stator »Mémoire de Master. USTHB.2010.
- [11] Kezerli.R« Alimentation et Commande d'une MADA connectée au réseau local, en utilisant les convertisseurs multi niveaux ». Mémoire de Magister. USTHB.2009.
- [12] P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi, "Eoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
- [13]http://wind_energy.eklablog.com/avantages-et-inconvenients-des-eoliennes-a-axe-vertical-et-horizontal-a1069986.
- [14] O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine", Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96.
- [15] J.L. Menet, L.-C. Valdès, B. Ménart, "Acomparative calculation of the wind turbines capacities on the basis of the L- σ criterion", Renewable Energy 22, 2001, pp. 491-506.

- [16] BOUKHARI.H et GUERMACHE.S «Étude d'une éolienne à vitesse variable avec génératrice asynchrone pilotée par le stator »Mémoire de Master. USTHB.2010.
- [17] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [18]L.BAGHLI, "Modélisation et commande de la machine asynchrone», notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005.
- [19]F.POITIER, "Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne", thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003.
- [20]G. SEGUIER, "Electrotechnique industrielle", éditions TEC & DOC, pp 513-514.
- [21] B. MULTON, X. ROBOAM, B. DAKYO, C. NICHITA, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, Aérogénérateurs électriques, Techniques de l'Ingénieur, D3 960.
- [22] Frédéric POITIERS, Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003
- [23]H.TAMRABET, "Robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une machine asynchrone", mémoire de magister, Université de Batna, 2006.
- [24]MERRAHI Farid. «Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) ». Mémoire de Magister. Ecole Nationale polytechnique. Algérie .2007.
- [25] MAHAMMEDI.M et AIT OUARAB.M «Modélisation en vue d'une Commande d'une chaine éolienne utilisant des convertisseurs multi niveaux NPC ». Mémoire d'Ingéniorat. U.S.T.H.B .Algérie.2010.
- [26] KORICHI .M et CHIALI.L. «Etude de l'intégration de la production décentralise dans un réseau

« application à l'éolienne » ». Mémoire d'Ingéniorat .U.S.T.H.B .Algérie.2008.

[27] Frédéric Poiiers, « Etude et commande de génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne ».école polytechnique de l'université de Nantes, 2003.

[28] Zhang F. and al. « Separately Controlled Double-fed Speed Regulation System». IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS'99 IEEE pp 751-754.

[29] J. Châtelain « Machines électriques tournantes ». Edition Dunod, tome1, 1983.

[30] P. Barret: « Régime transitoire des machines électriques tournantes ».Ecole supérieure d'Electricité, Eyrolles- Paris-1982.

[31].Bose B.K. « Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1987.Cvbn,

[32] F. Poitiers "Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour L'utilisation de l'énergie Éolienne " thèse de Doctorat d'état en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes -2003.

[33] S.EL Aimani "Modélisation de Différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ", Thèse de Doctorat, d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.

[34] M.Machmoum, "Contribution `a l'étude de la commande numérique de l'ensemble Cycloconvertisseur triphasé-Machine Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de doctorat. Institut Nationale Polytechnique de Lorraine, 1989.

[35] S.Noui, "Etude et réalisation d'un redresseur à MLI commandé par DSP. Application à l'alimentation d'un onduleur à 3 niveaux", Mémoire de magister. Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2001

[36] A.Dendouga "Commande par Mode Glissante de la Machine à Double Alimentation Alimentée par un Onduleur de Tension " , thèse de Magister , Université de Batna .

[37] S.EL Aimani "Modélisation de Différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ", Thèse de Doctorat, d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.

[38] N. Kasbadji Marzouk « Quel avenir pour l'Energie Eolienne en Algérie ?, »Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, Déc. 2008, p.6-7

[39] S. METATLA ; « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » ; mémoire de magister, ENP, el Harrach 2009.

[40] N. LAVERDURE « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » Thèses de Doctorat, ENS de Cachan, 2005.

[41] Leclercq. Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue D'assurer des Services systèmes, Thèse de doctorat. Ecole doctorale sciences pour L'ingénieur, Université des Sciences et Technologie de Lille, 2004.

[42] M.Cherkaoui" Contribution a la modélisation, à l'étude et à la commande des machines application à une machine asynchrone à double alimentation", thèse de doctorat, Polytechnique de Lorraine 1990, France

[43] A.Chaiba "Commande par la Logique Floue de la Machine Asynchrone a Double Alimentation Alimentée en Tension", Thèse de Magister, Université de Batna-2004

[44] HAMID.A et DJELFAOUI.H »Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation Alimentée par une source hybride (éolien-photovoltaïque)». Mémoire d'Ingéniorat .U.S.T.H.B.Algérie.2009.

[45]MTOUK et BOUGHERBAL.A « Etude d'un MPPT d'une éolienne ».Mémoire d'ingéniorat .U.S.T.H.B Algérie.2010.

Annexe

Donnée de la machine à induction double alimentée

Valeurs nominales: 1.5MW ; 690V/15KV ; 50Hz ;

Paramètre:

R_s (Résistance du stator) = 0.012 Ω

R_r (Résistance du rotor) = 0.021 Ω

L_s (Inductance stator) = 0.0137H

L_r (Inductance du rotor) = 0.0137H

M (Inductance Mutuelle) = 0.135H

Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Nombre de pale = 3

Diamètre d'une pale R=35.25

Gain du multiplicateur : G=90

Inertie J= 1000 Kg.m²

Coefficient f=0.0024 N.m.s/rd

Dimensionnement du régulateur PI

La figure (1.1) montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI.

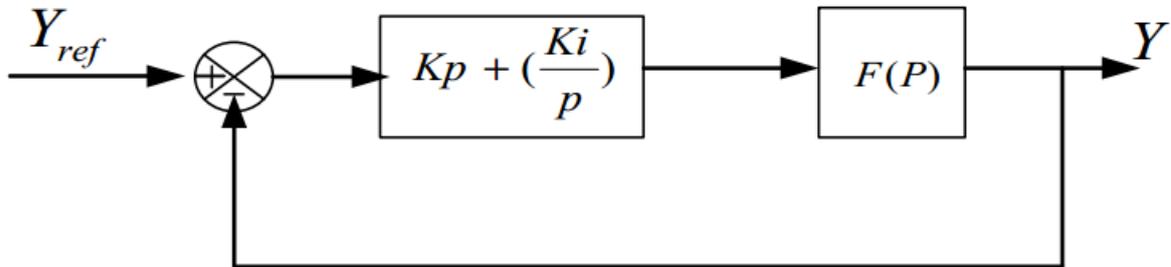


Figure.4.11. Schéma bloc d'un système réglé par un PI.

La forme du correcteur est la suivante :

$$C_p = K_p + \frac{K_i}{p}$$

Avec :

K_p : est le gain proportionnel du régulateur .

K_i : est le gain intégral du régulateur.

Si on considère la fonction du transfert suivante :

$$F(p) = \frac{K}{1 + \tau p}$$

En boucle ouverte on aura la fonction de transfert suivante :

$$F_{BO}(p) = \frac{K_p + \left(\frac{K_i}{p}\right)}{1 + \tau p} = \frac{k(K_p P + k_i)}{P(1 + \tau p)} = K k_i \frac{1 + \frac{k_p P}{k_i}}{P(1 + \tau p)}$$

On prend

$$\tau = \frac{K_p}{k_i}$$

Alors

$$F_{BO}(p) = \frac{k_i K}{P}$$

Annexe

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit comme suit :

$$F_{BF}(p) = \frac{k_i K}{k_i K + P} = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{k_i K} P}$$

Pour attendre 95% de la consigne, le temps de repense t_r du système bouclé vaut :

$$t_r = 3 \frac{1}{k_i K}$$

Or

$$k_i = \frac{k_p}{\tau}$$

Alors

$$t_r = 3 \frac{1}{k_p K}$$

D'où

$$\begin{cases} k_p = 3 \frac{\tau}{t_r K} \\ k_i = \frac{3}{t_r K} \end{cases}$$