



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Machine Electrique

Thème

**Commande par DPC de la machine
asynchrone à double alimentation pour
l'utilisation dans la production de
l'énergie éolienne**

Réalisé par :

BOUSKAYA TEDJANI

KAB ABDELKADOUSSE

Encadré par :

Dr: Serhoud Hicham

Soutenu en Mai 2018



Remerciements

Mon remerciement s'adresse en premier lieu à Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces longues années.

*Ainsi, je tiens également à exprimer mon vif remerciement à mon encadreur **Dr.H.Serhoud** qui m'a apportée une aide précieuse. Je lui exprime mon gratitude pour sa grande disponibilité ainsi que pour sa compréhension et ces encouragements.*

Je remercie aussi tous les enseignants qui ont contribué à ma formation et à tous les membres du jury qui ont accepté de juger ce travail.

En fin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont aidé et encouragé dans les moments pénibles et qui m'ont donné la force et la volonté de continuer et de réaliser ce modeste travail.





Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A la fleur de ma vie...ma très chère mère en témoignage de ma profonde et ma grande reconnaissance pour sa tendresse, sa patience, ces sacrifices tout au long de ma vie.

Mon honorable et très cher père « ... » qui a sacrifié sa vie pour qu'on puisse se retrouver à ce niveau et qui m'a été source de réussite.

A mes frères et mes sœurs.

A Toute ma famille.

A tous mes amis intimes .

, et les beaux moments à eloued.

A Toute la promotion 2018 d'électrotechnique

T'EDJANI.B

ABDelkédousse. K



Résumé :

Le présent travail est consacré à une commande par DPC "Contrôle direct de puissance" de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) intégrée à un système éolien. Le transfert de puissance entre le stator et le réseau est réalisé par action sur les signaux rotoriques. Les performances et la robustesse sont analysées par simulation à base du logiciel Matlab/Simulink. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de cette stratégie de contrôle au travers de bon performances dynamiques.

Mots clés : Machine Asynchrone à Double Alimentation ; DPC ; Eolienne ; Commande MPPT.

ملخص:

هذا العمل مخصصا لأمر " DPC التحكم المباشر في القدرة" الخاص بآلة التغذية المزدوجة غير المتزامنة (MADA) المدمجة في نظام طاقة الرياح . يتم تحقيق نقل الطاقة بين الجزء الثابت والشبكة من خلال العمل على إشارات الدوار . يتم تحليل الأداء والقوة من خلال المحاكاة على أساس برنامج . Matlab / Simulink . النتائج التي تم الحصول عليها تثبت فعالية استراتيجية التحكم هذه من خلال الأداء الديناميكي الجيد.

كلمات مفتاحية: آلة تغذية مزدوجة غير متزامنة؛ DPC ؛ طاقة الرياح ؛ الأمر MPPT

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	01
----------------------------	----

CHAPITRE I: Les énergies éoliennes à vitesse variable

I.1. INTRODUCTION.....	03
I.2. HISTORIQUE.....	03
I.3. PRINCIPES ET ELEMENTS CONSTITUFS DE L'EOLIEN.....	04
I.3.1. Définition de l'énergie éolienne	04
I.3.2. Descriptif d'une éolienne	06
I.4. PRINCIPE D'UNE EOLIENNE.....	08
I.5. LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES	08
I.5.1. Les éoliennes à axe horizontal.....	08
I.5.2. Les éoliennes domestiques.....	09
I.5.3. Les éoliennes à axe vertical.....	10
I.5.4. Les hydroliennes.....	11
I.5.5. Eolienne de pompage.....	12
I.6. CONSTITUTION D'UNE EOLIENNE MODERN	13
I.7. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE.....	14
I.7.1. Avantages.....	14
I.7.2. Inconvénients	15
I.8. FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE.....	16
I.8.1. Quelque notion sur le vent.....	16
I.8.2. Efforts sur une pale	17
I.8.3. Contrôle de la puissance.....	19
I.9. Régulation de la puissance d'une éolienne.....	20
I.9.1. Bilan de force sur une pale.....	20
I.9.2. Régulation mécanique.....	21
I.10. Régulation de la vitesse de rotation d'éolienne.....	23
I.10.1. Régulation électrique (contrôle MPPT).....	23
I.10.2. Techniques d'extraction du maximum de la puissance.....	26
I.11. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens à vitesse variable	27
I.11.1. Système utilisant une génératrice synchrone.....	27
I.11.2. Système utilisant une génératrice asynchrone	27

I.11.3. Système utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation.....	27
I.12. MODELISATION D'UNE TURBINE EOLIENNE.....	28
I.12.1. Modélisation de la turbine.....	28
I.12.2. La puissance de la turbi.....	28
I.12.3. La puissance aérodynamique.....	29
I.12.4. La coefficient de puissance.....	29
I.12.5. Modèle de multiplicateur.....	33
I.12.6. Equation dynamique de l'arbre.....	33
I.13. schéma bloc du modèle de la turbine	34
I.14. Modèle de la turbine en MATLAB/SIMULINK.....	35
I.15. CONCLUSION.....	36

CHAPITRE II: Modélisation et commande vectorielle de la MADA

II.1. INTRODUCTION	38
II.2. PRESENTATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION	38
II.3. DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT DE LA MADA.....	39
II.3.1. Structure de la machine.....	41
II.3.2. Mode de fonctionnement de la MADA.....	42
II.3.2.1. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.....	42
II.3.2.2. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.....	42
II.3.2.3. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.....	42
II.3.2.4. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.....	42
II. 4. Principe de fonctionnement de la MADA.....	43
II.5. Domaine d'application de la MADA	44
II.5.1. Application de la MADA dans les système éoliens.....	44
II.6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MADA.....	44
II.6.1. Avantages.....	44
II.6.2. Inconvénients	45
II.7. MODELISATION DE LA MADA	45
II.7. 1. Description de la MADA.....	46
II.7.2. Hypothèses simplificatrices.....	46
II.7.3. Modèle mathématique de la MADA.....	47
II.7.3.1. Equations électriques.....	47
II.7.3.2. Equation mécaniques.....	48

II.7.4 Modèle diphasé de la MADA.....	48
II.7.4 .1.Equations des tensions.....	49
II.7.4 .2.Equations des flux.....	50
II.7.4 .3.Equations du couple électromagnétique.....	50
II.8. COMMANDE VECTORIELLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION.....	50
II.8.1. Principe.....	51
II.8.2. Commande de la MADA avec orientation du flux statorique.....	51
II.8.3 Commande vectorielle de la MAD.....	51
II.8.3.1.Relation entre les courants statoriques et rotoriques.....	52
II.8.3.2.Expression des puissances actives et réactives dans le repère synchrone.....	52
II.8.4Contrôle indépendant des puissances actives et réactives.....	54
II.8.4.1.Commande directe	55
II.8.4.2.Commande indirecte	56
II.8.5.Onduleur des tensions à deux niveaux	57
II.8.5.1.Stratégie de commande.....	59
II.8.5.2.Algorithme de commande	59
II.9.SYSTEME DE CHAINE GLOBALE	60
II.10.RESULAT DE SIMULATION	61
II.11.INTERPRETATION DE RESULTA.....	63
II.12.CONCLUSION.....	64

CHAPITRE III : Commande directe de puissance (DPC) de la MADA intégrée dans les énergies éoliennes

III.1 INTRODUCTION	66
III.2. ETAT DE L'ART SUR LA COMMANDE DPC	66
III.3.PRINCIPE GENERALE DE LA DPC	67
III.4.DPC DE LA MADA	68
III.4.1. Estimation de la puissance active et réactive.....	68
III.4.2. Comparateur à hystérésis.....	69
III.4.3. Détection de secteur.....	69
III.4.4.Estimation de flux statorique	70
III.4.5.Table de commutation.....	72
III.5.CACULE DES PUISSANCES INSTANTANÉES	73
III.6.EFFET DES PARAMETRES DE REGLAGE DE SYSTEME DE CONTROLE	74

III.7.RESULAT DE SIMULATION	74
III.8.INTERPRETATION DE RESULTA	76
III.9.CONCLUSION.....	76

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Généralité sur les systèmes éolien-

Figure I.1 : Ancêtres des moulins à vent.....	04
Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	05
Figure I.3 : élément constitution d'une éolienne	06
Figure I.4 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.....	07
Figure I.5 : Éoliennes à axes horizontale.....	09
Figure I.6 : Eoliennes Domestiques.....	10
Figure I.7 : Eoliennes Savonius	10
Figure I.8 : Eoliennes Darrius.....	11
Figure I.9 : Eoliennes hydroliennes.....	12
Figure I.10 : Eoliennes de pompage.....	12
Figure I.11 : Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N6.....	13
Figure I.12 : Efforts sur un élément d'une pale.....	18
Figure I.13 : Structure générale de contrôle d'un système éolien.....	20
Figure I.14 : Bilan des forces sur une pale.....	20
Figure I.15 : Courbe typique d'une turbine éolienne.....	22
Figure I.16 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.....	25
Figure I.17 : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.....	26

Figure I.18 : Eoliennes à vitesse variable.....	28
Figure I.19 : Tube de courant autour d'une éolienne.....	30
Figure I.20 : Interpolation du facteur de puissance.....	31
Figure I.21 : Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne.....	31
Figure I.22 : Vitesse du vent v et vitesse tangentielle ΩtR	32
Figure I.23: Puissance disponible d'une éolienne donnée.....	33
Figure I.24 : Schéma de la turbine éolienne.....	34
Figure I.25 : Schéma bloc du modèle de la turbine.....	33
Figure I.26 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.....	35
Figure I.27 : Schéma bloc du modèle de la turbine.....	35

Chapitre II :

Modélisation et commande vectorielle de la MADA

Figure II.1 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.....	38
Figure II.2 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.	39
Figure II.3 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.....	39
Figure II.4 : Représentation des structures du rotor bobiné de la MADA.....	40
Figure II.5 : Photo de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).....	41
Figure II.6: Principe du rotor bobiné.....	41
Figure II.7 : Modes opérationnels caractéristiques de la MADA.....	43
Figure II.8 : Représentation simplifié de la MADA.....	46
Figure II.9 : Modèle de PARK de la MADA.....	48
Figure II.10 : Représentation de la machine dans le repère diphasé.....	49

Figure II.11 : Orientation de flux statorique.....	51
Figure II.12 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.....	54
Figure II.13 : Schéma bloc de la commande directe.....	55
Figure II.14 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.....	56
Figure II.15 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.....	57
Figure II.16 : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux	57
Figure II.17 : Principe de fonctionnement de la technique MLI triangle sinusoïdale à une porteuse.....	60
Figure II.18 : structure de la chaine globale.....	60
Figure II.19 Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de la MADA	63

Chapitre III :

La Commande Directe de Puissance (DPC)

De la MADA intégrée dans les énergies éoliennes

Figure III.1 : Configuration de la DPC de la MADA.....	68
Figure III.2 : Caractéristique des régulateurs à hystérésis à deux niveaux.....	69
Figure III.3 : Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel (α, β) divisé en douze (6) secteurs.....	70
Figure III.4 : Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de la MADA.....	75

LISTE DES SYMBOLES

β	Angle de l'orientation de pale
C_p	Coefficient de puissance
P_v	Puissance du vent
ρ	Densité d'air
R	Longueur de pales
v	Vitesse du vent
λ	Ratio de vitesse
Ω_r	Vitesse mécanique de la turbine en rad/s
C_r	Le couple mécanique
C_{mec}	Couple mécanique adaptant la vitesse de la turbine à celle du énérateur ainsi
G	Rapport de multiplication.
Ω_g	Vitesse du générateur (rad/s mécanique).
J_T	Inertie totale des parties tournantes (turbine + génératrice) (Kg.m2).
C_T	Couple de la turbine
f_T	Coefficient de frottement visqueux
V_s	Vecteur tension statorique
I_s	Vecteur courant statorique
I_r	Vecteur courant rotorique
Φ_s	Vecteur flux statorique
Φ_r	Vecteur flux rotorique
R_s	Matrice résistance statorique
$[R_r]$	Matrice résistance rotorique.
$[L_{ss}]$	Matrice inductance statorique.
$[L_{rr}]$	Matrice inductance rotorique.

$[M_{sr}]$	Matrice inductance mutuelle stator-rotor.
M_0	Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor (leurs axes magnétiques sont, alors, alignés).
ω_s	Pulsation électrique statorique.
ω_r	Pulsation de glissement ($\omega_s - \omega$).
R_s	Résistance statorique.
R_r	Résistance rotorique
l_s	Inductance propre d'une phase statorique.
l_r	Inductance propre d'une phase rotorique.
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statorique.
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique.
M_{sr}	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe a_s coïncide avec l'axe a_r .
L_s	Inductance cyclique statorique.
L_r	Inductance cyclique rotorique.
L_m	Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor.
i_{dc}	Courant actif nécessaire pour charger le bus continu
i_{dqr}	Composantes du courant rotorique dans le repère (d, q)
i_{dqs}	Composantes du courant statorique dans le repère (d, q)
i_{abcs}	Courants instantanés des phases statoriques
i_{abcr}	Courants instantanés des phases rotoriques
P_v	Puissance portée par le vent
$[P(\theta)]^{-1}$	Transformation de Park inverse
$[P(\theta)]$	Transformation de Park directe
GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation

$\varphi_{sd}\varphi_{sq}\varphi_{rd}\varphi_{rq}$ Flux statoriques et rotoriques dans le repère (d q)

DTC Direct Torque Control

DPC Direct Power Control

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, l'énergie éolienne est devenue une réalité mondiale incontournable. L'évolution de la capacité de production d'électricité par éoliennes n'a pas cessé d'augmenter depuis 1980. L'industrie éolienne est en mesure de devenir un facteur important dans l'industrie de production de l'énergie comme un alternatif propre et renouvelable, et avec le problème de l'échauffement global, les pays à travers le monde investissent des sommes énormes pour la recherche et le développement des nouvelles technologies pour optimiser les couts et augmenter les capacités de l'énergie extraite de l'éolienne, et par conséquent le potentiel énergétique mondial de cette énergie est estimé à une puissance de 5300 TWh, ce qui représente un gisement énergétique non négligeable et très prometteur.

Dans le domaine des entraînements des grandes puissances, il existe une solution nouvelle et originale, utilisant une machine alternative fonctionnant dans un mode un peu particulier. Il s'agit de la machine asynchrone à double alimentation MADA.

Pour obtenir des hautes performances et une meilleure exécution de la génératrice à double alimentation, il faut concevoir une commande robuste adéquate, qui rend le système insensible aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques. Il existe différentes stratégies dans littérature pour résoudre le problème de la commande de la MADA.

Notre objectif dans ce travail est l'étude de la commande directe de puissance (DPC).d'un système éolien basée sur MADA connecte dans un réseau électrique.

Ce travail est subdivisé en trois chapitres :

En premier chapitre, on fait une description générale, et le principe de fonctionnement de système éolien.

Le second chapitre est consacré à la modélisation de machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Le troisième chapitre est consacré à modélisation et la commande directe de puissance (DPC).

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale qui résume notre étude.

Chapitre I

Les énergies éoliennes à vitesse variable

I.1.INTRODUCTION :

L'intérêt pour l'usage des énergies renouvelables augmente, car les populations sont de plus en plus concernées par les problèmes environnementaux. Parmi les énergies renouvelables, on trouve l'énergie éolienne qui est actuellement largement utilisée.

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes (turbines à vent). En cherchant surtout à les utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques : l'entraînement d'une turbine reliée mécaniquement à une machine électrique, génératrice, permet de générer le courant électrique [1].

Une grande partie des éoliennes utilise les machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice qui peut fonctionner à vitesse variable. Elle permet, alors, de mieux contrôler les ressources éoliennes pour les différentes conditions de vent. Bon nombre de configurations existent aujourd'hui, elles utilisent divers types de convertisseurs statiques [1].

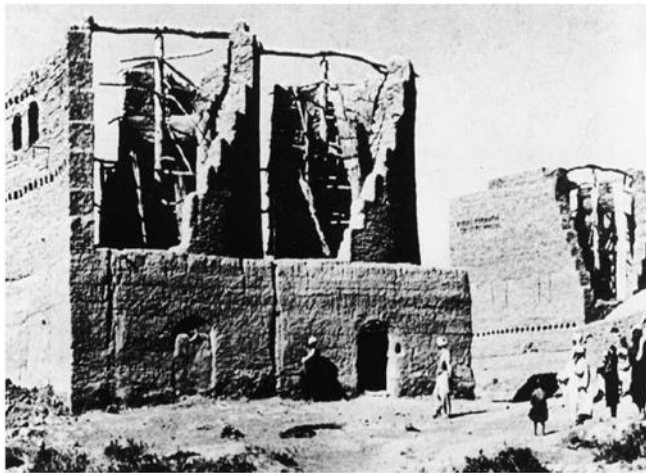
Pour chaque configuration nous disposons d'une commande adaptée ainsi que de performances spécifiques. Ces différents points seront plus détaillés dans les paragraphes qui suivent.

Dans ce chapitre, on présente les éoliennes d'une manière générale et les différents types des machines utilisées dans les éoliennes, mobilisation énergie éolienne, ainsi que le choix de la machine qui sera utilisé pour l'étude menée dans ce mémoire.

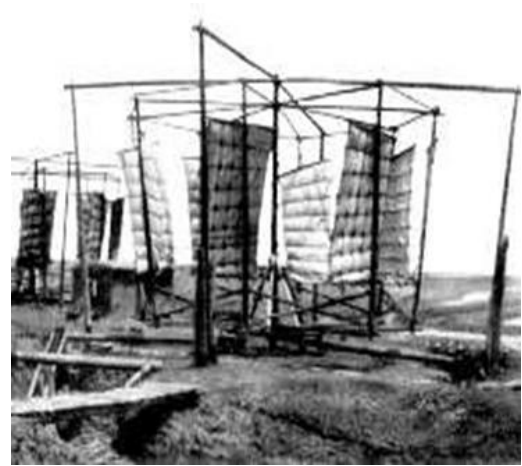
I.2. HISTORIQUE:

Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grande quantité d'énergie. L'utilisation de cette énergie pour effectuer un travail est une pratique aussi vieille que l'histoire. Il y a environ 5000 ans, les égyptiens furent les premiers à capter cette source d'énergie dans le domaine maritime. Ils s'en servirent pour déplacer de petites embarcations à l'aide d'une voile. Les Chinois sont, à cette époque, les premiers à prendre la mer sur des radeaux de fortune [2].

Quant aux premières éoliennes, il faut remonter jusqu'à 4000 années en arrière pour en trouver la trace. C'est sous le règne d'Hammourabi, roi de Babylone, qu'apparurent les premiers systèmes d'irrigation entraînés par le vent et on utilisait déjà en Perse les premiers moulins à vent à axe vertical pour moudre du grain, des moulins à vent semblables et extrêmement primitifs ont survécu en Afghanistan jusqu'à nos jours comme le montre la figure 1.1. Petit à petit, cette technologie commença à faire son chemin vers les pays méditerranéens et l'Europe Centrale [2].



(a) Moudre les grains en Afghanistan 1977.



(b) Pompage de l'eau en Chine.

Fig.I.1 - Ancêtres des moulins à vent.

I.3 PRINCIPES ET ELEMENTS CONSTITUTIFS DE L'EOLIEN:

I.3.1 DEFINITION DE L'ENERGIE EOLIENNE:

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [2].

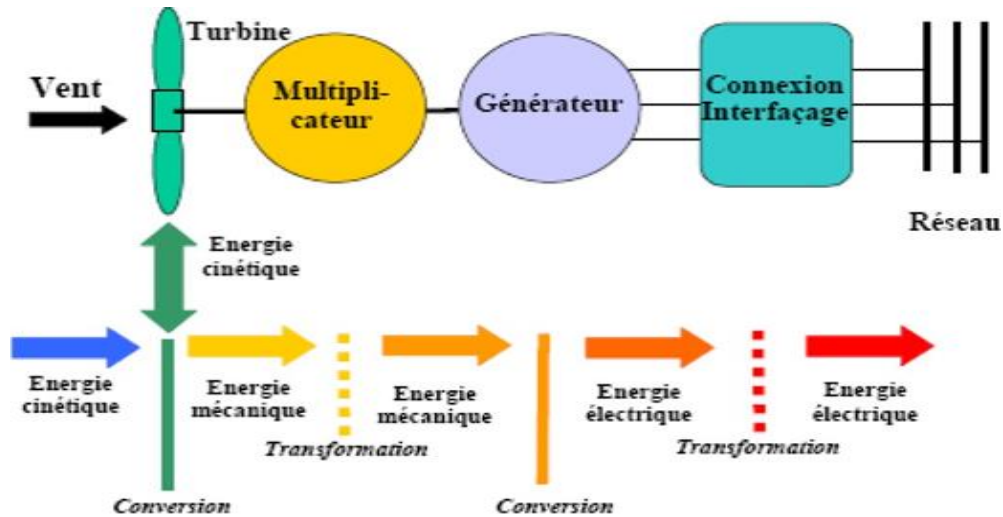


Fig. I-2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [1].

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. [1].

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW

I.3.1 DESCRIPTIF D'UNE EOLIENNE:

L'éolienne est composée de deux parties : une partie mobile le rotor et une partie fixe le stator, permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. L'éolienne est équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent, Une éolienne "classique" est généralement constituée de [3].

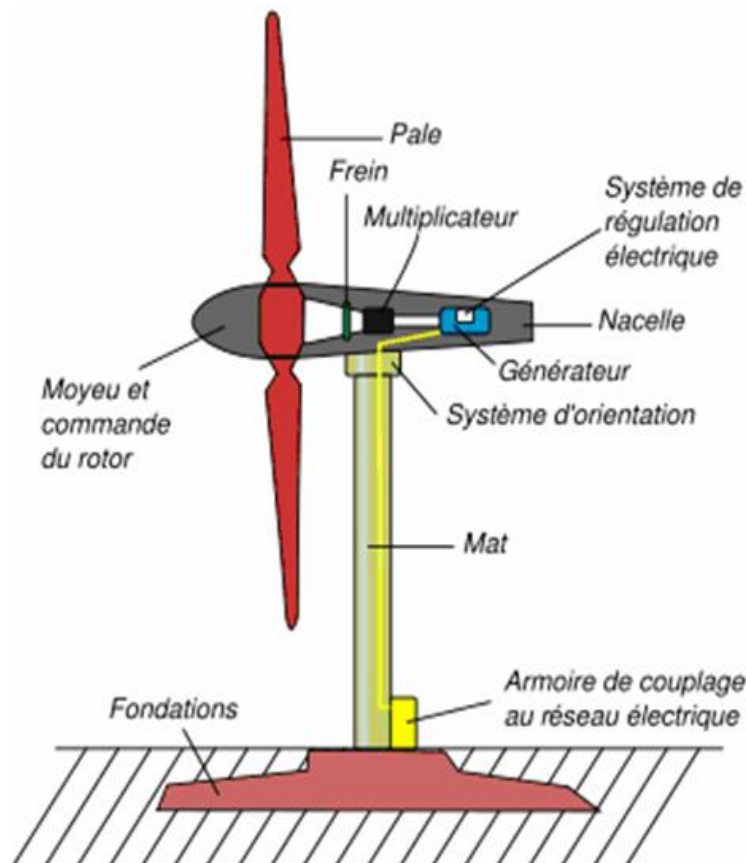


Figure I-3 : élément constitution d'une éolienne

- **Le mât ou la tour** : solidement implanté dans le sol, c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier d'une part du maximum de l'énergie cinétique du vent, et de l'autre part pour éviter les perturbations près du sol.
- **Le rotor** : formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.
- Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de

fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

- Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).
- **La nacelle** : située en haut du mât, elle regroupe les équipements mécaniques permettant de produire l'électricité en couplant la génératrice électrique à l'arbre du rotor, elle est représentée par la (Figure. I-4) [8].

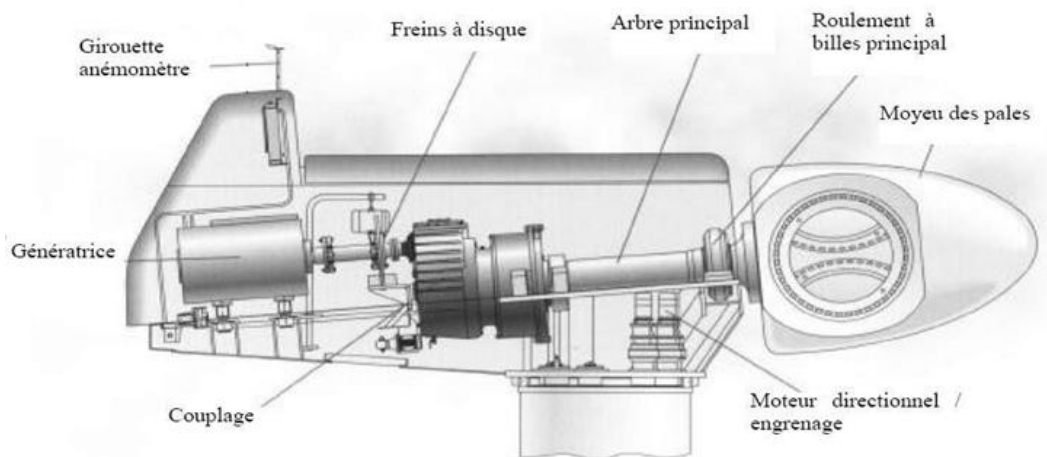


Fig. I-4 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne

Les équipements abrités par la nacelle sont :

- **Le multiplicateur** : Il sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne (arbre lent) à celle de la génératrice électrique (arbre rapide).
- **Le système de refroidissement** : Il se compose en général d'un ventilateur électrique pour la génératrice et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.
- **La génératrice électrique** : C'est l'élément principal qui permet la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle est en général une machine asynchrone à cage ou à rotor bobiné.
- **Le système de commande** : Permet de contrôler et assurer le bon fonctionnement de l'éolienne. Grâce à ce système de supervision et de contrôle, l'éolienne peut être arrêtée

automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité de fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.

- **Système d'orientation des pâles** : Il sert au réglage aérodynamique (régulation de puissance). [09].

I.4.Principe d'une éolienne:

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.

La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice [02].

I.5.Les différents types d'éoliennes :

On distingue les éoliennes on shore (terme américain signifiant sur le sol c'est-à-dire sur les continents), et les éoliennes off-shore (sur la mer). Ces dernières présentent des avantages au niveau des nuisances sonores puisqu'elles sont éloignées des habitations et au niveau des vents car les vents marins sont plus nombreux et plus forts que les vents continentaux. En revanche, elles sont beaucoup plus difficiles à installer et donc beaucoup plus coûteuses. [06].

- Les éoliennes à axe horizontal
- Les éoliennes domestiques
- Les éoliennes à axes verticaux
- Les hydroliennes
- Eolienne de pompage

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

- Les turbines éoliennes à axe horizontal.
- Les turbines éoliennes à axe vertical.

I.5.1.Les éoliennes à axe horizontal:

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la

production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal [07].



Fig. I-5 : Éoliennes à axes horizontales.

I.5.2. Les éoliennes domestiques:

Leur taille n'excède pas les 12m et elles ont une puissance comprise entre 100W et 20Kw. Leur implantation en France est encore très faible, environ 600. (Beaucoup moins que dans certains autres pays européens).

Les éoliennes horizontales ou domestiques peuvent être de type « aval » ou « amont ». Dans la majorité des cas, ce sont des éoliennes « amont », c'est-à-dire que le vent souffle directement sur les pâles de l'éolienne. Cela implique l'utilisation de pâles très rigides car elles sont très exposées au vent.

La configuration « aval » est utilisée plus particulièrement pour les petites éoliennes qui sont munies de pâles plus fragiles. [06].



Fig. I-6 : Eoliennes Domestiques.

I.5.3. Eoliennes à axe vertical:

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès.

Il existe deux principaux types d'éoliennes à axe horizontal : type Savonius et type Darrieus. Leur rendement est moins bon que celui des éoliennes à axe horizontal mais elles ont d'autres avantages non négligeables : elles sont moins sensibles aux vents forts, démarrent avec un vent plus faible et n'ont pas besoin d'être orientées. Il existe également un 3ème type moins répandu d'éolienne à axe vertical : les éoliennes à voilures tournantes.

A. Éoliennes de type Savonius :

Cette éolienne a également un faible rendement par rapport à une éolienne classique mais elle a l'avantage de fonctionner avec toutes les directions du vent. L'éolienne est compacte et le fait d'être sur un axe vertical diminue les vibrations ce qui peut être très contraignant sur un bâtiment.



Savonius-Rotor

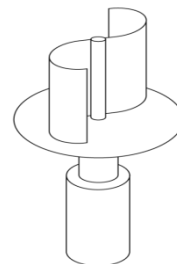


Fig. I-7 : Eoliennes Savonius .

B. Éoliennes de type Darrius :

Elles sont peu encombrantes, ne nécessitent pas de systèmes d'orientations et sont simples à installer. Par contre, elles ont un faible rendement et ne démarrent pas toutes seules.

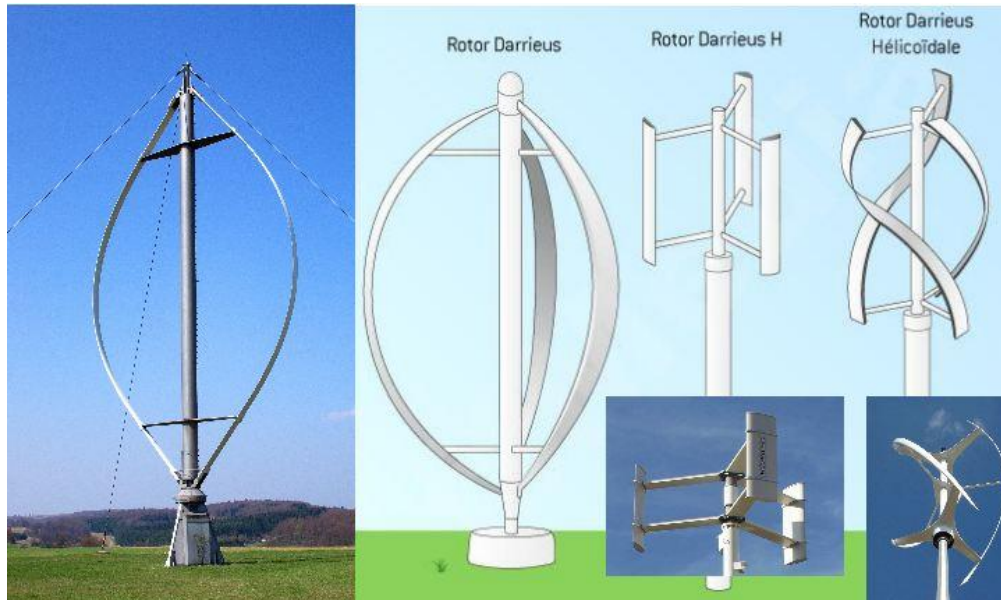


Fig. I-8 : Éoliennes Darrius

I.5.4. Les hydroliennes:

Les hydroliennes sont des éoliennes spécifiques qui fonctionnent sous l'eau en utilisant l'énergie des courants marins. Ce sont des éoliennes sous-marines ou aérogénérateurs marins.

Le développement des hydroliennes est très récent et déjà très prometteur. Si la fabrication des éoliennes terrestres est beaucoup moins complexe que celle des hydroliennes, ces dernières peuvent déployer une puissance beaucoup plus grande pour une taille beaucoup plus petite. Cela est dû au fait que l'énergie des courants marins est 800 fois supérieure à celle du vent. Les variations au sein des courants marins sont également beaucoup plus faibles que les variations du vent.

L'inconvénient majeur des hydroliennes est son impact sur l'environnement marin : si les hélices tournent assez lentement et créent moins de perturbations que les hélices d'un bateau, les hydroliennes créent cependant des zones de turbulence plus grandes empêchant le développement de la faune et de la flore marine sur de grands périmètres.

Les hydroliennes étant sous l'eau, l'érosion est très forte et pour l'instant la durée de vie des hydroliennes est assez limitée. L'installation d'hydroliennes notamment au niveau des courants de marée reste une voie très intéressante pour la production d'énergie nouvelle. [07].

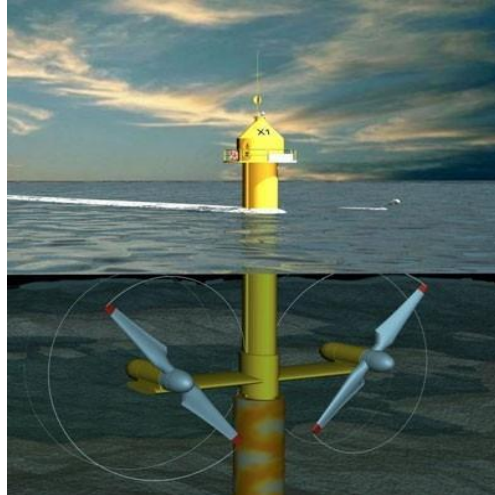


Fig. I-9 : Eoliennes hydroliennes

I.5.5 .Eolienne de pompage:

Créées dans les années 1930, les éoliennes « Oasis » ont pour fonction d'utiliser la force motrice du vent pour actionner une pompe à eau. Acquisies par milliers par les agriculteurs français, elles sont employées pour de nombreux usages : [SITE 1].

- L'alimentation du bétail,
- L'irrigation des cultures maraîchères,
- La lutte contre les incendies (alimentation de réserves en eau),
- Le drainage et l'assèchement de zones humides,
- L'oxygénation des étangs,
- La pisciculture,
- La sylviculture,
- Le pompage d'eau de mer pour les marais salants,
- La création de points d'eau pour le gibier...



Fig. I-10 : Eoliennes de pompage

I.6.Constitution d'une éolienne modern:

La figure (I.11) représente une Chaîne électromécanique à multiplicateur de vitesse d'une éolienne moderne tripale à axe horizontal de type Nordex N60 [29].

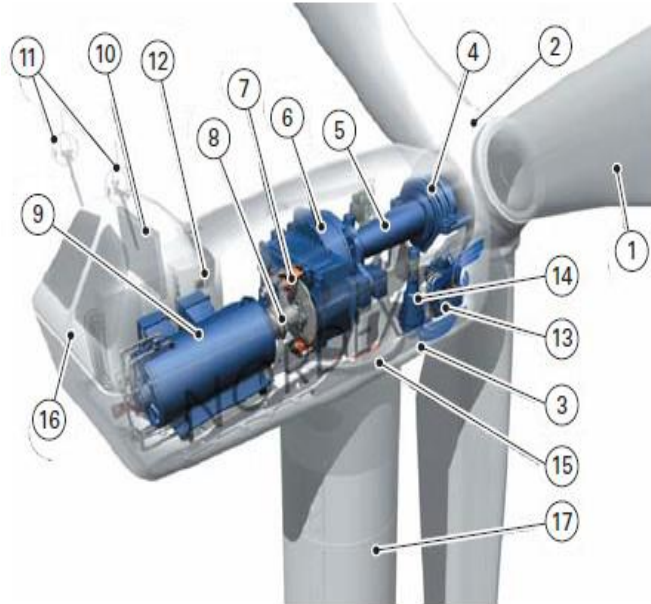


Figure I-11 : Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N6.

Elle est constituée d'une tour (17), supporte la nacelle (3) et le moyeu de la turbine (2) sur lequel sont fixées les pales (1). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales.

La nacelle (3) partiellement accueille la génératrice (9) et son système de refroidissement (10), le multiplicateur de vitesse (6) et différents équipements électroniques de contrôle (12) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation (13), (14), (15) ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne. Le multiplicateur de vitesse comporte un arbre lent (12) muni d'un palier à billes, et un arbre à grande vitesse. Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7) et un accouplement flexible (8) avec le générateur (9). Le tout est protégé par un capot en acier (16).

Un anémomètre et une girouette (11) situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent. [29].

I.7.AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE:

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.[05].

I.7.1 LES AVANTAGES:

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement.
- Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, etc.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable .
- Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace .
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, selon l'article le coût de l'éolienne à diminuer presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie

éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines.

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple [5].

I.7.2 LES INCONVENIENTS:

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : Ça reste néanmoins un thème subjectif. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien. [5].
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils, extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne.

Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux [5].

- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de

la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien.
- Selon l'article de, il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.

I.8. Fonctionnement d'une éolienne:

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Leurs conditions de fonctionnement dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. Par conséquent, on ne peut agir qu'en limitant, de manière optimale dans certaines conditions, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique, avant transfert vers le réseau [05].

I.8.1 Quelques notions sur le vent :

La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers. Le vent est défini par sa direction et sa vitesse.

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents.

La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques-unes au tableau I.1

Degrés Beaufort	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse du vent (km/h)	Description générale	Pression sur surface plane (daN/m ²)
0	0 à 0.4	< 1	Calme	
3	3.5 à 5.5	12 à 19	Petite brise	3.2 (5 m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4 (7 m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent frais	22 (20 m/s)
8	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52 (20 m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117 (30 m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	cyclone	470 (60m/s)

Tableau I-1 Echelle Beaufort

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude. Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s [8].

I.8.2. Efforts sur une pale:

La figure (I.4) illustre une coupe transversale d'une pale, vue du bout de la pale, qui se déplace dans un vent incident de vitesse V . Du fait de la rotation, la pale est soumise en plus du vent incident de vitesse V , à un vent relatif U dirigé dans le sens contraire de rotation de la turbine. La vitesse de ce vent relatif est donnée par : [5].

$$U = r \cdot \Omega_T \quad (\text{I. 1})$$

Où : r est la distance entre l'axe de rotation de la turbine et le tronçon de la pale en m .

Ω_T : est la vitesse de rotation de la turbine en rd/s .

La composition de vitesses de ces deux vents, incident V et relatif U donne la vitesse du vent réel V_{rel} au quel est soumise la pale.

$$V_{rel} = V + U \quad (\text{I. 2})$$

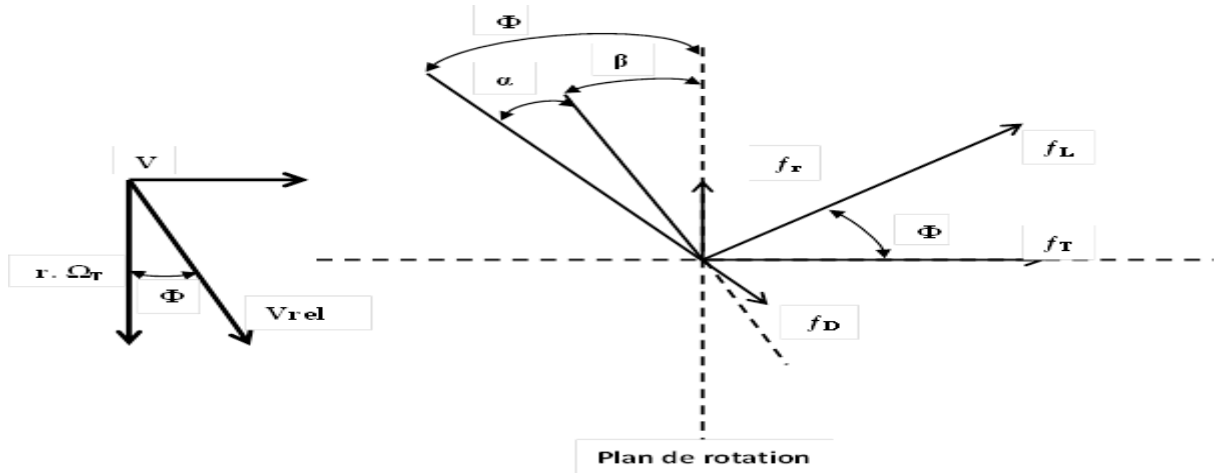


Figure I-12 Efforts sur un élément d'une pale.

L'écoulement d'air crée une différence de pression en dessus et en dessous de la pale qui aura comme conséquence deux forces, l'une perpendiculaire à la direction du vent réel appelée la portance f_L et l'autre dans le même sens que V_{rel} appelée la trainée. Ces deux forces sont généralement exprimées en fonction du coefficient de portance C_L et du coefficient de trainée :

$$f_L = \frac{\rho \cdot d \cdot A}{2} \cdot V_{rel}^2 \cdot C_L \quad (I.3)$$

$$f_D = \frac{\rho \cdot d \cdot A}{2} \cdot V_{rel}^2 \cdot C_D \quad (I.4)$$

Ou :

ρ Densité de l'air.

: Surface baliée par le rotor de la turbine.

(α) , (α) : Coefficient de trainée et coefficient de portance respectivement.

La résultante de ces deux forces peut être décomposée en une composante axiale et une autre tangentielle. La composante axiale par unité de longueur est donnée par :

$$f_T = \frac{\rho \cdot d \cdot A}{2} \cdot V_{rel}^2 \cdot [C_L(a) \cos(\varnothing) + C_D(a) \cdot \sin(\varnothing)] \quad (I.5)$$

Cette force doit être supportée par le rotor, la tour et les fondations. D'une autre part, la force tangentielle développe un couple de rotation qui produit le travail utile. Ce couple par unité de longueur est donné par :

$$f_r = \frac{\rho \cdot d \cdot A}{2} \cdot V_{rel}^2 \cdot [CL(a) \sin(\varnothing) - CD(a) \cdot \cos(\varnothing)] \quad (I. 6)$$

Seule la portance contribue à la génération du couple utile, la trainée crée plutôt un couple dans le sens inverse. Par conséquent, un rapport élevé entre la portance et la trainée CL/CD est fortement conseillé pour avoir un bon rendement de la turbine [06].

I.8.3. Contrôle de la puissance:

Comme nous venons de le voir au paragraphe précédent, le couple éolien est en fonction du carré de la vitesse du vent sur laquelle on n'a qu'une action mais aussi il est fonction de l'angle d'incidence α que nous pouvons modifier ça valeur. Le contrôle de puissance peut se faire donc à chacun des deux niveaux de conversion de l'énergie et de différentes manières suivant les conditions de fonctionnement.

- ✓ Au niveau de la turbine, essentiellement pour limiter la puissance convertie pour les vents forts. Plusieurs méthodes sont utilisées.
- ✓ Au niveau du générateur, en particulier pour les structures à vitesse variable. Ceci permet d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens.

Le système de contrôle d'un système générateur éolien peut par ailleurs être séparé en trois niveaux fonctionnels essentiels [05].

- Le système de contrôle des grandeurs physiques. Il s'agit d'assurer la régulation et l'asservissement des grandeurs autour des valeurs de consignes délivrées par le niveau de commande supérieur.
- Le système de gestion et d'élaboration des lois de consignes et de gestion des protections.
- Le système de gestion de l'ensemble dans un parc éolien. C'est le niveau de contrôle supérieur qui gère un certain nombre d'éoliennes en fonction de la demande provenant des contraintes d'utilisation du réseau électrique.

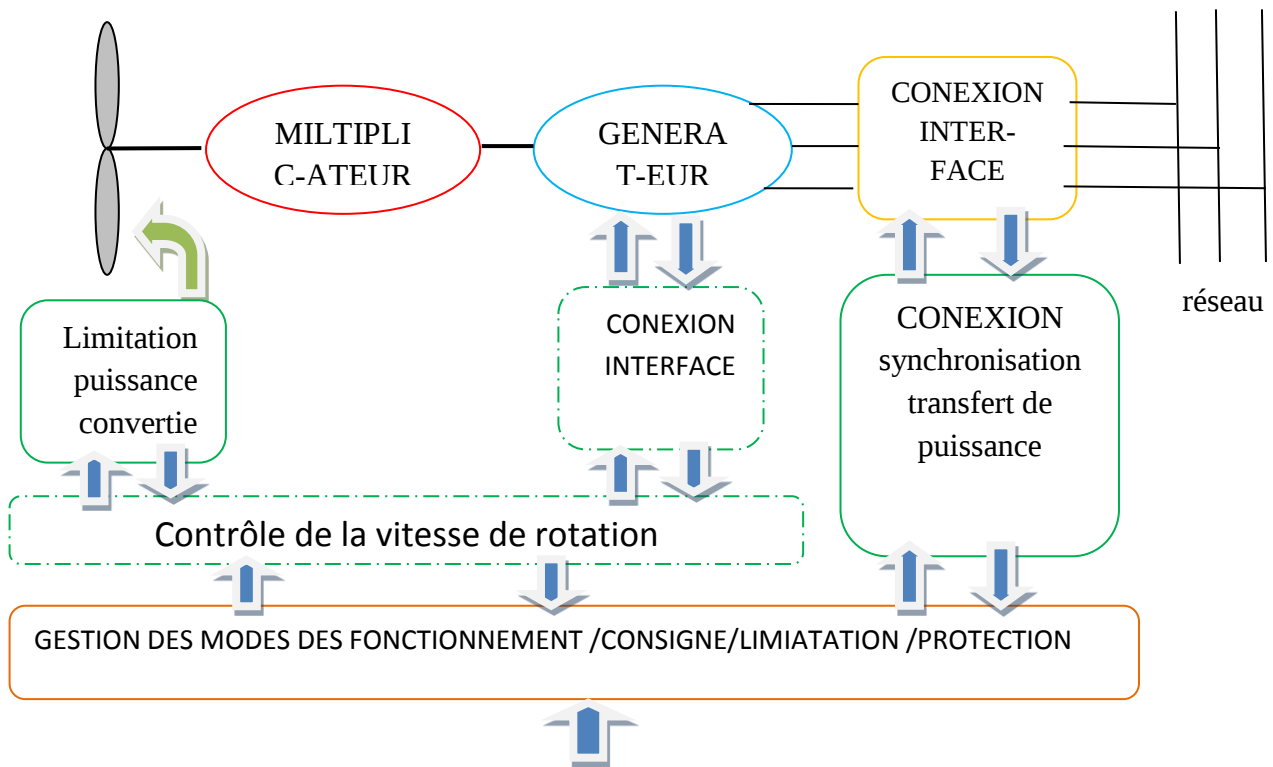


Figure I-13 Structure générale de contrôle d'un système éolien.

I.9. Régulation de la puissance d'une éolienne:

I.9.1 Bilan des forces sur une pale :

La figure (1.14) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur $\vec{V}$. Le vecteur $\vec{V}_{rot}$ représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée $\vec{V}_{res}$. L'action du vent sur la pale produit une force qui se décompose en une poussée axiale F_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation F_{rot} qui produit effectivement le déplacement [5].

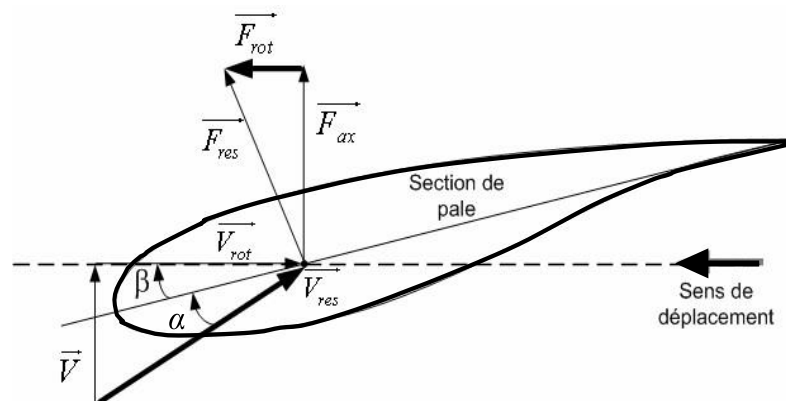


Fig. 1.14 - Bilan des forces sur une pale

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale. [05].

I.9.2 Régulation mécanique

Les objectifs de la régulation mécanique sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts d'une part et délimiter la puissance extraite par la turbine éolienne d'autre part. En effet, cette turbine est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nécessaire, dénommée puissance nominale P_n . Cette puissance P_n est obtenue à partir de la vitesse v_n (vitesse nominale) du vent relatif. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à v_n la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter sa destruction mécanique, en faisant de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

A côté de la vitesse nominale V_n qui varie entre 11m/s et 15m/s en fonction des technologies, on spécifie aussi :

- La vitesse de démarrage V_d (cut-in), à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie. Selon les constructeurs, V_d varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance. [05].
- La vitesse maximale du vent V_m (cut-off), pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement. Pour la grande majorité des éoliennes, V_m vaut 25m/s.

Quatre zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées (voir figure 1.15):

- ❖ **La zone I**, la vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est négligeable ($P=0$).
- ❖ **La zone II**, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent v . Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande sera appliqué pour permettre à la turbine d'extraire la puissance maximale du vent. Pour ce but, l'angle de calage des pales β est maintenu constant à sa valeur minimale (généralement $\beta=0^\circ$). Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

- ❖ **La zone III**, correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de la turbine est limitée à une valeur maximale pour limiter la puissance P fournie par l'éolienne égale à la puissance nominale P_n , afin de ne pas subir de dégâts. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.
- ❖ **La zone IV**, lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne V_m , les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($\beta=90^\circ$) afin de protéger la partie mécanique de l'éolienne et d'éviter son endommagement. Dans ce cas, la turbine s'arrête et la puissance extraite par la l'aérogénérateur sera nulle ($P_g=0$).

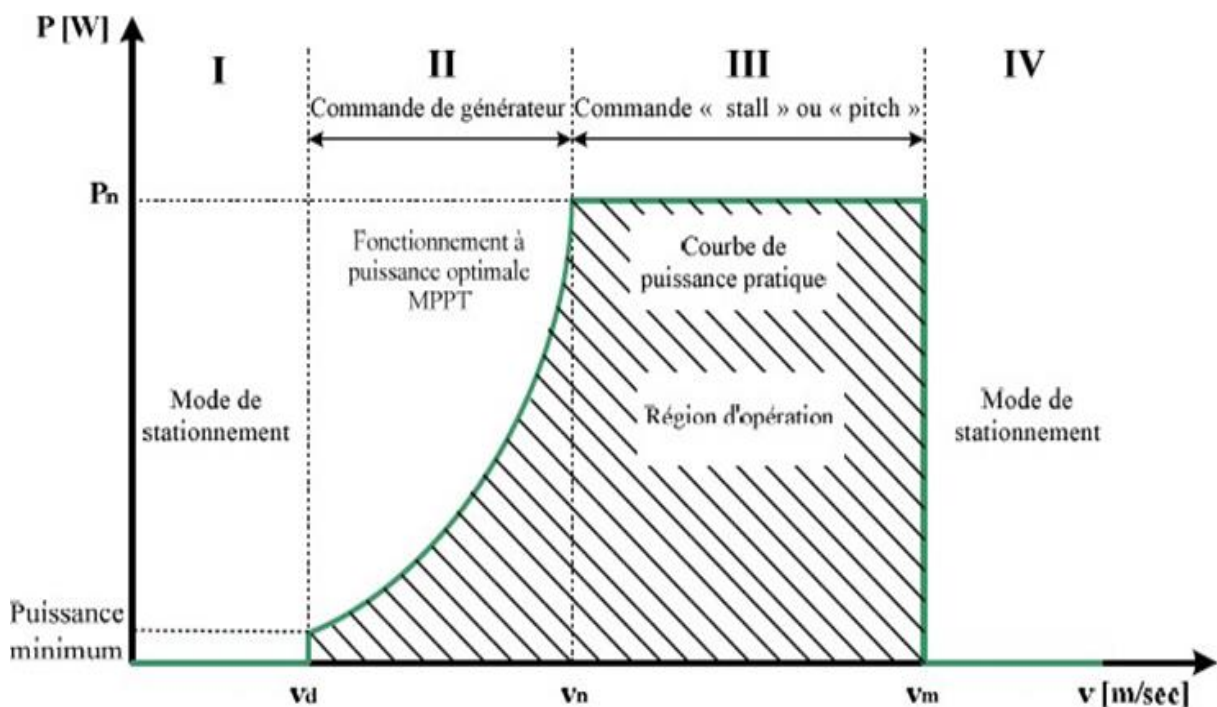


Fig.1.15 - Courbe typique d'une turbine éolienne.

Généralement, il existe quatre systèmes de régulation mécanique pour contrôler la vitesse de l'éolienne par rapport à la vitesse du vent. Autrement dit, pour limiter la puissance extraite de la turbine, à la valeur de la puissance nominale de la génératrice.

I.10. Régulation de la vitesse de rotation d'éolienne:

- ✓ **Le système à calage ou à pas variable « pitch control »** qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesse. Cette technique est plutôt utilisée sur les éoliennes à vitesse variable de moyenne et fortes puissances.
- ✓ **Le système à décrochage aérodynamique passif « passive stall control »**, le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance chute plus vite: il s'agit donc d'une solution passive. Ce système de contrôle est généralement destiné aux éoliennes à vitesse fixe.
- ✓ **Le système à décrochage aérodynamique actif « active stall control »**, ce n'est qu'une combinaison des deux méthodes précédemment citées. Les turbines les plus modernes et de grande capacité utilisent déjà cette technique comme le proposent certains fabricants danois. Pour les vents faibles et modérés, la commande est de type « pitch », et pour le réglage sur la plage à puissance nominale, les pales sont orientées de façon à forcer la perte de portance, ce qui est équivalent à la méthode « passive stall ».
- ✓ **Le système d'orientation « yaw control »**, pour les vents supérieurs à v_m (vent élevée), un dispositif oriente automatiquement la nacelle face au vent grâce à une mesure de la direction du vent effectuée par la girouette située à l'arrière de la nacelle, ce qui annule toute conversion d'énergie. Ce type de commande est cependant limité aux petites turbines éoliennes car cette méthode engendre des efforts mécaniques importants au niveau du mat et des pales. Les éoliennes de plus grande taille ne peuvent pas adopter cette méthode de régulation de puissance sans provoquer des efforts pouvant endommager l'éolienne[05].

I.10.1 Régulation électrique (contrôle MPPT):

Les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitation au mieux l'énergie disponible dans le vent. C'est pour cela que de nombreux systèmes de commande de l'éolienne, agissant au niveau de la partie mécanique ou électrique, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie. On parle alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum (MPPT en anglais Maximum Power Point Tracking). Ces systèmes utilisent différents moyens afin d'obtenir ce point de puissance maximum. Il est possible de modifier l'angle de calage des pales, ou la

vitesse de rotation de l'hélice ou bien encore jouer sur la commande de la génératrice. La recherche du maximum se fait en permanence et l'éolienne s'adapte donc à chaque variation de vent pour être dans une configuration d'extraction maximale de puissance. De tels systèmes introduisent aussi des sécurités qui permettent par exemple de limiter la puissance produite lorsque le vent devient trop important et risque d'endommager l'éolienne[6].

Selon la littérature spécialisée, la commande des turbines éoliennes se fait de préférence par les moyens mécaniques aérodynamiques qui sont décrits précédemment. Cependant, en suivant les principes de conversion de l'énergie du vent il apparaît qu'une autre forme de faire la régulation de la puissance produite par l'éolienne est d'agir sur sa vitesse de rotation. Plusieurs configurations sont réalisables, avec des machines synchrones ou asynchrones et c'est ici que le domaine des asservissements des machines électriques prend sa place. Il y a déjà quelques d'années que cette discipline a développé différentes formes de commande de vitesse parmi lesquelles plusieurs sont applicables aux systèmes de conversion éoliens.

Les systèmes traditionnels fonctionnent typiquement à fréquence fixe, imposée par le réseau auquel ils sont connectés. Le fait de travailler à fréquence fixe et donc, à vitesse de rotation presque fixe, implique qu'il n'y a qu'une seule vitesse de vent pour laquelle l'énergie disponible est correctement exploitée. Pour les autres vitesses de vent, la capture d'énergie se fait de façon sous-optimale.

Pour donner intérêt à la vitesse variable, on donne l'exemple de la figure 1.33; d'où pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 ; on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

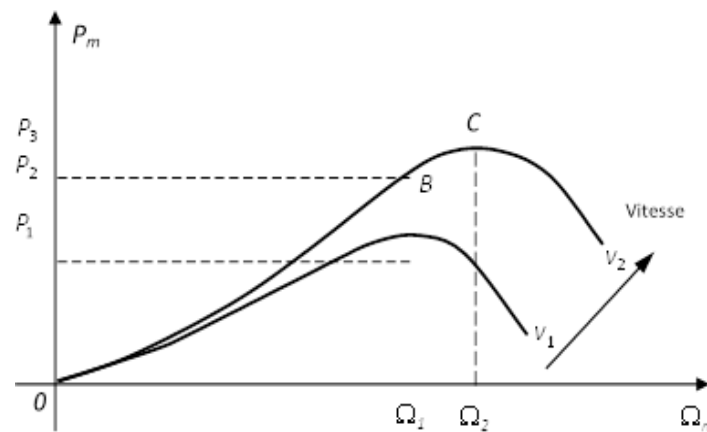


Fig.1.16 - Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

Au vu de la caractéristique au-dessus (figure 1.16), il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités.

Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en terme de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent.

L'MPPT peut être définie comme étant une stratégie de gestion permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs éoliens à travers une électronique de puissance permettant de maximiser l'efficacité énergétique du système à travers la variation de la vitesse du vent.

Les caractéristiques de la figure 1.17 représentent les allures des puissances théoriquement disponibles au niveau d'une turbine éolienne de grande puissance en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice pour différentes vitesses du vent. Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1900tr/min sur la figure 1.34) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour atteindre ces maxima, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1200 et 2000tr/min pour cet exemple (courbe de réglage MPPT) .

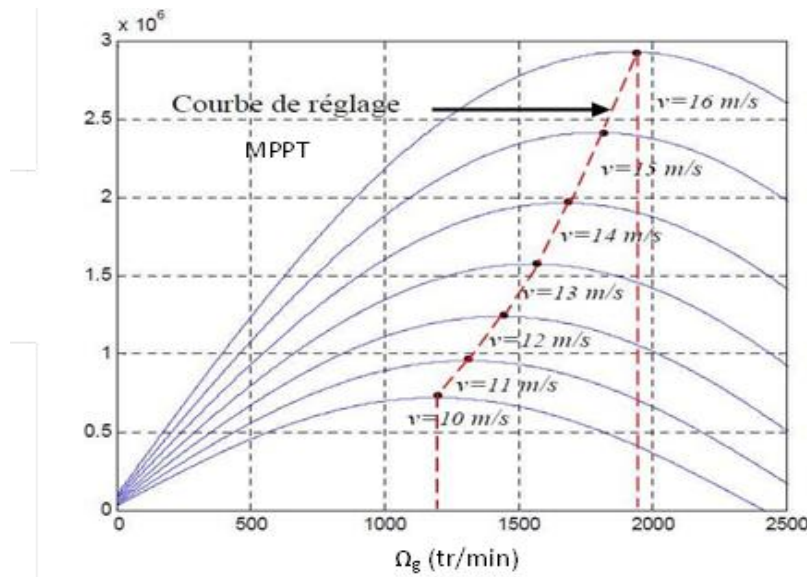


Fig. 1.17 - Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne

Donc, l'objectif de cette stratégie est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale v_n , au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale V_m qui pourrait endommager la turbine.

I.10.2.1 Techniques d'extraction du maximum de la puissance:

Dans cette partie, nous présenterons une stratégie pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne (Figure. I.15). On distingue deux familles de structures de commande [22] :

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

I.11 Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens à vitesse variable:

I.11.1. Système utilisant une génératrice synchrone :

Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Autrement dit, si la génératrice est connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [11].

L'utilisation de génératrices synchrones dans les applications éoliennes à grande puissance est récente. Deux types de génératrices sont utilisés, à bobinage inducteur ou à aimants permanents

I.11.2. Système utilisant une génératrice asynchrone :

L'éolienne dans cette configuration entraîne une génératrice asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé sur le circuit statorique. Contrairement à une éolienne à vitesse fixe, les tensions et la fréquence à la sortie de la génératrice ne sont plus imposées par le réseau, ce qui permet de réguler la vitesse de l'éolienne. La commande de l'onduleur permet de garder constante la tension du bus continu.

I.11.3. Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation :

C'est une des configurations en forte croissance dans le marché des turbine éolienne. La structure figure (I.15) dont le stator est relié directement au réseau de puissance et dont le rotor est connecté à un convertisseur électronique qui fait office de variateur de fréquence. La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur la plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor.

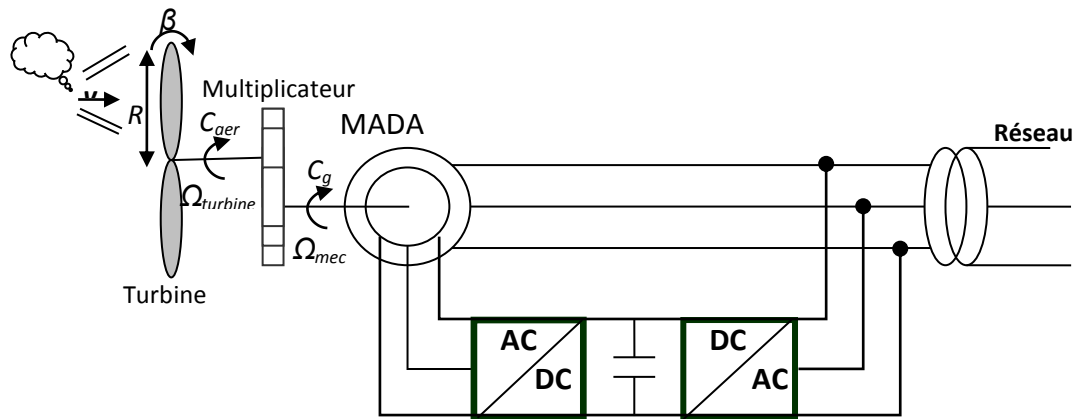


Figure I-18 Eoliennes à vitesse variable.

Malgré la présence des courants glissements, la majorité des projets éolienne reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone piloté par le rotor .L'insertion d'un convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau mais également pour la vitesse supérieure au synchronisme, du rotor vers le réseau. [11].

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance

I.12.Modélisation d'une turbine éolienne:

I.12.1.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 turbine, qui entraînera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G la figure(I.24) montre le schéma d'une turbine éolienne.

I.12.2.la puissance d'une éolienne:

La puissance cinétique du vent à travers une turbine éolienne de rayon R, est donnée par la relation suivante [08] :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_{\text{ent}}^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{\text{ent}}^3 \quad (\text{I. 7})$$

Avec :

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_{ent} : est la vitesse du vent en (m/s).

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

I.12.3. la puissance aérodynamique:

Toutefois, toute l'énergie ne peut être captée, car la vitesse d'un vent n'est pas nulle après la turbine. 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, la puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_{aer} = C_p \cdot P_V = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (I.8)$$

C_p : est le coefficient de performance ou coefficient de puissance.

Avec :

β : est l'angle d'orientation des pales.

Le couple aérodynamique est donné par

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (I.9)$$

I.12.4. Le coefficient de puissance:

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par le savant Allemand **Albert Betz** dans les années 1920. Betz suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse v_1 et à l'infini en aval d'une vitesse v_2 (figure 1.19).

La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique, la vitesse v_2 est nécessairement inférieure à v_1 .

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne v_1 et la vitesse du vent après passage à travers le

rotor v_2 soit $\frac{v_1 + v_2}{2}$

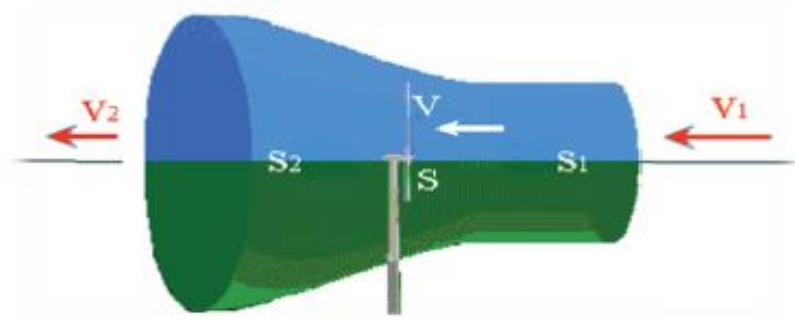


Fig.1.19 - Tube de courant autour d'une éolienne.

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est donnée par:

$$m = \frac{1}{2} \rho S (v_1 + v_2) \quad (1.10)$$

La puissance P_t alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton):

$$P_t = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2) \quad (1.11)$$

Soit en remplaçant l'expression (1.3) dans (1.4), on obtient:

$$P_t = \frac{1}{4} \rho S (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2) \quad (1.12)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse v_1 , la puissance P_v correspondante serait alors :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \quad (1.13)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors:

$$\frac{P_t}{P_v} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_1}{v_2} \right) \left(1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^2 \right) \quad (1.14)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (1.14) (voir figure 1.20), on s'aperçoit que le ratio P_t / P_v appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit 0.593 . C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Dorénavant, pour alléger l'écriture, nous allons considérer que le symbole v correspond à v_1 pour la vitesse du vent. [12]

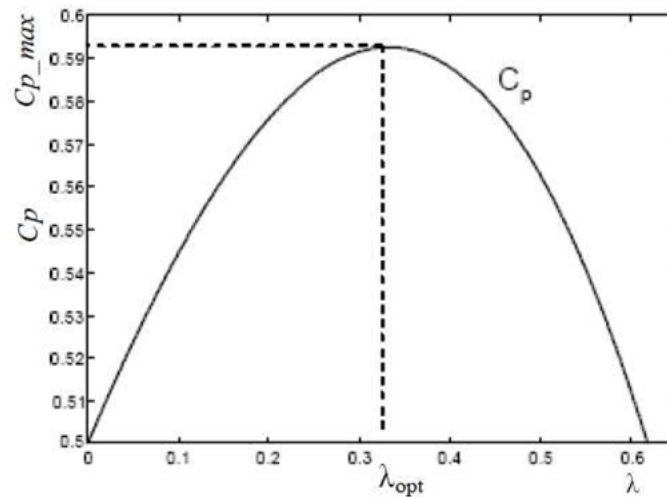


Fig.1.20 - Interpolation du facteur de puissance

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la figure (I.21).

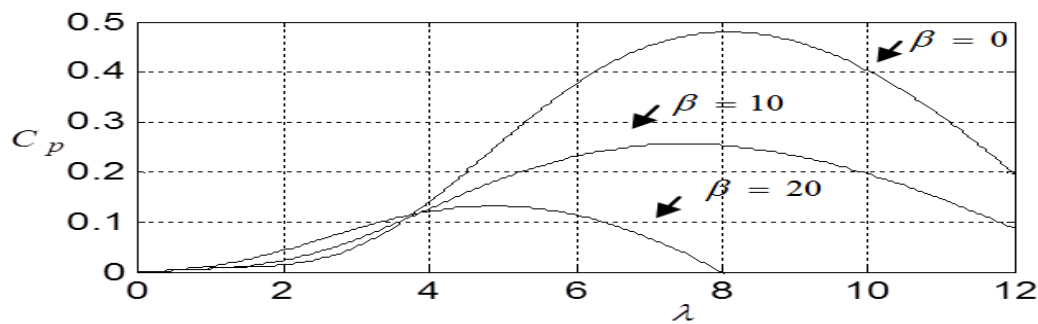


Figure I-21 Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de l'angle de calage des pâles β et la vitesse relative λ , représentant le rapport de la vitesse tangentielle de l'extrémité des pales de l'éolienne ($\Omega t R$) sur la vitesse instantanée du vent v (voir figure 1.20). Alors:

$$C_p = C_p(\lambda, \beta) \quad (1.15)$$

$$\text{Avec:} \quad \lambda = \frac{R\Omega t}{v} \quad (1.16)$$

Où Ω_t est la vitesse mécanique de rotation de l'aérogénérateur en [rad/s], et R : le rayon de la turbine éolienne en [m].

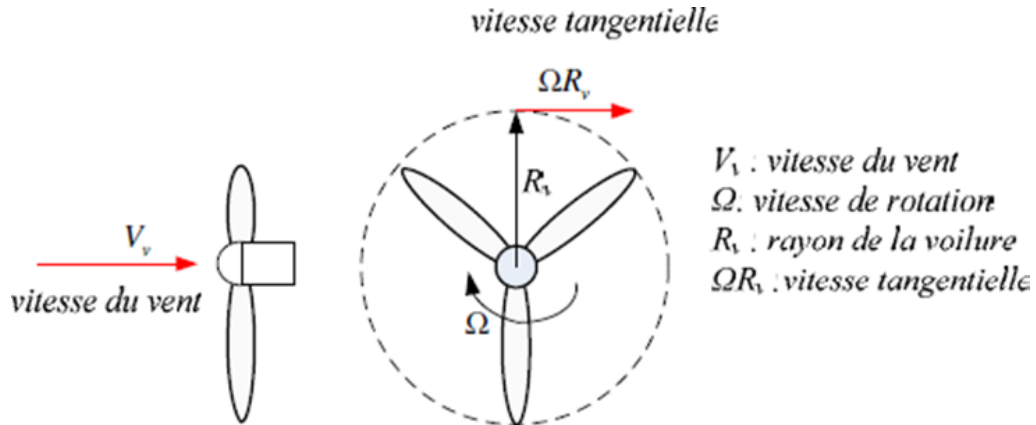
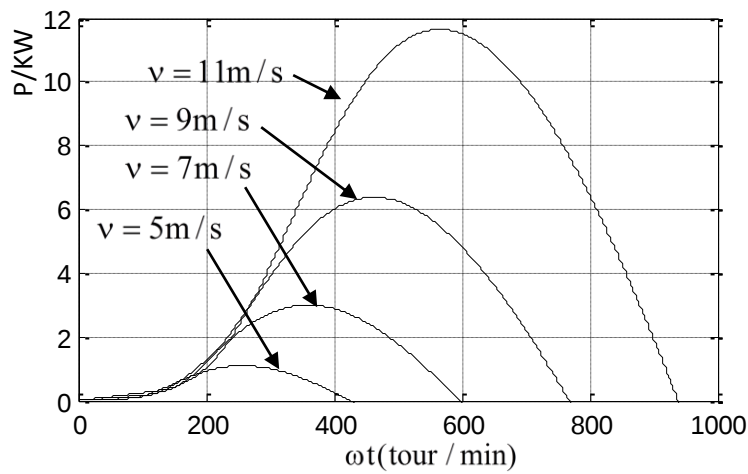
Fig.1.22 - Vitesse du vent v et vitesse tangentielle Ωr .

Figure I-23 Puissance disponible d'une éolienne donnée.

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 10KW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante.

$$C_P(\lambda, \beta) = 0.5176 \cdot \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} - 0.0068 \cdot \lambda \quad (I.17)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^2 + 1}$$

I.12.5. Modèle de multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice, mathématiquement elle est modélisée par les équations suivantes [30] :

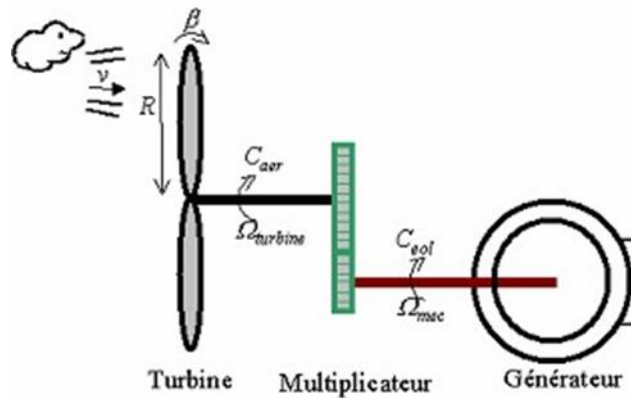


Figure I-24 : Schéma de la turbine éolienne.

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (I.18)$$

Avec :

C_g : Couple issu du multiplicateur.

C_{aer} : Couple aérodynamique.

G : Gain du multiplicateur

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (I.19)$$

I.12.6. Equation dynamique de l'arbre

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

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_{mes} \quad (I.20)$$

Avec :

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

C_{mes} : c'est le couple mécanique, ce dernier prend en compte le couple électromagnétique produit par la génératrice C_{mes} , le couple de frottement visqueux C_{vis} et le couple issu du multiplicateur C_g

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (I.21)$$

le couple résistant qui résulte des frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{ves} = f\Omega_{mec} \quad (I.22)$$

I.13. Schéma bloc du modèle de la turbine

La turbine génère un couple aérodynamique transmis au multiplicateur. Ce couple peut être calculé à partir des valeurs de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et en couple du multiplicateur.

La turbine peut être ainsi commandée par l'action du couple électromagnétique du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation [13].

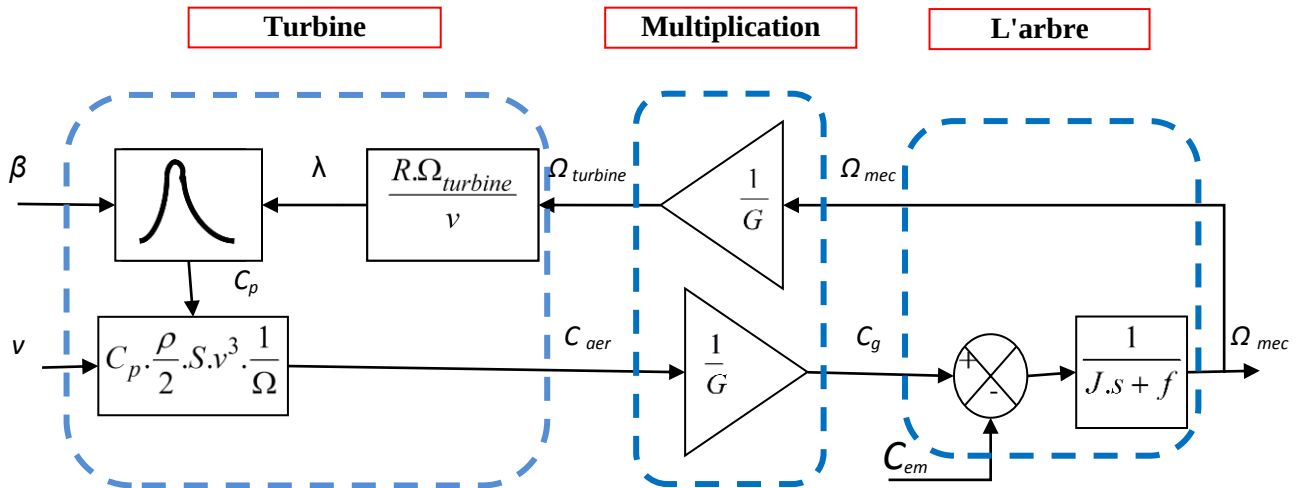


Figure I-25 Schéma bloc du modèle de la turbine .

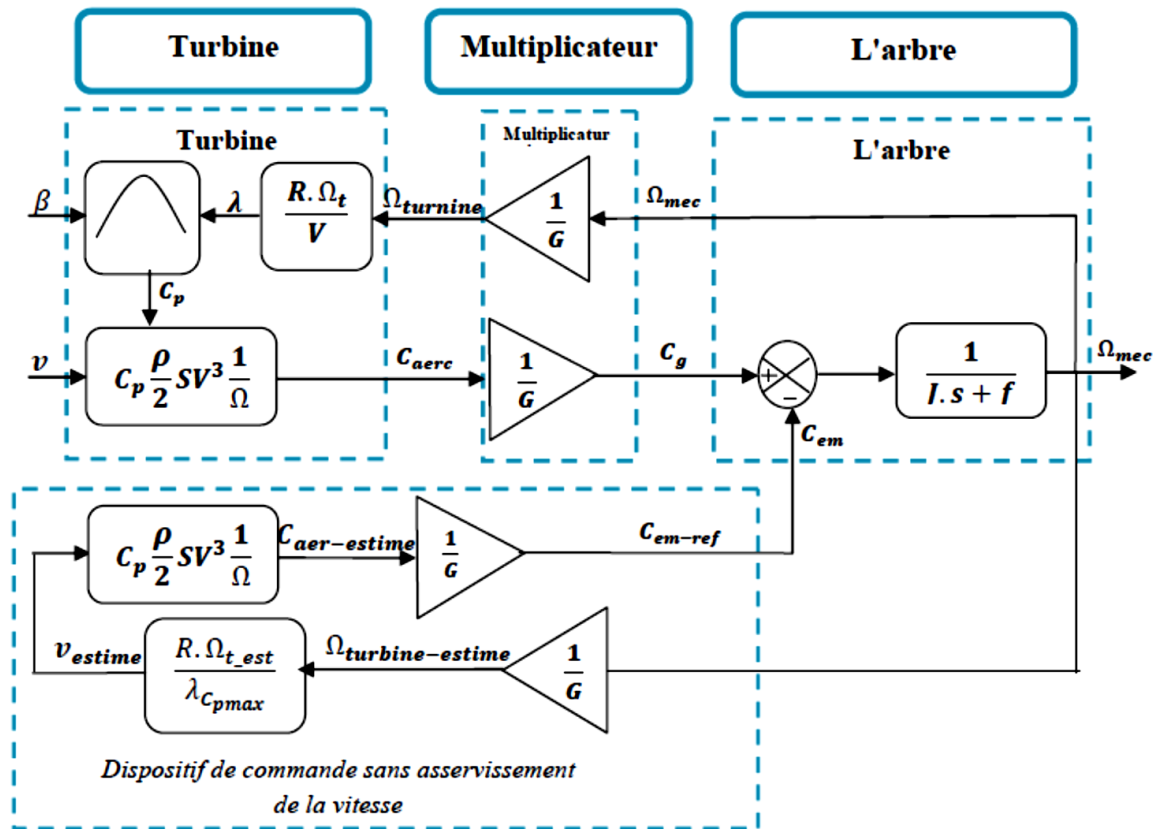


Figure I.26 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

I.14. Modèle de la turbine en MATLAB/SIMULINK :

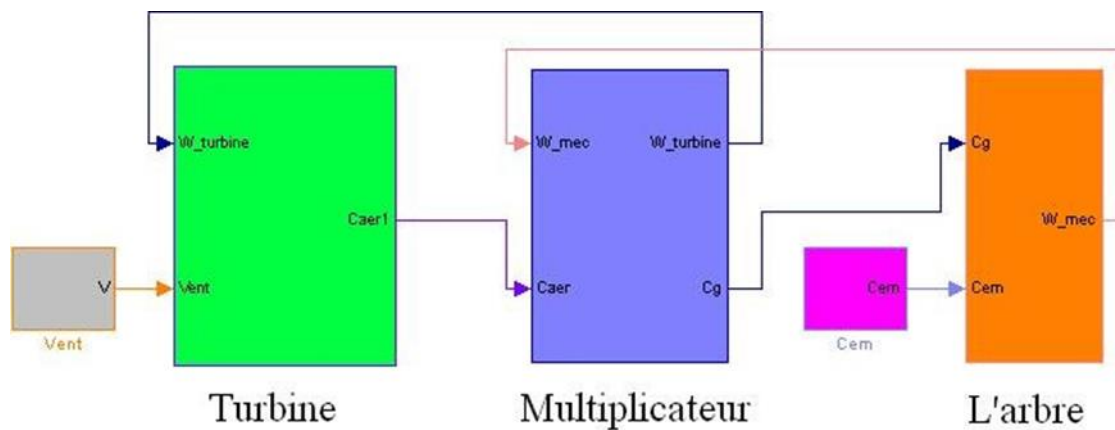


Figure I-27. Schéma bloc du modèle de la turbine.

I.15.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine, nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation. Enfin nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques.

Dans ce qui suit nous allons étudier les générateurs les plus utilisés dans la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, notamment les génératrices asynchrones a doublé aimantation.

Chapitre II

Modélisation et commande vectorielle de
la MADA

II.1. Introduction:

Dans ce chapitre, on va présenter la modélisation de machine asynchrone à double alimentation, cette modélisation était basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. La simplicité de conception et d'entretien de cette machine à la faveur des industries, s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, ainsi que la commande vectorielle.

En suit les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine ont été développés. Puis, dans le but d'établir les différentes commandes des deux convertisseurs, nous avons développés les modèles de la MADA .

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

La première apparition de cette machine date de l'année 1899 [05]; il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation.

La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures; elle présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone ou synchrone). Son rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais, il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [15].

La figure suivante représente la structure de la machine asynchrone à double alimentation.

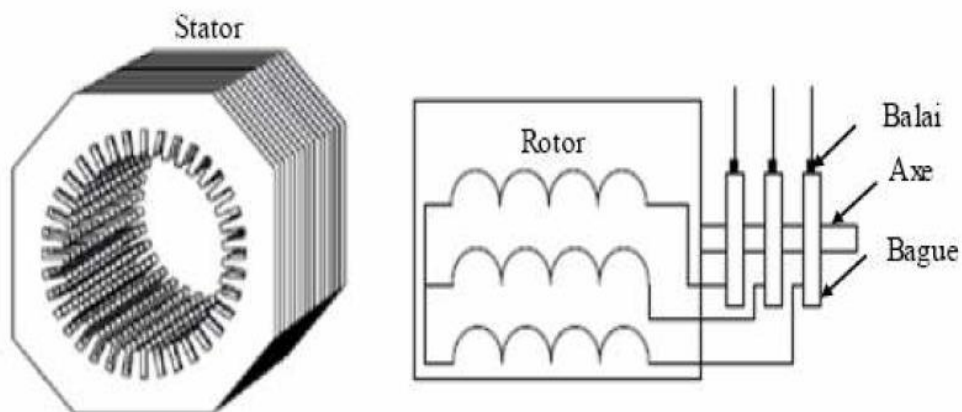


Figure II-1 Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général.

Les enroulements des trois phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique peuvent être représentés comme indiqué en figure (II.2) :

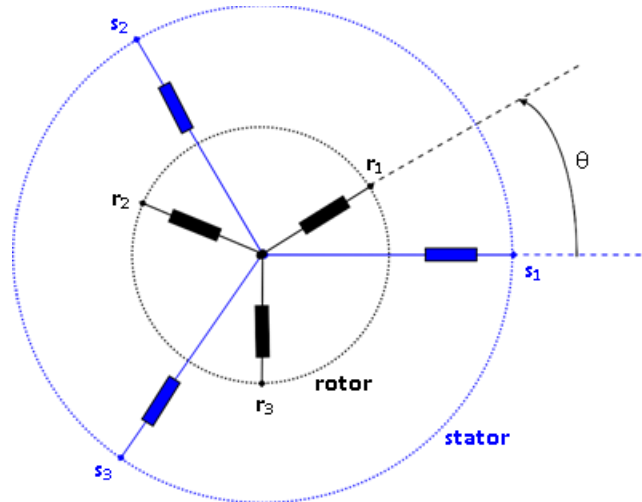


Figure II.2 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation

II.3. Description du fonctionnement de la MADA:

Appelée DFIG (Doubly Fed Induction Generator) lorsqu'elle est utilisée en génératrice dans la production d'énergie éolienne, ou DFIM (Doubly Fed Induction Motor) pour des applications d'entraînement à vitesse variable, elle peut être qualifiée en français de Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). Le schéma de la figure (II.3) représente le symbole d'une MADA [05].

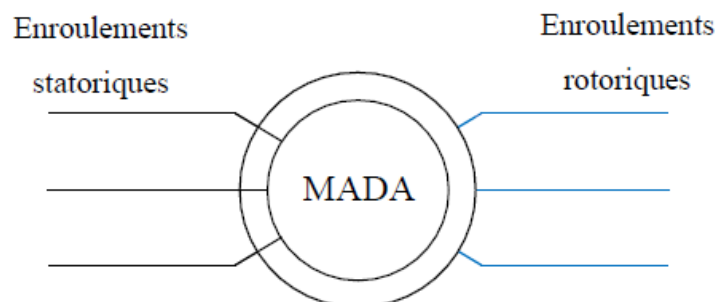


Figure II.3 : Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation

Elle fait partie de la famille des machines à courant alternatif à double alimentation.

Sa première apparition était en 1899; il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation.

La machine asynchrone à double alimentation se compose principalement de deux parties. Le stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classique (A), et le rotor (B) 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 sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor est relié aux bagues sur lesquelles glissent des balais. Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator de la MADA est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un convertisseur de puissance.

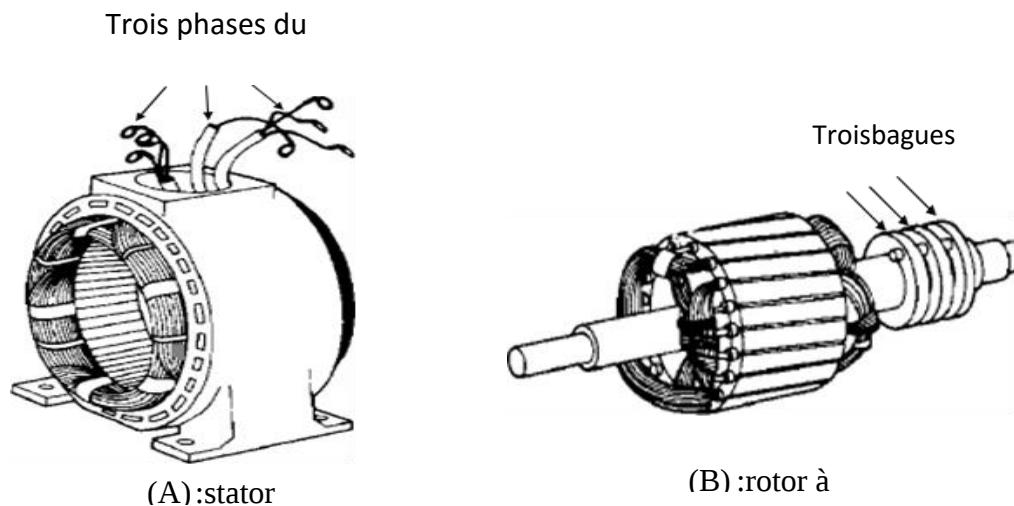


Figure II. 4 : Représentation des structures (A) : du stator et (B) : du rotor bobiné de la MADA.

La figure (II.5) illustre une MADA de puissance 4kW, utilisée dans le banc expérimental développé. Les sorties des enroulements statoriques et rotoriques se distinguent clairement. Cependant, il est à remarquer que le volume de la MADA est quelque peu encombrant [5].

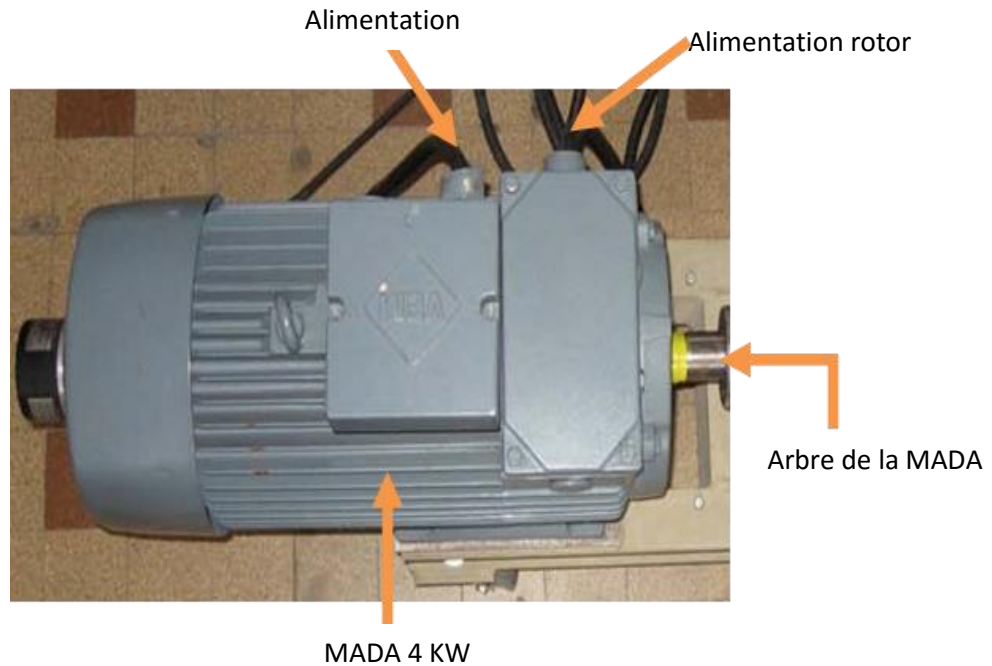


Figure II.5 : Photo de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

II.3.1. 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'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques.

On peut voir sur la (figure II.6) que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor [12].

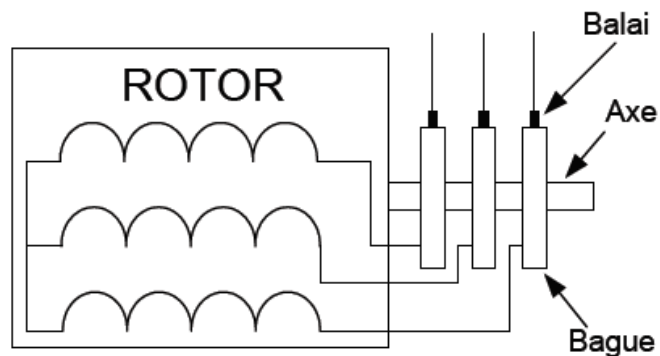


Figure II-6 Principe du rotor bobiné.

II.3.2. Modes de fonctionnement de la MADA:

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en génératrice. 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 au-dessous de sa vitesse des synchronismes pour être moteur et au-dessus pour être générateur. Pour la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de générer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.

Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement :

II.3.2.1. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone:

La puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau.

II.3.2.2. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone:

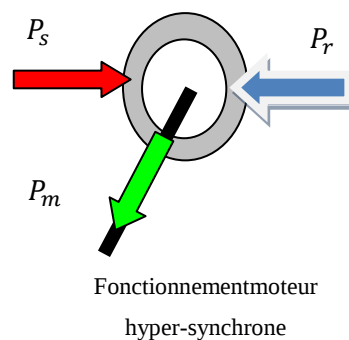
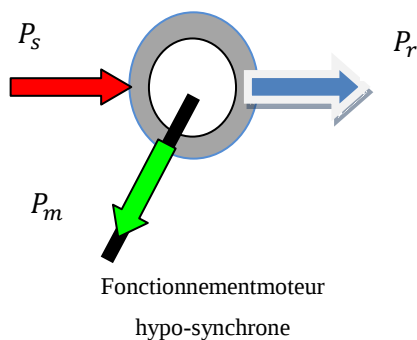
Une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

II.3.2.3. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone:

Une partie de la puissance transmise par le stator est réabsorbée par le rotor.

II.3.2.4. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone:

La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g \cdot P_m$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.



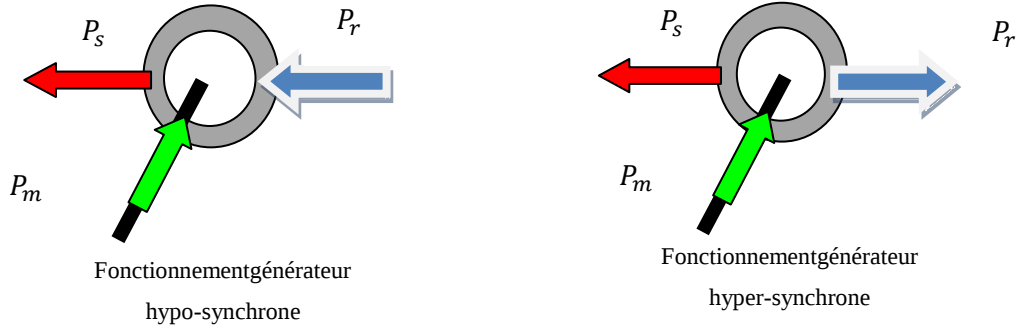


Figure II-7 Modes opérationnels caractéristiques de la MADA.

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 [17].

II.4. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation:

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de FMM des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f$ et le rotor tourne avec la vitesse ω_r ; alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des FMM des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse ω_{gl} telle que [13] :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_g \quad (\text{II. 1})$$

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

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques ; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés [11].

Pour que la rotation du vecteur résultant des FMM par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence f_{ro} , définie à partir de $\omega_{gl} = 2\pi f_{ro}$; c'est-à-dire:

$$f_{ro} = fg \quad (\text{II. 2})$$

II.5. Domaines d'application de la MADA:

La machine asynchrone à double alimentation 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%

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 [17].

- 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.

II.5.1. Application de la MADA dans les systèmes éoliens:

Pour l'application dans un système éolien, le mode de fonctionnement en génératrice est intéressant. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas ($\pm 30\%$) en de ça ou au-delà de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale [09].

II.6. Avantages et inconvénients de la MADA:

Nous introduisons dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients que présente la machine asynchrone à double alimentation [19].

II.6.1. Avantages de la MADA:

La machine asynchrone à double alimentation présente plusieurs avantages dont on peut citer:

- Production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo en hyper-synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement la puissance nominale sans être surchauffée.

- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés que pour une fraction de la puissance de la machine (30%) contrairement au système utilisant la machine asynchrone à cage d'écureuil ou le convertisseur est dimensionné pour la totalité de la puissance de la machine.
- 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 qui alimentent la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.

II.6.2. Inconvénients de la MADA:

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à cause des balais.
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).
- La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium donnent maintenant un petit avantage à la MADA [19].

II.7. Modélisation de la MADA:

La machine asynchrone étant un système non linéaire très complexe, sa modélisation nécessite l'introduction de certaines hypothèses simplificatrices sans trop exagérer pour avoir un modèle le plus proche possible de la réalité

II. 7.1. Description de machine asynchrone à double alimentation:

La machine asynchrone à double alimentation comporte trois bobines statorique (A_s, B_s, C_s) décalées entre elles par un angle de $(\frac{2\pi}{3})$, et aussi trois bobines rotorique identique de répartition et similaire à celles du stator, (A_r, B_r, C_r).

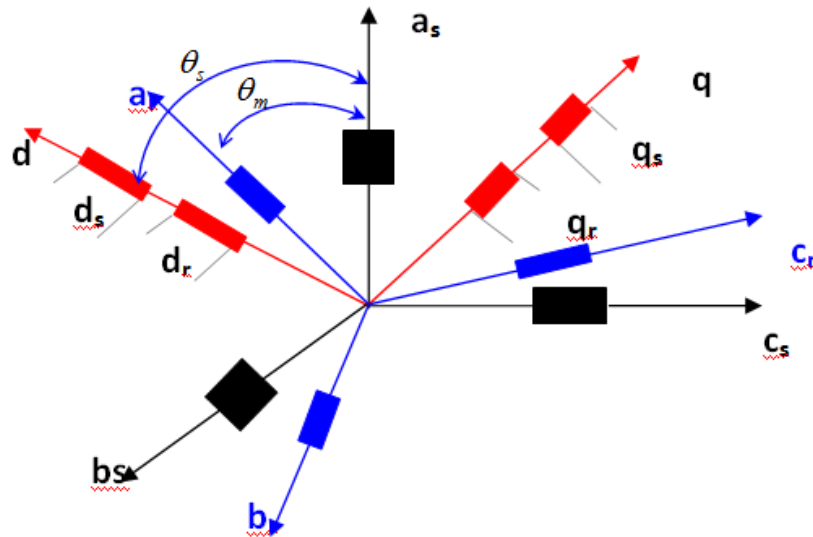


Figure II-8 Représentation simplifiée de la MADA

Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage. En effet la cage de la machine est assimilée au bobinage triphasé de la MADA. Cependant le rotor de la MADA n'est pas en court-circuit et donc les tensions rotoriques ne sont pas nulles[6].

II.7.2. Hypothèses simplificatrices:

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées.
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdales d'où résulte du fait que l'entrefer est constant, et que les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoïdalement en fonction de l'angle entre leurs axes magnétiques.
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé.

De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.

II.7.3. Modèle mathématique de la MADA:

II.7.3.1. Equations électriques:

Les équations des tensions statoriques, peuvent être exprimées, en utilisant la notion matricielle, par [21] :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad (\text{II. 3})$$

Les équations des tensions rotoriques, peuvent être exprimées par [4]:

$$[V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \quad (\text{II. 4})$$

$$\text{Où : } [V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}$$

$$[\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

Les flux statoriques et rotoriques instantanés par phase, sont donnés par :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \quad (\text{II. 5})$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{sr}]^t \cdot [i_s] \quad (\text{II. 6})$$

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

Et

$$[M_{sr}] = M_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

En remplaçant les relations (II.5.)et(II.6)respectivement dans les relations (II.3) et (II.4), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [i_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [i_r]) \quad (\text{II. 7})$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}]^t \cdot [i_s]) \quad (\text{II. 8})$$

II.7.3.2. Equation mécanique:

L'équation mécanique de la machine est décrite sous la forme:

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - f \cdot \Omega \quad (\text{II. 9})$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables (II.7) et (II.8). L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide des équations différentielles à coefficients constants.

II.7.4. Modèle diphasé de la MADA :

Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de Park. (Figure II.9).

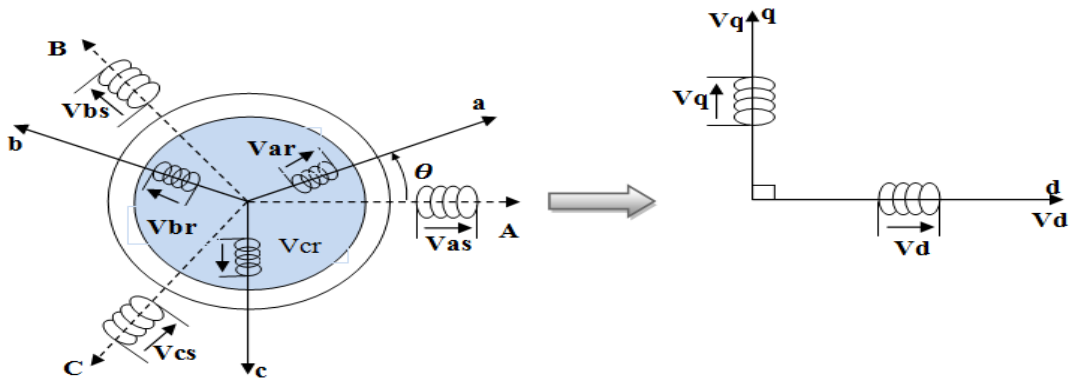


Figure II-9 Modèle de PARK de la MADA

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d-q) donné par la transformation de Park est alors

utilisé. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par [20]:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Il est noté par θ_s l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (θ_r) rotoriques (figure II.10).

La transformation de Park aboutit à une relation liant les angles θ_s et θ_r , celle-ci s'exprime par :

$$\theta + \theta_r = \theta_s$$

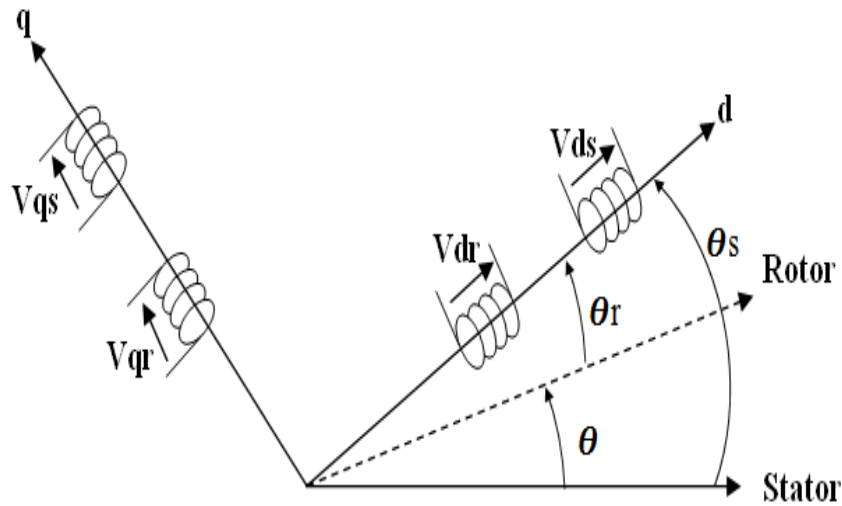


Figure II-10 Représentation de la machine dans le repère diphasé.

II.7.4.1. Equation des tensions:

Après l'application de transformation de Park pour l'équation (II.3) du stator et l'équation (II.4) du rotor, les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d,q) sont données par: [5].

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (II. 11)$$

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

ω_r : Pulsation électrique du rotor.

II.7.4.2. Equation des flux :

L'équation des flux statorique et rotorique est donné comme suit:

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M \cdot i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (II. 12)$$

II.7.4.3. Equation du couple électromagnétique :

Après qu'on ait effectué le changement de variable, l'expression du couple électromagnétique peut être exprimée sous différentes formes, on trouve celle-ci [6] :

$$C_e = p(\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (II. 13)$$

$$C_e = p \cdot M(i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (II. 14)$$

$$C_e = \frac{p \cdot M}{L_r} (\phi_{dr} \cdot i_{qs} - \phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (II. 15)$$

$$C_e = \frac{p \cdot M}{L_s} (\phi_{qs} \cdot i_{dr} - \phi_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (II. 16)$$

II.8. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation

La commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation est une solution plus attractive pour des applications à haute performance comme l'entraînement à vitesse variable et les systèmes de génération de l'énergie électrique [20].

II.8.1.Principe :

Dans la commande vectorielle, la MADA est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée. Le principe de la commande vectorielle consiste à orienter l'axe d du repère de Park suivant l'un des flux de la machine asynchrone Φ_s , Φ_r au choix, afin d'obtenir un découplage ce qui nous permet de faire un contrôle du couple [20].

II.8.2. Commande de la MADA avec orientation du flux statorique :

Pour pouvoir commander facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives par orientation du flux statorique. Pour simplifier la commande il est nécessaire de faire un choix judicieux de référentiel. Pour cela, on se place dans un référentiel d-q lié au champ tournant avec une orientation du flux statorique (l'axe d aligné avec la direction du flux statorique) comme le montre la Figure (II.11)

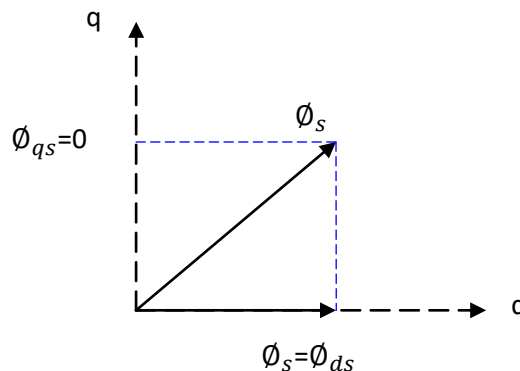


Figure II-11 Orientation de flux statorique

La particularité de la MADA est qu'elle possède deux courants à contrôler directement à savoir i_{rq} , i_{sq} , et deux courants contrôlés indirectement i_{qr} , i_{qs} .

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

II.8.3. Commande vectorielle de la MADA :

La commande à flux orientée appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants.

Étant négligeable pour les machines de forte puissance utilisées dans les turbines éoliennes [13], l'expression de la tension statorique devient alors :

$$V_s \cong \frac{d\Phi_s}{dt} \quad (\text{II.17})$$

Dans le même référentiel et dans l'hypothèse où le flux statorique est constant grâce à une alimentation par un réseau stable, les équations des tensions s'exprimeront par :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_s \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

En utilisant les simplifications précédentes, les équations des flux s'exprimeront comme suit :

$$\begin{cases} \Phi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_e = \frac{-P M}{L_s} \Phi_s i_{qr} \quad (\text{II.20})$$

II.8.3.1. Relations entre les courants statoriques et rotoriques :

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statorique (II.19), nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques comme suit :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

II.8.3.2. Expression des puissances actives et réactives dans le repère synchrone :

Dans un repère diphasé quelconque les puissances actives et réactives sont exprimées par :

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

L'application des hypothèses choisies ainsi que le système d'axes nous permet d'établir la simplification suivante :

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Ainsi en remplaçant I_{ds} et I_{qs} par leurs expressions en fonction des courants rotoriques :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = \frac{V_s \Phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

De l'expression (II.18) nous pouvons écrire :

$$\Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (\text{II.25})$$

D'où d'après (2.13)

$$Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \quad (\text{II.26})$$

En considérant la mutuelle constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d (la constante $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ prés imposée par le réseau).

Les flux rotoriques s'expriment en fonction des courants rotoriques, après avoir remplacé les courants statoriques par leur expression, da la façon suivante :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

En injectant ces équations dans les expressions des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

A partir des systèmes d'équations (II.24) et (II.28), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous.

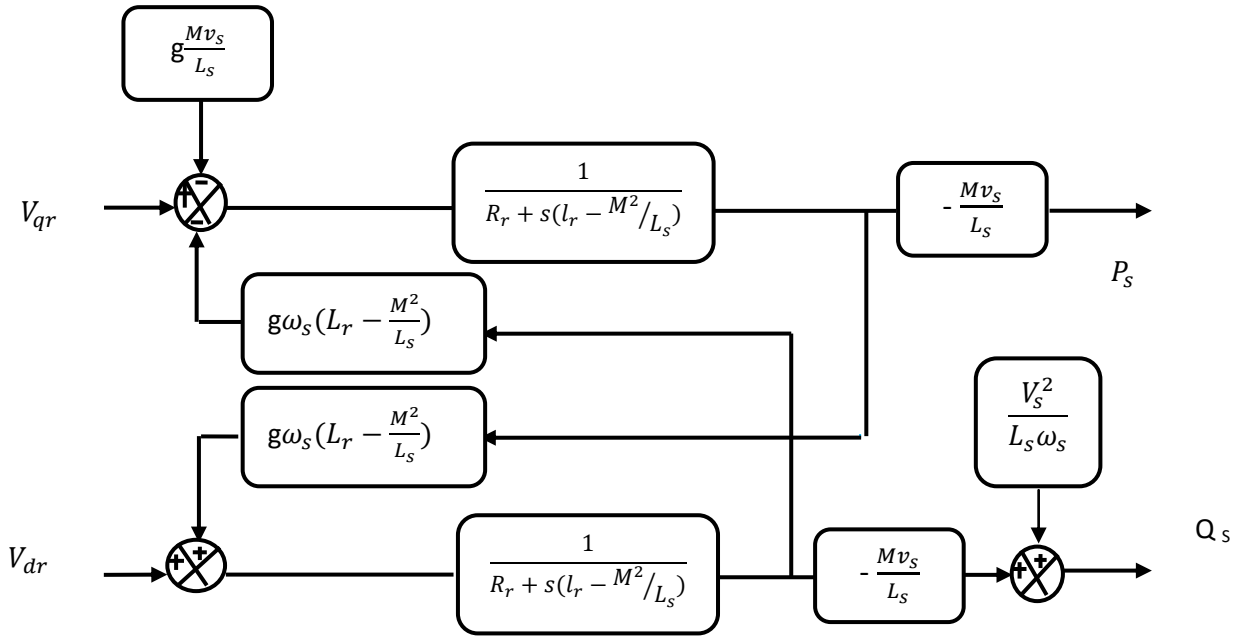


Figure II-12 Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances

II.8.4. contrôle indépendant des puissances active et réactive :

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA, il suffit maintenant d'inverser son bloc pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances active et réactive de références.

II.8.4 .1. Commande directe :

Si l'on observe les équations (II.24), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $\frac{MV_s}{L_s}$. De plus, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système (II.28) disparaissent en régime permanent [22]. Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (II.29)$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus.

L'effet du terme de couplage $g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande.

En revanche, le terme $g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s}$ représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul régulateur sur chaque axe (Figure II-13).[2].

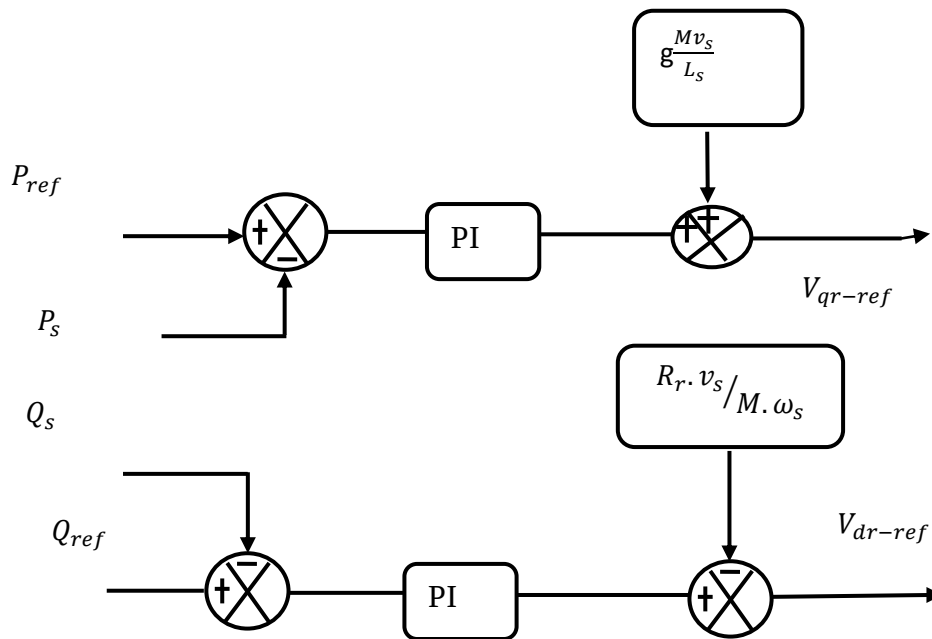


Figure II-13 Schéma bloc de la commande directe.

II.8.4.2. Commande indirecte :

II.8.4.2.1. Commande en boucle ouvert :

La commande en boucle ouvert est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q .

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système (II.24) on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations.

$$\begin{cases} I_{qr-ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} P_{s-ref} \\ I_{dr-ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} P_{s-ref} + \frac{V_s}{\omega_s.M} \end{cases} \quad (II.30)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous.

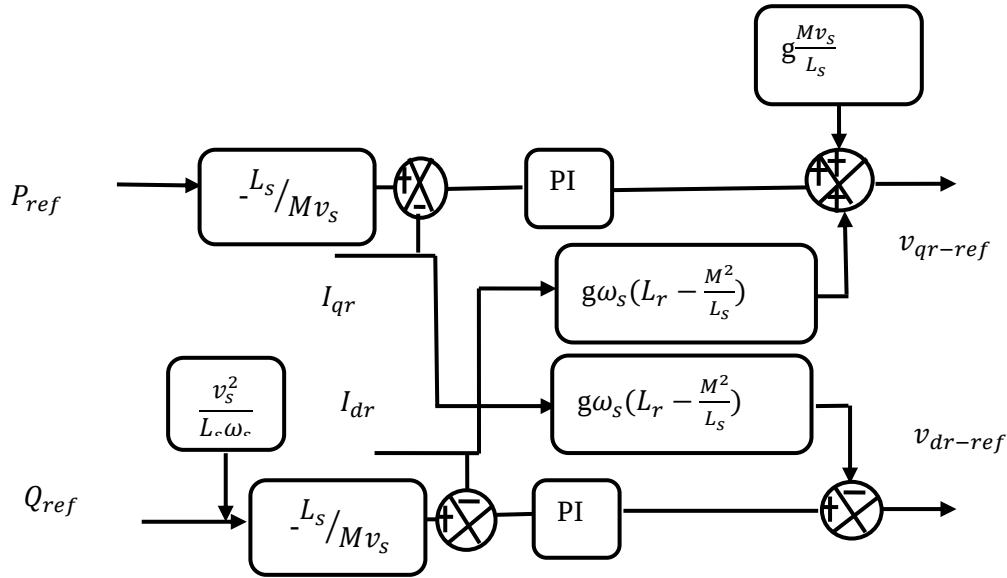


Figure II-14 Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.

II.8.4.2.2. Commande en boucle fermée :

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante.[2].

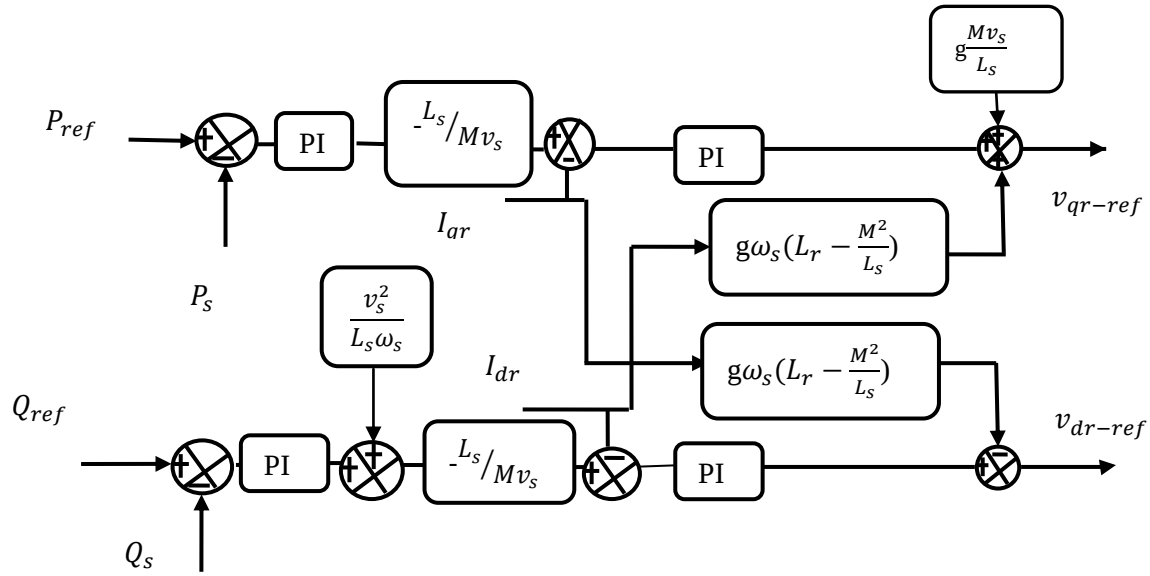


Figure II-15 Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.

II.8.4 .3Type du régulateur PI:

Les régulateur PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive et des courants i_{dr} i_{qr} . Offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en œuvre, ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré [17]. Le calcul des gains du régulateur est présenté à l'annexe dont les grandeurs commandées sont les puissances actives et réactives et les courants rotoriques.

II.8.5. Onduleur de tension a deux niveaux :

La symétrie des onduleurs à deux niveaux permet leur modélisation par bras. Après avoir modélisé chaque couple transistor – diode par un seul interrupteur bidirectionnel « S_i ». Il devient possible de déduire un modèle complet de l'onduleur (Figure II.16) [3].

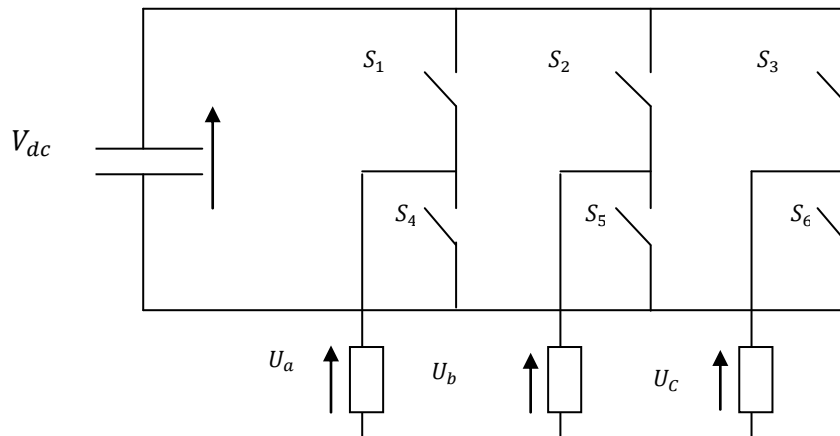


Figure II-16 Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

Pour exprimer les tensions de lignes en fonction de la tension dans l'étage continu et de l'état des commutateurs, les variables S_a , S_b et S_c se doivent d'être définies en fonction de l'état des commutations dans les trois branches :

- Branche1 :
 $S_a=0$ Si S1 est ouvert et S4 est fermé ;
 $S_a=1$ Si S1 est fermé et S4 est ouvert.
- Branche2 :
 $S_b=0$ Si S2 est ouvert et S5 est fermé ;
 $S_b=1$ Si S2 est fermé et S5 est ouvert.

- Branche3 :

$S_c=0$ Si S3 est ouvert et S6 est fermé ;

$S_c=1$ Si S3 est fermé et S6 est ouvert.

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

$$(II.31) \begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases}$$

Or, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} (II.32)$$

Ainsi l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (II.33)$$

II.8.5.1. Stratégie de commande:

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsion triangule sineusoïdale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance (Figure II.17). Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- 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 :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{II.34})$$

- 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) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (\text{II.35})$$

II.8.5.2. Algorithme de commande :

L'algorithme de commande de la stratégie triangle sineusoïdale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes [18]:

❖ Etape 1 :

$$\begin{cases} V_{refk} \geq U_p \Rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{refk} < U_p \Rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Tel que V_{dc} est la tension du bus continue.

❖ Etape 2 :

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \Rightarrow S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} \Rightarrow S_k = 0 \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

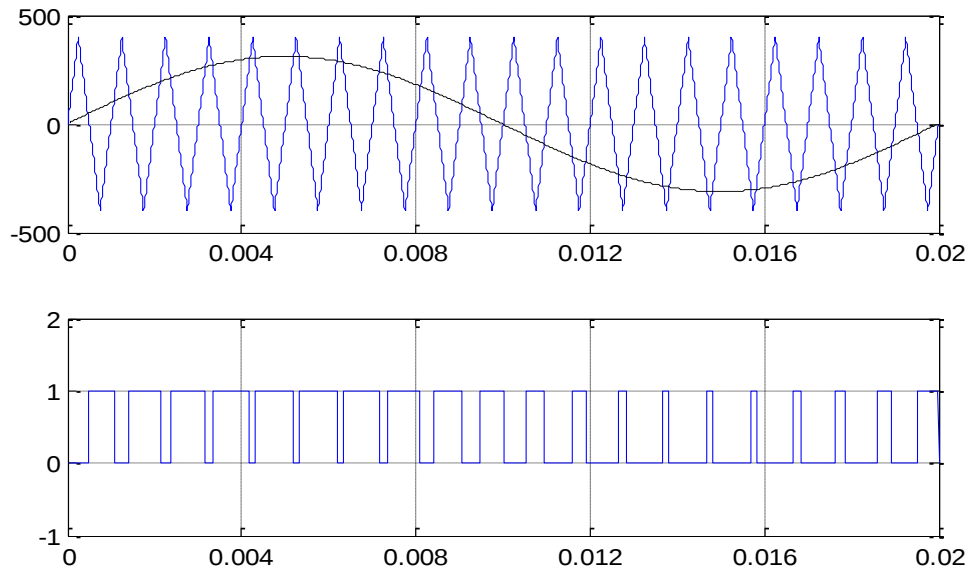


Figure II-17 Principe de fonctionnement de la technique MLI triangle sinusoïdale à une porteuse.

II.9. Système de la chaîne globale

La structure globale de la chaîne étudiée est constituée d'une MADA entraînée par une turbine éolienne et présentée sur la figure II.18 [4] :

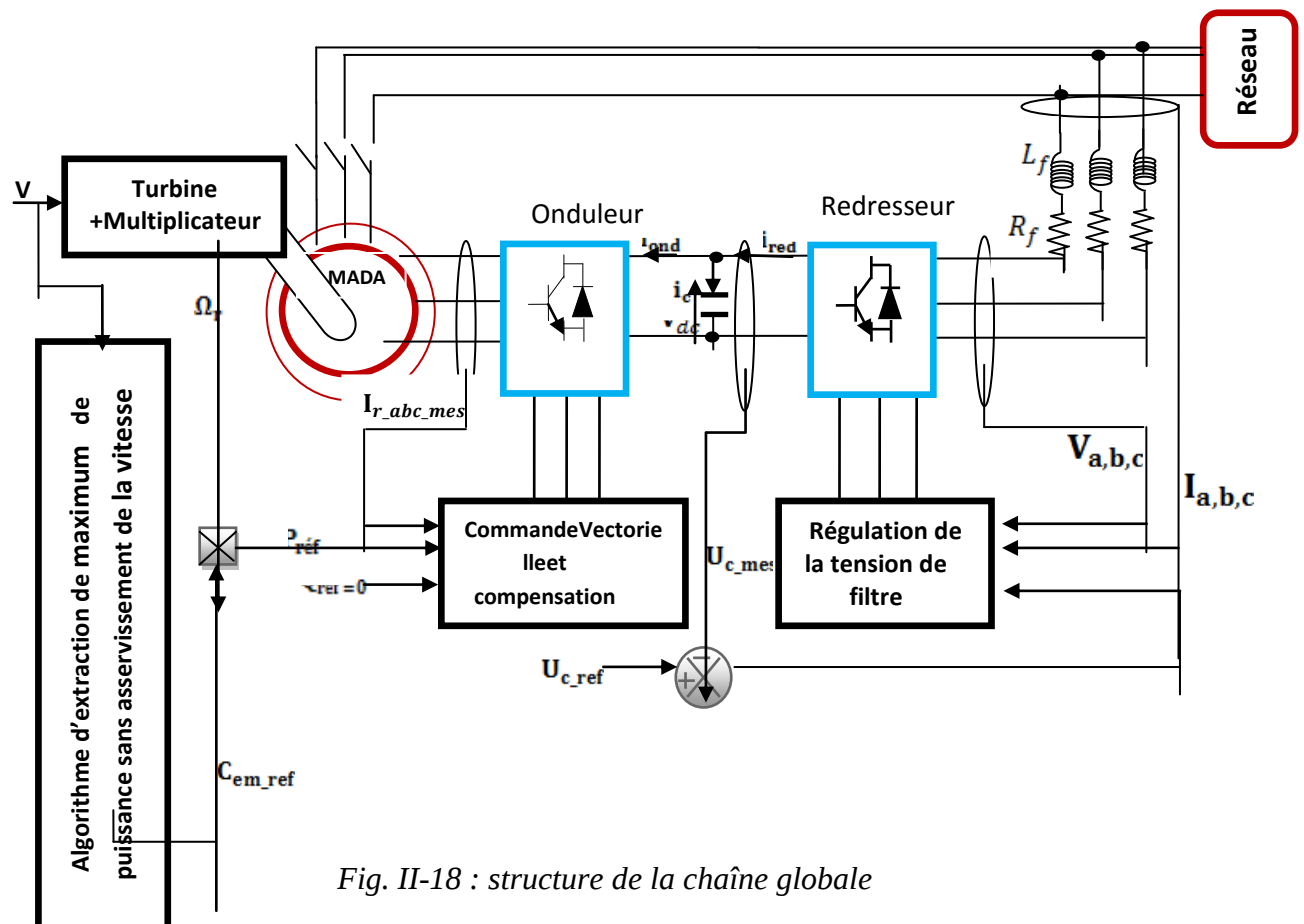
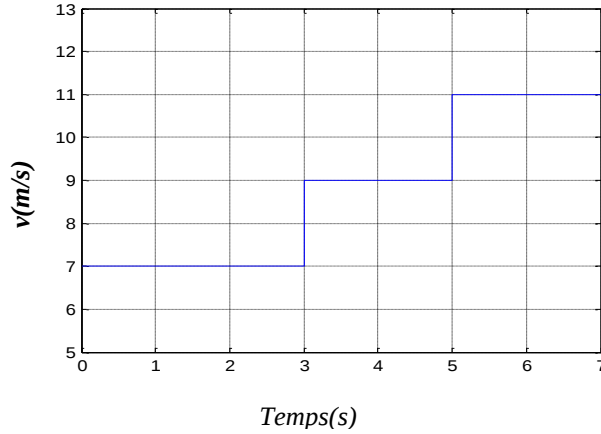


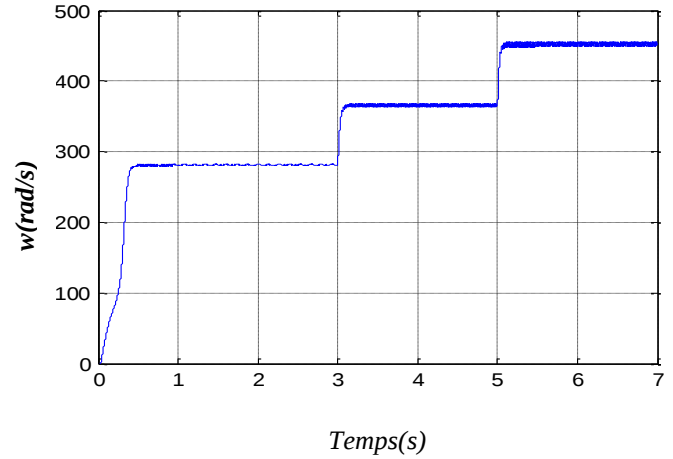
Fig. II-18 : structure de la chaîne globale

II.10. Résultats de simulation

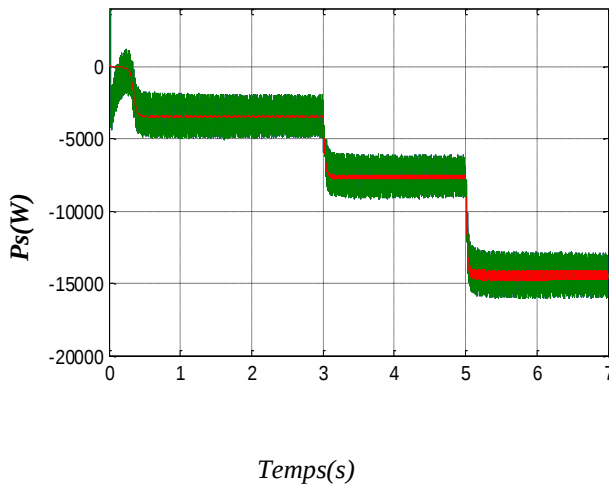
Les simulations ont été réalisées avec le logiciel Matlab/simulink, Afin de valider les commandes étudiées dans ce chapitre. Différente vitesse de vent est appliquée sur les pales de l'éolienne. La tension de référence du bus continu, notée V_{dc} , est fixée à 800 V. La puissance réactive de référence Q_s est fixée à 0. Nous montrons que les différentes puissances mises en jeu peuvent être contrôlées indépendamment.



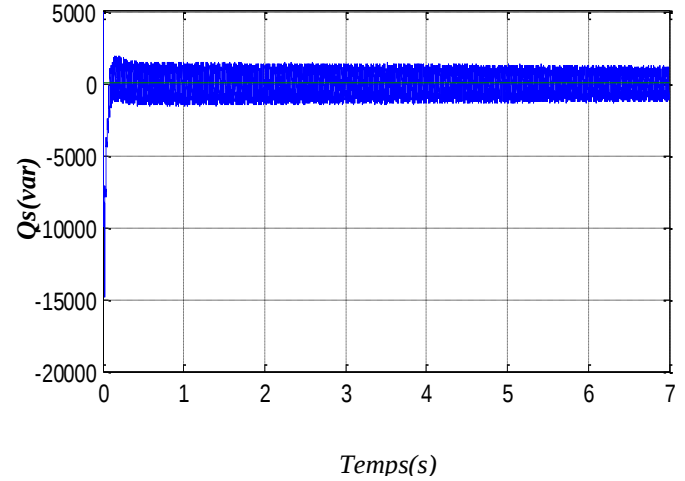
a. Vitesse du vent



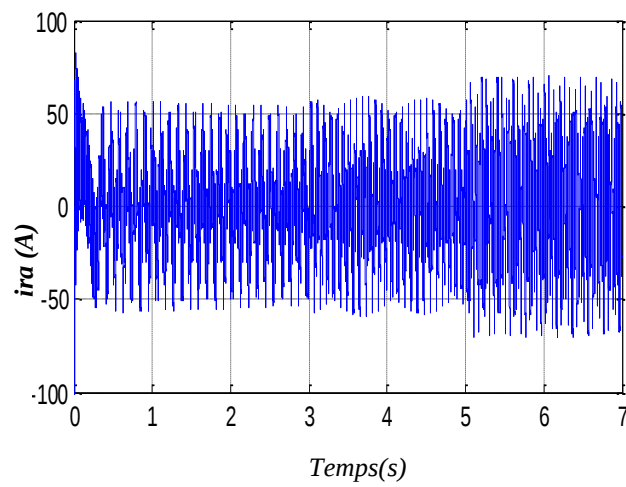
b. Vitesse de rotation



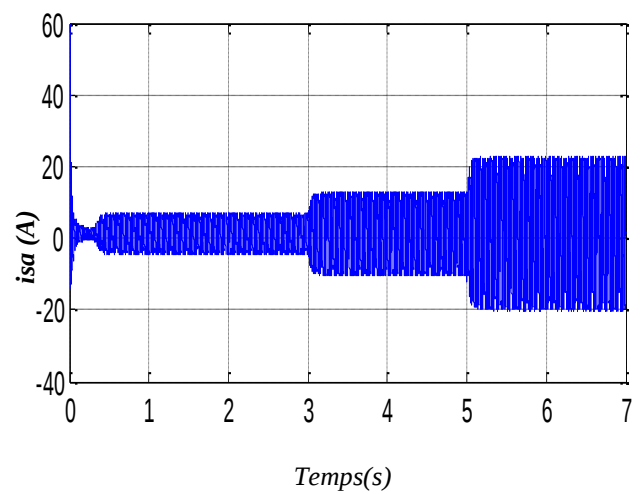
d. Puissance active statorique et sa référence



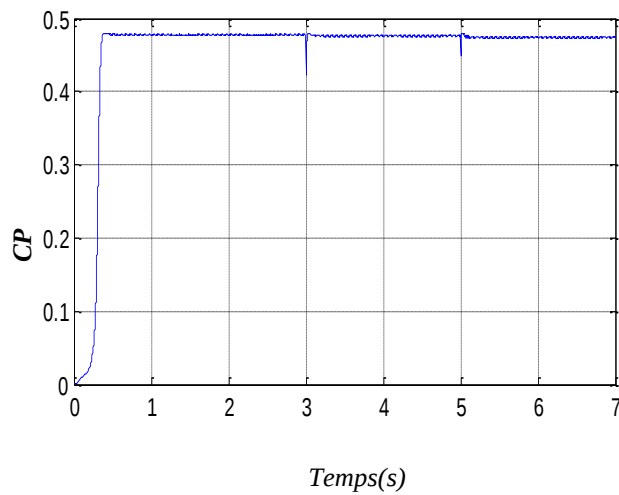
d. Puissance réactive statorique et sa référence



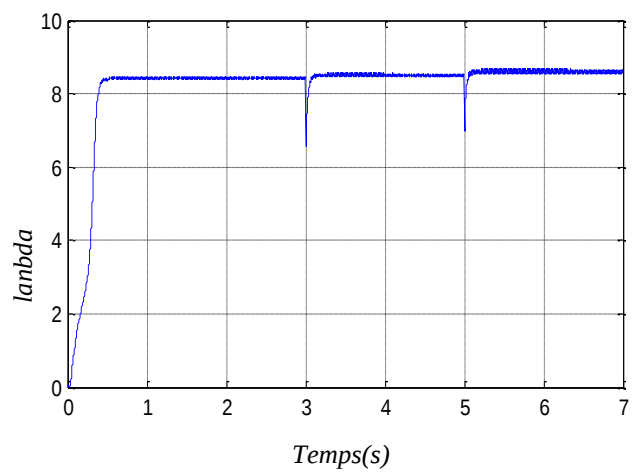
e. Courant rotorique d'une phase



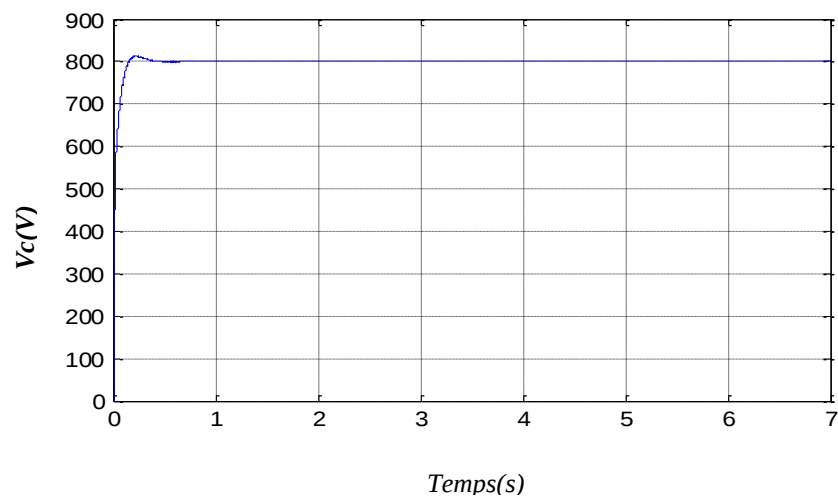
f. Courant statorique d'une phase



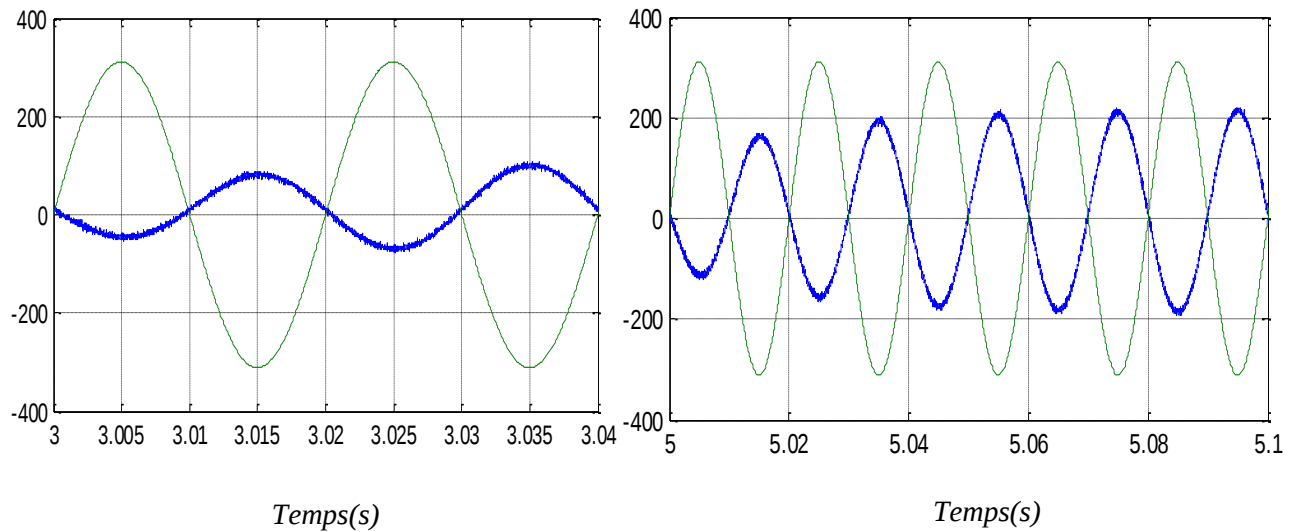
g. Coefficient de puissance de la turbine



h. Vitesse relative de l'éolienne



i-tension bus continue



Zoom sur le courant statorique et la tension réseau

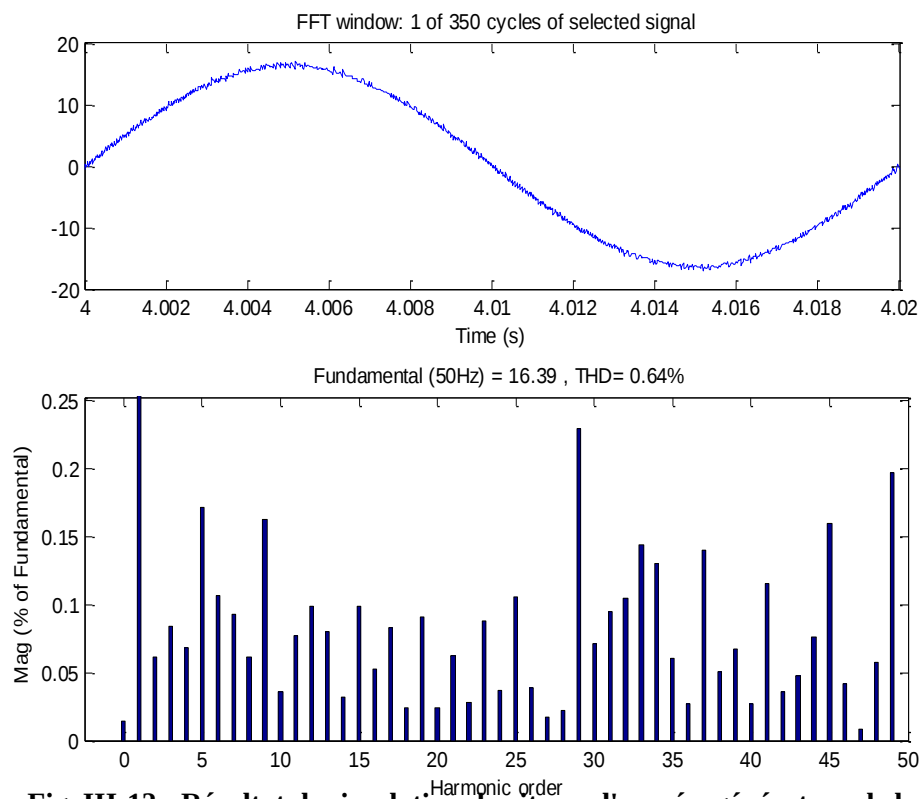


Fig. III-12 : Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de la MADA

II.11. Interprétations des Résultats

Les figures ci dessus représentent les résultats obtenus de cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux commandés par la stratégie triangle – sinusoïdale, et une machine asynchrone à double alimentation. La tension du bus continu suit bien sa référence qui est 800V.

Les courants délivrés par le convertisseur côté réseau ont une forme quasi-sinusoïdale. Le spectre harmonique de i_g présente des harmoniques pairs et impairs d'amplitude pratiquement négligeables devant celle du fondamental. Les courants statoriques et les courants du côté rotor sont stables et similaires à ceux trouvés avec une alimentation continue parfaite. Un bon suivi de consigne pour les puissances réactive statoriques.

la vitesse spécifique et le coefficient de puissance ne changent pas beaucoup de valeurs en régime permanent, ils restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références optimales 8.1 et 0.49 successivement, avec la puissance éolienne capturée suit sa référence optimale.

Le courant statorique fourni par la DFIG est en opposition de phase par rapport à la tension du réseau, puisque la DFIG n'injecte que la puissance active dans le réseau ($Q_{p_ref} = 0$).

Nous constatons que durant le régime de fonctionnement, le courant du filtre est en phase avec la tension du réseau, cela signifie que la DFIG absorbe une puissance active du réseau.

On remarque que la tension de bus continu stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande.

La tension continue en sortie du redresseur est bien contrôlée et quasi insensible aux variations de la vitesse.

L'analyse spectrale du courant montre bien que les harmoniques des rangs faibles sont rejetés vers les hautes fréquences avec tout en diminuant le taux de distorsion harmonique.

II.12. Conclusion

Dans ce troisième chapitre, on a présenté la commande de la machine asynchrone double alimentée pilotée par le rotor à l'aide de deux convertisseurs électroniques à commande MLI. L'un de ces deux convertisseurs joue le rôle d'un redresseur à transistors à commutation forcée et l'autre convertisseur est un onduleur. Cette combinaison électrique nous a permis d'exécuter la stratégie de commande conçue à ce système éolien étudié, la structure est associée à des stratégies de commande qui règle le couple électromagnétique recherche automatique sur un rendement de puissance proche de celui du maximum théorique sans correction de la vitesse du turbi

Chapitre III

La commande directe de puissance (DPC)
de la MADA intégrée dans system éoliens

III.1.Introduction :

Après la commande vectorielle, apparaît une nouvelle technique de commande pour les machines tournantes c'est la commande directe de puissance DPC.

Au cours de ces dernières années, des travaux de recherche importants ont été menés sur les stratégies de contrôle des convertisseurs MLI triphasés. Ces stratégies proposées peuvent être classées selon l'utilisation des régulateurs de boucle de courant ou de régulateurs de puissances active / réactive. Il existe deux stratégies de commandes communes, un contrôle orienté en tension (VOC) et un contrôle de puissance directe (DPC). La commande VOC peut contrôler indirectement les puissances active et réactive d'entrée en commandant le courant d'entrée du convertisseur MLI. Cela permet d'obtenir de bonnes réponses stables et dynamiques. Cependant la performance de commande VOC repose largement sur le contrôle du courant interne et l'ajustement d'un PI précis. La commande DPC est un autre type de stratégie de contrôle de haute performance pour les convertisseurs MLI basés sur la théorie de la puissance instantanée proposée pour la première fois dans et plus clairement présenté dans. L'idée de base de cette commande est de choisir le meilleur état de commutation des commutateurs de puissance à travers une table de commutation avec des comparaisons d'hystérésis pour maintenir un courant purement sinusoïdal et atteindre aussi un facteur de puissance unitaire. Bien que la DPC ait été considérée comme un système de commande puissant et robuste pour les convertisseurs MLI, les ondulations de puissance élevées et la fréquence de commutation variable sont les deux inconvénients les plus notables de la commande DPC conventionnel [5].

III.2 Etat de l'art sur la commande DPC :

Le principe du contrôle direct des convertisseurs d'électroniques de puissance à MLI a été proposé pour la première fois en 1986 par [4] et il a été développé plus tard dans plusieurs applications. Le but du contrôle direct de ces systèmes était d'éliminer le bloc de modulation de largeur d'impulsion et les boucles de régulations internes des variables contrôlées, en les remplaçant par une table de commutation prédéfinie, dont les entrées sont les erreurs de suivi de référence des grandeurs contrôlées et la sortie est le vecteur de commande.

La première application développée dans cet axe était le contrôle des machines électriques à vitesse variable alimentées par un onduleur à MLI triphasé. La structure de contrôle était connue sous le nom de contrôle direct de couple (DTC). Dans cette application, le flux

statorique et le couple électromagnétique sont contrôlés directement sans aucun bloc de modulation.

La grande similitude entre une machine électrique, alimentée par un onduleur de tension triphasé, et le redresseur à MLI triphasé connecté au réseau, a permis l'émergence d'une technique de contrôle analogue au DTC, appelée contrôle direct de puissance (DPC). La première configuration de ce type de contrôle a été proposée par, pour le contrôle direct des puissances instantanées actives et réactive du redresseur à MLI triphasé sans capteurs de tension du réseau. Ensuite, cette approche est développée et différentes configurations ont été proposées par. Le but commun de ce contrôle était d'assurer le prélèvement de courants sinusoïdaux tout en garantissant un facteur de puissance unitaire avec un contrôle découplé des puissances active et réactive. Les différentes configurations du DPC, définies dans la littérature, se subdivisent en deux catégories :

- DPC utilisant le vecteur de tension (V-DPC) : les références et établissent des configurations du DPC basées sur la position du vecteur de tension dans le repère stationnaire (α - β).

- DPC utilisant le flux virtuel : dans et, les configurations détaillées sont basées sur le calcul d'un flux virtuel. Dans, les auteurs suggèrent d'associer le principe du DPC avec une modulation de largeur d'impulsion vectorielle (SVM) afin d'obtenir une fréquence de commutation constante sans l'utilisation d'une table de commutation.

D'autres structures du DPC basées sur des approches prédictives ont été récemment publiées et. Le principe du contrôle direct de puissance est également étendu à d'autres applications. Dans ce contexte, les références et, exploitent le principe du DPC avec un onduleur de tension pour un système de filtrage actif, pour un moteur asynchrone à double alimentation et pour une interconnexion au réseau, respectivement.

III.3 Principe générale de la DPC :

La structure globale de la DPC-C, utilisant une table de commutation prédéfinie, appliqué au convertisseur triphasé coté machine « CCM » est illustrée sur la figure III.1. Elle est analogue à celle du contrôle direct de couple (DTC). Au lieu du couple et du flux rotorique, c'est la puissance active et réactive statoriques qui sont les grandeurs contrôlées.

Le principe de la DPC consiste à sélectionner une séquence des ordres de commutation (S_a , S_b , S_c) des semi-conducteurs constituant « CCM », à partir d'une table de commutation. La sélection s'effectue sur la base des erreurs (e_{P_S} et e_{Q_S}) entre les références des

puissances active et réactive (P^* et Q^*) et les valeurs réelles (P et Q), fournies par deux comparateurs à hystérésis de sorties numérisées H_p et H_Q respectivement, ainsi que sur le secteur (zone) dans lequel le vecteur du flux rotorique se trouve.

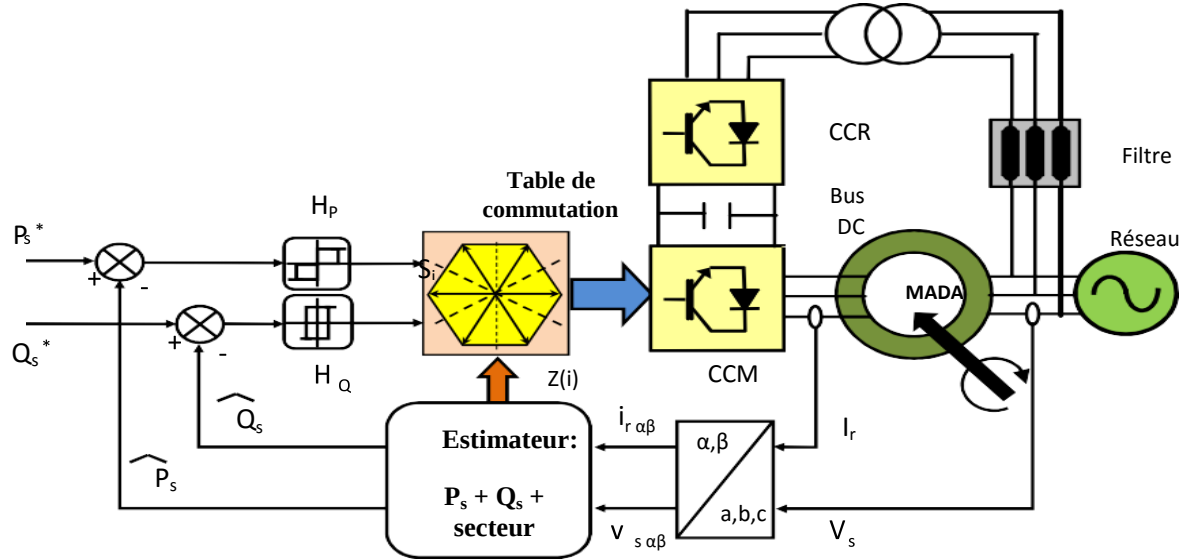


Fig. III.1- Configuration de la DPC de la MADA.

III.4 DPC de la MADA :

Afin d'aboutir à une table de commutation assurant un contrôle simultané des puissances active et réactive, durant tous les secteurs, il est indispensable d'étudier les variations provoquées par l'application de chacun des vecteurs de commande sur ces dernières, et cela au cours d'une période complète de la tension rotorique. Les vecteurs de commande sélectionnés dans la cette table de commutation doivent assurer la restriction de l'erreur de suivi de référence des deux puissances active et réactive, simultanément.

III.4.1 - Estimation de la puissance active et réactive :

Il y a trois méthodes pour calculer la puissance active et réactive :

- Par la mesure des courants et des tensions ;
- Par estimation des tensions du réseau et mesure des courants ;
- Par estimation du flux virtuel et mesure des courants.

Au lieu de mesurer les puissances sur la ligne, en capturant les courants rotoriques, et en estimons P_s et Q_s . Cette approche donne un contrôle anticipé des puissances dans les enroulements statoriques. Rappelons que la commande DPC sera effectuée sur la base du modèle simplifié de la MADA, c'est à dire celui établi en négligeant la résistance de la phase

statorique. Nous pouvons trouver les relations de P_s et Q_s en fonction des deux composantes du flux rotorique dans le référentiel. Ce référentiel tourne solidement avec le rotor de la MADA. Les puissances active et réactive sont contrôlées par deux comparateurs à hystérésis.

III.4.2 Comparateurs à hystérésis :

L'idée principale de la commande directe de puissance est de maintenir les puissances active et réactive instantanées dans une bande désirée. Ce contrôle est basé sur deux comparateurs à hystérésis qui utilisent comme entrée les signaux d'erreurs entre les valeurs de références et estimées des puissances actives et réactive.

$$e_p = p_{ref} - p_{inj} \quad (III. 1)$$

$$e_q = q_{ref} - q_{inj} \quad (III. 2)$$

La sortie des régulateurs à hystérésis donnée par les variables booléennes S_p et S_q , qui prennent l'état "1" pour une augmentation de la variable contrôlée (p ou q) et l'état "0" pour une diminution [4]:

$$\begin{aligned} S_p &= 1 \text{ si } p_{ref} - p_{inj} \geq h_p & S_q &= 1 \text{ si } q_{ref} - q_{inj} \geq h_q \\ S_p &= 0 \text{ si } p_{ref} - p_{inj} \leq -h_p & S_q &= 0 \text{ si } q_{ref} - q_{inj} \leq -h_q \end{aligned} \quad (III. 3)$$

Où : h_p et h_q désignent les bandes d'hystérésis

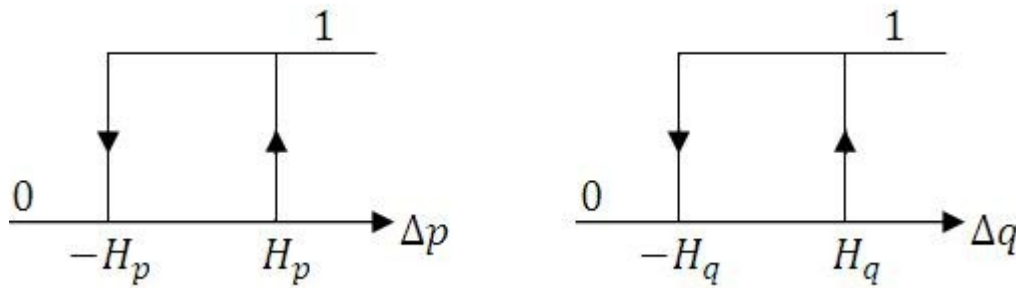


Fig. III.2. Caractéristique des régulateurs à hystérésis à deux niveaux.

III.4.3 Détection de secteur

L'influence de chaque vecteur de sortie résultant du SAPF sur les puissances active et réactive est très dépendante de la position réelle du vecteur de la tension de source. Ainsi, outre les signaux des deux contrôleurs à hystérésis, la table de commutation fonctionne selon la position du vecteur de la tension de source, qui tourne à la pulsation (ω), dans le plan complexe. Toutefois, au lieu d'introduire à la table de commutation la position exacte du

vecteur de la tension, le bloc du choix de secteur nous informe dans quel domaine est localisé l'actuel vecteur de la tension de source

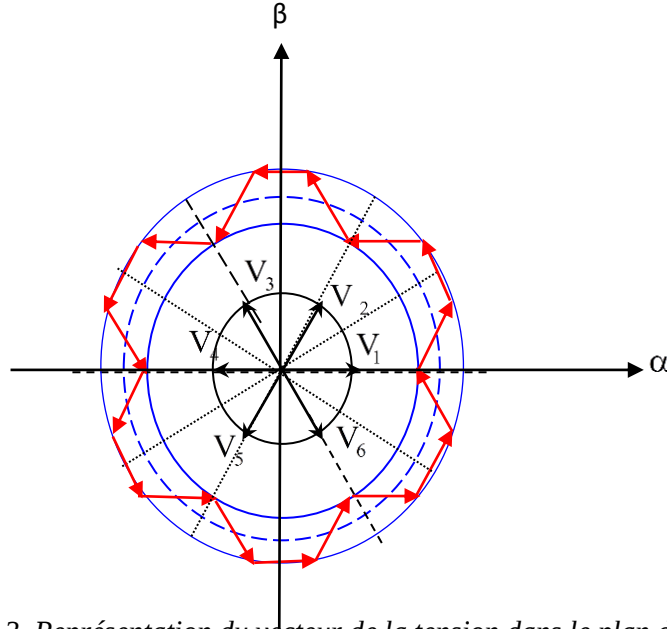


Figure.III.3. Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel (α, β) divisé en six (6) secteurs.

III.4.4 Estimateur du flux statorique :

Avant d'aborder l'étude du contrôleur du flux, on définit les étapes de calcul nécessaire à l'estimation de l'amplitude du flux statorique. L'estimation du flux statorique peut être réalisée par différentes techniques, parmi ces techniques celle basée sur la mesure des grandeurs statoriques, courants et tensions de la machine. [5].

A partir de l'équation (III.2) on obtient:

$$\begin{cases} \phi_{s\alpha} = \int_0^t (V_{s\alpha} - r_s i_{s\alpha}) dt \\ \phi_{s\beta} = \int_0^t (V_{s\beta} - r_s i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

Ces équations représentent les étapes de calcul nécessaire à l'estimation de l'amplitude du flux statorique. Cette technique est très simple et exige seulement la connaissance de la résistance statorique r_s où l'effet d'une erreur sur cette dernière est négligeable à haute fréquence.

On obtient les composantes $V_{s\alpha}$ et $V_{s\beta}$, après l'application de la transformation de Concordia sur les tensions d'entrée mesurées V_{an} , V_{bn} et V_{cn} .

Ces tensions sont exprimées à partir de la tension d'entrée de l'onduleur U_c , et des états de commande (S_a, S_b, S_c), soit:

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_c \left(S_a - \frac{1}{2} (S_b + S_c) \right) \\ V_{s\beta} = \sqrt{\frac{1}{2}} U_c (S_b - S_c) \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Les courants $i_{s\alpha}$ et $i_{s\beta}$, sont également obtenus à partir des courants réels i_{sa} , i_{sb} et i_{sc} par la relation :

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} i_a \\ i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{sb} - i_c) \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

L'amplitude du flux statorique est estimée à partir de ses composantes $\phi_{s\alpha}$ et $\phi_{s\beta}$, par :

$$\phi_s = \sqrt{\phi_{s\alpha}^2 + \phi_{s\beta}^2} \quad (\text{III.7})$$

L'angle α_s entre le référentielle statorique et le vecteur flux ϕ_s est égale à [1],[4],[14].

$$\alpha_s = \arctg \frac{\phi_{s\beta}}{\phi_{s\alpha}} \quad (\text{III.8})$$

Afin d'augmenter la précision et aussi pour éviter les problèmes rencontrés aux frontières de chaque vecteur de commande, le plan de l'espace vectoriel est divisé en 6 secteurs de 60° chacun (Figure. III.3), où le premier secteur est défini entre $(-\pi/3 < \theta_1 < 0)$. Les régions consécutives suivent dans le sens trigonométrique le même critère, qui peut être génériquement exprimé par:

$$(n-1) \frac{\pi}{3} \leq \theta_n \leq (n) \frac{\pi}{3} ; \quad n = 1, 2, \dots, 6 \quad (\text{III.9})$$

Selon l'angle du vecteur de la tension de source référencé sur l'axe (a), le secteur où le vecteur est localisé sera sélectionné. L'angle est calculé en utilisant la fonction

trigonométrique inverse, basée sur les composantes du vecteur de la tension dans le repère (a, b), indiquée par l'équation (III-5) :

$$\theta = \arctan \left(\frac{\phi_{\beta}}{\phi_{\alpha}} \right) \quad (\text{III. 10})$$

III.4.5 La table de commutation :

Une fois les sorties booléennes des comparateurs à hystérésis établies, et suivant le numéro du secteur où se trouve le vecteur $v_{s\alpha\beta}$, le vecteur de la tension à appliquer à la sortie du SAPF est sélectionné à partir de la table de commutation. Les erreurs numérisées S_p , S_q et le secteur de travail sont les entrées de cette table, où les états de commutation S_{1i} , S_{2i} , S_{3i} du SAPF sont mémorisés.

L'état optimal de commutation de l'onduleur est choisi à chaque état de commutation selon la commutation des signaux numériques, S_q et secteur c'est-à-dire, que le choix s'effectue de sorte que l'erreur de la puissance active et réactive instantanée puisse être restreinte dans une bande désirée.

Sachant qu'un onduleur de tension à deux niveaux génère huit vecteurs de tension pour huit combinaisons différents. Chaque vecteur de tension est calculé en se basant sur une combinaison des interrupteurs respectifs et de la tension du bus continu. La sélection des vecteurs de tension de sortie du l'onduleur, pour construire la table de commutation, est basée sur des erreurs des puissances active et réactive et aussi sur la position du vecteur de la tension au point PCC dans chaque secteur. Le vecteur de tension de sortie du filtre actif v_f est contrôlé de telle sorte que le filtre actif injecte un courant i_{inj} égale et en opposition de phase à celui absorbé par la charge polluante. Ainsi, le courant fourni par la source, après compensation, devient sinusoïdal. Le meilleur suivi de v_f est obtenue quand deux des vecteurs de tension adjacents non nuls (, $k = 1, 2, \dots, 6$) et un des vecteurs nuls (v_0 ou v_7) sont sélectionnés.

L'application du vecteur de tension approprié parmi les huit vecteurs de tension possibles du filtre conduira la variation des puissances active et réactive à une direction spécifique. L'influence de chaque vecteur de tension sur la variation de la puissance instantanée est différente, ce qui induit des dynamiques de commande différentes. Supposons, à l'instant (t), la tension au point de couplage v_s est située dans le secteur1. La sélection des vectrices tensions de l'onduleur, pour construire la table de commutation, est

basée sur le signe des erreurs des puissances active et réactive dans chaque secteur. Le Tableau III.1 résume les critères doivent être remplies pour la sélection du vecteur de tension approprié.

S_q	1			-1		
S_p	1	0	-1	1	0	-1
Sector 1	V_5	V_7	V_3	V_6	V_0	V_2
Sector 2	V_6	V_0	V_4	V_1	V_7	V_3
Sector 3	V_1	V_7	V_5	V_2	V_0	V_4
Sector 4	V_2	V_0	V_6	V_3	V_7	V_5
Sector 5	V_3	V_7	V_1	V_4	V_0	V_6
Sector 6	V_4	V_0	V_2	V_5	V_7	V_1

Tableau.III.1. Table de commutation de la DPC

III.5 Calcul des puissances instantanées :

Pour étudier la stratégie de contrôle directe de puissance (DPC), la théorie des puissances instantanées est utilisée pour calculer les valeurs instantanées des puissances active et réactive. Les valeurs instantanées des tensions et des courants triphasés sont respectivement : e_a, e_b, e_c et i_a, i_b, i_c . Après la transformation de Clark, on obtient les tensions e_α, e_β et les courants i_α, i_β sous le système de coordonnées stationnaires biphasés $\alpha\beta$. On sait que le calcul de la puissance active P est un produit scalaire entre les tensions et les courants, alors que la puissance réactive q peut être calculée par un produit vectoriel entre eux:

$$P_s = V_{s\alpha} i_{s\alpha} + V_{s\beta} i_{s\beta} \quad (\text{III.11})$$

$$Q_s = V_{s\alpha} i_{s\beta} - V_{s\beta} i_{s\alpha}$$

L'erreur de la puissance active ΔP est la différence entre la valeur de la puissance active désirée

P^* et la valeur réelle de la puissance active P :

$$\Delta P = P^* - P \quad (\text{III. 12})$$

L'erreur de la puissance réactive Δq est liée à la différence entre la valeur de puissance réactive désirée q^* et à la valeur de puissance réactive réelle q [29]:

$$\Delta q = q^* - q \quad (\text{III. 13})$$

III.6 Effet des paramètres de réglage de système de contrôle :

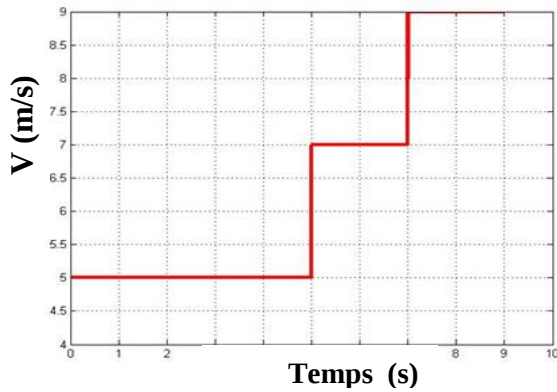
Les seuls paramètres réglables dans le système de contrôle direct de la puissance sont les bandes d'hystérésis des deux correcteurs à hystérésis. La résistance statorique est aussi un autre paramètre à adapter pour bien estimer la puissance.

III.7 Résultat de simulation :

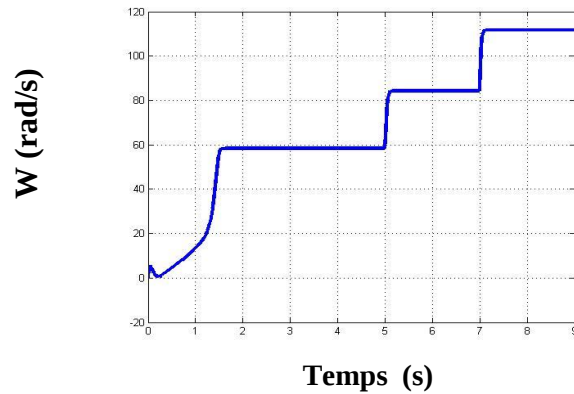
Dans cette section la commande DPC de la MADA de 7.5 KW (les paramètre de la MADA +turbine est présent dans la annexe) a été testée par simulation sous environnement MATLAB/SIMULINK.

Les tests ont été appliqués au système fonctionnement à vitesse du vent variable avec contrôle MPPT, Dans cet essai, un vent de vitesse variable de 5m/s jusque 10m/s appliqué sur les pales de la turbine éolienne.

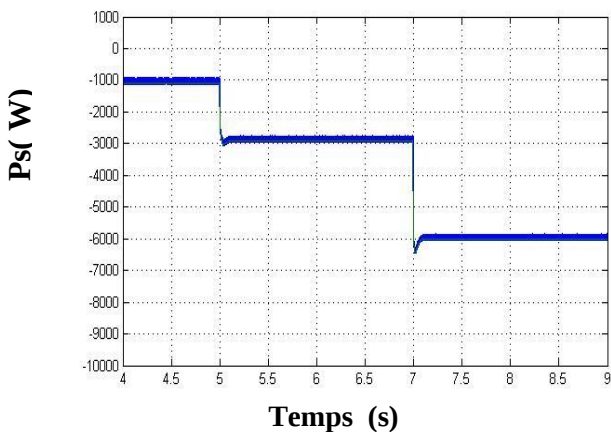
Les résultats de simulations avec la commande directe de puissance active et réactive sont Présentés à la Figure (III -4).



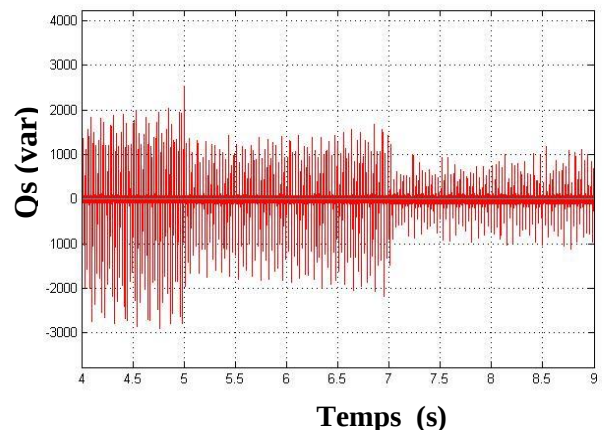
a. Vitesse de vent



b. Vitesse de rotation



c. Puissance active statorique



d. Puissance réactive statorique

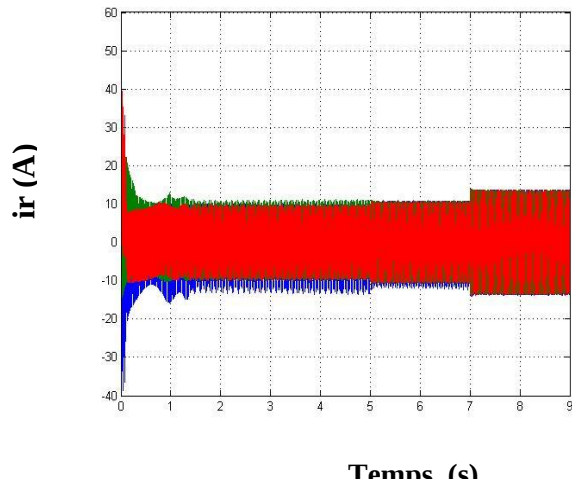
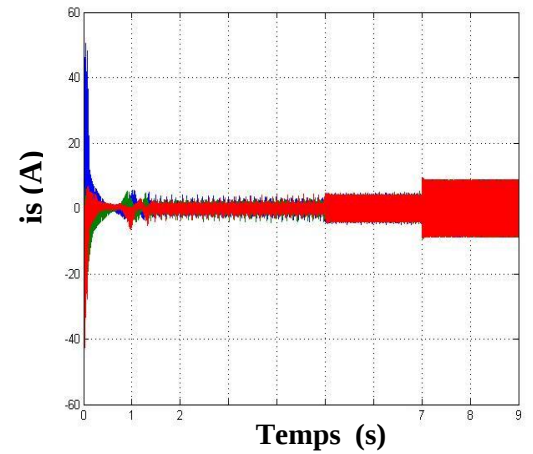
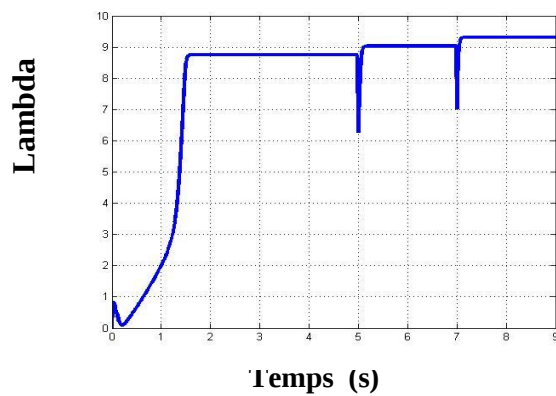
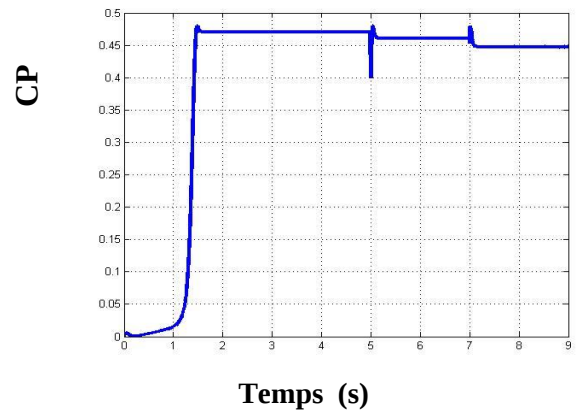
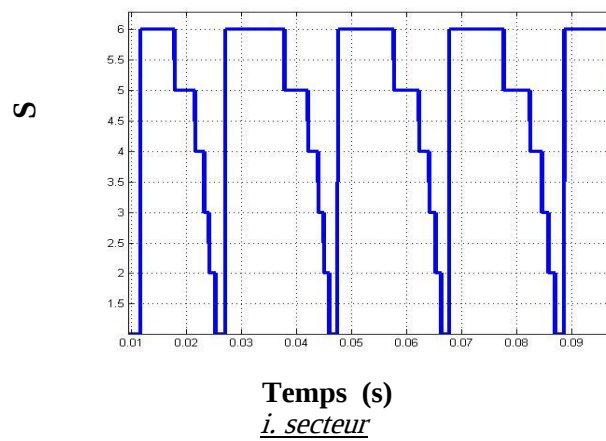
e. courants rotorique sf. courants statorique sg. vitesse relative de l'éolienneh. coefficient de puissance la turbinei. secteur

Fig. III-4 : Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de la MADA.

III.8. Interprétations des Résultats :

Les résultats de simulation montrent que :

- En ce qui concerne la vitesse de rotation de la machine, il est constaté que celle-ci reste dans des proportions acceptables Figure (III.4.a.b). Car, mis à part la période de démarrage. Les variations de la vitesse de la génératrice sont adaptées à la variation de la vitesse du vent. Donc la vitesse de rotation de la MADA est stable dans toutes les vitesses de vent.
- La figure (III.4.d) représente la puissance réactive injectée au réseau, avec la référence de la puissance réactive fixée à zéro ($Q_{p_ref} = 0$). Donc le découplage entre les deux puissances de la MADA est vérifié.
- La figure (III.4.h) représente l'évolution de coefficient de puissance, nous pouvons remarquer que celui-ci est dans le voisinage de sa valeur maximale théorique.
- Les courants statorique et rotorique figure (III.4.e) et (III.4.f) ont pris leurs formes sinusoïdales et sont aussi adaptés à la variation de la vitesse de rotor, et la fréquence rotorique dépend de la vitesse de rotation de l'éolienne.

En fin les résultats obtenus confirment l'efficacité de la stratégie de commande utilisée (DPC) pour le contrôle du système de conversion d'énergie éolienne à base de GADA et atteste les performances désirées.

III.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la commande du système éolienne en se basant sur la structure de la commande directe des puissances DPC. La résultat permet d'obtenir des performances dynamiques des puissances très satisfaisantes. Donc on peut dire que la commande par DPC de la MADA dans le système éolien est très compétitive et qui attire l'attention des différents chercheurs afin d'aboutir à une commande performante qui répondre aux exigences industrielles modernes.

CONCLUSION GENERALE

La consommation intensive de l'énergie électrique, et le souci de préserver l'environnement ont conduit plusieurs pays à initier des programmes nationaux et internationaux destinés à produire de l'énergie électrique à partir des ressources renouvelables notamment celle de type éolien.

Cette dernière se distingue par son caractère aléatoire et intermittent qui est souvent à l'origine des sérieux problèmes liés à la stabilité du réseau électrique.

L'objectif de notre travail est d'élaborer l'étude de la commande de la machine asynchrone double alimentée par la contrôle direct de puissance classique, pour ce faire, les principaux de ce travail être résumés comme suit :

La première partie a été consacrée à la présentation des généralités et caractéristiques sur l'énergie éolienne, ainsi que l'évolution de son exploitation au niveau mondial durant les trente dernières années.

La deuxième partie était l'étude et la modélisation des machines à double alimentation MADA connectée au réseau et fonctionnant à vitesse variable.

Dans la dernière partie nous avons abordé une modélisation complète du système globale de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation en utilisant les stratégies de contrôle direct du puissance (DPC) qui base sur les régulateurs par hystérésis.

Les résultats de simulation obtenus, nous ont permis de juger la qualité de la commande par DPC qui permet d'obtenir des performances dynamiques très satisfaisantes.

Face à ces observations et aux résultats obtenus, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement du dispositif éolien sont envisageables :

- 1- Une réalisation expérimentale du système éolien.
 - 2- Application d'autres algorithmes de réglage de la MADA tels que contrôle directe des puissances (DPC - prédictive).
 - 3- Utiliser d'autres techniques de l'intelligence artificielle avec la DPC
-

Annexe

1-machine à induction double alimentée :

Paramétré	Valeur numérique
Puissance nominale	7.5KW
Résistance statorique	0.474(Ω)
Résistance rotorique	0.7614(Ω)
Inductance mutuelle	0.107(H)
Inductance statorique	0.12(H)
Inductance rotorique	0.122(H)
Nombre de paires de pôles	2
Tension du réseau utilisé	220V
Fréquence du réseau	50Hz

Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Paramétré	Valeur numérique
Nombre de pale	3
Diamètre d'une pale	3m
Gain du multiplicateur	2
Inertie de l'arbre	0.5Kg. m^2
Coefficient de frottement	0.0024N.m.s/rad

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] H.Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers « Centre de Bordeaux »,2003 ».
- [2] Y. Djeriri, A. Meroufel, A. Massoum and Z. Boudjema, « Directpower control of a doubly fed induction generator based wind energy conversion systems including a storage unit »; Journal of Electrical Engineering, JEE, Romania, ISSN 1582-4594,Vol.14, No.1, pp.196-204, March 2014.
- [3] S. EL Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat « Ecole Centrale de Lille »,2004.
- [4] B.Mlton, G.Robin, O.Gergaud, H.ben Ahmed, « Le Génie électrique dans le vent, état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne» JCGE'03. Saint Nazaire, 2003.
- [5] A. Redha, « Modélisation et simulation de la G.A.D.A », Mémoire d'ingénieur d'Etat En Electrotechnique, Batna 2004.
- [6] A. Dendouga, « Commande par mode glissant de la machine à double alimentation alimentée par un onduleur », Thèse de Magister, Université de Batna 2004.
- [7] B.Hopfenspeger et D.J.Atkinson, "Doubly-frd a.c.machines : classification and comparison", European Conference on Power Electronics and Applicatiions (EPE), Gras, 2001.
- [8] N. Dujardin, C.Iweins, www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR
- [8] « Commande vectorielle et adaptative de la MADA » Mémoire d'ingénieur. Université de Batna [2002]
- [9] M. Pitrzak . David & B. Defmel « Comparaison et Synthèse des Procédés de Commande Vectorielle», Journées d'étude groupe de nord Lille, France [1992]
- [11] J. Bayard & L.wes «Utilisation du Pilotage Vectorielle pour Moteur Asynchrone en traction ferroviaire » Journées d'étude –groupe de nord. Lille, France [1992]
- [13] S.Drid, « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation: théorie et expérimentation » Thèse de doctorat en électrotechnique, université de batna, Algérie, 2005.
- [14] Y. Elbia, « Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté » Thèse de magister de l'université de Batna, 2009.

- [15]. Paul-Etienne V, « Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation » Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [16]. A.Boyette., « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I, 2006.
- [17]. B.toual « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable » Thèse de magister de l'Université de Batna ,2010.
- [18]. N. laverdure, « intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » . Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005.
- [19]. Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, Stéphan Astier,Brayima Dakyo, Cristian Nichita. État de l'art dans les aérogénérateurs électriques, 2002
- [20]. CHERIF, "Modélisation de Générateur Asynchronea Double Alimentation Pour la production de l'énergie éolienne", Universitaire d'EL-Oued, 2012
- [21]. M.A.HASSAD, « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques », thèse de magistère, Université SETIF 1, 2012
- [22]. S.Metatla , " Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une Mada", thèse de Magister, Ecole nationale polytechnique d'Alger 2009
- [25] Abdelhakim Derbane, « Contrôle Direct du Couple de la Machine Asynchrone à Aimants Permanents Basé Sur la Logique Floue ou les Réseaux de Neurones,» .Thèse magister, L'EMP, 2002.
- [26] H.Rezine, A. Derbane, K. Ben mansoure, « Nouvelle approche d'un contrôleur flou pour la commande directe du couple de la machine synchrone à aimants permanents,". Sans date.
- [27] Toufouti Riad, « Contrôle Directe du Couple de la Machine Asynchrone,» .Thèse de magister, Université de Constantine, 2003.
- [28] Mourad Moussaoui, Smail Rebbouh, « Commande Adaptative à Modèle de Référence. Application à un Moteur Asynchrone,» .Thèse d'ingénieur, Université Mohamed Boudiaf M'sila, Promotion JUIN2002.
- [29] K. Merouani, A. Kheloui, « Commande Directe du Couple d'une Machine Asynchrone par PC,» .Conférence Internationale ICEE' 2000.

- [30] Yen-Shim Lai and Juo-Chiun Lin AND Jennshing Jersey Wang, « Direct Torque Control Induction Motor Drives With Self-Commissioning Based On Taguchi Methodology, » .IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL.15, NO.6, NOVEMBER 2003.
- [31] Mukul Chandorkar, « New Techniques for Inverter Flux Control, » .IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL.37, NO.3, MAY/JUNE 2001.
- [32] Datta, R., Ranganathan, V.T.: Direct power control of grid-connected wound rotor induction machine without rotor position sensors. In: IEEE Trans. Power Electron., 16 (2001), No.3, May 2001, p. 390- 399.
- [33] Lie Xu, and Phillip Cartwright, “Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation” IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 21, No 3 September 2006.
- [34] L. Xu and P. Cartwright, “Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation,” IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 21, no.3, pp. 750-758, Sept. 2006