LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEINEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Akli Mohand Oulhadj -Bouira-Faculté Des Sciences Et Des sciences appliquées Département : Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme Master en Electromécanique

Option: Electromécanique

Thème

Optimisation du Rendement d'un Générateur Eolien à Axe Horizontal Basé sur Machine Asynchrone

Proposé et dirigé par :

❖ Mr: Ameziane Sadek

Présenté par :

- ❖ Hanafi badr eddine
- * Kadir mohamed

Année universitaire: 2017-2018

Remerciements

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Génie Électrique et Électromécanique de la Faculté des Science et des sciences appliquées, de l'Université Akli mohand oulhadj de bouira.

Avant tout, nous remercions Allah, le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Avec respect, nous tenons à remercier tout le corps enseignant de l'Université l'Université Akli mohand oulhadj de bouira pour nous avoir suivis tout au long de nos études.

Nous remercions également notre encadreur Monsieur amziane SADEK pour son aide, ses conseils lors des simulations réalisées.

Mercí enfín à tous ceux quí, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contríbué au succès de ce travail.

Hanafi badreddine kadir mohamed Bouira 2018

Je dédie ce travail

A:

Ma mère, qui a œuvré peur ma réussite de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis

Et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois a travers ce travail, aussi modeste soit il, l'expression de mes sentiments, et de son éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de langues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie, puisse dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit, merci pour les valeurs nobles l'éducation et le soutient permanant venu de toi.

Mes sœurs, qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

A tous les enseignants du département de génie électrique et à tous mes amis de la promotion électromécanique (2017-2018).

LISTE DES ACRONYMES ET D'ABREVIATIONS

 V_1, V_2 Vitesses du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne

Paer La puissance aérodynamique

 P_{ν} La puissance du vent

ρ Masse volumique de l'air en température ambiante (15°C)

F La force de l'air

C_p Le coefficient de puissance

R Longueur de la pale $Q_{turbine}$ Vitesse de la turbine

Vestimé La vitesse du vent estimée

G Gain de multiplicateurJ Moment d'inertie totale

λ Vitesse relative

β Angle d'orientation des pales

 C_g Couple du multiplicateur

Caer Couple aérodynamique de l'éolienne

 Ω_{mec} Vitesse mécanique de la génératrice

C_{em} Couple électromagnétique

Cr Couple résistant

Cem-ref Couple électromagnétique de référence

 Ω_{ref} Vitesse mécanique de référence de la génératrice

*J*_{pale} Inertie de la pale

 F_{pale} Coefficient de frottement de la pale par rapport au support de l'éolienne

MADA Machine asynchrone à double alimentation

GADA Génératrice asynchrone double alimentée

(d, q) Indice du repère de Park lié au rotor

Rs Résistance statorique

*L*_d Inductance statorique directe

 L_q Inductance statorique quadratique

 (U_{sd}, U_{sq}) Composantes de la tension au stator dans le repère de Park

 Ψ_f flux d'excitation des aimants permanents

 (ψ_{sd}, ψ_{sq}) Composantes du flux statorique dans le repère de Park

 (I_{sd}, I_{sq}) Composantes du courant statorique

P Nombre de paire de pôles

f Le coefficient de frottment

 ω Pulsation électrique statorique

 Ω Vitesse de rotation mécanique du rotor

F Vecteur force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable

 Φ_{S-nom} Le flux statorique nominal

 ω_{nom} Nominal la vitesse de rotation

 Φ_{S-ref} Le flux statorique de référence

 f_p Fréquences de modulation

 f_{ref} Fréquences de référence

 $V_{\it mref}$ Amplitude de la tension de référence

 V_m Valeur de crête de l'onde de modulation

M.P.P.T Maximum Power Point tracking

Sommaire

CHAPITRE 1: ETAT DE L'ART SUR L'ENERGIE EOLIENNE

I.1 Introduction:	3
I. 2 Définition de l'énergie éolienne :	3
I. 3 Historique :	3
I. 4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :	4
I.4.1 Avantages:	4
I.4.2 Inconvénients:	4
I.5 Les différents types d'éoliennes :	5
I.5.1 Eoliennes à axe vertical :	5
I.5.1.1 Aérogénérateurs à rotor de Darrieus :	5
I.5.1.2 Aérogénérateurs à rotor de Savonius :	5
I.5.1.3 Les principaux avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical :	5
I.5.2.Eoliennes à axe horizontal :	6
I.5.2.1.Les principaux avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal :	6
I.6.Architecture d'une éolienne à axe horizontal :	7
I.7. Régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne :	7
I.8.1 Système à décrochage aérodynamique "stall" :	8
I.7.2 système d'orientation des pales "pitch" :	9
I.8. Rendement énergétique :	9
I.8.1.Loi de Betz:	10
I.8.2.La limite de BETZ :	11
I.9. Modélisation de la vitesse du vent :	11
I.10. Modélisation de la turbine à axe horizontal :	12
I.10.1.Modèle de la Turbine :	12
I.10.2.Modèle du Multiplicateur :	13
I.10.3.Modèle de l'arbre :	14
I.11.Simulation:	14
I 11 1 Avec vitesse de vent fixe :	15

I.11.2 Avec vitesse de vent variable :	15
I.12.Conclusion:	16
CHAPITRE 2: ETAT DE L'ART SUR LA MACHINES ASYNCHRONE DOU	BLE
ALIMENTATION	
II.1.Introduction:	17
II.2.Constitution de la machine asynchrone à double alimentation :	17
II.3.Principe de fonctionnement de la MADA:17II.4.Modes de fonctionnement	de la
MADA:	18
II.4.1.Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :	18
II.4.2.Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone:	19
II.4.3.Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone:	19
II.4.4.Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone:	19
II.5. Variation de vitesse de la MADA :	19
II.5.1.Action sur le glissement :	19
II.5.2.Variation de la fréquence:	19
II.5.3.Action sur le nombre de pôle :	20
II.6.Différentes configurations de l'association MADA/convertisseur de puiss	sance
·	20
II.6.1.stator relié au réseau, rotor alimenté par un convertisseur :	20
II.6.2.stator relié au réseau, rotor alimenté par un cycloconvertisseur:	20
II.6.3.stator alimenté par un onduleur, rotor alimenté par un onduleur:	21
II.7. Avantages et inconvénients de la MADA:	22
II.7.1.Avantages de la MADA:	22
II.7.2.Inconvénients de la MADA :	23
II.8.Modélisation de GADA :	24
II.8.1.Modèle triphasé de la génératrice :	24
II.8.2.Modèle de Park :	25
II.8.3.Choix de référentielle :	25
II.9. Simulation de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA):	27

II.9.1.Résultat de Simulation :
II.10.Conclusion:
CHAPITRE 3: OPTIMISATION DU RENDEMENT POUR EOLIENNE A AXE
HORIZONTAL BASE SUR LA GENERATRICE ASYNCHRONE
III.1 Introduction: 32
III.2 La commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation : 32
III.3.Commande vectorielle:
III.3.1.Commande vectorielle directe en puissances active et réactive de la GADA :35
III.3.2. Régulateur (PI):
III.4.résultat et interprétation :
III.6 : Définition et principe de fonctionnement du système éolien à vitesse variable :
40
III.6.1 : Principe:
III.6.2 : Les différents types d'MPPT éoliens:
III.6.2.1.Maximisation de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure:
III.6.2.2.Maximisation de la puissance avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure:
III.6.2.3.Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse :
III.6.2.4.Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse :
III.7 : Simulation et interprétation :
III.8 : Conclusion:

Liste des figures

Figure	Titre	Page		
CHAPITRE I				
Figure (1-1)	Conversion de l'énergie cinétique du vent.			
Figure (1-2)				
Figure (1-3)	Aérogénérateur à axe vertical.	05		
Figure (1-4)	Aérogénérateur à axe horizontal.	06		
Figure (1-5)	Différentes partie d'éolienne.	07		
Figure (1-6)	•			
Figure (1-7)	Flux d'air sur un profil de pale « stall ».	08		
Figure (1-8)	Variation de l'angle de calage d'une pale.	09		
Figure (1-9)	Veine de vent à la traversée de l'aéromoteur.	10		
Figure (1-10)	Séquence de vent synthétique.	11		
Figure (1-11)				
Figure (1-12)	Coefficient de puissance en fonction du Ratio de vitesse (λ) et	13		
	de l'angle de calage β.			
Figure (1-13) Schéma bloc d'une turbine éolienne à axe horizontal.		14		
Figure (1-14) Bloc de simulation de l'éolienne.		14.		
Figure (1-15)				
Figure (1-16)	<u> </u>			
Figure (1-17)				
Figure (1-18)	Résultats de simulation de la turbine avec vitesse de vent	16		
	variable.			
	CHAPITRE II	_		
Figure (2-1)	Structure du stator et des contacts rotorique de la MADA.	17		
Figure (2-2)	Modes opérationnels caractéristiques de la MADA.	18		
Figure (2-3).	Schéma de l'alimentation de la MADA pour application	20		
	moteur premier configuration.			
Figure (2-4)	Schéma de l'alimentation de la MADA pour application	21		
	moteur deuxième configuration.			
Figure (2-5)	Schéma de l'alimentation de la MADA pour application	21		
	moteur troisième configuration.			
Figure (2-6)	Schéma d'alimentation de la MADA pour l'application	22		
	génératrice.			
Figure (2-7).	Représentation schématique de la machine asynchrone dans	24		
(2.0)	l'espace électrique.			
Figure (2-8).	Bloc de simulation de la génératrice asynchrone double	27		
T' (2.0)	alimentation asynchrone.	20		
Figure (2-9)	l'évolution des courant rotoriques et statorique.	28		
Figure (2-10)	Evolution des tensions statoriques en fonction de la variation	28		
	de la vitesse du rotor.			

Figure (2-11)	Evolution des tensions statoriques en fonction de la variation	
	de l'amplitude et de la tension rotorique.	
Figure (2-12)	Evolution des tensions statoriques en fonction de la variation	30
	de la charge.	
	CHAPITRE III	
Figure (3-1)	Principe de control vectoriel.	34
Figure (3-2).	Schéma-bloc de la GADA à réguler.	35
Figure (3-3)		
Figure (3-4)	ure (3-4) Boucle de régulation par PI.	
Figure (3-7)	Réglage des puissances de la GADA par la commande	
	Vectorielle directe avec une vitesse fixe.	
Figure (3-8)	Puissances Réglage des puissances de la GADA par la	39
	commande Vectorielle directe avec une vitesse variable.	
Figure (3-9)	Diagramme de la vitesse angulaire sur l'arbre en fonction de	41
	la vitesse du vent.	
Figure (3-10	Figure (3-10 MPPT avec asservissement de la vitesse.	
Figure (3-11)	gure (3-11) MPPT sans asservissement de la vitesse.	
Figure (3.14)	gure (3.14) Résultat de simulation sans MPPT avec vitesse de vent fixe.	
Figure (3.17)	Résultat de simulation sans MPPT avec vitesse de vent	47
·	variable.	
Figure (3.18)	Résultat de simulation MPPT sans asservissement de la	48
	vitesse.	

Introduction Generale

Il est clair que l'énergie électrique permet un véritable confort et une des causes du développement d'un pays. Il est clair que sans ressources énergétiques viables, un pays aura d'autant plus de mal à se développer. Toutefois, cela révèle un autre problème : Pour faciliter leur développement, certains pays font appel à des sources d'énergie polluantes tandis que d'autres plus développés souhaitent favoriser le développement de ressources moins polluantes. Ainsi, alors que les énergies prédominantes sont le pétrole et le nucléaire, la recherche tant publique que privée se tourne vers des énergies plus renouvelables. D'ailleurs, même si ces recherches peuvent paraître du point de vue leur progression industrielle dérisoires, elles n'en restent pas moins primordiales.

De la même façon que le vent actionnait les pales des moulins à eau ou à blé, le vent peut actionner les pales d'une hélice et ainsi entraîner un système équivalent à une dynamo appelée aérogénérateur . L'ensemble « pales + aérogénérateur » est plus particulièrement appelé « éolienne » (du grec Eole, dieu du vent) ou système éolien et correspond à une haute tour (le vent soufflant davantage en hauteur) en béton ou en métal, au sommet de laquelle tourne une hélice (généralement de 30 à 40 mètres de diamètre) comportant trois pales. D'ailleurs, le diamètre de l'hélice se doit d'être important du fait que la puissance théorique d'une éolienne croît proportionnellement au carré du diamètre des pales et au cube de la vitesse du vent . Aussi, l'électricité éolienne est l'une des énergies renouvelables les plus prometteuses et pour cause puisqu'elle est également la moins coûteuse des énergies renouvelables. Toutefois, tous les sites ne peuvent pas forcément inclure des éoliennes du fait que la vitesse moyenne du vent doit dépasser les 5 mètres par seconde soit 18 km par heure. De nos jours, les machines les plus courantes ont une puissance de 750 kW et les plus puissantes commercialisées atteignent 1,5 MW.

Actuellement, plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. C'est le cas de l'Allemagne, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 12 GW, l'Espagne, numéro deux de l'Union Européenne avec 4,15 GW et le Danemark avec 2,9 GW à la fin de l'année 2002.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type Asynchrone à double alimentation dans un système éolien. Le premier chapitre est consacré à des rappels sur les systèmes éoliens à travers les équations et les concepts physiques régissant leurs fonctionnements.

Dans la deuxième chapitre nous allons nous intéresser à la machine asynchrone à double alimentation, la plus utilisée dans les éoliennes tournant à une vitesse variable, en partant d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices pour la modélisation mathématique de la machine.

Dans le troisième chapitre nous allons intéresser à l'optimisation du rendement d'un générateur éolien à axe horizontal basé sur une génératrice asynchrone doublement alimenté, la vérification des résultats obtenus vont être réalisés dans la plateforme Simulink du logiciel Matlab.

CHAPITRE 1: ETAT DE L'ART SUR L'ENERGIE EOLIENNE

I.1 Introduction:

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Dans ce premier chapitre, on va essayer de donner un aperçu général sur les systèmes éoliens ; et précisément sur les systèmes éoliens à axe horizontal qui représentent l'actualité des énergies renouvelables.

I. 2 Définition de l'énergie éolienne :

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. Cette conversion se fait en deux étapes [1] :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Le fonctionnement général est illustré par la Figure 1.1 :

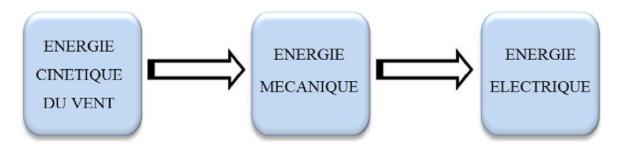


Figure 1.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I. 3 Historique:

Depuis l'Antiquité, des moulins à vent convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique (généralement utilisée pour moudre du grain, presser des produits oléifères, battre le fer, le cuivre, le feutre ou les fibres du papier... ou relever de l'eau). De nos jours, on Trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, généralement utilisées pour assécher des zones humides ou au contraire irriguer des zones sèches ou abreuver du bétail [1], [2].

La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est mise au point par le Danois Poul Lacour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse.

AMO 2018 Page 3

-

Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il vend soixante-douze exemplaires en 1908 [1], [2].

En France, une éolienne expérimentale de 800 kVa était mise en fonctionnement de 1955 à 1963, à Nogent-le-Roi dans la Beauce. Elle avait été conçue par le Bureau d'études scientifiques et techniques de Lucien Romani et exploitée pour le compte d'EDF.

Simultanément, deux éoliennes Neyrpic de 130 et 1 000 kW furent testées par EDF à Saint-Rémydes Landes (Manche). En Algérie, une éolienne fut montée sur les hauteurs d'Alger (Dély Ibrahim) en 1957.

Cette technologie ayant été quelque peu délaissée par la suite, il faudra attendre les années 1970 et le premier choc pétrolier pour que le Danemark relance les activités dans les installations d'éoliennes [2].

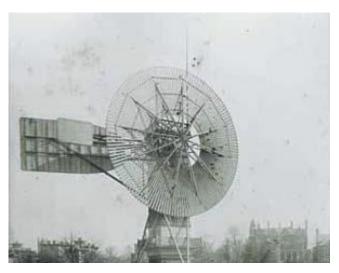


Figure 1.2: Eolienne de Charles.F.Brush (Etats-Unis, 1888) [3]

I. 4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

I.4.1 Avantages:

- ➤ l'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- ➤ Pollution zéro c'est une énergie propre (pas d'émissions de gaz, pas de particules)

I.4.2 Inconvénients:

- ➤ la nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- ➤ Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- Le bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des multiplicateurs.

I.5 Les différents types d'éoliennes :

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. En effet, les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types : les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal

I.5.1 Eoliennes à axe vertical:

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles ; les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Siguard Savonius en 1924) [3].

I.5.1.1 Aérogénérateurs à rotor de Darrieus :

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation. La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif [3].

I.5.1.2 Aérogénérateurs à rotor de Savonius :

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure [3].



Figure 1.3 : Aérogénérateur à axe vertical (savonius) [3].

I.5.1.3 Les principaux avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical :

Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretient.

La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction. Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants:

- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance,
- Occupation importante du terrain pour les puissances élevées,
- Faible vitesse du vent à proximité du sol.

I.5.2. Eoliennes à axe horizontal :

Les turbines à axe horizontal sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisque elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques. Elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripal est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent [4].



Figure 1.4 : Aérogénérateur à axe horizontal [3].

I.5.2.1.Les principaux avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal :

Eoliennes à axe horizontal			
Avantage	Inconvénient		
Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.	Coût de construction très élevé		
Cette structure capte le vent en hauteur,	L'appareillage se trouve au sommet de la		
donc plus fort et plus régulier qu'au	tour ce qui gêne l'intervention en cas		

voisinage du sol.	d'incident.
Le générateur et les appareils de	
commande sont dans la nacelle au	
sommet de la tour.	
Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter	
un local pour l'appareillage	

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical son encore utilisé pour la production d'électricité dans les zones isolés. Elles sont de faible puissance et sont, généralement, destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple.

I.6. Architecture d'une éolienne à axe horizontal :

Une éolienne est constituée principalement de trois parties : les pales, la nacelle et la tour. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement [5].

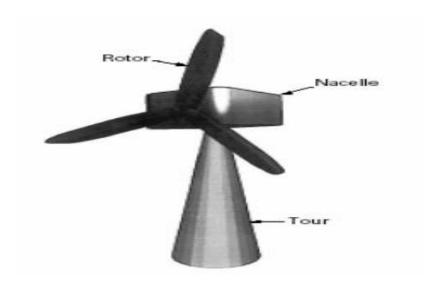


Figure 1.5 : Différentes partie d'éolienne [3].

La tour : est généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, elle doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre une tour (mât) de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur.

- ➤ 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.
- ➤ La nacelle : regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, le frein à disque (différent du frein aérodynamique) qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge ainsi que le générateur (généralement une machine asynchrone) et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales. A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne (figure 1.6).

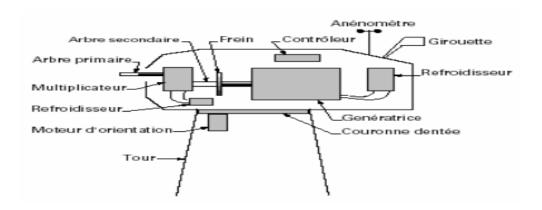


Figure 1.6 : Eléments d'une nacelle [13].

I.7. Régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne :

I.8.1 Système à décrochage aérodynamique "stall" :

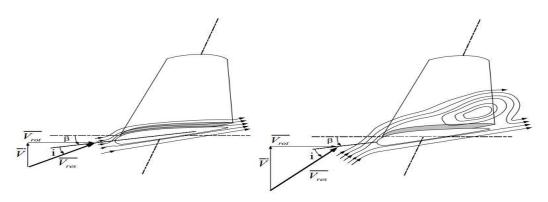


Figure 1.7 Flux d'air sur un profil de pale « stall » [4]

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la

pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale Vn, l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage β et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante [7].

I.7.2 système d'orientation des pales "pitch" :

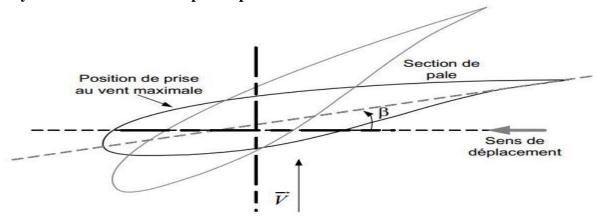


Figure 1.8 Variation de l'angle de calage d'une pale [4]

I.8. Rendement énergétique :

On définit un coefficient de performance Cp propre à chaque éolienne, comparable au rendement d'un moteur thermique, qui dépend directement des caractéristiques de l'éolienne.

La puissance récupérable Pr sur l'éolienne est alors définie par :

$$P_r = C_p P_d \tag{1.1}$$

Où P_d est la puissance disponible.

I.8.1.Loi de Betz:

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en

1929, formula la loi de Betz pour la première fois. Considérons le système de la figure 1.9 qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal.

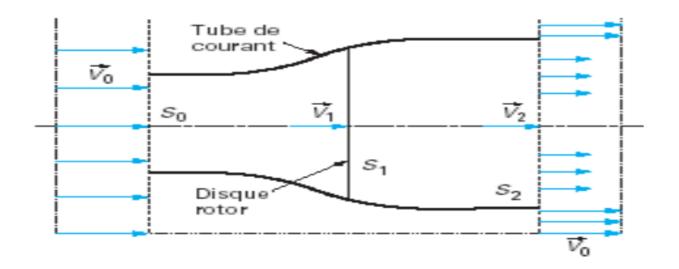


Figure 1.9 Veine de vent à la traversée de l'aéromoteur[15]

On supposera l'air incompressible, ce qui permettra d'écrire la conservation du débit volumique :

$$S_0 V_0 = S_1 V_1 = S_2 V_2 \tag{1.2}$$

De plus, la masse d'air élémentaire dm traversant l'éolienne pendant le temps dt est :

$$d_m = \rho S_1 V_1 dt \tag{1.3}$$

La variation de l'énergie cinétique par seconde de la masse d'air est :

$$P_c = \frac{dW_c}{dt} = 1/2\rho S_1 V_1 (S_0^2 V_2^2)$$
 (1.4)

Ainsi la puissance récupérable selon la théorie de Betz s'énonce :

$$P_c = 1/4\rho S_1 (V_0 + V_2)^2 (V_0 + V_2)$$
(1.5)

I.8.2.La limite de BETZ:

La relation devant exister entre V0 et V2 pour que cette puissance Pr passe par un maximum est :

$$\frac{dP_r}{dV_2} = 0 \qquad V_0 = 3V_2$$

Dans ces conditions la puissance maximale s'écrit :

$$P_{max} = \left(\frac{8}{27}\right) \rho S V_0^3 = \left(\frac{16}{27}\right) \left(\frac{1}{2\rho S V_0^3}\right)$$
 (1.6)

$$P_{max} = (\frac{16}{27})P_d \tag{1.7}$$

ce qui signifie que la puissance maximale récupérable ne pourra jamais représenter plus de $(16/27) \times 100 = 59,26 \%$ de la puissance disponible due au vent, c'est la limite de Betz.

I.9. Modélisation de la vitesse du vent :

La première étape nécessaire pour un projet de production éolienne est le choix géographique du site. Les propriétés du vent sont intéressantes pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie éolienne, puisque sa puissance, dans les conditions idéales, est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Pour connaître les caractéristiques d'un site, il est indispensable d'avoir des mesures de la vitesse du vent et d e sa direction, sur une grande période du temps.

Le modèle du vent utilisé dans notre étude est donné par la relation suivant :

$$V(t) = 8 + 0.2.\sin(0.1047.t) + 2.\sin(0.2665.t) + 0.2.\sin(3.6645.t)$$
 (1.2)

Cette équation est modélisée sous MATLAB/SIMULINK le résultat de simulation de cette équation est présenter sur la (figure 1.10) :

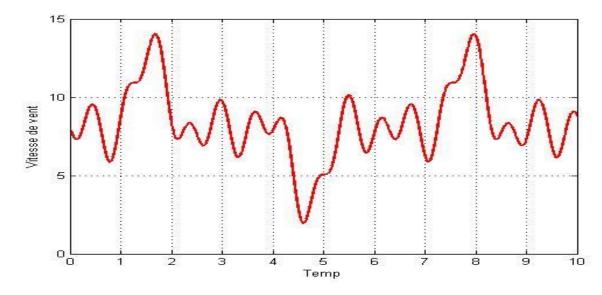


Figure 1.10 : Séquence de vent synthétique

I.10. Modélisation de la partie mécanique d'une éolienne à axe horizontal :

Dans cette partie, il y à la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et le rotor de la génératrice :

- ➤ la turbine éolienne se compose de 3 pales orientables
- le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.
- L'arbre relis la partie mécanique à la partie électrique ou bien relie la turbine avec le générateur.

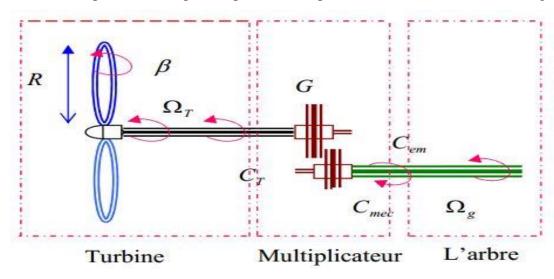


Figure 1.11: Architecture globale d'une turbine.

I.10.1.Modèle de la Turbine :

La relation entre la vitesse du vent et la puissance mécanique extraite donne par l'équation suivante :

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times C_p(\beta, \lambda) \times V^3$$
 (1.3)

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} \tag{1.4}$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure 1.12 représente la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β .

Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_{T \times R}}{V} \tag{1.5}$$

A partir de relevés réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante :

$$C_P(\beta, \lambda) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5\right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}}$$
 (1.6)

Avec:
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} \times \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$
 (1.7)

La Figure illustre la courbe de $C_P(\beta, \lambda)$, pour la valeur de $\beta = 2(\deg)$:

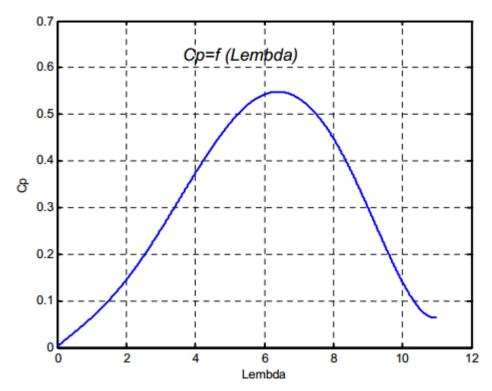


Figure 1.12 : Coefficient de puissance en fonction du Ratio de vitesse (λ) et de l'angle de calage (β).

De la figure (1.12), on peut déduire que le C $_{pmax}$ =0.54 et λ_{Cpmax} =6.41.

I.10.2.Modèle du Multiplicateur :

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés.

Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur:

$$C_{mec} = \frac{1}{6} C_{turbine} \tag{1.8}$$

Ainsi que:

$$\Omega_a = G.\Omega_T \tag{1.9}$$

Ou Ω_q est la vitesse de générateur (rad/s).

I.10.3.Modèle de l'arbre :

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par :

$$J\frac{d\Omega_T}{dt} = C_T + f\Omega_T \tag{1.10}$$

J : Inertie totale des parties tournantes (turbine + génératrice) (Kg.m²).

f : Coefficient de frottement visqueux.

 $C_T = C_{em} + C_r$: Couple totale de l'éolienne (N.m).

 C_{em} : Couple électromagnétique de la génératrice en (N.m).

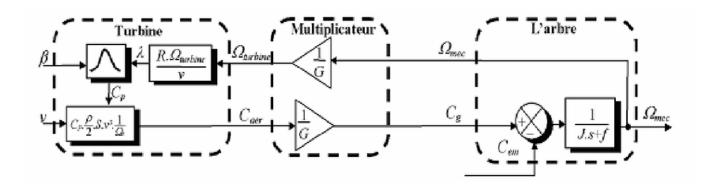


Figure 1.13: Schéma bloc d'une turbine éolienne à axe horizontal.

I.11.Simulation et interprétation :

Dans cette simulation on a proposé deux vitesses déférentes de vent, premièrement avec une vitesse fixe moyenne autour de 12 m/s et deuxièmement avec une vitesse variable. Les résultats obtenus pour les différentes vitesses de vent sont données comme suit :

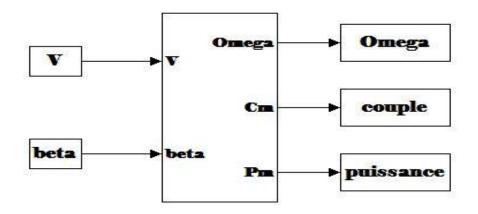


Figure 1.14 Bloc de simulation de l'éolienne

I.11.1 Avec vitesse de vent fixe :

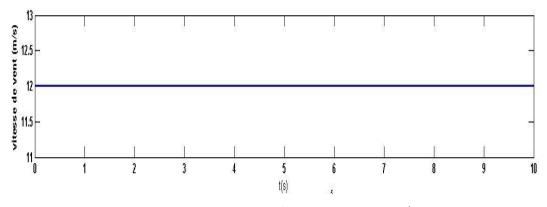


Figure 1.15 profil de vent appliqué.

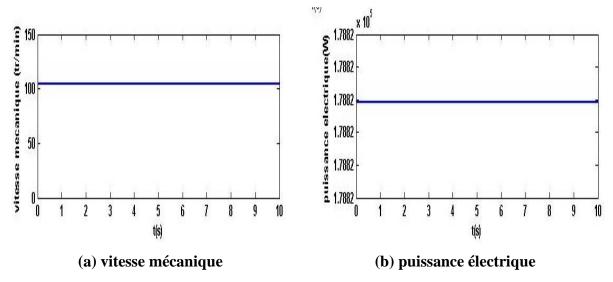


Figure 1.16 Résultats de simulation de la turbine avec vitesse de vent fixe.

I.11.2 Avec vitesse de vent variable :

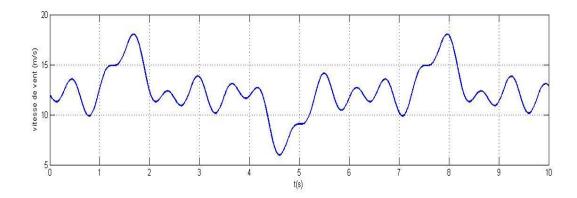


Figure 1.17: profil de vent appliqué.

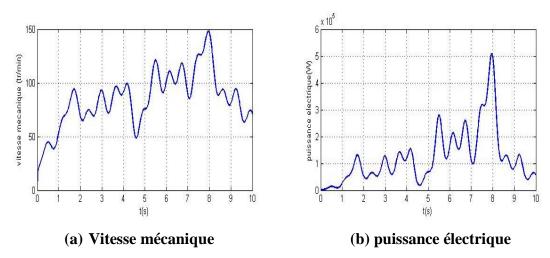


Figure 1.18 Résultats de simulation de la turbine avec vitesse de vent variable.

Les résultats de simulation montrent clairement que les sorties du système modélisé exprimés par la vitesse mécanique et la puissance électrique produite, suivent d'une façon adéquate le profil de vitesse du vent imposé.

I.12.Conclusion:

On a étudié dans ce chapitre les différents types des turbines éoliennes et les différentes parties d'une turbine éolienne à axe horizontal comme par exemple La tour, Le rotor...etc. La modélisation et la simulation de la vitesse du vent plus la partie aérodynamique de l'éolienne à axe horizontal ont été détaillées. la partie aérodynamique comporte trois parties (turbine, multiplicateur et l'arbre); la turbine éolienne se compose de trois pales orientables, le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique, et l'arbre met la liaison entre la partie mécanique et la partie électrique ou bien la liaison entre la turbine et le générateur. Les résultats de simulations montrent bien l'efficacité des modèles adaptés. Dans le chapitre suivant un état de l'art sur la machine asynchrone double alimentation va être traité.

CHAPITRE 2: ETAT DE L'ART SUR LA MACHINES ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION

II.1.Introduction:

La littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime.

Ce chapitre dresse un état de l'art sur la MADA. Il permet ainsi de mettre en évidence l'évolution qu'a connue cette machine depuis que les progrès tangibles ont été réalisés dans divers domaines tels que : les matériaux d'électrotechnique, l'informatique et l'électronique de puissance.

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

La première apparition de cette machine date de l'année 1899 il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation [8]. 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.

La figure suivante représente la structure 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.

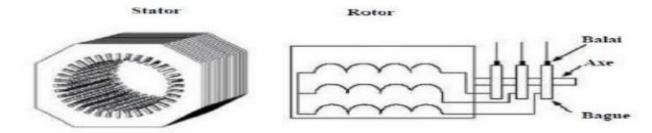


Figure 2.1 Structure du stator et des contacts rotorique de la MADA [15]

II.3.Principe de fonctionnement de la MADA:

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de F.m.ms des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega s=2\pi fs$, et le rotor tourne avec la vitesse ωr ; alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des F.m.ms des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse ω telle que :

$$\omega r = \omega s - \omega = g \omega s$$
 (2.1)

Où : g est le glissement et ωr : 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 :

Pour que la rotation du vecteur résultant des F.m.ms par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence fr définie à partir de $\omega r=2\pi fr$; c'est-à-dire:

$$fr=g.fs$$
 (2.2)

II.4.Modes de fonctionnement de la MADA:

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, cependant la commande des tensions rotoriques permet de gérer 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 ou générateur. Pour l'utilisation de la MADA dans l'application moteur, les travaux présents dans la littérature montre les bonnes performances de cette machine pour ce mode fonctionnement cette application ne concerne pas le thème considéré[9].

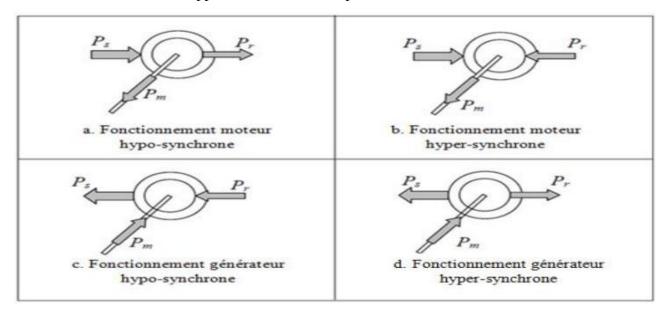


Figure 2.2 Modes opérationnels caractéristiques de la MADA [9]

II.4.1.Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :

La puissance est fournie par le réseau au stator, et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vit esse de synchronisme, figure (2.2a). La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Jou le dans le rotor.

II.4.2.Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone:

La puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme, figure (2.2b). La machine à cage classique ne peut fonctionner dans ce régime.

II.4.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone:

La puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. Le rotor absorbe la puissance du glissement et la direction du champ magnétique est identique à celle du champ du stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme, figure (2.2c). La machine asynchrone à cage classique ne peut fonctionner dans ce régime.

II.4.4.Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone:

La puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinje ctée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme, figure (2.2d). La machine à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement, mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

II.5. Variation de vitesse de la MADA:

L'examen de la formule de la vitesse donné par : $\Omega = (2\pi/p).(fs(1-g))$, fait sortir trois modes de variation :

II.5.1.Action sur le glissement :

Pour régler la vitesse, lorsqu'on utilise ce principe on place entre le réseau et le moteur un gradateur pour chacune des phases. On fait varier la vitesse par action sur l'angle de passage des courants durant chaque alternance. Ce mode affecte directement le rendement $\eta=(1\text{-g})$. Techniquement on réalise ce type par action sur la tension d'alimentation pour le moteur à rotor à cage et avec une résistance rotorique pour le moteur à rotor bobiné.

II.5.2. Variation de la fréquence:

Pour faire varier la vitesse dans de bonnes conditions, il faut faire varier sa fréquence d'alimentation en utilisant des convertisseurs (onduleur MLI ou plein onde-cycloconvertisseur).

II.5.3.Action sur le nombre de pôle :

C'est un mode constructif par action sur le nombre de pôles, cette technique de bobinage consistant à changer la polarité de la machine par un changement des sens de courant. La vitesse Ω varie du simple au double et inversement ce qui implique une variation discontinue.

II.6.Différentes configurations de l'association MADA/convertisseur de puissance :

La MADA offre plusieurs possibilités de reconfiguration avec son association avec les Convertisseurs de puissances. Ces configurations dépendent essentiellement du domaine D'application de la MADA [10]. On peut distinguer les configurations suivantes.

II.6.1.stator relié au réseau, rotor alimenté par un convertisseur :

Cette classe est dite MADA simple. Les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé fixe tandis que le rotor est relié à son propre onduleur. La figure 2.3 représente un schéma de principe de cette catégorie de MADA.

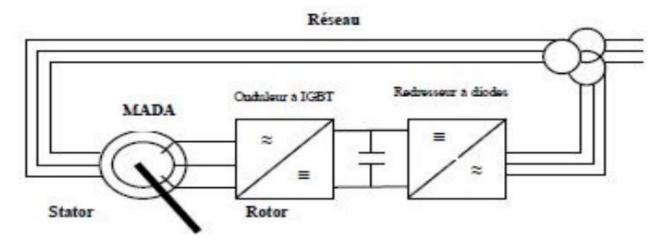


Figure 2.3 Schéma de l'alimentation de la MADA pour application moteur

Première configuration [10]

II.6.2.stator relié au réseau, rotor alimenté par un cycloconvertisseur :

Dans cette configuration les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé fixe tandis que le rotor est relié à un cyclo –convertisseur.

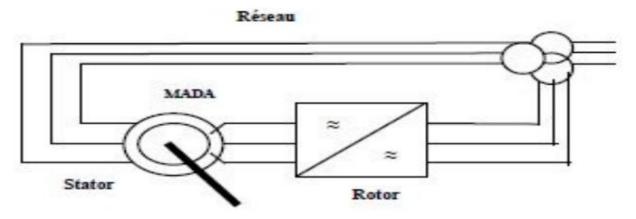


Figure 2.4 Schéma de l'alimentation de la MADA pour application moteur Deuxième

Configuration [15]

II.6.3. stator alimenté par un onduleur, rotor alimenté par un onduleur :

Les deux côtes stator et rotor sont alimentées par des onduleurs de tension. Elle peut prendre deux formes équivalentes :

- -Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun, ce dernier est donc une source d'alimentation commune aux deux côtes,
- -Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs. Dans ce cas, c'est le réseau qui est a source du couplage électrique existant entre les deux côtes.

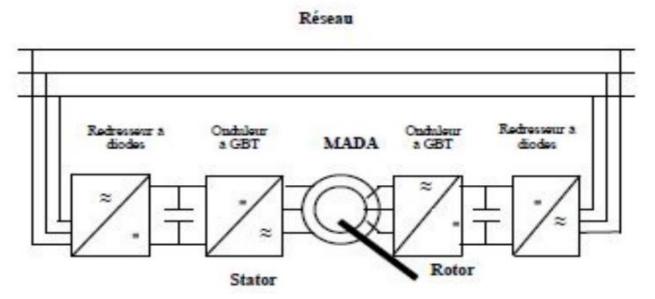


Figure 2.5 Schéma de l'alimentation de la MADA pour application moteur

Troisième configuration [15]

Pour l'utilisation dans l'énergie éolienne à vitesse variable la configuration largement répondue est représenté dans la figure 2.6. Elle consiste à alimenter le rotor par un convertisseur et à relié le stator au réseau [10].

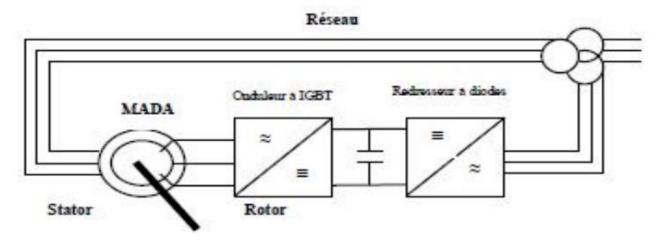


Figure 2.6 Schéma d'alimentation de la MADA pour l'application génératrice [15]

De plus, cette dernière offre la possibilité d'avoir une commande découplée des puissances active et réactive, de même qu'elle assura un coût d'investissement réduit par rapport aux autres configurations. Ces avantages expriment l'utilisation tés vaste de la MADA avec cette configuration dans l'industrie et surtout dans les domaines des éoliennes à vitesse variable [10].

II.7. Avantages et inconvénients de la MADA :

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs : sa structure, sa stratégie de commande et ses applications.

II.7.1.Avantages de la MADA :

Parmi ses nombreux avantages, nous citons :

- -L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté Pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités De récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine.
- 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.
- -La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de Synchronisme [11].

De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesse.

Dans la MADA, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator [11].

Ce convertisseur rotorique de haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement .

- -L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.
- -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 .
- -Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau.
- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissance.
- -La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6).
- -La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la vitesse nominale.
- -Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation.

II.7.2.Inconvénients de la MADA:

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

- -Elle est plus longue à causes des balais [12].
- -Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix. Pourtant certaines études prétendent le contraire [12].
- -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).

II.8.Modélisation de GADA:

II.8.1.Modèle triphasé de la génératrice :

La représentation schématique de la machine asynchrone dans l'espace électrique est donnée sur la Figure (2.6) :

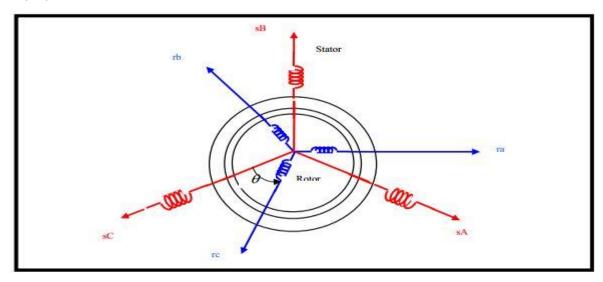


Figure 2.7 représentation schématique de la machine asynchrone dans l'espace électrique

Les équations des tensions des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques sont :

Equation statoriques:

$$V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{\Psi_{sa}}{dt} \tag{2.1}$$

$$V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{\Psi_{sb}}{dt} \tag{2.2}$$

$$V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{\Psi_{sc}}{dt} \tag{2.3}$$

> Equations rotorique :

$$V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{\Psi_{ra}}{dt} \tag{2.4}$$

$$V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{\Psi_{rb}}{dt} \tag{2.5}$$

$$V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{\Psi_{rc}}{dt} \tag{2.6}$$

> Equation magnétiques :

La relation entre flux et courant s'écrivent comme suit :

Pour le stator :

$$\psi_{sa} = L_s I_{sa} + M_s I_{sb} + M_s I_{sc} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc}$$
(2.7)

$$\psi_{sb} = L_s I_{sb} + M_s I_{sa} + M_s I_{sc} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc}$$
(2.8)

$$\psi_{sc} = L_s I_{sc} + M_s I_{sa} + M_s I_{sb} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc}$$
(2.9)

Pour le rotor :

$$\psi_{ra} = L_r I_{ra} + M_r I_{rb} + M_r I_{rc} + M_{sr} I_{sa} + M_{sr} I_{sb} + M_{sr} I_{sc}$$
(2.10)

$$\psi_{rb} = L_r I_{rb} + M_r I_{ra} + M_r I_{rc} + M_{sr} I_{sa} + M_{sr} I_{sb} + M_{sr} I_{sc}$$
(2.11)

$$\psi_{rc} = L_r I_{rc} + M_r I_{ra} + M_r I_{rb} + M_{sr} I_{sa} + M_{sr} I_{sb} + M_{sr} I_{sc}$$
(2.12)

Equation mécanique :

L'équation mécanique est donné par :

$$J\frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \tag{2.13}$$

Telle que:

C_{em} : Couple électromagnétique.

 C_r : Couple résistant.

f : Coefficient de frottement.

 $\boldsymbol{\Omega}$: vitesse angulaire.

J : Moment d'inertie.

II.8.2.Modèle de Park:

Les équations précédentes permettent la modélisation de la machine dans le plan (a b c). Elles peuvent être implantées dans un calculateur. Par contre, vu la complexité (36 termes pour l'énergie magnétique) de ces équations non linéaires et multi variable. Pour cela on utilise la transformation de Park qui permettra de rendre simple à les étudier.

La matrice $P(\theta)$ de Park est donné par :

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{2} \qquad \frac{1}{2} \qquad \frac{1}{2}$$
(2.14)

Son inverse $[P(\theta)]^{-1}$ est donné par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1\\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1\\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}$$
(2.15)

En appliquant ces transformations aux tensions ainsi qu'aux flux statoriques et rotoriques, nous obtenons le modèle électrique diphasé d'une machine asynchrone.

II.8.3.Choix de référentielle :

La transformation de Park nous permettra de passer d'un système triphasé abc vers un système diphasé alpha –beta puis vers le repère dq. Elle consiste à faire une transformation triphasé-diphasé suivie d'une rotation.

Pour étudier la théorie des processus transitoires des machines on utilise trois systèmes de Park qui sont des cas particuliers du système d'axes (d, q).

La machine asynchrone peut être modélisée dans un repère diphasé (d, q) par le Système d'équation suivant :

Equation électriques :

$$V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{\Psi_{sd}}{dt} - \omega_s \Psi_{sq}$$
 (2.16)

$$V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{\Psi_{sq}}{dt} + \omega_s \Psi_{sd}$$
 (2.17)

$$V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{\Psi_{rd}}{dt} - (\omega_{s} - \omega_r) \Psi_{rq}$$
(2.18)

$$V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{\Psi_{rq}}{dt} + (\omega_{s} - \omega_r) \Psi_{rd}$$
(2.19)

Equation magnétique :

$$\psi_{sd} = -L_s I_{sd} + M I_{rd} \tag{2.20}$$

$$\psi_{sq} = -L_s I_{sq} + M I_{rq} \tag{1.21}$$

$$\psi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \tag{2.22}$$

$$\psi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \tag{2.23}$$

Et après un simple calcul de produit matriciel, les tensions s'écrivent en forme d'équations d'état:

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \tag{2.24}$$

Sous forme matricielle:

• Pour le stator :

$$V_{s} = [R_{s}][I_{s}] + \frac{d}{dt}[\psi_{s}]$$
 (2.25)

• Pour le rotor :

$$V_r = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\psi_r]$$
 (2.26)

Equation de puissance et de couple :

Selon Park la puissance électrique statorique instantanée s'écrit :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left(V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \right) \tag{2.27}$$

Le couple électromagnétique développé par le champ tournant est :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \left(I_{qs} \psi_{ds} + I_{ds} \psi_{ds} \right) \tag{2.28}$$

En explicitant les flux statoriques et rotoriques en fonction des inductances, on vérifier que :

$$C_{mec} = \frac{3}{2}MP(I_{qs}I_{dr} - I_{ds}I_{qr})$$
(2.24)

Telle que:

 C_{mec} : Couple mécanique (N/m).

M : Induction mutuelle.

P : Nombres de pair de pole.

II.9. Simulation de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA) :

A l'aide de logiciel MATLAB, on va simuler la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement générateur. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park. (Plan (d, q)) lié au champ tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 5 KW.

Les figures ci dessous sont obtenus pour le modèle de MADA, entraînée à une vitesse fixe égale à 1600 tr/min, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence de 50Hz et d'amplitude $V = 220*\sqrt{2}$, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 22V et une fréquence égale à la fréquence rotorique

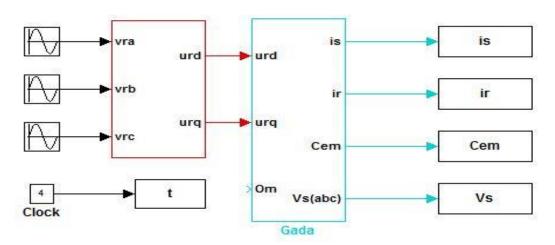


Figure 2.8 Bloc de simulation de la génératrice asynchrone double alimentation asynchrone

II.9.1.Résultat de Simulation et interprétations :

Avec les données suivantes :

Pn(puissance statoriques nominale) =5 kW; Ls(inductance statoriques) = 0.094H; Lr(inductance rotorique) = 0.088H; Rr(résistance rotorique) =1.8 Ω ; Rs(résistance statoriques) = 0.95 Ω ; M(mutuelle stator-rotor) = 0.082H; J(moment d'inertie) = 0.1s; p(nombre de pair de pôles) = 3; f=0.0067; ws(pulsation statoriques) = 2* *fs; fs(fréquence statoriques))=50 Hz.

> Les courant statoriques et rotorique :

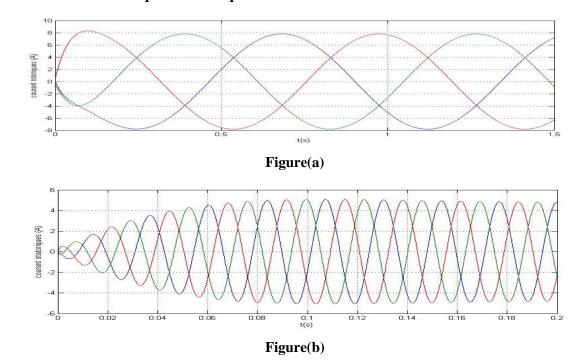


Figure 2.9 l'évolution des courant rotoriques et statorique.

> Les tensions statoriques :

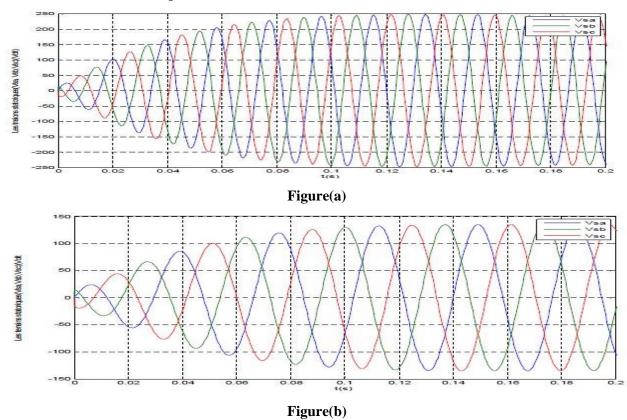


Figure 2.10 Evolution des tensions statoriques en fonction de la variation de la vitesse du rotor $(Fig(a): wr=300rd/s \text{ et } Fig(b): wr=160 \text{ rd/s}) \text{ avec}: Vr=15V \text{ et } R=100\Omega).$

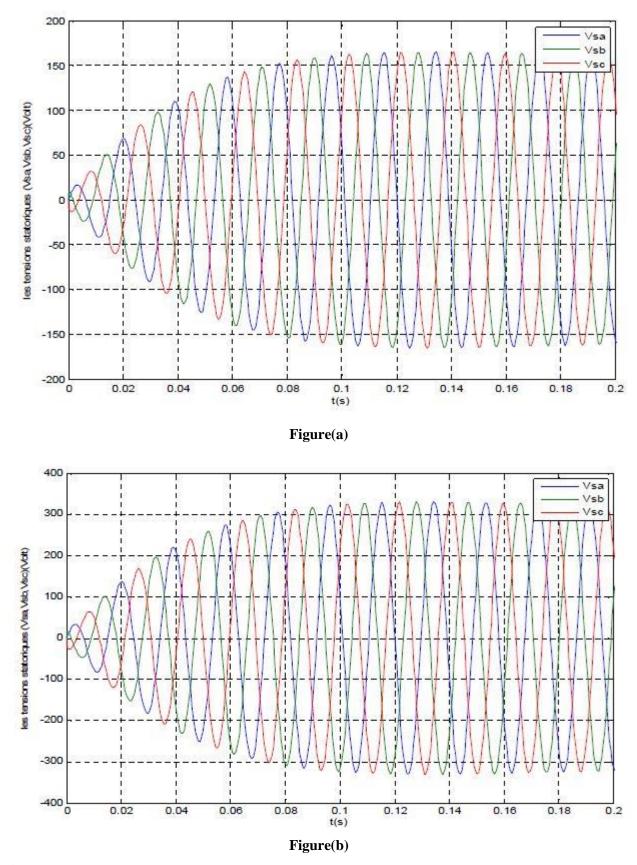


Figure 2.11 Evolution des tensions statoriques en fonction de la variation de l'amplitude et de la tension rotorique (Fig(a) : Vr=10V et Fig(b) : Vr=20 V) avec : wr=300V et $R=100\Omega$).

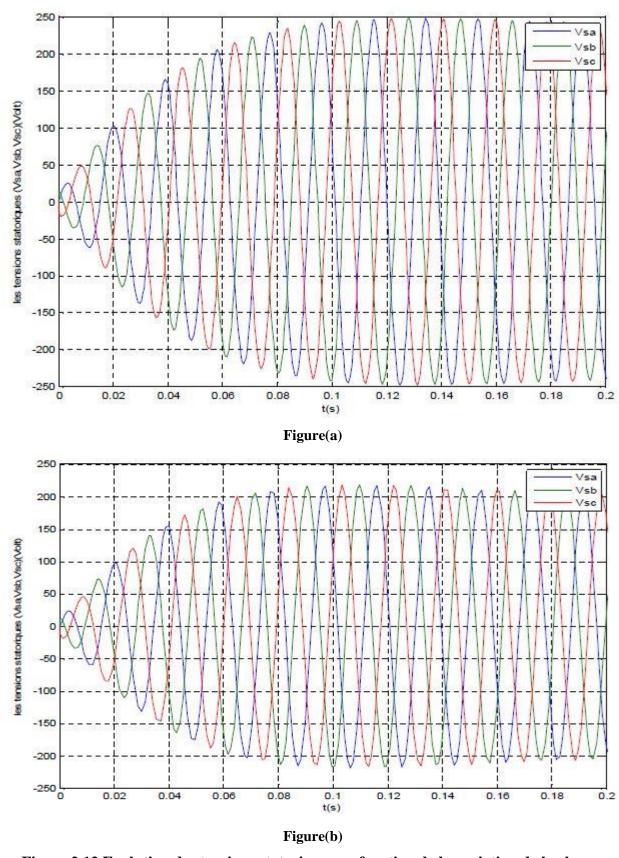


Figure 2.12 Evolution des tensions statoriques en fonction de la variation de la charge (Fig(a): $R=100~\Omega$ et Fig(b): $R=50~\Omega$) avec: Vr=15V et wr=300rd/s).

- La Figure 2.8 représente l'évolution des courants rotorique et statoriques en fonction du temps. Après un régime transitoire de duré de 0.08s la machine atteint son régime nominale avec les grandeurs suivantes Ir_max=8A, Is_max=4.5A.
- Figure 2.9 montre l'évolution des tensions statoriques en fonction de la variation de la vitesse du rotor on a fixé la tension rotorique Vr= 15 V et la charge R=100 Ohm on observe que la tension atteint le régime permanant a 0.08s, le changement de vitesse de rotation de 160rad/s a 300rad/s provoque une chute de tension et un changement de fréquence.
- Figure 2.10 montre l'évolution des tensions statoriques en fonction de la variation de l'amplitude on voit clairement que si on augmente la tension Vr la tension statorique augmente.
- Figure 2.11 montre l'évolution des tensions statoriques en fonction de la variation de la charge, la variation de la charge (R=100, R=50) on voit qu'il ya une chute de tension statorique et une fréquence constante.

II.10.Conclusion:

L'intérêt porté à la MADA ne cesse de croître pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certains applications industrielles.

Nous avons concentrez le long de ce chapitre sur le fonctionnement de la MADA en mode générateur alimentée par un onduleur de tension au rotor et le stator est connecté directement au réseau. Le chapitre suivant sera dédié à présenter la commande de cette machine (la machine est intégrée dans un système éolien à axe horizontal).

Chapitre 3:

Optimisation du rendement pour l'éolienne à axe horizontal basé sur la génératrice asynchrone

III.1 Introduction:

L'amélioration du rendement d'un système éolien nécessite l'utilisation d'un dispositif nommé MPPT et qui signifie maximisation de la puissance extraite. Les systèmes éoliens à axe horizontal et sont de puissances (grandeurs de sorties) variables car leurs grandeurs d'entrées sont variables, pour cela un algorithme d'MPPT qui suit la puissance maximale est indispensable.

Ce chapitre est dédié à l'implantation de l'MPPT pour un système éolien dans la plateforme Matlab. Pour ce faire, en premier lieu on décrira la commande adoptée pour la machine Asynchrone, on expliquera ensuite les MPPTs proposés et finalement une simulation sera exposée et interprétée.

III.2 La commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation :

La machine asynchrone, bien qu'il soit la machine le plus simple à fabriquer et la plus robuste, est cependant la machine la plus difficile à contrôler car la position du champ rotorique n'est pas connue (contrairement au cas du moteur synchrone pour lequel la position du champ rotorique est identique à celle du rotor)[5].

Le réglage de la vitesse des machines Asynchrones est donné par la formule :

$$\Omega_{mec} = \frac{2\pi f_s}{p} \left(1 - g \right) \tag{3.1}$$

- Variation de la vitesse via la variation de la fréquence primaire (statorique f_s)
- Variation de la vitesse via le changement du nombre de paire de pole
- Variation de la vitesse via la variation du glissement

La commande vectorielle, notée FOC (Field Oriented Control) consiste à rendre le comportement de la machine asynchrone identique à celui de la machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux rotorique. Par conséquent, les dynamiques du flux rotorique sont linéaires d'où l'utilisation d'un simple PI pour réguler le flux. Quand les dynamiques du flux rotorique ont atteint une consigne constante, la dynamique de la vitesse devient linéaire et peut être régulée par un PI classique, La commande à flux orienté permet de piloter la machine suivant deux axes : un axe pour le flux et un autre pour le couple. De nombreuses variantes basées sur ce principe d'orientation.

Généralement ces techniques se diffèrent selon :

- la source d'énergie : commande en tension ou en courant,
- l'orientation du repère (d, q) : suivant le flux statoriques ou rotorique ou d'entrefer,
- le contrôle du flux : direct par mesure ou indirect par observation

III.3.Commande vectorielle:

Dans cette méthode, on ne régule pas le flux rotorique et on a donc besoin ni de capteur ni d'estimateur ou d'observateur de flux. Si le flux rotorique réel n'est pas utilisé, sa position doit être connue pour effectuer les changements de coordonnées ; ceci exige la présence d'un capteur de position du rotor, L'orientation de flux est réalisée par la position déduite par intégration de la position d'autopilotage, il est déduit de la vitesse à partir du bloc de défluxage. Le bloc de défluxage permet l'exploitation optimale des capacités magnétiques de la machine, il permet un fonctionnement à couple constant si la vitesse est inférieure à la vitesse nominale. D'une part, ce bloc permet en autre d'affaiblir le flux inversement proportionnel à la vitesse, pour les fonctionnements à puissance constante lorsque la vitesse excède la vitesse nominale. Il est défini par la relation non linéaire suivante :

$$\begin{cases}
\Phi_{S-ref} = \Phi_{S-nom} & Si\omega \leq \omega_{nom} \\
\Phi_{S-ref} = \frac{\Phi_{S-nom}}{|\omega|} \omega_{nom} & Si\omega > \omega_{nom}
\end{cases}$$
(3.2)

Avec:

 ω_{nom} : la vitesse de rotation nominal.

 Φ_{S-nom} : le flux statorique nominal.

 Φ_{S-ref} : le flux statorique de référence.

La commande vectorielle vient régler ce problème de découplage des réglages du flux à l'intérieur de la machine de celle du couple. Il existe plusieurs types de contrôles vectoriels, nous n'aborderons dans ce chapitre que la commande vectorielle indirecte avec orientation du flux statorique. Mais d'abord le principe de la commande vectorielle. Nous avons vu que le couple s'exprime dans le repère dq comme un produit croisé de courant ou de flux. Si nous reprenons l'écriture de :

$$C_{em} = \frac{3}{2}P(I_{qs}\psi_{ds} + I_{ds}\psi_{qs})$$
(3.3)

On s'aperçoit que si l'on élimine le deuxième produit, alors le couple ressemblerait fort à celui d'une MCC. Il suffit, pour ce faire, d'orienter le repère dq de manière à annuler la composante de flux en quadrature. C'est-à-dire, de choisir convenablement l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe direct (d) et donc d'avoir $\Psi_{qs} = O$. Ainsi $\Psi_{ds} = \Psi_{s}$ uniquement.

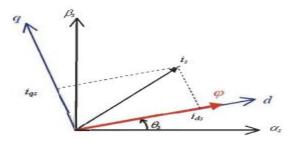


Figure 3.1 Principe de control vectoriel

L'equation de couple devient alors :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P(I_{qs} \psi_{ds}) \tag{3.4}$$

Dans l'hypothèse où le flux ψ_{ds} est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator), le choix du repère diphasé rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendante du courant rotorique d'axe q. Et pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans les éoliennes, on peut négliger la résistance statorique tout en considérant le flux statorique constant [2], [5].

Sous ces hypothèses ($R_s=0$ et $\psi_{ds}=\psi_s$) l'equation des tentions statoriques devient :

$$[V_{abcs}] = \frac{d}{dt} [\varphi_{abcs}] \tag{3.5}$$

On peut alors écrire que :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \varphi_s \omega_s \end{cases}$$
 (3.6)

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = 0 = -L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = -L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases}$$
 (3.7)

A partir de l'équation, nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases}
i_{ds} = -\frac{\varphi_s}{L_s} + \frac{M}{L_s} i_{dr} \\
i_{qs} = \frac{M}{L_s} i_{qr}
\end{cases}$$
(3.8)

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une

Machine asynchrone s'écrivent [2], [5] :

$$\begin{cases}
P = V_{ds}i_{ds} + V_{qs}i_{qs} \\
Q = V_{qs}i_{ds} + V_{ds}i_{qs}
\end{cases}$$
(3.9)

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas (Vds = 0) donne:

$$\begin{cases}
P = V_{qs}i_{qs} \\
Q = V_{qs}i_{ds}
\end{cases}$$
(3.10)

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (5.27) dans l'équation (5.29) nous obtenons les expressions suivantes :

$$\begin{cases}
P = V_{qs} \frac{M}{L_s} i_{qr} \\
Q = V_{qs} \left(-\frac{\varphi_s}{L_s} + \frac{M}{L_s} i_{dr} \right)
\end{cases}$$
(3.11)

On pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques:

$$\begin{cases} V_{dr} = R_{r}i_{dr} + \left(L_{r} - \frac{M^{2}}{L_{s}}\right)\frac{di_{dr}}{dt} - g\omega_{s}\left(L_{r} - \frac{M^{2}}{L_{r}}\right)i_{qr} \\ V_{qr} = R_{r}i_{qr} + \left(L_{r} - \frac{M^{2}}{L_{s}}\right)\frac{di_{qr}}{dt} + g\omega_{s}\left(L_{r} - \frac{M^{2}}{L_{r}}\right)i_{dr} + g\omega_{s}\left(L_{r} - \frac{M^{2}}{L_{r}}\right) \end{cases}$$
(3.12)

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

A partir des équations on obtient le schéma bloc ci-dessous de la GADA à réguler.

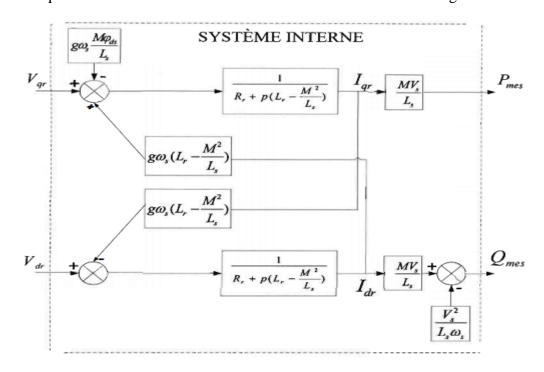


Figure 3.2 Schéma-bloc de la GADA à réguler.

III.3.1.Commande vectorielle directe en puissances active et réactive de la GADA :

Pour simplifier la commande de la MADA, nous considérons que la tension du réseau est stable, ce qui nous permet d'utiliser une seule boucle de régulation sur chaque axe avec un régulateur indépendant. Toutefois nous allons négliger les termes de couplage entre les deux axes, qui apparaît dans la Figure 5.4 à cause du faible glissement et l'influence des termes de couplage entre les deux axes en $\left(L_r - \frac{M^2}{L_r}\right)$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs permettra de les compenser [2], [5].

Par contre le terme $g\omega_s\left(L_r-\frac{M^2}{L_r}\right)$ n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage, vu qu'elle représente la force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

Nous allons utiliser les régulateurs Pl (Proportionnel-Intégral) en raison de leur performance et de leur rapidité de calcul et sa fonction de transfert est de la forme:

$$F_T = \frac{1 + PT_n}{PT_i}$$

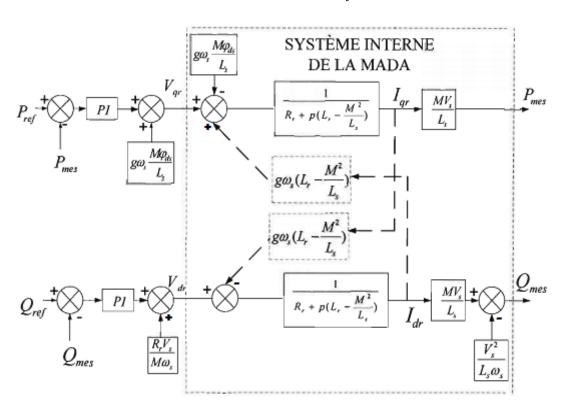


Figure 3.3 commande vectorielle avec un seul régulateur

III.3.2. Régulateur (PI) :

Le schéma ci-dessous montre la boucle de régulation du système corrigé par le PI, Ki et Kp représentent respectivement la constante du régulateur.

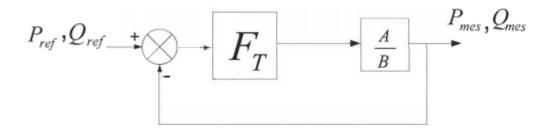


Figure 3.4 boucle de régulation par PI

Les valeurs A at B sont A= MV_s et B= $R_rL_s + PL_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_r}\right)$.

La fonction de transfert en boucle ouverte du système est donc :

$$F_{TBO} = \frac{1 + PK_p}{PK_i} \frac{\frac{MV_s}{R_r L_s}}{1 + P\frac{\left(L_r - \frac{M^2}{L_r}\right)}{R_{rr}}}$$
(3.13)

Par la méthode de compensation des pôles on trouve:

$$K_p = \frac{\left(L_r - \frac{M^2}{L_r}\right)}{R_r} \tag{3.14}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte devient alors:

$$F_{TBO} = \frac{\frac{MV_S}{R_T L_S}}{PK_i} \tag{3.15}$$

En boucle fermée, on obtient la fonction de transfert suivante:

$$F_{TBF} = \frac{F_{TBO}}{1 + F_{TBO}} = \frac{1}{1 + \tau_p} \tag{3.16}$$

Avec
$$\tau = \frac{K_i R_r L_s}{M V_s}$$

 τ est le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10 ms, alors la constante de d'intégration K_i egale :

$$K_i = \frac{\tau M V_S}{R_r L_S} \tag{3.17}$$

Les figures ci dessous sont obtenues pour les données suivantes :

Pn(puissance statoriques nominale) =5kW; ls(inductance statorique) = 0.094H; lr(inductance rotorique) = 0.088H; rr(résistance rotorique) =1.8 Ω ; rs(résistance statorique) = 0.95 Ω ; m(mutuelle stator-rotor) = 0.082H; J(moment d'inertie) = 0.1 ;p(nombre de pair de pôles) = 3; f=0.0067; ws(pulsation statorique) = $2*\pi*fs$; fs(fréquence statorique))=50 Hz.(a)

Le premier essai consiste à réaliser des échelons de puissance active et réactive alors que la machine est entraînée à vitesse fixe (A t=5s la vitesse passe brusquement de 980 tr/min à 1500 tr/min), pour le deuxième essai la machine est entraînée a vitesse variable.

Les Figures (3.5) et (3.6) représentent respectivement le profile des puissances (Active et Réactive) de référence.

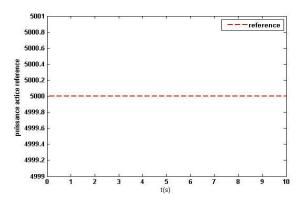


Figure (3.5) profile de trajectoire de la puissance active de référence

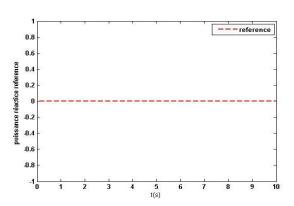
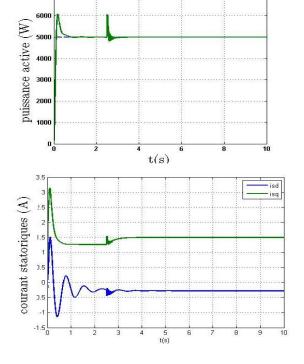
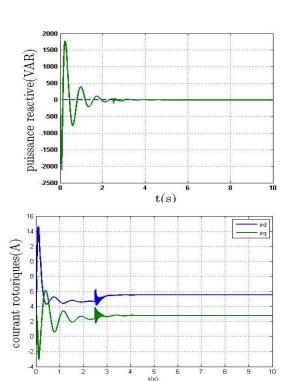


Figure (3.6) profile de trajectoire de la puissance réactive de référence

III.4.résultat et interprétation :





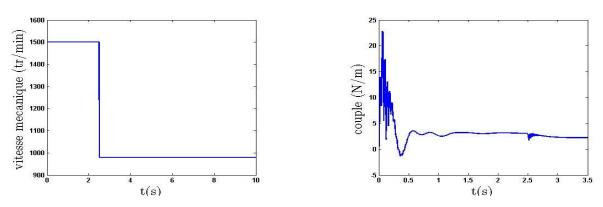


Figure (3.7) Réglage des puissances de la GADA par la commande Vectorielle directe avec une vitesse fixe.

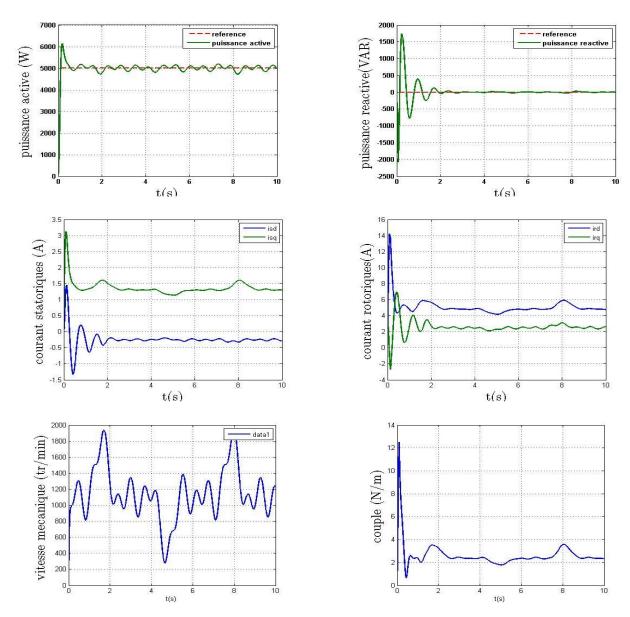


Figure (3.8) Réglage des puissances de la GADA par la commande Vectorielle directe avec une vitesse variable.

La stratégie de la commande directe des puissances active et réactive statoriques a été implémentée dans l'environnement Matlab/Simulink afin d'évaluer et de tester le système complet pour un fonctionnement à vitesse constante ou variable.

Dans ce cas nous avons des dynamiques appropriées pour les puissances actives et réactives de référence afin de tester le découplage de ces puissances dans les deux cas de fonctionnement à vitesse variable et constante. Nous pouvons constater que le couple électromagnétique dépend directement de la puissance active et ceci traduit par sa forme identique de celle de la puissance active. Dans ce cas, nous pouvons conclure que la puissance active est une conséquence du couple électromagnétique; alors que la puissance réactive est une conséquence de l'excitation du circuit rotorique, D'après les résultats obtenus, nous constatons que la commande directe utilisant des correcteurs PI présente un bon découplage au réglage des puissances active et réactive au niveau du stator et une bonne poursuite à leurs valeurs de références imposées dans le cas d'un entraînement à vitesse constante de la GADA ,Cependant, cette méthode est moins performante pour un fonctionnement à vitesse variable et ceci dû à la présence de certaines perturbations aux niveaux des puissances active et réactive. Ainsi qu'au niveau du couple à l'instant de variation de la vitesse d'entraînement et par conséquent cette méthode de contrôle est moins rependue dans les applications à vitesse variable.

$\underline{\mathbf{III.6}: \mathbf{D\acute{e}finition}\ et\ \mathbf{principe}\ \mathbf{de}\ \mathbf{fonctionnement}\ \mathbf{du}\ \mathbf{syst\grave{e}me}\ \acute{e}olien\ \grave{a}\ \mathbf{vitesse}\ \mathbf{variable}\ \mathbf{:}}$

III.6.1 : Principe:

Le système éolien à vitesse variable est un système apte à travailler pour des vitesses égales ou différentes de la vitesse nominale (optimal) à l'aide du sous système MPPT, et cela pour produire la puissance max [20]. L'MPPT peut être définie comme étant un algorithme [Ada.M] ou un système [20] capable d'aider le système éolien à axe horizontal à vitesse variable pour extraire le maximum de puissance électrique à partir de l'énergie cinétique du vent disponible.

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la Figure 2.1. Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée $\lambda_{opt} = \lambda_{Cpmax}$ et C_p donné nommé C_{pmax} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par La caractéristique correspondant à cette relation donnée sur la zone II de la figure (3.9). La zone I correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est

limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts. La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau. Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. L'onduleur coté réseau est alors découplé de la machine via le bus continu et il n'y a pas de lien direct entre la fréquence du réseau et celle délivrée par la machine. Un tel dispositif doit cependant être conçu et commandé de façon à limiter les perturbations qu'il est susceptible de générer sur le réseau. En effet, la tension délivrée n'est pas sinusoïdale et peut contenir des harmoniques indésirables. De plus, les convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance échangée entre la génératrice et le réseau, ils représentent par conséquent un investissement financier et conduisent à des pertes non négligeables[15].

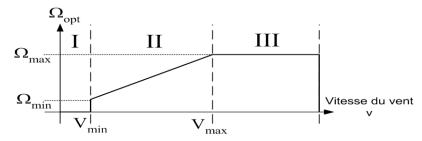


Figure 3.9 Diagramme de la vitesse angulaire sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire, Pour chaque vitesse de vent, il faut que le système trouve la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale qui correspond aussi à un couple de charge strictement défini. Le schéma de la figure (2.1) donne les courbes caractéristiques de la voilure éolienne de type Savonius dans le plan puissance-vitesse de rotation de la voilure. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse du vent V donnée. Cette famille des courbes est obtenue directement à partir de la caractéristique C_p de la voilure. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale de forme cubique. Idéalement, cette courbe doit être suivie à tout moment du fonctionnement du système éolien. Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique doit être utilisée.

III.6.2 : Les différents types d'MPPT éoliens:

La puissance capturée par la turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient C_p. Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice. L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la

vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. Pour cela, on peut distinguer deux approches (types) possibles :

- La première, la moins classique, considère que la caractéristique C_p n'est pas connue ;
- La seconde façon d'agir, plus répandue, suppose que cette caractéristique de voilure est connue. Il suffit de suivre la courbe de puissance optimale comme caractéristique de charge pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales

III.6.2.1. Maximisation de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure:

Pour l'étude de la commande permettant d'effectuer une recherche du point maximal de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique C_p, une structure avec redresseur MLI triphasé peut être utilisée. Cette structure assure un contrôle dynamique en vitesse ou en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation et ainsi d'effectuer par ce biais une recherche de la puissance maximale souhaitée. En l'absence de toute connaissance des caractéristiques de voilure, des algorithmes de comportement sont à tenir afin de converger vers le point optimal. Ces algorithmes dépendent des variations de puissance ΔP et de vitesse $\Delta \Omega$. Par exemple : si on mesure une augmentation de puissance ($\Delta P > 0$) suite à un incrément positif de vitesse, on dois continuer à accélérer la voilure ($\Delta\Omega_{ref} > 0$). On se situe alors sur la partie gauche de la cloche $P(\Omega)$ (figure 2.1). L'utilisation d'un dispositif MPPT (Maximum Power Point Tracking) basé sur le principe des ensembles flous peut être réalisable [19]. Il existe aussi d'autres structures, comme celle basée sur la machine asynchrone à cage, pilotée par le stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques [19], et celle basée sur la machine asynchrone à rotor bobiné ou la vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissances situés au circuit rotorique [21].

III.6.2.2.Maximisation de la puissance avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure:

Une autre façon de procéder consiste en une pseudo recherche du point maximal de puissance en connaissant la courbe caractéristique de la voilure éolienne à piloter. Ces méthodes permettent de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples, internes au convertisseur mécano-électrique, c'est-à-dire sans obligation de capture de la vitesse du vent. Cette façon de

procéder exige au constructeur de la voilure des essais de caractérisation (extérieur, soufflerie) ou des simulations du profil de pales.

III.6.2.3. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse :

Si on suppose que la génératrice est idéale, donc quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique C_{em} développé est à tout instant égal à sa valeur de référence C_{em-ref} , (c-à-d: $C_{em} = C_{em-ref}$). Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine}$ qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. La vitesse de la génératrice Ω égale à $\Omega_{turbine}$ (pas de multiplicateur) est influencée par l'application de trois couples : le couple éolien C_g , le couple électromagnétique C_{em} et le couple résistant C_r . En regroupant l'action de ces trois couples on peut écrire [Sal.E] :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{I} \cdot (C_g - C_{em} - C_r) \tag{3.20}$$

avec, J: l'inertie de la turbine plus l'inertie de la génératrice.

Cette structure de commande (figure 2.8) consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine C_{aer} de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, l'utilisation d'un asservissement de la vitesse est indispensable. Alors le couple électromagnétique de référence C_{em-ref} permettant d'obtenir une vitesse mécanique égale à la vitesse de référence Ω_{ref} est basé sur la relation suivante [22]:

$$C_{em-ref} = K_{reg} \cdot (\Omega_{ref} - \Omega)$$
 (3.21)

K_{reg}: le régulateur de vitesse (il peut être PI ou à avance de phase....etc.).

Cette vitesse de référence Ω_{ref} dépend de la vitesse de la turbine à fixer $\Omega_{turbine}$ pour maximiser la puissance extraite. La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle de la valeur optimale du ratio de vitesse λ_{Cpmax} (β constant) permettant d'obtenir la valeur maximale du C_p . Alors on peut écrire :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{Cp \max} . V}{R} \tag{3.22}$$

III.6.2.4. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse :

Cette seconde structure de commande (figure 2.9) repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine [22] :

$$J.\frac{d\Omega}{dt} = C_g - C_{em} - C_r = 0 = C_{mec}$$
 (3.23)

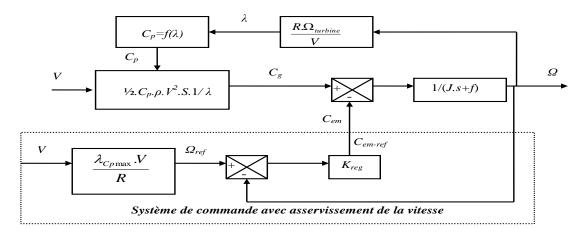


Figure 3.10 MPPT avec asservissement de la vitesse.

Une mesure précise de la vitesse du vent est pratiquement difficile. Ceci pour deux causes :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine [5], ce qui errone la lecture de la vitesse du vent;
- Le diamètre de la surface balayé par les pales étant important.

Selon L'équation (2.16), le couple mécanique C_{mec} est nul. Donc, si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux ($C_r \cong 0$), on obtient :

$$C_{mec} = C_g \tag{3.24}$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien :

$$C_{em-ref} = C_{aer-estim\acute{e}} \tag{3.25}$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique en utilisant l'équation :

$$C_{aer-estim\acute{e}} = C_p \cdot \frac{\rho.S.V_{estim\acute{e}}^3}{2.\Omega_{turbing-estim\acute{e}}}$$
(3.26)

L'estimation de $\Omega_{turbine}$ vient de la mesure de la vitesse mécanique Ω : $\Omega_{turbine-estimé} = \Omega$

La vitesse du vent estimée peut être donnée par l'équation suivante :

$$V_{estim\acute{e}} = \frac{\Omega_{turbine-estim\acute{e}}.R}{\lambda}$$
 (3.27)

En se basant sur les équations précédentes, on peut alors écrire :

$$C_{em-ref} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot \Omega^2 \cdot \pi \cdot R^3}{2 \lambda^3}$$
 (3.28)

Pour extraire le maximum de puissance, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur λ_{Cpmax} qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax} . Le couple électromagnétique doit être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{p \max} . \rho . \Omega^2 . \pi . R^3}{2 . \lambda_{C_{p \max}}^3}$$
(3.29)

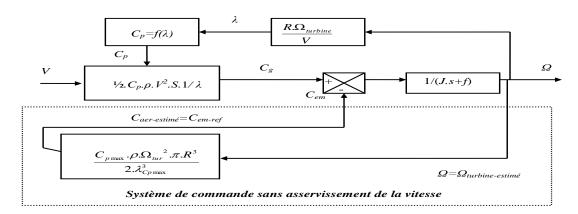


Figure 3.11 MPPT sans asservissement de la vitesse.

III.7 : Simulation et interprétation :

Dans cette partie on a ajouté le modèle de l'éolienne au système. Et on va simuler en trois modes déférents, la première partie avec une vitesse de vent fixe deuxièmement avec une vitesse de vent variable, la troisième expérience on a utilisé la commande MPPT sans asservissement de la vitesse (figure 3.11) avec deux vitesse de vent fixe.

Les figures ci dessous sont obtenues pour les données suivantes : un profil de vent fixe et un coefficient de puissance maximale et ratio de vitesse maximale pour chaque vitesse de vent.

A t=3s la vitesse passe brusquement de 8m/s a 12m/s les résultats de simulation sont montrés sur les figures suivants :

Vitesse de vent (m/s)	8	12
Cp(coefficient de puissance) (%)	40	49

Tableau 3.1 variation de Cp en fonction de vitesse de vent

> Premier test :

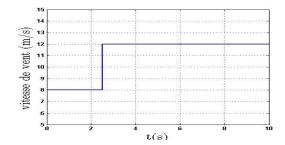


Figure 3.12 profil de vent Appliqué (m/s)

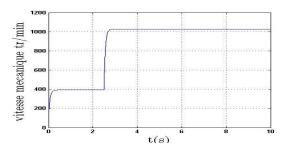


figure 3.13 vitesse mécanique (tr/min)

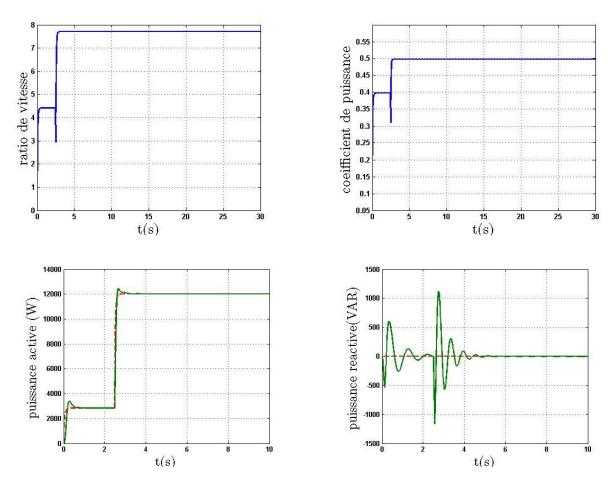


Figure 3.14 résultat de simulation sans MPPT avec vitesse de vent fixe.

> Deuxième test :

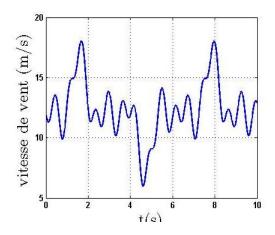


Figure 3.15 profil de vent Appliqué (m/s)

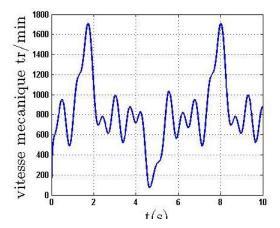


figure 3.16 vitesse mécanique (tr/min)

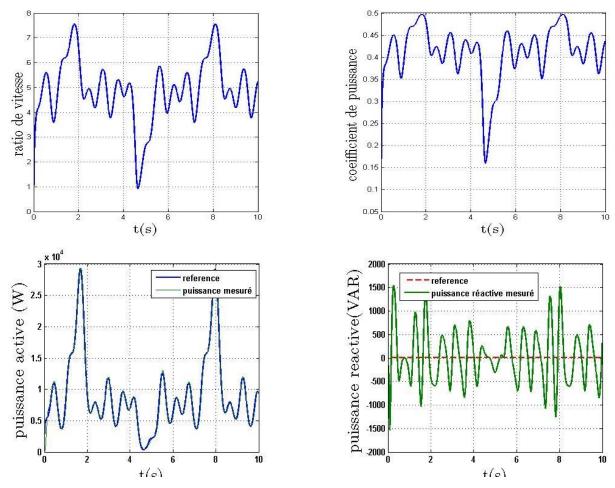


Figure 3.17 résultat de simulation sans MPPT avec vitesse de vent variable.

> Troisième test:

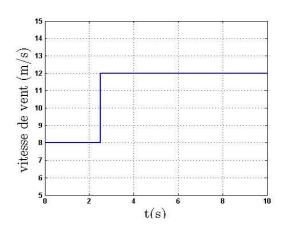


Figure 3.16 profil de vent Appliqué (m/s)

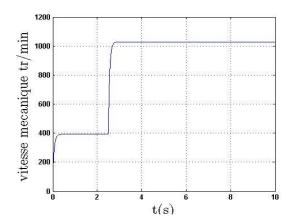


figure 3.17 vitesse mécanique (tr/min)

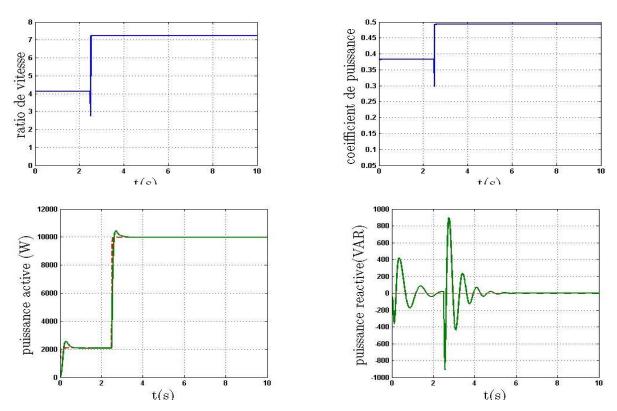


Figure 3.18 résultat de simulation MPPT sans asservissement de la vitesse. (vitesse de vent fixe)

Cet essai nous permet de vérifier dans quelle mesure les puissances mesurées restent à leur valeur de consigne lorsque la vitesse de rotation de la machine varie brusquement.

III.8: Conclusion:

Dans ce chapitre, une mise en œuvre pratique sur la plateforme Matlab de l'MPPT par une hybridation Machine -convertisseur a permis de statuer sur la manière dont les deux systèmes devraient être connectés. Les résultats obtenus sur simulateurs éolien avec des données copiant la réalité (vent) approuvent bien l'efficacité de telles approches.

CONCLUSION GENERALE

LE TRAVAIL ACCOMPLI

L'objectif préalablement défini de ce travail consistait à la modélisation et la commande des génératrices asynchrones utilisées dans l'éolien. A la lumière de l'étude effectuée, nous avons vu les étapes successives permettons d'élaborer une stratégie de commande pour une génératrice asynchrone jusqu'à sa mise en œuvre.

Dans le contexte des énergies renouvelables, un état de l'art de la génératrice éolienne est présenté dans le premier chapitre, on rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et les différents types d'éoliennes avec les machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie. Ce qui nous a amené à choisir la machine asynchrone à double alimentation.

Dans le deuxième chapitre la MADA a été modélisées et simulées dans les différents régimes de fonctionnement que soit linéaire ou de saturation (cas réel).

Pour finaliser ce travail on à plusieurs techniques de commande de la génératrice asynchrone, on a choisis la commande vectorielle à flux rotorique orienté, les de simulation résultats obtenus dans plusieurs travaux cités dans la bibliographie ce qui nous encouragera au Future de compléter la chaîne éolienne par la simulation de la partie réseau.

Bibliographie

- [1] : http://www.éolienne, « Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre » Article de Scientific American sur l'invention de Brush (1890).
- [2]: Adam MIRECKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse avril 2005.
- [3]: J.F. Manwell, J.G. McGowan and A.L. Rogers, « Wind Energy Explained: Theory, Design and Application », University of Massachusetts, Amherst, USA 2002.
- [4] : H.Fatmaoui, « Eléments de base de l'aérodynamique des pâles d'éoliennes » Université Ibn Zohr Faculté des sciences, Maroc.
- [5]: S. NOUHOU, Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne, Thèse (2007), École Nationale Polytechnique, Algérie.
- [6]: O. Gergaud, Modélisation Energétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et Associé a un Accumulateur, Thèse de Doctorat de L'école Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [7] :B. Beltran, Maximisation de la puissance produite parune génératrice asynchrone double alimentation d'une éolienne par mode glissant d'ordre supérieur, Actes de JCGE'08 Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie.
- [8]:Medjber, A. Moualdia, A. Mellit, M.A. Guessoum, Commande Vectorielle Indirecte d'un Générateur Asynchrone Double Alimenté Appliqué dans un Système de Conversion Eolien, (Manuscript received August 18, 2012, Electrique), Lyon, Décembre, 2008.
- [9] :H. Amimeur, « Contribution au contrôle de la machine asynchrone double étoile ». Thèse doctorat, Université de Batna, Alger, 27/06/2012.
- [10]: A. Dendouga, « Contrôle des puissances active et réactive de la machine a double alimentation (DFIM) ». Thèse doctorat, Université de Batna, Alger, Le 10/02/2010.

- [11] :B. Boukhezzar, « Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes a vitesse variable ». Thèse de doctorat, université paris XI 2006.
- [12] : Sejir KHOJET EL KHIL, « Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA) ». Thèse doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse 2006.
- [13] : Sejir KHOJET EL KHIL, « Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA) ». Thèse doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse 2006.
- [14]:Chondrogiannis S, Bames M. Stability of doubly-fed induction generator under stator voltage orientated vector control. IET Renewable Power Generation, 2008.
- [15]:Mode ling and Control Structures for Variable Speed. Wind Turbine. Salma EL AIMANI. Ibn Zohr University. Ploydisciplinary Faculty of Ouarzazate. (April 2011).
- [16] :Thèse R .BAÏLE «Analyse et modélisation multifractales de vitesses de vent. Application à la prévision de la ressource éolienne.» université de Corse le 18 Octobre 20 10.