

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



Centre Universitaire d'EL-Oued
Institut des Sciences et de Technologies



Mémoire de Fin d'Etude
Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Contrôle et Diagnostic des Systèmes Électriques

Thème

Modélisation de Générateur
Asynchrone a Double Alimentation Pour la
production de l'énergie éolienne

D'ériger par:
Serhoud Hicham

Réaliser par:
Cherif Khayreddine
Zobeidi med sabri

Soutenu le 10 Juin 2012

Remerciements

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Mr. Serhoud Hicham pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de département d'Electrotechnique qui a contribué à notre formation par ailleurs, Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

À mes très chères frère et à ma grande famille.

À tous mes amis.

À tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

À vous.

Cherif et sabri.

Résumé

Ce travail présente l'étude et modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) dans le domaine de production de l'énergie électrique à vitesse variable. Après une présentation de l'état de l'art de l'énergie éolienne nous avons développée un modèle simplifié de la turbine avec sa commande .

Afin d'atteindre le point de fonctionnement à puissance produite maximale (MPPT), une commande vectorielle en puissance active et réactive statorique a été élaborée.

La dernière partie de ce mémoire a pour objectif de la simulation à fin de tester la robustesse de la commande utilisée au niveau du système complet .

Mots Clés: génératrice asynchrone à double alimentation, commande vectorielle, Modélisation, turbine.

Notations et symboles

V_{vent}	La vitesse du vent nominale de l'aérogénérateur.
V	La vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur.
F	Force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable.
ρ	Masse volumique de l'air.
R	Rayon de la surface balayée par la turbine.
P_{aero}	La puissance absorbée par l'aérogénérateur.
C_p	Le coefficient de puissance.
C_{p_max}	Le coefficient de puissance maximal de la turbine.
λ	La vitesse relative de l'éolienne.
λ_{opt}	La vitesse relative optimale de l'éolienne.
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de rotation de la turbine.
Ω_{mec}	Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.
Ω_{opt}	Vitesse de rotation optimale de l'arbre du générateur.
G	Gain du multiplicateur.
C_g	Couple résistant issue du multiplicateur.
C_{aer}	Couple aérodynamique de l'éolienne.
C_{vis}	Couple des frottements visqueux.
f	Coefficient des frottements visqueux de l'éolienne et de sa génératrice.
J	Inertie totale de l'arbre.
$J_{turbine}$	Inertie de la turbine.
f_r	Fréquence rotoriques.
g	Glissement.
P_{mec}	Puissance mécanique disponible au niveau de l'arbre de la machine.
MADA	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
MLI	Modulation de largeur d'impulsion.
s, r	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
d	Indice de l'axe direct.
q	Indice de l'axe en quadrature.

$[V_s]$	Vecteur tension statorique.
$[I_s]$	Vecteur courant statorique.
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique.
$[\Phi_s]$	Vecteur flux statorique.
$[\Phi_r]$	Vecteur flux rotorique.
$[R_s]$	Matrice résistance statorique.
$[R_r]$	Matrice résistance rotorique.
$[L_{ss}]$	Matrice inductance statorique.
$[L_{rr}]$	Matrice inductance rotorique.
$[M_{sr}] :$	Matrice inductance mutuelle stator-rotor.
p	Nombre de paires de pôles.
θ_s	L'angle électrique entre l'axe a_s et l'axe d.
θ_r	L'angle électrique entre l'axe a_r et l'axe d.
θ	La position angulaire du rotor par rapport au stator.
ω_s	Pulsation électrique statorique.
ω_r	Vitesse angulaire de rotation.
Ω	Vitesse de rotation mécanique.
C_{em}	Couple électromagnétique.
R_s	Résistance statorique.
R_r	Résistance rotorique
l_s	Inductance propre d'une phase statorique.
l_r	Inductance propre d'une phase rotorique.
M_s	Inductance mutuelle entre deux phase statorique.
M_r	Inductance mutuelle entre deux phase rotorique.
M_{sr}	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe a_s coïncide avec l'axe a_r .
L_s	Inductance cyclique statorique.
L_r	Inductance cyclique rotorique.
L_m	Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor.
P	Puissance active statorique.
Q	Puissance réactive statorique.
K_p	Coefficient de l'action proportionnelle du régulateur.
K_i	Coefficient de l'action intégrale du régulateur.
τ_r	Constante de temps du régulateur.

V_a, V_b, V_c	Tensions simples statoriques.
U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}	Tensions composées statoriques.
S_a, S_b, S_c	Etat des commutateurs de puissance.
V_{dc}	Tension continu.
f_p	Fréquence de la porteuse.
U_p	Amplitude de la porteuse.
i_{red}	Courant redressé.
V_{res}	Tension simple du réseau.
V_{ond}	Tension simple à la sortie de l'onduleur.
P_{ond}	Puissance transitée par l'onduleur.
P_{red}	Puissance transitée par le redresseur.
I_{ond}	Courant dans le bus continu généré par l'onduleur.
I_{red}	Courant dans le bus continu généré par le redresseur.
P_c	Puissance emmagasinée par le condensateur.
S	la surface circulaire balayée par la turbine [m ²]
v	la vitesse du vent [m/s]
ρ	la densité de l'air

SOMMAIRE

No table of contents entries found.....

Introduction générale

Dans ce mémoire nous allons traiter la modélisation et la commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA. Les modèles aérodynamique, mécanique et électrique de la chaîne de conversion électromécanique sont présentés et examinés.

Dans cette étude sur une chaîne de conversion éolienne on a choisi la machine asynchrone à double alimentation GADA. Cette machine peut être fonctionnée à vitesse variable, donc possibilité de fournir de l'énergie quelque soit la vitesse de vent.

Donc ce travail est structuré en trois chapitres, ces derniers sont énoncés de la manière suivante :

Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur les énergies éoliennes, les éléments constitutifs ainsi que l'intérêt de la MADA dans la conversion électromécanique.

Dans le second chapitre, une modélisation de la MADA sera présentée. Celle-ci sera suivie par l'établissement de la stratégie de commande qui permettra à la machine d'avoir un fonctionnement à vitesse variable. Ceci est possible à travers la mise en place de la double alimentation. Une alimentation constante au niveau du stator, une autre de tension et fréquence variables au niveau du rotor. Cette stratégie consiste en la commande vectorielle qui permet de contrôler indépendamment les puissances active et réactive.

Dans le troisième chapitre, qui représentera la partie principale de cette étude, on envisage de traiter (étude et simulation) toute la chaîne de conversion éolienne : turbine, la génératrice, et le convertisseur. Le convertisseur utilisé sera commandé en utilisant la technique de Modulation de Largeur d'Impulsions MLI. Ainsi, les résultats de simulation seront présentés et interprétés.



CHAPITRE 1

LES ENERGIES EOLIENNE A

VITESSE VARIABLE

Chapitre I. les énergies éolienne à vitesse variable

1. Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter:

- un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation et au contrôle de la turbine éolienne.

Dans un premier temps, les différentes parties constituant une éolienne sont d'écrites d'une façon générale. L'éolienne à vitesse variable est une technologie qui se développe de plus en plus, pour être intégrée dans les réseaux de moyenne tension. Différentes stratégies de commande seront d'écrites. Ces dernières sont différentes selon le point de fonctionnement fixé par la caractéristique puissance/vitesse. Ensuite, différentes techniques permettant de maximiser l'extraction de la puissance éolienne sont présentées.

La dernière partie de ce chapitre illustre les principales méthodes permettant de contrôler la puissance aérodynamique recueillie par la turbine.

2. Description de l'éolienne

La turbine éolienne est munie de pales fixes ou orientables et tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 tr/min. Plus le nombre de pales est grand plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité. En effet, lorsque la pale supérieure atteint le point le plus extrême, elle capte la puissance maximale du vent. A ce moment, la pale inférieure traverse la zone abritée du vent par la tour. Cette disposition tend à faire fléchir l'ensemble de la turbine vers l'arrière. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales.

Lorsque des pales fixes sont utilisées, un dispositif de freinage aérodynamique est utilisé permettant de dégrader le rendement de la turbine au delà d'une certaine vitesse (décrochage aérodynamique ou Stall control). Sinon, un mécanisme d'orientation des pâles permet la régulation de la puissance et un freinage (réglage aérodynamique).

Un arbre dit "lent" relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

Un multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné à environ 1500 tr/min). Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.

Les signaux électroniques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de contrôle l'éolienne pour démarrer lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5 m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne lorsque la vitesse du vent est supérieure à 25m/s a fin d'assurer la protection de l'éolienne. [1]

3. Principales composantes des éoliennes à axe horizontal

L'éolienne à axe horizontale (Figure 1.1), étant le sujet de notre étude, sera décrite en citant ses différents composants, En générale, l'éolienne à axe horizontale est constituée de trois éléments principaux ; La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu.

- La tour : C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.
- La nacelle : Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique (figure 1.1). Elle comprend les éléments suivants :
 - Arbre.
 - Multiplicateur.
 - Roulements.
 - Le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
 - Le générateur qui est dans le cas de cet exposé une MADA.
 - Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent).

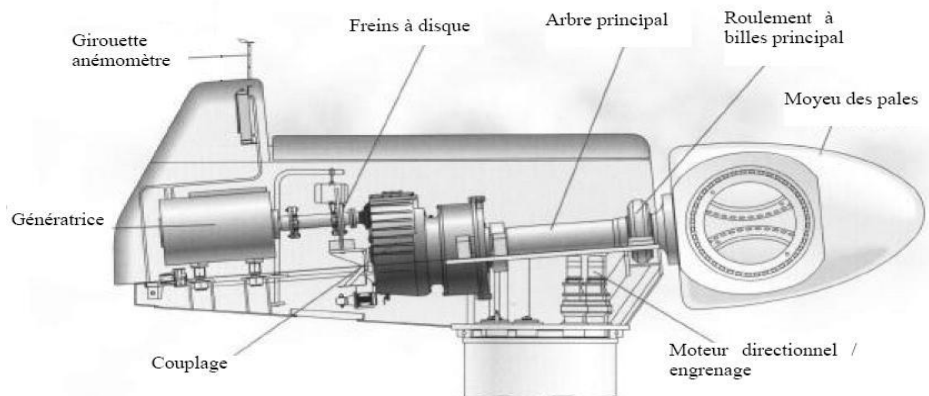


Figure 1.1 – Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.

- Les pales : Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre

constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.

- Le moyeu : C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent. [11]

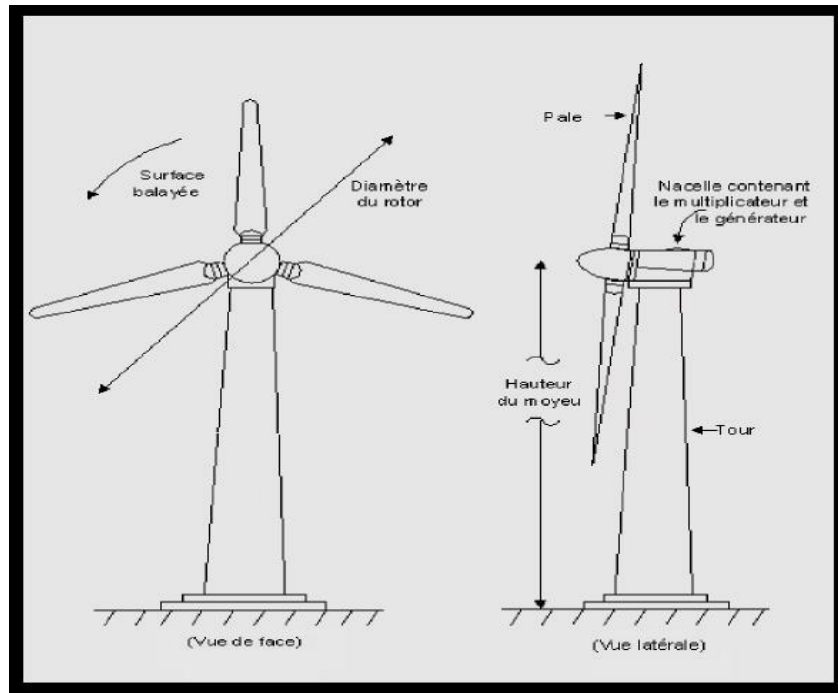


Figure 1.2– Principales composantes de l'éolienne à axe horizontale.

4. Les éoliennes à vitesse variable

La configuration de la figure 1-3 est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné (MADA). La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique

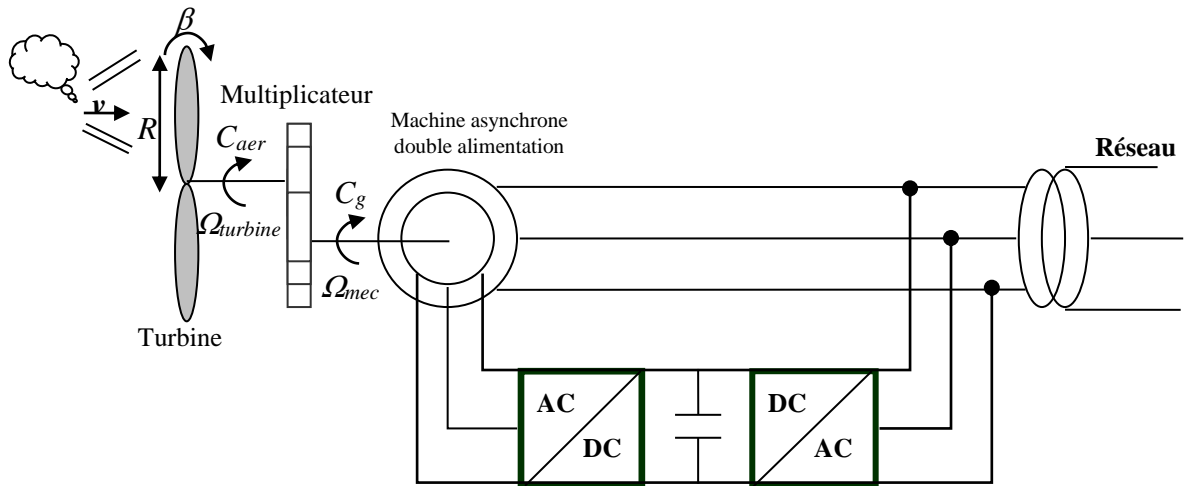
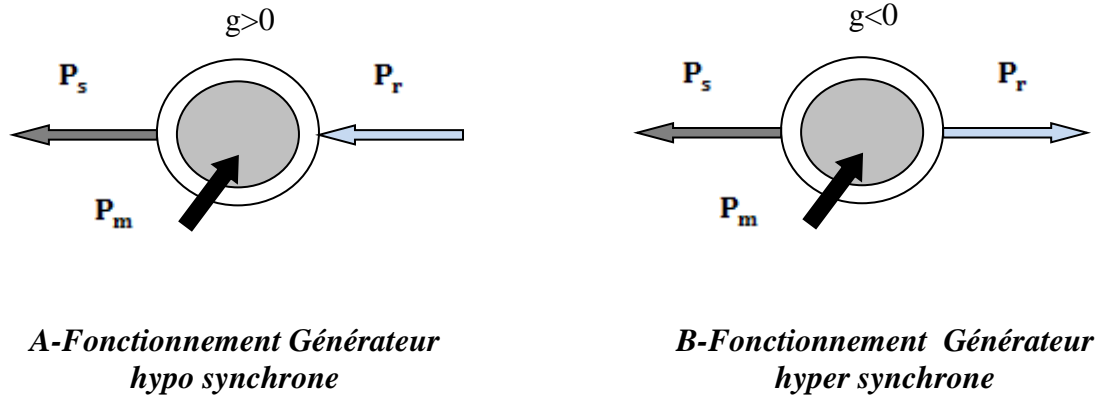


Figure. 1.3. Eoliennes à vitesse variable

La Figure 1-4 montre les différentes configurations de fonctionnement de la Générateur asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur, P_s , la puissance transitant par le stator, P_r , la puissance transitant par le rotor, et P_m , la puissance mécanique



A-Fonctionnement Générateur hypo synchrone

B-Fonctionnement Générateur hyper synchrone

Figure 1.4 Les différents modes de fonctionnement de la GADA.

4.1 Génératrice en hypo synchronisme

la puissance est fournie par le dispositif d'entraînement, dans notre cas la turbine éolienne ; une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor

4.2 Génératrice en hyper synchronisme

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

5. Modélisation des éoliennes

Dans cette partie, nous nous intéressons uniquement à la modélisation d'éoliennes à axe horizontales tri-pales. Aujourd'hui, pratiquement toutes les éoliennes sont à axe horizontal car, même si les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, leur faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique produite les ont écartées du marché. [10]

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de gain G de vitesse (figure 1.4).

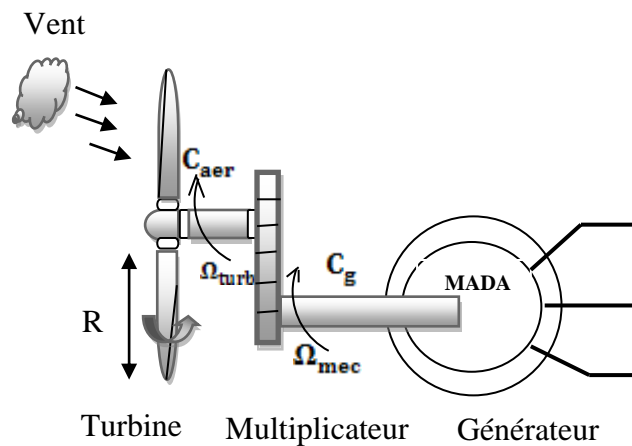


Figure. 1.4 Schéma d'un système éolien

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (1.1)$$

Avec:

- ρ est la densité de l'air (approx. 1.22kg/m à la pression atmosphérique à 15°C).
- S est la surface circulaire balayée par la turbine [m²] de rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale R[m].
- v est la vitesse du vent [m/s].

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors:

$$P_{aer} = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (1.2)$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne, il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (1.5) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β . [4]

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.00167(\beta - 2)) \sin\left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (1.3)$$

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

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{v} \quad (1.4)$$

Où Ω_t est la vitesse de la turbine.

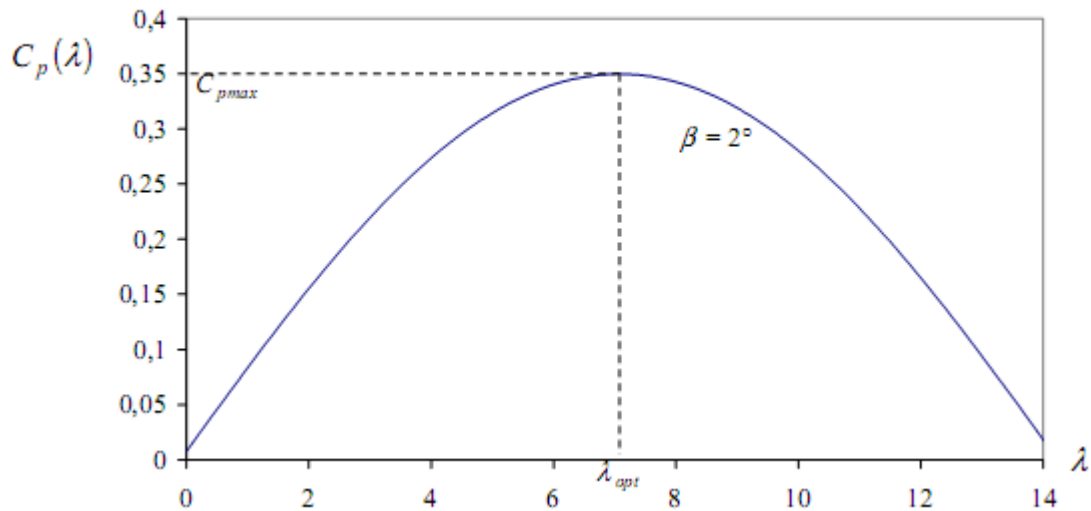


Figure 1-5 : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour $\beta = 2^\circ$.

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

$$C_{\text{ear}} = \frac{P_{\text{ear}}}{\Omega_t} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_t} \quad (1.5)$$

5.1. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (figure 1.5), ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes:

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (1.6)$$

5.2. Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (1.7)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne de 2MW, une pale a une longueur de 39 m et pèse 6.5 tonnes [09]. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor:

$$J \cdot \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} \quad (1.8)$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (1.9)$$

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{méc} \quad (1.10)$$

5.3. Schéma bloc du modèle de la turbine

Une représentation globale du modèle de cette turbine utilisant le schéma bloc correspondant à cette modélisation est représenté sur la figure1.6. [11]

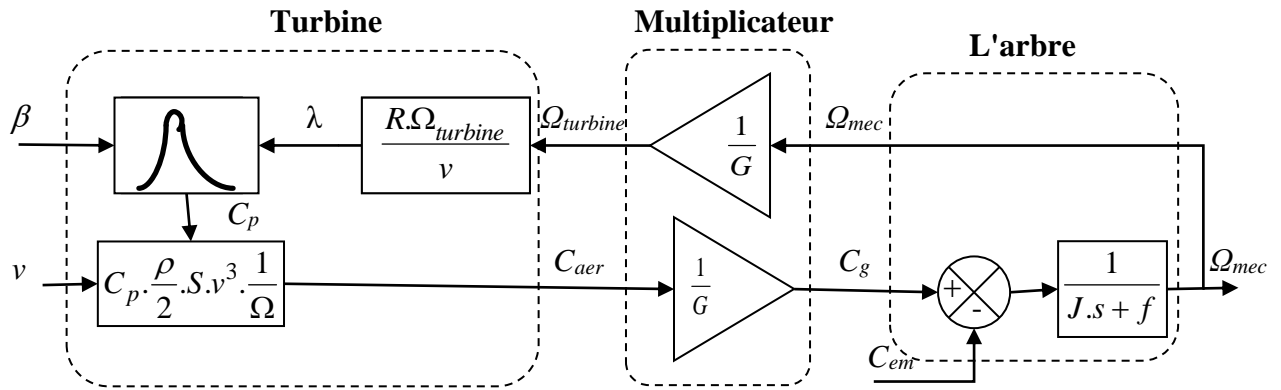


Figure. 1.6. Schéma bloc du modèle de la turbine

6. Stratégies de commande de la turbine éolienne

Caractéristique puissance vitesse d'éoliennes de grande puissance[9]

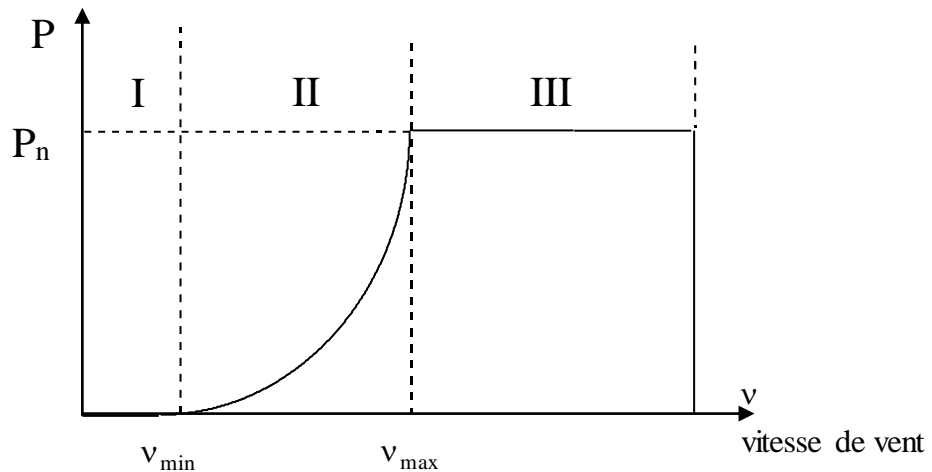


Figure.1.7. Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolien de grande puissance

On distingue trois types de fonctionnement: la phase de démarrage et le partial (load) ou fonctionnement à charge partielle et le (full load) ou fonctionnement à pleine charge.

- **Zone 1:** C'est la zone de démarrage de la machine.

- **Zone 2:** (λ_{opt} , $C_{p_{max}}$) : dans cette zone que l'on nomme partial load1, on cherche à extraire le maximum de puissance du vent. Le contrôle vise à faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne de manière à rester aux alentours de λ_{opt} . Comme l'angle de calage est fixe, le coefficient de puissance de l'éolienne est alors égal à sa valeur maximale $C_{p_{max}}$.

- **Zone 3:** (N_{nom} , P_{nom}) : Pour le full load, on cherche à maintenir constante la puissance électrique produite à sa valeur nominale en agissant sur l'angle de calage, dans cette dernière

zone, la vitesse de rotation est toujours égale à sa valeur nominale mais cette fois-ci la puissance délivrée par l'éolienne a atteint sa valeur nominale. [8]

7. Techniques d'extraction du maximum de la puissance

Dans cette partie, nous présenterons différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique (figure 2.4) de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T.) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne. On distingue deux familles de structures de commande

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

Dans notre travail nous nous intéressons au contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique. [9]

7.1 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Plusieurs dispositifs de commande peuvent être envisagés.

La vitesse est influencée par l'application de trois couples :

Un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant.

En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em}

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (C_g - f \cdot \Omega_m - C_{em})$$

Le modèle de la turbine se simplifie. La structure de commande obtenue consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence.

On peut écrire :

$$C_{em-ref} = PI(\Omega_{ref} - \Omega_{mec})$$

On prenant en compte le gain du multiplicateur on a

$$\Omega_{ref} = G \cdot \Omega_{tur-ref}$$

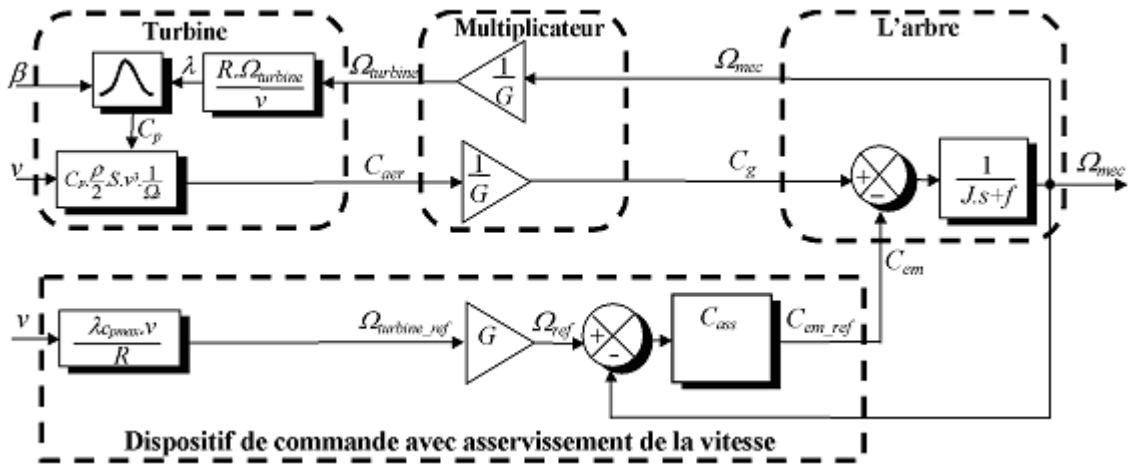


Figure.1.8 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse

7.2 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui entraîne la lecture erronée de la vitesse du vent.
- Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important, une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse. [1]

Cette structure de commande 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:

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (1.11)$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique \$C_{mec}\$ développé comme étant nul. Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux (\$C_{vis} \approx 0\$), on obtient : $C_{em} = C_g$

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

éolien :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-estimé}}{G} \quad (1.12)$$

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 (1.2) :

$$C_{aer-estimé} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-estimé}} \cdot v_{estimé}^3 \quad (1.13)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine-estime}$ est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique:

$$\Omega_{turbine-estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (1.14)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation (2.15)

$$v_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine-estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (1.15)$$

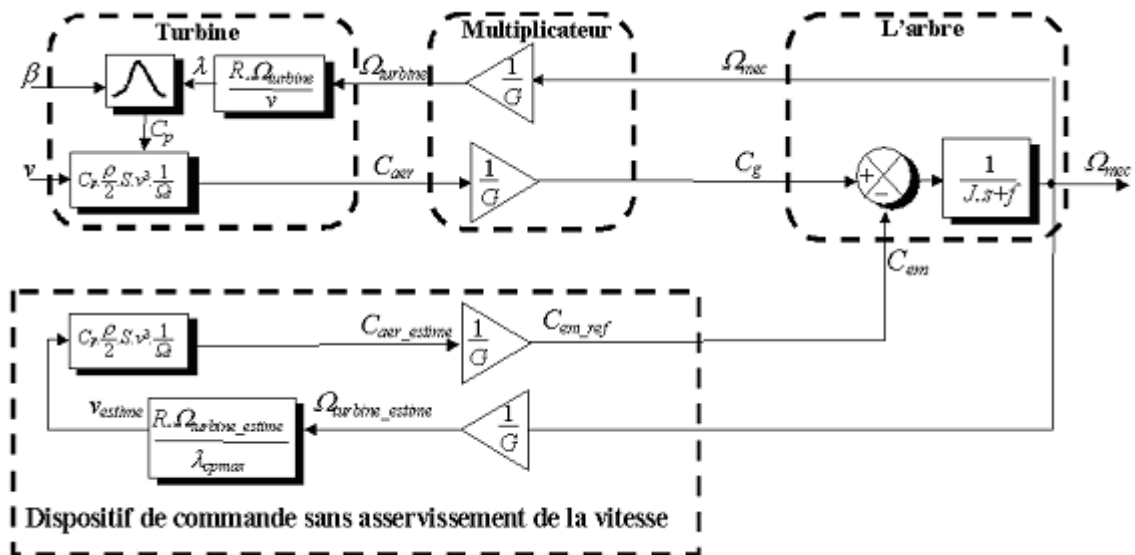


Figure.1.9. Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

7.3 Système d'orientation des pales

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé "pitch control". (Fig.1.10).

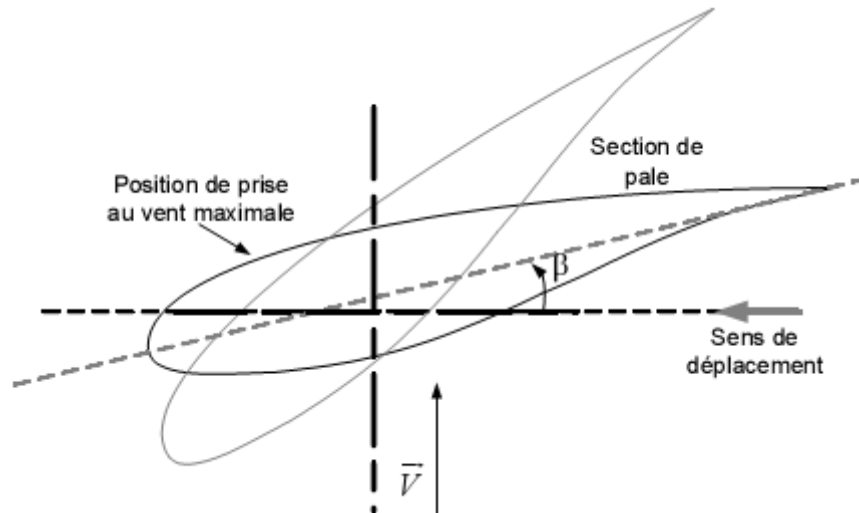


Figure.1.10. Variation de l'angle de calage d'une pale

En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine, et plus précisément le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basses vitesses, puis, pour les fortes vitesses de vent, s'inclinent pour de grader le coefficient de puissance à la valeur optimale. Elles atteignent la position "en drapeau" à la vitesse maximale V_{max} .

Le système de régulation de la puissance par orientation des pales possède les avantages suivants:

- Il permet d'effectuer un contrôle actif de la puissance pour de larges variations du vent (bien sur en dessous de la limite de sécurité).
- Il offre une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage STALL pour la plage de fonctionnement correspondant aux fortes vitesses de vent.
- Il facilite le freinage de l'éolienne, en réduisant la prise du vent des pales, ce qui limite l'utilisation de freins puissants.
- Ce type de régulation réduit les efforts mécaniques lors des fonctionnements sous puissance nominale et sous grandes vitesses. [10]

8. Conclusion

Nous avons présenté une étude de la turbine. Dans l'objectif de modélisation nous avons décrit le modèle simplifié de différents composants de la turbine (multiplicateur, arbre, turbine). Ainsi que et pour la commande de la turbine nous avons identifié trois zones de fonctionnement: une zone d'optimisation de la conversion énergétique, une zone de limitation de la puissance produite et une zone intermédiaire. on a présenté les trois méthodes disponibles pour contrôler le maximum de la puissance de vent.



CHAPITRE II
MODELISATION ET COMMANDE
DE LA MACHINE ASYNCHRONE A
DOUBLE ALIMENTATION

Chapitre II. Modélisation et Commande de la machine asynchrone à double alimentation

1. Introduction

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

Dans ce chapitre on va présenter la modélisation de machine asynchrone à double alimentation, ainsi que la commande vectorielle.

La modélisation de la machine électrique est une étape primordiale de son développement. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels, permettant de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques.

Le modèle classique de la machine asynchrone correspondant au schéma monophasé équivalent, n'est valable qu'en régime sinusoïdale à fréquence fixe au stator, pour étudier son comportement à une fréquence variable et avec des signaux fournis par les convertisseurs statiques qui ne sont pas sinusoïdaux, il faut faire appel à un modèle plus compliqué; on considère que chaque armature triphasée statorique et rotorique peut être représentée par une armature diphasée équivalente à l'aide de la transformation de PARK, chaque armature diphasée est donc représentée par deux enroulements identiques placés sur deux axes en quadrature, tout en tenant compte des hypothèses simplificatrices suivantes:

- La machine est de construction parfaitement symétrique.
- Même nombre des phases entre le stator et le rotor.
- Répartition sinusoïdale des champs magnétiques de chaque bobinage, le long de l'entrefer.

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.

2. Modele mathématique de la GADA

La génératrice asynchrone à double alimentation est classiquement modélisée dans le repère de Park (repère tournant à la vitesse électrique ω_s), donnant lieu aux équations suivantes : [8]

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

3. Expression du couple

On distingue l'expression du couple :

$$C_e = 3/2 p \cdot (\Phi_{ds} \cdot i_{qs} - \Phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (2.3)$$

En plus, on peut écrire l'expression du couple en fonction des courants statorique et les flux rotorique comme suit :

$$C_e = \frac{3}{2} p \cdot \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (2.4)$$

Donc l'équation mécanique devient :

$$\dot{\omega}_m = \frac{1}{j} \left[p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot (\Phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds}) - C_r \right] \quad (2.5)$$

4. Expressions des Puissances Active et réactive

Les expressions des puissances active et réactive sont données par: [7]

$$\begin{aligned} P_s &= v_{sd} \cdot i_{sd} - v_{sq} \cdot i_{sq} \\ Q_s &= v_{sq} \cdot i_{sd} - v_{sd} \cdot i_{sq} \end{aligned} \quad (2.6)$$

5. Commande de la MADA avec orientation du flux statorique

La Commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par une autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axe d-q et une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux [10].

Pour simplifier la commande il est nécessaire de faire un choix judicieux de référentiel. Pour cela, on se place dans un référentiel d-q lié au champ tournant avec une orientation du flux statorique (l'axe d aligné avec la direction du flux statorique) comme le montre la Fig.2.1.

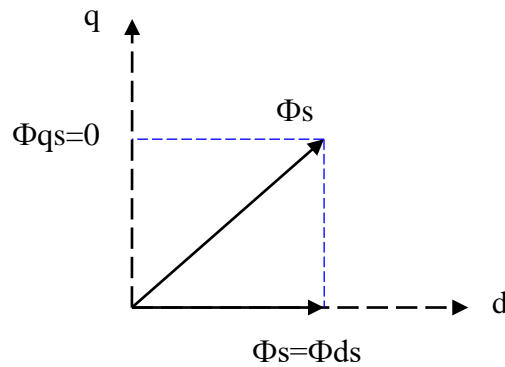


Figure .2.1. Orientation de flux

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

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

- **Commande vectorielle de la MADA**

"La commande à flux orienté" appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. [5]

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

$$V_s \cong \frac{d\Phi_s}{dt} \quad (2.7)$$

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

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_s \end{cases} \quad (2.8)$$

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

$$\begin{cases} \Phi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (2.9)$$

- **Relations entre les courants statoriques et rotoriques**

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statorique (2.9), nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques comme suit : [9]

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (2.10)$$

- **Expression des puissances actives et réactives dans le repère synchrone**

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

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (2.11)$$

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

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (2.12)$$

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

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = \frac{V_s \Phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (2.13)$$

De l'expression (2.8) nous pouvons écrire :

$$\Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (2.14)$$

D'où d'après (2.13)

$$Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \quad (2.15)$$

En considérant la mutuelle constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d (la constante $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ prés imposée par le réseau). [4]

- **Expressions des tensions rotoriques en fonction de courants rotoriques**

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

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (2.16)$$

En injectant ces équations dans les expressions des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (2.17)$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (2.18)$$

L'étude précédemment établie nous permet de définir le schéma bloc du système à réguler (Figure 2.2). [6]

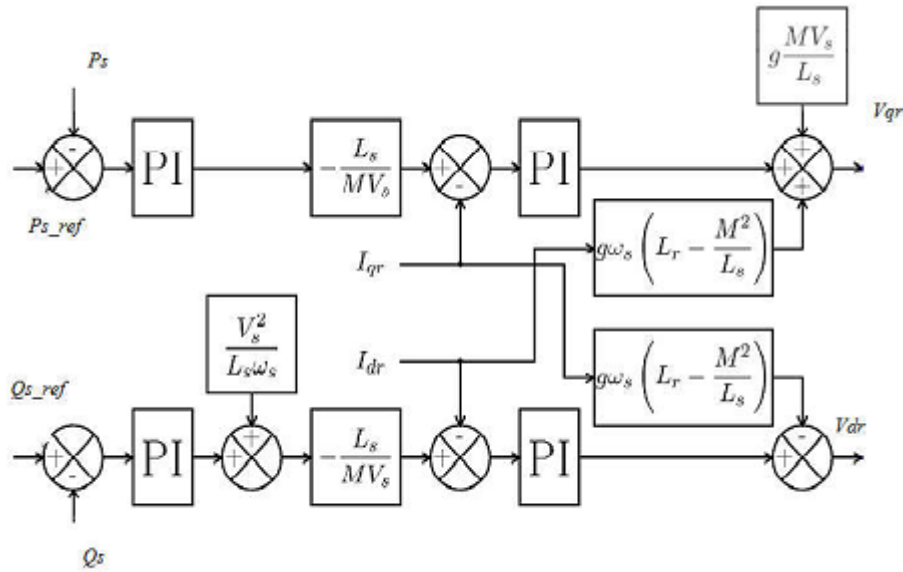


Figure 2. 2 Commande en puissance avec boucle de courant

6. Onduleur de tension a deux niveaux

Le rotor de la MADA est alimenté par une tension continue à travers un onduleur de tension qui est supposé constante, la tension de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie de l'onduleur.

l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante : [2]

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons traité l'aspect modélisation et commande de la partie électrique de l'éolienne. L'étude de modélisation nous a permis d'élaborer un modèle mathématique simple et adéquat pour commander la machine asynchrone à double alimentation.

Pour contrôler la MADA nous avons utilisé une loi de commande vectorielle directe par un système d'orientation de flux statorique. Cette commande qui ramené les équations de modèle de la machine en deux équations permet de faciliter la commande de la machine à double alimentation.



CHAPITRE III

RESULTATS DE SIMULATION

Chapitre III. Résultats de simulation (turbine, GADA)

A partir de l'étude de modélisation du système de génération complet (turbine, GADA) et leur structure de commande il est intéressant de réaliser une simulation numérique sous l'environnement Matlab/Simulink du système complète est présenté sur la figure3.1 ,afin d'analyser et interpréter ces résultats obtenus.

Les paramètres mécaniques et électriques de la turbine éolienne de 1.5MW basée sur une machine asynchrone à double alimentation, sont illustrés comme suit

Paramètre de la GADA	Signification
$R = 35.25$	Rayon de l'éolienne en (m)
$G = 90$	Gain de multiplicateur de vitesse
$R_s = 0.012$	Résistance statorique (Ω)
$R_r = 0.021$	Résistance rotorique (Ω)
$M = 0.0135$	Mutuelle inductance (H)
$L_s = 0.0135$	Inductance statorique (H)
$L_r = 0.0135$	Inductance rotorique (H)
$J = 1000$	Inertie de l'arbre (kg.m^2)
$f = 0.0024$	Coefficient de frottement
$p = 2$	Nombre de paire de pôles
1.5 MW	La puissance nominale (w)

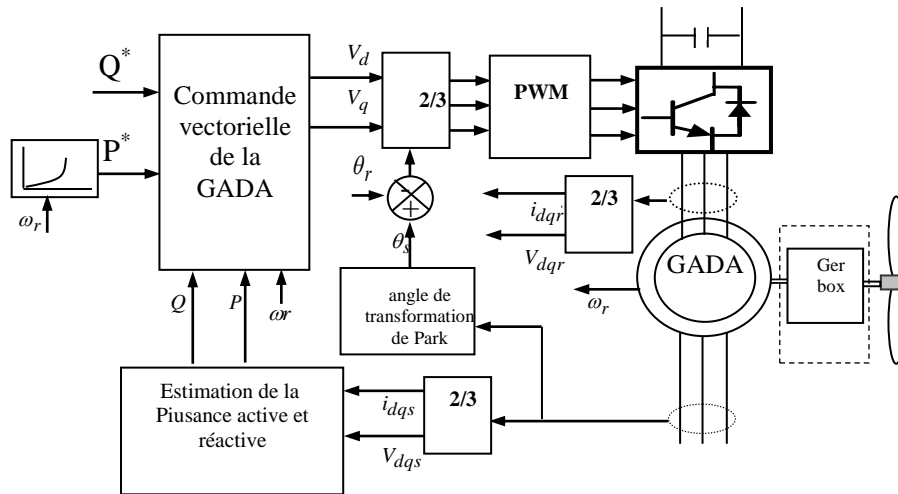


Figure 3.1 Schéma bloc de système complet

1- Conditions de la simulation

Les résultats de simulation sont obtenus à l'aide du MATLAB Simulink, la simulation est faite en imposant la puissance réactive nulle (supposant qu'on a pas de production de puissance réactive).

La partie mécanique des pales n'a pas été introduite. La machine a été alimentée au rotor par un convertisseur à deux niveaux. La tension du bus continu est fixée à 2000V

La maximisation de la puissance est obtenue avec asservissement de la vitesse mécanique de la turbine.

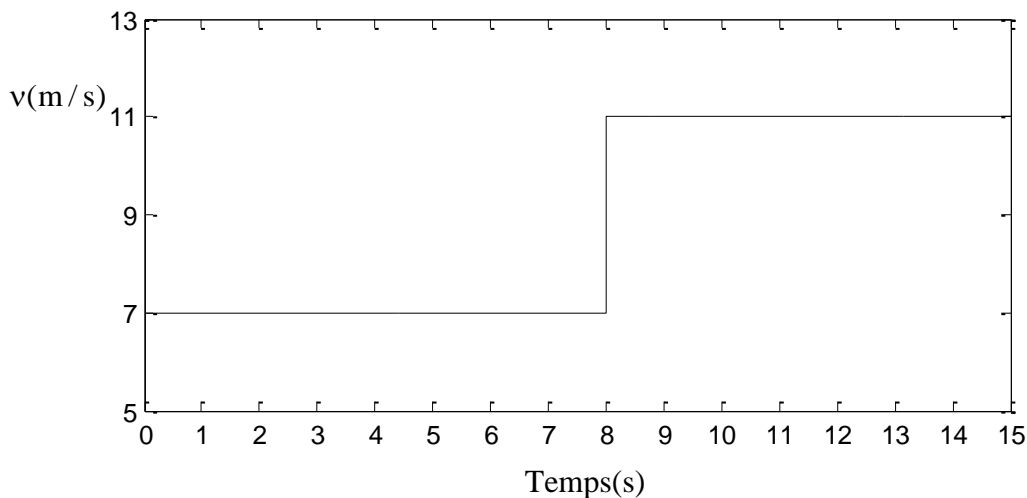


Figure 3.2 Vitesse de vent en fonction du temps

La variation de vitesse du vent est donnée par la figure 3.2, et la vitesse de la MADA est proportions a le vent qui entraînant l'éolienne Figures 3.3

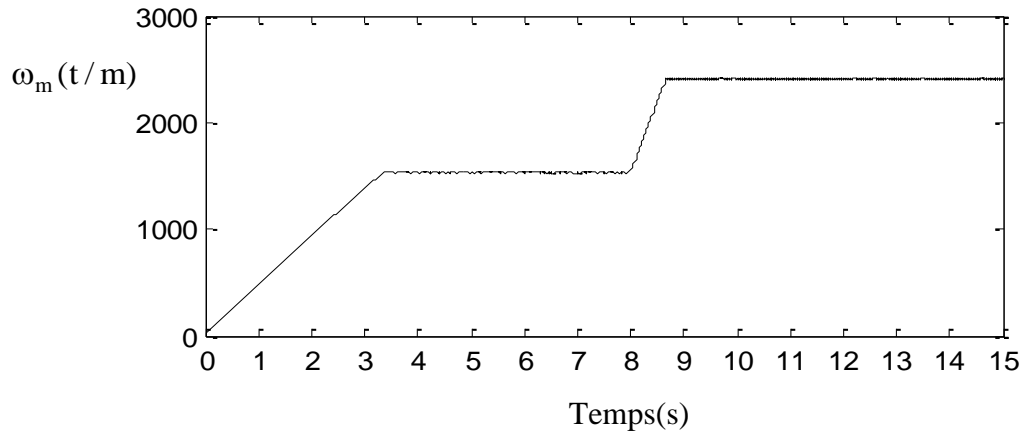


Figure3.3 Variation de la vitesse mécanique (tour/min)

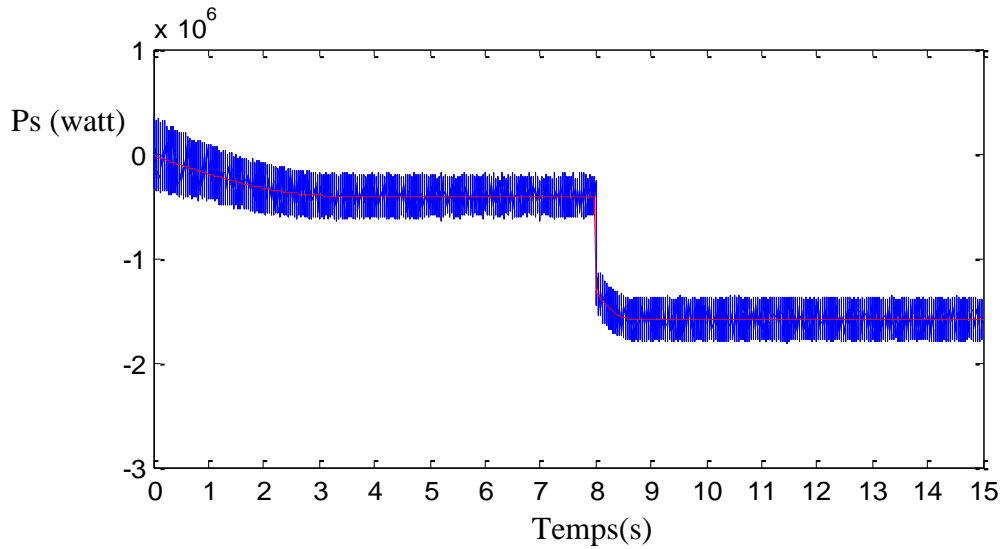


Figure 3.4 Puissance active statorique et sa référence

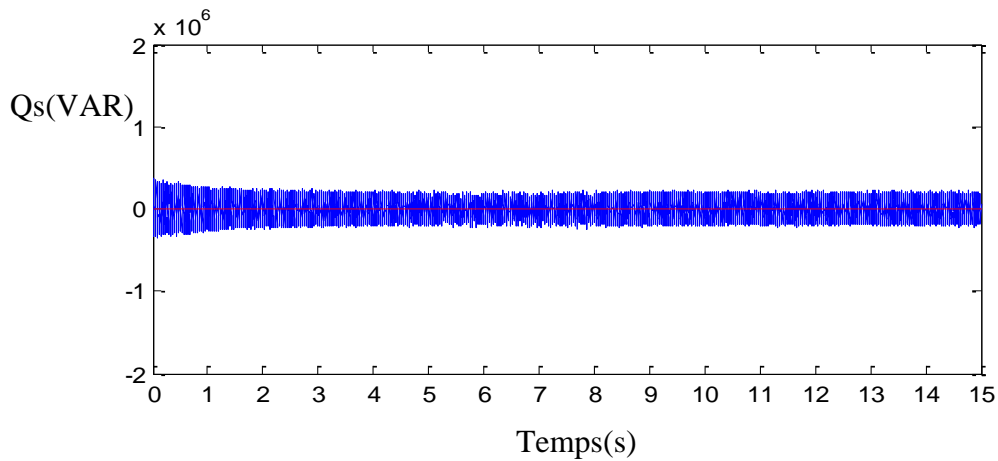
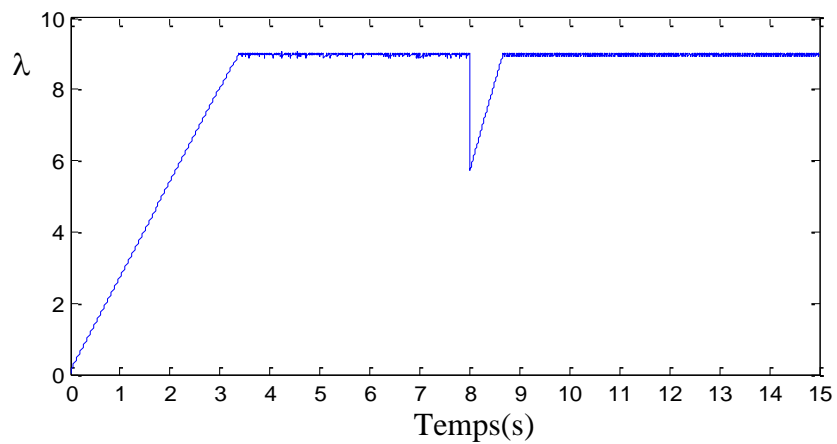
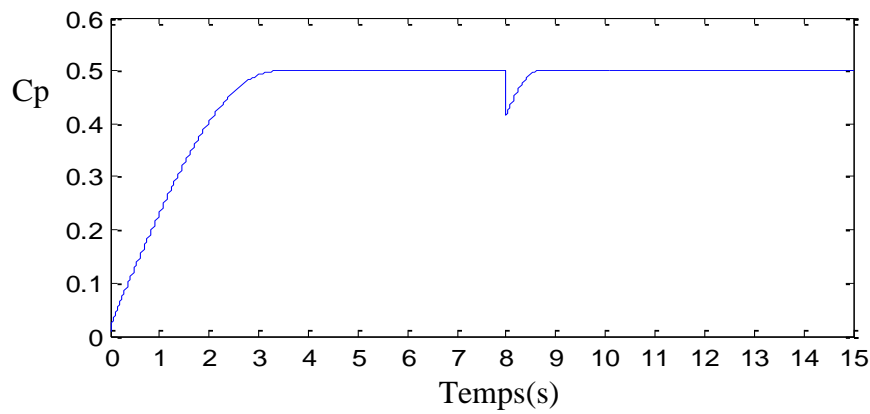
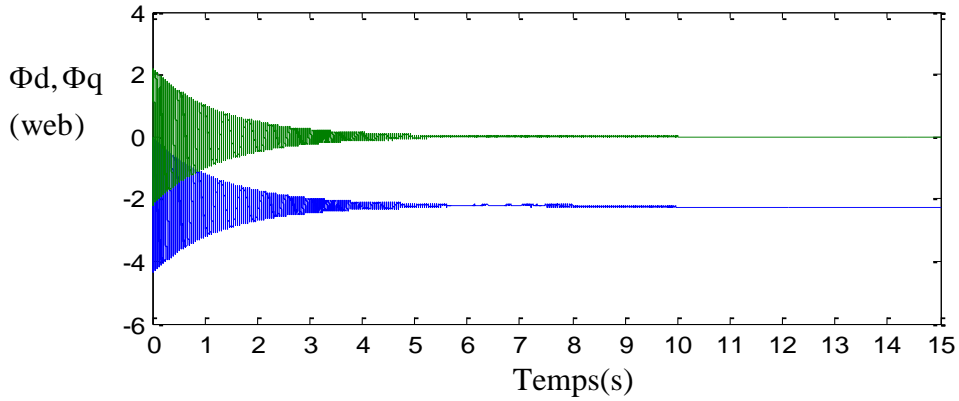


Figure 3.5 Puissance réactive statorique et sa référence

On constate aussi un bon suivi de consigne pour les puissances active et réactive statoriques (référence de la puissance réactive est maintenue nulle) par les puissances réelles débitées par la GADA figure (3.4), figure (3.5).



La figure (3.6) présente l'allure des composantes du flux statorique qui montre une bonne orientation du flux et garantissant une commande vectorielle bien découplée de la GADA. La vitesse spécifique λ et le coefficient de puissance C_p ils restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références optimales 9 et 0.5 successivement figure (3.7), figure (3.8).

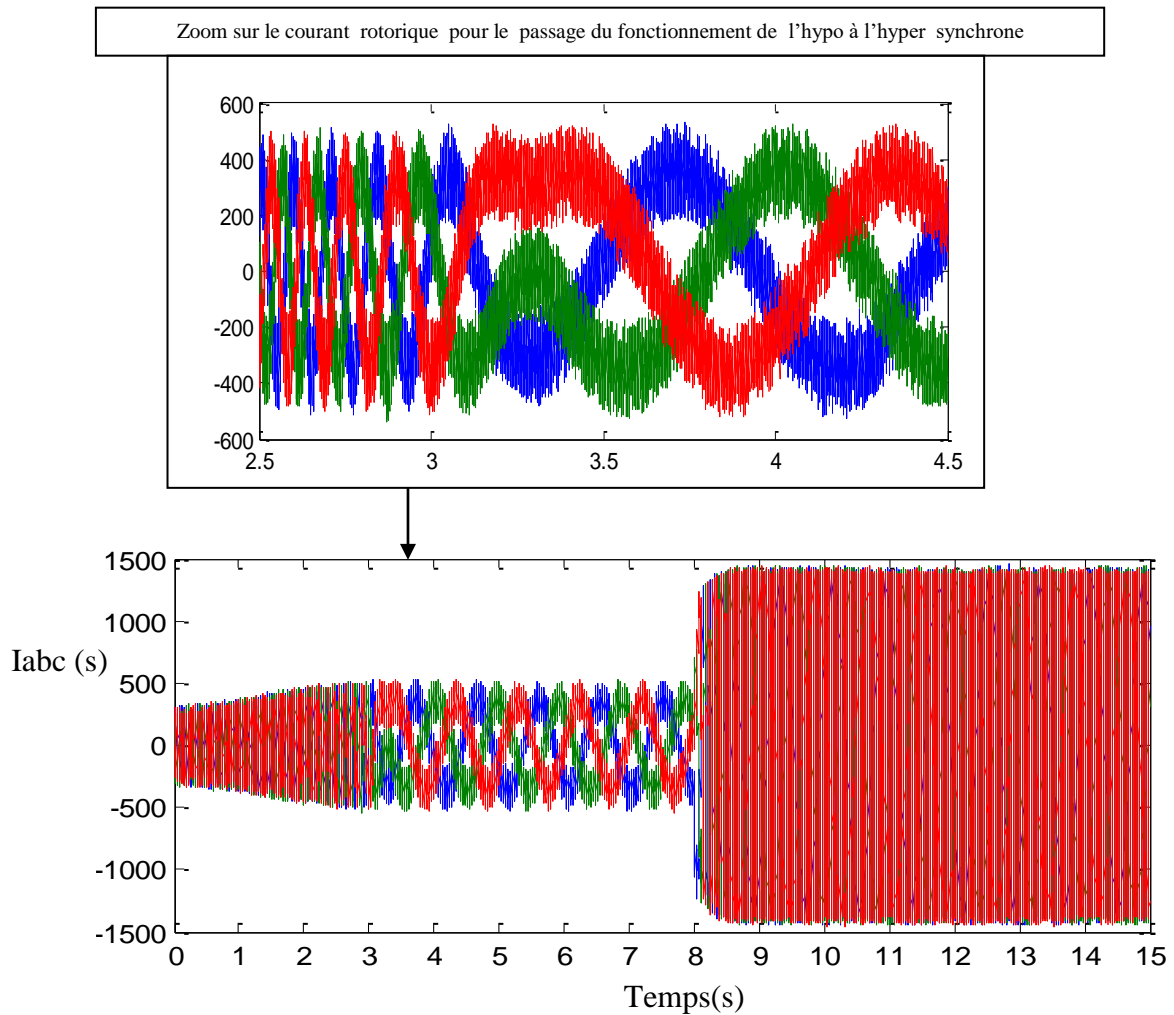


Figure3-9 Courant triphasé rotorique

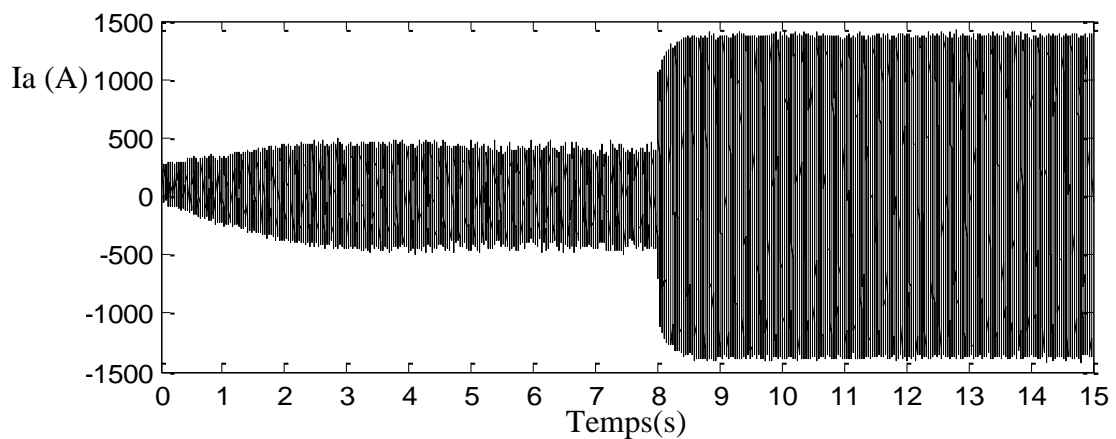


Figure 3- 10 Courant d'une phase statorique

La Figure 3-9 montre le courant rotorique durant une transition du régime hypo-synchrone au régime hyper-synchrone .Ce résultat confirme que la GADA peut fonctionner dans les deux régimes.

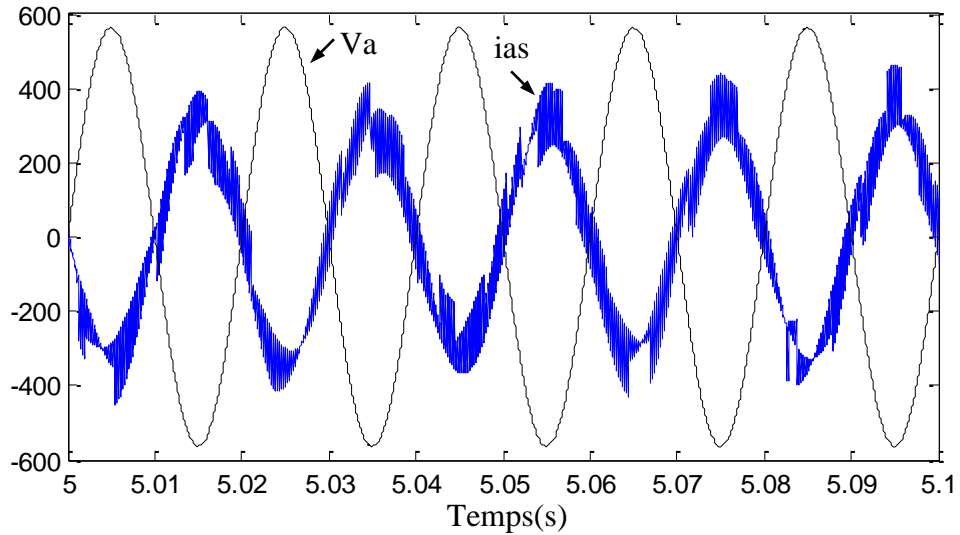


Figure 3.11 le courant et la tension de la MADA

Le déphasage de 180° entre la tension et le courant de phase statorique, Ceci confirme que le système éolien n'injecte que la puissance active dans le réseau.

Les résultats de simulation correspondant à cet algorithme de commande montrent que les variations de la vitesse de la génératrice sont adaptées à la variation de la vitesse du vent. La puissance électromagnétique convertie en puissance électrique active produite est très fluctuante. Ce phénomène est dû à la commutation électronique au niveau du convertisseur rotorique et cette puissance sera comptabilisée négativement car elle s'oppose à la puissance aérodynamique. on obtient une forme de courant et de tension qui loupé est parfaitement sinusoïdal avec une amplitude évolue de la même forme que le profil du vent utilisé

2. Conclusion

Les résultats obtenus montrent les hautes performances et la robustesse des algorithmes de contrôle appliqués au niveau de la turbine, tel que celui de maximisation et de limitation de la puissance générée par le système complète, ainsi que au niveau de la GADA tel que la commande vectorielle qui permet d'obtenir un fonctionnement a un facteur de puissance unitaire.

Conclusion générale

Nous avons étudié dans ce mémoire un système éolien pour génération d'électricité basé sur une MADA , la modélisé la turbine et ainsi un algorithme de maximisation de la puissance captée du vent a été mis en œuvre. La valeur de la puissance active statorique de référence est estimée à partir de la vitesse mécanique de rotation. Dans se travail on supposés l'alimentation de l'onduleur est constante.

A travers cette étude nous pouvons noter que le rôle de la MADA dans la conversion électromécanique et son efficacité dans les conditions aux quelles nous l'avons soumise, cela prouve la viabilité de son application dans un système éolien.

dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MADA sont envisageables:

1-alimenter le rotor de la MADA par deux convertisseurs électroniques réversibles

2-Etude de la commande directe des puissances active et réactive de la MADA .

3-utilisation outre algorithme de maximisation de la puissance captée

4-Développement d'un contrôle vectoriel sans capteurs de vitesses mécanique

Bibliographie

- [1] S. EL AIMANI, " *Modélisation de différentes technologies éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension*", thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille et l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 6 décembre 2004.
- [2] Amar MAAFA "étude d'un générateur éolien base sur la cascade de deux machines asynchrones pilote par un convertisseur de fréquence" mémoire de magister, Université de BATNA, 2011.
- [3] M. ADAM «*étude comparative de conversion d'énergie dédiée a une éolienne de petite puissance*», thèse de doctorat, L'institut national polytechnique de Toulouse, avril 2005.
- [4] I.HAMZAOUI, "*Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur*", mémoire de magistère, ENP, Janvier 2008.
- [5] F.POITIER, "*Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne*", thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003.
- [6] R. ABDESSAMAD et M. KADJOU DJ, "*Modélisation des machines électriques. Presse de l'université de Batna, Algérie, 1987*"
- [7] L.BAGHLI, "*Modélisation et commande de la machine asynchrone*", notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005.
- [8] M.ABBAS, M.MICHENTEL, "*Modélisation et commande d'une MADA alimentée par une cascade à trois niveaux, application à l'énergie éolienne*", projet de fin d'études, ENP, Juin 2006.
- [9] L.KHETTACHE, "*Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation*", mémoire de magister, Université de BATNA, 2007.
- [10] Arnaud GAILLARD ,''*Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service*'' Thèse de doctorat, de l'Ecole Centrale de Nancy et l'Université des Sciences et Technologies de Nancy, France, 30 avril 2010.
- [11] DOUADI TAREK "Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone" mémoire de magister, Université de BATNA, 2011