

République l'Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**



CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Spécialité : Génie électrique

Option : Contrôle et Diagnostic des Systèmes Électriques

Thème

**Alimentation d'un site isolé par une
centrale éolienne.**

Réalisé par :

lekhoua mohammed

med rachiddiab moham

Encadré par :

slimane wissem

REMERCIEMENTS

Avant tout on remercie Dieu le tout puissant qui nous a donné le courage, la patience, l'aide et la volonté de réaliser ce modeste travail .

Nous tenons à remercier vivement notre encadreur Me: **SLIMANE WISSAM** qui a ménagé un grand effort afin de nous permettre de mener à bien le présent travail et à qui nous exprimons notre gratitude et notre respect .

Nous remercions aux enseignants du département d'électrotechnique .

Nous remercions très vivement **M:LABBI YACINE** pour son aide. Tout comme j'exprime mes meilleurs sentiments de gratitude aux honorables membres du Jury qui ont l'amabilité et la patience de supporter notre maladresse .

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicaces	
Sommaire	
Notations et symboles	
Introduction générale.....	05

Chapitre Un: Les systèmes éoliens

I.1. Introduction.....	06
I.2. Quelques notions sur le vent.....	06
I.3. Généralités sur les différents types d'éoliennes.....	07
I.3.1. Eoliennes à axe vertical.....	07
I.3.2. Eoliennes à axe horizontal.....	09
I.3.2.1. Eoliennes lentes.....	09
I.3.2.2. Eoliennes rapides.....	10
I.4. Modélisation des éoliennes à axe horizontal	11
I.4.1. Différentes parties d'un aérogénérateur.....	11
I.4.2. Modélisation des pales : Bilan des forces.....	12
I.4.3. Puissance susceptible d'être recueillie par les pales : Théorème de Betz.....	13
I.4.4. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne.....	16
I.4.4.1 Système à décrochage aérodynamique "stall".....	16
I.4.4.2. Système d'orientation des pales "pitch".....	17
I.4.4.3. Modèle de la turbine éolienne.....	18
I. 5. Conclusion.....	19

Chapitre Deux: modélisation et commande de la MADA

1. Introduction	20
2. Modélisation de la MADA	20
2.1. Hypothèses Simplificatrices	20
2.2. Modèle mathématique de la MADA	21
2.2.1. Equation électrique de la MADA	21
2.2.2. Equation mécaniques de la MADA	22
2.3. Modèle diphasé de la MADA	23
2.3.1. Equation des tensions	24

2.3.2. Equation des flux	24
2.3.3. Equation du couple électromagnétique	25
3. Commande vectorielle de la MADA	25
3.1. Principe général.....	25
3.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	26
3.2.1. Choix du référentiel pour le modèle diphasé	27
3.2.2. Relation entre le courant statorique et le courant rotorique	28
3.2.3. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques	29
3.2.4. Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques	30
3.3 Type de régulateur utilisé.....	30
4. Onduleur de tension a deux niveaux	31
4.1. Modèle de l'onduleur a deux niveaux	32
5. Résultat et interprétation :	32
6. Conclusion.....	36

Chapitre Trois:simulink d'une chaîne de conversion éolienne

1. Introduction	37
2. Modèle de la chaîne de conversion	37
2.1. Description de montage.....	37
2.2 Redresseur de tension	38
2.2.1. Modélisation du redresseur	38
2.2.2. Commande du redresseur	39
3. Modélisation de la turbine.....	39
3.1. Modèle de multiplicateur	39
3.2. Equation dynamique de l'arbre	40
3.3. Schéma bloc du modèle de la turbine.....	40
4. Les différents zones de fonctionnement de l'éolienne a vitesse variable	40
5. Système de la chaîne globale	41
6. Résultats de simulation.....	42
6.1. Interprétation des résultats	44
7.conclusion.....	45
Conclusion générale	46

Bibliographie

Annexe : Paramètres utilisés

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à:

Mon père et ma mère,

Mon frère et mes soeurs

Tous mes proches,

Tous mes amis,

Toute la promotion 2010 d'Electrotechnique,

Tous ceux qui me sont chers.

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.
C_p	Le coefficient de puissance.
λ	La différentes valeurs de l'angle de calage.
λ_{nom}	La vitesse la valeur nominale 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.
K_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.
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	Pulsation de glissement ($\omega_s - \omega$).
ω	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.
V_a, V_b, V_c	Tensions simples statoriques.
S_a, S_b, S_c	Etat des commutateurs de puissance.
V_{dc}	Tension continu.
m	Indice de modulation.
f_p	Fréquence de la porteuse.
r	Taux de modulation.
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.

V_{red} Tension simple à l'entrée du redresseur.

P_{ond} Puissance transitée par l'onduleur.

P_{red} Puissance transitée par le redresseur.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Avec la crise mondiale marquée par la hausse du prix du pétrole, nous constatons l'émergence des énergies renouvelables qui se caractérisent par leur stock inépuisable et durable. Elles sont propres et ont un faible impact sur l'environnement d'où leur succès grandissant dans l'opinion publique, chez les investisseurs et les pouvoirs publics.

La source principale de ce type d'énergie est le soleil. Cette énergie est captée dans sa forme primaire à travers les cellules photovoltaïques. Elle peut être également transformée par la nature en courants marins à l'origine de l'énergie des vagues ou en mouvement de masse d'air à l'origine de l'énergie éolienne (énergie du vent). Cette dernière offre des bénéfices certains pour la communauté, ses prix peuvent être maîtrisés sans faire l'objet de spéculation sur le marché. Le développement de son industrie a pour effet d'absorber une main d'œuvre nombreuse et variée.

Ce type d'énergie procure l'avantage de ne pas être centralisé mais d'être disponible au lieu de la demande. En effet, l'éloignement engendre des pertes considérables à travers les câblages dont l'investissement se caractérise par des coûts très importants. Aujourd'hui, le transport classique de l'électricité est remis en question grâce à la disponibilité et la propagation des éoliennes et donc une décentralisation de la production.

Compte tenu de ces arguments, de la grande superficie et du fort potentiel relatif au gisement éolien, nous avons choisi de traiter le processus de production de ce type d'énergie.

Les premières machines électriques qui sont utilisées dans le domaine éolien étaient les machines asynchrones. En effet, celles-ci présentent plusieurs avantages tels que leur moindre coût, leur robustesse et leur entretien réduit.

Le travail que nous avons à réaliser, consiste à une étude sur une chaîne de conversion éolienne et à travers les différentes machines utilisées dans un système éolien. Pour donner un bon rendement au réseau électrique, on a choisi la machine asynchrone à double alimentation **MADA** en anglais «*doubly fed induction machine DFIM* », cette machine peut être fonctionnée à vitesse variable, donc possibilité de fournir de l'énergie quelque soit la vitesse

de vent. Ce travail est structuré en trois chapitres, ces derniers sont énoncés de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à la description et la modélisation du système éolien à travers les équations et les concepts physiques régissant son fonctionnement

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 en P et Q.

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 les convertisseurs qui leur sont associés. Les deux convertisseurs utilisés seront commandés en utilisant une MLI triangulosinusoidale à une porteuse. Ainsi, les résultats de simulation seront présentés et interprétés.

I. 1. Introduction

Depuis l'avènement des moulins à vent jusqu'aux premiers aérogénérateurs, la technologie des aéromoteurs (ou capteurs éoliens) a connu une évolution fulgurante surtout ces dernières décennies ; notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et leurs structures sont de plus en plus performantes. Outre leurs caractéristiques mécaniques, nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

En effet, il existe deux types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. Ainsi dans ce qui suit nous allons énoncer en première partie une généralité sur les différents types d'éoliennes, ensuite nous allons nous intéresser plus particulièrement aux éoliennes rapides à axe horizontal qui sont non seulement les plus répandues, mais aussi les plus efficaces.

I. 2. Quelques notions sur le vent

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non polluante. La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers (offshore). Le vent est défini par sa direction et sa vitesse.

Direction et vitesse du vent

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

La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques unes au tableau 1, [3].

Degrés Beaufon	Vitesse du vent (km/h)	Vitesse du vent(m/s)	Dexription générale	Pression sur surface plane (d aN/m^2)
0	0 à 0.4	<1	Calme	
3	3.5 à 5.5	12 à 19	Petite brise	3.2(5m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4(7 m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent frais	22(13 m/s)
8	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52(20 m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117(30 m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	Cyclone	470(60 m/s)

Tableau un:échelle Beaufort

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude

Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10m/s. [4]

I.3. Généralités sur les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical qui tendent à disparaître, les éoliennes lentes à axe horizontal utilisées surtout pour le pompage et les éoliennes rapides à axe horizontal plus particulièrement utilisées dans la production d'énergie électrique.

I.3.1. Eoliennes à axe vertical

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

*Le rotor de Savonius dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble.

L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure 1-1).

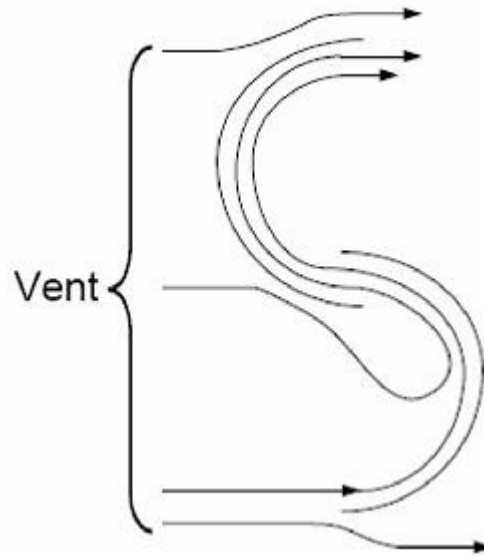


Figure 1-1: Eolienne de Savonius

* Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus. Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, (Figure 1-2), est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées [18].

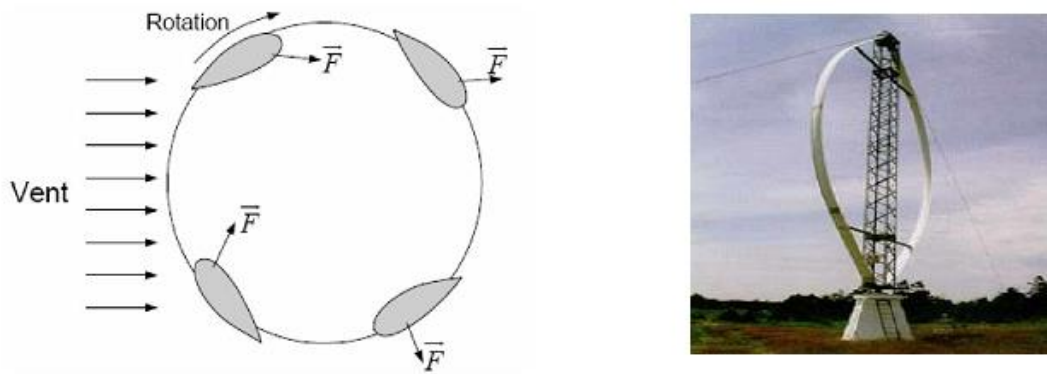


Figure 1-2: éolienne de Darrieus

I.3.2. Eoliennes à axe horizontal

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

I. 3.2.1. Eoliennes lentes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multipales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 (m/s) et leurs couples de démarrage sont relativement forts.

Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau.

La puissance maximale susceptible d'être obtenue par ce type de machine peut se calculer en fonction du diamètre par l'expression suivante [3] :

$$P = 0.15 * D^2 * V^3$$

La puissance étant exprimée en watts, le diamètre en mètre et la vitesse du vent en

I.3.2.2. Eoliennes rapides

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre (2 et 4) pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible.

Le tableau 2 propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW

Tableau Deux : classification des turbines éoliennes [3]

En effet, les éoliennes ont différentes dimensions, et puisque l'air est une ressource diffuse, la tendance générale favorise les appareils de plus en plus gros. Les progrès en science des matériaux ont permis la fabrication de pales plus légères et plus solides ainsi que l'amélioration de la conception des tours et des fondations, ce qui permet la construction d'appareils de plus en plus imposants. En 1995, les éoliennes de 500 kW étaient la dernière nouveauté. Aujourd'hui, des appareils individuels de 4,5 MW (4 500 kW) sont en production commerciale [1].

Dans ce qui suit, notre étude se portera spécialement sur les éoliennes rapides dont nous essayerons de donner une description globale du modèle.

Formule pratique pour une éolienne rapide à axe horizontal, tenant compte d'un rendement moyen:

$$P = 0.2 * D^2 * V^3$$

I.4. Modélisation des éoliennes à axe horizontal

I. 4.1. Différentes parties d'un aérogénérateur

Une éolienne rapide est constituée principalement de trois parties les pales (entre 1 et 3), 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.

*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 oeuvre 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 (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât 80m).

*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. Le générateur qui est généralement une machine asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). 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.

*Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) [4].

*Une armoire de commande, comportant tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle.

*Un multiplicateur de vitesse, un radiateur de refroidissement et un système de freinage.

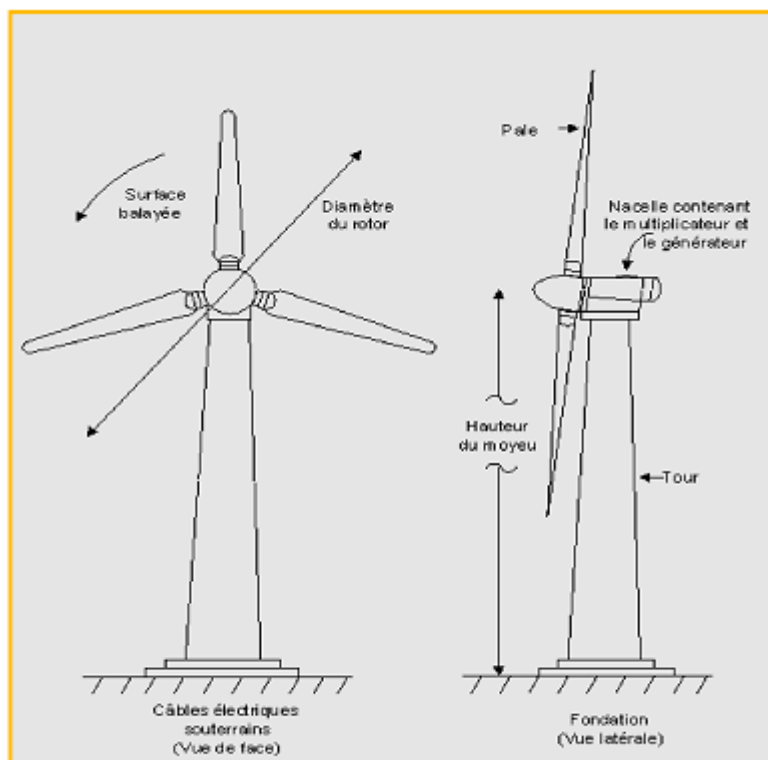


Figure 1-3 : Principales composants de l'éolienne à axe horizontale

I.4.2. Modélisation des pales : Bilan des forces

La figure 1-4 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur V . Le vecteur $rotV$ représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur.

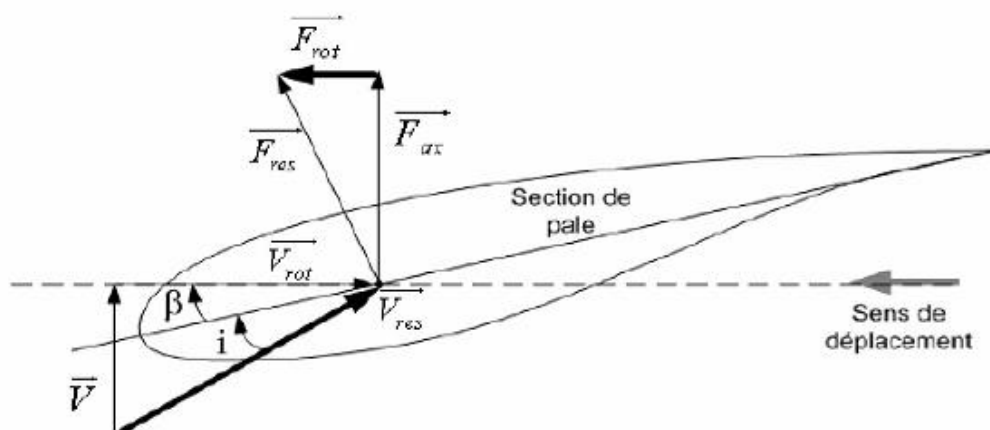


Figure 1-4 : Bilan des forces

La résultante de ces deux vecteurs est appelée V_{res} . L'action du vent sur la pale produit une force F_{res} qui se décompose en une poussée axiale F_{ax} directement compensée par la résistance

mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation F_{rot} qui produit effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse du vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale β et i sont respectivement l'angle de calage et l'angle d'incidence, [4].

I.4.3. Puissance susceptible d'être recueillie par les pales : Théorème de Betz

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par **Betz**. Il suppose que les pales sont placées dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 .

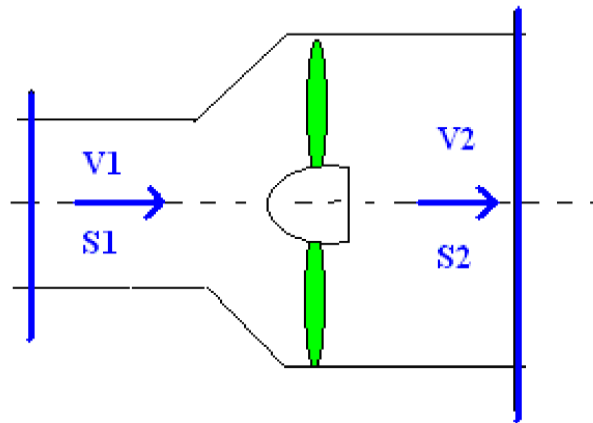


Figure 1-5 : Théorie de Betz

La production d'énergie ne peut se faire qu'au préjudice de l'énergie cinétique du vent, la vitesse V_2 est nécessairement inférieure à V_1 . Il en résulte que la veine fluide traverse les pales en s'élargissant. Désignons par V , la vitesse de l'air à la traversée de l'aéromoteur et par S la surface balayée par les pales. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit :

$$S_1 * V_1 = S * V = S_2 * V_2 \quad (1)$$

Par ailleurs d'après le théorème d'Euler, la force exercée par les pales sur l'air en mouvement est dirigée vers l'avant et égale en valeur absolue à:

$$F_{rot} = \rho * Q * (V_1 - V_2) = \rho * S * V * (V_1 - V_2) \quad (2)$$

Et la puissance développée par la force F_{rot} (c'est-à-dire par l'aéromoteur) dont le point d'application se déplace à la vitesse V par rapport aux molécules d'air en mouvement est :

$$P = F_{rot} * V = \rho * S * V^2 * (V_1 - V_2) \quad (3)$$

Exprimons maintenant que la puissance absorbée par l'aéromoteur est égale à la variation ΔT de l'énergie cinétique de la masse d'air qui traverse par seconde l'éolienne. Ainsi on a :

$$\Delta T = \frac{1}{2} \rho * S * V (V_1^2 - V_2^2) = P = \rho * S * V^2 (V_1 - V_2) \quad (4)$$

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (5)$$

En remplaçant (5) dans (2) et (3) et en dérivant P par rapport à V_2 ; $dP/dV_2=0$ admet comme racine puissance maximale susceptible d'être recueillie par les pales :

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho * \pi * R^2 * V_1^3 \quad (6)$$

Et la puissance mécanique disponible sur l'arbre de l'aérogénérateur s'exprime par l'équation suivant [3]:

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) * \pi * R^2 * V_1^3 \quad (7)$$

Avec : $\lambda = \frac{R\Omega}{V_1}$ vitesse spécifique

ρ : densité de l'air, environ 1,3 kg/m³

S : surface balayée par l'hélice en m²

V_1 : vitesse du vent en m/s

P_m : puissance en Watts

R : rayon du rotor

Ω : Vitesse angulaire de rotation

C_p : Coefficient de puissance (en fonction de λ et β)

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp\left(-\frac{C_5}{\lambda_1}\right) + C_6 \lambda \quad (8)$$

En tenant compte du rapport du multiplicateur de vitesse K , la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) * \left(\frac{R\Omega_2}{KV_1}\right) * \rho * \pi * R^2 * V_1^3 \quad (9)$$

Avec

Ω : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (figure 1-6) [5].

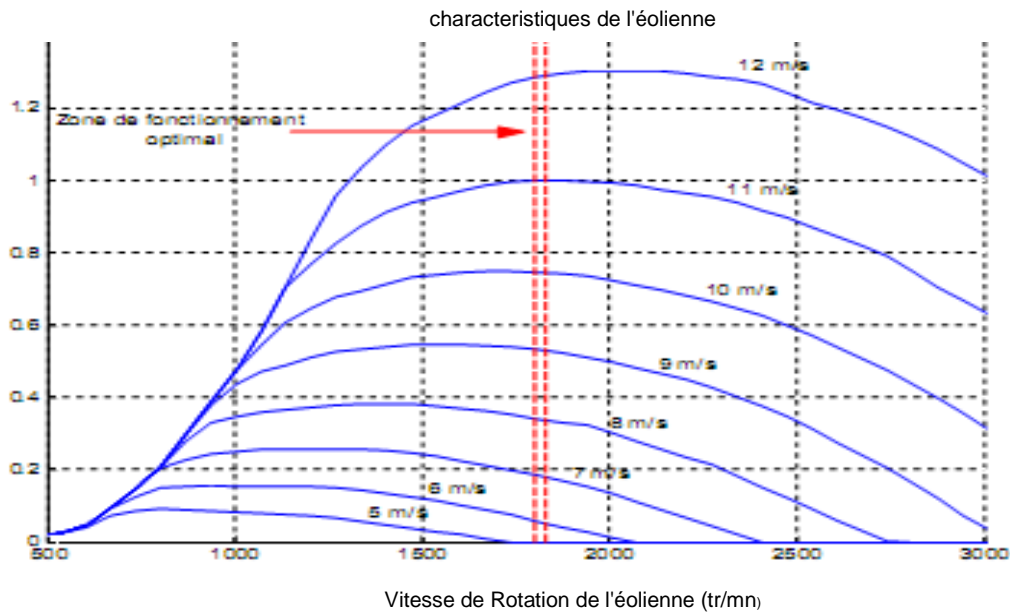


Figure 1-6 : Puissance théorique disponible d'une éolienne donnée

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1500 tr/min sur la Figure 1-6) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1250 et 2000 tr/min pour cet exemple

I.4.4. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

I.5.4.1 Système à décrochage aérodynamique "stall"

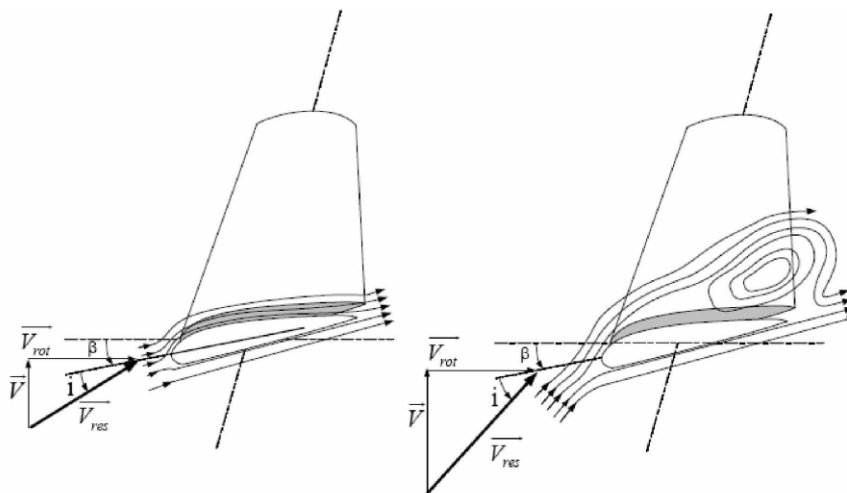


Figure 1-7 : Flux d'air sur un de pales profile (stall)

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 V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure 1-7) 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 la vitesse du vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante [4].

I.4.4.2. Système d'orientation des pales "pitch"

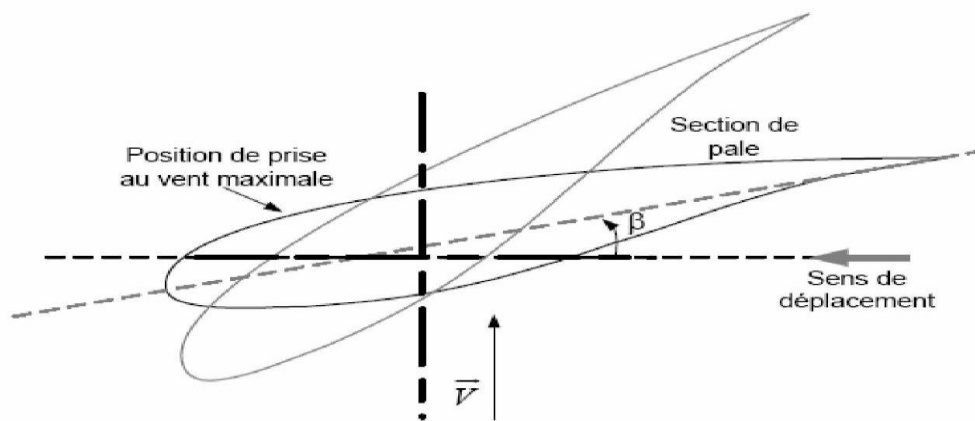


Figure 1-8 : Variation de l'angle de calage d'une pale

Il utilise la variation de l'angle de calage des pales (figure 1-8). En variant l'angle d'incidence de la pale, on modifie le rapport entre les composantes de portance et de traînage. L'angle d'incidence optimal conduit à la puissance maximale disponible. En général, la modification de l'angle de calage de la pale de l'éolienne permet quatre actions distinctes :

- *le démarrage à une vitesse du vent [Vd] plus faible ;
- * l'optimisation du régime de conversion de l'énergie, quand la vitesse du vent évolue entre les limites [Vd, Vn] en complément de la vitesse variable dans une plage relativement réduite (1 à 2 voire 1 à 3 pour un rapport (Vn/Vd) de l'ordre de 4 à 5) ;
- * la régulation par limitation de la puissance pour $V > V_n$;
- * la protection de l'éolienne contre les vents trop violents, par la mise en « drapeau » des pales de l'hélice. On remarque que ce système intervient dans le fonctionnement de la turbine, par la variation du calage β , de manière prépondérante depuis le démarrage (figure 1-9) (zone I) et dans le régime de régulation de vitesse (zone II et III) jusqu'au phénomène de décrochage aérodynamique (zone IV) de la turbine, [17].

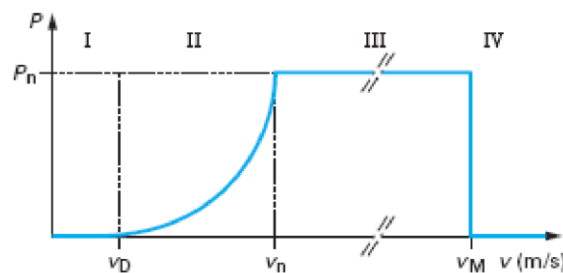


Figure 1-9 : Courbe typique de régulation

I.4.4.3. Modèle de la turbine éolienne

Le modèle est basé sur les caractéristiques de puissance en état d'équilibre de la turbine. La rigidité de l'arbre d'entraînement est supposée infinie, le coefficient de frottement et l'inertie de la turbine doivent être combinés avec ceux du générateur couplé à la turbine (figure 1-11). La puissance de sortie est donnée par l'équation suivante que nous normaliserons en pu :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) * \pi * R^2 * V_1^3 \quad (10)$$

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp\left(-\frac{C_5}{\lambda_1}\right) + C_6 \lambda \quad (11)$$

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la figure 1-10. La valeur maximale de C_p ($C_{pmax}=0.48$) est atteinte pour $\beta=0$ et $\lambda=8.1$. Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur nominale λ_{nom} [5].

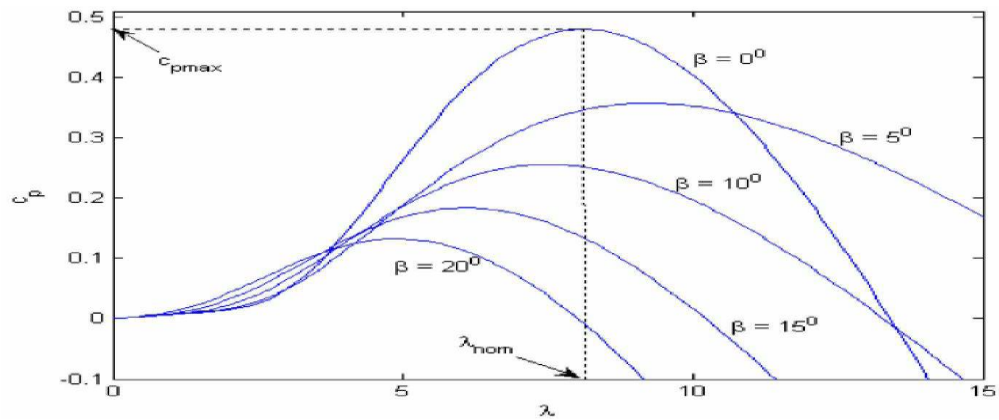


Figure 1-10 : coefficient de puissance

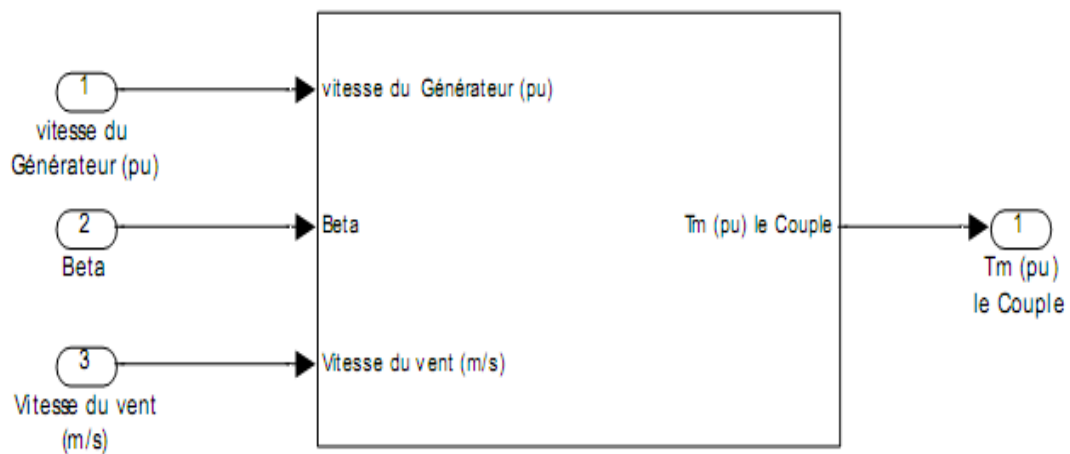


Figure 1-11: Modèle en bloc de la turbine

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz), nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation. Enfin nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques. Il est à noter que pour qu'un projet éolien soit rentable, il est essentiel de s'assurer que l'on dispose d'une ressource suffisante car la vitesse moyenne du vent sur un site est un facteur déterminant du fait que l'énergie produite varie proportionnellement au cube de cette vitesse. Un site idéal bénéficie de vents assez forts et constants

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

1. Introduction

Nous avons vu au chapitre précédent que le fonctionnement à vitesse fixe donne une efficacité réduite de l'éolienne à la vitesse de vent élevées. Pour répondre à cette contrainte on a choisi la machine asynchrone à double alimentation.

La machine à double alimentation porte un caractère qui permet à cette dernière d'occuper un large domaine d'application. Soit dans les entraînements à vitesses variables (fonctionnement moteur), soit dans les applications à vitesse variables et à fréquence constante (fonctionnement générateur).

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation et la commande vectorielle en puissance active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation à rotor bobine fonctionnement génératrice.

2. Modélisation de la MADA

La modélisation des machines électriques consiste en élaboration des modèles mathématique qui permettent de prédire le comportement de la machine dans différents régimes de fonctionnement, en prévoyant ainsi les points qui risquent de provoquer des perturbations.

2.1. Hypothèses Simplificatrices

La machine asynchrone comprend une répartition des enroulements et une géométrie très complexe. Par conséquent, pour analyse tenant compte de sa configuration exacte il est nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices suivantes [7] :

- *On suppose les circuits magnétiques non saturés. Les relations entre les flux et les courant sont constant d'ordre linéaire ;
- *On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé ;
- *Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés ;
- *Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoidalement le long de la périphérie des deux armatures ;
- *On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles

sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.

2.2. Modèle mathématique de la MADA

2.2.1. Equation électrique de la MADA

Les équations des tensions statoriques, peuvent être exprimées, en utilisant la notion matricielle, par [7] :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad (2.1)$$

Les équations des tensions rotoriques, peuvent être exprimées par [15]:

$$[V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \quad (2.2)$$

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

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

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

$$[\Phi_s] = [L_{ss}].[i_s] + [M_{sr}].[i_r] \quad (2.3)$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}].[i_r] + [M_{sr}]^t.[i_s] \quad (2.4)$$

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

$$\text{et } [M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

En remplaçant les relations (2.3) et (2.4) respectivement dans les relations (2.1) et (2.2), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}]\frac{d}{dt}[i_s] + \frac{d}{dt}([M_{sr}].[i_r]) \quad (2.5)$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}]^t \cdot [i_s]) \quad (2.6)$$

2.2.2. Equation mécaniques de la MADA

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_e = \frac{1}{2} p [i]^T \frac{d[L]}{dt} [i] \quad (2.7)$$

Avec:

$[i]$: Matrice de courant total.

$[L]$: Matrice inductance totale.

p : est le nombre de paire de pôle.

L'équation mécanique est exprimée comme suit :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - K_f \Omega \quad (2.8)$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables ((2.5) et (2.6)). L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide des équations différentielles à coefficients constants.

Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de Park. (Figure 2.1).

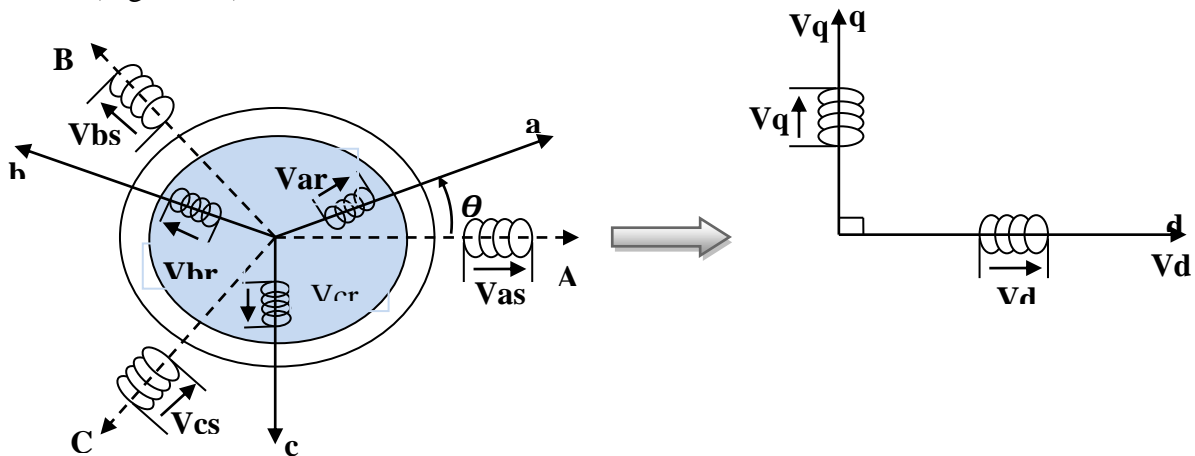


Figure 2.1 - Modèle de PARK de la MADA.

2.3. Modèle diphasé de la MADA

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis

et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d, q) donné par la transformation de Park est alors utilisé [4]. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par [8]:

$$[P(\theta_s)] = K \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Dans le cas de la conservation de la puissance nous avons $K = \sqrt{\frac{2}{3}}$.

Il est noté par θ_s (resp. par θ_r) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. rotoriques) (**figure 2.2**).

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

$$\theta + \theta_r = \theta_s \quad (2.8)$$

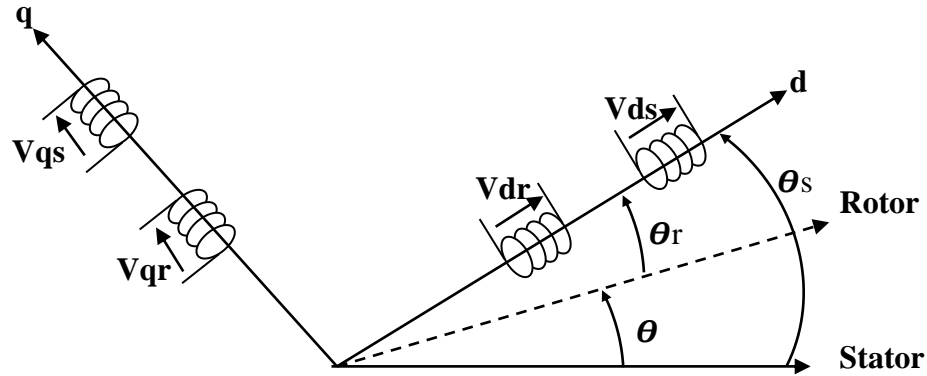


Figure 2.2 - Représentation de la machine dans le repère diphasé.

2.3.1. Equation des tensions

Nous appliquons la transformation de Park à l'expression (2.1) et en multipliant les deux membres de l'égalité par $[P(\theta_s)]$ et en simplifiant, nous aurons :

$$[V_{sdq}] = [R_s][i_{sdq}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sdq}] + [P(\theta_s)] \frac{d}{dt} [P^{-1}(\theta_s)] [\Phi_{sdq}] \quad (2.9)$$

L'expression (2.9) devient alors :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

De manière similaire, et en suivant les mêmes étapes, nous obtenons pour le rotor l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{d\theta_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

On écrit :

$$\begin{cases} [V_{ds}] = [R_s][i_{ds}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{ds}) - \omega_s \Phi_{qs} \\ [V_{qs}] = [R_s][i_{qs}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{qs}) + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (2.12)$$

Par analogie, on obtient pour les grandeurs rotoriques les tensions suivantes:

$$\begin{cases} [V_{dr}] = [R_r][i_{dr}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{dr}) - (\omega_s - \omega)\Phi_{qr} \\ [V_{qr}] = [R_r][i_{qr}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{qr}) + (\omega_s - \omega)\Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.13)$$

Avec : $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$; $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega = g\omega_s = \omega_r$

2.3.2. Equation des flux

Nous appliquons la transformation de Park à l'expression (2.3) :

$$[\Phi_{sdq}] = [P(\theta_s)] \cdot [L_{ss}] [P^{-1}(\theta_s)] [i_{sdq}] + [P(\theta_s)] \cdot [M_{sr}] [P^{-1}(\theta_r)] [i_{rdq}] \quad (2.14)$$

En introduisant les inductances cycliques :

$$L_s = l_s - M_{sr}$$

$$L_m = \frac{3}{2} M_{sr}$$

L'expression (2.12) devient alors :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

De la même manière, en appliquant la transformation de Park a l'équation du flux rotorique, et en introduisant l'inductance cyclique :

$$L_r = l_r - M_r$$

On aura :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

2.3.3. Equation du couple électromagnétique

Après qu'on effectué le changement de variable, l'expression du couple électromagnétique peut être exprimé sous différentes formes, on trouve celle-ci [8] :

$$C_e = p(\Phi_{ds}i_{qs} - \Phi_{qs}i_{ds}) \quad (2.17)$$

3. Commande vectorielle de la MADA

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

Dans cette optique, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière, met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [6].

3.1. Principe général

Le principe général de la commande vectorielle en puissances active et réactive est illustré sur la figure (2.3).

Dans le cadre de ce mémoire, nous développons la commande vectorielle en puissance active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère (d - q) suivant le flux statorique. Pour établir cette commande, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques et rotoriques de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc, toutes les composantes homopolaires sont nulles.

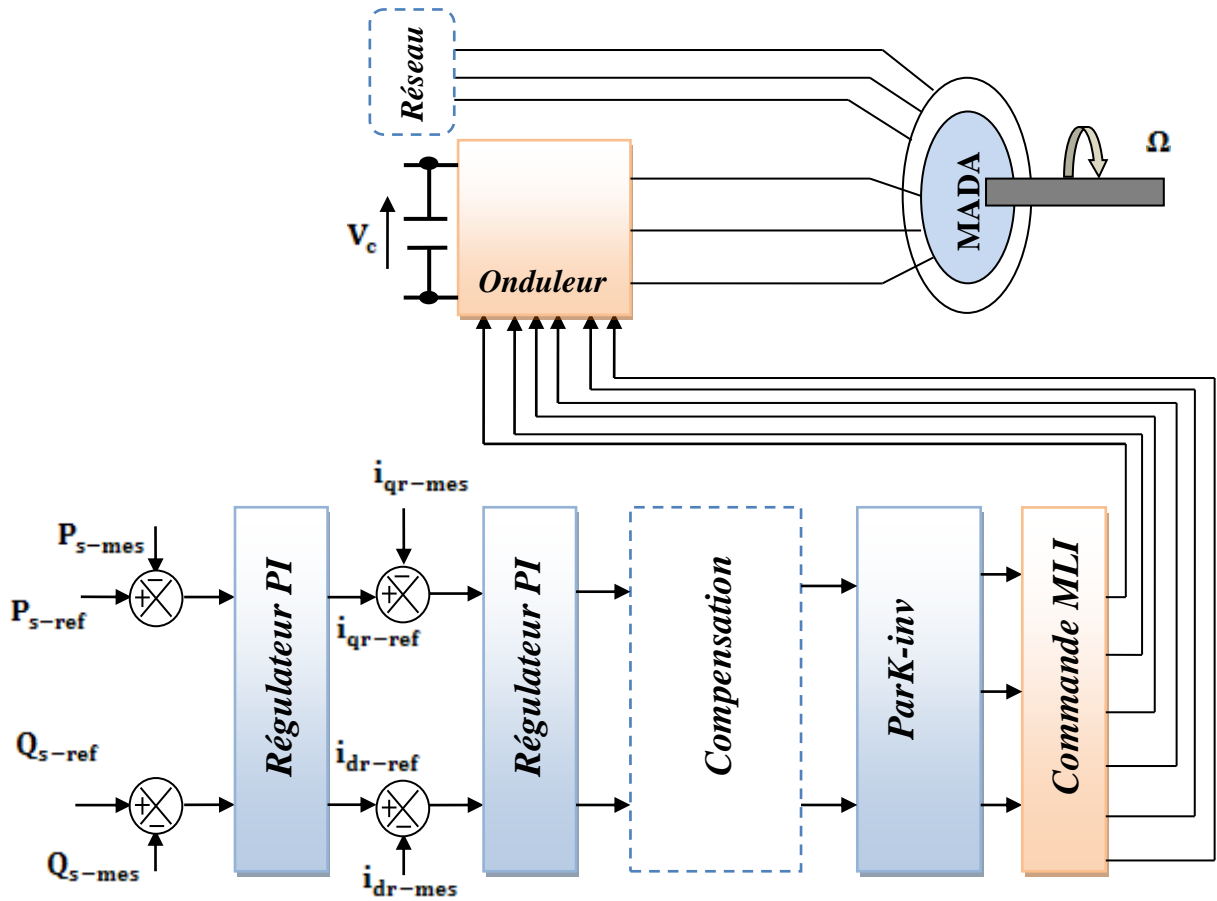


Figure 2.3 : Principe général de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique

3.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

On rappelle d'abord le système d'équations différentielles de la machine [6] :

$$\begin{cases} [V_{ds}] = [R_s][i_{ds}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{ds}) - \omega_s \Phi_{qs} \\ [V_{qs}] = [R_s][i_{qs}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{qs}) + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} [V_{dr}] = [R_r][i_{dr}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{dr}) - (\omega_s - \omega)\Phi_{qr} \\ [V_{qr}] = [R_r][i_{qr}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{qr}) + (\omega_s - \omega)\Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.19)$$

3.2.1. Choix du référentiel pour le modèle diphasé

En orientant l'un des flux, le modèle obtenu de la MADA se simplifie et le dispositif de commande qui en résulte l'est également. Un contrôle vectoriel de cette machine a été conçu en orientant le repère de Park pour que le flux statorique suivant l'axe q soit constamment nul [6].

Nous pouvons écrire :

$$\Phi_{ds} = \Phi_s ; \Phi_{qs} = 0$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_r \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.21)$$

Dans le repère triphasé a, b, c, la tension aux bornes d'une phase n du stator s'exprime par la relation générale :

$$V_{ns} = R_s i_{ns} + \frac{d\Phi_{ns}}{dt} \quad (2.22)$$

Si l'on néglige la résistance R_s , cette relation devient [6]:

$$V_{ns} \approx \frac{d\Phi_{ns}}{dt} \quad (2.23)$$

Cette relation montre qu'un repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur tension statorique et qu'il est en avance de $\frac{\pi}{2}$ sur ce même vecteur.

Toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant, on peut écrire :

$$V_{ds} = 0 ; V_{qs} = V_s \quad (2.24)$$

Dans l'hypothèse où le flux Φ_{ds} est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator), le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendants du courant rotorique d'axe q.

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_e = p \frac{M}{L_s} \Phi_{ds} i_{qr} \quad (2.25)$$

Le courant i_{qr} sera rendu variable par action sur la tension V_{qr} , le flux peut être contrôlé par le réglage du courant i_{dr} . Ce dernier est rendu variable par action sur la tension V_{dr} [5], [6].

En utilisant les simplifications ci-dessus, nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_{ds} = \omega_s \Phi_s \\ V_{ds} = 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (2.27)$$

3.2.2. Relation entre le courant statorique et le courant rotorique

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statoriques (équation 2.27), nous pouvons écrire les équations liant les courant statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (2.28)$$

3.2.3 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques :

Dans un repère diphasé, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (2.29)$$

L'adaptation de ces équations au système d'axe choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{ds}=0$) donne :

$$\begin{cases} P_s = V_s i_{qs} \\ Q_s = V_s i_{ds} \end{cases} \quad (2.30)$$

En remplaçant i_{ds} et i_{qs} par leurs expressions données à l'équation (2.30), nous obtenons :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \Phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (2.31)$$

A partir de l'équation (2-26), on peut avoir :

$$\Phi_{ds} = \Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$$

L'expression de la puissance réactive Q_s devient alors :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} i_{dr} \quad (2.32)$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites, et si l'on considère l'inductance magnétisante M comme 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 à la constante $V_s^2/L_s \omega_s$ près imposée par le réseau [6].

3.2.4. Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques

D'abord, pour les flux on a :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (2.33)$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (2.34)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions, on aura :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \end{cases} \quad (2.35)$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe d et q sont alors intégrées aux expressions tensions rotoriques diphasées de l'équation (2.21). Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (2.36)$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (2.37)$$

En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations, on obtient :

$$\begin{cases} V_{dr} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) P \right] i_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ V_{qr} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) P \right] i_{qr} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g\omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (2.38)$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes déphasées des tension rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus ;

* $[L_r - (M^2/L_s)]$: est le terme de couplage entre les deux axes ;

* $[g\omega_s (M V_s / \omega_s L_s)]$: représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation ;

Les équations précédentes montrent que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à influence des couplages près, chaque axe peut être commandé avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront : La puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire du côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée au réseau [9].

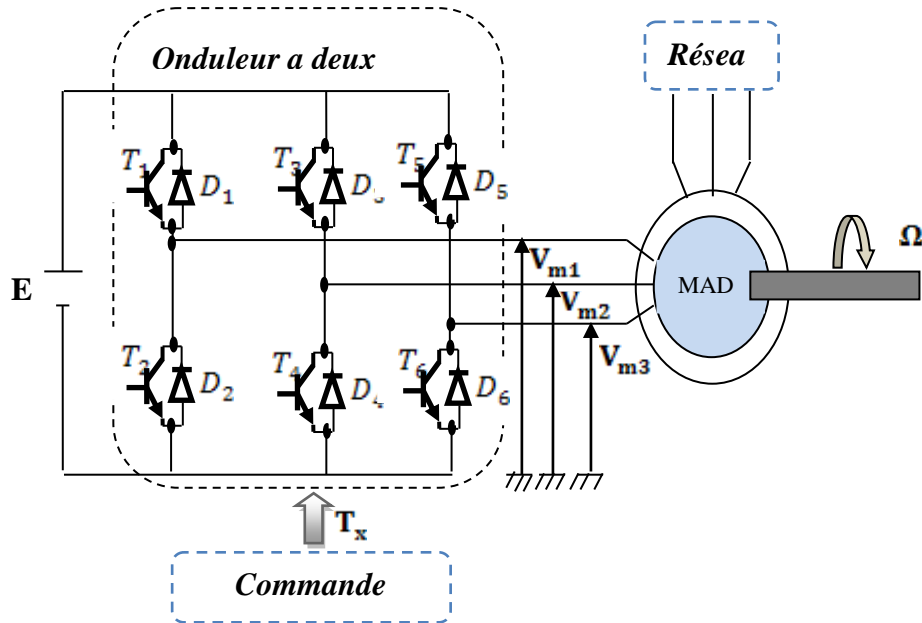
3.3. Type de régulateur utilisé

Nous allons maintenant procéder à la synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de la commande en puissance active et réactive de la MADA. Le régulateur Proportionnel Intégral (PI) reste le plus communément utilisé pour la commande de la MADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industrielle. Les régulateurs de chaque axe ont pour rôle d'annuler l'écart entre les puissances actives et réactives de références et la puissance active et réactive mesurée. Le dimensionnement du régulateur PI est présentée dans l'annexe. Dans notre cas, la variable Y à contrôler est remplacée par i_{dr}, i_{qr} P et Q [9].

4. Onduleur de tension à 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 [10].



Ou : **Figure 2.4** : Schéma électrique de la liaison de rotor via un convertisseur MLI

- E : la tension du bus continu.
- V_{m-i} : avec $i \in \{1,2,3\}$ sont les tensions simples modulées par le convertisseur MLI.
- T_i, D_i : avec $i \in \{1,2,3,4,5,6\}$ désignent respectivement le transistor IGBT et la diode en anti parallèle.

4.1. Modèle de l'onduleur a deux niveaux

La symétrie des onduleurs à deux niveaux permet leur modélisation par bras. Après avoir modélisé chaque couple transistor – diode par un seul interrupteur bidirectionnel « S_i ». Il devient possible de déduire un modèle complet de l'onduleur (Figure 2.5).

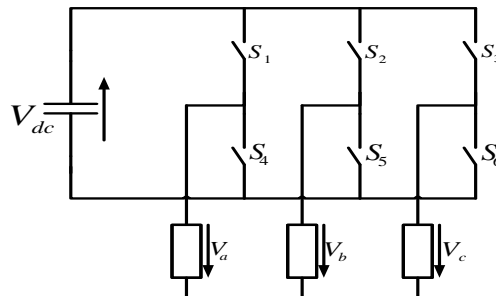


Figure 2.5 : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

5. Résultat et interprétation

A l'aide du logiciel MATLAB, les résultats de simulation obtenus vont permettre de montrer les performances de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique appliquée à une machine asynchrone à double alimentation, le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1350 tr/min, pilotée par un onduleur à deux niveaux.

*A $t=0s$: échelon négatif pour la puissance active (P_{Sref} passe de 0 à -1,5MW).

*A $t=0,5s$: Connexion du stator à une source triphasée parfaite d'amplitude égale 690v et de fréquence 50Hz

*A $t=1s$: échelon positif pour la puissance active (P_{Sref} passe de -1,5MW à +1,5MW).

*La puissance réactive (Q_{Sref}) est maintenue nulle.

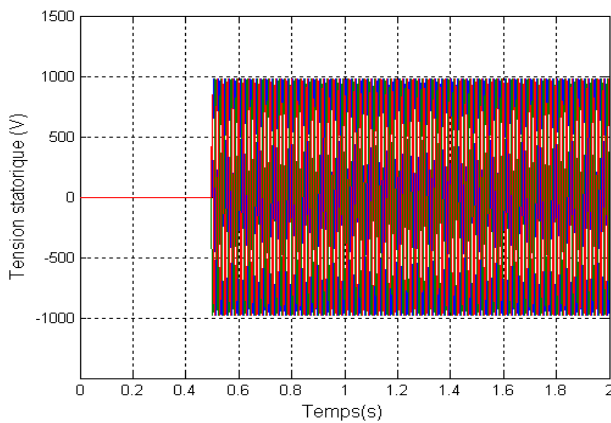


Figure 2.7 : La tension statorique

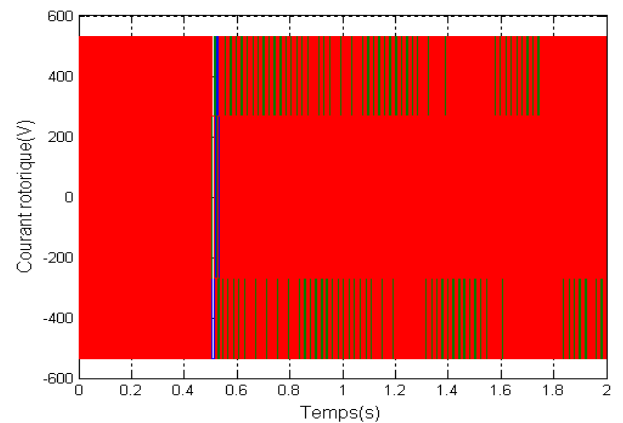


Figure 2.8: La tension rotorique

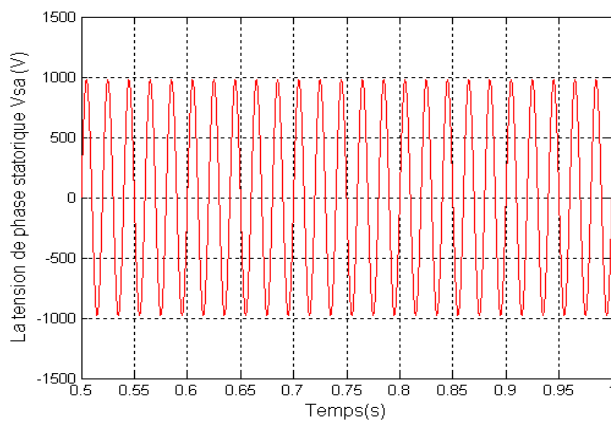
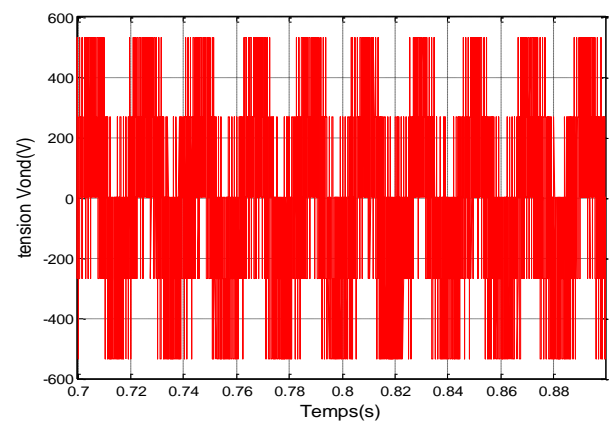


Figure 2.9 : La tension de phase statorique est la tension ondulée



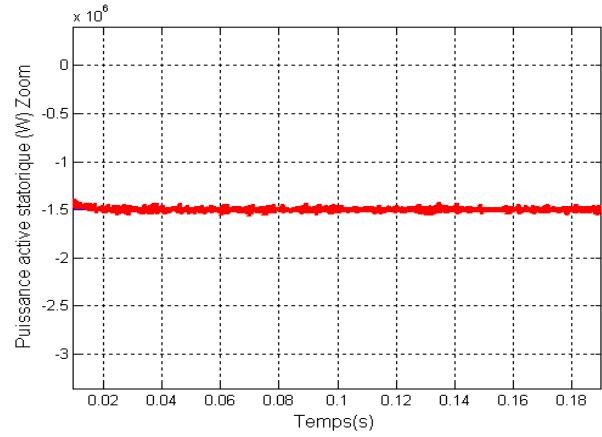
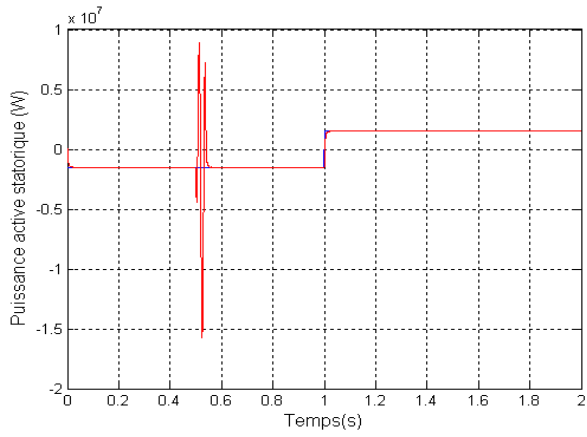


Figure 2.10 : La puissance active avec un zoom

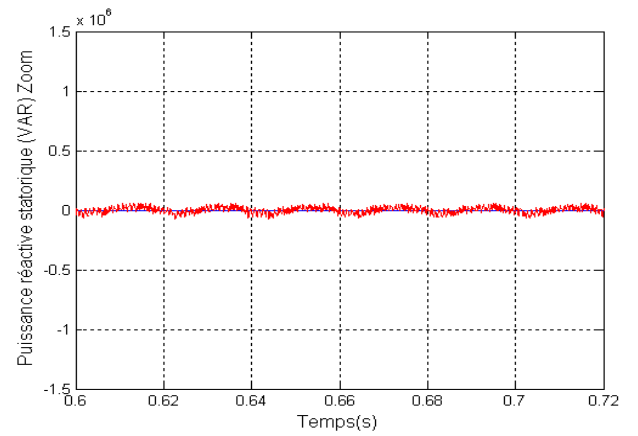
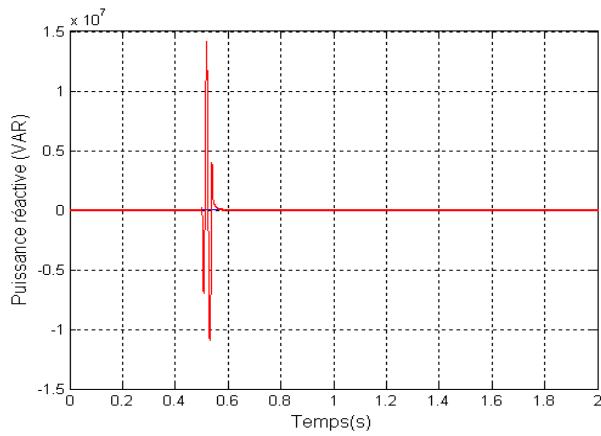


Figure 2.11: La puissance réactive avec un zoom

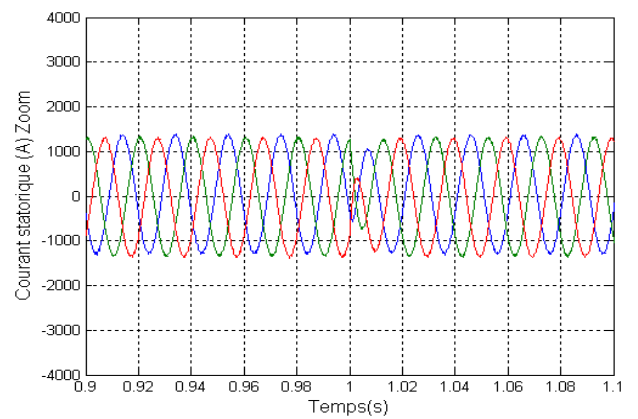
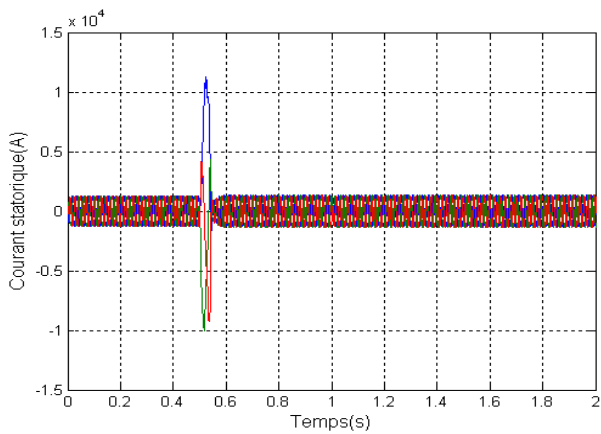


Figure 2.13 : Le courant statorique avec un zoom

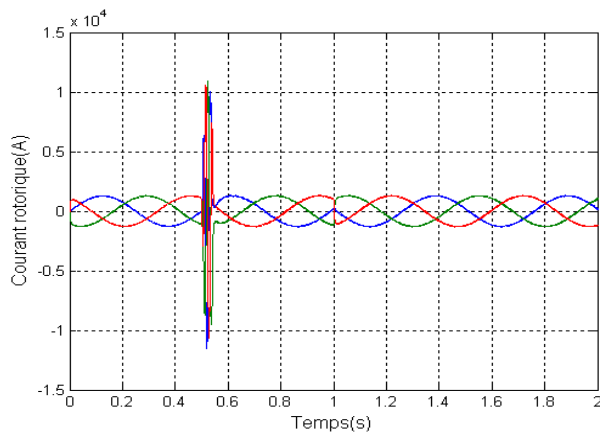


Figure 2.14: Le courant rotorique

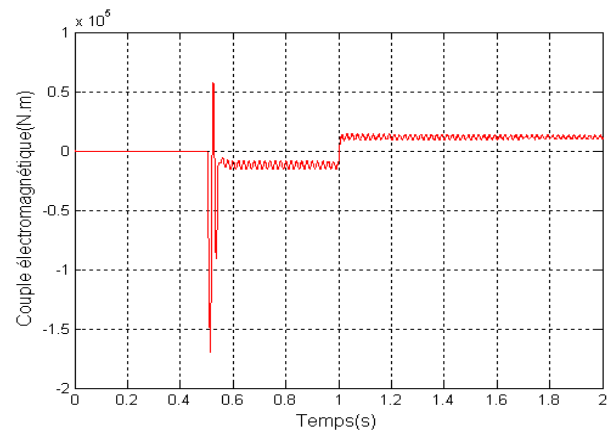


Figure 2.15 : Le couple électromagnétique

A travers les résultats de simulation, il est bon noter le suivi de consigne pour la puissance active et réactive statorique. A $t=0s$ un échelon négatif de (-1.5 MW) est appliqué, et à $t=1s$ on fait un changement de signe pour la même consigne, on remarque que la puissance active statorique suit toujours sa référence, pour l'échelon de la puissance réactive statorique est maintenu nulle, et la puissance réactive réelle produite par la MADA oscille autour de cette consigne (0VAR).

On constat aussi que les courant statoriques et rotoriques de la MADA sont sinusoïdales mais de fréquences différent (50Hz pour les courant statorique et 5Hz pour les courant rotoriques), a $t=0.5s$ on connecte le stator de la MADA a une source de tension triphasée parfaite d'amplitude ($690 * \sqrt{2}$ v) qu'on suppose comme un réseau électrique dans le cas réel. On constat que les grandeurs de la génératrice sont due des oscillations au moment de la connexion qui sont dues aux couplages entre les axes. Et après un temps bref, les grandeurs se stabilisent ce qui confirme les performances de la commande appliquée. Le couple électromagnétique est nul avant la connexion du stator au réseau et prend sa valeur après le régime transitoire.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les équations électrique et dynamique de la MADA utilisé en génératrice cela nous a permis d'établir un modèle de Park qui réduit le système électrique de la machine de six à quatre équations.

Par la suite nous avons exposé le principe de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique, deux boucles de régulation ont été présentées l'une régule la puissance active et l'autre régule les courants par des régulateurs PI. Un choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d, par conséquent la puissance active sera dépendante uniquement I_{qr} .

A la fin de ce chapitre on a présenté les résultats de simulation qui ont été obtenus en utilisant un onduleur de tension à deux niveaux alimenté par une tension continue considérée constante est contrôlé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI), dans le troisième chapitre cette tension sera fournie par un redresseur de tension lié au réseau électrique.

1- Introduction

La turbine éolienne permet la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique transmise à l'ordre de la génératrice. Les différents éléments constituant une éolienne sont conçus pour maximiser la conversion énergétique [11], .L'objectif est d'avoir un bon compromis entre la caractéristique couple/vitesse de la turbine et de la génératrice. Pour satisfaire cela, l'éolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement et électriquement.

Dans ce chapitre nous allons traiter l'alimentation continue de l'onduleur de tension qui est supposé constante dans le chapitre précédent, ceci comprendra son maintien à la valeur désirée et limitation des harmoniques injectées dans le réseau par l'utilisation d'un redresseur commandé par la technique MLI. L'ensemble composé du redresseur, du bus continu et de l'onduleur formera la cascade qui sera la liaison entre le rotor et le réseau, par la suite, on a modélisera la turbine, son contrôle, et puis, l'asservissement de toute la chaîne de conversion éolienne.

2 -Modèle de la chaîne de conversion

2.1Description du de montage

Tel que décrit dans la section précédente l'onduleur alimentant le rotor de la MADA doit être lui-même alimenté par une tension continu, qui est fournie par un redresseur de tension liant le réseau à l'onduleur. La structure montrée sur la figure (3.1) comporte deux convertisseurs à MLI, l'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des signaux dont la modularité permet de limiter les perturbations [12].

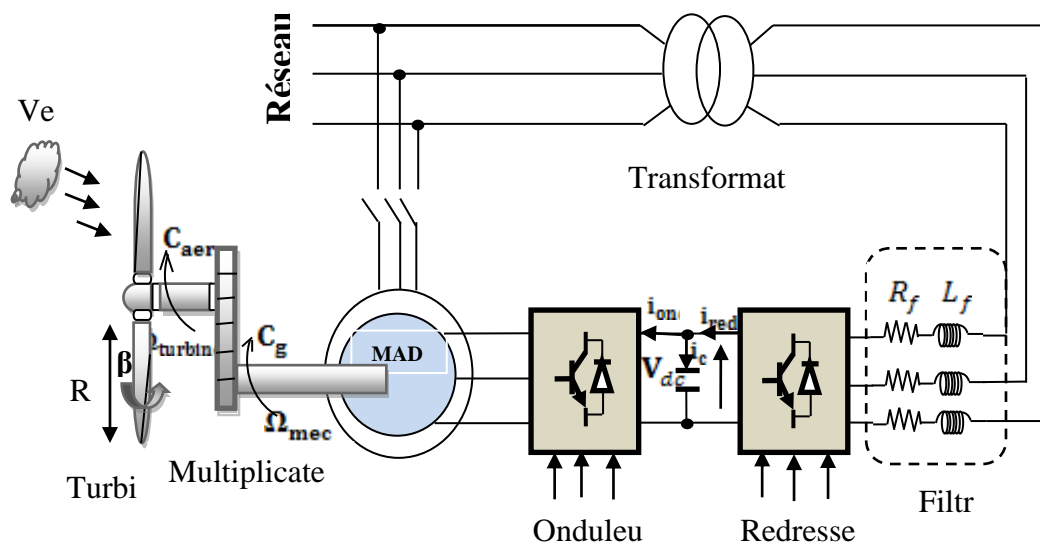


Figure (3.1) : Modèle de la chaîne de conversion éolienne.

Les deux convertisseurs interposés entre le rotor et le réseau sont à deux niveaux, Commandés par MLI, ils sont bidirectionnels en puissance, donc répondant aux exigences de ce type d'application. Le convertisseur côté réseau aura le même modèle que celui de l'onduleur tel que décrit précédemment, Sauf que signaux de commande seront déterminés en faisant un asservissement de la tension du bus continu.

Après avoir repoussé les harmoniques générées par le redresseur vers un rang supérieur grâce à la technique MLI, celles-ci doivent être atténuées grâce à un filtre liant le réseau au redresseur. Ce filtre étant passe bas, la qualité du réseau sera améliorée en y atténuant les harmoniques supérieurs.

Le rotor de la MADA est entraîné par la turbine qui sera détaillée dans les paragraphes qui suit.

2.2. Redresseur de tension

Le rôle du redresseur de tension est de fournir la tension continue à partir de la tension alternative du réseau. La commande par MLI permet le contrôle des courants injectés par ce convertisseur dans le réseau .Ainsi, il est possible de contrôler la puissance réactive permettant à ce type de redresseur de ne pas dégrader le facteur de puissance de réseau. En outre, les formes d'ondes des courants alternatifs peuvent être sinusoïdales et ainsi repousser les harmoniques vers des fréquences élevées [11].

2.2.1. Modélisation du redresseur

Le redresseur est à deux niveau, son modèle est identique à celui de l'onduleur étudié précédemment, tel que [10]:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Et le courant redressé est donné par :

$$I_{red} = \begin{bmatrix} S_a & S_b & S_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

2.2.2. Commande du redresseur

Ce type de commande permet de fixer un courant de référence dans les lignes du réseau électrique avec deux degrés de liberté, l'amplitude et la fréquence. Le principe de cette stratégie est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de référence [14].

3. Modélisation de la turbine

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

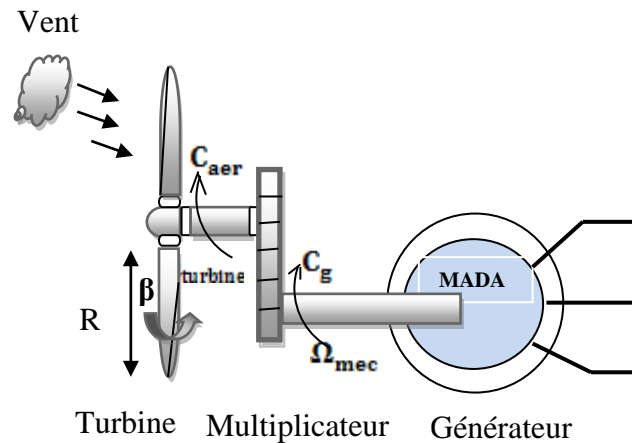


Figure 3.4 : Schéma d'une turbine éolienne.

3.1. Modèle de multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice, mathématiquement elle est modélisée par les équations suivantes [4] :

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (3.3)$$

Avec :

C_g : Couple issu du multiplicateur.

C_{aer} : Couple aérodynamique.

G : Gain du multiplicateur

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{\text{turbine}} = \frac{\Omega_{\text{mec}}}{G} \quad (3.4)$$

3.2. Equation dynamique de l'arbre

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

$$J_t \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} + f_{\text{mec}} = \sum \text{des couples} \quad (3.5)$$

Avec :

J_t : Inertie totale comprenant l'inertie de la génératrice et celle de la turbine.

f : coefficient de frottement visqueux.

3.3. Schéma bloc du modèle de la turbine

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

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

La turbine peut être ainsi commandée par l'action du couple électromagnétique du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation (Figure3.5).

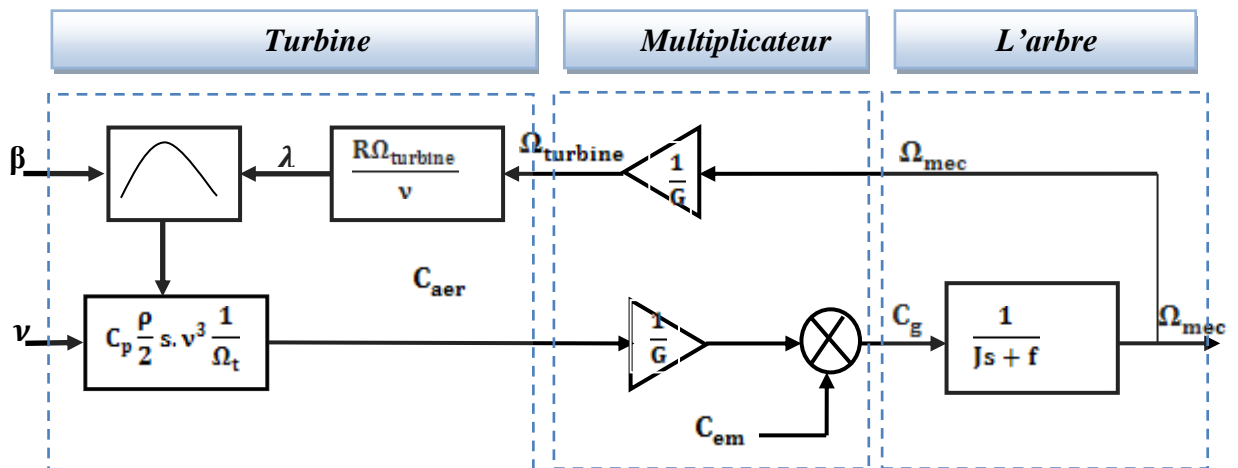


Figure (3.6):Schéma bloc du modèle de la turbine

4. Les différents zones de fonctionnement de l'éolienne a vitesse variable

Comme il est illustré sur la figure (3.7), on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement [6].

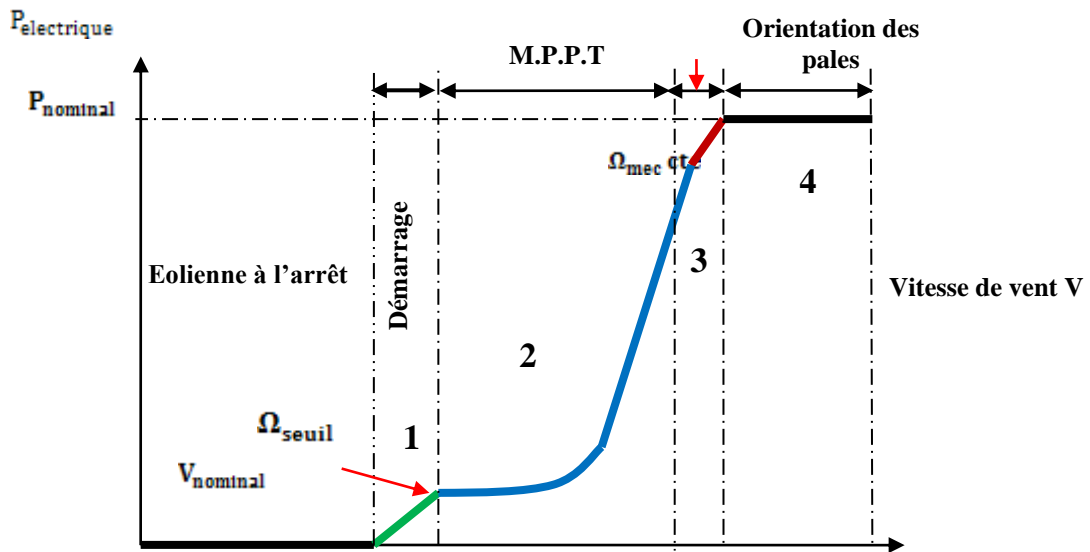


Figure 3.7: Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

- **Zone1** : C'est la zone de démarrage de la machine, elle démarre lorsque la vitesse mécanique atteint une valeur minimale. (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour la quelle éolienne a démarré).
- **Zone2** : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un C_p maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.
- **Zone3** : Dans cette zone l'éolienne fonctionne à vitesse constante, et la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .
- **Zone4** : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales. (angle de calage), c'est le «**Pitch Control**».
- Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la **zone 2** ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique générer

5. Système de la chaîne globale

La structure globale de la chaîne étudiée est constituée d'une MADA entraînée par une turbine éolienne et présenté sur la figure3.8 [4] :

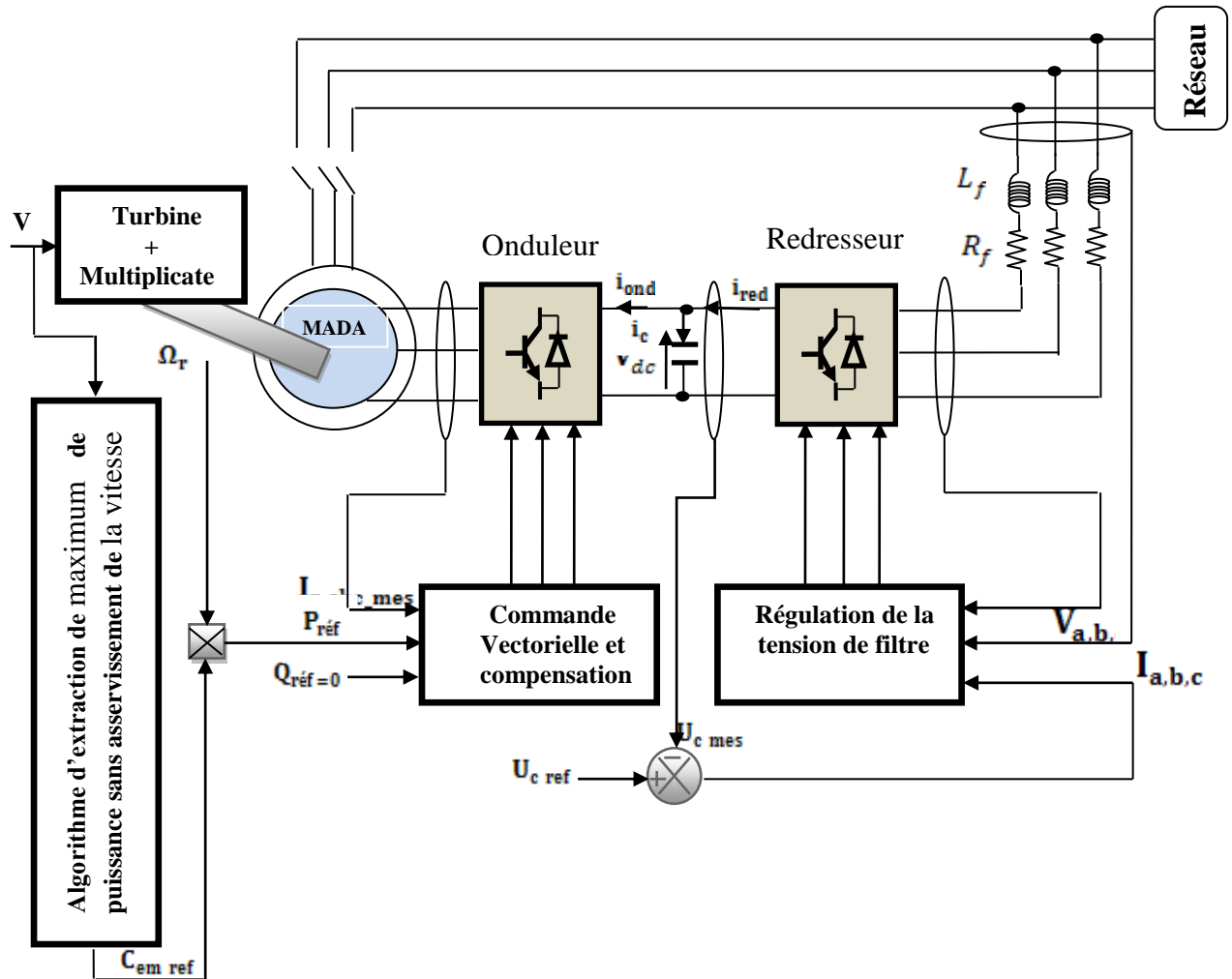


Figure 3.8 : structure de la chaîne globale

6. Résultats de simulation

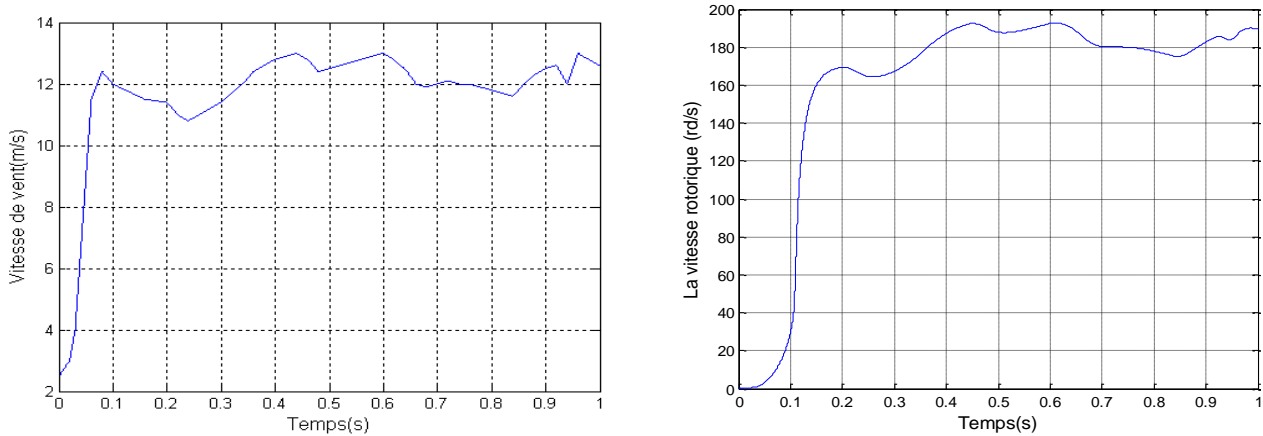


Figure 3.9: Le profil du vent appliqué et la vitesse de rotor (rd/s)

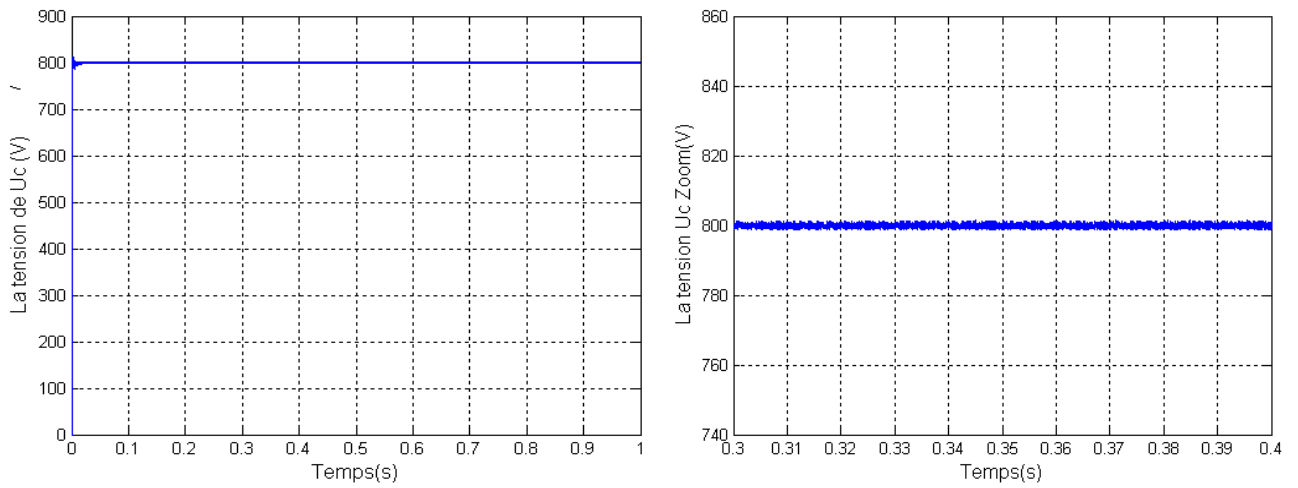


Figure 3.10 : La tension de bus continu avec zoom

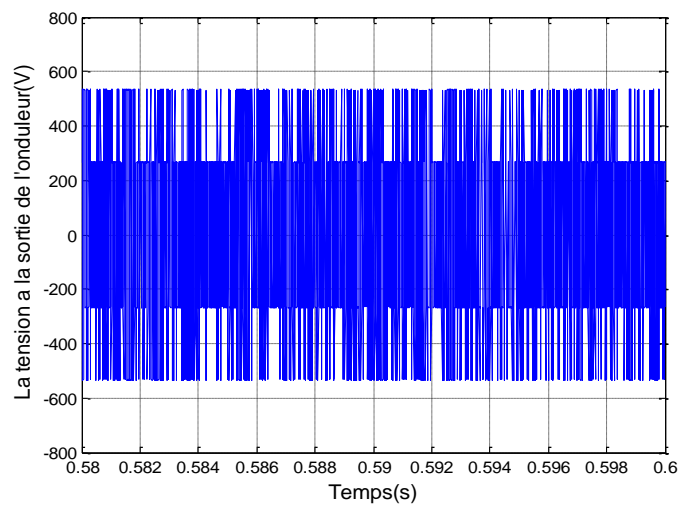


Figure 3.11 : La tension a la sortie de l'onduleur avec Zoom

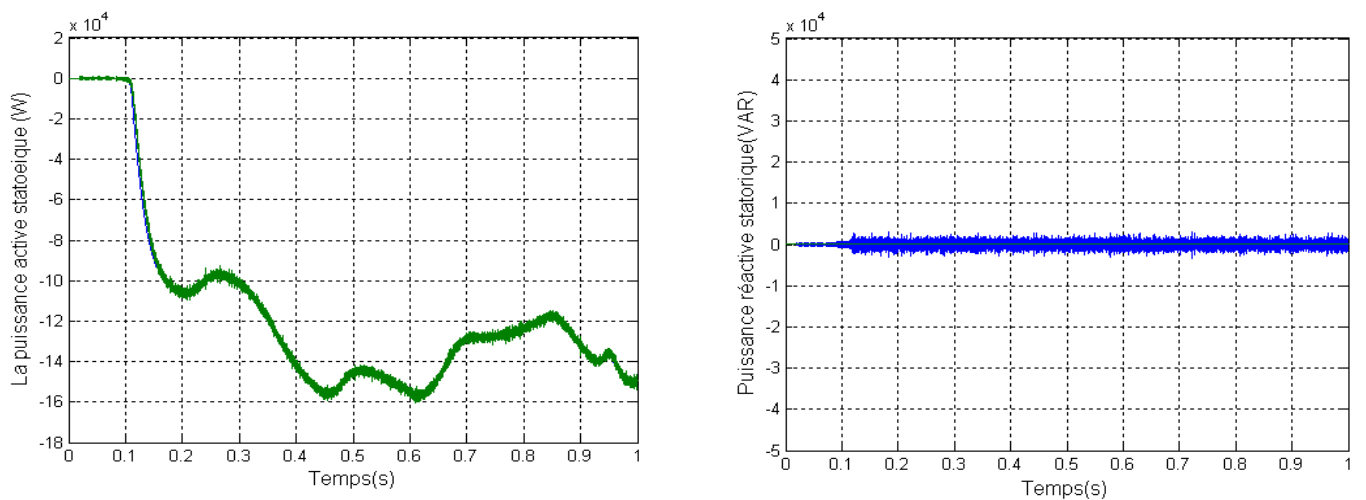


Figure3.12 : La puissance active et réactive statorique

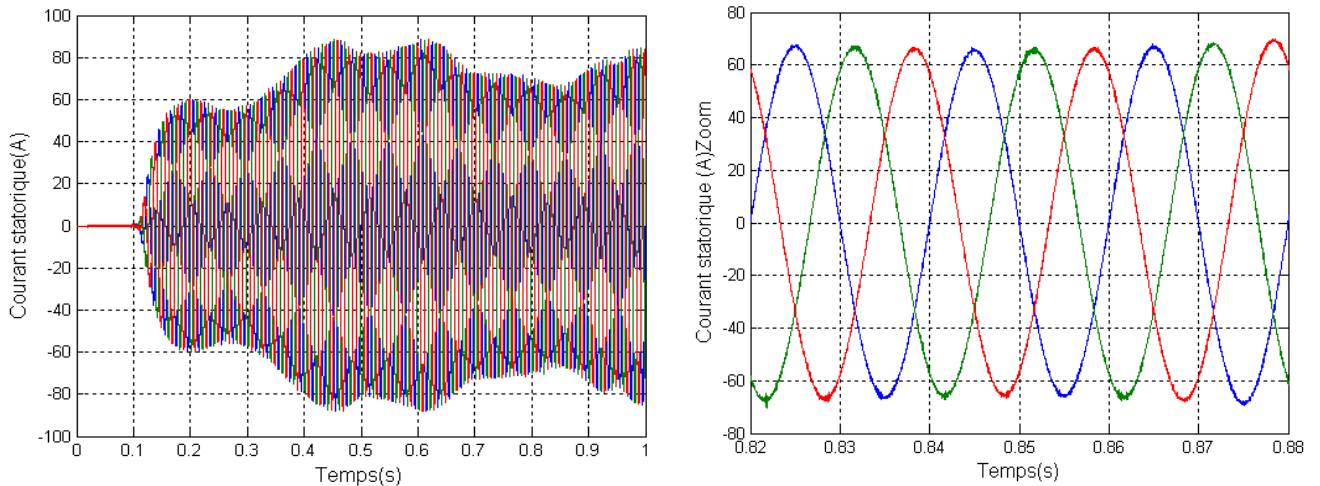


Figure 3.13: Le courant statorique avec Zoom

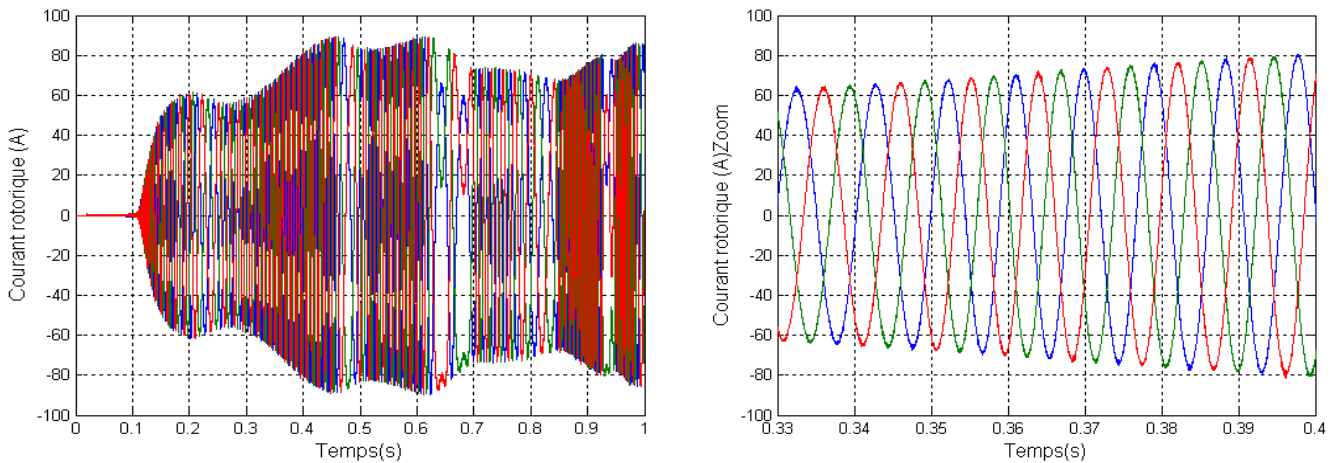


Figure 3.14: Le courant rotorique avec Zoom

6.1. Interprétation des résultats

La figure (3.9) présente le profil du vent supposé et appliqué à la turbine éolienne, sa valeur moyenne est autour de 12.5m/s .

Les résultats de simulation montrent que la tension de bus continu est réglée à une valeur de référence, et suit bien sa consigne qui est 800V figure (3.10), et la tension a la sortie de l'onduleur et a deux niveau figure (3.11). 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 MADA. Donc, la puissance active (figure (3.12)) est adaptée à la variation de la vitesse de la génératrice (figure (3.9)), qui est elle-même adaptée à la variation de la vitesse du profil du vent .Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse du rotor en fonction de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite.

Les courants statorique et rotorique (figure (3.13) et (3.14)) ont pris leurs formes sinusoïdales et sont aussi adaptés à la variation de la vitesse de rotor, et la fréquence rotorique dépend de la vitesse de rotation de l'éolienne.

7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné en premier lieu le modèle de la chaîne étudiée, est on a traité l'alimentation de rotor qui est fournie par deux convertisseur MLI à deux niveaux (onduleur à deux niveaux et redresseur à deux niveaux). La modélisation et l'application du redresseur à MLI, nous a permis la régulation de la tension du bus continu qui est utilisée pour alimenter l'onduleur connecté au rotor de la MADA. Et par la suite, on a modélisé la turbine éolienne, où on a défini aussi les quatre zones de fonctionnement d'une éolienne en général. En dernier lieu, nous avons associés les différentes parties étudiées (Turbine, MADA, et les deux convertisseurs de puissance) qui présente un système éolien global.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Lors de cette étude nous avons modélisé et simulée une chaîne de conversion éolienne. Celle-ci a été suivie d'une commande adaptée en vue d'atteindre les meilleures performances.

Notre travail s'est déroulé selon les étapes suivantes :

Dans le premier chapitre, on a donné des généralités sur les énergies éoliennes et les différents types existants, les différentes génératrices utilisées et le choix de la machine asynchrone à double alimentation, les structures d'alimentation de la MADA associées à des convertisseurs d'électronique de puissance ont été présentées. La structure adoptée est celle qui comporte un système de convertisseurs indirects connecté au rotor de la génératrice (MADA) dont le stator est lié directement au réseau.

Dans le troisième chapitre, on a traité l'alimentation de l'onduleur qui est supposés constante, or cela n'est vrai en pratique que dans le cas des installations de faible puissance qui utilisent des batteries, donc cette alimentation est assurée par un redresseur de tension a deux niveaux à travers un condensateur de lissage. Par la suite, on 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 où on a supposé que la vitesse du vent varie l'égerment au régime permanent. A la fin de ce chapitre, on a rassemblé tous les éléments constituant la chaîne éolienne.

A travers cette étude nous pouvons noter 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.

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuées à l'amélioration du fonctionnement de la MADA sont envisageables :

- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique ;
- Utilisation d'autres types de régulateurs plus performants dans la commande du dispositif ;
- Utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : Logique floue, réseau de neurones.

Annexes

Annexe

Paramètres utilisés

1. Valeurs nominales :

1.5 MW, 690V – 50 Hz.

2. Paramètres de la MADA:

- Résistance statorique: $R_s = 0.012 \ \Omega$.
- Résistance rotorique: $R_r = 0.021 \ \Omega$.
- Inductance cyclique statorique: $L_s = 0.0137 \ H$.
- Inductance cyclique rotorique: $L_r = 0.0136 \ H$.
- Inductance cyclique mutuelle: $L_m = 0.0135 \ H$.
- Le nombre de paires de pôles est: $p = 2$.

3. Paramètres de la turbine éolienne utilisée :

- Nombre de pales = 3.
- Rayon de la surface balayée par les pales : $R = 60m$.
- Gain du multiplicateur : $G = 90$.
- Moment d'inertie de la turbine $J_{turbine} = 50 \text{ kg.m}^2$.
- Coefficient de frottement visqueux : $f = 7.1 \times 10^{-3} \text{ N.m.s/rd}$.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] S. SMAOUN ET N. AMAR "état de l'art des machine d'entraînement pour l'éolienne", Mémoire DEUA, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, Juin 2006.
- [2] Disponible dans : 1).http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9olienne
2).<http://www.wwindea.org>
- [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] 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.
- [7] R. ABDESSAMAD et M. KADJOU DJ, "Modélisation des machines électriques. Presse de l'université de Batna, Algérie, 1997"
- [8] L.BAGHLI, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005.
- [9] R.ACHOURI, M.HIDOU CHE, "Commande vectorielle de la machine asynchrone", projet de fin d'étude, ENP, Juin 2007.
- [10] H.FOCH, F.FOREST, et T.MEYNARD, "Onduleurs de tension : Structures, Principes et Applications", Techniques de l'ingénieur, D 3 176.
- [11] F.MERRAHI, "Alimentation et commande d'une MADA (application à l'énergie éolienne)", mémoire de magistère, ENP, 2007.

[12] Y.A.BENCHARIF, "Modélisation et commande d'une machine asynchrone a double alimentation pour la production de l'énergie éolienne», mémoire de magistère, ENP ,2008.

[14] 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.

[16] 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.

[17] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Eoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.

[18] O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine", Ann. Rev. Fluid. Mech.

➤ Sites internet

www.eole.com