

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud MAMMARI de Tizi Ouzou

Faculté de Génie Electrique et d'informatique

Département d'Electrotechnique



Mémoire

De fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : MACHINE ELECTRIQUE



Proposée et Dirigée par :

M^{elle} ARAB NAIMA

M^{me} BOUKHELIFA AKKILA

Etudié par :

M^r AMOURA RABAH

M^r ARAB REZKI

PROMOTION : 2012 -2013

Dédicace

Du fond du cœur, nous dédions ce modeste travail en signe de reconnaissance et de respect :

A nos parents qui ont toujours été les étoiles de notre ciel et ont illuminé nos Chemins depuis notre naissance, que Dieu tout puissant les bénisse et nous les garde en bonne et parfaite santé ;

A nos très chers frères et sœurs

A tous nos amis (es)

A tous ceux que nous aimons et qui nous aiment.

A. Rezki

A. Rabah

Remerciements

Nous tenons à remercier et rendre grâce à DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté de mener à bien terminer ce modeste travail.

Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidé tout au long de notre travail, particulièrement à :

❖ Notre promotrice M^{elle} N.ARAB pour avoir accepté de nous encadrer ainsi que pour son aide, ses conseils et son suivi durant la période de la réalisation de notre travail.

❖ Notre Co- promotrice M^{me} A.BOUKHLIFA pour ses orientations judicieuses qui nous ont été infiniment utiles.

❖ A L'ensemble des enseignants qui nous ont suivi durant notre cycle d'étude.

Nos respects aux membres du jury qui nous feront l'honneur d'apprécier notre travail.

A. Rezki
A. Rezki

A. Rabah
A. Rabah

Résumé

L'étude suivante présente une description générale d'un aérogénérateur à base d'une machine synchrone à aimants permanents, sa modélisation et sa commande globale qui permet d'une part : la maximisation de la puissance aérodynamique et le control de la puissance de sortie d'autre part.

Mots clés

- Eolien
- MPPT
- Modélisation
- Energie

SOMMAIRE

Introduction générale 1

Chapitre I

Généralités sur les énergies renouvelables.

I.1 Introduction 3

I.2 Les différentes formes de l'énergie renouvelable 3

 I.2.a Hydraulique 3

 I.2.b La biomasse 3

 I.2.c La géothermie 4

 I.2.d Solaire 4

 I.2.e L'éolien 4

I.3 Différents configurations d'éoliennes 5

 I.3.1 Une éolienne sur un terrain individuel 15

 I.3.2 Un parc éolien terrestre 6

 I.3.3 Un parc éolien en mer ou offshore 6

I.4 Généralités 7

 I.4.1 Notion du vent 7

 I.4.2 Les différents types d'éoliennes 7

 I.4.2.a Eoliennes à axe vertical 7

 1) Le rotor de Savonius 7

 2) Le rotor de Darrieus 8

 I.4.2.b Eoliennes à axe horizontal 9

I.5 Différentes parties d'un aérogénérateur 10

 I.5.1 Le mat 11

 I.5.2 Le rotor 11

 I.5.3 La nacelle 11

 I.5.4 Différentes composantes de la nacelle 11

- L'arbre primaire 11
- Un multiplicateur 11
- L'arbre rapide 11
- Système du verrouillage du rotor 11
- Génératrice 11
- Le système de refroidissement 11
- L'anémomètre 11

• Système de contrôle.....	12
• Le pivot d'orientation.....	12
I.6 Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	13
I.7 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne.....	13
I.7.1 Génératrice asynchrone.....	13
I.7.1.a Machine asynchrone à cage.....	13
I.7.1.b Machines asynchrones à double alimentation (MADA).....	14
I.7.2 Génératrices synchrones.....	14
I.8 Etat de l'art sur la conversion électromécanique.....	14
I.8.1 Les éoliennes à vitesse fixe.....	14
I.8.1.a Avantages.....	15
I.8.1.b Inconvénients.....	15
I.8.2 Les éoliennes à vitesse variable.....	15
I.8.2.a Avantages.....	16
I.8.2.b Inconvénients.....	16
I.9 Conversion de l'énergie éolienne.....	17
I.9.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.....	17
I.9.2 Loi de Betz.....	18
I.10 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	20
I.10.1 Système à décrochage aérodynamique "stall.....	21
I.10.2 Système d'orientation des pales "pitch.....	22
I.11 Avantages et inconvénients du système éolien.....	22
I.11.a Avantages.....	22
I.11.b Inconvénients.....	22
I.12 Conclusion.....	23

Chapitre II

Modélisation et Commande de la turbine éolienne

II.1 Introduction.....	24
II.2 Modélisation d'un système éolien.....	24
II.2.1 Modélisation de vitesse de vent.....	24
II.2.2 Modélisation de la turbine éolienne.....	25
II.2.3 Modèle de turbine.....	28
II.2.4 Modèle de multiplicateur.....	30

II.2.5 Equation dynamique de l'arbre	30
II.2.6 Schéma bloc du modèle de la turbine	30
II.3 Techniques d'extraction du maximum de la puissance (MPPT)	31
II.3.1 Maximisation de la Puissance avec asservissement de la vitesse	32
II.3.2.1 Conception du correcteur de vitesse	33
II.3.2.2 Simulation et interprétation	35
II.3.2.2.a Résultat de simulation	35
II.3.2.2.b Interprétation des résultats de simulation	36
II.3.2.3 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse.....	36
II.3.2.a Résultats de simulation	39
II.3.2.b. Interprétation des résultats	40
II.3.3 Comparaison entre les résultats obtenus	40
III Conclusion	43

Chapitre III

Commande de générateur éolien

III.1 Introduction	44
III.2 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	44
III.2.1 Les hypothèses simplificatrices	44
III.2.2 Les équations électrique de la machine synchrone à aimants permanents	45
III.2.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère de park	48
III.2.3.1 La transformation de park.....	48
• Equations magnétiques	49
• Equations électriques	49
• Expression de couple	50
III.3 Modèle du redresseur MLI	50
III.4 Commande en couple de la GSAP	52
III.4.1 Principe général de la méthode.....	52
III.4.2 Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents.....	52
III.4.3 Synthèse de correcteurs	53
III.4.4 La simulation du système de conversion éolien	55
III.4.4.1 Résultats de simulation.....	57
III.4.4.2 Interprétation des résultats.....	62

III.5 Conclusion	62
Conclusion générale	63

Chapitre I

Généralités sur les énergies renouvelables

Fig I.1 L'évolution de l'éolienne.....	5
Fig I.2 Eolienne sur un terrain individuel.....	5
Fig I.3 Un parc éolien terrestre.....	6
Fig I.4 Un parc éolien en mer ou offshor.....	6
Fig I.5 L'éolienne de Savonius.....	8
Fig I.6 L'éolienne de Darrius.....	8
Fig I.7 Eoliennes à axe vertical.....	9
Fig I.8 Eoliennes à axe horizontal.....	9
Fig I.9 Eolienne en amont.....	10
Fig I.10 Eolienne en aval.....	10
Fig I.11 Schéma d'une éolienne Nordex N60 (1300 kW)	12
Fig I.12 Principe de la conversion d'énergie.....	13
FiI.13 Eolienne directement connectée au réseau.....	15
Fig I.14 Eoliennes à vitesse variable.....	16
Fig I.15 Colonne d'air animée d'une vitesse v	17
Fig I.16 Tube de courant autour d'une éolienne.....	18
Fig I.17 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	20
Fig I.18 Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne.....	21

Chapitre II

Modélisation et commande de la turbine éolienne

Fig II.1 Evolution de profil du vent.....	25
Fig II.2 Système mécanique de l'éolienne.....	26
Fig II.3 Modèle mécanique simplifié de la turbine.....	27
Fig II.4 Modèle de la turbine éolienne	27
Fig II.5 Coefficient de puissance (C_p) en fonction de λ	28
Fig II.6 Caractéristique de C_p pour différentes valeurs de l'angle de calage B	29
Fig II.7 Schémas bloc du turbine.....	31
Fig II.8 Schémas bloc avec asservissement de la vitesse mécanique.....	33
Fig II.9 Schéma bloc de correcteur (IP).....	34
Fig II.10 Coefficient de puissance (C_p) en fonction de temps.....	35
Fig II.11 Vitesse mécanique et sa référence en fonction de temps.....	35

Fig II.12 Puissance mécanique en fonction de temps.....	36
Fig II.13 Schémas bloc de modèle de la turbine sans asservissement de la vitesse.....	37
Fig II.14 Coefficient de puissance en fonction de temps.....	39
Fig II.15 Vitesse mécanique en fonction de temps	39
Fig II.16 Puissance mécanique en fonction de temps.....	40
Fig II.17 Coefficient de puissance en fonction de temps(s)	41
Fig II.18 Vitesse mécanique en fonction de temps.....	41
Fig II.19 Puissance mécanique en fonction de temps.....	42

Chapitre III

Commande de générateur éolien

Fig III.1 Structure de la génératrice synchrone.....	45
Fig III.2 Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.....	48
Fig III.3 Passage de Repère naturel du stator au repère (d, q) de Park.....	48
Fig III.4 Schémas de Redresseur MLI.....	50
Fig III.5 Boucle de régulation de courant.....	54
Fig III.6 Commande de la génératrice synchrone à aimants permanents.....	55
Fig III.7 Schéma complet de la commande de la chaîne de conversion éolienne.....	56
Fig III.8 Schéma bloc de simulation sous MATLAB-SIMULINK.....	57
Fig III.9 Evolution de profil de vent.....	57
Fig III.10 Coefficient de puissance (C_p).....	58
Fig III.11 Force électromotrice e_q	58
Fig III.12 Courants i_d et $i_{d_{ref}}$	58
Fig III.13 Courants i_q et $i_{q_{ref}}$	59
Fig III.14 Courant de phase i_a	59
Fig III.15 Puissance de sortie de la GSAP.....	60
Fig III.16 Tension de référence sur l'axe d.....	60
Fig III.17 Tension de référence sur l'axe q.....	60
Fig III.18 La vitesse réduite (λ) en fonction de temps.....	61
Fig III.19 La vitesse électrique en fonction de temps.....	61

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Les énergies renouvelables ou EnR ne représentent qu'environ 20% de la production mondiale d'électricité; en excluant l'hydroélectricité, ce taux tombe à 2%. Dans un contexte de crise énergétique mondiale sous-tendue par l'impératif d'un développement durable (problèmes environnementaux, épuisement des ressources fossiles,...), Les défis de futur énergétique nécessiteraient le développement des EnR comme sources de substitution, propres et inépuisables [1]. Ces dernières existent sous plusieurs formes, on peut citer par exemple : l'hydraulique, le solaire, la géothermique, la biomasse et l'éolienne qui fait l'objet de notre étude. Parmi les ressources d'énergie renouvelables, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour pallier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante.

Après des siècles d'évolution et des recherches plus poussées depuis quelques décennies, aujourd'hui, plusieurs pays qui sont résolument tournés vers l'énergie éolienne. Les plus avancés dans le domaine sont : l'Allemagne avec une puissance installée de 14609 MW, l'Espagne 6202 MW, le Danemark 3110 MW, la Hollande 912 MW et l'Amérique du nord 6677 MW. Avec certains projets d'énergie éolienne développés ("offshore", au large des côtes) de grandes centrales éoliennes fournissent de l'électricité dans certaines parties du monde, à un prix concurrentiel à celui de l'énergie produite par les installations conventionnelles (par ex. : les centrales nucléaires et les centrales thermiques au mazout ou au charbon [2]).

Par contre en Afrique, et en particulier en Algérie, Depuis l'installation de l'éolienne d'ADRAR en 1957, le développement de l'énergie éolienne n'a connu aucune évolution et pourtant les ressources n'y manquent pas et la technologie accessible, sauf la volonté et le manque de prise de conscience de la majorité des autorités de notre pays [3]. Actuellement, le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie [2]. C'est dans ce cadre que le présent

mémoire que nous nous présentons décrit une étude sur l'utilisation des machines synchrones à aimants permanents dans un système éolien.

Le premier chapitre est consacré à la présentation d'une vue générale sur les différents types des énergies renouvelables en particulier l'énergie éolienne, ainsi la description globale de l'éolienne, les différentes génératrices appropriées pour les systèmes éoliens et leur fonctionnement à vitesse fixe ou variable. Le principe de fonctionnement de l'aérogénérateur, les techniques utilisées pour la régulation de la puissance mécanique et à la fin, les avantages et inconvénients des turbines éoliennes.

Le deuxième chapitre sera dédié à la modélisation de la turbine éolienne qui est munie d'un multiplicateur, la maximisation de la puissance mécanique par la méthode MPPT (méthode de recherche de maximum de puissance) avec l'application de deux techniques de commande : avec et sans asservissement de vitesse mécanique et l'établissement d'un modèle mathématique général pour le système éolien. Finalement, la visualisation des résultats sous l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Le troisième chapitre consiste dans la première partie sur la présentation de modèle mathématique de la GSAP dans le repère naturel, puis dans le repère de PARK, ainsi que le modèle de convertisseur de puissance MLI. La deuxième partie sera consacrée pour la commande vectorielle de la GSAP de générateur éolien ainsi que une simulation du système global sous MATLAB/SIMULIK.

Chapitre 1

*Généralités sur les énergies
renouvelables*

I.1 Introduction

Les ressources en énergies renouvelables sont devenues parmi les plus importantes priorités de la majorité des pays industrialisés notamment les pays développés. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres. Parmi ces énergies, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire, thermique) [4]. L'énergie éolienne est l'énergie du vent, C'est une énergie plus respectueuse de l'environnement que les énergies classiques telles que les combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire. Elle est presque universellement reconnue comme une source d'énergie la plus prometteuse pour produire de l'électricité propre à court et à moyen termes et elle contribue à la préservation de l'environnement [5]. Ce chapitre présente en première partie une vue générale sur les différentes configurations des systèmes de production éolien, la génération des énergies renouvelables et particulièrement l'énergie éolienne.

I.2 Les différentes formes de l'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables sont nombreuses la plupart sont issues directement ou indirectement du soleil : son rayonnement réchauffe l'atmosphère terrestre provoque le vent, les courants, le cycle de l'eau... [6] Les plus célèbres formes de l'énergie renouvelable sont :

I.2.a Hydraulique

Le principe de l'hydroélectricité est d'utiliser la force de l'eau créée grâce à une hauteur de chute (barrage artificiel ou chute d'eau naturelle) pour qu'elle entraîne une turbine reliée à un générateur d'électricité.

I.2.b La biomasse

La filière biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse solide (bois, déchet de bois, déchets agricole, déjections animales), le biogaz (de décharge, de station d'épuration ou d'unités de méthanisation industrielle ou agricoles) les déchets municipaux renouvelables solides et la biomasse liquide (bioéthanol, biodiesel, huile végétale) [7].

I.2.c La géothermie

La production de l'électricité géothermique consiste à convertir la chaleur des nappes aquifères haute température (de 150 à 350 C°) à l'aide de turboalternateur, la géothermie est essentiellement développée dans les zones volcaniques [7].

I.2.d Solaire

La production d'électricité solaire repose sur deux technologies bien distinctes. La technologie de modules photovoltaïques utilise une des propriétés de semi conducteur (généralement le silicium) que au contact de la lumière génèrent de l'électricité. La seconde technologie est celle des centrales hélios thermodynamique (ou centrale solaire thermique) cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de miroir sur un point focal afin d'obtenir des températures très élevées (de 400 à 1000 c°) qui permettent la production de vapeur d'eau et donc de l'électricité [7].

I.2.e l'éolien

La production d'électricité éolienne est une opération qui consiste à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique par l'intermédiaire d'un système mécanique appelé "turbine éolienne" entraînant une génératrice électrique. Depuis l'apparition des éoliens, ces derniers sont en progrès perpétuel. L'évolution de ce système de production d'électricité est montrée dans la figure (I.1).

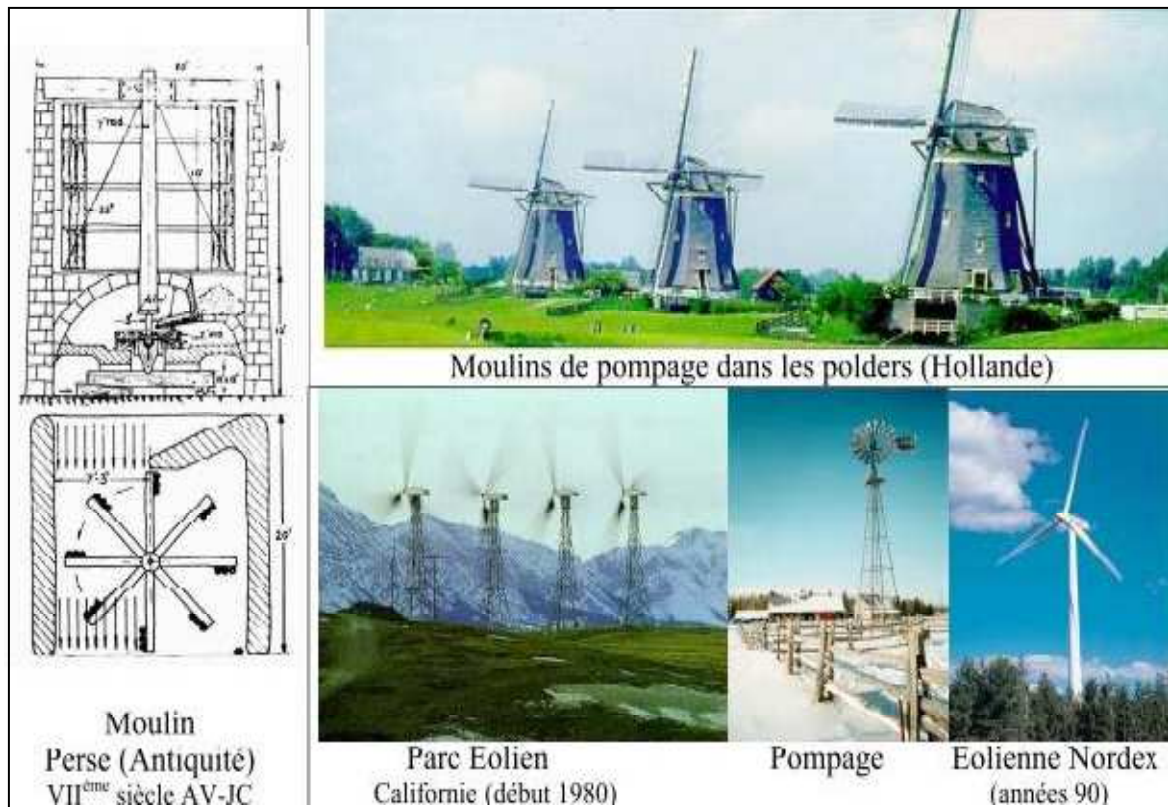


Fig I.1 L'évolution de l'éolienne.

I.3 Différentes configurations d'éoliennes

Les systèmes éoliens connaissent un essor considérable depuis une quinzaine d'années au niveau mondial, Grâce au caractère renouvelable et non polluant de l'énergie produite, Elle peut être représentée sous les trois configurations suivantes :

I.3.1 Une éolienne sur un terrain individuel

C'est une éolienne dont la production en énergie électrique est destinée à satisfaire l'autoconsommation du propriétaire (Fig I.2).



Fig I.2 Eolienne sur un terrain individuel.

I.3.2 Un parc éolien terrestre

C'est un ensemble d'éoliennes distantes entre elles d'au moins deux cents mètres (200 m) dont la production d'électricité est destinée à la vente au distributeur local. Bien que chaque machine ait une faible emprise au sol, il faut disposer d'une superficie de l'ordre de 10 hectares pour un parc éolien significatif (Fig I.3) [8].



Fig I.3 Parc éolien terrestre.

I.3.3 Un parc éolien en mer ou offshore

C'est un ensemble d'éoliennes qui sont implantées au niveau de la mer (Fig I.4) dont la profondeur allant jusqu'à 25 ou 30 m et dans des zones situées à une distance moyenne de 10 km des côtes. Il possède un câble sous-marin pour se connecter au réseau terrestre [3].



Fig I.4 Parc éolien en mer (OFFSHORE).

I.4 Généralités

I.4.1 Notion du vent

C'est une énergie renouvelable, qui provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement, il est caractérisé par sa direction et par sa vitesse qui varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers (offshore).

I.4.2 Les différents types d'éoliennes

Il existe deux catégories principales d'éoliennes:

- Les éoliennes à axe vertical (qui tendent à disparaître).
- Les éoliennes à axe horizontal, selon le critère de la vitesse, ce type d'éoliennes se divise en deux autres classes :
 - Les éoliennes lentes (utilisées surtout pour le pompage).
 - Les éoliennes rapides (utilisées dans la production d'énergie électrique).

I.4.2.a Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement 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. La particularité de ce type d'éoliennes est qu'elles n'ont pas besoin de s'orienter par rapport au vent. De nombreuses variantes ont été testées dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [9].

1) Le rotor de Savonius

Dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" (Fig I.5), 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 [10].

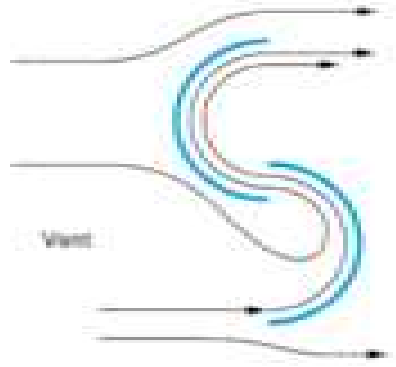


Fig I.5 L'éolienne de Savonius.

2) Le rotor de Darrieus

Dont la structure est la plus répandue des éoliennes à variation cyclique d'incidence. Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles 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 [9](Fig I.6).

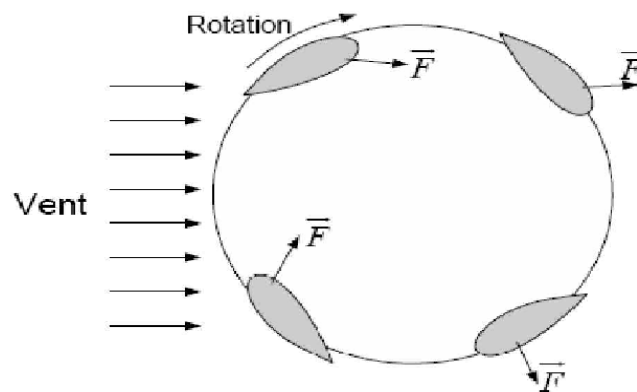


Fig I.6 L'éolienne de Darrieus.

Les éoliennes à axe vertical sont très peu mises en œuvre car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice au sol directement mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol. En ce qui concerne leur implantation elles ont un empire au sol plus important que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur des grandes distances. En effet, les câbles des haubans doivent passer au dessus des pales, cela représente un inconvénient majeur pour une implantation sur un site agricole.



Fig I.7 Eoliennes à axe vertical.

I.4.2.b Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent [9]. Elles nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ce type d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important.



Fig I.8 Eoliennes à axe horizontal.

Suivant leur orientation en fonction du vent, les éoliennes à axe horizontal sont dites " en amont " (up-Wind) ou " en aval " (down-Wind). Les premiers ont le rotor face au vent,

puisque le flux d'air atteint le rotor sans obstacle, le problème de " l'ombre de la tour " (Tower Shadow) est bien moindre. Néanmoins, un mécanisme d'orientation est essentiel pour maintenir en permanence le rotor face au vent. Les éoliennes à rotor en aval n'ont pas besoin de ce mécanisme d'orientation mais le rotor est placé de l'autre côté de la tour [3]. Chaque configuration possède avantages et inconvénients : la formule « amont » requiert des pales rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour alors que la configuration « aval » autorise l'utilisation de rotors plus flexibles. Par ailleurs, dans le cas d'une machine « amont », l'écoulement de l'air sur les pales est peu perturbé par la présence de la tour. L'effet de masque est plus important dans le cas d'une machine « aval ». Enfin, une machine « aval » est théoriquement auto-orientable dans la plage du vent, alors qu'une éolienne « amont » doit généralement être orientée à l'aide d'un dispositif spécifique. De ces deux types d'éoliennes, celle en amont est prédominante. Les figures ci-dessous montrent les deux types mentionnés :

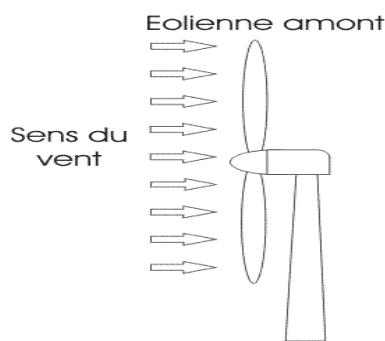


Fig I.9 Eolienne en amont.

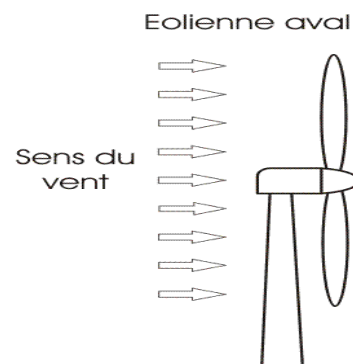


Fig I.10 Eolienne en aval.

I.5 Différentes parties d'un aérogénérateur

Tous les éléments permettant de produire de l'énergie électrique sont intégrés dans la nacelle qui est représentée sur la (Fig I.11). Une éolienne est composée de trois parties principales :

- Le mat.
- La nacelle.
- Le rotor.

I.5.1 Le mat

Les mats peuvent être réalisés en acier ou en béton armé. Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble (rotor + nacelle) pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie [10]. Le mat atteint une hauteur comprise entre 80 m et 100 m.

I.5.2 Le rotor

Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. C'est la partie tournante de l'éolienne. Les pales sont faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre ou de fibre de carbone. Leur longueur atteint actuellement entre 30 m et 55 m. L'éolienne comporte habituellement deux ou trois pales. Le rotor à trois pales réduit les contraintes mécaniques que subit le système, mais son coût est plus élevé.

I.5.3 La nacelle

Située en haut de la tour. Elle comporte toute l'installation de production d'électricité. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques qui descendent à l'intérieur du mât de l'éolienne.

I.5.4 Les différentes composantes de la nacelle

- **L'arbre primaire:** Il est entraîné par les pales et tourne à vitesse assez basse avec beaucoup de force.
- **Un multiplicateur :** Il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
- **L'arbre rapide :** C'est le lien entre la génératrice et le multiplicateur.
- **Système du verrouillage du rotor :** C'est un système de freinage automatique, son rôle est d'empêcher le rotor de fonctionner quand la vitesse du vent est supérieure à 90km/h.
- **Génératrice :** C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Le système de refroidissement :** Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur qui encaisse les efforts mécaniques d'un arbre à l'autre.
- **L'anémomètre :** Cet instrument sert à connaître la vitesse du vent. Il se situe derrière les pales. Il mesure en permanence la vitesse du vent qu'il va transmettre au système

de contrôle de façon à démarrer ou arrêter l'éolienne sous l'action du vent.

L'anémomètre tourne autour d'un axe vertical, il est doté d'une girouette qui indique la direction du vent. En général, une éolienne est enclenchée à partir de 3 à 4 m/s et arrêtée approximativement à 25m/s (90 km/h).

- **Système de contrôle** : Surveillance et pilote la turbine.
- **Le pivot d'orientation** : Permet à la machine de présenter l'hélice face au vent quelque soit sa direction mais ne fait pivoter que la nacelle.

Ces éléments constitutifs de la turbine éolienne sont montrés dans la figure (I.11).

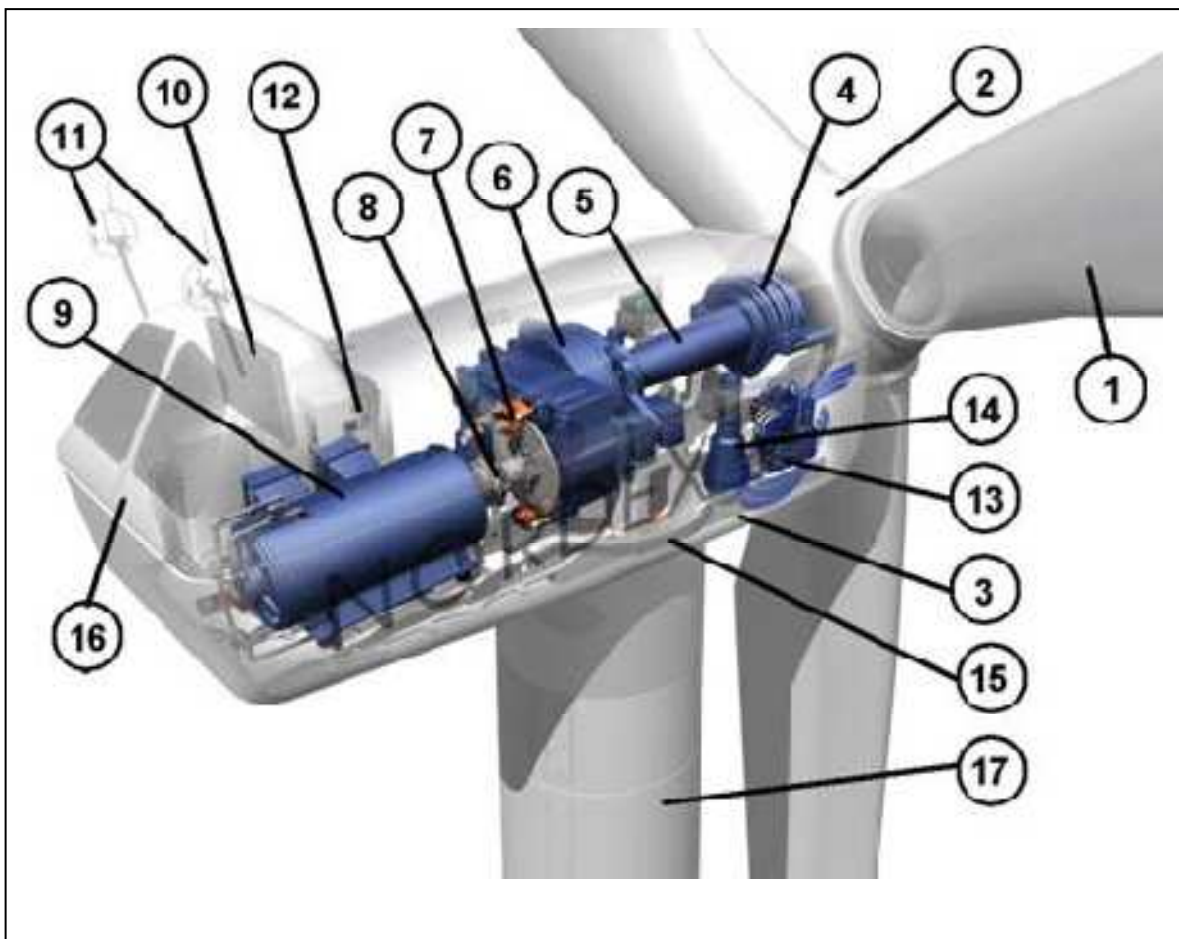


Fig I.11 Schéma d'une éolienne Nordex N60 (1300 kW).

1 : pales, 2 : moyeu, 3 : nacelle, 4 : cardan, 5 : transmission, 6 : multiplicateur de vitesse, 7 : frein à disque, 8 : accouplement, 9 : génératrice, 10 : radiateur de refroidissement, 11 : centrale de mesures du vent, 12 : contrôle, 13 : Centrale hydraulique, 14 : mécanisme d'orientation face au vent, 15 : paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque, 16 : capot, 17 : mât.

I.6 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Le principe de fonctionnement de l'éolienne est le même que celui d'un convertisseur dynamique, sauf que ici le rotor est entraîné par le vent à travers les pales, son but est la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, notons que la conversion se fait en deux étapes (Fig I.12) [10].

- Au niveau de la turbine (rotor) : consiste à extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice : qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, qui est transmise ensuite au réseau électrique de distribution.

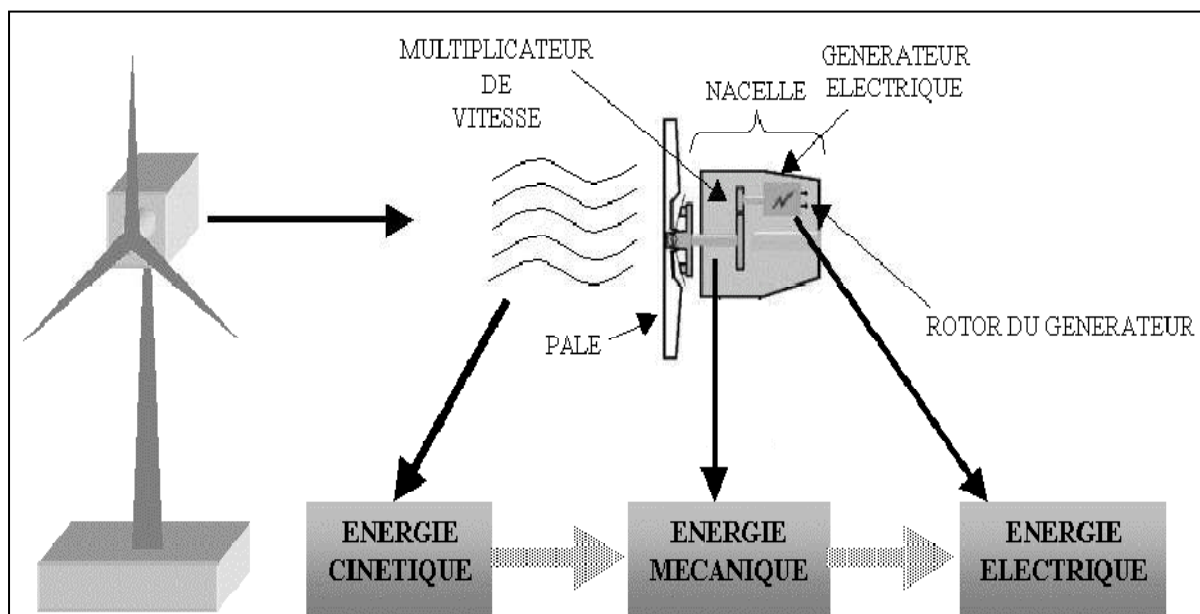


Fig I.12 Principe de la conversion d'énergie.

I.7 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Les deux types de machines utilisées dans les systèmes éoliens sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes.

I.7.1 Génératrice asynchrone

I.7.1.a Machine asynchrone à cage

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu

élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse [4].

I.7.1.b Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter d'un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa) utilisent ce type de machines [4]. Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau le plus souvent par un transformateur. A la place du rotor à cage d'écureuil, ces machines asynchrones ont un rotor bobiné dont le réglage électronique assure la variation du glissement. La chaîne rotor permet ainsi à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse qui dépend du type et du dimensionnement de la chaîne rotor

I.7.2 Génératrices synchrones

Les machines asynchrones présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et Un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais [4]. Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines Synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Ces machines sont à grand nombres de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanent dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

I.8 Etat de l'art sur la conversion électromécanique

I.8.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Il y a encore quelques années, pratiquement toutes les éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau, sa vitesse Ω_{mec} est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice [8].

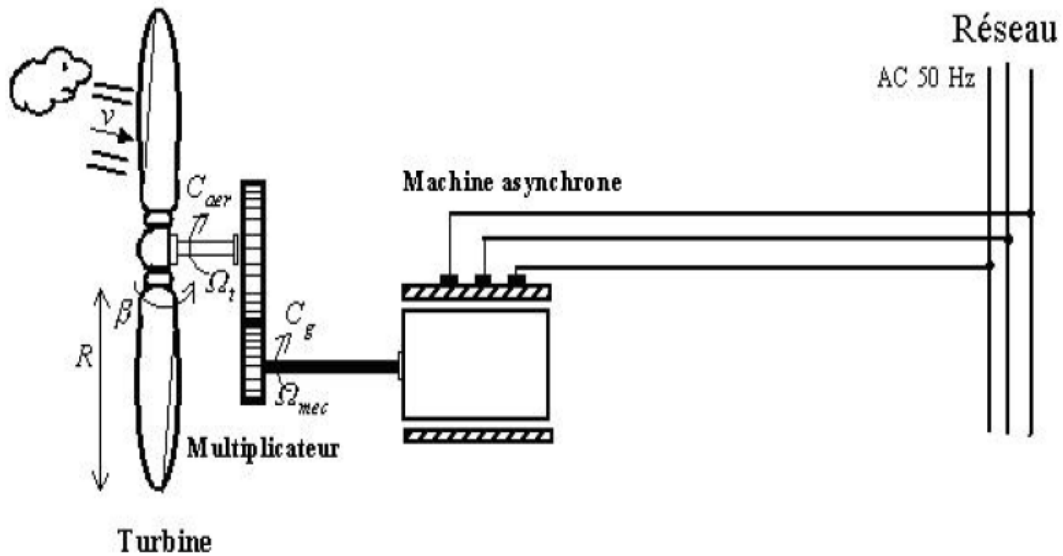


Fig I.13 Eolienne directement connectée au réseau.

I.8.1.a Avantages

Les avantages principaux de ce type :

- Système électrique plus simple.
- Moins cher.
- Pas besoin de système de l'électronique de puissance.
- Plus fiable (moins d'entretien).

I.8.1.b Inconvénients

- En vitesse fixe le maximum théorique de puissance n'est pas atteint.
- L'énergie captée n'est pas forcément optimale.
- Difficulté de contrôler la puissance transite au réseau.
- Présence des efforts et oscillation du couple dans le train de puissance.

I.8.2 Les éoliennes à vitesse variable

Il existe deux structures des éoliennes à vitesse variable :

- Une structure basée sur une machine asynchrone à cage pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable par des convertisseurs statiques.
- Une structure basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance situé au circuit rotorique.

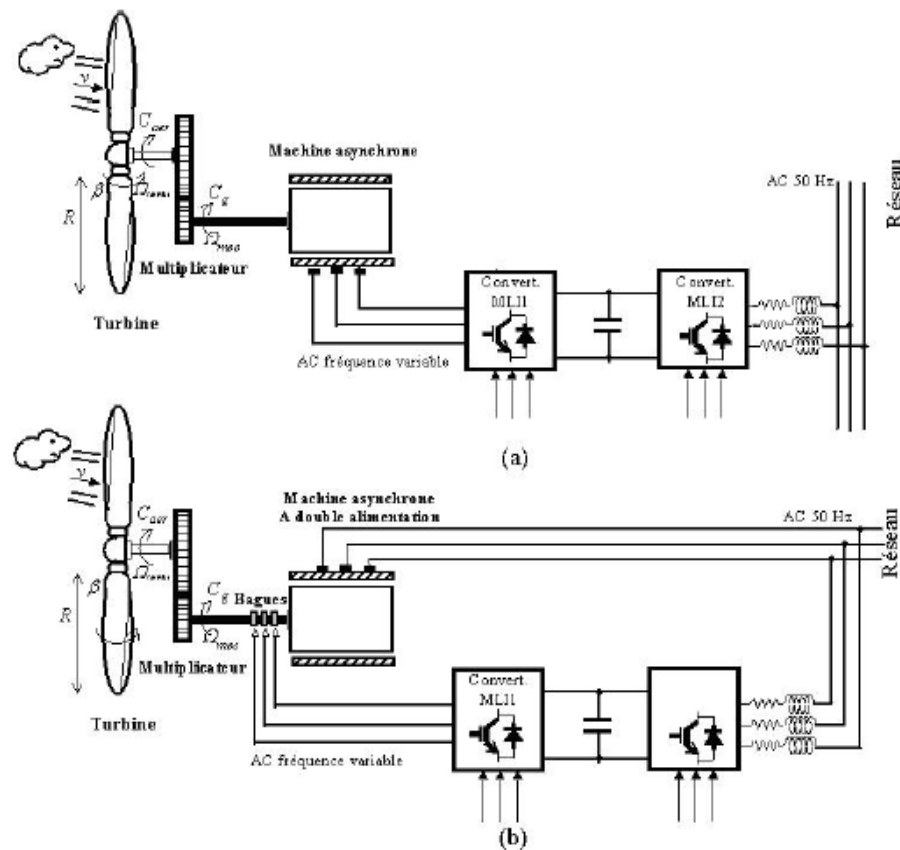


Fig I.14 Eoliennes à vitesse variable

I.8.2.a Avantages

- Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor.
- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.
- Réduction des contraintes mécaniques subites par le train de puissance.

Les turbulences et rafales de vent peuvent être absorbées, l'énergie absorbée du vent est donc emmagasinée dans l'inertie mécanique de la turbine, réduisant ainsi les oscillations de couple.

- Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- Ce type de machines offre une constante de temps plus grande du système de contrôle de l'angle de calage, ce qui réduit sa complexité.
- Réduction des bruits acoustique.

I.8.2.b Inconvénients

- Utilisation de machines spéciales.
- Coûts supplémentaires plus importants (convertisseur, commande,...).
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.

- Gestion du transfert de puissance entre les convertisseurs, et placement au point de puissance optimum de l'éolienne.

I.9 Conversion de l'énergie éolienne

I.9.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur d_x , de section S de masse volumique ρ , animée d'une vitesse \mathbf{V} s'écrit [12] :

$$dE_x = \frac{1}{2} * \rho * S * V^2 * d_x \quad (\text{I. 1})$$

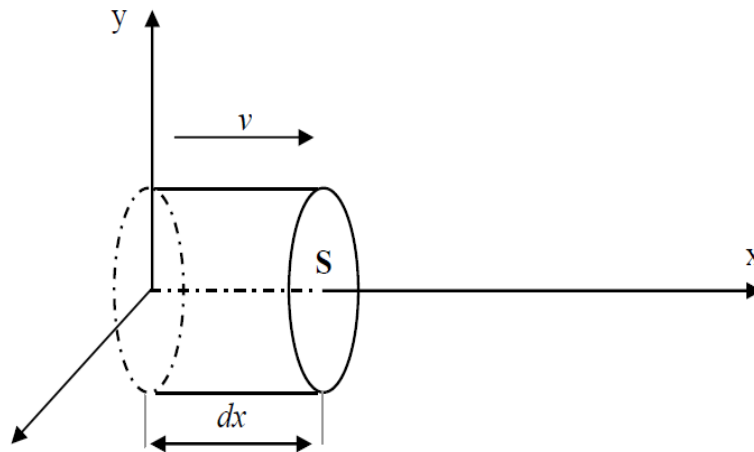


Fig I.15 Colonne d'air animée d'une vitesse v .

La puissance P_m extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps. En supposant $d_x = V * d_t$, on déduit l'expression de P_m :

$$P_m = \frac{dE_c}{d_t} = \frac{1}{2} * \rho * S * V^3 \quad (\text{I. 2})$$

ρ : Masse volumique de l'air (Kg/m³).

V : Vitesse instantanée du vent (m/s).

E_c : Energie cinétique du vent (m/s).

I.9.2 Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (I.16) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 . Soit $\frac{V_1+V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est [13]:

$$m = \frac{\rho * S * (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{I.3})$$

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

$$P_m = \frac{m * (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{I.4})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (I.4) :

$$P_m = \frac{\rho * S * (V_1 + V_2) * (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{I.5})$$

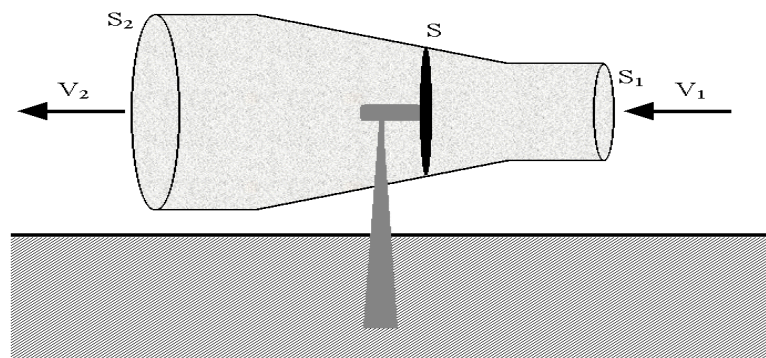


Fig I.16 Tube de courant autour d'une éolienne.

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_v correspondante serait alors :

$$P_v = \frac{\rho * S * V_1^3}{2} \quad (\text{I.6})$$

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité.

La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} * P_v = 0.59 * P_v \quad (\text{I.7})$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal Théorique est défini :

$$C_p^{\text{opt}} = \frac{P_{\max}}{P_v} = \frac{2 * P_{\max}}{\rho * S * V_1^3} = 0.59 \quad (\text{I.8})$$

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance C_p de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent [4] :

$$C_p = \frac{2 * P_{\text{éol}}}{\rho * S * V_1^3} \quad (\text{I.9})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus, on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_{\text{éol}}}{P_v}$ appelé aussi coefficient de puissance présente un maximum de $\frac{16}{27}$ soit 0,59. Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne une grandeur spécifique est utilisée La vitesse réduite λ , qui est un rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse de vent :

$$\lambda = \frac{R * \Omega_1}{v_1} \quad (\text{I.10})$$

C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [4].

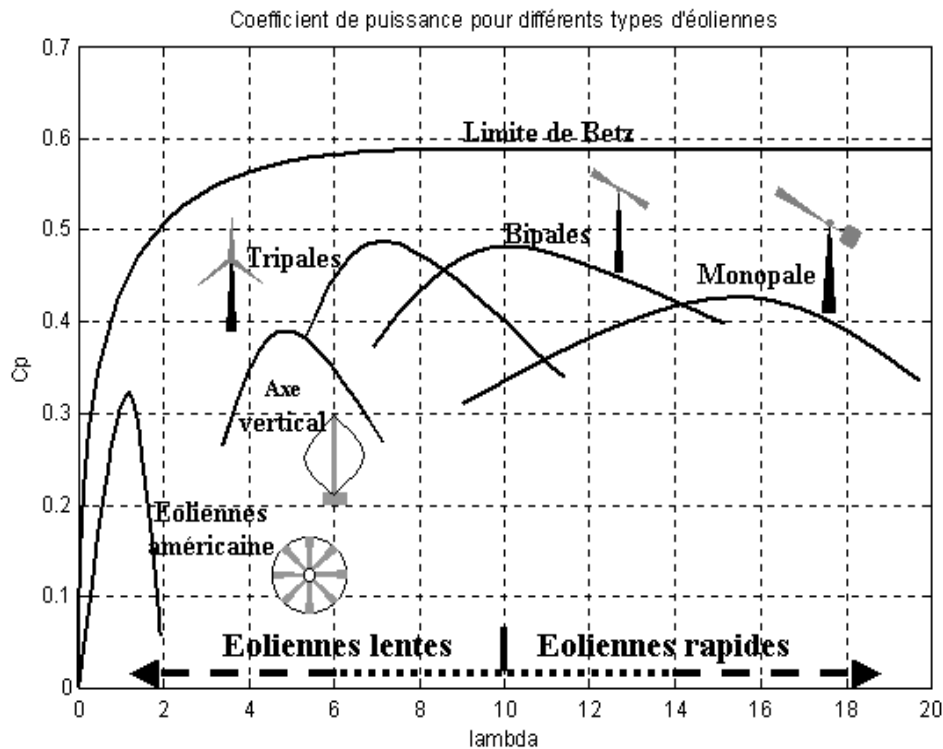


Fig I.17 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

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

I.10 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale v_n . Pour des vitesses de vents supérieures à v_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue [14] :

v_D : La vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie.

v_M : La vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

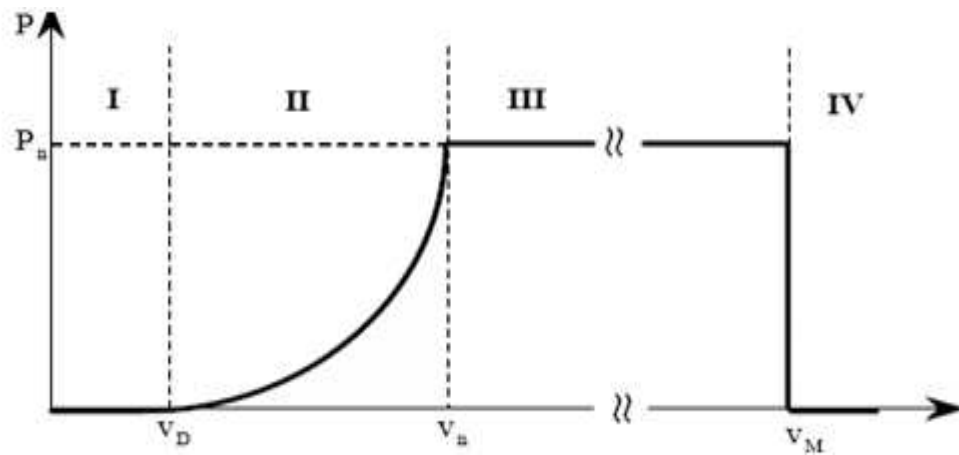


Fig I.18 Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne[5].

Les vitesses v_D, v_n et v_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- La zone **I**, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas)
- La zone **II**, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V .
- La zone **III**, où la vitesse de rotation est maintenue constante où la puissance P fournie reste égale à P_n .
- la zone **IV**, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie. Il existe deux techniques principales pour cette régulation de puissance :
 - 1) Le décrochage aérodynamique (la conception des pales induit ce phénomène qui limite l'action du vent quand la vitesse de celui-ci dépasse sa valeur nominale).
 - 2) Le calage variable (les pales peuvent pivoter autour de leur axe longitudinal afin de réduire la portance et donc le couple moteur).

I.10.1 Système à décrochage aérodynamique "stall"

Le comportement aérodynamique des pales évolue également d'une manière passive selon le rapport entre la vitesse de rotation de la turbine et la vitesse du vent. En effet les pales peuvent être conçues de façon à ce qu'à partir d'une certaine vitesse de vent, la turbulence provoquée par le profil des pales entraîne un décrochage aérodynamique et par suite une décroissance du couple capté par chacune des pales. Ce décrochage dépend notamment de l'angle de calage des pales. Les pales sont fabriquées avec un pas variant suivant la position le long de la pale, permettant ainsi le décrochage aérodynamique qui se produit progressivement d'abord près du rayon moyen puis de plus en plus près de bout de la pale [15]. Ce genre de contrôle passif de la puissance captée par les pales est appelé (stall-régulation) ou (régulation par décrochage aérodynamique).

I.10.2 Système d'orientation des pales "pitch"

Ce système de régulation par variation de l'angle de calage « β » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses. C'est la régulation par mise en drapeaux, soit augmenter l'angle de calage, ce qui diminue l'angle d'incidence. Ce système permet également de freiner la turbine si nécessaire [15].

I.11 Avantages et inconvénients du système éolien

I.11.a Avantages

- Le premier avantage de l'éolienne est qu'elle ne nécessite pas de carburants, et ne crée pas de gaz à effet de serre. De plus, cette forme de production d'énergie ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- Il s'agit d'une énergie illimitée, c'est-à-dire : tant que le soleil restera actif il y aura du vent. En fin de vie, une éolienne est entièrement démontable, et presque totalement recyclable. Aucun polluant ne reste sur le site d'implantation.
- Les données météo permettent de prévoir la production d'énergie éolienne, ce qui aide à la planification des besoins des autres types d'énergies conventionnelles et renouvelables. C'est en hiver que les vents soufflent le plus régulièrement et le plus fort, c'est donc à cette période que les éoliennes sont les plus productives, ce qui coïncide bien avec les périodes de fort besoin énergétique.
- Elles requièrent peu de place sur les terres agricoles. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- Les éoliennes nécessitant la puissance du vent, elles sont très rentables en région ventée.

I.11.b Inconvénients

- Elles sont dangereuses pour la faune, surtout les oiseaux qui risquent d'entrer en collision avec les hélices. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Plus le parc éolien est dense, plus ce risque est grand. Des feux sur les pales peuvent réduire ce danger. L'implantation de champs d'éoliennes influence la flore environnante.
- Une éolienne toute seule ne produit pas réellement beaucoup de bruit, mais lorsque l'on se retrouve avec un parc éolien se bruit devient de plus en plus désagréable.

- Par son principe de fonctionnement même, une éolienne absorbe l'énergie du vent et le rend turbulent, créant ainsi un effet de sillage jusqu'à dix diamètres de rotor derrière elle.
- La rotation de l'hélice de l'éolienne peut causer des problèmes particuliers, parce qu'elle crée des signaux parasites intermittents qui interfèrent avec les trajectoires originales de transmission hertzienne. Cependant, dans la plupart des cas, si des interférences électromagnétiques apparaissent, il existe des solutions bon marché et efficaces comme par exemple l'installation d'un récepteur ou transmetteur pour renforcer le signal original.

I.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une vue générale sur les différents types des énergies renouvelables en particulier l'énergie éolienne, ainsi la description de l'éolienne, ces éléments constitutifs, ces différents types, les différentes génératrices utilisées dans les systèmes éoliens et leur stratégie de fonctionnement soit à vitesse fixe ou vitesse variable. Comme nous avons procédé à l'explication de leur principe de fonctionnement, et les techniques utilisées pour la régulation de la puissance mécanique. Finalement nous avons citées les avantages et inconvénients des turbines éoliennes. La modélisation de la turbine et les différentes techniques de maximisation de la puissance mécanique seront traitées dans le deuxième chapitre.

Chapitre II

*Modélisation et commande de la
turbine éolienne*

II.1.Introduction

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique, cette conversion est assurée par un dispositif mécanique intitulé turbine éolienne, ensuite, vient le rôle de la génératrice électrique qui va convertir l'énergie mécanique issue de la turbine en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour assurer la production de l'énergie, et 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 être équipée d'un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pâles de l'éolienne, orientation de la nacelle) et un autre qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

II.2 Modélisation d'un système éolien

II.2.1 Modélisation de la vitesse du vent

La ressource en vent, de point de vue de sa distribution statique est primordiale dans un projet éolienne et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion de l'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent. La mesure exacte de la vitesse du vent à la hauteur des turbines est assez complexe. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par les paramètres statistiques [4]. La vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous forme :

$$V_{\text{vent}}(t) = V_0 + \sum A_i \sin(\omega_i(t) + \varphi_i) \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

V_0 : La composante moyenne.

A_i : L'amplitude des harmoniques.

$\omega_i(t)$: La pulsation des harmoniques..

φ_i : La phase initiale de chaque composante spectrale fluctuante.

La simulation du profil du vent est représentée sur la figure suivante :

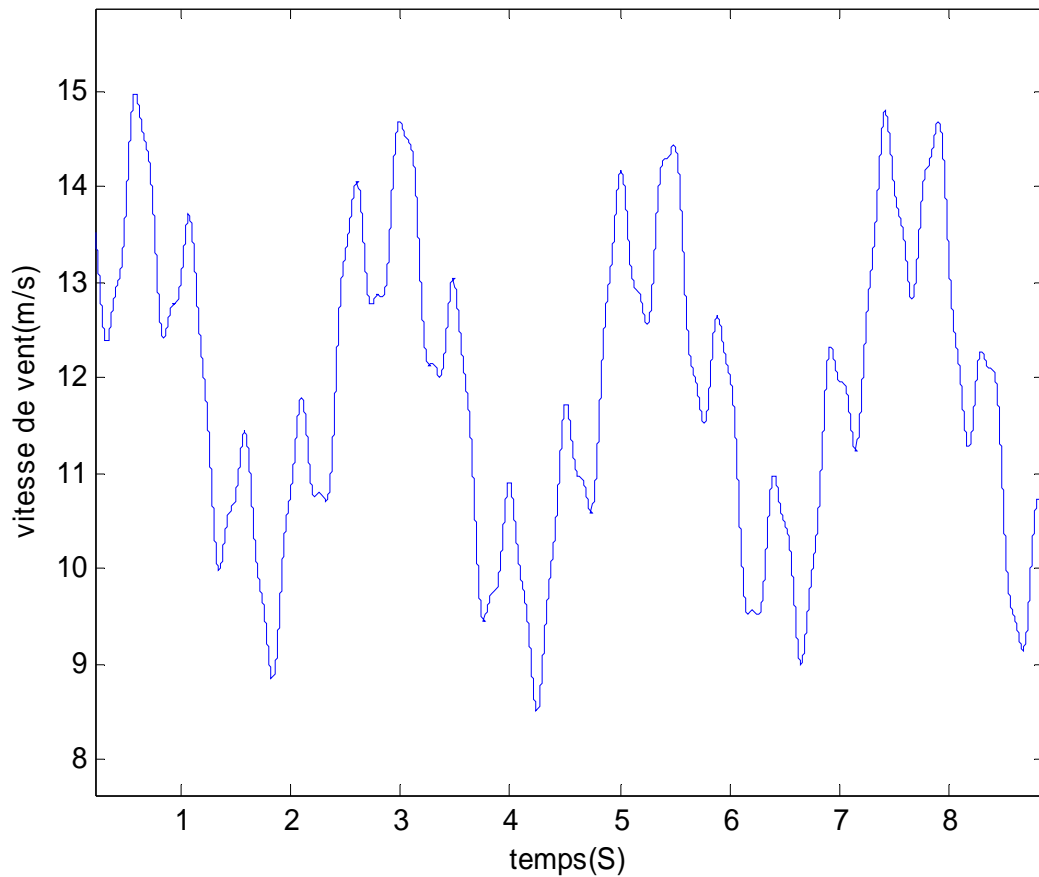


Fig II.1 Evolution de profil du vent.

II.2.2 Modélisation de la turbine éolienne

Hypothèses Simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Dans notre travail, nous allons étudier une turbine qui comprend trois pales orientables de surface S et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_{turb} qui est reliée à un multiplicateur de gain G . Ce dernier entraîne une génératrice électrique.

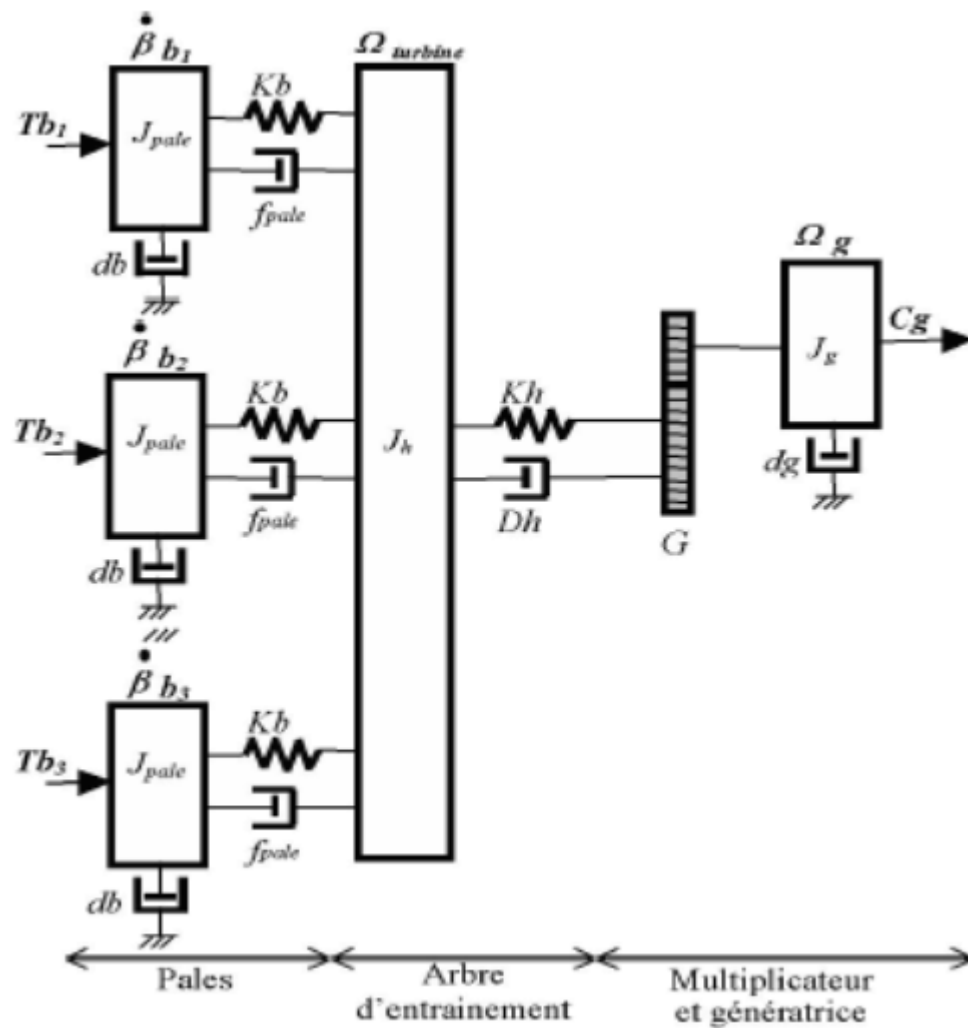


Fig II.2 Système mécanique de l'éolienne.

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- La même inertie J_{pale} .
- La même élasticité K_b .
- Le même coefficient de frottement par rapport à l'air d_b .

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées : $\dot{\beta} b_1, \dot{\beta} b_2, \dot{\beta} b_3$. Chaque pale reçoit une force T_{b1}, T_{b2}, T_{b3} qui dépend de la vitesse du vent qui lui est appliquée [8].

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- Son inertie J_h .
- Son élasticité K_h .
- Son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_h .

Le rotor de la génératrice possède :

- Une inertie.

Ce rotor transmet un couple entraînant C_g à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée $\Omega_{méc}$ ($\Omega_{méc} = \Omega_g$). Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($T_{b1} = T_{b2} = T_{b3}$) on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (d_b) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeable par rapport aux pertes par frottement du coté de la génératrice. On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (Fig II.3) [8].

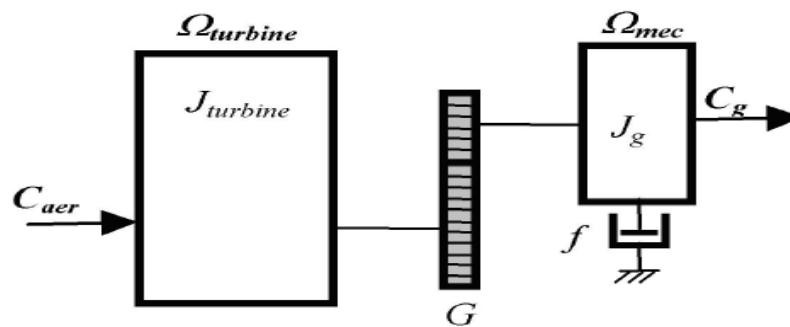


Fig II.3 Modèle mécanique simplifié de la turbine.

La turbine qui sera modélisée est à axe horizontal. Elle comporte trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse-turbine, et elle entraîne une génératrice (GSAP) à travers un multiplicateur de gain G et avec une vitesse $\Omega_{méc}$. Cette turbine est montrée dans (Fig II.4).

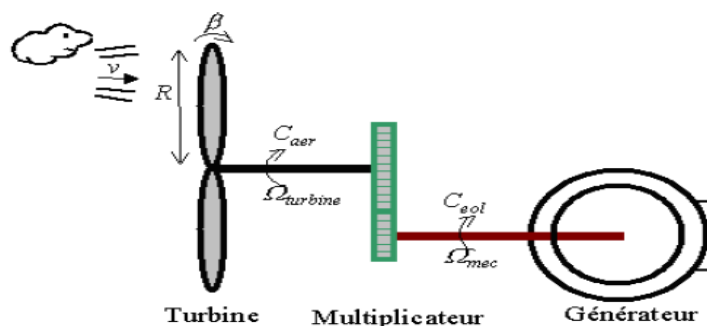


Fig II.4 Modèle de la turbine éolienne.

II.2.3 Modèle de la turbine

La puissance mécanique $P_{a\acute{e}r}$ disponible sur l'arbre d'un aéro-générateur s'exprime ainsi [16]:

$$P_V = \frac{1}{2} * \rho * S * V^3 \quad (II.2)$$

$$P_{a\acute{e}r} = \frac{P_{a\acute{e}r}}{P_V} * P_V = \frac{1}{2} * C_p(\lambda, \beta) * \rho * \pi * R^2 * V^3 \quad (II.3)$$

$$\lambda = \frac{R * \Omega_{turb}}{V} \quad (II.4)$$

Avec :

$$S = \pi * R^2$$

λ : Coefficient de vitesse réduite.

Ω_{turb} : vitesse de rotation de rotor de la turbine.

R : Rayon de l'aéro-générateur.

L'expression du coefficient de puissance est donnée par l'équation suivante :

$$C_p = 0.22 * \left(\frac{116}{\Gamma} - 0.4 * \beta - 5 \right) * \exp\left(-\frac{12.5}{\Gamma}\right) \quad (II.5)$$

Avec :

$$\Gamma = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08 * \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \quad (II.6)$$

La caractéristique de coefficient de puissance est représentée par la figure suivante :

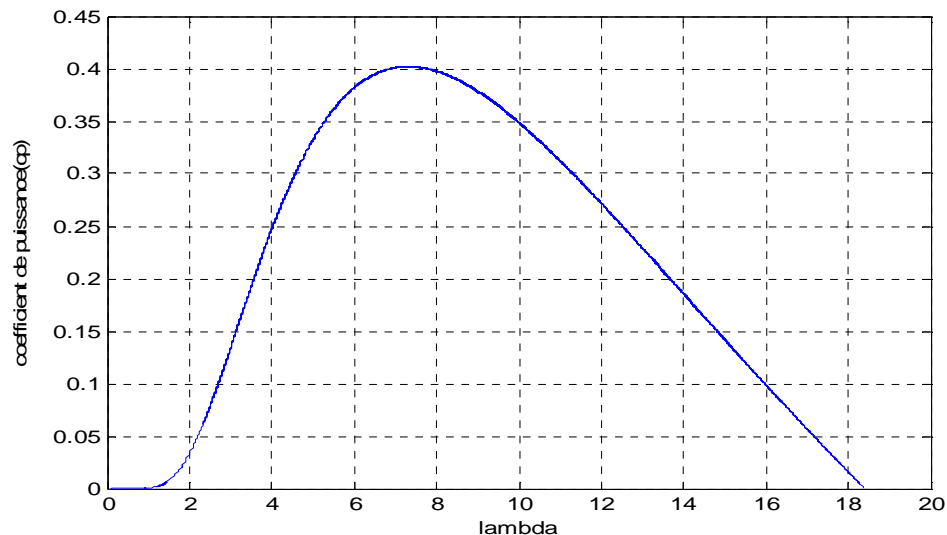
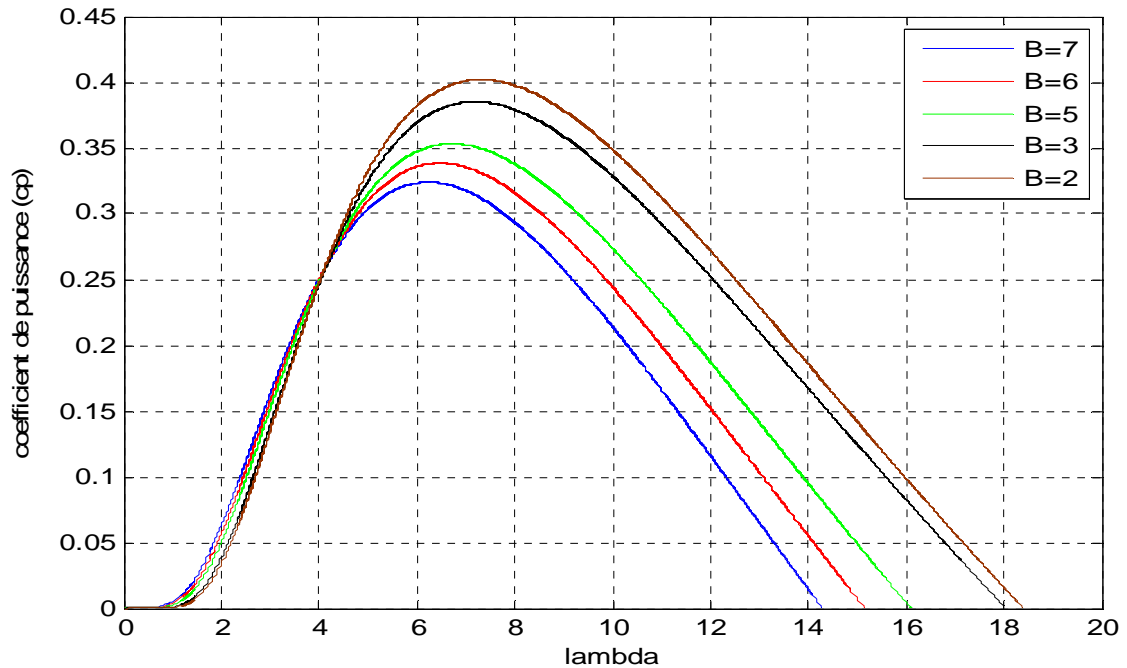


Fig II.5 Coefficient de puissance (C_p) en fonction de lambda

Les courbes de la caractéristique (C_p) en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la Figure (II.6). La valeur maximale de C_p est atteinte pour $\beta = 2$.

**Fig II.6** Caractéristique de C_p pour différentes valeurs de l'angle de calage B .

Les courbes apportent deux informations essentielles qu'on doit prendre en considération par la suite, qui sont :

1. Pour l'importe quel profil du vent, et pour un angle de calage $\beta = 2$, le coefficient de puissance atteint une valeur maximale qui est (0.4).
2. Le coefficient de puissance maximum est inversement proportionnel à l'angle de calage « β ».

Pour la vitesse réduite optimale, le coefficient de puissance est maximal et la voileure délivre un maximum de puissance mécanique. Il est donc fortement souhaitable d'exploiter le système éolien de façon à obtenir son fonctionnement sur ce point, le couple aérodynamique est déterminé par :

$$C_{a\text{ér}} = \frac{P_{a\text{ér}}}{\Omega_{\text{turb}}} = \frac{1}{2 * \lambda} * C_p * \rho * \pi * R^3 * V^2 \quad (\text{II. 7})$$

II.2.4 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de génératrice.

Ce multiplicateur est modélisé par les équations suivantes :

$$\Omega_{\text{turb}} = \frac{\Omega_{\text{méc}}}{G} \quad (\text{II. 8})$$

$$C_g = \frac{C_{\text{aér}}}{G} \quad (\text{II. 9})$$

II.2.5 Equation dynamique de l'arbre

L'équation de l'inertie totale J qui est constitué de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice est donnée comme suit :

$$J = \frac{J_{\text{turb}}}{G} + J_g \quad (\text{II. 10})$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique totale $C_{\text{méc}}$ appliquée au rotor :

$$C_{\text{méc}} = J * \frac{d\Omega_{\text{méc}}}{dt} \quad (\text{II. 11})$$

J : est l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice.

Ce couple mécanique prend en compte :

- Le couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em} .
- Le couple des frottements visqueux C_{vis} .
- Le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{\text{méc}} = C_g - C_{\text{em}} - C_{\text{vis}} \quad (\text{II. 12})$$

$$C_{\text{vis}} = f * \Omega_{\text{méc}} \quad (\text{II. 13})$$

II.2.6 Schéma bloc du modèle de la turbine

On s'aidant de modèle mathématique de la turbine obtenu précédemment, on procède à la réalisation de schéma bloc du modèle de la turbine qu'on va exploiter dans la simulation sur Matlab/Simulink.

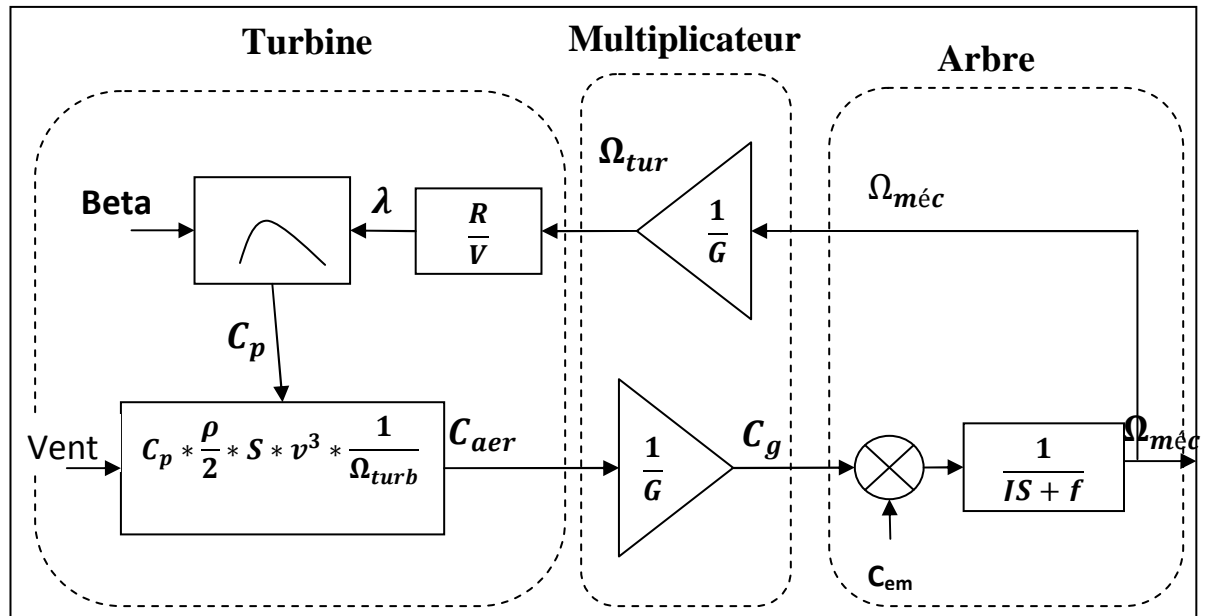


Fig II.7 Schémas bloc du modèle de la turbine.

La turbine génère le couple aérodynamique, qui est appliqué au multiplicateur. Ce dernier transforme :

- la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de rotor de la machine et en couple de multiplicateur.
- Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique.

II.3 Techniques d'extraction du maximum de la puissance (MPPT)

L'utilisation d'une turbine éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence générée quel que soit la vitesse du vent qui est considérée comme une grandeur perturbatrice[4].

La puissance mécanique ($P_{méc}$) est stockée dans l'inertie totale (J) et apparaissant sur l'arbre de la génératrice est exprimée comme étant le produit entre le couple mécanique ($C_{méc}$) et la vitesse mécanique $\Omega_{méc}$:

$$P_{méc} = C_{méc} * \Omega_{méc} \quad (\text{II. 14})$$

Dans cette partie, nous présenterons différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée.

On distingue deux familles de structures de commande :

1. Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
2. Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

II.3.1 Maximisation de la Puissance avec asservissement de la vitesse

La nature fluctuante du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien, et crée des variations continues de puissance. De cet effet, il est supposé que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence quelque soit la puissance générée [8].

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (II. 15)$$

Selon L'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence.

$$C_{em-ref} = C_{ass}(\Omega_{méc-ref} - \Omega_{méc}) \quad (II. 16)$$

$$\Omega_{méc-ref} = G * \Omega_{turb-ref} \quad (II. 17)$$

C_{ass} : Régulateur de vitesse.

$\Omega_{méc-ref}$: vitesse mécanique de référence.

Selon l'équation (II.4), la vitesse de rotation de la turbine est égal à :

$$\Omega_{turb} = \frac{\lambda * V}{R} \quad (II. 18)$$

La vitesse de référence de la turbine peut être obtenue à partir de la valeur optimale de la vitesse spécifique λ_{opt} qui correspond à la valeur de coefficient de puissance maximale C_{pmax} , elle s'exprime par la relation suivante :

$$\Omega_{turb-ref} = \frac{V * \lambda_{Cpmax}}{R} \quad (II. 19)$$

Dans ce cas l'asservissement de la vitesse est assuré par un régulateur intégral proportionnel, ce dernier est insérer dans le schéma bloc du modèle de la turbine dont le but est de contrôler la vitesse mécanique. Le schéma est représenté dans la (Fig II.8).

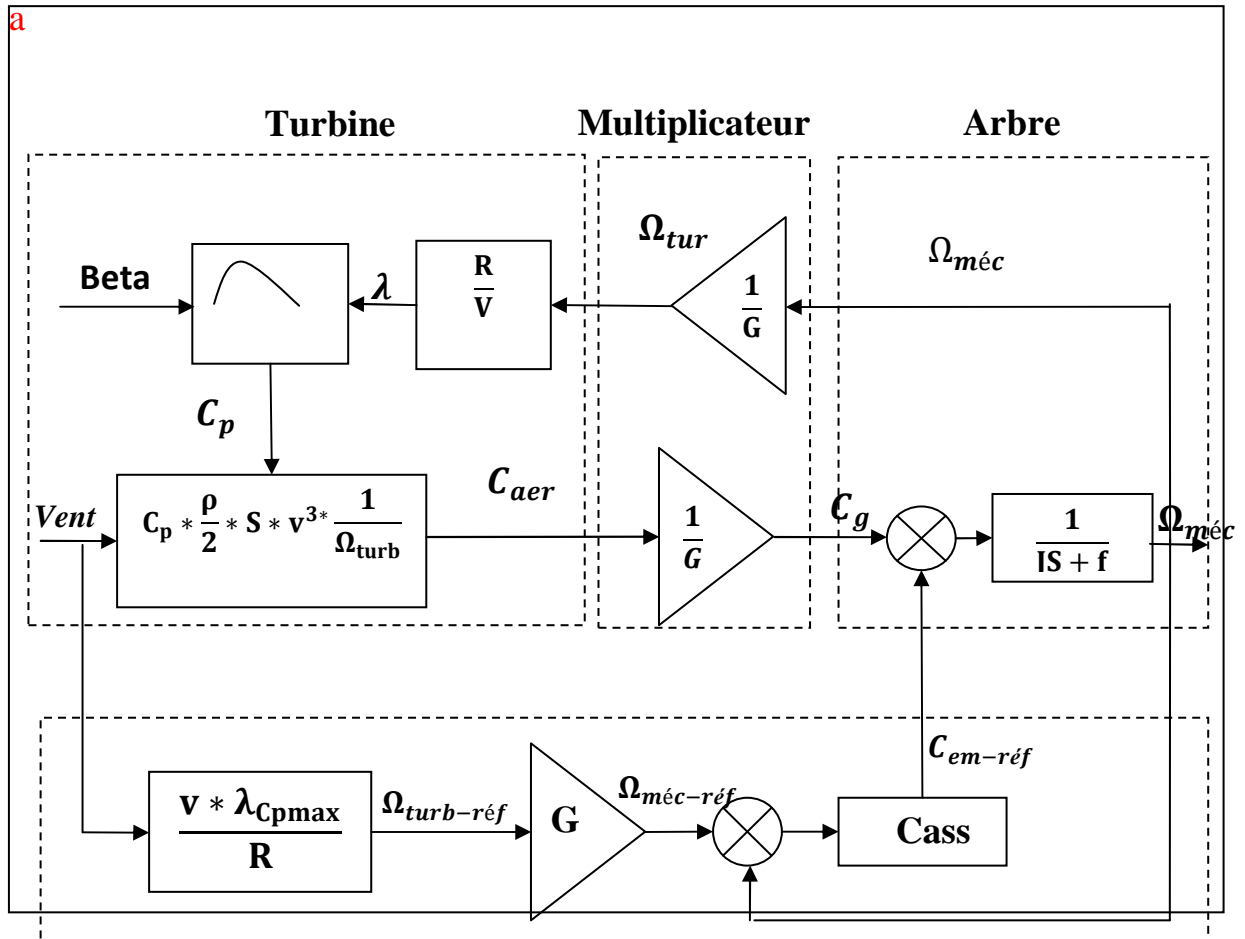


Fig II.8 Schémas bloc avec asservissement de la vitesse mécanique.

II.3.2.1 Conception du correcteur de vitesse

Le correcteur de vitesse constitue la partie « intelligente » de l'asservissement dans cette méthode de maximisation de puissance, et sa détermination judicieuse confère à L'asservissement de ses qualités.

Il doit accomplir les deux fonctions suivantes :

- 1- Asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- 2- Atténuer l'action du couple aérodynamique qui constitue une entrée perturbatrice.

Un correcteur Intégral Proportionnel (IP) a été utilisé dans le développement du modèle.

$$C_{em-ref} = \left(\frac{K_I}{S} \right) * (\Omega_{méc-ref} - \Omega_{méc}) \quad (II. 20)$$

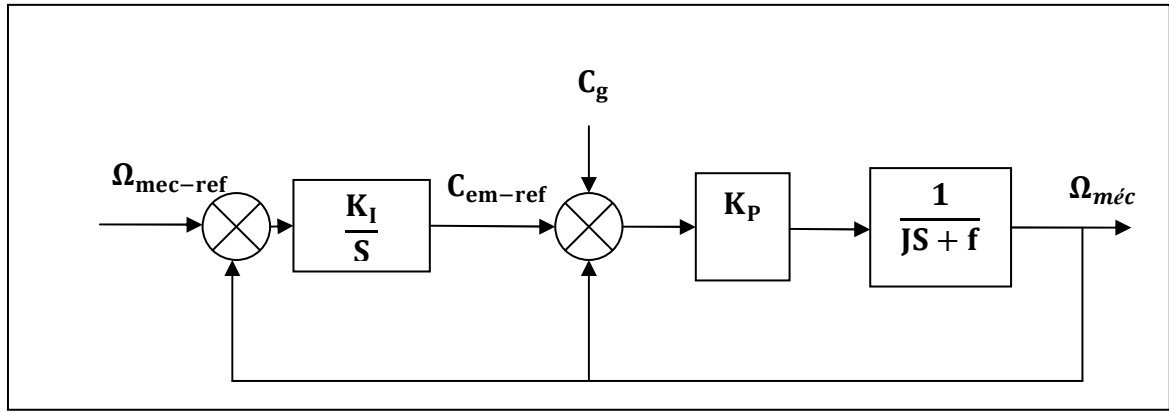


Fig II.9 Schéma bloc de correcteur (IP)

$$\Omega_{méc} = f(S) * \Omega_{méc-ref} + G(S) * C_g \quad (II. 21)$$

$f(S)$: La fonction de transfert de la vitesse.

$$f(S) = \frac{K_P * K_I}{J * S^2 + (K_P + f) * S + K_P * K_I} \quad (II. 22)$$

$$G(S) = \frac{\frac{-K_P * K_I}{J}}{S^2 + \frac{f}{J} * S - \frac{K_P * K_I}{J}} \quad (II. 23)$$

$$w_n = \sqrt{\frac{K_P * K_I}{J}} \quad (II. 24)$$

$$\xi = \frac{f + K_P}{2 * J * w_n} \quad (II. 25)$$

$$K_I = \frac{J * w_n^2}{K_P} \quad (II. 26)$$

$$K_P = 2 * J * \xi * w_n - f \quad (II. 27)$$

K_I et K_P : sont les paramètres de régulateur (IP)

K_I : Gain intégral statique.

K_P : Gain statique proportionnel.

Pour déterminer les paramètres K_I et K_P , il faut imposer un facteur d'amortissement ξ , et un temps de réponse t_r .

II.3.2.2 Simulation et interprétation

Pour une éolienne d'une puissance générée de 2MW, on va choisir un modèle tri-pale dont la longueur d'une pale est de 41m, une surface de 5278.35 m² et le gain du multiplicateur de vitesse est de 77.

II.3.2.2.a Résultat de simulation

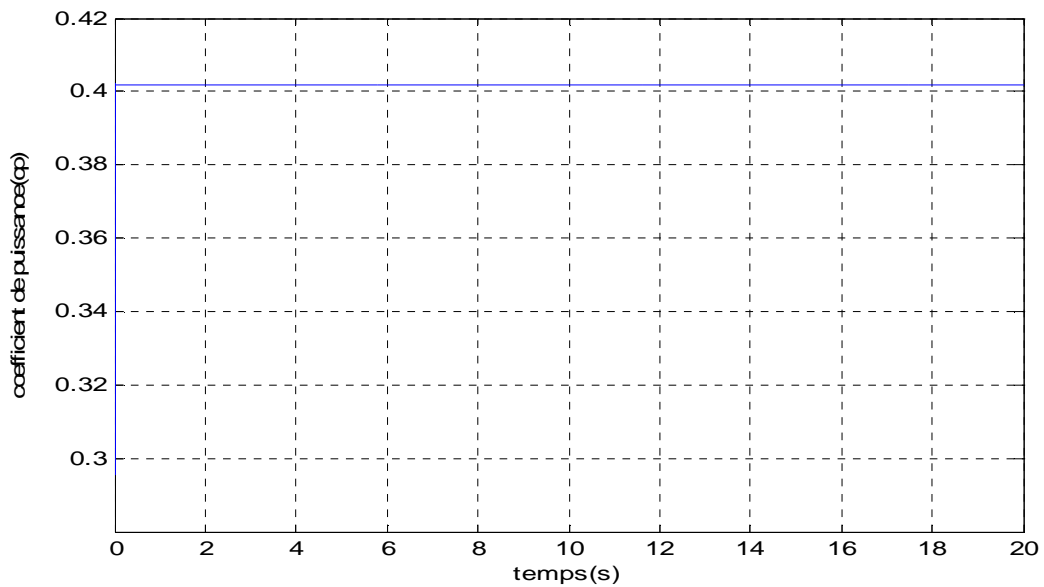


Fig II.10 Coefficient de puissance (C_p) en fonction de temps.

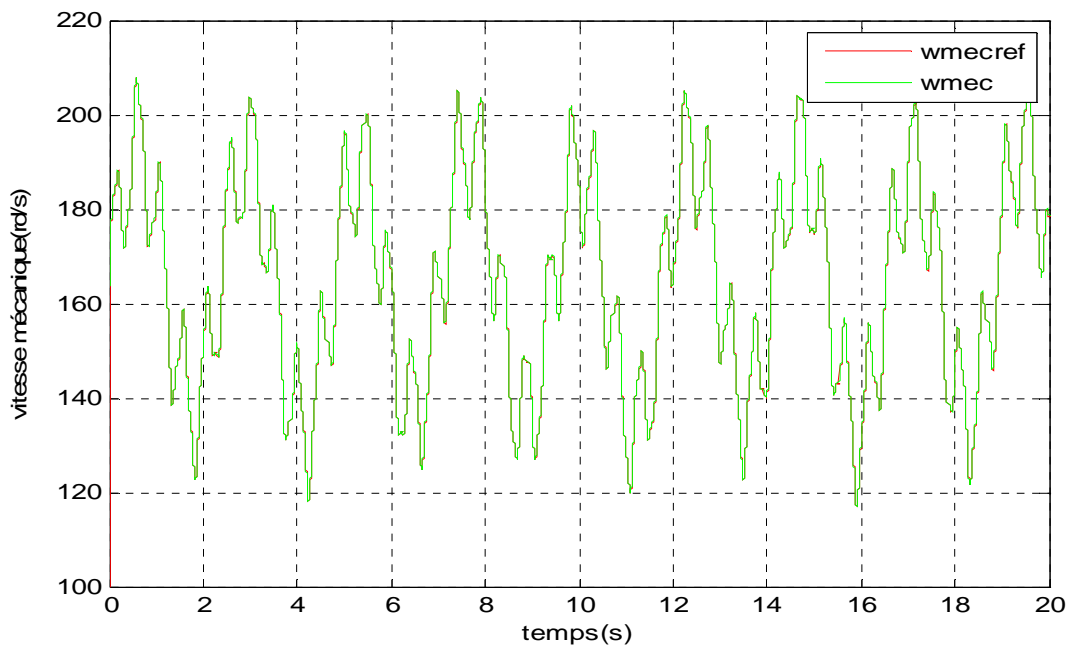
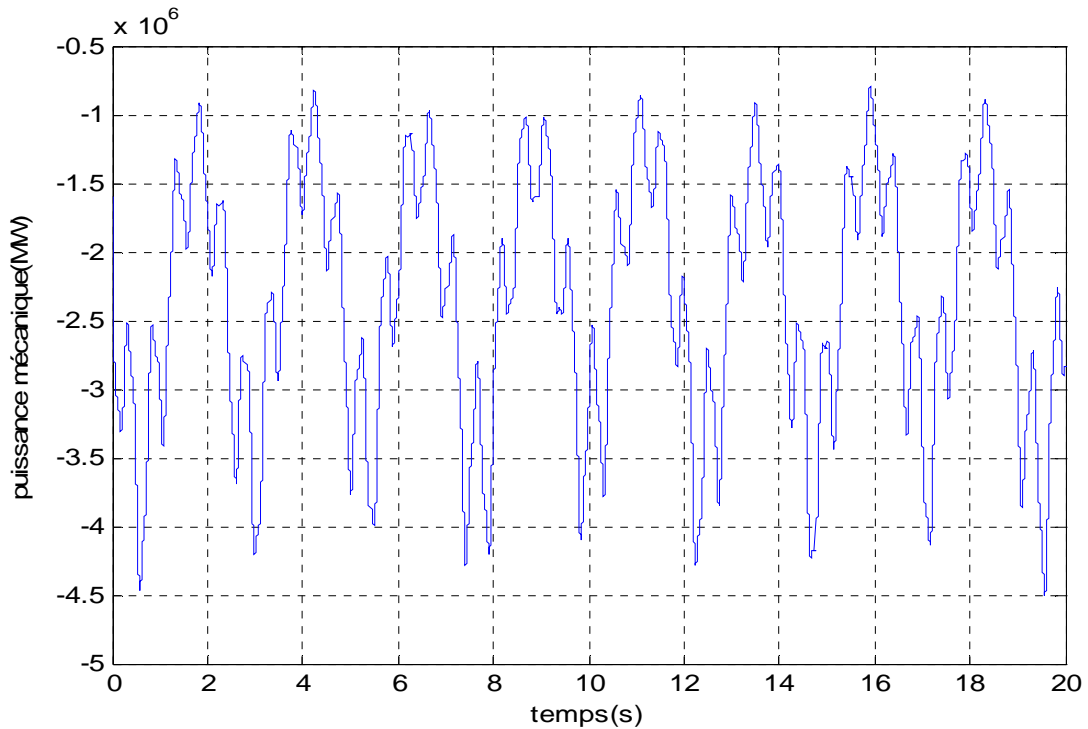


Fig II.11 Vitesse mécanique et sa référence en fonction de temps.



. **Fig II.12** Puissance mécanique en fonction de temps.

II.3.2.2.b Interprétation des résultats de simulation

Les résultats de simulation du modèle sous **matlab /simulink** pour la structure de commande avec asservissement de vitesse montrent que les résultats suivent l'allure de vent appliqué convenablement, le coefficient de puissance est de 0.4 (c'est la valeur maximale pour avoir un maximum de puissance extraite du vent). La figure (II.11) montre assez clairement que la vitesse mécanique suit bien sa référence et ça grâce au régulateur ce qui est l'objectif de la commande utilisée. La puissance mécanique atteint des valeurs importantes (4MW).

II.3.2.3 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Etant donné que la technique précédente de maximisation de puissance repose sur la connaissance précise de la vitesse du vent, ce qui rend le réglage de la vitesse de rotation de la turbine relativement difficile, et dégrade les puissances captées avec des mesures erronées de cette vitesse de vent. Le recours au control des éoliennes sans asservissement de vitesse est devenu une nécessité pour la plupart des constructeurs. Cette méthode est basée sur l'hypothèse que la vitesse du vent soit estimée et par conséquent la vitesse de rotation de la turbine varie très peu en régime permanent [8].

Ceci, nous conduit à déduire :

- Le couple mécanique exercé sur l'arbre est considéré nul $C_{méc} = 0$.

- Le couple résistant dû aux frottements peut être négligé $C_{vis} = 0$.

Le comportement dynamique de la turbine est décrit par l'équation statique :

$$C_{méc} = C_g - C_{em} - C_f = C_g - C_{em} = 0 \quad (II. 28)$$

$$C_{em} = C_g = \frac{C_{aér}}{G} \quad (II. 29)$$

Le couple électromagnétique de référence est déterminé à partir d'une estimation du couple aérodynamique :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aér-esti}}{G} \quad (II. 30)$$

Le couple aérodynamique estimé est déterminé par l'expression :

$$C_{aer-esti} = \frac{1}{2} * C_p * \rho * S * \frac{1}{\Omega_{turb-esti}} * v_{esti}^3 \quad (II. 31)$$

$\Omega_{turb-esti}$: Est la vitesse estimée de la turbine, elle est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique.

$$\Omega_{turb-esti} = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (II. 32)$$

v_{esti} : est la valeur estimée de la vitesse du vent, elle peut être donnée par l'expression (II.33).

$$v_{esti} = \frac{R * \Omega_{turb-esti}}{\lambda} \quad (II. 33)$$

En utilisant les formules du (II.30), au (II.33), on obtient une expression globale du couple électromagnétique de référence :

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} * \frac{C_p}{\lambda^3} * \rho * \pi * R^5 * \frac{\Omega_{méc}^2}{G^3} \quad (II. 34)$$

Pour que la puissance extraite soit maximale, on associe à la grandeur λ sa valeur optimale λ_{opt} correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax} . La valeur du couple électromagnétique de référence est alors réglée à la valeur maximale suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} * \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} * \rho * \pi * R^5 * \frac{\Omega_{méc}^2}{G^3} \quad (II. 35)$$

$$K_{opt} = \frac{1}{2} * \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} * \rho * \pi * R^5 * \frac{1}{G^3} \tag{II.36}$$

L'expression (II.34) peut s'écrire sous la forme :

$$C_{em-ref} = K_{opt} * \Omega_{méc}^2 \tag{II.37}$$

Schémas bloc de modèle

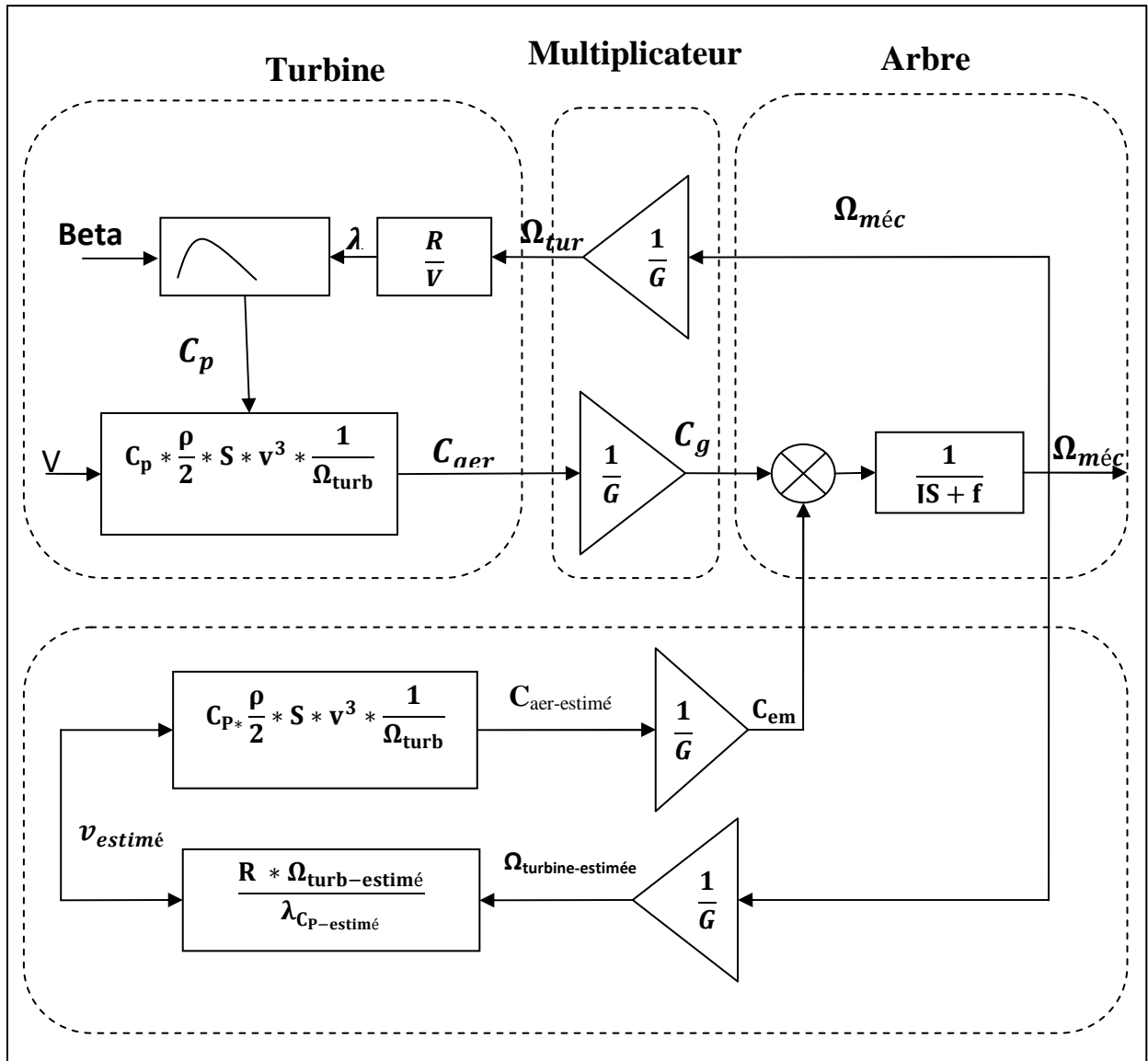


Fig II. 13 Schémas bloc de modèle de la turbine sans asservissement de la vitesse.

II.3.2.a Résultats de simulation

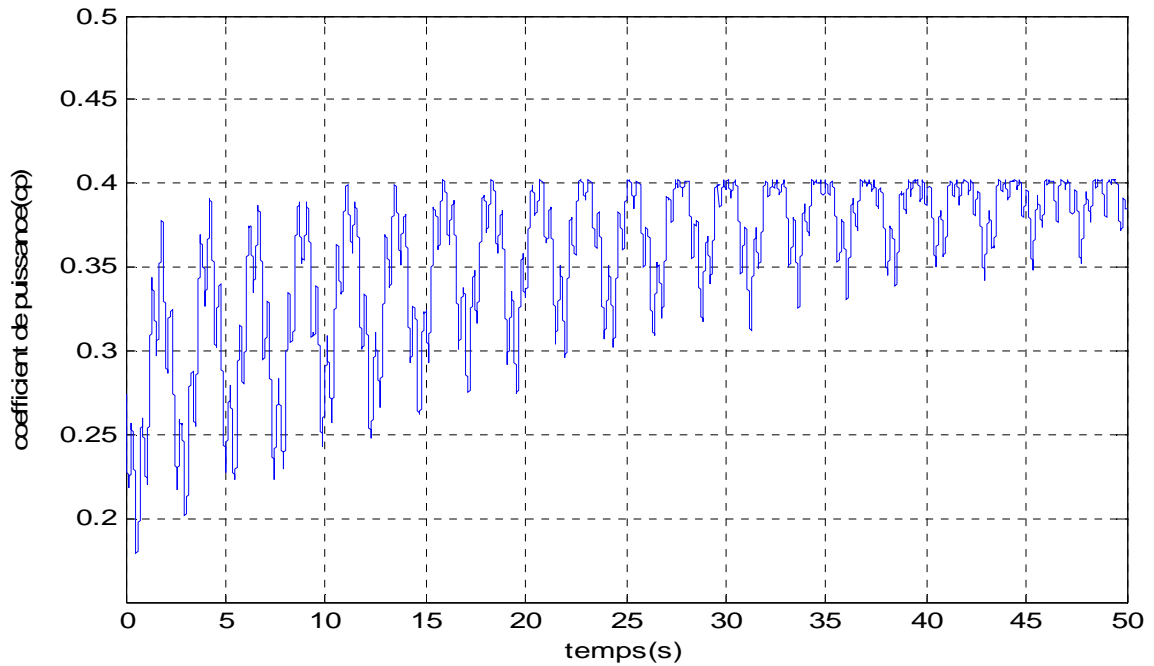


Fig II.14 Coefficient de puissance en fonction de temps.

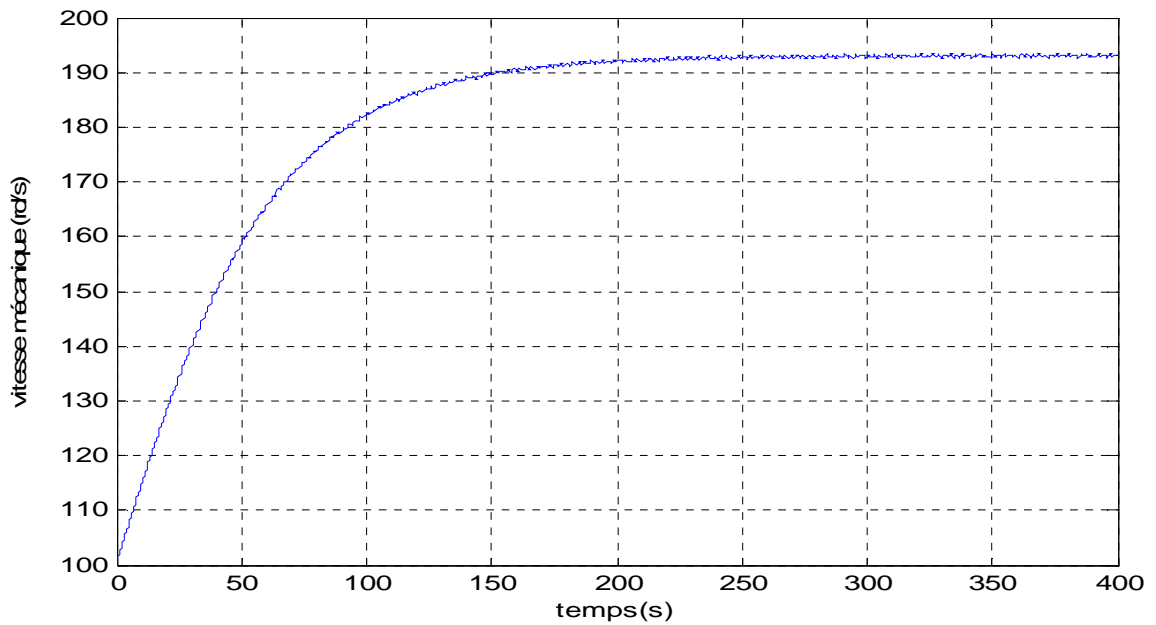


Fig II.15 Vitesse mécanique en fonction de temps.

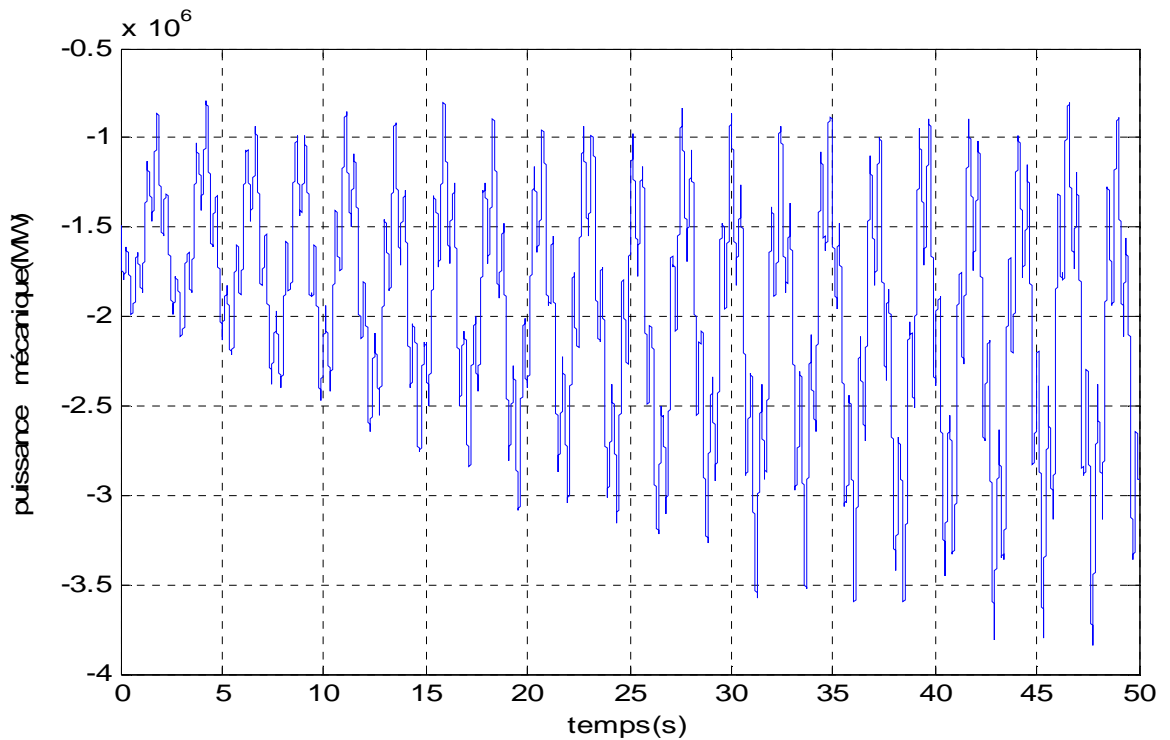


Fig II.16 Puissance mécanique en fonction de temps.

II.3.2.b. Interprétation des résultats

Les résultats obtenus montrent que les allures des grandeurs (coefficient de puissance, puissance et vitesse mécanique) sont aussi affectés par le profil du vent, l'allure de coefficient de puissance présente plus de fluctuations.

II.3.3 Comparaison entre les résultats obtenus :

Les figures (II.17, II.18, II.19) montrent les résultats de simulation pour les trois cas de commande :

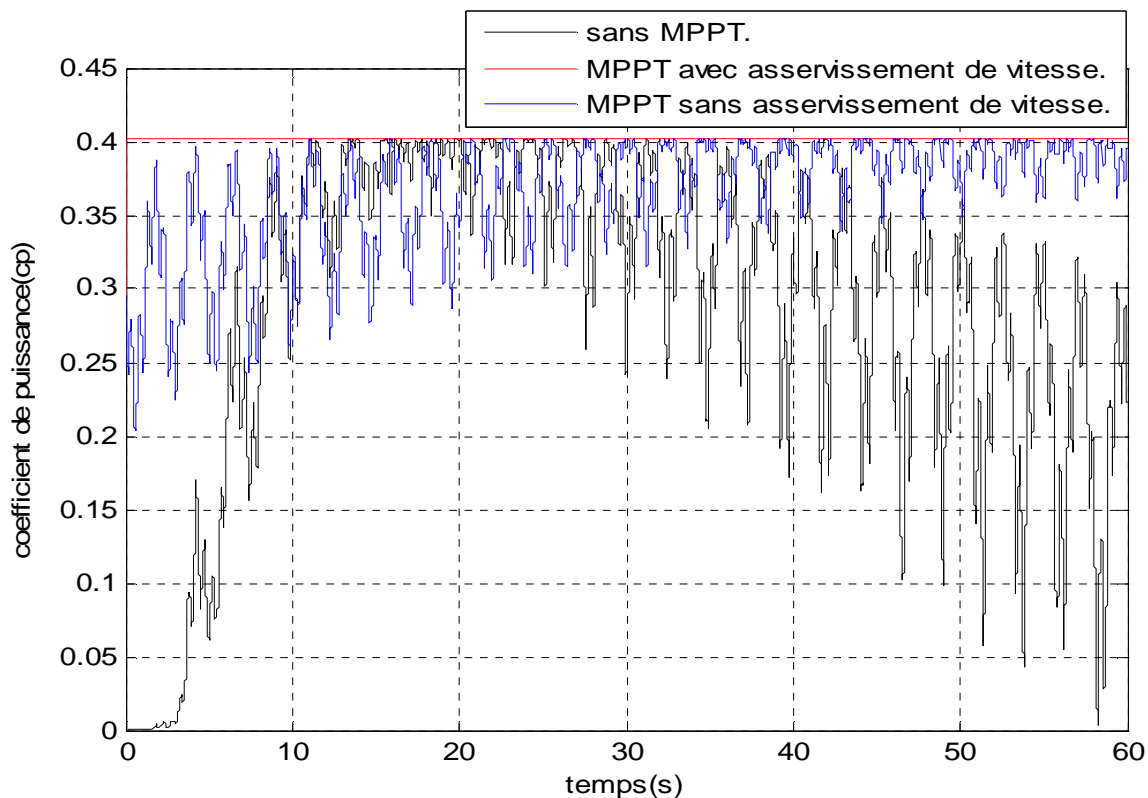


Fig II.18 Coefficient de puissance en fonction de temps(s).

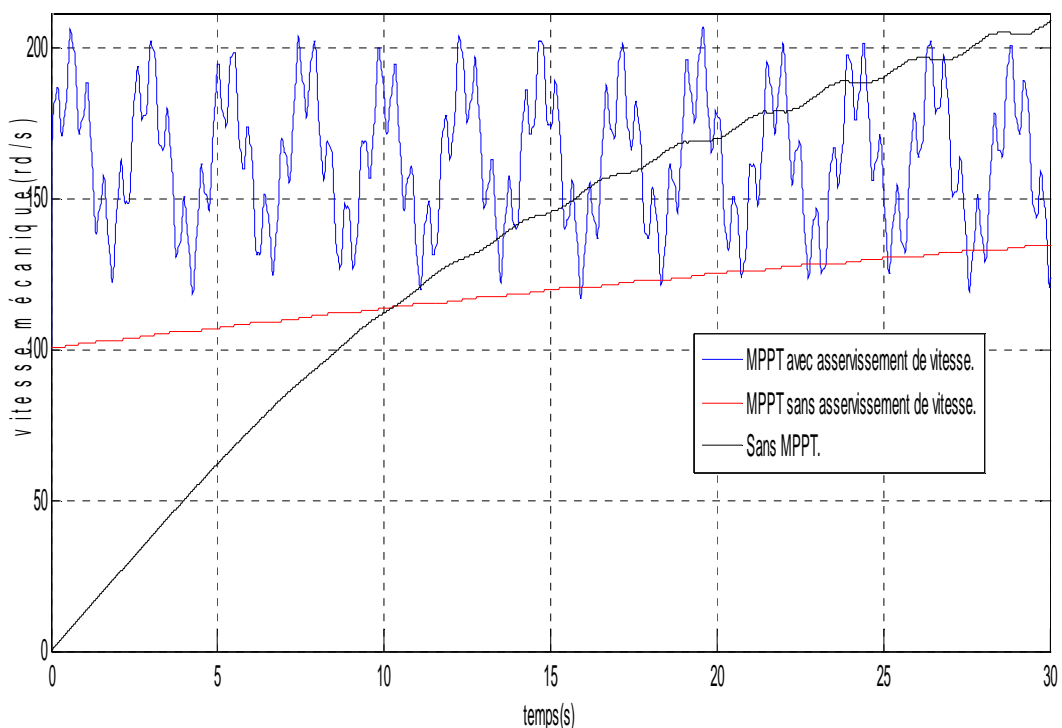


Fig II.17 Vitesse mécanique en fonction de temps.

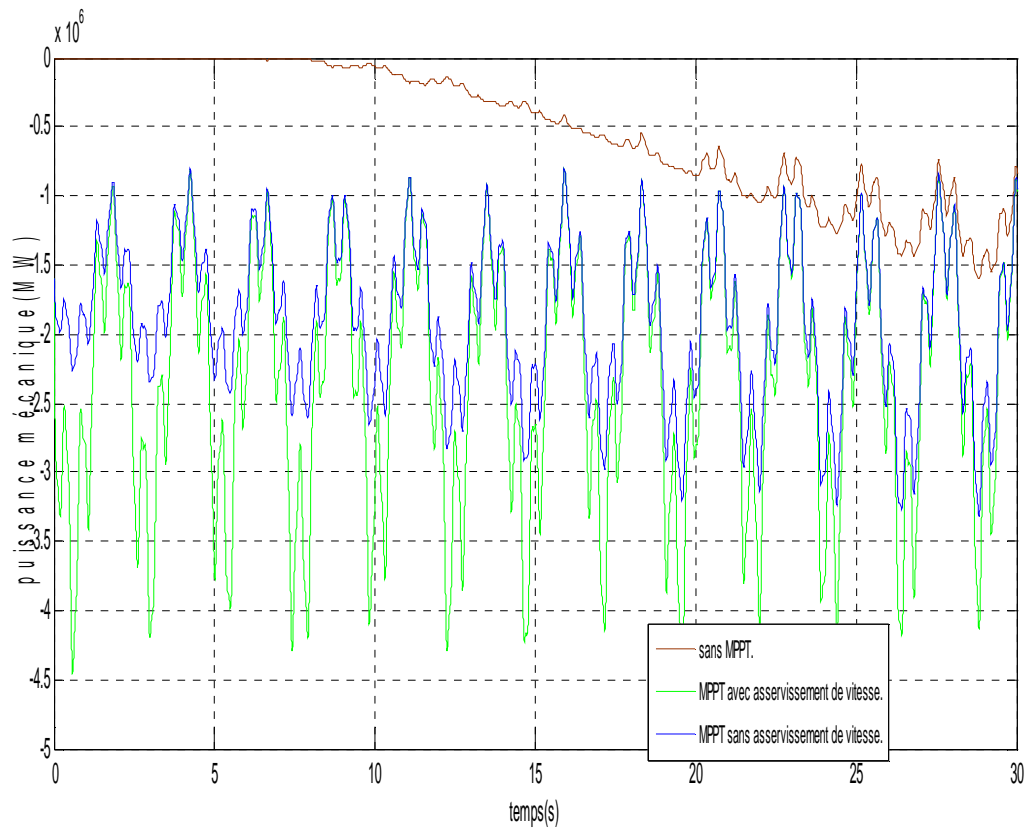


Fig II.19 Puissance mécanique en fonction de temps.

Le profil du vent qui est montré dans la figure (II.1) est le même que celui que on a appliqué dans les trois cas de MPPT. Dans le cas de la turbine sans MPPT, on constate que le coefficient de puissance maximal est atteint, mais instantanément, donc il est instable. Pour la commande avec asservissement de vitesse et celle d'estimation de vitesse du vent, le coefficient de puissance atteint un état d'équilibre stable avec une valeur maximale est égal à (0.4) qui est le point idéal pour avoir un maximum de puissance extraite du vent, la puissance mécanique atteint une valeur maximale mais elle est instable dans le cas sans MPPT, ce qui n'est pas adéquat quand on cherche à avoir un maximum de puissance extraite du vent, pour les autres cas avec MPPT, nous remarquons que la puissance obtenue avec asservissement de vitesse est la plus importante, elle atteint une valeur de (-4.5 MW) pour une vitesse du vent de 15 m/s avec un temps de réponse réduit par rapport aux deux autres cas et cela grâce au régulateur.

La Figure (II.18) montre la vitesse mécanique pour les différentes techniques. Ces résultats montrent qu'on a un meilleur contrôle de la vitesse en régime transitoire et en régime permanent en boucle fermée, la vitesse atteint 200 rad/s dans un laps de temps assez réduit par rapport à celle avec MPPT sans asservissement de la vitesse et elle est médiocre pour le cas sans MPPT.

III Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé la turbine éolienne, puis nous avons introduit cette modélisation sous *MATLAB/SIMULINK* dont le but d'observer la caractéristique de coefficient de puissance (C_p). Les résultats de la simulation montrent assez clairement que le coefficient de puissance atteint sa valeur maximale (**0.4**) pour **B=2** quelque soit la vitesse du vent.

En suite, on a montré les deux techniques principales qui existent pour maximiser la puissance extraite du vent avec leurs modèles mathématiques. Les résultats de simulation de chaque modèle sur *MATLAB/SIMULINK* montrent que les allures de toutes les grandeurs (coefficient de puissance, puissance et vitesse mécanique) sont affectées par le profil du vent introduit.

Finalement, on a effectué une comparaison entre les résultats obtenus des trois cas étudiés, le prochain chapitre sera consacré pour l'étude et la commande du système de conversion éolien.

Chapitre III

Commande du générateur éolien

III.1 Introduction

Dans notre travail, Le générateur éolien est constitué d'une turbine à vitesse variable couplée directement à une génératrice synchrone à aimants permanents raccordée à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance MLI [1]. Cette chaîne de conversion est complémentaire, Pour prévoir son fonctionnement, On est amené à traiter le système élément par élément car ce genre d'étude repose sur le savoir de comportement de chaque composant constitutif. Pour cette raison, la première partie de ce chapitre sera consacré pour la modélisation de la GSAP dans le repère naturel, puis dans le repère de PARK. Ensuite, nous passons à la modélisation de convertisseur de puissance MLI. Dans La deuxième partie, on propose une commande de générateur éolien dite : « commande en couple » pour maximiser la puissance de sortie. Par la suite, On procède à la simulation des modèles mathématiques établis sous l'environnement MATLAB/SIMULINK et la présentation des résultats avec leurs interprétations.

III.2 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

III.2.1 Les hypothèses simplificatrices

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (robustesse, maintenance, prix), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne. Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses simplificatrices essentielles [17]:

- . L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- . La distribution sinusoïdale de le FMM crée par les enroulements du stator.
- . L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- . L'effet d'encoche est négligeable.
- . La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

Comme les enroulements statoriques sont montés en étoile à neutre isolé (fig III.1), la somme instantanée des courants statoriques est nulle, de sorte qu'il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou de flux, elle n'intervient pas dans le couple. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

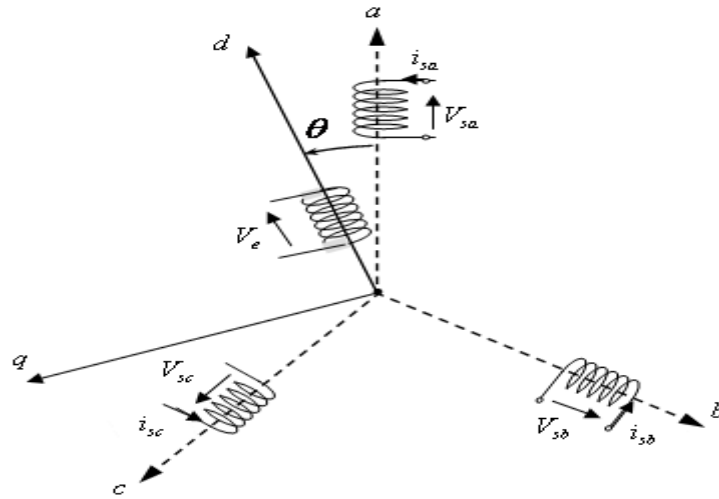


Fig III .1 Représentation de la génératrice synchrone.

III.2.2 Les équations électrique de la machine synchrone à aimants permanents

D'après la loi d'ohm, les expressions des tensions simples aux bornes des trois phases statoriques a, b, c. de la machines peuvent s'écrire [19] :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_a * i_{sa} + \frac{d\Phi_{ta}}{dt} \\ V_{sb} = R_b * i_{sb} + \frac{d\Phi_{tb}}{dt} \\ V_{sc} = R_c * i_{sc} + \frac{d\Phi_{tc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III. 1})$$

Ou :

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Sont respectivement les tensions simple des phases a, b, c.

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Sont respectivement les courants dans les phases a, b, c.

R_a, R_b, R_c : Sont respectivement les résistances des phases a, b, c.

$\Phi_{ta}, \Phi_{tb}, \Phi_{tc}$: Sont respectivement les flux induit dans les phases a, b, c.

On peut décomposer les flux en distinguant les flux auto-induits par les courants statoriques eux même et ceux dus à l'aimant rotorique :

$$\begin{cases} \Phi_{ta} = \Phi_{sa} + \Phi_{ra} \\ \Phi_{tb} = \Phi_{sb} + \Phi_{rb} \\ \Phi_{tc} = \Phi_{sc} + \Phi_{rc} \end{cases} \quad (\text{III. 2})$$

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$: Sont respectivement les flux auto-induits par les courants dans les phases statoriques a, b, c.

$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$: Sont respectivement les flux transmis par les aimants dans les phases statoriques a, b, c.

En introduisant les inductances, les flux créés par les courants eux-mêmes dans les phases statoriques peuvent s'écrire :

$$\begin{cases} \Phi_{sa} = L_{aa} * i_{sa} + M_{ab} * i_{sb} + M_{ac} * i_{sc} \\ \Phi_{sb} = L_{bb} * i_{sb} + M_{ba} * i_{sa} + M_{bc} * i_{sc} \\ \Phi_{sc} = L_{cc} * i_{sc} + M_{ca} * i_{sa} + M_{cb} * i_{sb} \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} : Sont respectivement les inductances propres des phases a, b, c.

$M_{ab}, M_{ba}, M_{ac}, M_{ca}, M_{bc}, M_{cb}$: Sont respectivement les inductances mutuelles entre les phases a, b, c. Comme les phases sont symétriques est les inductances sont indépendantes de la position du rotor, on peut écrire :

$$\begin{cases} M_{ab} = M_{ac} = M_{ba} = M_{bc} = M_{ca} = M_{cb} = M \\ R_a = R_b = R_c = R \\ L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L \end{cases} \quad (\text{III. 4})$$

Étant donné que les enroulements des phases de la machine sont connectés en étoile avec neutre en l'air, la composante homopolaire du courant est nulle, il est possible de faire la simplification suivante :

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \Rightarrow i_{sb} + i_{sc} = -i_{sa} \quad (\text{III. 5})$$

Pour la phase a, le flux peut s'écrire :

$$\Phi_{sa} = L * i_{sa} + M * (i_{sb} + i_{sc}) = (L - M) * i_{sa} = L_m * i_{sa} \quad (\text{III. 6})$$

Où : $L_m = (L - M)$ représente l'inductance équivalente d'une phase.

La méthode est répétée pour les deux autres phases et les flux créés par les courants statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} \Phi_{sa} = L_m * i_{sa} \\ \Phi_{sb} = L_m * i_{sb} \\ \Phi_{sc} = L_m * i_{sc} \end{cases} \quad (\text{III. 7})$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \Phi_f * \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III. 8})$$

Où θ_r est l'angle électrique et Φ_f est le flux de l'aimant vu du stator.

Les flux totaux induit dans les phases a, b, c peuvent alors s'écrire :

$$\begin{cases} \Phi_{ta} = L_m * i_{ra} + \Phi_{ra} \\ \Phi_{tb} = L_m * i_{rb} + \Phi_{rb} \\ \Phi_{tc} = L_m * i_{rc} + \Phi_{rc} \end{cases} \quad (\text{III. 9})$$

Le modèle électrique de la machine prend alors la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sa} = R * i_{sa} + L_m * \frac{di_{sa}}{dt} + \frac{d\Phi_{ra}}{dt} \\ V_{sb} = R * i_{sb} + L_m * \frac{di_{sb}}{dt} + \frac{d\Phi_{rb}}{dt} \\ V_{sc} = R * i_{sc} + L_m * \frac{di_{sc}}{dt} + \frac{d\Phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III. 10})$$

Le troisième terme du système d'équation (III.10) représente la force électromotrice (**f.c.e.m**) ou la tension induite par les aimants rotorique dans chaque phase rotorique.

L'expression de la **f.c.e.m** de la phase(a)s'écrit :

$$e_a = \frac{d\Phi_{ra}}{dt} = \frac{d\Phi_{ra}}{d\theta} * \frac{d\theta}{dt} = \omega_r * e_{ra} \quad (\text{III. 11})$$

$$\text{Avec : } e_{ra} = \frac{d\Phi_{ra}}{d\theta}$$

Et de la même façon pour les deux autres phases b, c :

$$\begin{cases} e_b = \omega_r * e_{rb} \\ e_c = \omega_r * e_{rc} \end{cases} \quad (\text{III. 12})$$

θ : Angle de rotation mécanique.

$\omega_r = \frac{d\theta}{dt}$: vitesse de rotation mécanique.

Les grandeurs représente les **f.c.e.m** par unité de vitesse ou les variations par rapport à la position rotorique de flux transmis par les aimants à travers les phases statoriques a, b, c.

Le système d'équation devient :

$$\begin{cases} V_{sa} = R * i_{sa} + L_m * \frac{di_{sa}}{dt} + \omega_r * e_{ra} \\ V_{sb} = R * i_{sb} + L_m * \frac{di_{sb}}{dt} + \omega_r * e_{rb} \\ V_{sc} = R * i_{sc} + L_m * \frac{di_{sc}}{dt} + \omega_r * e_{rc} \end{cases} \quad (\text{III. 13})$$

Cette dernière peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} * \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_m \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \omega_r * \begin{bmatrix} e_{ra} \\ e_{rb} \\ e_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 14})$$

III.2.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère de park

III.2.3.1 La transformation de park

Pour simplifier le système d'équations à coefficients variables, un modèle dans le repère de Park de cette machine (fig III.2) sera utilisé V_{sd}, V_{sq} et i_{sd}, i_{sq} . Le repère de Park est en fait un repère diphasé, équivalent du repère triphasé, Il est plus simple à manipuler car les grandeurs électriques évoluent comme des grandeurs continues. On peut passer de l'un à l'autre repère à l'aide de matrices de passage [4,12].

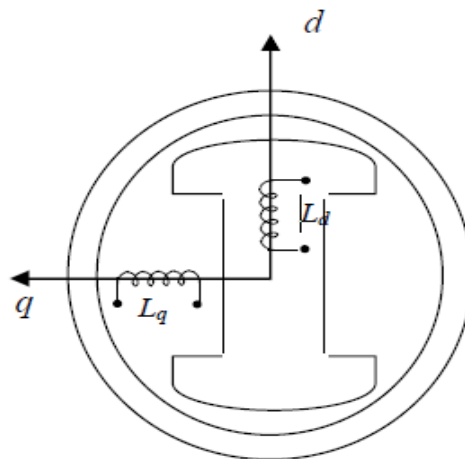


Fig III.2 Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.

Les deux bobines d et q, tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q), nous permettent de passer de repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine.

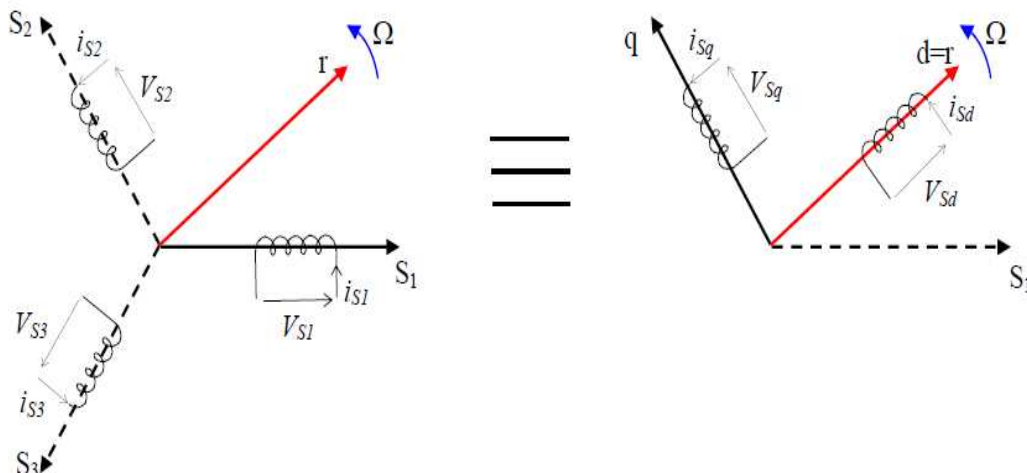


Fig III.3 Passage de Repère naturel du stator au repère (d, q) de Park.

En mettent : $V_{s1} = V_{sa}, V_{s2} = V_{sb}, V_{s3} = V_{sc}$

$$[V_{sdq}] = [P(\theta)] * [V_{sabc}] \quad (\text{III. 15})$$

$$[i_{sdq}] = [P(\theta)] * [i_{sabc}] \quad (\text{III. 16})$$

Avec :

$P(\theta)$: Matrice de **PARK** est donnée par [13]:

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 17})$$

Après développement des équations ci-dessus, on obtient les équations suivantes [4] :

$$V_{sd} = R_s * i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - p * \Omega_{méc} * \Phi_{sq} \quad (\text{III. 18})$$

$$V_{sq} = R_s * i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + p * \Omega_{méc} * \Phi_{sd} \quad (\text{III. 19})$$

- **Equations magnétiques**

Les équations magnétiques sur les axes d et q sont données par les expressions suivantes :

$$\Phi_{sd} = L_{sd} * i_{sd} + \Phi_f \quad (\text{III. 20})$$

$$\Phi_{sq} = L_{sq} * i_{sq} \quad (\text{III. 21})$$

Φ_f : représente le flux des aimants à travers le circuit équivalent direct.

- **Equations électriques**

Les équations de la machine dans le repère de Park sont les suivantes :

$$V_{sd} = R_s * i_{sd} + L_{sd} * \frac{di_{sd}}{dt} - p * \Omega_{méc} * L_{sq} * i_{sq} \quad (\text{III. 22})$$

$$V_{sq} = R_s * i_{sq} + L_{sq} * \frac{di_{sq}}{dt} + p * \Omega_{méc} * L_{sd} * i_{sd} + p * \Omega_{méc} * \Phi_f \quad (\text{III. 23})$$

$$\omega_e = p * \Omega_{méc}$$

Avec :

i_{sq}, i_{sd} : Courants statoriques dans le repère de Park [A].

V_{sq}, V_{sd} : Tensions statoriques dans le repère de Park [V].

R_s : Résistance statoriques [Ω].

L_s : Inductance cyclique statorique [H].

p : Nombre de paire de pôles de la machine synchrone.

ω_e : Vitesse électrique [rad/s].

Les tensions étant les grandeurs d'entrée, on peut exprimer les grandeurs de sortie (les courants) en fonction de celles-ci. On obtient alors :

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_{sd}} * (V_{sd} - R_s * i_{sd} + p * \Omega_{méc} * L_{sq} * i_{sq}) \quad (III. 23)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_{sq}} * (V_{sq} - R_s * i_{sq} - p * \Omega_{méc} * L_{sd} * i_{sd} - \omega_e * \Phi_f) \quad (III. 24)$$

- **Expression de couple**

Le couple électromécanique développé par le machines synchrone peut être donné par la relation suivante:

$$C_{em} = \frac{3}{2} * p * (\Phi_{sd} * i_{sq} - \Phi_{sq} * i_{sd}) \quad (III. 25)$$

Après affectation des opérations nécessaires on peut écrire :

$$C_{em} = \frac{3}{2} * p * [(L_{sd} - L_{sq}) * i_{sd} * i_{sq} + \Phi_f * i_{sq}] \quad (III. 26)$$

Dans une machine à pole lisse : $L_{sd} = L_{sq} = L_s$, Le couple électromagnétique sera :

$$C_{em} = \frac{3}{2} * p * \Phi_f * i_{sq} \quad (III. 27)$$

III.3 Modèle du redresseur MLI

L'utilisation des convertisseurs de puissance dans le système de conversion d'énergie éolienne permet, non seulement, d'obtenir la forme souhaitée de l'énergie électrique, mais aussi d'optimiser la puissance prélevée [5]. Plusieurs structures de conversion de l'énergie électrique fournie par la génératrice éolienne à vitesses variables peuvent être utilisées dans le but d'avoir une tension de fréquence et amplitude constants du coté réseau.

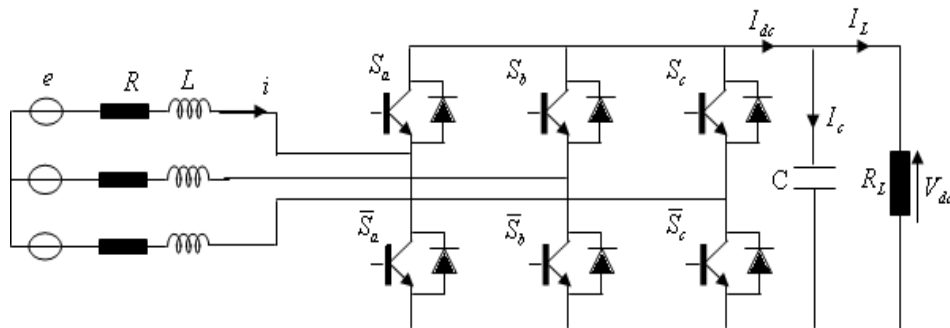


Fig III.4 Schémas de Redresseur MLI.

Dans l'étude de l'ensemble commande (machine – redresseur – charge), nous intéresserons uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine.

A fin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation en modélisant le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux, c'est-à dire :

- Résistance nulle à l'état passant.
- Résistance infinie à l'état bloqué.
- Réaction instantanée aux signaux de commande.

Pour le modèle dynamique du système, l'étude du convertisseur est divisée en trois parties: Le coté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le coté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir un lien entre le coté alternatif et le cote continu. Ensuite la liaison entre le coté alternatif et le coté continu au travers des interrupteurs; ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante [2]:

$$S = \begin{cases} +1, \bar{S} = -1 \\ -1, \bar{S} = +1 \end{cases} \quad \text{Pour : } S = a, b, c$$

Puis les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de : S_j, U_{dc} et les courant d'entrée i_a, i_b, i_c .

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (\text{III. 28})$$

Les tensions d'entrée entres phases du redresseur peuvent être décrites par :

$$\begin{cases} U_{sab} = (S_a - S_b) * U_{dc} \\ U_{sbc} = (S_b - S_c) * U_{dc} \\ U_{sca} = (S_c - S_a) * U_{dc} \end{cases} \quad (\text{III. 29})$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre peuvent être écrites ainsi :

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L * \frac{d}{dt} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 30})$$

Avec :

$$\begin{cases} U_{sa} = \frac{2 * S_a - S_b - S_c}{3} * U_{dc} \\ U_{sb} = \frac{2 * S_b - S_a - S_c}{3} * U_{dc} \\ U_{sc} = \frac{2 * S_c - S_a - S_b}{3} * U_{dc} \end{cases} \quad (\text{III. 31})$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage des cotés alternatif et continu:

$$C * \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a * i_a + S_b * i_b + S_c * i_c - i_l \quad (\text{III. 32})$$

Les équations précédentes dans les coordonnées synchrones dq sont:

$$\begin{cases} e_d = R * i_d + L * \frac{di_d}{dt} - \omega * L * i_q + U_{sd} \\ e_q = R * i_q + L * \frac{di_q}{dt} + \omega * L * i_d + U_{sq} \end{cases} \quad (\text{III. 33})$$

$$C * \frac{dU_{dc}}{dt} = S_d * i_d + S_q * i_q - i_l \quad (\text{III. 34})$$

III.4 Commande en couple de la GSAP

III.4.1 Principe général de la méthode

La commande vectorielle est une méthode qui traite la technique de contrôle des machines alternatif [20]. Son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes (i_{sd} , i_{sq}) en quadrature dans un référentiel lié au champs tournant de façon que l'une des composantes (i_{sq}) commande le couple et l'autre (i_{sd}) commande le flux, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu, à excitation séparée [21].

III.4.2 Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents

La commande de la génératrice est basée sur un pilotage vectoriel classique avec capteur de position [20]. Le champ magnétique d'excitation dans une machine synchrone est produit par le rotor. Ce champ magnétique tourne avec une vitesse angulaire égale à la vitesse de rotation électrique. Un autre champ magnétique tournant est appelé la réaction magnétique de l'induit est produit par les enroulements de stator. La vitesse de rotation est liée à la pulsation du champ tournant par la relation:

$$\omega = p * \Omega \quad (\text{III. 35})$$

Où : p est le nombre de paires de pôles de la machine. Si on suppose un fonctionnement de la machine à vide et sans pertes, seul le flux magnétique d'excitation apparaît. La commande vectorielle classique consiste à aligner un des deux axes du repère de Park, généralement l'axe direct d selon ce vecteur tournant composé par le champ d'excitation [20]. Lorsque la machine est chargée, une réaction d'induit apparaît et déplace le flux d'excitation. Le couple électromagnétique et la vitesse de rotation dépendent donc des courants statoriques et du flux magnétique.

Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à une machine synchrone, celle qui consiste à imposer une référence du courant direct i_{sd} à zéro est la plus répandue. Ce choix est justifié dans le but d'éviter la démagnétisation des aimants permanents due à la réaction d'armature selon l'axe d [4]. Le couple électromagnétique est donné donc par l'expression (III. 36).

$$C_{em} = \frac{3}{2} * p * (\phi_{sq} * i_{sq}) \quad (III. 36)$$

A flux d'excitation émis par les aimants, la régulation de couple Electromagnétique est possible en contrôlant le courant i_{sq} tandis que le courant i_{sd} est asservi à zéro.

III.4.3 Synthèse de correcteurs

On propose de mettre en œuvre des régulateurs de type PI dans la structure de commande. Les équations du modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents peuvent être écrites par la forme [4] :

$$V_{sd}(p) = R_s * I_s(p) + P * L_s * I_s(p) - \omega * \phi_{sq} \quad (III. 37)$$

$$V_{sq}(p) = R_s * I_{sq}(p) + P * L_s * I_{sq}(p) + \omega * \phi_{sd} \quad (III. 38)$$

Les termes de couplage en ($E_{dq} = \omega * \phi_{sdq}$) sont considérés comme des perturbations mesurables. La fonction de transfert de la machine peut s'écrire sous la forme :

$$G_s(p) = \frac{1}{R_s + L_s * p} = \frac{1}{R_s} * \frac{1}{1 + T_e * p} \quad (III. 39)$$

$$G_s(p) = \frac{i_{sdq}(p)}{v_{sdq}(p) + E_{dq}(p)} \quad (III. 40)$$

Avec la constante de temps électrique:

$$T_e = \frac{L_s}{R_s} \quad (III. 41)$$

- Les boucles de régulation se présentent alors sous la forme du schéma donné sur la figure (III.5).

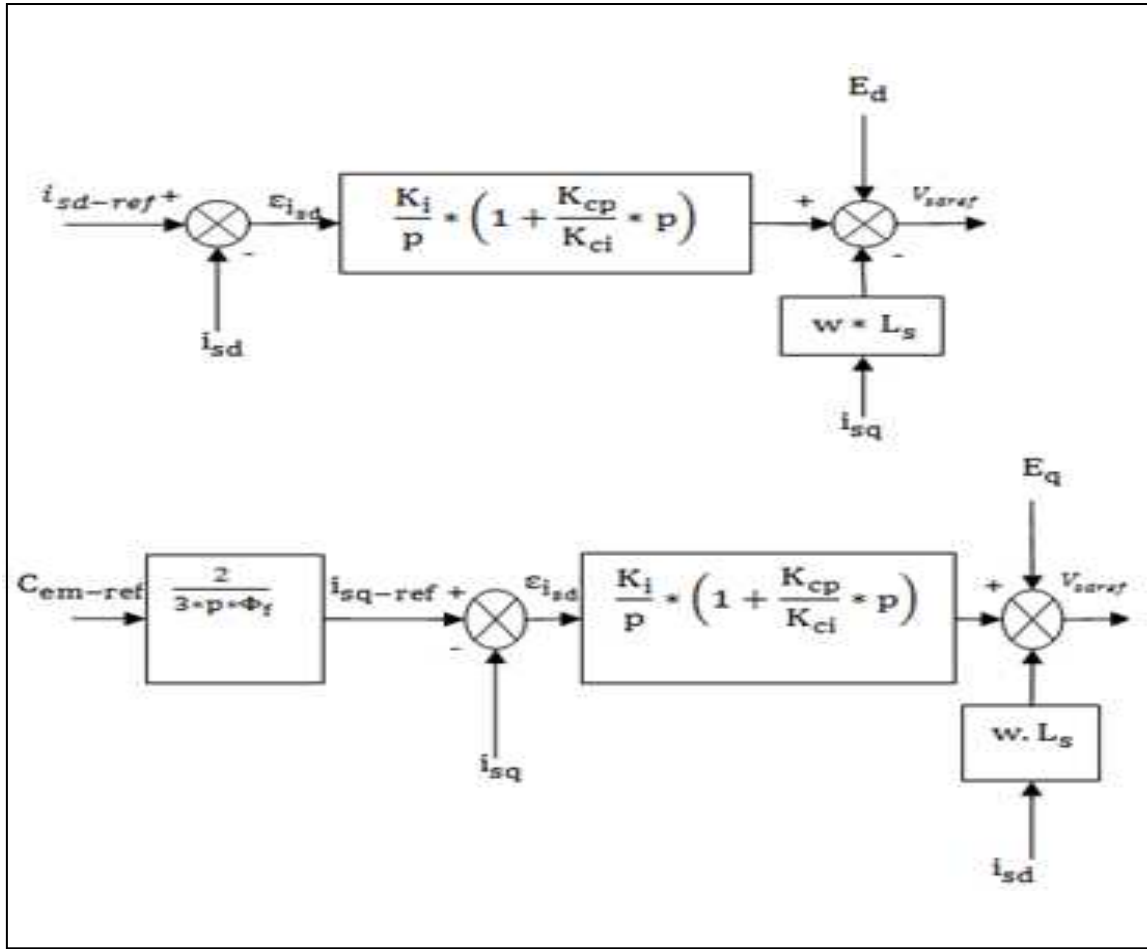


Fig III.5 Boucle de régulation de courant.

En boucle ouverte la fonction de transfert est égale à :

$$G_0(P) = \frac{K_I}{K_p} * \left(1 + \frac{K_p}{K_i} * p\right) * \frac{1}{R_s} * \frac{1}{1 + T_e * p} \tag{III. 42}$$

Les paramètres du régulateur sont déterminés par la méthode de la compensation du pôle. en boucle ouverte, les constantes de temps sont égales à :

$$T_0 = T_e = \frac{K_p}{K_i} \tag{III. 43}$$

En boucle fermée la fonction de transfert devient :

$$G(p) = \frac{G_0(p)}{1 + G_0(p)} = \frac{1}{1 + \frac{R_s}{K_i} * p} = \frac{1}{1 + T_f * p} \tag{III. 44}$$

En boucle fermée la constante de temps T_f est donc égale à :

$$T_f = \frac{R_s}{K_i} \quad (\text{III. 45})$$

Alors :

$$K_i = \frac{R_s}{T_f} \quad (\text{III. 46})$$

D'après l'expression (III.43) le coefficient proportionnel k_p du régulateur est calculé :

$$K_p = \frac{L_s}{T_f} \quad (\text{III. 47})$$

III.4.4 La simulation du système de conversion éolien

La figure (III.6) illustre les trois fonctions de la commande de la GSAP qui sont [13]:

- 1- l'algorithme d'extraction du maximum de puissance.
- 2- La commande vectorielle de la GSAP.
- 3- Le contrôle du convertisseur MLI.

Les techniques d'extraction du maximum de puissance détaillées dans le chapitre (II) permettent de piloter la génératrice synchrone en imposant un couple de référence donné par la formule (II.36).

La commande vectorielle de la GSAP permet d'appliquer les tensions de réglage nécessaires à ces bornes pour avoir le couple demandé [4]. La commande rapprochée du convertisseur détermine les signaux nécessaires à la MLI.

Dans notre travail le système de conversion éolien étudié et à attaque directe (sans multiplicateur mécanique) comme il est présenté sur la figure (III.6)

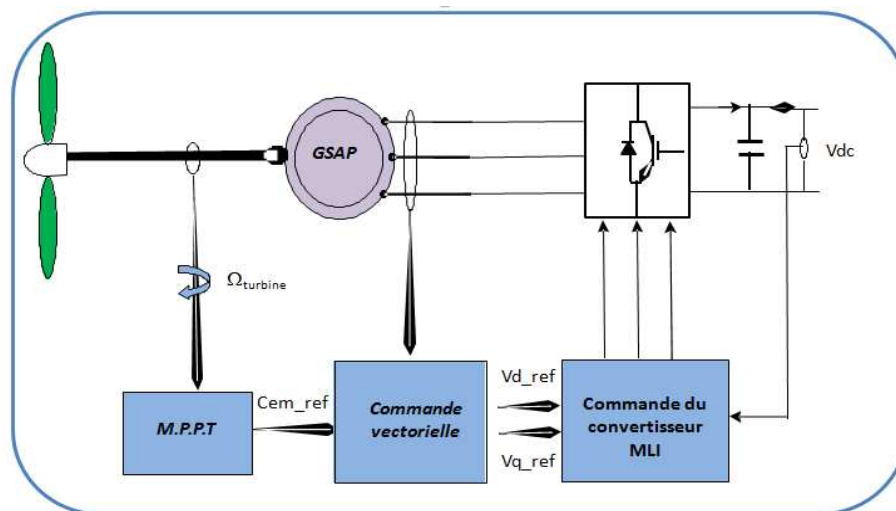


Fig III.6 Commande de la génératrice synchrone à aimants permanents.

Le schéma bloc de la commande est représenté par la figure (III.7).

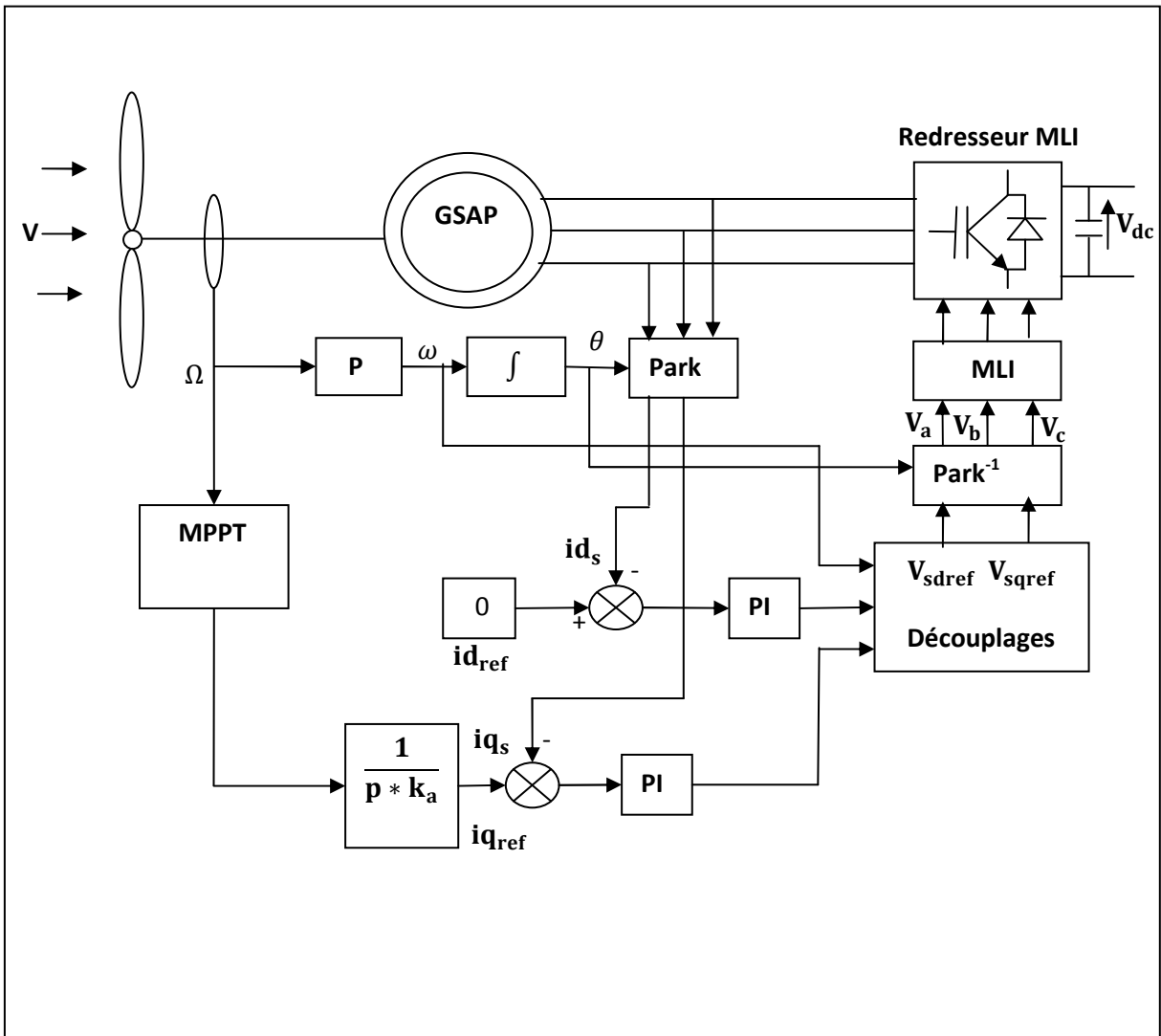


Fig III.7 Schéma complet de la commande de la chaine de conversion éolienne.

Le schéma bloc introduit sous MATLAB-SIMULINK est représenté par figure suivante :

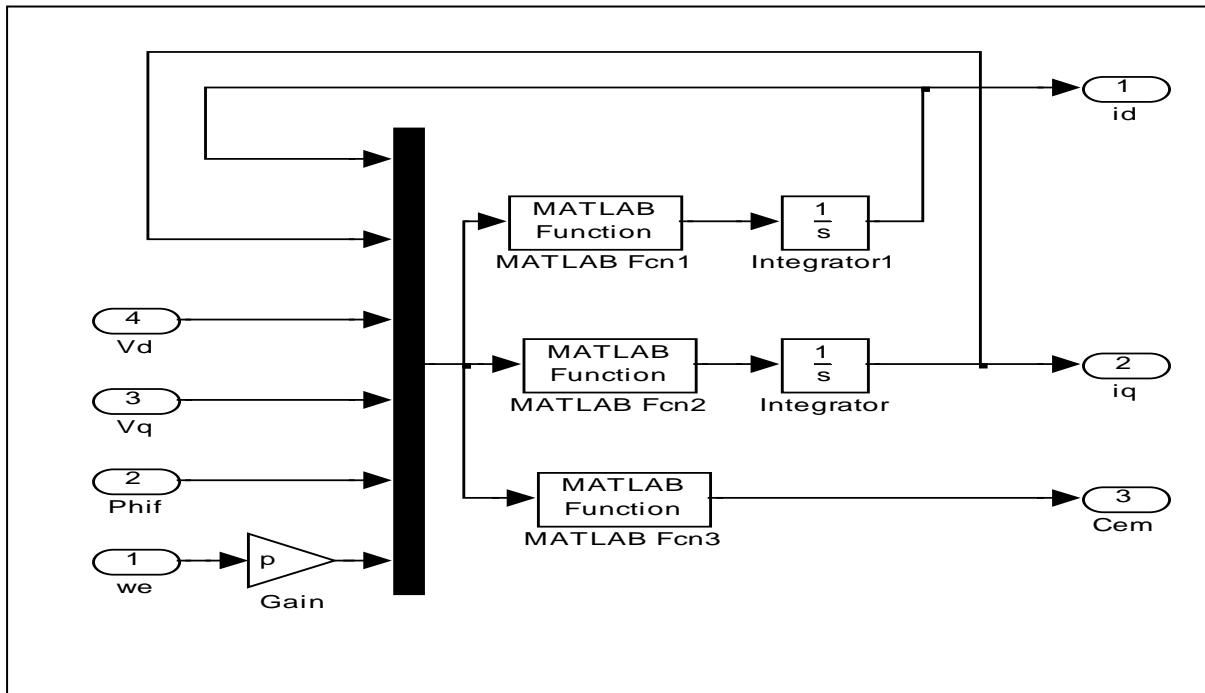


Fig III.8 Schéma bloc de la GSAP sous MATLAB/SIMULINK.

III.4.4.1 Résultats de simulation

Les résultats de simulation obtenus après l'introduction des modèles sous MATLAB/SIMULINK sont illustrés dans les figures suivantes :

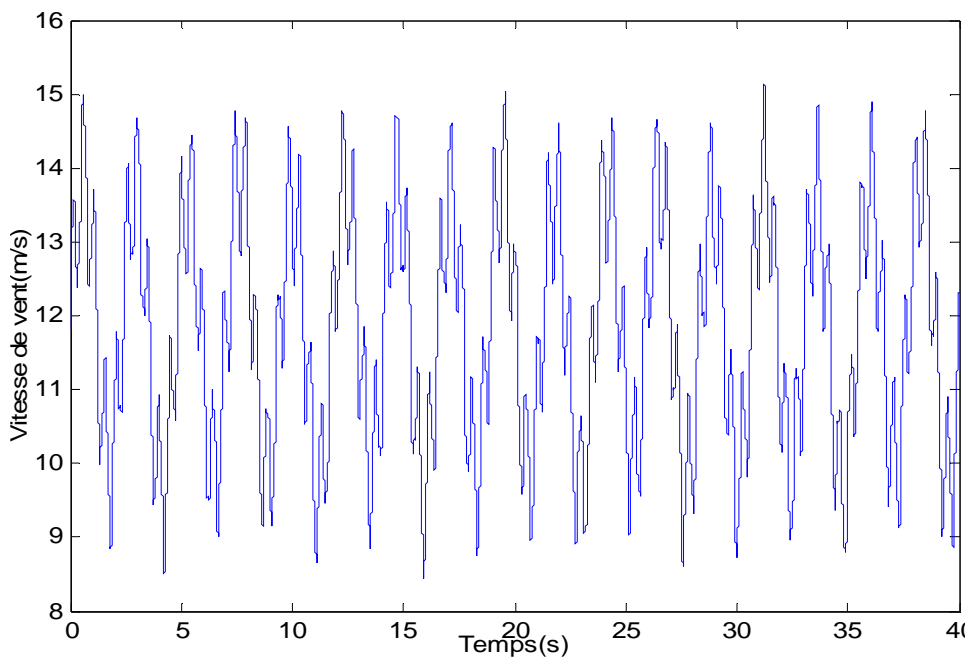


Fig III.9 Evolution de profil du vent.

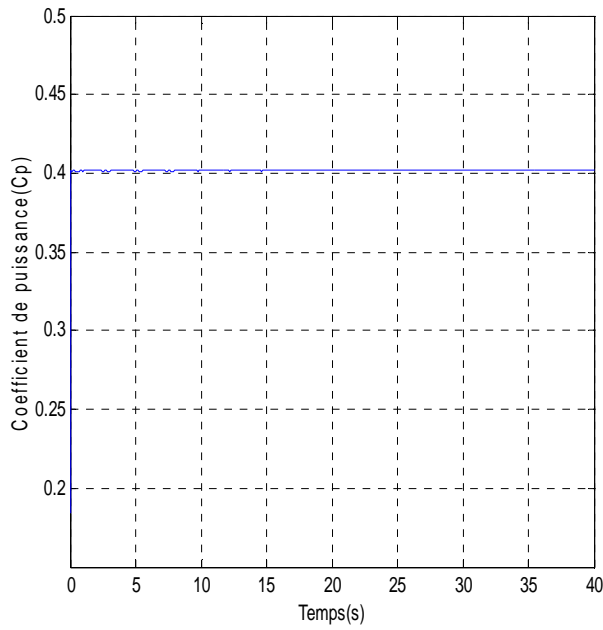


Fig III.10 Coefficient de puissance (C_p).

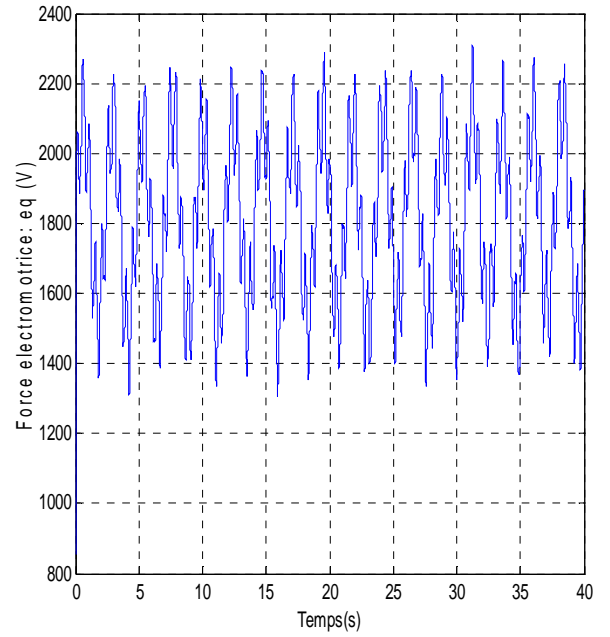


Fig III.11 Force électromotrice e_q .

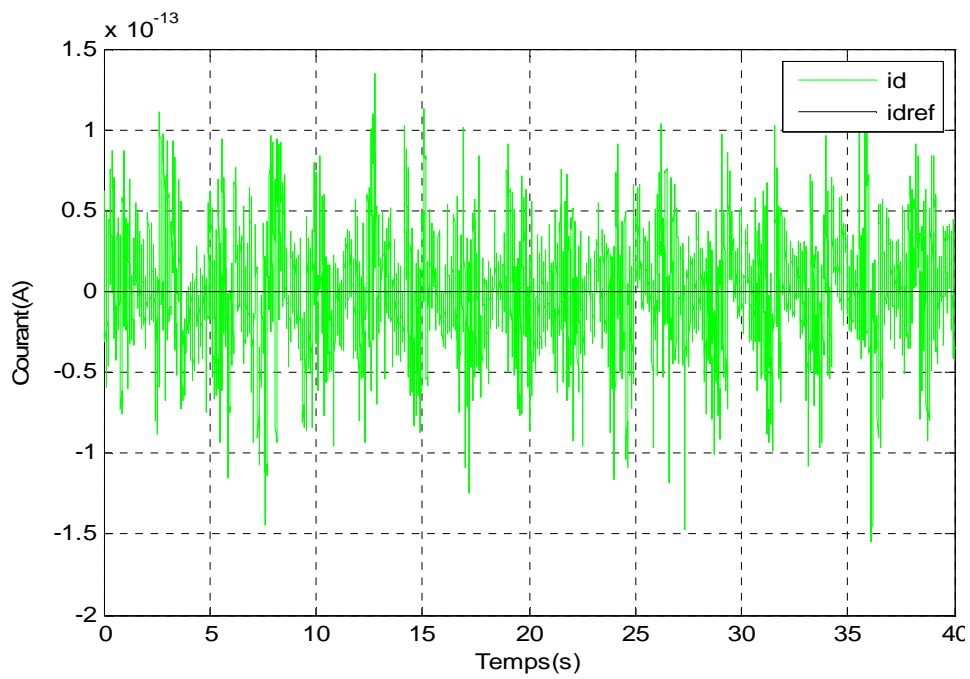
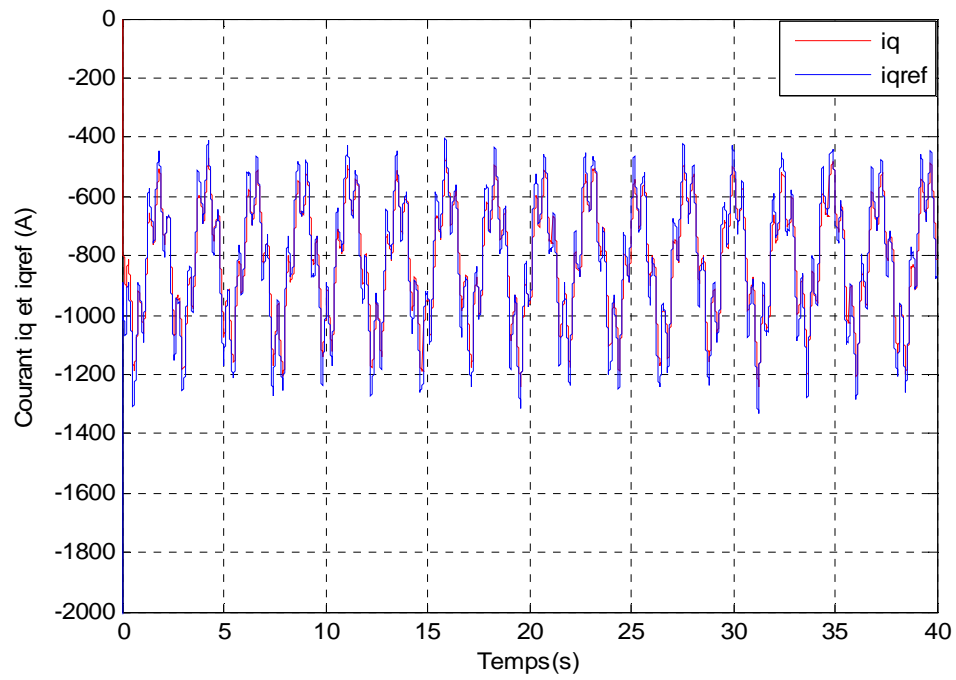
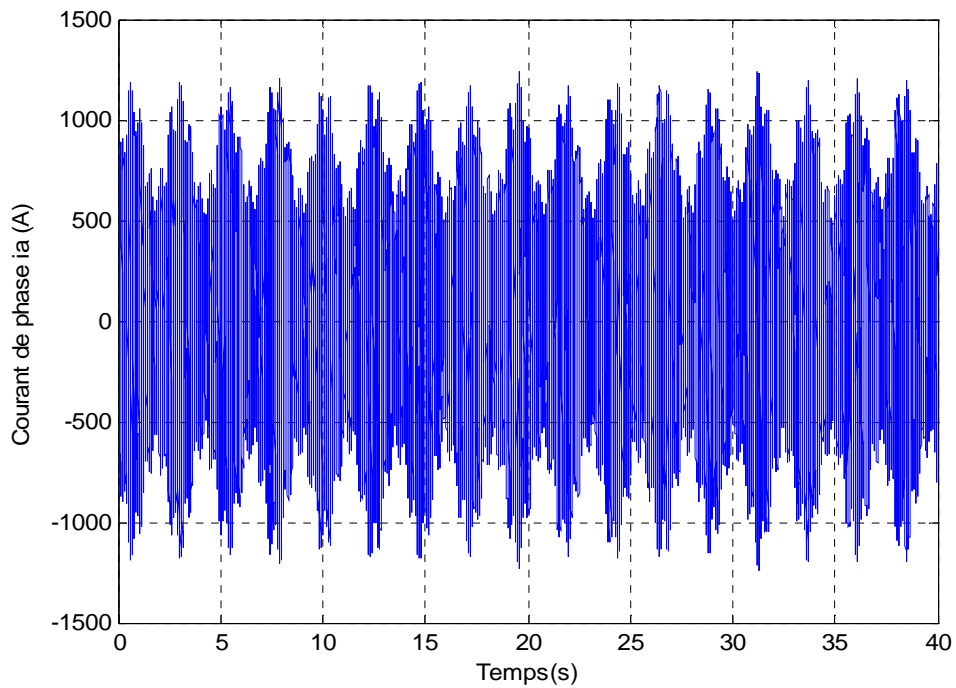


Fig III.12 Courants i_d et i_{dref} .

**Fig III.13** Courants i_q et i_{qref} .**Fig III.14** Courant de phase i_a .

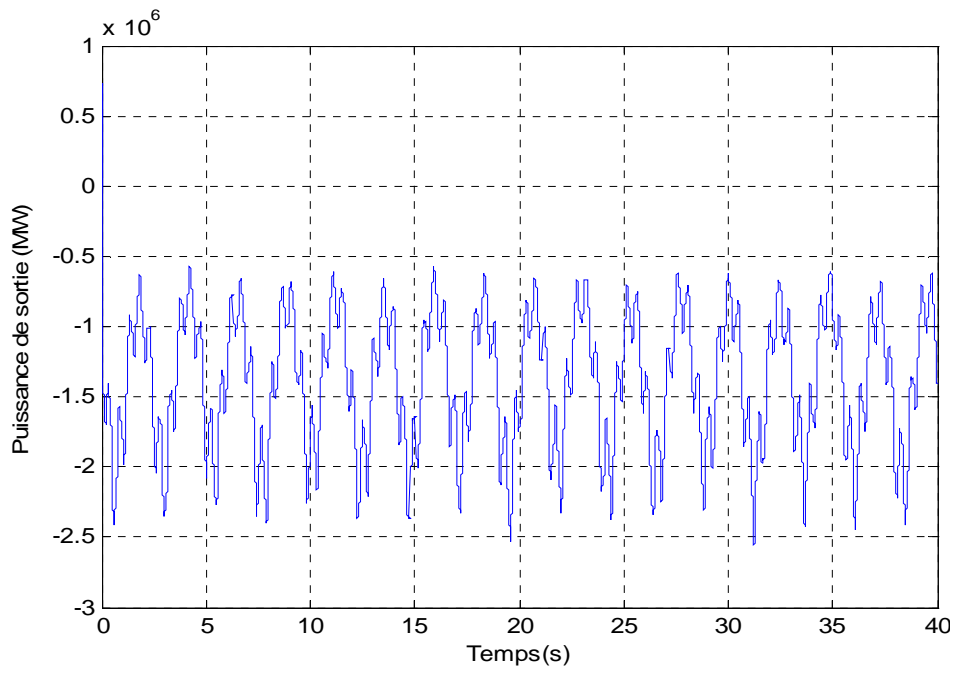


Fig III.15 Puissance de sortie de la GSAP.

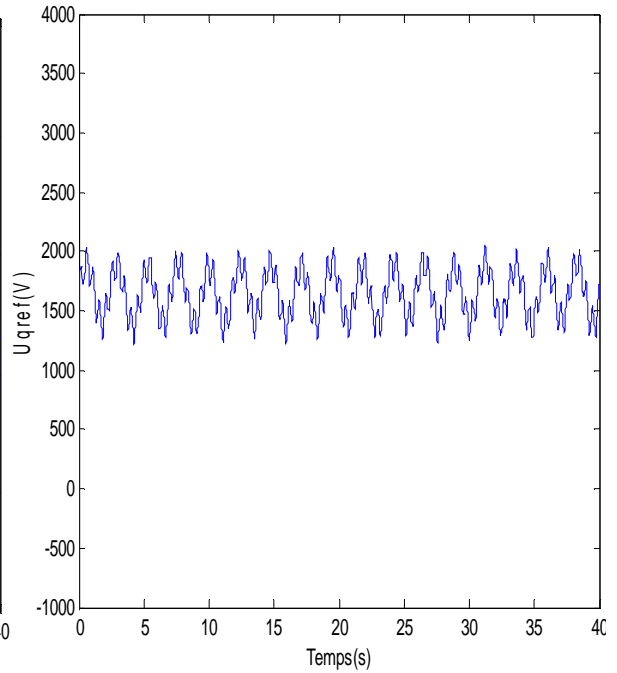
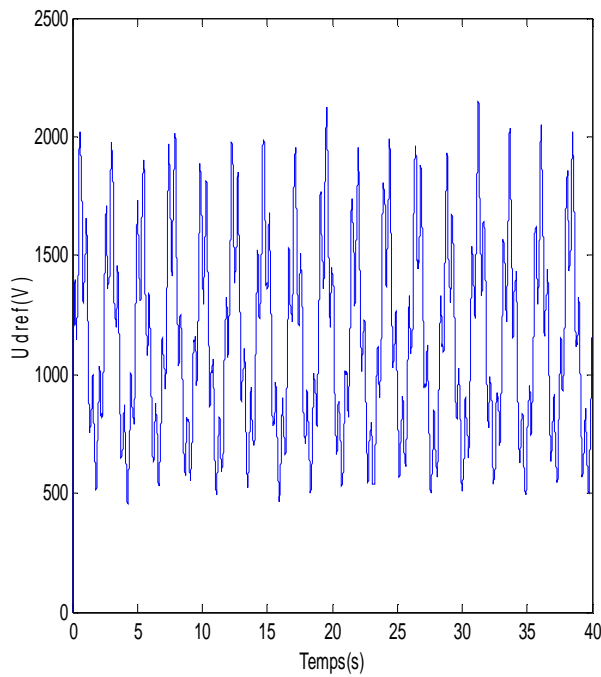


Fig III.16 Tension de référence sur l'axe d.

Fig III.17 Tension de référence sur l'axe q.

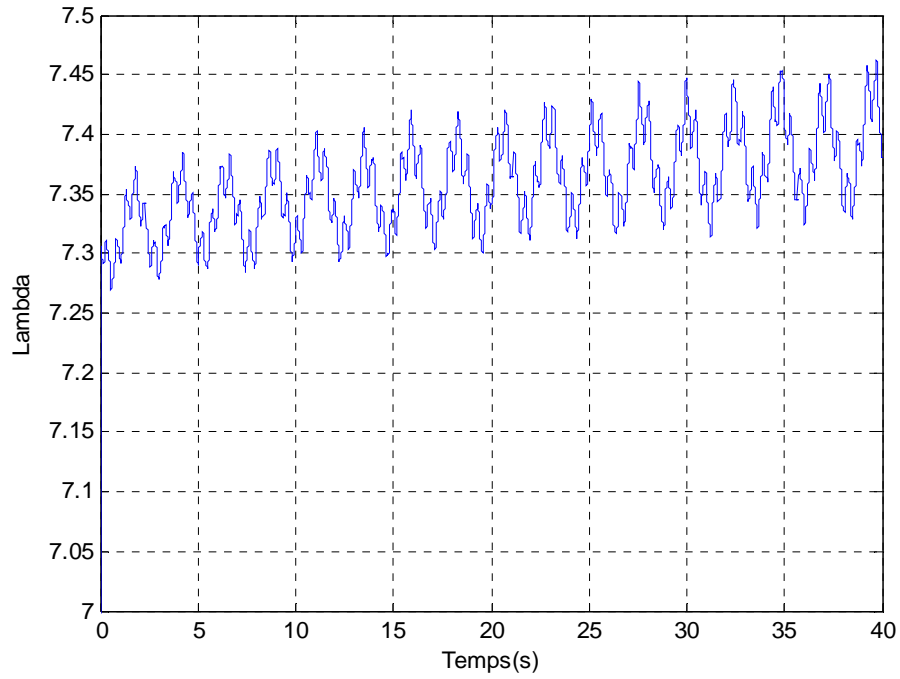


Fig III.18 La vitesse réduite (λ) en fonction de temps.

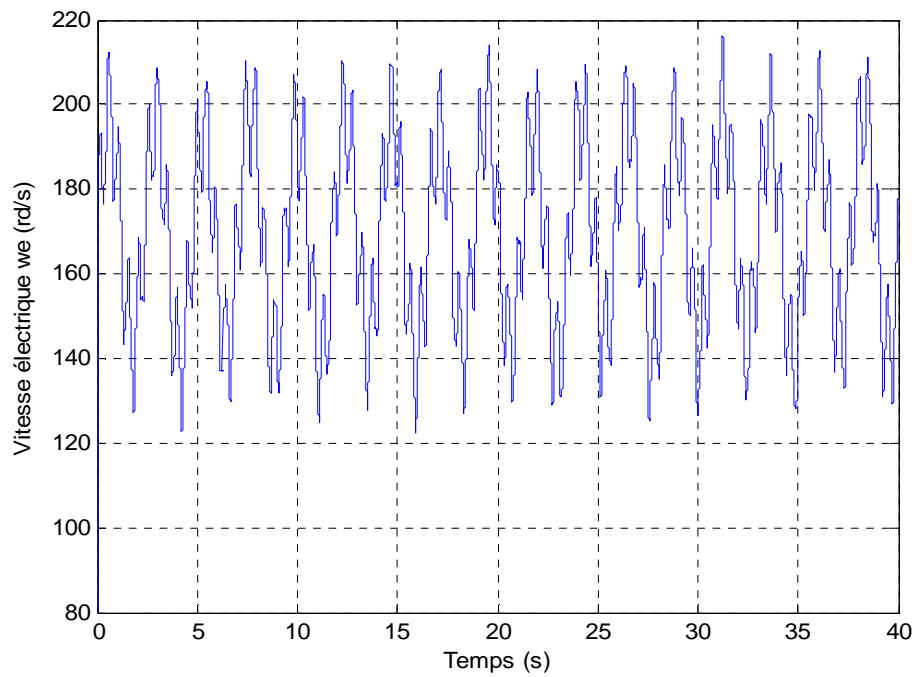


Fig III.19 La vitesse électrique en fonction de temps.

III.4.4.2 Interprétation des résultats

D'après les résultats de simulation obtenus, on constate que toutes les allures des grandeurs électriques (force électromotrice, courants, puissance active et vitesse électrique) sont affectées par le profil du vent, L'allure représenté dans la figure (III.10) montre que la valeur de coefficient puissance (C_p) souhaitée est atteinte et égal à (0.4), La vitesse optimale est aussi maintenu à sa valeur (7.387) pour capter le maximum de puissance par la stratégie de maximisation de puissance (MPPT). Donc, ces deux constatations confirment sur la performance de la commande utilisée. La figure (III.15) montre l'allure de la puissance récupérée à la sortie de la génératrice qui est bien attendue. En terme de valeur, elle a une valeur de (2MW) pour une vitesse de vent de (12m /s). Pour la vitesse électrique, elle suit sa référence convenablement, elle atteint une valeur de (218rd/s) dans un laps de temps grâce au grand nombre de pôles que possède la génératrice synchrone, les deux tensions de référence sur l'axe d et q sont donnée par les figures (III.12, III.13) qui sont utilisées comme entrée de redresseur MLI pour assurer le fonctionnement à vitesse variable.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons établi, en premier lieu un modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère naturel, puis dans le repère de Park. Ce dernier permet de rendre le modèle de la GSAP plus simple et analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée qui est facile à commander. Deux boucles de régulation ont été prévues pour la commande des courants. L'une de courant i_d pour commander le flux et l'autre pour le courant i_q pour commander le couple électromagnétique. En suite, on a effectué une modélisation de redresseur MLI. Finalement, un schéma global pour le control de la chaine de conversion a été prévu et simulé sous MATLAB/SIMULINK pour une vitesse du vent donnée. Les résultats de simulation ont montré la possibilité d'extraire le maximum de puissance de l'énergie du vent et de contrôler la puissance de sortie.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est de modéliser les différents composants d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents à vitesses variables, de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser le rendement aérodynamique et de contrôler la puissance de sortie. Pour ce faire on a utilisé l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Dans le but de décrire le système éolien, Un état de l'art a été présenté des différentes configurations électriques utilisées dans le domaine de l'énergie éolienne. Les différentes topologies de génératrices utilisées et leur stratégie de fonctionnement, le choix a été porté sur l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents à vitesses variables avec redresseur commandés par MLI. Après avoir déduit les caractéristiques aérodynamiques principales de la turbine, les différentes zones de fonctionnement et les stratégies de contrôle utilisées ont été présentées. La zone particulière, où la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée a été détaillée. Les algorithmes de maximisation de puissance ont été validés par des résultats de simulation qui ont montré leurs inconvénients et leurs avantages.

Le modèle de la GSAP a été validé par les résultats de simulation à vide, le contrôle vectoriel de la GSAP a été réalisé en imposant le courant sur l'axe direct ($i_{d_{ref}}$) nul pour pouvoir extraire le maximum de puissance du vent.

Enfin, une modélisation a été élaborée des différents éléments de la chaîne éolienne selon une structure de conversion d'énergie choisie constituée d'une machine synchrone à aimants permanents, pilotée par le stator par un convertisseur contrôlé par MLI, un bus continu placé en aval de ce convertisseur, Un modèle complet de système a été développé dans le but d'analyser son comportement dynamique. Un dispositif de control est basé sur la commande vectorielle de la génératrice associé au système de conversion pour pouvoir extraire la puissance maximale du vent. Les résultats de simulation pour un profil du vent donné ont permis d'envisager les objectifs fixés par ces stratégies de commande.

Suite aux travaux réalisés, on peut proposer quelques perspectives qui peuvent améliorer les performances de la chaine de conversion proposée :

- Association d'un système de stockage d'énergie ;
- Régulation de l'angle de calage ;
- Utilisation d'autre méthode de maximisation de puissance (logique floue, réseau de nouerons) ;

Notations

P_m	La puissance extraite du volume d'air en mouvement
ρ	Masse volumique de l'air en Kg/m ³ .
V	Vitesse instantanée du vent en m/s.
m	La masse d'air.
P_v	Puissance d'un vent théoriquement non perturbé.
P_{max}	Puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne.
C_p^{opt}	Coefficient de puissance maximal Théorique.
C_p	Coefficient puissance d'une éolienne.
λ	Vitesse réduite.
v_D	Vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie.
v_M	Vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement.
v_n	Vitesse de vent nominale.
P_n	Puissance nominale.
V_2	Vitesse de vent en aval.
V_1	Vitesse de vent en amont.
φ_i	Phase initiale de chaque composante spectrale fluctuante.
V_0	Composante moyenne.
A_i	L'amplitude des harmoniques.
$\omega_i(t)$	La pulsation des harmoniques.
$V_{vent}(t)$	Vitesse du vent modélisé.
R	Longueur de pale.
J_{pale}	L'inertie de pale.

Notations

K_b	L'élasticité de pale
d_b	Coefficient de frottement par rapport à l'air
$\dot{\beta}b_1, \dot{\beta}b_2, \dot{\beta}b_3$	Vitesses d'orientation de chaque pale.
J_h	L'inertie de L'arbre d'entraînement des pales.
K_h	L'élasticité de L'arbre d'entraînement des pales.
D_h	Coefficient de frottement par rapport au multiplicateur .
(T_{b1}, T_{b2}, T_{b3})	Les forces de poussée des pales.
$P_{aér}$	Puissance aérodynamique.
$C_{aér}$	Couple aérodynamique.
Ω_{turb}	Vitesse de rotation de rotor de la turbine.
G	Gain de multiplicateur.
$C_{méc}$	Couple mécanique.
$\Omega_{méc}$	Vitesse mécanique.
J_{turb}	L'inertie de la turbine.
J_g	L'inertie de la génératrice.
J	L'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice.
C_{em}	Couple électromagnétique produit par la génératrice.
C_{vis}	Couple des frottements visqueux .
C_g	Couple issu du multiplicateur.
f	Coefficient de frottement visqueux .
C_{em-ref}	Couple électromagnétique de référence.
C_{ass}	Régulateur de vitesse.

Notations

$\Omega_{\text{méc-ref}}$	Vitesse mécanique de référence.
λ_{opt}	Vitesse spécifique optimale.
$\Omega_{\text{turb-ref}}$	Vitesse de référence de la turbine.
$f(S)$	Fonction de transfert de la vitesse.
K_I, K_P	Paramètres de régulateur (IP).
ξ	Facteur d'amortissement.
t_r	Temps de réponse
$C_{\text{aer-esti}}$	Couple aérodynamique estimé
$\Omega_{\text{turb-esti}}$	Vitesse estimée de la turbine,
v_{esti}	Valeur estimée de la vitesse du vent
C_{pmax}	Coefficient de puissance maximale
MPPT	Maximum Power Point tracking
MSAP	Machine synchrone à aimants permanents
GSAP	Génératrice synchrone à aimants permanents
(d,q)	Indice du repère de Park lié au rotor
R_S	Résistance statorique
L_{sd}	Inductance statorique directe
L_{sq}	Inductance statorique quadratique
$(i_{sa}, i_{sb}; i_{sc})$	Composantes du flux statorique dans le repère dePark
$(i_a, i_b; i_c)$	Tensions aux phases a, b et c du stator
$(i_{sa}, i_{sb}; i_{sc})$	Courants aux enroulements a, b et c du stator
p	Nombre de paire de pôles
$P(\theta)$	Matrice de PARK

Notations

Φ_f	Flux d'excitation des aimants permanents .
i_{sq}, i_{sd}	Courants statoriques dans le repère de Park [A].
V_{sq}, V_{sd}	Tensions statoriques dans le repère de Park [V].
R_s	Résistance statoriques [Ω].
L_s	Inductance cyclique statorique [H].
p	Nombre de paire de pôles de la machine synchrone.
ω_e	Vitesse électrique [rad/s].
MLI	Modulation de L'arguer d'Impulsion.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] S.BELAKEHAL* ,A.BENTOUNSI, M.ERZOUG ET BENALLA,« Modélisation et commande d'une génératrice synchrone à Aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne »,revue des énergies renouvelables Vol. 13 N°1 (2010) 149-161.
- [2] A. MOUSSA SIDOU, S.NOUHOU IBRAHIM, « Etude de générateur asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne » , Mémoires d'Ingéniorat,Ecole nationale de polytechnique, Algérie, 2007.
- [3] C. MALEK M. MAZOUZ, « Optimisation de la puissance de sortie d'un générateur éolien », Mémoires d'Ingéniorat, U.S.T.H.B, Algérie, 2012.
- [4] A. MIRECKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse Doctorat .Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [5] Bernard MULTON and all « État de l'art dans les aérogénérateurs électrique », L'École Normale Supérieure de Cachet Toulouse, GREAH Université du Havre.
- [6] Thierry Gallauziaux, David Fedullo, « L'installation électrique »,2004-2006
- [7] Observ'ER avec le soutien financier des ces partenaires « la production d'électricité d'origines renouvelable dans le monde » Quatrième inventaire, Edition 2012
- [8] EL AIMANI Salma, «Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse Doctorat. Université des sciences et technologies de Lille , France, 2004.
- [9] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Eoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
- [10] P.LECONTE, M.RAPIN, « Eolienne », Des Ingénieurs de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers et de l'École Supérieure, des Techniques Aérospatiales, Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA).
- [11] N. Laverdure, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.
- [12] M. Mayouf « contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents », Mémoire de magister, Université de Batna, 2008
- [13] H.HEDIR, « évaluation et commande de la puissance d'une installation éolienne » Mémoire de Magister, UMMTO, 2012.

- [14] A. Boyette, « Contrôle – Commande d'un Générateur Asynchrone avec un Système de Stockage pour la production Eolienne », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.
- [15] N.Mekkaoui « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée » Mémoire de Magister, Université de Batna, 2004
- [16] MING YING and ALL, "Modelling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration" power ignoring society general meeting, juin 2007, PP 1-6
- [17] F. Meibody-Tabar, « Machines synchrones à aimants permanents alimentées par onduleurs de tension ; modélisation, commande et segmentation de puissance », Thèse Doctorat .Habilitation à Diriger des Recherches, Nancy, janvier 2000.
- [18] A.S. Toledo, « Commande directe et observation des convertisseur de puissance application à l'onduleur de tension triphasé » Thèse de Doctorat de L'Ecole Doctorale de L'INPG, 2000.
- [19] B.BOUKAIS « contribution à la modélisation des système couples machines convertisseurs : application aux machines à aimants permanents (BDCM-PMSM) », Thèse de Doctorat, UMMTO ,2012
- [20] B. N. Mobarkah, « Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification 'en ligne' des paramètres », thèse de doctorat de l'Université de Téhéran, Iran. Décembre 2001

PARAMETRES DE SYSTEME DE CONVERSION EOLIEN :

Puissance nominale $P_n = 2\text{MW}$

Nombre de pale $N=3$

Rayon d'une pale $R= 41\text{m}$

Gain du multiplicateur $G=77$

Inertie total $J = 8000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Coefficient de frottements visqueux $f=0.0024 \text{ Nm} \cdot \text{s}/\text{rd}$.

Résistance statorique $R_s = 0.1 \Omega$

Inductance statorique $L_s = 0.005\text{H}$

Nombre de paire de pole $P=80$