

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djilali Bounaama – Khemis-Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention de diplôme

Master

En

« Génie électrique »

Option :

« Électrotechnique »

Titre :

Intégration et stratégie de contrôle de la production éolienne
Au réseau électrique à base de la machine synchrone
à aimant permanent

Réalisé par :

Etudiant 1 : HAMMI MEDJDOUB
Zakaria

Encadré par : Dr.HAMZAOUI .I
Mme :TIDJANI.N

Etudiant 2 : OULD MOHAMED YAHYA
Mohamed Abdellahi

Année Universitaire 2015/2016

Résumé

Dans ce travail nous allons étudier la modélisation et la commande d'une génératrice synchrone à aimants permanents associée à une turbine éolienne. Et à l'intermédiaire de convertisseurs MLI nous allons faire un travail d'adaptation sur les puissances sorties de la machine afin qu'elles soient compatibles avec le réseau. Les simulations des différents modèles vont être réalisées sous environnement MATLAB/Simulink.

Abstract

In this work we study the modeling and control of a synchronous permanent magnet generator associated with a wind turbine. And via PWM converters we will make an adjustment work on the power output of the machine to be compatible with the network. Simulations of various models will be produced in MATLAB / Simulink.

ملخص:

في هذا العمل سوف نقوم بدراسة النمذجة والتحكم في مولد متزامن ذو مغناطيس دائم مربوط بتوربين هوائي ; بواسطة محول MLI سوف نقوم بتكييف القدرة التي تعطيها الآلة من أجل أن تكون موافقة للشبكة الكهربائية. المحاكاة لمختلف النماذج سوف يتم انجازها بواسطة MATLAB / SIMULINK.

Remerciement

Avant tout nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donnés le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

*Nos remerciements les plus vifs et chaleureux, vont à notre promotrice de mémoire **Mlle HAMZAOUI** pour son aide, son orientation judicieuse et sa disponibilité, aussi pour la confiance, la patience et la compréhension qu'elle nous a toujours manifesté ...*

*Nos vifs remerciements vont à **Mme TIDJANI N** pour son aide.*

*A travers cette mémoire, nous adressons nos reconnaissances à tous nos enseignants de l'**UKM** en particulier ceux du département de l'électrotechnique.*

Ainsi à tous nos amis et, qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

Enfin, on ne peut pas oublier de remercier nos familles, en particulier nos parents, pour leur compréhension, leurs sacrifices et leur patience, sans lesquels ce travail n'était pas réalisé.

Dédicace

Je viens de remercier Allah le Tout Puissant Qui ma donné Laforce pour achever ce travail.

Et bien sur à mon collègue HAMMI MEDJDOUB ZAKARIA qui m'a accompagné pendant le long de cette période pour réaliser ce modeste travail.

Puis je dédie ce travail essentiellement A mes chers parents, oncles, tantes, leurs conjoints ainsi que leurs enfants, A la petite FARAH, A tous les membres de ma grande famille.

A mes amies YASSER, NOURDINE, et YASSINE, MUSTAPHA

A tous mes amis que je ne vais pas nommer car ils sont nombreux & je ne sais pas qui choisir.

A tous mes collègues sans exception & à toutes les promos 2016 surtout d'électrotechnique.

Je vous remercie tous

H-M-ZAKARIA

Dédicace

Je viens de remercier Allah le Tout Puissant Qui ma donné Laforce pour achever ce travail

Et bien sur à mon collègue OULD MOHAED YAHYA MOHAMED ABDELALI qui m'a accompagné pendant le long de cette période pour réaliser ce modeste travail.

Puis je dédie ce travail essentiellement A mes chers parents, oncles, tantes, leurs conjoints ainsi que leurs enfants, A tous les membres de ma grande famille.

A mes amies MUSTAPHA, ZIYAD, ABDALLAH, YAHYA, BABA, ZOHAIR, HAMMA, MED

A tous mes amis que je ne vais pas nommer car ils sont nombreux & je ne sais pas qui choisir.

A tous mes collègues sans exception & à toutes les promos 2016 surtout d'électrotechnique.

Je vous remercie tous

O.M.Y.M.ABDELALI

NOTATIONS ET SYMBOLES

MPPT	: Maximum Power Point tracking.
MLI	: Modulation de Largeur d'Impulsion.
MADA	: Machine Asynchrones Doublement Alimenté.
GSAP	: La génératrice synchrone à aimants permanents
MSAP	: Machine synchrone à aimants permanents.
A, B, C	: Indices correspondants aux trois phases A, B, C.
d, q	: Les axes biphasés respectivement directe et en quadrature.
I_d, I_q	: Courants statoriques d'axe direct et en quadrature.
V_d, V_q	: Tension statoriques d'axe direct et en quadrature.
V_a, V_b, V_c	: Tensions instantanées des phases statoriques.
I_a, I_b, I_c	: Courants instantanés des phases statoriques.
Ω_t	: Vitesse de rotation de turbine.
P	: Nombre de paire de pôles.
C_{em}	: Couple électromagnétique.
C_f	: Couple de frottement.
$C_{aéd}$: Couple aérodynamique.
M	: Mutuelle inductance entre phases du stator.
L_d	: Inductance propre d'axe d .
L_q	: Inductance propre d'axe q .
C_p	: coefficient de puissance.
R_s	: Résistance d'une phase statorique.
$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$: Flux instantanés des phases statoriques.
φ_f	: Flux constant aux aimants permanents.
θ	: L'angle entre les axes triphasé et les axes biphasé.
$p(\theta)^{-1}$: Matrice de Park invars.
$P(\theta)$: Matrice de PARK.
V_{red}	: La tension redressée.
V_{ond}	: La tension d'alimentation de l'onduleur.
L_f	: L'inductance du filtre.
R_f	: La résistance du filtre.

I_c	:	Courant de bus contenu .
V_c	:	Tension de bus contenu.
$S,$:	Indices correspondants au stator .
θ_{obs}	:	Angle d'observation de la matrice de PARK.
V	:	Tension.
I	:	Courant.
Φ	:	Flux.
V_v	:	La vitesse de vent.
J	:	Moment d'inertie de la partie tournante.
f	:	Coefficient de frottement visqueux.
Ω_{mec}	:	Vitesse mécanique.
$(d \ q)$:	Axes correspondant au référentiel lie au champ tournant.
$(U \ v)$:	Axes du système biphasé.
S	:	Opérateur dérivé de LAPLACE.
ω	:	pulsation du système.
Φ_{ref}	:	Flux de référence.
Ω_{ref}	:	Vitesse de référence.
K_p, K_i	:	coefficients de proportionnalité et d'intégration.

LISTE DE FIGURE

Figure I.1 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10 m de la sole (m/s).....	14
Figure I.2 : Principe de la conversion d'énergie.....	15
Figure I.3 : Les composants de la turbine éolienne.....	16
Figure I.4 : Schéma et principe du rotor de Savonius.....	18
Figure I.5 : Schéma et principe du rotor de Darrieus.....	18
Figure I.6 : Rotor Darrieus.....	19
Figure I.7 : éolienne à axe horizontal.....	20
Figure I.8 : Configurations à axe horizontal.....	20
Figure II.1 : Turbine éolienne.....	25
Figure II.2: Coefficient de puissance(C_p) en fonction de λ	28
Figure II.3 : Caractéristique C_p - λ pour les différentes valeurs de l'angle de tangage.....	28
Figure II.4: Schéma bloc du modèle de la turbine.....	29
Figure II.5 : Zones de fonctionnement d'une éolienne.....	30
Figure II.6 : Schéma bloc avec asservissement de vitesse.....	32
Figure II.7: Schéma bloc sans asservissement de vitesse.....	35
Figure II.8 : le profile de vent.....	35
Figure II.9: la vitesse de la turbine.....	36
Figure II.10: le coefficient de la puissance.....	36
Figure II.11: le couple aérodynamique.....	37
Figure II.12 : la puissance nominale.....	37
Figure III.1 : Représentation schématique d'une machine synchrone dans le repère abc.....	39
Figure III.2 : Convertisseur statique MLI.....	43
Figure III.3: Courant directe de la MSAP.....	44
Figure III.4: Courant en quadrature de la MSAP.....	44
Figure III.5: Couple électromagnétique de la MSAP.....	45
Figure III.6: Courant statorique triphasé avec un zoom.....	45
Figure III.7 : Schéma de la liaison au réseau électrique via un convertisseur.....	46
Figure III.8: Représentation sous forme de schéma-blocs du contrôle des courants dans le repère de Park.....	47
Figure III.9 : Représentation sous forme d'un schéma bloc du contrôle de la liaison réseau.....	49
Figure III.10 : tension de bus continu.....	50

Figure III.11 : Courant généré par le convertisseur côté réseau et la tension d'une phase réseau avec Zoom.....	50
FigureIII.12 : Tension générée coté réseau.....	51

Sommaire

TABLE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

LISTE DES FIGURE

INTRODUCTION GENERALE11

Chapitre I : Généralité sur l'énergie éolienne

I.1. Introduction.....	13
I.2. Historique.....	13
I.3. Potentiel éolienne en Algérie.....	14
I.4. principe de fonctionnement et composants d'une éolienne.....	15
I.4.1. Principe de fonctionnement	15
I.4.2. Les composants d'une éolienne.....	16
I.5. Différents types l'éolienne	17
I.5.1. Eolienne à axe verticale.....	17
I.5.1.1. Rotor Savonius.....	17
I.5.1.2. Rotor Darrieus.....	18
I.5.2. Eolienne à axe horizontal (HAWT).....	19
I.6. Conversion de l'énergie éolienne	21
I.6.1. Chaine de conversion de l'énergie éolienne.....	21
I.6.2 La loi de BETZ.....	21
I.7. Les Différents systèmes utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne.....	21
I.7.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone à double alimentation.....	21
I.7.2. Systèmes utilisant la machine synchrone.....	22
I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	23
I.8.1. Les avantages.....	23
I.8.2. Les inconvénients.....	24
I.9. Conclusion.....	24

Chapitre II : Modélisation et simulation de la turbine éolienne

II.1. Introduction.....	25
-------------------------	----

II.2. Modélisation de la turbine éolienne.....	25
II.2.1. Puissance aérodynamique.....	27
II.2.2. Couple aérodynamique.....	29
II.3. Les différents types de commande de la turbine éolienne.....	30
II.3.1. Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse.....	31
II.3.2. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	33
II.4. Résultat de simulation.....	35
II.5. Conclusion.....	37

Chapitre III: Modélisation et commande de la MSAP

III.1. Introduction.....	38
III.2. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	38
III.2.1. Mise en équations de la machine.....	38
III.2.2. Equation électrique	39
III.2.3. Equation magnétique	40
III.2.4. Equation mécanique	40
III.2.5. Transformation de PARK :.....	41
III.3. Commande vectorielle de la MSAP.....	42
III.4. Modélisation convertisseur coté machine	42
III.5. Résultats des simulations	44
III.6. Contrôle de la liaison au réseau.....	46
III.6.1. Contrôle des courants envoyés au réseau.....	46
III.7. Régulation des puissances.....	47
III.8. Régulation du bus continu par réglage du transit de la puissance active.....	48
III.8.1 Régulation de la tension du bus continu.....	48
III.8.2 Modélisation du bus continu.....	48
III.9. Résultats de simulation	50
III.10. Conclusion.....	51
Conclusion générale.....	52
Annexe.....	53
Bibliographie.....	55

Introduction générale

Les énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolienne, géothermique,..) ne représentent actuellement 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 du futur énergétique nécessiteraient le développement des énergies renouvelables comme sources de substitution, propres et inépuisables. A titre indicatif, la Communauté Economique Européenne se donne comme triple objectif à l'horizon 2020 d'augmenter la part des énergies renouvelables à hauteur de 20 %, de dépolluer de 20 % et d'économiser 20 % d'énergie et ce grâce à de multiples actions politico-économiques et technologiques concertées.

Dans ce contexte, la filière éolienne représente le créneau à plus forte croissance dans la production d'électricité. Parallèlement au marché de la génération éolienne de forte puissance, se développent de plus en plus des systèmes de petite taille en site isolé. Ces derniers s'adaptent bien aux spécificités de notre pays, l'Algérie. Ce qui justifie quelque peu le choix de cette technologie pour notre présente étude.

En effet, les conversions d'énergie associées utilisent souvent un générateur synchrone à aimants permanents. Afin de maximiser l'efficacité de l'aérogénérateur éolien, diverses solutions ont été examinées à différents niveaux de la chaîne de conversion. En ce qui concerne l'interface électronique de puissance entre le générateur et le réseau, son rôle est souvent de commander le générateur afin d'extraire le maximum de puissance du vent.

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité. Les pales du rotor éolien captent une partie de l'énergie contenue dans le vent et la transfèrent au moyeu qui est fixé sur l'arbre de l'éolienne. Celui-ci transmet ensuite l'énergie mécanique au générateur électrique qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

Dans ce travail, nous allons nous intéresser à l'étude d'une chaîne complète de conversion d'énergie éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents à

attaque directe. Nous allons également étudier des stratégies de commande permettant l'optimisation de l'énergie extraite par la turbine ainsi que des contrôleurs permettant de commander la puissance électrique fournie au réseau.

Nous allons entamer ce travail avec un premier chapitre qui traitera des généralités sur l'énergie éolienne, nous allons parler des différents types d'éoliennes existant en abordant leurs différentes structures, leurs fonctionnements, leurs qualités et éventuellement leurs défauts. Ensuite, nous allons donner quelques notions théoriques sur les calculs de base qui permettent de contrôler le fonctionnement de notre système par la suite. nous allons également citer quelques structures composant la turbine éolienne associée à sa génératrice.

Dans le deuxième chapitre, nous allons commencer par la modélisation de la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude. Cette modélisation va permettre de commander la turbine puis nous allons aborder les différentes techniques des commandes utilisés pour la maximisation de puissance aérodynamique sortie de la turbine et ensuite nous allons donner les résultats de simulation de modèle.

Dans le troisième chapitre nous allons nous intéresser à la modélisation et la commande de la machine synchrone à aimants permanents en donnant des équations mathématiques qui permet de modéliser la machine de notre choix, et de modéliser sa commande vectorielle. Un control des puissances s'impose alors suivant les objectifs recherchés. Mais nous n'allons pas associer la machine directement au réseau avant de faire un travail d'adaptation sur les tensions récupérées afin qu'elles soient compatibles avec le réseau. C'est pourquoi nous allons d'abord redresser les tensions des trois phases grâce à un redresseur à MLI, puis filtrer la tension de sortie pour la débarrasser des signaux parasites dus au redressement, avant de l'onduler grâce à un onduleur à MLI. cette opération permet d'obtenir un système de tensions triphasé de la fréquence désirée.

I.1. Introduction.

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles, de son exploitation pour faire avancer les bateaux, en passant par les moulins à vent et enfin par les aérogénérateurs dont la technologie a beaucoup évolué ces dernières années. Ceci a permis à l'énergie éolienne de devenir une alternative aux sources d'énergie traditionnelles.

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pâles profilées ont été utilisés avec succès pour générer l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante.

I.2. Historique.

Il y a plus de 3000 ans déjà, l'énergie du vent était transformée en énergie mécanique, d'une part sur terre par les moulins et des systèmes de pompage de l'eau, d'autre part en mer, par les bateaux [1]. La génération d'énergie électrique par le vent a débuté à la fin du dix-neuvième siècle. Parmi les pionniers on peut citer Paul La Cour au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891. Dans les années 1950. Johannes Juul (élève de Paul La Cour) devient aussi un pionnier dans l'utilisation de l'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif.

La première crise pétrolière en 1973 contribua à éveiller l'intérêt pour l'énergie éolienne dans plusieurs pays. Les USA ont notamment lancé en Californie une opération à grande échelle au début des années 1980 en passant de 7MW en 1981 à 386 MW en 1985. aujourd'hui, les études portent sur l'amélioration de l'aérogénérateur ainsi que sur la chaîne de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau. les premières éoliennes mettent en œuvre est une génératrice asynchrone liée aux pâles par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse, fonctionnant à vitesse fixe et directement reliée au réseau (pas d'interface électronique). Cette technologie est surtout employée au Danemark dans les années 1970. les systèmes les plus récents se dirigent d'une part vers la vitesse variable pour maximiser la puissance captée du vent avec l'insertion d'électronique

entre la génératrice et le réseau, et d'autre part vers l'utilisation de génératrices spéciales tournant à basse vitesse afin de s'affranchir du réducteur de vitesse [2].

I.3. Potentiel éolien en Algérie.

L'estimation des ressources éoliennes d'un pays en constitue une importante étape. Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent, a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie. Cette représentation de la vitesse sous forme de carte a deux objectifs :

- Le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne.
- Le second est de mettre en évidence la variation relative des ressources à travers l'Algérie.

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Les données météorologiques sont des mesures faites par l'Office National de la météorologie (ONM). Les mesures sont effectuées à 10 m au-dessus du sol. Les données sont tirées des bulletins mensuels d'informations climatologiques des années 2000 à 2005. La carte représentée dans la figure I.1 montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord.

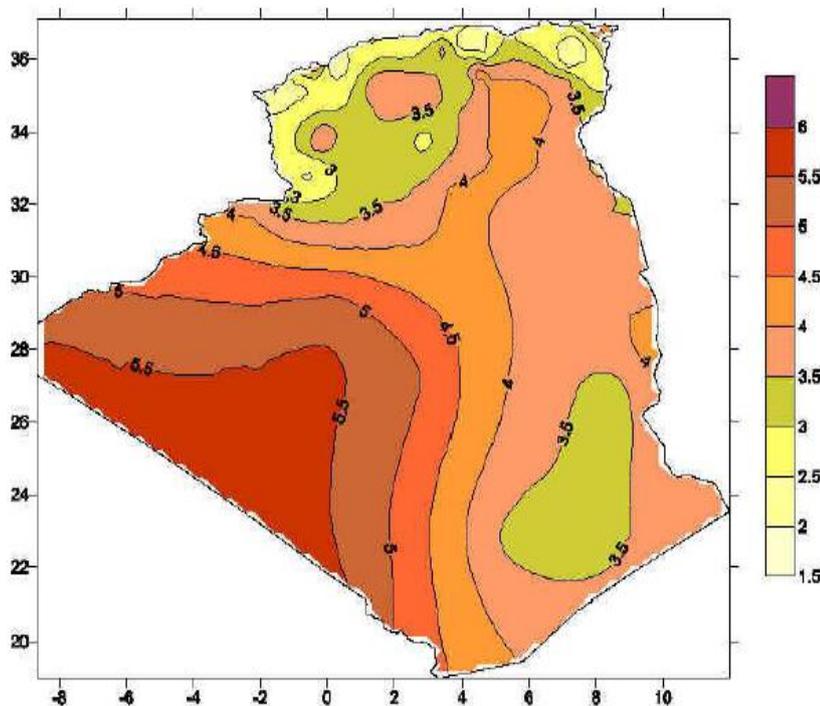


Figure I.1 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10 m de sole (m/s).

I.4. Principe de fonctionnement et composants d'une éolienne.

I.4.1. Principe de fonctionnement.

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

* Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.

* Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

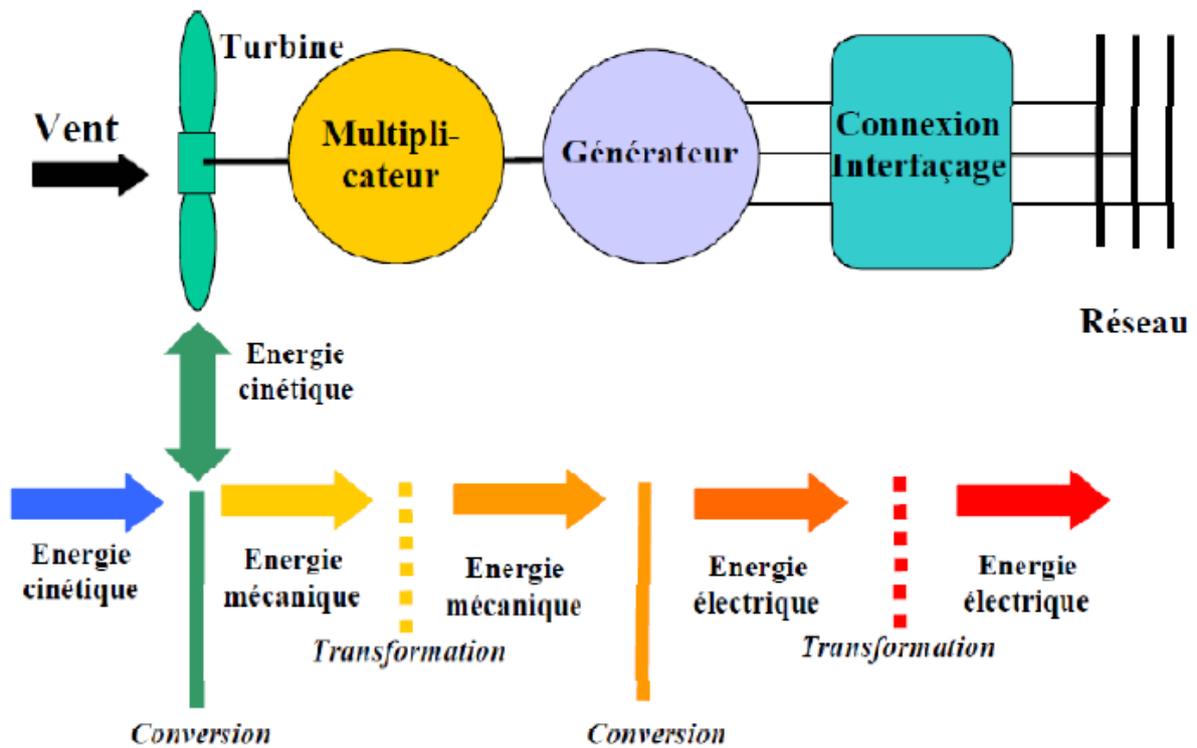


Figure I.2 : Principe de la conversion d'énergie

I.4.2. Les composants d'une éolienne.

Les principaux composants de l'éolienne sont représentés sur la figure (I.3)

- Les pales: Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor.
- Le Moyeu : constitué par un système d'orientation des pales pour réguler la vitesse de rotation
- Le multiplicateur mécanique de vitesse: permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide.
- Le frein à disque mécanique : dispositif de sécurité pour limiter la fréquence de rotation en cas de vent violent
- Les outils de mesure du vent: une girouette pour en évaluer la direction et un anémomètre pour en mesurer la vitesse.
- Le générateur électrique: assure la production électrique (transforme l'énergie mécanique en énergie électrique). MADA la plus utilisée.
- Le système d'orientation de la nacelle est une couronne dentée équipée d'un moteur. Il permet Placer la nacelle face au vent[3].

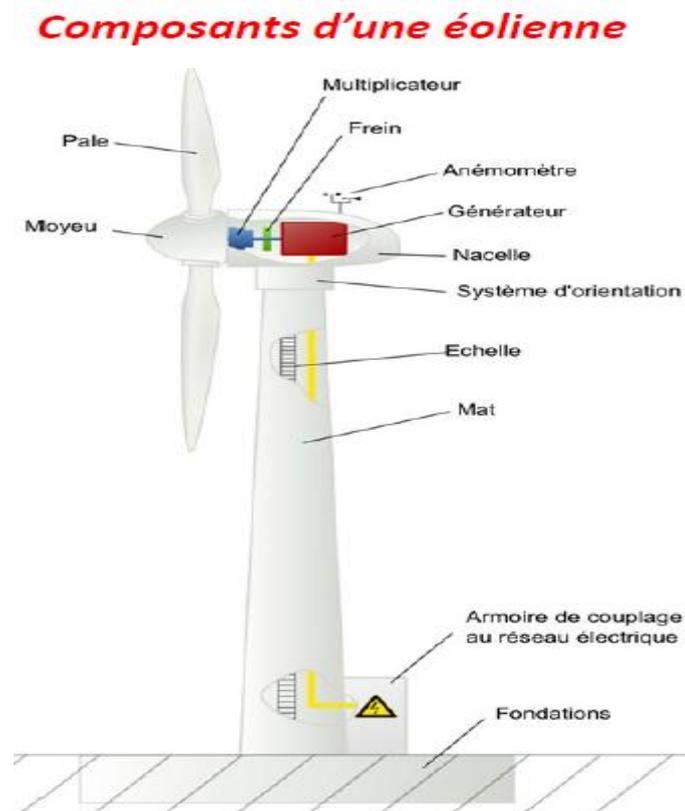


Figure I.3 : Les composants de la turbine éolienne

I.5. Différents types d'éoliennes.

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

I.5.1. Eoliennes à axe vertical.

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal.

Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées.

De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation.

I.5.1.1. Rotor Savonius.

Dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres :

Les efforts exercés par le vent (Figure I.4) sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. l'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur.

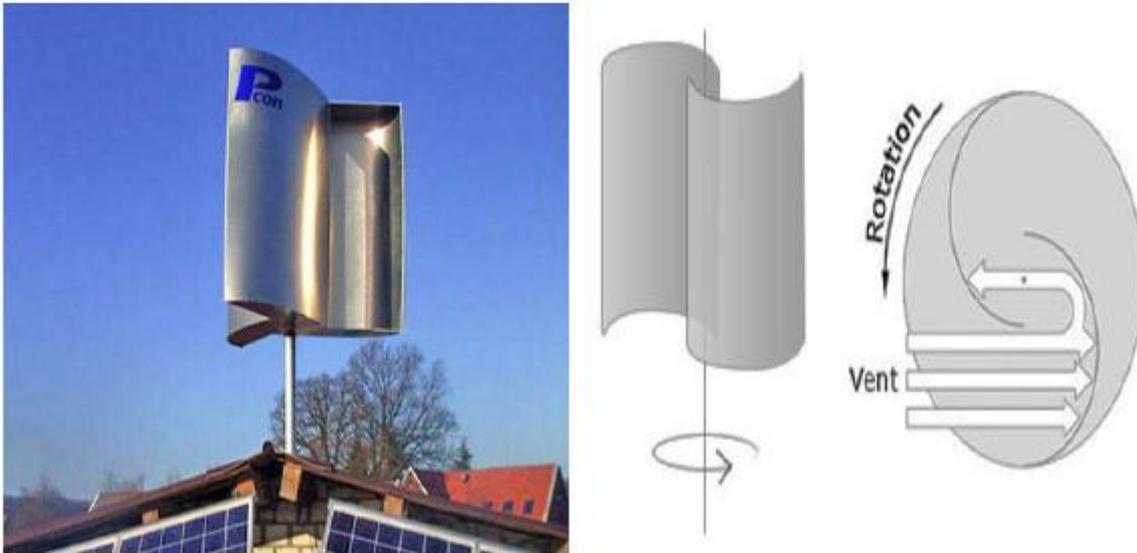


Figure I.4 : Schéma et principe du rotor de Savonius.

I.5.1.2. Rotor Darrieus.

Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure I.5) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

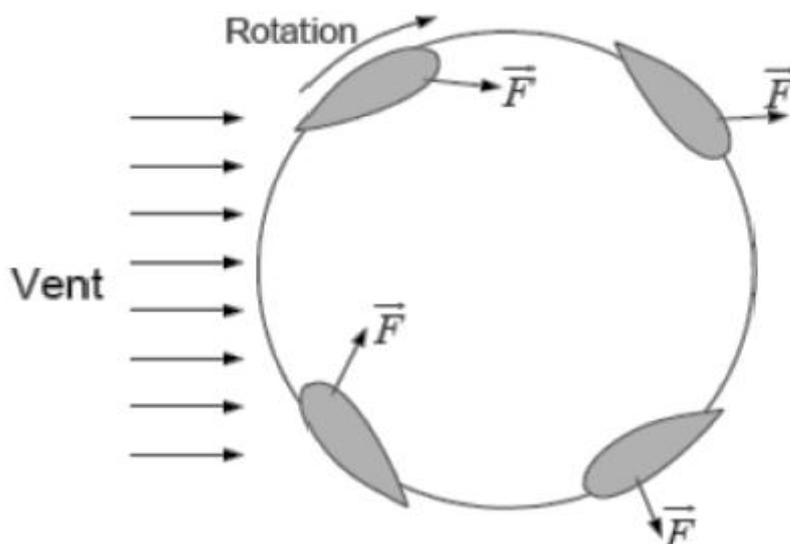


Figure I.5 : Schéma et principe du rotor de Darrieus.

La figure I.6 montre les différents rotors de Darrieus qui existe dans le tirant de la production de l'énergie du vent ou monde.



Figure I.6 : Rotor Darrieus.

I.5.2. Eoliennes à axe horizontal (HAWT).

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. elles sont constituées de pales profilées de façon aérodynamique à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. [2]

La turbine peut être placée avant la nacelle (upwind) et alors un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne face au vent est nécessaire. Une autre solution qui permet d'alléger la construction par la suppression de toute mécanique d'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (downWind) (figure I.7).

Dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent. Les éoliennes de ce type sont assez rares car des vibrations importantes sont à noter et qui sont dues au passage des pales derrière le mat (effet d'ombre de la tour). [5]



Figure I.7 : éolienne à axe horizontal.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal (Figure I.8):

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable. [6]

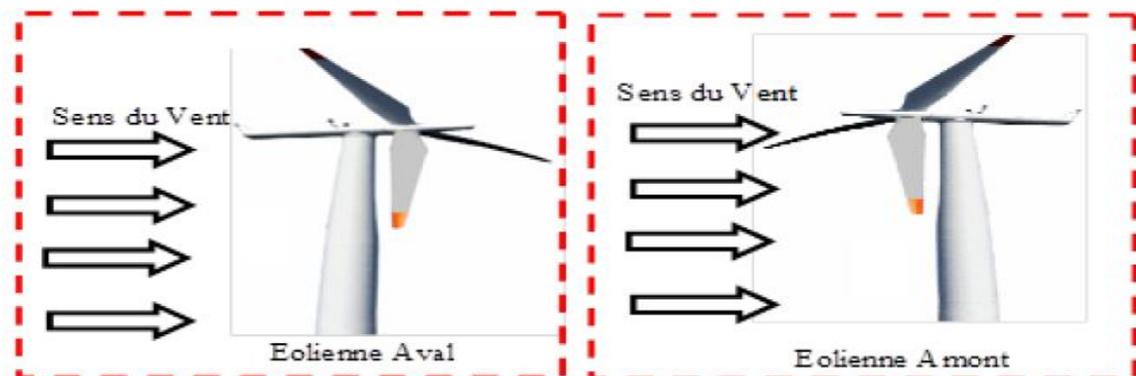


Figure I.8 : Configurations à axe horizontal.

I.6. Conversion de l'énergie éolienne.

I.6.1. Chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

L'éolienne est un système complet permettant de convertir l'énergie (mécanique) du vent en énergie électrique [4]. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site, [5].

I.6.2. La loi de BETZ.

La limite de BETZ est une loi physique qui indique que la puissance théorique maximale développée par un capteur éolien est égale à $16/27$ de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne. Ce résultat fut découvert par l'allemand Albert Batz en 1919 et fut publié dans son livre Wind Energie en 1926. Cette loi s'applique à tout type d'éolienne que l'on désignera d'ailleurs par le nom générique de capteur éolien. Les détails des équations de Betz se trouvent dans l'annexe.

I.7. Les Différents systèmes utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne.

I.7.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone à double alimentation.

La machine asynchrone à double alimentation été conçue pour fonctionner en moteur sur une grande plage de variation de vitesse comme première application. L'utilisation d'une MADA permet de varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques, ce dispositif sera donc économique quand on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d'environ 70% [6].

Pour le fonctionnement de la MADA en génératrice, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [6], [7] :

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions ;
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;

- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable ;
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation du carburant.

I.7.2. Systèmes utilisant la machine synchrone.

Malgré toutes les caractéristiques et avantages des machines asynchrones, ces dernières présentent le défaut d'imposer la présence du multiplicateur de vitesse car elles possèdent un couple mécanique insuffisant pour un couplage mécanique directe aux pales. Par contre les machines synchrones sont connues pour fournir un couple important, à dimensions géométriques convenables. C'est pourquoi elles offrent l'avantage de se passer du multiplicateur de vitesse, notamment si le nombre de pôles est important [8].

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques.

L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation.

Dans le cas de la machine à rotor bobiné, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on le remplace souvent par des aimants permanents. Toutefois, certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couple électromagnétique qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de la durée de vie de la connexion d'une machine synchrone au réseau [8].

La liaison avec le réseau se fait via un convertisseur connecté au stator de la machine. C'est un simple redresseur puisqu'elle n'absorbe pas de puissance réactive, ce qui permet d'éviter les variations importantes de la tension sur les enroulements statoriques. Ce

redresseur est classiquement suivi d'un hacheur élévateur permettant de délivrer une tension suffisante à l'onduleur MLI pour les faibles vitesses de rotation. La présence de l'onduleur MLI permet de contrôler le facteur de puissance coté réseau. Ces convertisseurs sont toutefois dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la machine et entraînent jusqu'à 3% de cette puissance de pertes [9].

Le champ magnétique de la génératrice synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si elle possède un nombre suffisant de pôles, elle peut s'utiliser pour les applications d'entraînement direct (direct-drive) qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses (gearless). Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents (MSAP) est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente.

Ces avantages sont la motivation principale du choix sur lequel se base ce travail, à savoir l'étude d'un système de génération d'énergie éolienne utilisant une MSAP, d'une puissance de 600Watts. Après la modélisation du système de production, l'étude portera sur l'optimisation de la puissance que peut fournir la turbine éolienne via une commande du coefficient de puissance qui caractérise cette dernière. Puis nous allons contrôler la puissance électrique produite de sorte à ce qu'elle soit optimale et constante d'une part puis variable tout en essayant de maintenir la puissance réactive égale à zéro mais capable de prendre une autre valeur en cas de besoin. Ces opérations de contrôle se feront grâce à des régulateurs de type PI puis IP afin de comparer les résultats obtenus. L'alimentation de la charge se fera via un onduleur à six bras commandables alimentés par la génératrice à travers un redresseur à MLI.

I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

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

I.8.1. Les avantages:

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement,
- L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO₂,
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable,

- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs,
- Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées,
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [10],
- peut être rentable dans les régions éloignées et ventée (sites isolés),
- peut être complémentaire des filières traditionnelles [11],
- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est plus forte.

I.8.2. Les inconvénients :

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

- L'impact visuel. ça reste néanmoins un thème subjectif [12],
- Le bruit des pales,
- L'impact sur les oiseaux (les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux),
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante [12].

I.9. Conclusion.

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne. Nous avons abordé une évaluation du potentiel éolien Algérien afin d'avoir une idée sur l'importance de l'investissement dans ce créneau. Nous avons également présenté le fonctionnement d'une éolienne et ses principaux composants. Nous avons parlé des différents types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal. Nous avons donné un aperçu sur la conversion électromécanique et les différents types de machines utilisées. La comparaison entre ces machines a dégagé l'idée de consacrer notre étude à un système utilisant une machine synchrone à aimants permanents. Et enfin Nous avons abordé les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

II.1. Introduction.

Dans ce chapitre, nous allons établir un modèle mathématique qui permettra de simuler le comportement de l'éolienne dans un cadre de fonctionnement bien défini. Le dispositif, qui sera étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne entraînant une génératrice sans multiplicateur de vitesse. La première partie de ce chapitre est consacrée à la modélisation de l'éolienne, et dans la deuxième partie et nous allons aborder les différents types de stratégie de commande de l'éolienne et en fin la simulation du modèle pour savoir le comportement de l'éolienne sans l'association avec la génératrice et sans l'asservissement de vitesse.

II.2. Modélisation de la turbine éolienne.

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse incidente du vent et des conditions de fonctionnement, sa vitesse de rotation en particulier. Cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre lent de l'éolienne. Cette modélisation (essentiellement dépendante du coefficient de puissance C_p ou rendement énergétique de l'éolienne). La turbine retenue comprend trois pales profilées orientables de longueur R . Elles sont fixées à travers un moyeu sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_{tr} . Cet arbre entraîne une génératrice synchrone à grand nombre de pôle dans notre cas (Figure II.1)

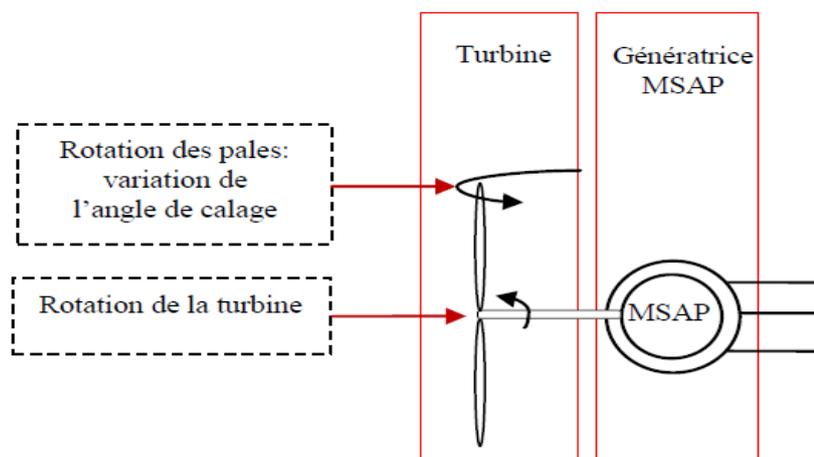


Figure II.1 : Turbine éolienne.

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

*Le même moment d'inertie j_{pal}

Ces pales sont orientables et chacune d'elles reçoit une force F_1, F_2, F_3 qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée.

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

*Son moment d'inertie J_a .

Le rotor de la génératrice possède :

*Un moment d'inertie j_g .

Le rotor transmet un couple entraînant (C_{tr}) à la génératrice électrique et tourne à la vitesse notée Ω_{tr} . 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 ($F_1 = F_2 = F_3$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique dont on peut simplifier la modélisation. On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses, [13].

La transmission mécanique entre la turbine et la génératrice peut être modélisée par le système d'équations (II.1). L'absence de multiplicateur de vitesse se justifie par la machine synchrone à aimants permanents retenue qui possède un grand nombre de paires de pôles ($p = 125$).

$$C_{tr} - C_{em} - f_v \Omega_g = j_t \frac{d\Omega_g}{dt} \quad (\text{II.1})$$

$$\Omega_{tr} = \Omega_g$$

$$j_t = j_{pal} + j_g + j_{arbre} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

f_v : Coefficient de frottements visqueux.

II.2.1. Puissance aérodynamique.

La puissance aérodynamique P_{aer} extraite par la turbine en fonction du facteur de puissance C_p est donnée par :

$$P_{aer} = C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (II.3)$$

- ρ : la masse volumique de l'air (approximativement $1,225 \text{ kg/m}^3$).

- S : la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle décrit étant défini par la longueur d'une pale, $S = \pi \cdot R_t^2$.

- R_t : le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

- v : est la vitesse du vent.

- C_p : est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine (Figure II.2). ce coefficient, dont la limite théorique égale à $16/27=0.593$ (limite de Betz), dépend de deux paramètres :

- La vitesse spécifique λ représentant le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent,

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{v} \quad (II.4)$$

Où Ω_t est la vitesse de rotation la turbine.

- L'angle de calage des pales β

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - (0.00167 * \alpha) * \sin\left(\frac{\pi(\lambda+0.1)}{18.5-(0.3*\alpha)}\right) - (0.00184(\lambda - 3)\alpha) \quad (II.5)$$

Avec :

$$\alpha = \beta - 2$$

La caractéristique du coefficient de puissance par rapport au rapport de la vitesse en extrémité est présentée par la figure (II.2). Cette caractéristique est un élément principal dans la caractérisation des convertisseurs d'énergie éolienne [14].

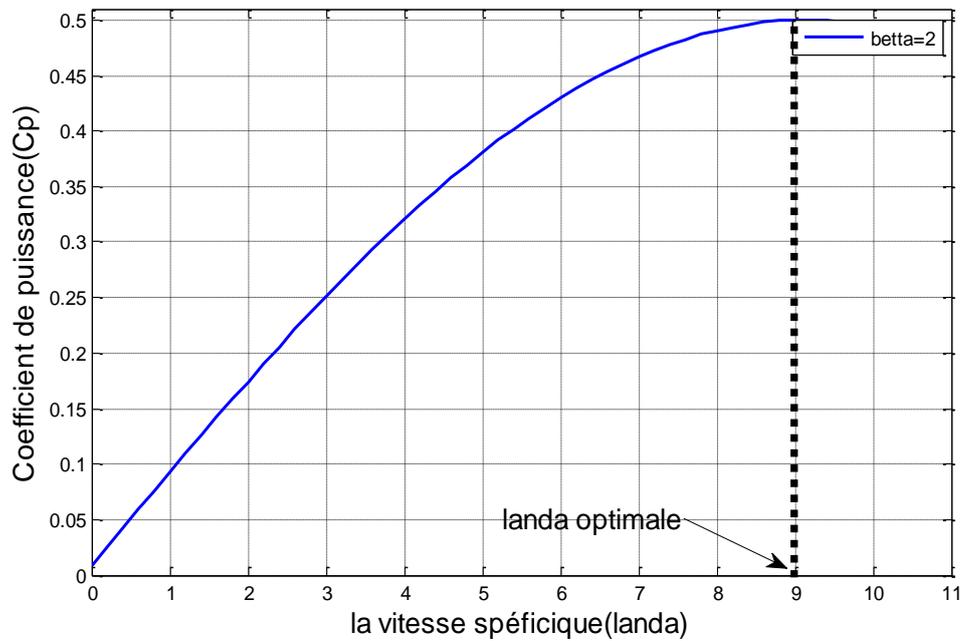


Figure II.2 : Coefficient de puissance(C_p) en fonction de λ .

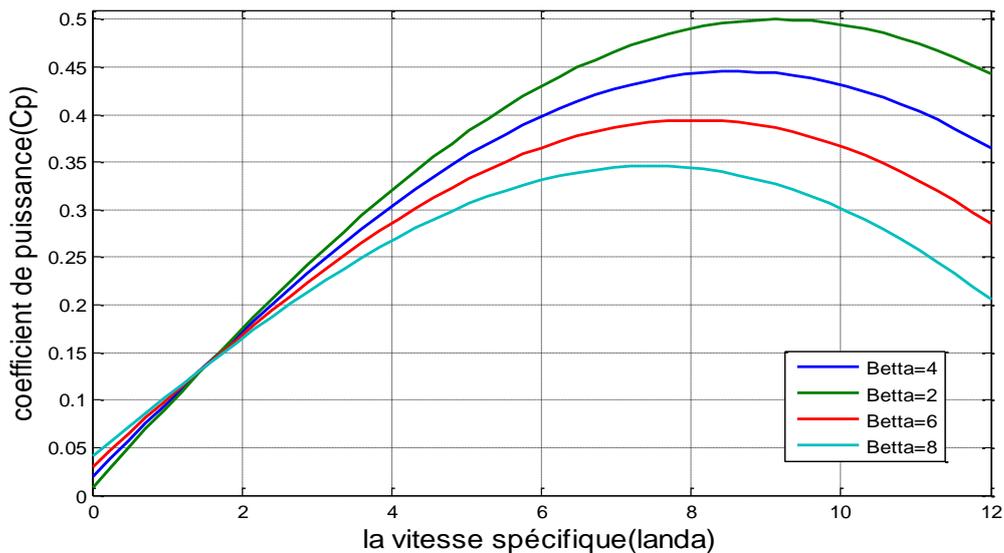


Figure II.3 : Caractéristique C_p - λ pour les différentes valeurs de l'angle decaalage.

Sur la figure (II.3), plusieurs courbes sont distinguées mais nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet. Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{opt}=9, C_{pmax}=0.5, \beta =2^\circ$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_p et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée. Nous remarquons que l'augmentation de β permet de dégrader le coefficient C_p et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

II.2.2. Couple aérodynamique.

La variation instantanée de l'énergie cinétique du vent capturée par l'aéroturbine se transforme en puissance mécanique P_{aer} qui développe un couple moteur C_{tr} faisant ainsi tourner le rotor à une vitesse Ω_{tr} .

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_t^3 \cdot v^2}{\lambda} \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (II.6)$$

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit aisément à partir des équations précédentes figure (II.4).

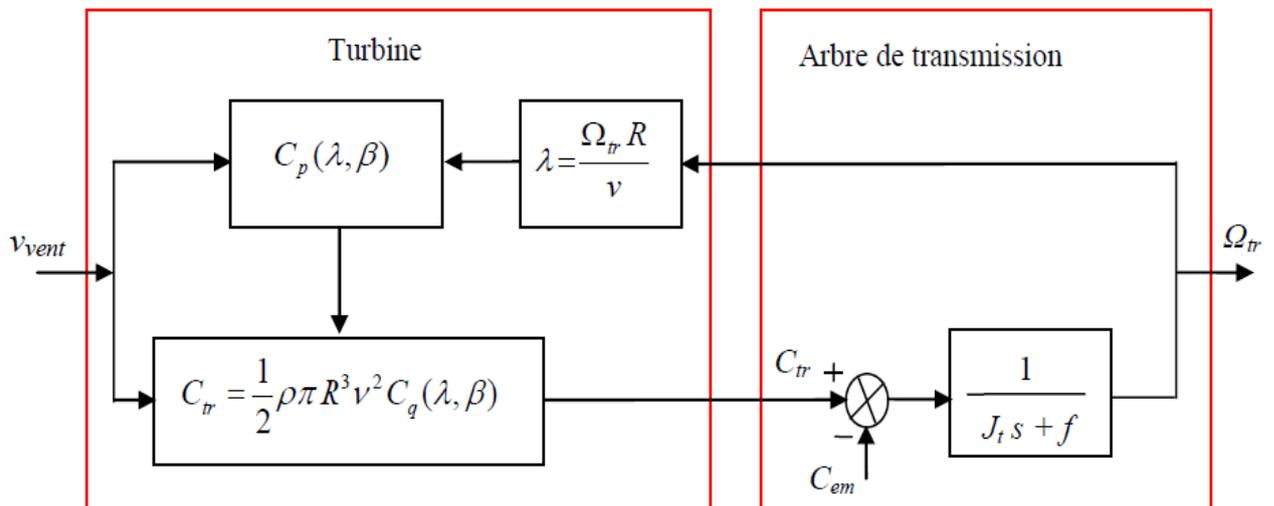


Figure II.4 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

Avec :

C_q : Coefficient de couple, $C_q = \frac{C_p}{\lambda}$

II.3. Les différents types de commande de la turbine éolienne.

La figure II.5 représente la caractéristique de la turbine éolienne, qui est la puissance extraite par la turbine du vent en fonction de la variation de vitesse de vent.

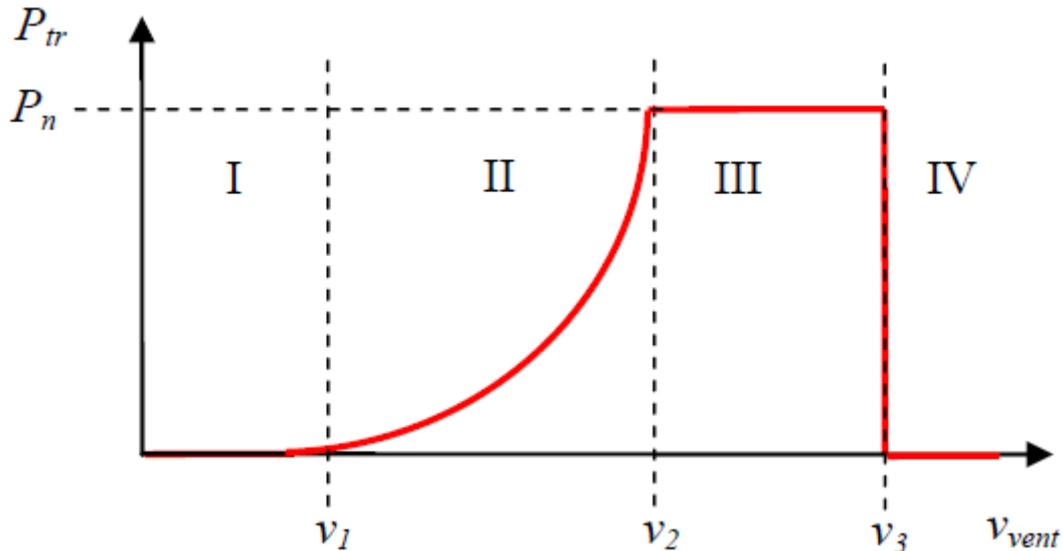


Figure II.5 : Zones de fonctionnement d'une éolienne.

Zone I : $v < v_1$:

La vitesse du vent est trop faible, la turbine peut tourner mais l'énergie captée est trop faible.

Zone II : $v_1 < v < v_2$:

Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes

méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite (appelées généralement MPPT). Cette zone correspond au fonctionnement dit « à charge partielle (CP) ».

Zone III : $v_2 < v < v_3$

La puissance incidente devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de P_n . Cette zone correspond au fonctionnement dit « à pleine charge (PC) ».

Zone IV : $v > v_3$

La vitesse du vent devient trop forte pour les capacités opérationnelles de l'installation. La turbine est donc arrêtée et la puissance extraite est nulle.

Les considérations de base seront les suivantes:

$v1$: vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, $v1$ varie entre $2.5m/s$ et $4m/s$ pour les éoliennes de forte puissance.

$v2$: vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, $v2$ varie entre $11.5m/s$ et $15m/s$ en fonction des technologies.

$v3$: vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, $v3$ vaut $25m/s$

La puissance capturée par la turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient de puissance. Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice. D'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. Pour cela, on peut distinguer deux approches (types) possibles [15] :

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

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

Si on suppose que la génératrice est idéale, donc quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique C_{em} développé est à tout instant égal à sa valeur de référence C_{em-ref} , (c.-à-d: $C_{em} = C_{em-ref}$). Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine Ω_t qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

La vitesse de la génératrice Ω_r égale à Ω_t (pas de multiplicateur) est influencée par l'application de trois couples : le couple éolien C_g , le couple électromagnétique C_{em} et le couple résistant C_r .

En regroupant l'action de ces trois couples on peut écrire [15]:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_g - C_{em} - C_r) \quad (II.7)$$

Avec ;

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

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

$$C_{em-ref} = F(S) * (\Omega_{ref} - \Omega)$$

Avec :

$F(S)$: Fonction de transfert du régulateur de vitesse (II.8)

Cette vitesse de référence Ω_{ref} dépend de la vitesse de la turbine à fixer Ω_t pour maximiser la puissance extraite. La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle de la valeur optimale du ratio de vitesse $\lambda_{cp\ max}$ (β constant) permettant d'obtenir la valeur maximale de C_p .

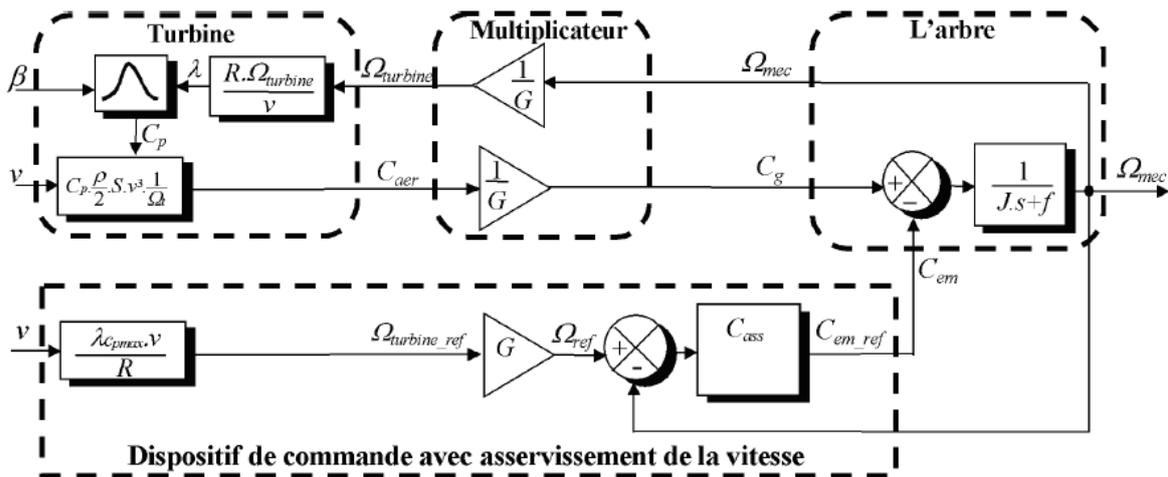


Figure II.6 : Schéma bloc avec asservissement de vitesse.

II.3.2. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.

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

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui errone la lecture de la vitesse du vent.
- Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70 m pour une éolienne de 1.5 MW), une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentatives de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [16].

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_f \quad (II.8)$$

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

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

$$C_{em_ref} = \frac{C_{aer_est}}{G} \quad (II.9)$$

dans notre cas $G=1$ donc :

$$C_{em_ref} = C_{aer_est} \quad (II.10)$$

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

$$C_{aer_est} = C_p \cdot \frac{\rho S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine_est}} \cdot v_{est}^3 \quad (II.11)$$

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

$$\Omega_{turbine_estime} = \Omega_{mec} \quad (II.12)$$

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

$$v_{estime} = \frac{\Omega_{turbine_est} \cdot R}{\lambda} \quad (II.13)$$

En regroupant ces quatre équations $Rc0$, $Rc1$, $Rc2$, $Rc3$, on obtient une relation globale de contrôle :

$$C_{em_ref} = \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (II.14)$$

L'expression du couple de référence devient alors proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice.

$$C_{em_ref} = A \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (II.15)$$

Avec :

$$A = \frac{C_p}{\lambda_{Cpmax}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \quad (II.16)$$

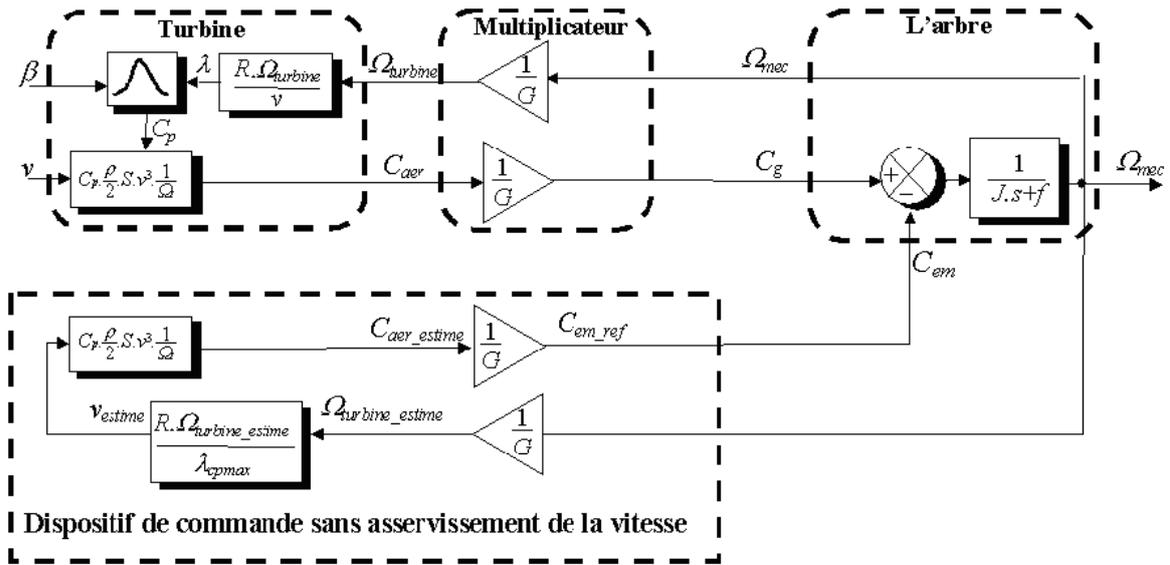


Figure II.7 : Schéma bloc sans asservissement de vitesse.

II.4. Résultat de simulation.

Les résultats de simulation du modèle de la turbine éolienne montrent les variations de la vitesse mécanique, le coefficient de puissance et le couple aérodynamique.

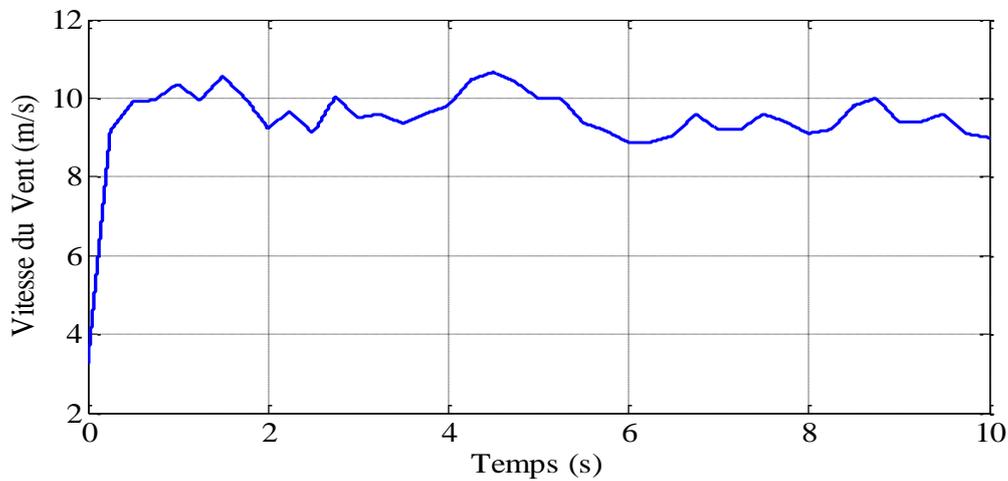


Figure II.8 : Le profil de vent.

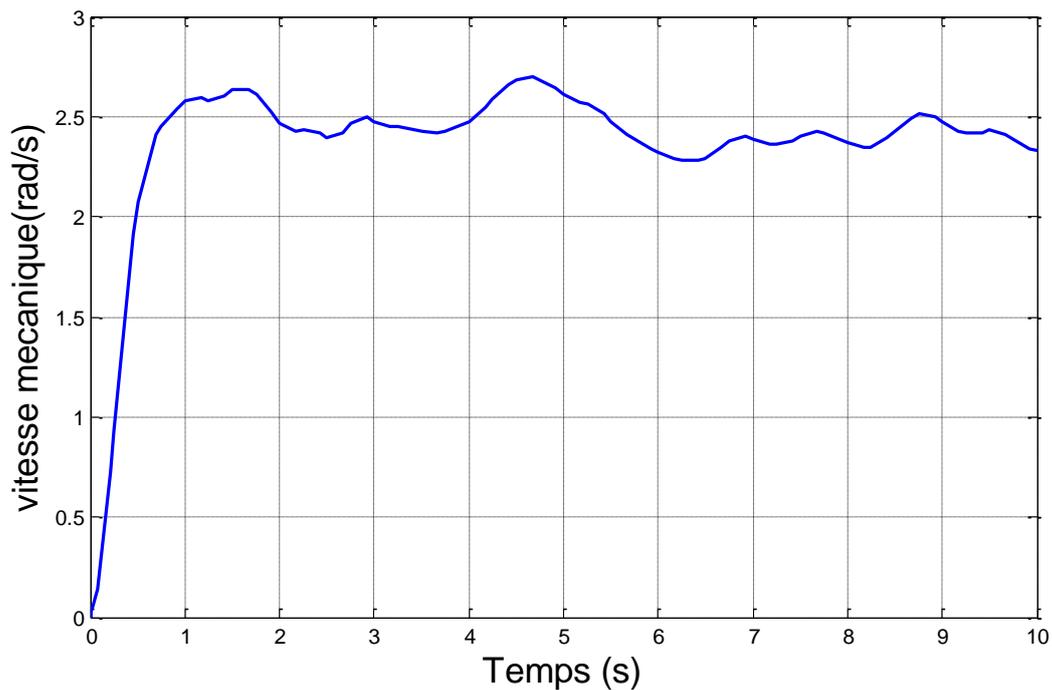


Figure II.9 : la vitesse de la turbine.

D'après les deux figures (II.8 et II.9) on a remarqué que la vitesse de la turbine a la même allure que le profile de vent donc les variations de la vitesse de la génératrice sont adaptées à celle de la vitesse du vent.

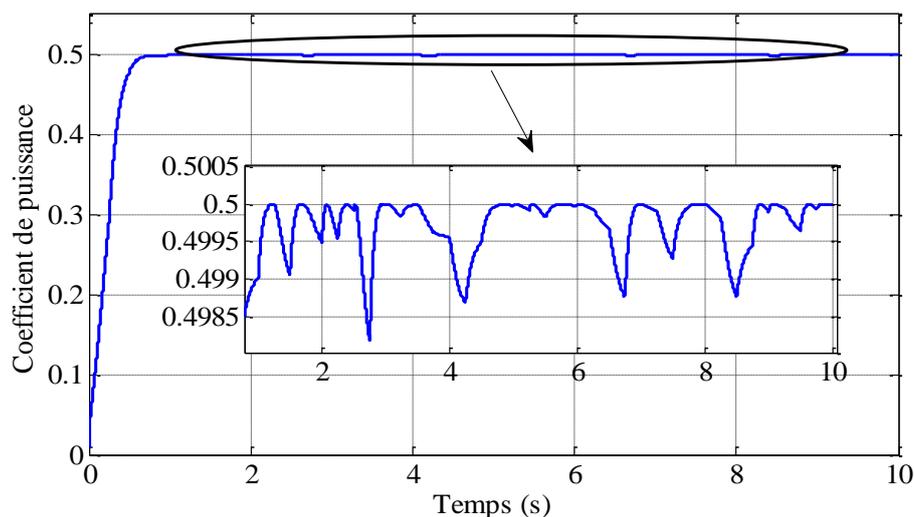


Figure II.10 : le coefficient de la puissance.

Le coefficient de la puissance garde toujours sa valeur maximal et son allure est quasi proche de l'allure de profile de vent.

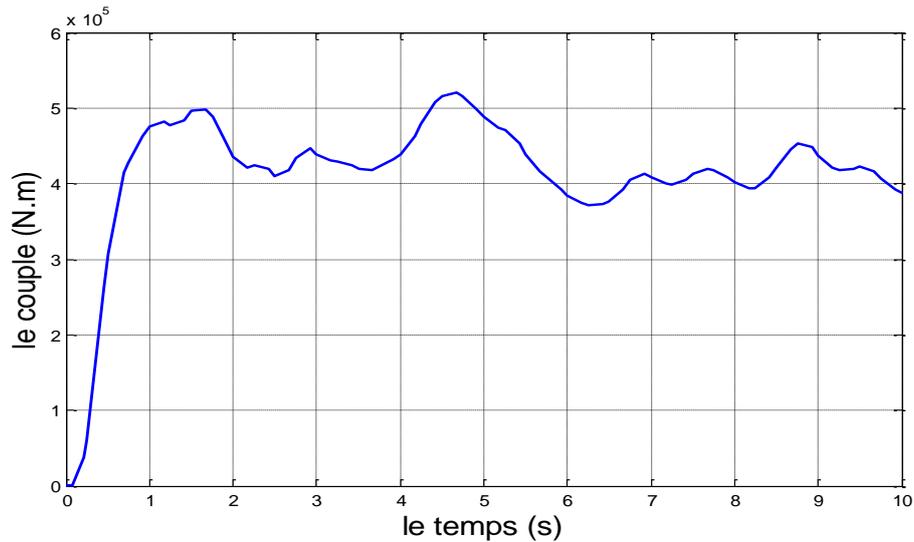


Figure II.11 : le couple aérodynamique.

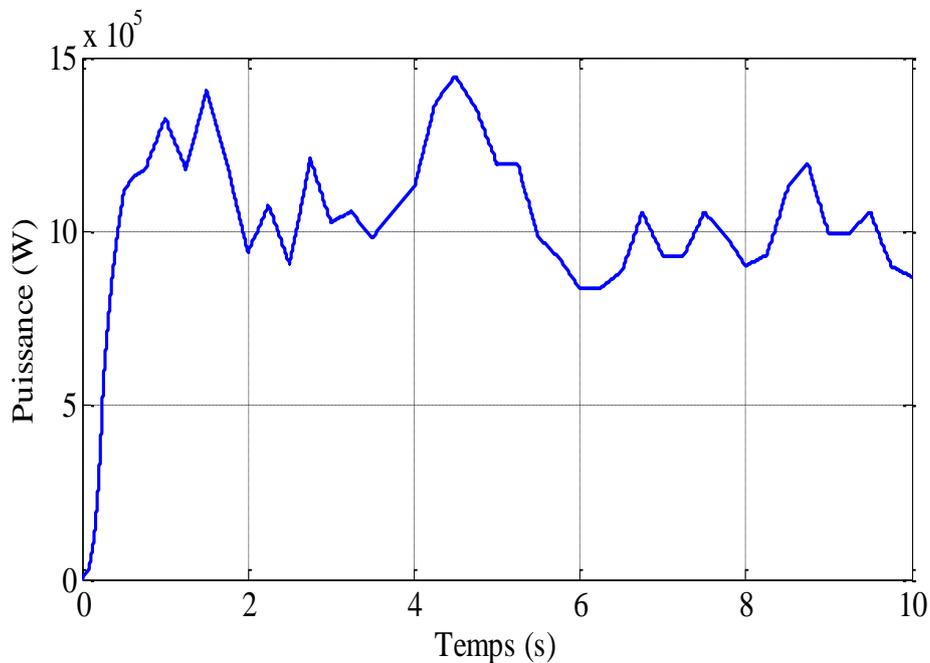


Figure II.12 : la puissance nominale

II.5. Conclusion.

Dans ce chapitre nous avons modélisé la turbine éolienne, et on a abordé les différents techniques utilisés pour la maximisation de la puissance capturée par la turbine nous avons également donné les résultats de simulation de modèle sans l'association avec la génératrice synchrone.

Dans le prochain chapitre, nous allons étudier la modélisation et la commande de la génératrice synchrone à aimant permanent.

III.1. Introduction.

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. Dans l'hypothèse où le flux est maintenu constant, le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active dépendante uniquement du courant statorique d'axe q .

III.2. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.

La modélisation de la machine est primordiale pour concevoir des systèmes de commandes performants, ceci consiste à décrire son comportement par un modèle mathématique. Le modèle analytique de la machine synchrone à aimants permanents peut être déduit en adoptant un ensemble d'hypothèses simplificatrices usuelles données dans la majorité des références qu'il est bon de rappeler, [17]:

*La répartition du champ inducteur dans l'entrefer ainsi que les forces magnétomotrices sont sinusoïdales;

*Le circuit magnétique est considéré linéaire (absence de saturation);

*Les irrégularités de l'entrefer dues aux encoches statoriques sont ignorées;

*Les phénomènes d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés;

*Le rotor est supposé lisse du point de vue magnétique (MSAP sans pièces polaires);

*Les enroulements du stator sont par construction tous décalés d'un angle de 120° les uns par rapport aux autres;

*Les aimants sont idéaux, le flux magnétique émis par les aimants est constant;

*on néglige l'influence de la température sur les résistances des enroulements;

III.2.1. Mise en équations de la machine.

Les équations de tensions des phases statoriques servent au point de départ pour l'élaboration du modèle dynamique de la machine synchrone à aimants permanents. La structure électrique d'une MSAP triphasée est constituée au stator d'un enroulement triphasé représenté par les trois axes (a , b , c) décalés, l'un par rapport à l'autre, d'un angle de 120° électrique, et au rotor des aimants permanents assurant son excitation, Figure III.1

Il est important de noter ici que le grand avantage des machines synchrones à aimants permanents est l'absence de bobinage au rotor et, par conséquent, l'absence de contacts glissants et de perte joules au rotor. En revanche, l'inconvénient majeur réside dans le fait

qu'on perd toute possibilité de réguler le courant inducteur, donc le champ magnétique associé.

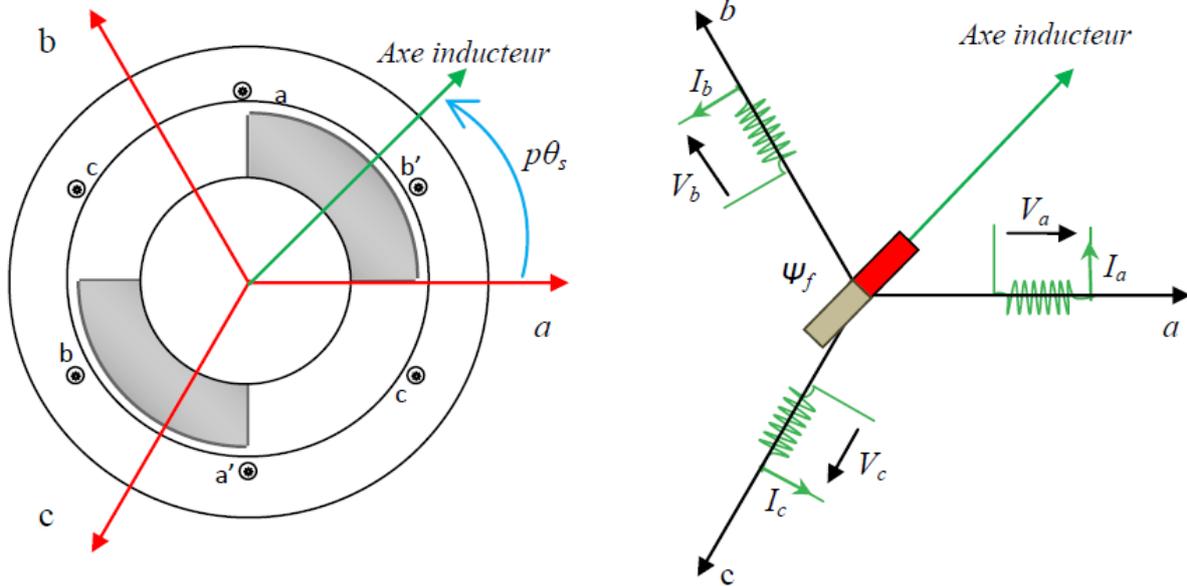


Figure III.1 : Représentation schématique d'une machine synchrone dans le repère abc.

On distingue trois types d'équations qui définissent internement le comportement de la machine à savoir :

- 1) - Les équations électriques.
- 2) - Les équations magnétiques.
- 3) - Les équations mécaniques.

III.2.2. Equation électrique

$$\begin{aligned}
 V_a &= R_s I_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\
 V_b &= R_s I_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\
 V_c &= R_s I_c + \frac{d\varphi_c}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{III.1}$$

Avec :

R_s : résistance d'une phase statorique.

$V_a, V_b,$ et V_c : tensions des phases statorique.

Sous forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix}. \quad (\text{III.2})$$

III.2.3. Equation magnétique.

Puisque la machine est non saturée et équilibrée les flux sont liés aux courants par :

$$\begin{cases} \varphi_a = L_a * I_a + M_{ab} * I_b + M_{ac} * I_c + M_{af} * I_f. \\ \varphi_b = L_b * I_b + M_{ba} * I_a + M_{bc} * I_c + M_{bf} * I_f. \\ \varphi_c = L_c * I_c + M_{ca} * I_a + M_{cb} * I_b + M_{cf} * I_f. \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Pour un réseau symétrique : $L_a = L_b = L_c = L$

$$M_{af} = M_f \cos(\theta); M_{bf} = M_f \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right); M_{cf} = M_f \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right).$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + M_f I_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Tel que : M : Mutuelle inductance entre phases du stator.

L : Inductance propre d'une phase statorique.

$M_f I_f$: Flux constant du aux aimants permanents (φ_f).

III.2.4. Equation mécanique.

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$J \frac{\Omega r}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$$\Omega r = \omega / p :$$

Avec :

p: Nombre de paire de pole.

C_{em} : Couple électromagnétique.

Cr : Couple résistant.

Cf : Couple de frottement.

J : Moment d'inerte.

III.2.5. Transformation de PARK.

Afin de simplifier l'étude, on utilise la transformation de Park qui est un outil mathématique permettant de transformer les axes magnétiques des bobines statoriques (a,b,c) en axes orthogonaux (d,q). Ce qui se traduit par le remplacement des bobinages statoriques (a,b,c) par des bobinages équivalents (d,q) [18].

La transformation de Park est donnée par :

$$[P](\theta) = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

$[P](\theta)$: Matrice de PARK

Et inversement, pour passer des équations dans le plan de Park aux équations dans le plan (a,b,c) on utilise la transformation de Park inverse qui est donnée par :

$$[P^{-1}](\theta) = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Le changement de variable effectué aux équations des tensions, courants et flux, on obtient :

$$[i_{dq}] = P(\theta)[i_{abc}] \quad (\text{III.8})$$

$$[v_{dq}] = P(\theta)[v_{abc}] \quad (\text{III.9})$$

$$[\theta_c] = P(\theta)[\phi_{abc}] \quad (\text{III.10})$$

Enfin, les équations de la machine synchrone dans le repère de Park sont données par les expressions suivantes:

$$v_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + L_d \cdot \frac{dI_{ds}}{dt} - L_q \cdot \omega \cdot I_{qs} \quad (\text{III.11})$$

$$v_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + L_q \cdot \frac{dI_{qs}}{dt} - L_d \cdot \omega \cdot I_{ds} + \phi_s \cdot \omega_s \quad (\text{III.12})$$

$$\Phi_d = L_d \cdot I_d + \Phi_f \quad (\text{III.13})$$

$$\Phi_q = L_q \cdot I_{qs} \quad (\text{III.14})$$

$$C_{em} = \left(\frac{3}{2}\right) p \left((L_q - L_d) I_d \cdot I_q + \Phi_f \cdot I_q \right) \quad (\text{III.15})$$

Avec :

p : le nombre de paires de pôles

I_{qs} : le courant statorique sur l'axe q.

I_{ds} : le courant statorique sur l'axe d.

Φ_f : le flux magnétique.

III.3. Commande vectorielle de la MSAP.

La commande de la MSAP est basée sur un pilotage vectoriel des tensions statorique [19]. Son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes (I_d , I_q) en quadrature dans un référentiel lié au champs tournant de façon que l'une des composantes (I_q) commande le couple électromagnétique et l'autre commande I_d le flux, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu, à excitation séparée [20]. Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à la machine synchrone, celle qui consiste à imposer une référence du courant direct à zéro est la plus répandue.

le choix d'imposer I_{dref} à zéro est justifié dans le but d'éviter la démagnétisation des aimants permanents due à la réaction d'induit selon l'axe d , [21], [22], et de réduire les pertes joules dans la machine, [23].

$$I_{dref} = 0$$

$$I_q = \frac{C_{em}}{1.5p\Phi_f}$$

III.4. Modélisation convertisseur coté machine.

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée [24]. La Figure 3.5 présente aussi un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor IGBT et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C de tension V dc.

le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L, R) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique [25].

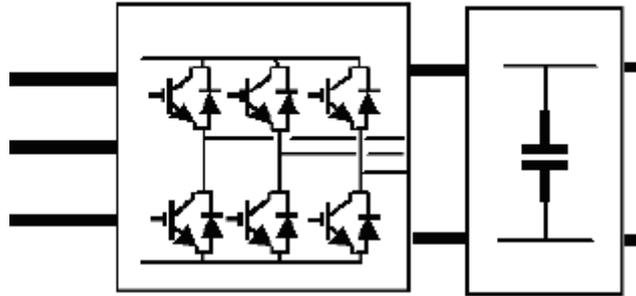


Figure III.2 : Convertisseur statique MLI.

On peut faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation en modélisant le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux, ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante [26] :

$$S_j = \begin{cases} 1, \bar{S}_j = 0 \\ 0, \bar{S}_j = 1 \end{cases} \quad j = a, b, c \quad (\text{III.16})$$

Puis les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de S_j , de la tension du bus continu V_{dc} et les courants d'entrée I_{Sa}, I_{Sb}, I_{Sc} :

$$I_{Sa} + I_{Sb} + I_{Sc} = 0$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur peuvent être décrites par [24], [26] :

$$\begin{cases} U_{Sab} = (S_a - S_b)V_{dc} \\ U_{Sbc} = (S_b - S_c)V_{dc} \\ U_{Sca} = (S_c - S_a)V_{dc} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

D'où on peut déduire les tensions simples :

$$\begin{cases} U_{Sab} = \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} V_{dc} \\ U_{Sbc} = \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} V_{dc} \\ U_{Sca} = \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} V_{dc} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

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

$$[V_{rabc}] = R_r [I_{rabc}] + L_r \frac{d}{dt} [I_{rabc}] + U_{Sab} \quad (\text{III.19})$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = (S_a I_{Sa} + S_b I_b + S_c I_c) - I_{dc} \quad (\text{III.20})$$

III.5. Résultats des simulations :

A l'aide du logiciel MATLAB, la simulation de la MSAP a été faite. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park (plan (d,q)) liée au champ tournant est entraîné par une turbine éolienne.

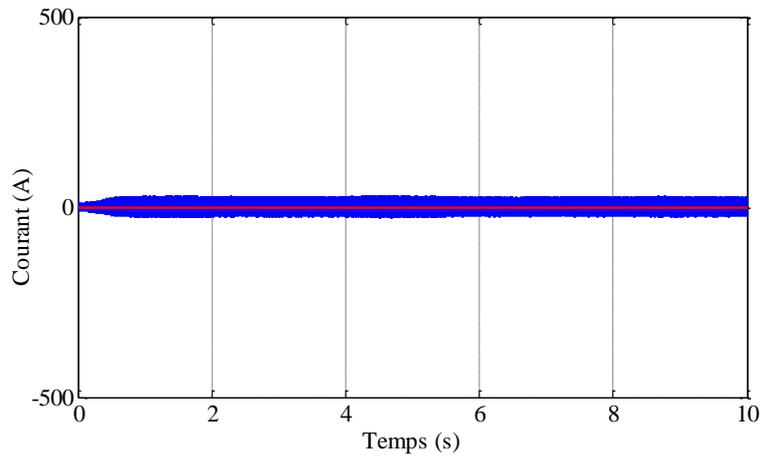


Figure III.3: Courant directe de la MSAP.

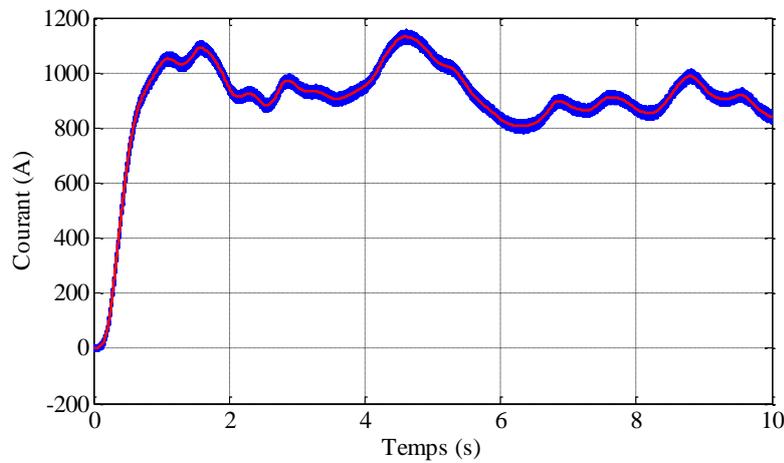


Figure III.4 : Courant en quadrature de la MSAP.

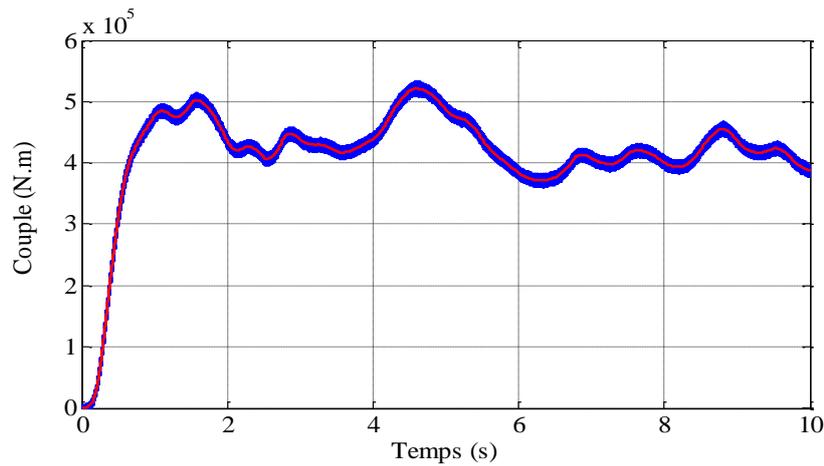


Figure III.5 : Couple électromagnétique de la MSAP.

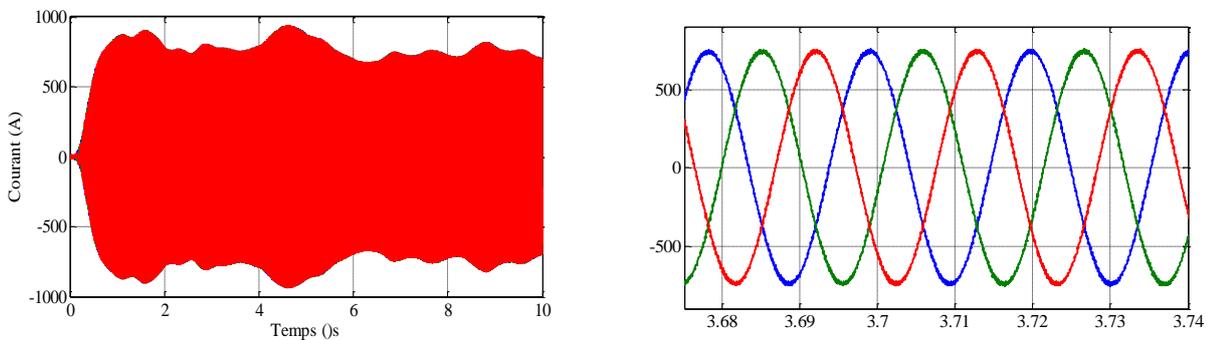


Figure III.6 : Courant statorique triphasé avec un zoom.

Les résultats obtenus ci dessus confirment le bon fonctionnement du système de commande vectorielle. En effet, le courant direct est nulle figure III.3, et le courant en quadrature suit l'allure du couple Figure III.4,III.5, le système de commande assure l'optimisation de la puissance extraite, en maintenant le coefficient de puissance de la turbine à sa valeur maximale, les éoliennes fonctionnent alors en MPPT.

On remarque aussi que les courants statorique de la MSAP sont sinusoïdales mais de fréquences différentes, leurs amplitudes sont liées à la variation de la vitesse mécanique du générateur éolien présenté par la figure III.6.

III.6. Contrôle de la liaison au réseau.

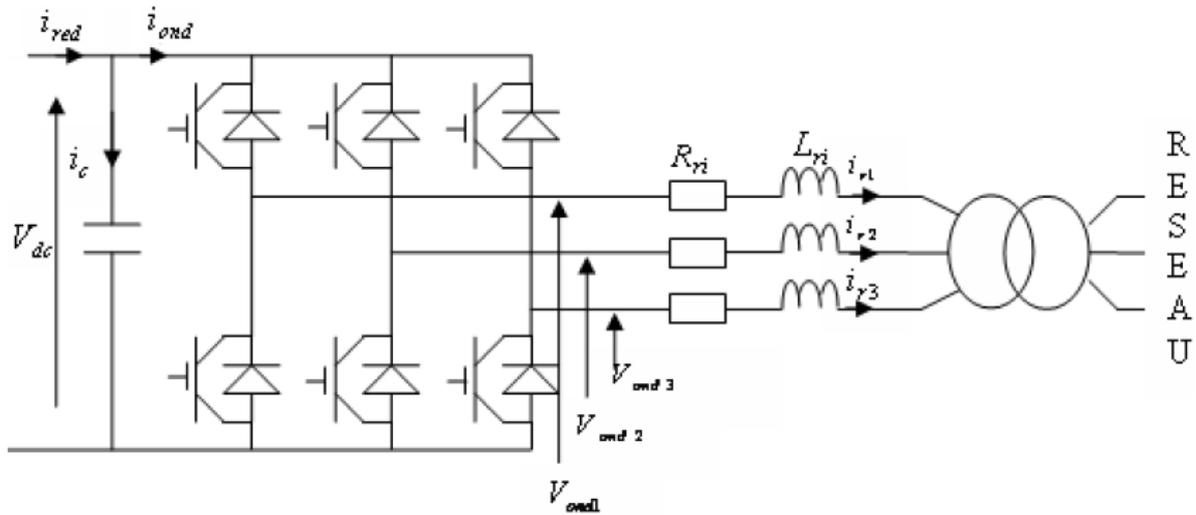


Figure III.7 : Schéma de la liaison au réseau électrique via un convertisseur.

Avec :

- * V_{dc} = tension du bus continu.
- * I_c = le courant traversant le condensateur.
- * I_{red} = le courant de sortie du redresseur.
- * I_{ond} = courant ondulé.
- * $R_{ri} L_{ri}$ = résistance et inductance du filtre.
- * $V_{ond.i}$ = avec $i = \{1, 2, 3\}$ sont les tensions simples à la sortie de l'onduleur ;
- * i_{r1}, i_{r2}, i_{r3} : sont les courants circulant dans le filtre et fourni au réseau.

Afin de générer un courant au réseau, il faut que la tension du bus continu (V_{dc}) soit supérieure à la valeur crête des tensions composée du côté du filtre, qui est $\sqrt{2} \times V_{res-eff}$; avec V_{eff} est la valeur efficace de la tension apparaissant du côté du filtre. en appliquant la transformation de Park, ainsi la transformée de Laplace,

III.6.1. Contrôle des courants envoyés au réseau.

Le dispositif de commande des courants (i_{td} et i_{tq}) il comprend trois actions spécifiques :

– une compensation de la tension au secondaire du transformateur

$$e_{q-est} = L_t \cdot \omega_s \cdot i_d \quad (III.21)$$

$$e_{d-est} = L_t \cdot \omega_s \cdot i_q \quad (III.22)$$

– une action de découplage des courants :

$$v_{md-reg} = v_{bd-ref} - e_{q-est} + v_{bd-mes} \quad (III.23)$$

$$v_{mq-reg} = v_{bq-ref} - e_{d-est} + v_{bq-mes} \quad (III.24)$$

– Un contrôle en boucle fermée des courants :

$$v_{bd-ref} = C_i \cdot (i_{td-ref} - i_{td-mes}) \quad (III.25)$$

$$v_{bq-ref} = C_i \cdot (i_{tq-ref} - i_{tq-mes}) \quad (III.26)$$

III.7. Régulation des puissances.

Le dispositif de commande précédemment expliqué permet d'imposer égaux les courants transités à leurs références. Cela entraîne les puissances actives et réactives transitées suivantes :

$$P = v_{pd} \cdot i_{td} + v_{pq} \cdot i_{tq} \quad (III.27)$$

$$Q = v_{pq} \cdot i_{td} - v_{pd} \cdot i_{tq} \quad (III.28)$$

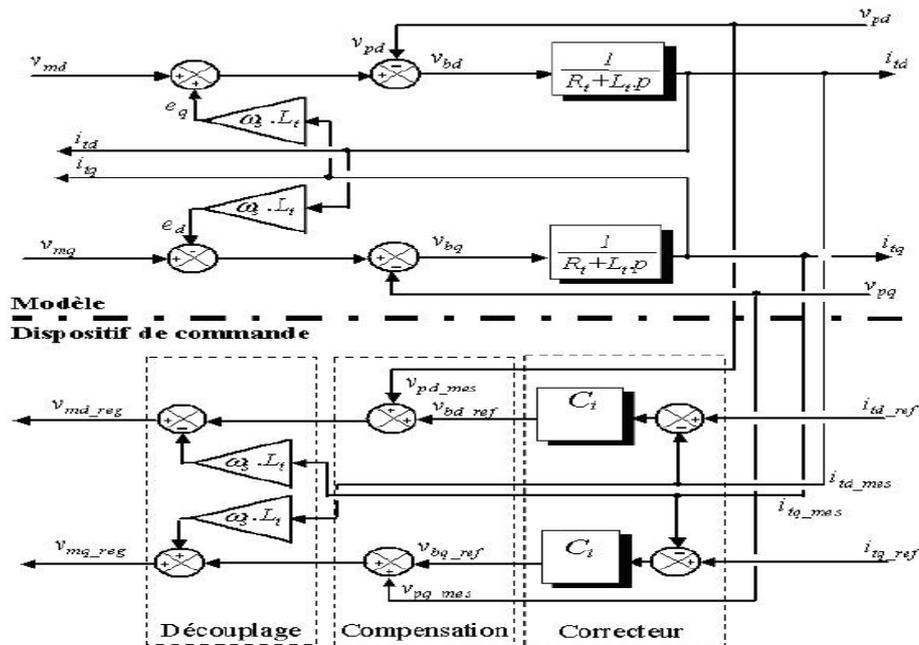


Figure III.8: Représentation sous forme de schéma-blocs du contrôle des courants dans le repère de Park.

Par inversion de ces relations, il est alors possible d'imposer des références pour la puissance active P_{ref} et la puissance réactive Q_{ref} imposant les courants de référence

$$i_{td-ref} = \frac{p_{ref} \cdot v_{d-mes} + Q_{ref} \cdot v_{q-mes}}{v_{d-mes}^2 + v_{q-mes}^2} \quad (III.29)$$

$$i_{tq-ref} = \frac{p_{ref} \cdot v_{q-mes} - Q_{ref} \cdot v_{d-mes}}{v_{d-mes}^2 + v_{q-mes}^2} \quad (III.30)$$

La composante directe du courant est utilisée pour réguler la tension du bus continu. Ce dernier est contrôlé à l'aide d'un régulateur (PI). La composante en quadrature est utilisée pour réguler la puissance réactive transitée. Un contrôle indépendant des puissances active et réactive circulant entre le convertisseur et le réseau sera expliqué.

Le système de commande doit permettre de maintenir constante la tension du bus continu, et d'obtenir des courants sinusoïdaux au primaire du transformateur d'amplitude et de fréquence identiques à celles du réseau.

une puissance réactive nulle peut alors être imposée ($Q_{ref}=0$).

III.8. Régulation du bus continu par réglage du transit de la puissance active.

III.8.1 Régulation de la tension du bus continu.

Le réglage de la tension du bus continu est réalisé par une boucle externe. La transition de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Donc, la boucle de régulation externe permet de maintenir une tension constante au niveau du bus continu et de générer la référence du courant à injecter dans le condensateur (i_{cref}).

III.8.2 Modélisation du bus continu.

On obtient la tension du bus à partir de l'intégration du courant capacitif [27].

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot I_c \quad (\text{III.31})$$

Le courant du condensateur est :

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (\text{III.32})$$

Avec :

* i_{red} : courant redressé.

* $i_{ond} = i_{ch}$: courant de charge.

La tension de bus continu est modéliser par :

$$V_{dc} = \int \frac{dV_{dc}}{dt} + V_{dc}(t) \quad (\text{III.33})$$

Où :

$V_{dc}(t_0)$: est la valeur de la tension continue à l'instant initia

.

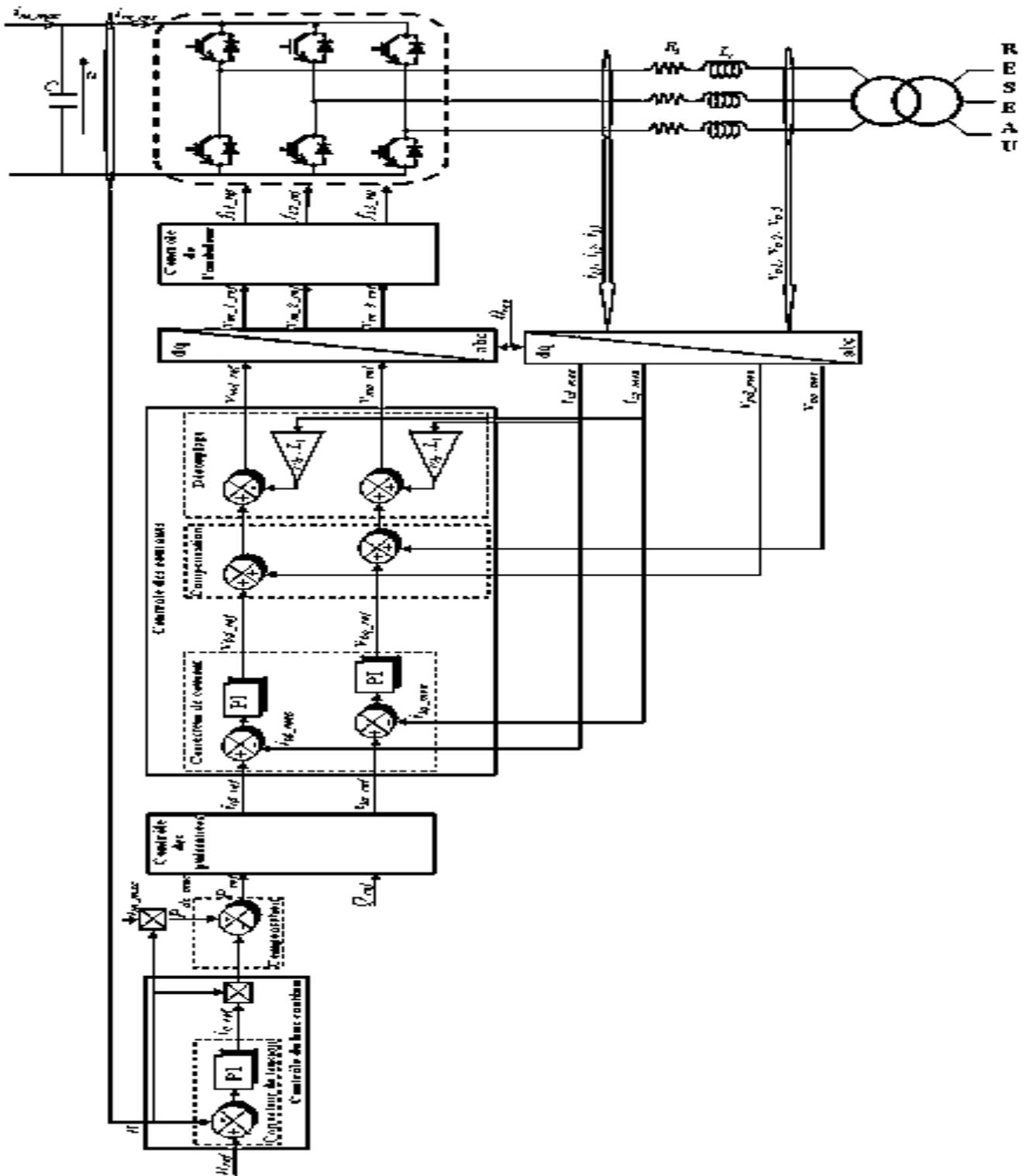


Figure III.9 : Représentation sous forme d'un schéma bloc du contrôle de la liaison réseau.

III.9. Résultats de simulation.

Les figures ci dessous représentent les résultats obtenus de cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux commandés par la stratégie triangulo-sinusoidale et une machine synchrone à aimants permanents.

la figure III.10 montre que tension du bus continu suit bien sa référence qui est 1500V.

les courants statoriques délivrés par le convertisseur coté réseau ont une forme sinusoidale, sont stables et similaires à ceux trouvés avec une alimentation continue parfaite

Figure III.11. Ainsi, le courant statorique I_s délivré par le générateur éolien est en opposition de phase par rapport à la tension V_s du réseau. Ceci confirme que le système éolien n'injette que la puissance active dans le réseau.

La tension à la sortie du convertisseur coté réseau est à deux niveaux où son amplitude dépend de la valeur de la tension du bus continu (Figure III.12).

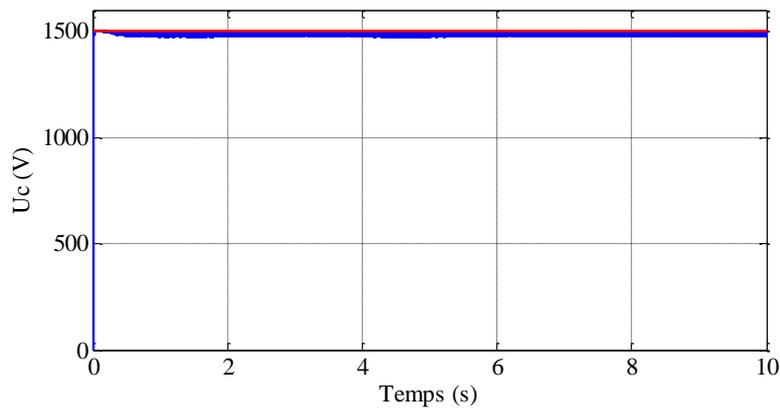


Figure III.10 : tension de bus continu.

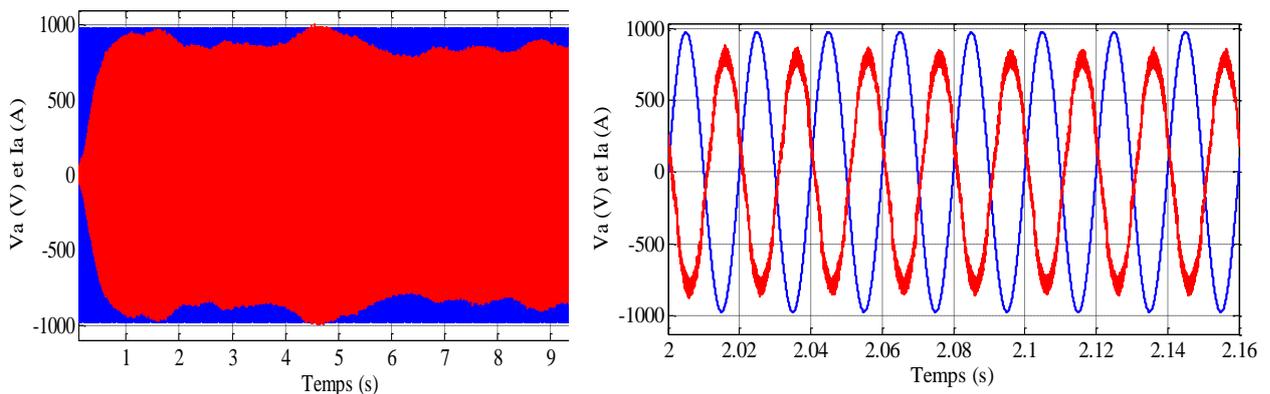


Figure III.11 : Courant généré par le convertisseur côté réseau et la tension d'une phase réseau avec Zoom.

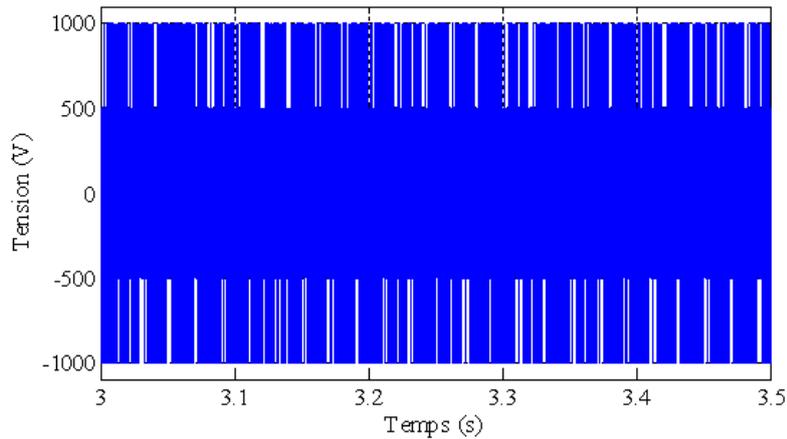


Figure III.12: Tension générée coté réseau.

III.10. Conclusion.

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation et la commande de la machine synchrone à aimants permanents fonctionnement génératrice. En basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine synchrone à aimants permanents est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Ainsi, les résultats obtenus par simulation s'avèrent satisfaisants, vu la stabilité des différentes grandeurs qui constituent la machine synchrone à aimants permanents. La modélisation du convertisseur à MLI à deux niveaux a été détaillée, son application nous a permis la régulation de la tension du bus continu à une valeur de référence désirée qui sera la source de tension pour le convertisseur coté rotor pendant le démarrage, et par la suite de générer des courants vers le réseau.

Conclusion générale

Dans le cadre de la réalisation du mémoire de master, nous avons choisi de travailler sur le thème de la production et conversion de l'énergie éolienne. Pour cela, nous avons pris pour objectif l'étude et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine de puissance (1.5 Mw) associée à une génératrice synchrone à aimants permanents.

Cet ensemble de conversion de l'énergie éolienne est complété par un dispositif d'électronique de puissance afin de transmettre l'énergie électrique produite vers le réseau. Cette étude est complétée par la mise en place des stratégies de commande nécessaires au bon fonctionnement de chaque partie.

Le premier chapitre a traité des généralités sur l'énergie éolienne en rendant compte de l'état actuel de l'exploitation mondiale de ce créneau énergétique. Puis nous avons parlé des différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Nous avons également traité les lois fondamentales permettant la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique.

Puis la comparaison entre les différentes génératrices utilisées dans ce domaine nous a permis de choisir de porter notre étude sur un système basé sur une machine synchrone à aimants permanents MSAP.

Dans le chapitre deux, nous avons modélisé la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude. et nous avons abordé les différentes techniques utilisés pour maximiser la puissance de la turbine. Quelques résultats de simulation ont été ensuite donnés.

Le chapitre trois a été consacré à la modélisation et la commande de la génératrice synchrone à aimants permanents, des équations électriques, magnétiques et mécanique régissant la MSAP ont été donné dans le repère (abc) le repère de Park et nous avons effectuer la commande vectorielle qui permet d'assimiler la MSAP à une machine à courant continu à excitation séparée afin de faciliter son étude et notamment sa simulation sous Matlab-Simulink, nous avons abordé le problème lié à la puissance électrique produite par la génératrice grâce à son entraînement par le vent. Nous avons élaboré une stratégie de commande de la puissance active variable, et une puissance réactive égale à zéro.

Enfin, on a effectué l'étude du redresseur MLI par la présentation de sa structure, son fonctionnement, ainsi que sa commande à MLI. Cette structure particulière du redresseur nous a permis d'avoir une tension parfaitement redressée quelque soient les fluctuations du vent. L'onduleur à MLI a la même structure que celle du redresseur étudié et nous a permis d'obtenir des tensions de phases de la fréquence désirée.

ANEXXE

I.1. PARAMETRES DE SIMULATION ET MODELISATION MSAP

La machine utilisée est une machine synchrone aimant permanent. De 1.5MW Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

Puissance nominale (Pn)	1.5 MW
Nombre des paires de pole (p)	125
Résistance statorique (Rs)	0.0081 Ω
Inductance cyclique du stator (Ls)	0.0012 H
Flux magnétique (\emptyset)	2.458 Web

I.2. PARAMETRES DE L'EOLIENE

La vitesse nominale (Vn)	12.5
Rayon (R)	35.25 m
Moment d'inertie de l'arbre (J)	1000 kg.m ²
Coefficient de Frottement visqueux (f)	0.0024
Densité de l'air (ρ)	1.225

I.3. PARAMETRES DE CONVERTISEURS COTE RESEAU

Résistance du filtre (Rf)	$5 \cdot 10^{-3} \Omega$
Inductance du filtre (Lf)	$0.002 \cdot 10^{-3} \text{ H}$
Capacité du bus continu (C)	4400 μF
pulsation du réseau (rd)	$\omega_{\text{res}} = 2 \cdot \pi \cdot 50$
La fréquence (f)	50HZ

I.4. La loi de Betz

La puissance incidente du vent est cinétique, dépend de la surface que le capteur éolien propose au vent, de la vitesse du vent et de la masse volumique de l'air, considérons l'éolien schématisé ; sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur, V_2 est en aval ; V est la vitesse du vent qui traverse l'aérogénérateur.

En supposant que:

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (1)$$

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

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (2)$$

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

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (3)$$

Soit en remplaçant 'm par son expression donnée dans l'équation (I-3), on trouve:

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (4)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse v_1 , la puissance mécanique totale P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{4} \quad (5)$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad (6)$$

Ceci a été dérivé la première fois par A. Betz, c'est pourquoi on l'appelle le " facteur de Betz " ou " limite de Betz ". Cette valeur est la valeur théorique maximale du coefficient de puissance, donc, l'efficacité théorique maximale qu'un convertisseur d'énergie éolienne peut avoir est 59,3%. Il est bien de mentionner que cette valeur du coefficient de puissance a été obtenue pour un idéal convertisseur de flux sans frottement

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Rachel Baïle**, « analyse et modélisation multifractales de vitesses de vent. Application à la prévision de la ressource éolienne », thèse de doctorat ; université de corse, 2010.
- [2] **Luc Moreau**, « modélisation, conception et commande de génératrices à reluctance variable basse vitesse », thèse de doctorat, université de Nantes ; 2005.
- [3] notre-plante.info
- [4] <http://www.windpower.org/fr/core.hm> .
- [5] Technique de l'ingénieur BM 4 640.
- [6] F.Poitiers. Etude et Commande de Génératrice Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne -Machine asynchrone `a cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [7] S.EL-Aimani. Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension, Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.
- [8] A. Boyette, « Contrôle – commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [9] J-C. Sabonnadière, « Nouvelles technologies de l'énergie 1 », Lavoisier, 2006.
- [10] **Farid Merrahi**, « alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne) » mémoire de magister, école nationale polytechnique, 2007.
- [11] D.J.Adams F.Z.Peng, J.W.Mckeever. Cascaded Multilevel Inverter for Utiling Applications, IEEE. 0-7803-3932-0, 2000.
- [12] P.Migliore E.Muljadi et K.Pierce. Control Strategy for Variable-Speed, Stall-regulated WindTurbines. American Conrols Conference, Philadelphia, PA, Juin 24-26, 1998.
- [13] Abdenour ABDELLI, " Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive ", Thèse doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, Octobre 2007.

- [14] **F. Kendouli, K.Abed, K.Nabti and H.Benalla**, "Modelling and control of a variable speed wind turbine driving doubly fed induction generator using three-level PWM converter," *International Journal of Renewable Energy Technology*, Vol. 3, No. 3, 2012, pp.276-294.
- [15] **Ameziane Sadek**, « implantation expérimentale de l'«mppt pour un système de génération hybride solaire-éolien », thèse de magister, université de Batna, 2009.
- [16] E. Muljadi, "Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation", *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 37, No 1, Jan./Feb. 2001.
- [17] Babak VASEGHI, " Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre -spires : modélisation- réduction du courant de défaut ", Thèse doctorat, Nancy Université - Institut National Polytechnique de Lorraine, Décembre 2009.
- [18] M.Yin, G.Li, M. Zhou, C.Zhao, << Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration >>, *Power Engineering Society General Meeting*, June 2007, pp 1-6.
- [19] Mark Z. JACOBSON, " Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security ", *Energy & Environmental Science*, 2009
- [20] Babak NAHID MOBARAKEH, " Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification 'en ligne' des paramètres ", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine. Décembre 2001.
- [21] M. Chinchilla, S. Arnaltes, J. Carlos Burgos, " Control of Permanent Magnet Generators Applied to Variable-Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid ", *IEEE Transaction on energy conversion* vol 21, n°, 1, Mars 2006.
- [22] Ludovic Leclercq, " Apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes ", thèse de doctorat, Université de Lille, Décembre 2004.
- [23] Arnaud Davigny, " Participation aux services système de la fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergies ", Thèse doctorat, Université sciences

et techniques de Lille. Décembre 2007.

[24] F. Kendouli et al. , «Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation». *Revue des Énergies Renouvelables* Vol. 14 N°1 (2011) 109 - 120, Algérie.

[25] M. A. E. Alali, *Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électrique basse tension*, Thèse (2002), Université Louis Pasteur - Strasbourg 1, France.

[26] M. Malinowski, *Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers*, Thesis (2001), Warsaw University of Technology, Poland.

[27] L. Leclercq. Apport du stockage inertiel associé des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes, Thèse de doctorat. Ecole doctorale sciences pour l'ingénieur, Université des Sciences et Technologie de Lille, 2004