RépubliqueAlgérienneDémocratiqueEtPopulaire

MinistèreDeL'EnseignementSupérieur EtDeLaRechercheScientifique

UNIVERSITE Dr YAHIA FARES DE MEDEA

جامعة الدكتور يحيى فارس

Faculté de Science et Technologie

Département Génie De La Matière

Mémoire de FinD'Etude Pour L'obtention du Diplôme

MASTER en Génie Mécanique

Option : Mécatronique

Thème

==========

Étude, Modélisation et Simulation D'un Système Éolien A Base de MADA

==========

Réalisée Par :

* BOURGHAIA Rachid
* TAIBI Karim

Promoteur :

Pr : ABUDURA Salam

CO.pr :Dr : Belhadj Abd Elmoneim

Juin2016

Remerciements

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à ALLAH pour nous avoir donné le courage, et la patience à fin de terminer ce travail.

Notre gratitude est désigné a nos parant qui nous ont pleinement encouragé par leurs soutien, et sacrifier leurs vie pour notre réussite.

Et également a notre promoteur ABUDURA SALAM pour nous avoir encadrés et orientés tout au long de ce travail, sans oublier les membres de jury qui ont accepté d'examiner notre travail.

Nous adressons aussi nos remerciements à nous familles pour toute l'aide, qu'elles nous ont apportées tout le long de nos études.

Nous remerciements sont aussi présentés à tous les professeurs qui nous ont enseignée au coure de tout nos études.

ET bien sur, merci à tous nos amis avec qui nous avons gardé des souvenirs très agréables et des bons moments vécus ensemble.

Finalement, un grand merci à toute la promotion de la mécatronique, tout en leurs souhaitons un avenir plein de réussite.

Karim et Rachid

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, pour leur soutien moral et leurs encouragements, leurs sacrifices et leurs courages dans la vie et je le dédie également à ma plus belle femme pour leur soutien, à ma belle sœur et surtout et spécialement à mon beau fils **Adem Sadjed**

Je le dédie également à tous mes frères et leurs familles, Je le dédie aussi a mes amis, Amin, zaki, houalem, bertali... et a mon ami et mon binôme Karim et ça famille, Et a toute Person qui me connais de prêt ou de loin.

Rachid

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, pour leur soutien moral et leurs encouragements, leurs sacrifices et leur courage dans la vie et je le dédie également à ma plus belle femme pour leur soutien, à mes belles sœurs et surtout et spécialement à ma belle fille NESSERINE

Je le dédie également à tous mes frères et leurs familles Je le dédie aussi a mes amis, Amin, zaki, houalem, hertali... et a mon ami et mon binôme rachid et ça famille, Et a toute Person qui me connais de prêt ou de loin.

Karim

Résumé

Le développement des systèmes de l'énergie éolienne a un double impact (positif et négatif) sur l'environnement.

Sur le coté positif, l'énergie éolienne est généralement considérée comme ami de l'homme et de son environnement, spécialement quand les effets des émissions à partir des centrales électriques et industrielles conventionnelles de grandes échelles sont considérées.

L'objectif principale de la recherche réaliser dans ce mémoire est d'étudier les différents technologies injectée dans les éoliennes et de modéliser et simuler une éolien introduit dans un réseau électrique a moyenne tension, la technologie utilisée est basé sur une machine asynchrone a double alimentation(MADA).

MOTS CLES : Éolien, MADA, le vent, simulation, machine, modèle, puissance active, puissance réactive, générateurs, redresseur AC, convertisseur CC, Bus

ملخص :

تطوير أنظمة طاقة الرياح لها تأثير مزدوج على البيئة (الإيجابية والسلبية).

على الجانب الايجابي، تعتبر طاقة الرياح عموما كصديق للإنسان وبيئته، وخاصة عند الأخذ بعين الاعتبار تأثير الانبعاثات من محطات الطاقة التقليدية وعلى نطاق واسع الصناعي.

الهدف الرئيسي من البحث الذي أجري في هذه المذكرة هو دراسة التقنيات المختلفة , المحقونة في التور بينات ,نمذجة ومحاكاة عنفة رياح , لتغذي شبكة كهربائية متوسطة الجهد، والتكنولوجيا المستخدمة فيها ويستند على الة غير متزامنة لديها ازدواجية التغذية (MADA).

Abstract

The development of wind energy systems has a double impact (positive and negative) on the environment.

On the positive side, wind power is generally regarded as a friend of man and his environment, and especially when the effect of emissions from conventional power plants and industrial large scale are considered.

The main objective of the research carried out in this thesis is to study the different technologies injected into the turbines and to modeling and simulate a wind power fed into a power grid has medium voltage, the technology used is based on an asynchronous machine has dual feed (DFIG).

Sommaire :

INTRODUCTION GENERALE……1

I Chapitre 1

I.1 INTRODUCTION……..…3

I.2 PRESENTATION DE SYSTEME HYBRIDE…….……..…4

I.2.1 Etat de l'art sur le système hybride de génération d'énergie…….4

I.2.2 Les principaux composants d'un système SH……...5

I.2.2.1 Le générateur éolien……..……5

I.3.2.2 Le générateur photovoltaïque……..……..……7

I.3.2.3 Générateur diesel……..…….8

I.3.2.4 Batteries de stockage……...……..9

I.3.2.5 Système de supervision……...……..9

I.3.2.6 Les convertisseurs……..……..10

I.3.2.7 Les charge……...…….10

I.4 STRUCTURE DES SYSTEMES HYBRIDES……..……11

I.4.1 Système hybride à base d'énergies renouvelables primaire seulement……...…….…11

I.4.2 Système hybride à base d'une ou plusieurs énergies renouvelables avec unité de secours….12

I.4.3 Système hybride à base d'énergie renouvelable avec un système de stockage…….….12

I.5 ARCHITECTURE DES SYSTEMES HYBRIDES……...…….13

I.5.1 Architecture à bus CC……..…..…13

I.5.2 Architecture à bus CC /CA……..…..13

I.6 CLASSIFICATION DES SYSTEMES HYBRIDES……...……14

I.7 PROBLEMES RENCONTRES DANS LE FONCTIONNEMENT DES SH……15

I.8 CONCLUSION……...……18

II Chapitre 2

II.1 INTRODUCTION……..……...19

II.2 LE GROUPE DIESEL……..……...……20

II.2.1 Groupe diesel fonctionnant à vitesse fixe……..……..20

II.2.2 Groupe diesel fonctionnant à vitesse variable…….……21

II.3 DIMENSIONNEMENT DU GROUPE DIESEL……...21
II.4 CONSTITUTION DU GROUPE DIESEL……...22
II.4.1 Le moteur diesel……..23
II.4.1.1 Définition……...23
II.4.1.2 Modèle simplifié du moteur diesel……..……..24
II.4.2 La machine synchrone à aimant permanant……25
II.4.2.1 Le stator…….25
II.4.2.2 Le rotor……..……..…25
II.4.2.3 Modèle simplifié de la MSAP……..….26
II.5 MODELISATION DU GROUPE ELECTROGENE DIESEL…….28
II.5.1 Modélisation du moteur diesel…….....28
II.5.2 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanant…….……29
II.6 CONTROLE DE TENSION ET DE FREQUENCE POUR LE GD……30
II.7 SIMULATION DU GROUPE ELECTROGENE……...……...…32
II.8 CONCLUSION…….35

III Chapitre 3

III.6.1. Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique…..44
III.6.2. Les éoliennes à vitesse fixe. ……..44
III.6.3. Intérêt de la vitesse variable……..……45
III.6.4. Eoliennes à vitesse variable commandées par le stator……...……47
III.6.5. Eolienne vitesse variable à base de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) ……...……48
III.6.5.1.Structure de la MADA……..……49
III.6.5.2.Modes de fonctionnement de la MADA……49
III.7Conclusion……...……..51

IV Chapitre 4

IV.1 INTRODUCTION……52
V.2 PRESENTATION DE LA CONFIGURATION CHOISIE……52
IV.2.1 Méthodologie adoptée……...……53
IV.2.2 Présentation du site et caractéristiques de la charge……53

IV.2.2.1 L'emplacement choisit.……..…….53
VI.2.2.2 L'emplacement du système hybride……..……53
IV.2.2.3 Caractérisation de la charge et Prédétermination du profil énergétique…….54
IV.2.2.4 Chargement primaire……54
IV 2.3 Potentiel éolien……..56
IV.3 Dimensionnement des sources……56
IV.3.1 choix d'éolienne……...57
IV.3.2 choix de générateur diesel……57
IV.4 APPLICATION DU LOGICIEL HOMER POUR L'OPTIMIZATION……....…57
IV.4.1 Présentation de l'outil de simulation.……57
IV.4.2 Construction de système hybride de génération d'énergie……..…58
IV.5 Interprétation des résultats……...59
IV.5.1 Analyse du comportement dynamique du SEH……....59
IV.5.1.1 Variation climatique (vent) ……..60
IV.6.1.2. Variation de la charge……..……63
IV.7 CONCLUSION ……....…64
Conclusion Générale……..…..65
ANNEXES……..…..67

Liste des figures

Figure I-1*Éolienne à axe vertical*……...…4

Figure I-2*Éolienne à axe horizontal*……...…5

Figure I-3*Principales composants de l'éolienne à axe horizontal*…….6

Figure I-4 *vitesse du vent et vitesse tangentielle en bout de pales*……9

Figure I-5 *Coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types de turbines*……..……10

Figure I-6*Système éolien basé sur la GS pour un fonctionnement à vitesse variable*…….….12

Figure I-7*Système éolien basé sur la génératrice asynchrone à cage à vitesse constante*…...13

Figure I-8*Système éolien basé sur la génératrice asynchrone GADA à vitesse variable*…….14

Figure I-9 *Structure de la GADA à rotor bobiné*……...…16

Figure I-10*structure de Scherbius avec convertisseurs MLI*……17

Figure I-11 *Bilans simplifiés des transferts d'énergie dans une machine à doublealimentation lorsque la vitesse varie de la moitié au double de Ω [12]*……...…19

Figure II-1*Structure du système de génération éolienne à base de MADA*……21

FigureII-2*Simulation de profil de vitesse du vent*…….....22

FigureII-3*Coefficient de puissance C_p en fonction du ratio de vitesse spécifique λ*……....24

FigureII-4 *Tube de courant autour d'une éolienne*……...…25

FigureII-5 *Coefficient de puissance*……...……..26

FigureII-6 *Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction De la vitesse du vent*….28

FigureII-7*Schéma équivalent simplifié d'une phase de la MAS ramené au stator*……...28

FigureII-8*Transformation du schéma équivalent*……...…29

Figure II-9*Caractéristique F (ω_s)*……...30

FigureII-10*Caractéristique G(ω_s)*…….…..…30

FigureII-11 *Connexion de deux convertisseurs de puissance à travers un bus à CC* ……..…31

FigureII-12 *Modélisation du bus CC*…..……..…32

FigureII-13 *Principe de commande mécanique à pas variable d'une turbine*……..…...…33

FigureII-14 *Fonction d'appartenance des entrées et sortie du contrôleur de position du système « Pitch Control »* …….…….…..34

FigureII-15 *Schéma bloc de la stratégie d'estimation de la vitesse du vent*……..…...35

FigureII-16 *Schéma bloc de la stratégie MPPT FL proposée*……..35

FigureII-17 *Schéma bloc de la stratégie d'estimation de la vitesse du vent*……..……...36

Figure III-1 *Structure du système éolien*…….....…39

Figure III-2 *Block de l'éolienne sous SimPowerSystem*……...…40

FigureIII-3*paramétrage d'une turbine éolienne utilisantle modèle sous SimPowerSystem*……..40

FigureIII-4 *Paramètres de la turbine éolienne sous SimPowerSystem*……...….41

Figure III-5 *Caractéristiques de turbine et caractéristique de Cheminement*……...…41

Figure III-*6* *paramètres de la génératrice sous SimPowerSystem*….....42

Figure III-7 *Paramètres du convertisseur turbine éolienne sousSimPowerSystem*.....42

Figure III-8 *Paramètres du système de contrôle de turbine éolienne sous SimPowerSystem*.…43

Figure III-9 *Bloc de simulation de système éolienne*……...….43

Figure III-10 *vitesse de vent décroissant en (m/s)*……..44

Figure III-11 *la puissance active en (MW)*……45

Figure III -12 *Vitesse de rotation de la turbine en (tr/min)*……45

Figure III-13 *couple mécanique en(N.m)*……46

Figure III-14 *Angle d'orientation (B) en dégrée*……46

Figure III-15 *La tension en(V)*……47

Figure III -16 *Perturbation de tension en(V)*……47

Figure III-17 *vitesse de vent décroissant en (m/s)*……48

Figure III -18 *la puissance active en (MW)*……..48

Figure III-19 puissance réactive……...49

Figure III-20 *vitesse de rotation de la turbine en (tr/min)*……..……49

Figure III -21 *couple mécanique Té (N/m)*……..……*50*

Figure III -22 *angle d'orientation*……...50

Figure III -23 *la tentions développer par la MADA (V)* ……51

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Avantages et inconvenants des différentes éoliennes.....…….....16

Tableau II-1 : Règles d'inférence du régulateur flou utilisé pour le contrôle de la position des pales « Pitch Control»…… ……..33

Liste des symboles :

I_{ins} la pénétration instantanée

P_{rw} la puissance éolienne

P_{ch} la puissance électrique de la charge

I_{moy} la pénétration moyenne (mesurée pendant des jours, des mois ou même des années).

W_{rw} l'énergie éolienne

W_{ch} l'énergie consommée par la charge principale

E_c l'énergie cinétique

V la vitesse

M une masse d'air

S une surface

ρ la masse volumique de l'air

P_v la puissance incidente

P_m la puissance du vent

λ la vitesse réduite

R le rayon de la voilure

Ω la vitesse de rotation

C_p coefficient de puissance

C_c le coefficient de couple

G glissement

f.e.m force électromotrice

E_r force électromotrice rotorique

E_s force électromotrice statorique

N_r nombre de spires des bobinages rotorique

N_s nombre de spires des bobinages statorique

ω_{mec} vitesse mécanique

ω_s vitesse synchronisme

I_r courant rotorique

I_s courant statorique

S_r puissance apparente rotorique

S_s puissance apparente statorique

K coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)

N nombre de conducteurs d'une phase de la machine

Φ Flux maximum à travers un enroulement [Wb]

N_s vitesse de rotation [rpm]

K' constante globale (caractéristique de la machine)

E_g force électromotrice à vide

V tension

R_g résistance de l'enroulement

L_g inductance synchrone

T_d le couple mécanique sur l'arbre

T_{em_g} le couple électromagnétique

θ Angles du champ tournant et du positon du rotor par rapport au stator

.

Introduction Générale

Introduction Générale

De la même façon que le vent actionnait les pales des moulins à eau ou à blé, le vent peut actionner les pales d'une hélice et ainsi entraîner un système équivalent à une dynamo appelée aérogénérateur. L'ensemble « pales + aérogénérateur » est plus particulièrement appelé « éolienne » (du grec Éole, dieu du vent) ou système éolien est correspond à une haute tour (le vent soufflant davantage en hauteur) en béton ou en métal, au sommet de laquelle tourne une hélice (généralement de 30 à 40 mètres de diamètre) comportant trois pales généralement ou plus, D'ailleurs, le diamètre de l'hélice se doit d'être important du fait que la puissance théorique d'une éolienne croît proportionnellement au carré du diamètre des pales et au cube de la vitesse du vent , Aussi, l'électricité éolienne est l'une des énergies renouvelables les plus prometteuses et pour cause puisqu'elle est également la moins coûteuse des énergies renouvelables.

De nos jours, l'énergie éolienne est devenue une solution valable pour la production d'énergie, en complément des autres sources d'énergie renouvelables ou non renouvelables , L'utilisation de cette énergie n'a aucun effet néfaste pour l'environnement. Ceci fait d'elle une énergie propre qui est une réelle alternative au problème de gestion des déchets nucléaires et aux émissions de gaz à effet de serre. Les éoliennes représentent également une chance pour plus de deux milliards de personnes isolées au monde d'accéder enfin à l'électricité. De plus, peu coûteuses à long terme, elles sont une véritable possibilité d'économie au vue de la consommation croissante en énergie, et depuis l'antiquité les hommes ont exploités l'énergie éolienne sur différentes formes et pour plusieurs applications. Après l'utilisation de moulin à vent la technologie des capteurs éoliens n'a cessé à se développer. Elle a connait un essor fort d'exploitation ses dernies années. Cependant la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature, ces expériences n'étaient pas toujours concluantes. Mais après le premier choc pétrolier, d'importants investissements ont été consacrés à la recherche et au développement des éoliennes [18]. L'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité a alors pris un essor considérable, notamment depuis la fin des années 80. En 1997. La puissance mondiale générée par les éoliennes a touché les 7GW, ce qui est passé à 121GW en 2008 [19] et environ les 576MW fin 2011 pour les petites éoliennes installées dans le monde entier [20]. Selon les statistiques la capacité éolienne installée dans le monde a touché le 273GW fin 2013.

Pour notre pays, l'Algérie s'engage sur la voie des énergies renouvelables afin de trouver des solutions globales au niveau de problématiques concernant la préservation de ressources énergétiques d'origine fossiles. Un programme algérien a été lancé dans un premier temps de l'installation de la première ferme éolienne d'une puissance de 10MW. Aussi deux fermes éoliennes de 20MW sont réalisées entre 2014 et 2015. Cependant des études seront menées pour détecter les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2016-2030[19].

Chapitre I

Généralité sur les éoliennes

I -1.INTRODUCTION :

Ce chapitre comportera des généralités sur les éoliennes. Divisé en quatre parties, la première suivra l'évolution de l'utilisation de la force éolienne dans l'histoire. Dans la deuxième partie, nous définirons brièvement le concept de la machine. La troisième partie sera consacrée à la classification des éoliennes selon leur axe de rotation, les différents composants d'une éolienne à axe horizontale ainsi qu'aux différents domaines d'applications des éoliennes. La dernière partie quant à elle, comprendra la définition des différentes caractéristiques de l'énergie éolienne.

I-2.HISTORIQUE :

L'utilisation de la force du vent pour suppléer l'énergie humaine ou animale n'est pas nouvelle. La première utilisation de l'énergie éolienne, et sans doute la plus simple, a été la propulsion des bateaux à voiles. Cette énergie aidait le bateau à avancer et remplaçait l'énergie des galériens.

En moyen âge, les Perses furent les premiers à utiliser des éoliennes très simples à axe vertical pour irriguer leurs cultures et aider au meulage du grain. Ce type d'éoliennes va se répandre dans tout le monde arabe puis dans l'occident suite aux croisades.

Au 16ème siècle, elles ont été utilisées pour pomper de l'eau et couper le bois. En 1891, le danois Poule La Cour inventa le premier aérogénérateur qui a pour but de produire de l'électricité. Aux débuts du 20ème siècle, a été marquée par la conception de la première éolienne à axe verticale, même si la puissance générée restait assez faible. Il faut attendre jusqu'à 1957 pour que la puissance atteigne les 200kW par le constructeur Danois Gedser. Mais ce n'est qu'après le premier choc pétrolier en 1973, quand les pays exportateurs de pétrole ont diminué leurs exportations que de nombreux pays se sont lancés dans le marché éolien.

Actuellement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement [9].

I-3. DEFINITION :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent, c'est-à-dire le fluide en mouvement, en énergiemécanique. Cette dernière est disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments dont la nacelle, le mât, les pales et le multiplicateur, doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative plus au moins stable à l'énergie nucléaire et d'autres d'origine fossile. Sans pour autant, prétendre à les remplacer de nos jours si nous prenons en compte l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite qui est largement plus faible. Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer. Ces dernières donnent naissance aux fermes éoliennes offshores, où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

I-4. LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES :

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

I-4.1. Les éoliennes à axe vertical :

Ces éoliennes ont un axe de rotation à la verticale du sol et presque perpendiculaire à la direction du vent. Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est identique à celui d'un anémomètre : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes.

Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine.

En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable (gradient de vent, turbulence due aux accidents du terrain en amont de la machine). Ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine. Par ailleurs, le principe même de fonctionnement, basé sur des variations incessantes de

charge aérodynamique sur les pales, fait que ces éoliennes sont très sujettes aux problèmes d'aéroélasticité.Enfin, pour des Éoliennes de grande puissance, la surface occupée au sol par le haubanage est très conséquente [9]. Les deux plus importantes conceptions d'éoliennes à axe vertical sont : Darrieus et Savonius



Figure I-1Éolienne à axe vertical

I-4.2. Les éoliennes à axe horizontal :

Ces éoliennes ont leur axe de rotation à l'horizontale du terrain mais aussi presque parallèle à la direction du vent. La majorité des éoliennes présentes dans le marché appartiennent à cette catégorie [9]. Même si elles nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, elles présentent néanmoins un rendement aérodynamique plus élevé. De plus, elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant 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, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Par contre, elle rond sa conception plus complexe mais aussi plus coûteuse [9].



Figure I-2Éolienne à axe horizontal

I-5.PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE A AXE HORIZONTAL :

On présente les différents composants d'une éolienne à axe horizontal étant le sujet de notre étude (Figure I-3) [10].

1- Pales en composite fibre de verre. Pas fixe, profil de type stal (décrochage aérodynamique). Freins aérodynamiques d'extrémité pivotants. 2- Moyeu du rotor en fonte.

3- Structure de la turbine en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.

4- Paliers du rotor à double rangée de billes.

5- Arbre lent du rotor en acier haute résistance.

6- Multiplicateur de vitesse à 3 étages (1 train épicycloïdal et 2 trains parallèles).

7- Frein à disque sur l'arbre rapide avec témoin d'usure. 8- Accouplement avec la génératrice de type flexible. 9- Génératrice asynchrone de (1500kW).

10- Radiateur de refroidissement intégré au système multiplicateur - génératrice.

11- Système de mesure du vent (anémomètre et girouette) transmettant les signaux au système de contrôle de la turbine.

12- Système de contrôle surveillant et pilotant la turbine.

13- Système hydraulique pour les freins d'extrémité de pale et le système d'orientation.

14- Entraînement d'orientation de la tourelle à deux trains d'engrenages planétaires entraînés par des moteurs alimentés à fréquence variable.

15- Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque.

16- Capot de la nacelle en structure acier recouverte de composite fibre de verre.

17- Tour en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles).

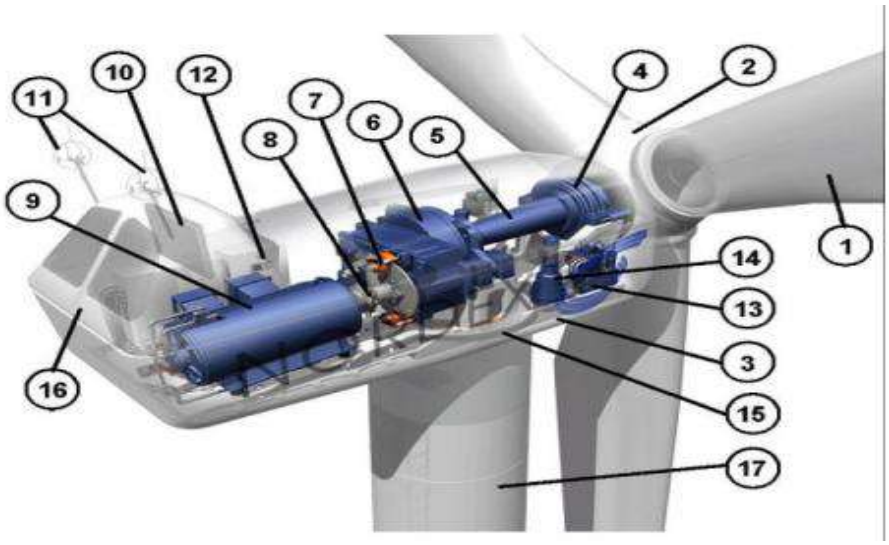


Figure I-3 Principales composants de l'éolienne à axe horizontal

I-6.APPLICATIONS DES EOLIENNES :

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation tout en tenant compte du rendement de la machine. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- Soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- Soit pour entraîner une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration:

- L'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
- L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne. D'une part, la complémentarité avec les moyens traditionnels de production, comme les centrales thermiques classiques ou nucléaires et les barrages pour des régions disposant d'une infrastructure existante. D'autre part, la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement. Comme pour l'alimentation d'unités de désalinisation, la cogénération avec des groupes diesels et des panneaux photovoltaïques [9].

I-7.POTENTIEL ENERGETIQUE :

Compte tenu des nécessités de conversion de l'énergie cinétique due au vent en énergie mécanique, le potentiel éolien disponible subit une succession de pertes, jusqu'à la sortie de l'aérogénérateur [9]. Ainsi, seule une partie de la puissance éolienne disponible sur un site donné est réellement obtenue en fin de processus.

I-7.1. Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique :

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur la turbine éolienne puis en énergie électrique via un aérogénérateur.

En effet, si nous considérons une masse d'air m, qui se déplace avec la vitesse v,

l'énergie cinétique de cette masse E_c est [9] :

$$E_c = m\ (1/2)\ V^2 \quad \text{(1.1)}$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être entièrement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface *S*, située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent. La puissance instantanée fournie serait :

$$P = 1/2 \rho S V^3 \quad \text{(1.2)}$$

Où ρ est la masse volumique de l'air.

La puissance qui peut être fourni par une éolienne est en fonction de trois principaux paramètres : l'énergie éolienne disponible, la courbe de puissance de la machine ainsi que la capacité de l'aérogénérateur à réagir aux fluctuations du vent.

I-7.2.Le coefficient de puissance :

Parce que la vitesse en aval du dispositif de récupération n'est jamais nulle, la puissance ne peut être captée en sa totalité [9], le dispositif de conversion extrait une partie seulement P_m de la puissance incidente P_v.

Ainsi, la puissance P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime comme suit :

$$P_m = ½\ \rho \pi R^2 V^3 C_P(\lambda) \quad \text{(1.3)}$$

Le coefficient C_p est une grandeur variable inférieure à 1, dit aussi rendement. *Ce* dernier est propre à chaque éolienne qui lie la puissance fournit par l'éolienne P_m est la puissance du vent disponible à l'entrée de la voilure par la relation suivante. :

$$C_P = P_m / P_v \quad \text{(1.4)}$$

I-7.3.Le coefficient de vitesse réduite :

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, une grandeur spécifique est utilisée, dite la vitesse réduite λ. Elle représente le rapport entre la vitesse tangentielle en bout de pales de la turbine et de la vitesse du vent (Figure II-4). Ainsi, la vitesse réduite est donnée par la relation suivante :

$$\lambda = \Omega R / V \quad \text{(1.5)}$$

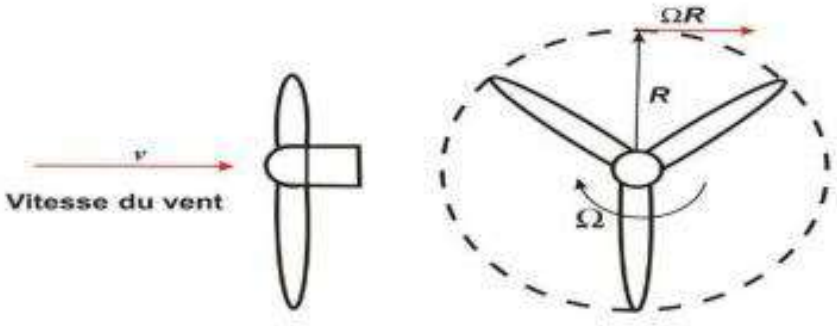


Fig. I-4 : vitesse du vent et vitesse tangentielle en bout de pales

Avec R le rayon de la voilure et Ω la vitesse de rotation.

I-7.4. Limite de Betz :

On peut estimer la valeur maximale de ce rendement, par la formule de Betz [9]. Cette dernière démontre qu'indépendamment du modèle de turbine, seuls 16 / 27^{ièmes} (59 %) de l'énergie cinétique du vent peuvent être transformés en énergies mécanique. Représentant ainsi la puissance maximale qui peut être récupérée par une éolienne. C'est la valeur maximale de ce coefficient qui correspond à la limite dénommée limite de Betz du coefficient de puissance.

$$C_p = 16/27 = 0.593 \quad (1.6)$$

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 réduite C_p.

I-7.5. Classement des types d'éoliennes en fonction du coefficient de puissance :

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend aussi de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse réduite λ.

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (1.7)$$

Ainsi, et sur le plan aérodynamique, nous pouvons comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite λ comme donné dans la Figure I-5.

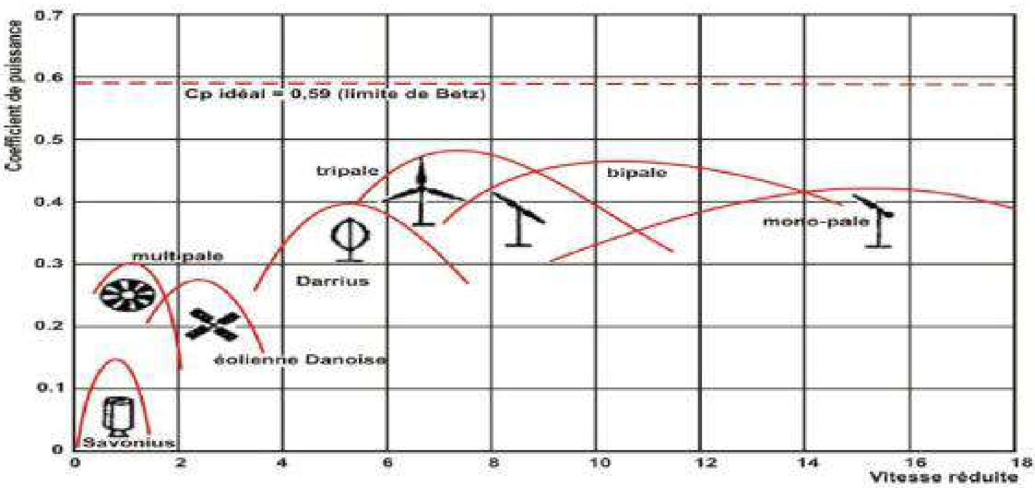


Fig.I-5 : Coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types de turbines [9]

On remarque en tout premier lieu que les éoliennes à axe horizontal, dites à vitesse rapide, possèdent potentiellement un rendement plus important que les autres formules. Ceci explique leur domination dans le marché des machines actuelles, où la courbe du coefficient de puissance atteint son maximum pour une gamme de λ comprise entre 5 et 15.

Dans un premier temps, le coefficient de puissance augmente avec la vitesse réduite. Il atteint un maximum pour une certaine valeur de λ puis diminue même avec une augmentation de la vitesse réduite. Ces variations de $C_p\ (\lambda)$ restent bien en dessous de la limite de Betz.

Elles dépendent de plusieurs propriétés aérodynamiques, mais essentiellement de plusieurs éléments dans la conception du rotor, notamment, dans le nombre de pales utilisées. On remarque aussi que pour une éolienne tripale, le coefficient de puissance est maximal pour λ=7, c'est-à-dire une vitesse périphérique en bout de pale égale à 7 fois la vitesse du vent. C'est pour une telle vitesse réduite que l'on maximise le rendement aérodynamique. Il est à noter aussi, qu'a diamètre et vitesse de vent donnés, une bipale devra avoir une vitesse de rotation bien plus élevée qu'une tripale, Par contre, en utilisant le coefficient de couple C_C, défini par la relation :

$$C_p = \lambda C_c \qquad (1.8)$$

On comprend tout l'intérêt des petites machines. Ainsi, et pour des λ très faibles, elles possèdent intrinsèquement un couple très important. Dans ce cas, la présence d'un nombre important de pale contribue à la création du couple de démarrage et ce, avec très peu de vent.

Par contre, dès que le vent se renforce, leurs caractéristiques de couple et de puissance s'effondrent rapidement [9].

I-8 GENERATEURS :

Actuellement la production de l'électricité est l'application la plus fréquente des turbines éoliennes. Et donc l'utilisation d'une machine électrique est indispensable. Différents types de machines électriques peuvent être utilisées pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de la machine pour chaque application.

En général la génératrice asynchrone à cage d'écureuil occupe la grande partie des installations des éoliennes avec ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs la rende appropriée pour l'utilisation en conversion éolienne [13]. On va entamer les différentes génératrices qui rentrent dans le mécanisme d'une conversion d'énergie par les turbines éoliennes, et par la suite on s'intéresse aux génératrices utilisées dans des petites installations orientées pour alimenter des sites isolés.

I-8-1 La génératrice synchrone :

C'est une machine qui offre des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elle peut être utilisée en entraînement direct sur les voilures éoliennes. Le circuit d'excitation de son inducteur demande la présence du réseau et une fourniture d'une puissance réactive. Les sites isolés ne sont pas adaptés à ce type de génératrice qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante, c'est le cas du travail présenté en [20] par *H. Benalla* et *al* dans le cadre d'une étude de modélisation et de commande d'une machine synchrone à aimant permanant associée à une chaîne de conversion d'énergie éolienne de petite taille pour les sites isolés ; un autre travail en [21] présente une modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance par l'utilisation aussi d'une MSAP, l'ajout des bagues et balais pour un système possédant un type de MSAP provient un entretien régulier. Par contre la possibilité de réglage de l'inducteur de cette machine offre un moyen supplémentaire d'ajustement du point de fonctionnement énergétique. L'électronique de puissance s'impose pour toutes les applications qui utilisent ce type de machine qui sont donc à vitesse variable [17].

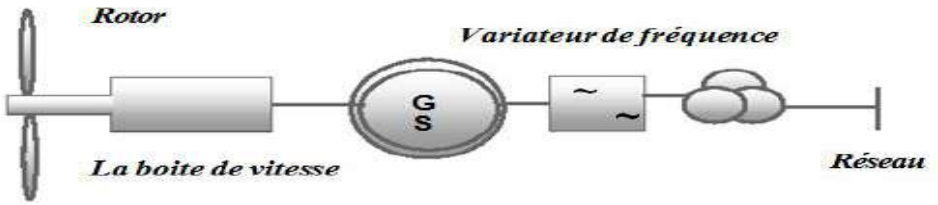


Figure I-6 Système éolien basé sur la GS pour un fonctionnement à vitesse variable

I-8-2 La génératrice asynchrone :

Le faible coût et la standardisation de machine asynchrone qui ne nécessite pas une complexité d'installation à conduit à une très large domination de ce type de génératrices jusqu'à des puissances dépassant les mégawatts. Elle est souvent associée à une batterie de condensateurs et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau [14]. Elle est moins exigeante en termes d'entretien et présente un taux de défaillance très peu élevé. Dans l'aérogénérateur de dimension conséquente, la vitesse de rotation est peu élevée. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

Dans la littérature plusieurs travaux de recherches ont été appliqués pour l'étude de la conversion d'énergie éolienne en utilisant la machine asynchrone comme génératrice.
Dans [22] *K. Idjdarene* a étudié le contrôle de la tension à la sortie d'une génératrice asynchrone connectée à un convertisseur statique dans le cas d'alimentation d'un site isolé, aussi bien et dans [19] l'auteur présente l'ensemble des travaux effectués pour l'utilisation des machines asynchrones pour des systèmes éoliens.

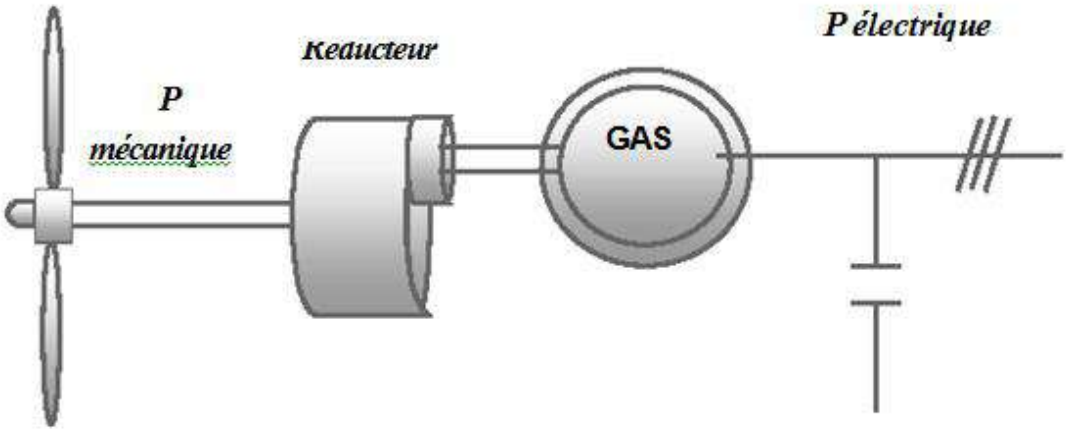


Figure I-7 Système éolien basé sur la génératrice asynchrone à cage à vitesse constante

I-8-3 La génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) :

Pour des grandes puissances ils existent des générateurs asynchrones capable de fonctionner à vitesse réglable, les avantages qui les mise en faveur en comparaison avec des générateurs à vitesse fixe sont :[23]

- une réduction des contraintes mécaniques à cause d'inertie stockée dans la turbine, un phénomène qui crée une élasticité permet de réduire les pulsations du couple.
- une qualité d'alimentation améliorée à cause de la réduction de la pulsation du couple qui empêche à éliminer les variations de puissance.
- une efficacité du système ou la vitesse de la turbine est réglée en fonction de la vitesse du

Vent pour maximiser la puissance en sortie.

- une commande plus simple avec une simplicité de la construction du système, à voir que Pour des vitesses du vent trop faible, l'angle d'inclinaison est généralement fixe et un contrôle de l'angle de tangage est effectué uniquement pour limiter la puissance de sortie.

La machine asynchrone à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone, c'est une solution à vitesse variable. La machine asynchrone à double alimentation MADA à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants, ce qui diminue légèrement leur robustesse ; mais cette machine est un peu plus complexe que l'ancienne machine car elle nécessite un multiplicateur de vitesse [19]. Cette éolienne permet également

de contrôler la puissance réactive et de contribuer ainsi à la tenue de la tension si nécessaire.

Dans [16] l'auteur présente une modélisation et un contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation pour les fortes puissances. Les résultats de l'étude favorisent l'utilisation de cette installation pour un mode de fonctionnement avec un redresseur et une batterie de stockage pour une énergie emmagasiné.

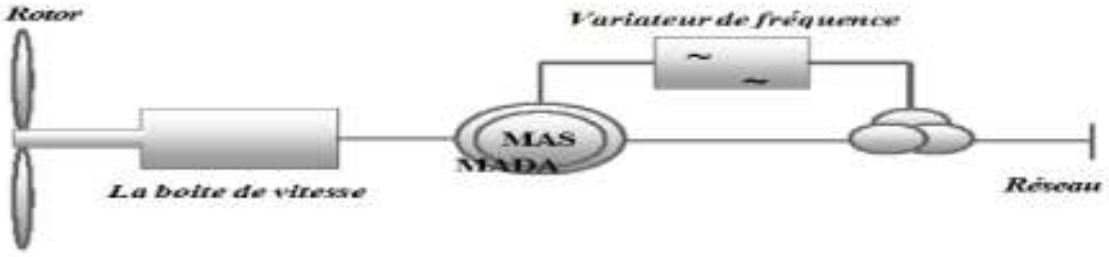


Figure I-8 Système éolien basé sur la génératrice asynchrone GADA à vitesse variable

I-8-4 Une comparaison entre les différentes machines : [24]

Type d'éolienne	avantages	inconvenants
MAS à vitesse fixe	-Machine robuste. -Faible cout -Pas d'électronique de puissance	-Puissance extraite non optimisé. -Maintenance de la boite de vitesse. -Pas de contrôle de l'énergie réactive. -Magnétisation de la machine imposée par le réseau.
MADA à vitesse variable	-Fonctionnement à vitesse variable. -Puissance extraite optimisé -Electronique de puissance dimensionnée à 30 % de la puissance nominale. -Machine standard. -Connexion de la machine facile à gérer. -Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau.	-Maintenance de la boite de vitesse. -Pris de l'électronique de puissance. -Contrôle et commande complexe. -Contact glissant bagues -balais
MSAP à vitesse variable	-Fonctionnement a vitesse variable sur toute la plage de vitesse. -Puissance extraite optimisé pour les vents faibles. -Connexion de la machine facile à gérer.	-Pris d'électronique de puissance. -Machine spécifique. -Grand diamètre de machine. -Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice.

***Tableau I.1 Avantages et inconvenants des différentes éolienn*es.**

I-9MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION :

I-9.1.Principe de fonctionnement :

Les machines asynchrones à rotor bobiné permettent, par un réglage dynamique du glissement, de s'adapter aux variations de puissance fournies par la turbine, augmentant ainsi le rendement du système. Si pour les petites puissances (<500kW), la partie mécanique peut généralement subir les variations brutales de régime de vent, ce type de contraintes devient inacceptable pour les fortes puissances. La variation de vitesse devient donc de plus en plus justifiée à mesure qu'on augmente la puissance de l'éolienne. Parmi les critères à prendre en compte pour juger de la qualité d'un tel système, on trouve :

- L'intérêt de maintenir une fréquence stator bien synchronisée par rapport à celle du réseau, afin de ne pas compromettre la stabilité d'ensemble. On peut même imaginer qu'un système „intelligent" augmente la marge de stabilité. Ce dernier aspect peut jouer sur la limite de puissance raccordable au réseau et permet la suppression, entre stator et réseau, de condensateurs susceptibles de provoquer des résonances.
- Le rendement de la conversion ;
- Le filtrage ou la qualité des formes d'ondes injectées au réseau ;
- Le prix évidemment.

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance *P* est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie, *(1-g) P*, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste*gP* sort par les ballais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence *gf*. Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc (*1+g) P*. Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un balai et de collecteurs (figure I-9).

Une fois connecté au réseau un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique [12].

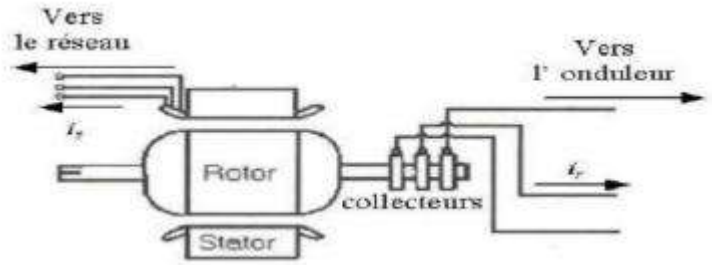


Figure I-9 :*Structure de la GADA à rotor bobiné*

Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des*f.e.m* dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les*f.e.m* créées au rotor et au stator est :

$$E_r / E_S = (N_r / N_S) \cdot (\omega_S - \omega_{mec}) / \omega_S \qquad (1.9)$$

N_r et N_S sont respectivement le nombre de spires des bobinages rotorique et statorique. ω_S et ω_{mec} sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine.

En posant : $g = (\omega_S - \omega_{mec}) / \omega_S$ l'équation (II-10) devient :

$$E_r / E_S = g \cdot (N_r / N_S) \qquad (1.10)$$

Les courants au stator et au rotor sont définis comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$I_r / I_S = N_r / N_S \qquad (1.11)$$

Donc le rapport entre la puissance au rotor S_r et la puissance au stator S_S devient :

$$(S_r / S_S) = (I_r / I_S) \cdot (E_r / E_S) = g \qquad (1.12)$$

Cette équation montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor, plus on augmente le glissement. La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement *g*.

I-9.2. Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI :

Cette configuration (figure 1.10) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cyclo convertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO [12]. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

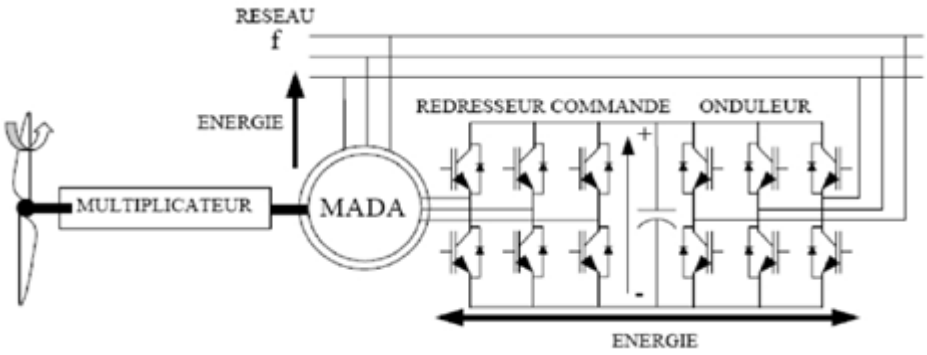


Figure I-10 : *structure de Scherbius avec convertisseurs MLI*

Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que les autres types de GADA. Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable.

La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Si le glissement reste inférieur à ± 30 % autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance.

De plus, le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau [12]. La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des dv/dt importants dans les enroulements rotorique et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements.

I-9.3.Mode de fonctionnement de la machine à vitesse variable :

En générale, la GADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la GADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur.

Par contre dans le cas de la GADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui

permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [12].

I-9-3-1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

Le fonctionnement en mode hypo synchrone du moteur est réalisé lorsqu'il s'agit d'une Plage de réglage de vitesse s'étendant de la vitesse de synchronisme à une vitesse plus faible. Le quadrant 1-1 de la figure II-11 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator ; la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau via les convertisseurs connectés au rotor, c'est la cascade hypo synchrone.

I-9-3-2Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

Le fonctionnement en mode hyper synchrone du moteur est réalisé lorsque la vitesse de la machine peut varier au delà de la vitesse de synchronisme. Dans le quadrant 1-2, nous voyons que dans ce mode de fonctionnement une partie de la puissance fournie par le réseau va au rotor via les convertisseurs statiques et est convertie en puissance mécanique.

I-9-3-3Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone

C'est surtout le mode de fonctionnement en génératrice qui nous intéresse car il correspond parfaitement dans notre cas, à la GADA utilisée dans une éolienne. Dans le quadrant 2-1, la puissance est fournie par le dispositif d'entraînement, dans notre cas la turbine éolienne ; une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

I-9-3-4 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone

Dans ce mode de fonctionnement comme le montre le quadrant 2-2, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine par la turbine éolienne est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à P_{mec} est transmise par l'intermédiaire du rotor.

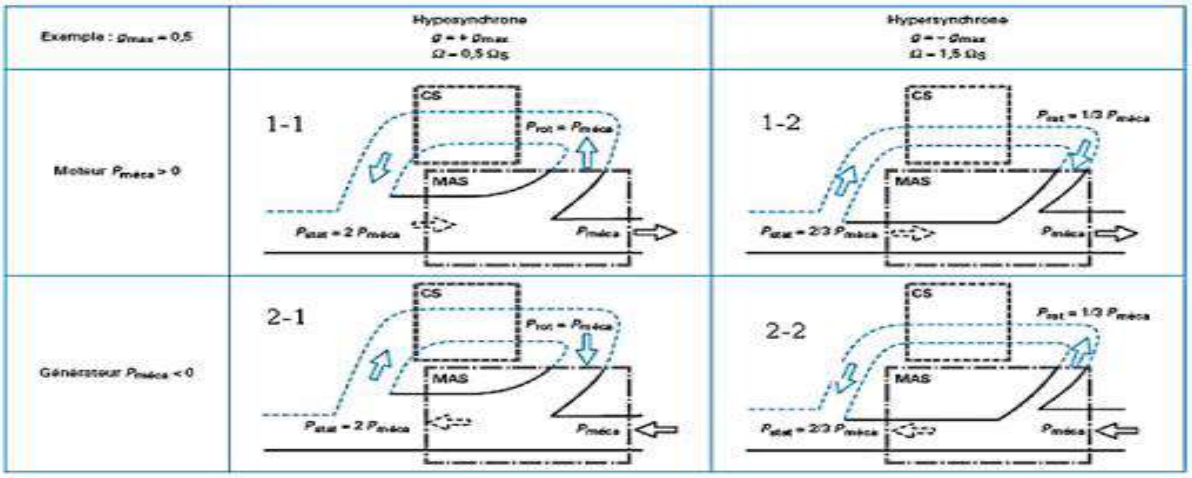


Figure I-11 : Bilans simplifiés des transferts d'énergie dans une machine à double alimentation lorsque la vitesse varie de la moitié au double de Ω [12].

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 2-1 et 2-2 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas ± 30% en deçà ou au delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est à dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbations que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage.

I-10 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la machine éolienne, en donnant les généralités sur son évolution, son utilisation, les deux grandes familles des aérogénérateurs, les différents composants d'une éolienne à axe horizontale et ses domaines d'applications. Ce premier chapitre nous permettra de mieux cerner le choix de l'aérogénérateur (turbine, génératrice) approprié pour un site avec un potentiel éolien donné.

Chapitre II

Modélisation d'un système éolien

II .1.Introduction :

Dans la littérature, plusieurs études ont été consacrées pour la modélisation de différents composants d'un système éolien pour une prévision de qualité de puissance générée. Les chercheurs qui prennent l'axe de recherche en relation avec l'énergie électrique ont tendance à simplifier les pièces aérodynamiques et mécaniques du système et soulignent généralement la description du générateur, contrairement aux chercheurs en mécanique, ces derniers négligent souvent les détails sur les performances du générateur.

Un model simple d'une éolienne de petite puissance a été présenté en [21], dans la même idée et pour comprendre les caractéristiques d'une éolienne non connecter à un réseau, les auteurs en [18] ont fait une analyse sur différents méthodes de modélisation, la première traite un modèle théorique y compris une deuxième basée sur les données expérimentales. Une complexité de fonctionnement de l'éolienne a mise au point une étude présentée par *M. Jelavić* et *al* dans l'article [25], pour but d'identifier un modèle linéaire capable de donner une bonne description du comportement de l'éolienne.

Dans les revues scientifiques on trouve la modélisation et la simulation de plusieurs génératrices qui peuvent être entrainées par une turbine dans un système éolien, les articles [16][22] [25] [26] présentent une étude pour but de modeler la génératrice asynchrone avec la turbine. Cependant l'optimisation d'une machine synchrone est présentée par *R.*

Bharanikumar et *al* dans [27] avec une utilisation d'algorithme MPPT (*Maximum Power Point Tracking).* Dans l'article [30] *Molina M.G* et *al* présentent une modélisation d'une chaine éolienne qui contient une machine synchrone à aimant permanant et son influence sur le réseau. L'impact des éoliennes sur la stabilité du réseau est également traité. Dans [31] l'auteur décrit un modèle complet d'une éolienne connecter au réseau et simuler par Matlab.

II.2.1 MODELISATION DE LA CHAINE EOLIENNE :

La structure du système éolien adoptée dans notre étude est illustrée sur la Fig. (2.3). Il est constitué d'une turbine et une MADA couplée à un réseau triphasé. Dans une telle configuration, l'enroulement du stator est directement connecté au réseau, tandis que l'enroulement rotorique est relié au réseau via deux convertisseurs de puissance permettant un échange de puissance entre le rotor et le réseau. Ainsi, le Convertisseur Côté Machine

(CCM) de la MADA permet une commande indépendante en puissances active et réactive, alors que le Convertisseur Côté Réseaux (CCR) permet la régulation de la tension du bus à CC et le réajustement du facteur de puissance côté réseau.

Dans notre étude, le système éolien fonctionne en deux modes: (1) le mode hypo synchrone, lorsque la puissance aérodynamique est insuffisante pour atteindre la vitesse synchrone, le système fonctionne en mode 1: extraction de la puissance maximale; (2) le mode hyper-synchrone, lorsque la vitesse du vent est supérieure à la valeur nominale. Dans ce cas, le système passe à l'état 2, où la puissance produite est limitée à sa valeur nominale par le système de variation d'angle de pales (pitch control).

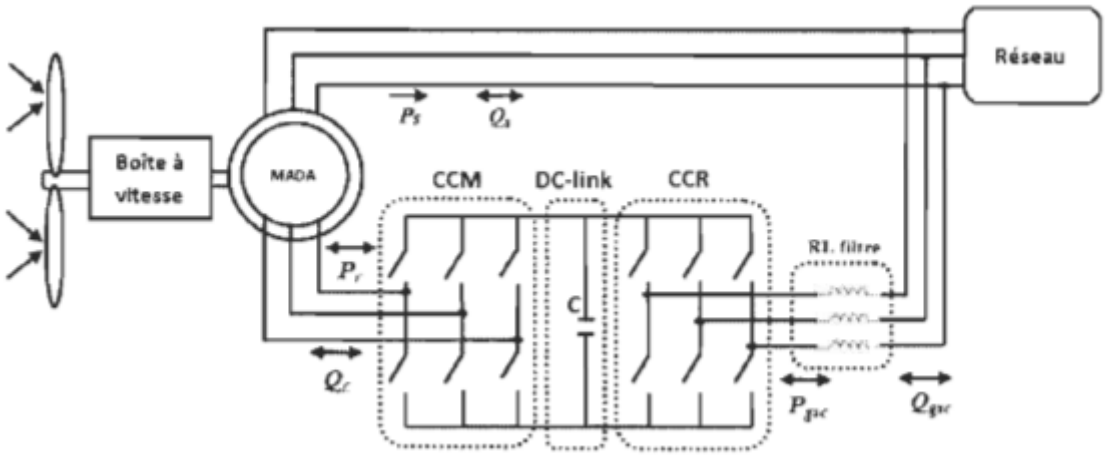


Figure II-1*Structure du système de génération éolienne à base de MADA*

II.2.2 Modèle du vent:

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie, car la puissance éolienne dans les conditions optimales évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent considéré dans ce modèle se limite à une dimension. A noter que l'orientation du vent dans le plan horizontal n'a pas d'importance pour une voilure à axe vertical [32].

Le modèle comportemental du vent peut donc être simplifié considérablement. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

(2.1) $V = f(t)$

La vitesse du vent peut être modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques :

(2.2)

$$V(t) = 8 + 0.2.\sin(0.1047t) + 2.\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2.\sin(3.6645t)$$

La Figure II-2 représente le vent simulé avec une vitesse moyenne de 8 m/s

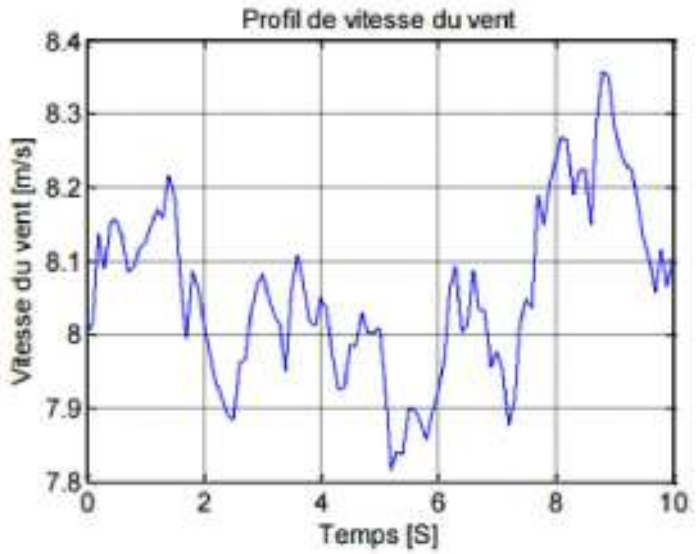


Figure II-2 ***Simulation de profil de vitesse du vent[32]***

II.3. Modélisation de la turbine :

II.3.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine :

Le modèle que nous sommes en train de l'étudier se compose d'une turbine qui contient 3 pales orientables de longueur R.

- les trois pales sont considérées de conception identique ce qui permet de voir l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique.
- le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est très faible et peut être négligé.
- la vitesse de la turbine étant faible et donc les pertes de frottement de la turbine sont négligeable par rapport aux pertes de génératrice.

II.3.2 Modèle de turbine :

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. 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. Dans notre cas on va prendre le moteur éolien à axe horizontal, leprincipe de la conversion éolienne été établie par Betz, il suppose que les pales sont placées dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 *e*t à l'infinie aval d'une vitesse V_2 avec une masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales, la masse d'air est définie par[14]:

(2.3) $$m = \frac{\rho s(V_1 + V_2)}{2}$$

Pour une vitesse de vent donnéev_w, la puissance mécanique générée par la turbin1e peut être exprimée comme suit:

(2.4) $$P_w = \frac{1}{2}\rho A C_p(\lambda,\beta)v_w^3$$

Où ρ est la densité de l'air en kg/m^3; A=π.R² est la surface brassée par les pales en m², et R est le rayon des pales en m.

Le modèle aérodynamique de la turbine peut être déterminée par la courbe $C_p(\lambda,\beta)$. C_p est le coefficient de puissance qui est fonction de ratio de vitesse spécifique λ, et de l'angle de calage des pales β.

Le coefficient de puissance qui est adimensionnel est donné par la relation suivante:

$$C_p = 0.398 \sin\left(\frac{\pi(\lambda-3)}{15-0.3\beta}\right) - 0.00394(\lambda-2)\beta \qquad (2.5)$$

Cp le coefficient définit le rendement aérodynamique de la turbine. La **Figure II-2** représente le coefficient de puissance qui dépend des dimensions des pales, du ratio de vitesse spécifique λ et de l'angle de calage des pales β.

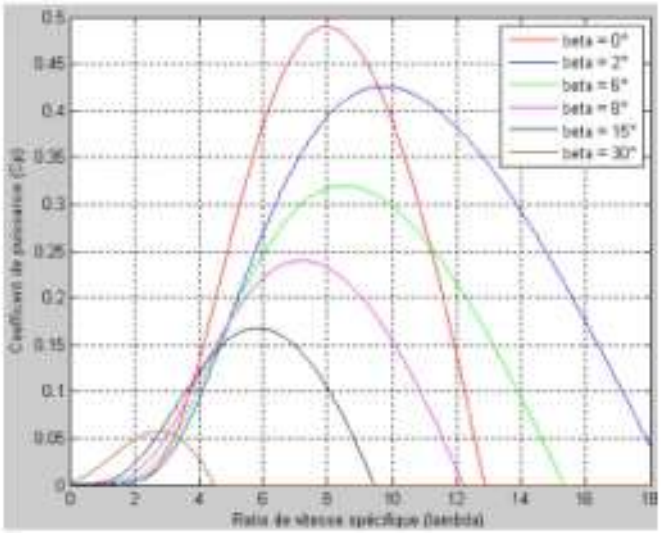


Figure II-3*Coefficient de puissance C_p en fonction du ratio de vitesse spécifique λ.*

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) :

$$P_m = \frac{m.(V_1^2 + V_2^2)}{2} \qquad (2.6)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (2.7) :

$$P_m = \frac{\rho.m(V_1 + V_2)(V_1^2 + V_2^2)}{2} \qquad (2.7)$$

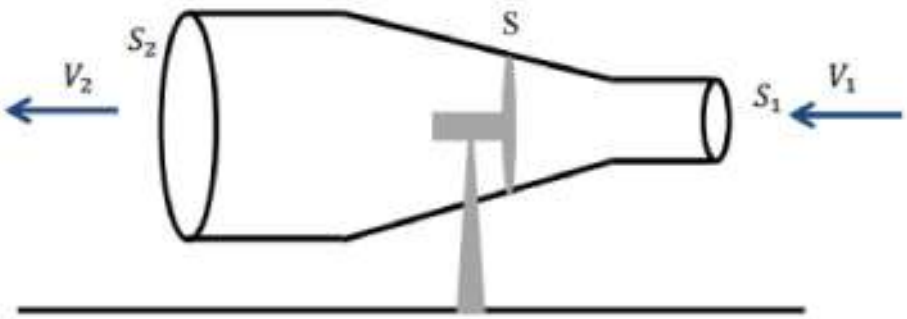


Figure II-4 *Tube de courant autour d'une éolienne***.**

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface *S* sans diminution de vitesse, soit à la vitesse$_1$, la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho.S.V_1^3}{2} \qquad (2.8)$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1+\left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right)\left(1-\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \qquad (2.9)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus, on s'aperçoit que le

Ratio$\frac{P_m}{P_{mt}}$appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de 0,59 (**Figure II-4**). C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne.

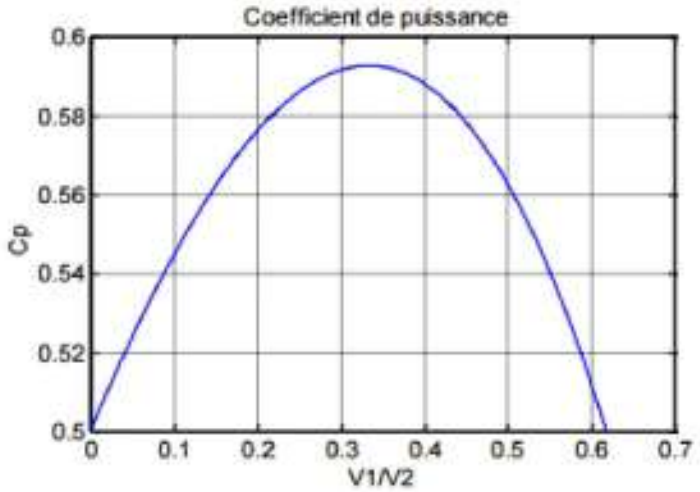


Figure II-5 *Coefficient de puissance.*

En combinant les équations (2.6),(2.9)et (2.10), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} . P_{mt} = C_p . P_{mt} = \frac{1}{2} . C_p(\lambda) \rho . \pi . R^2 . V_1^3 \qquad (2.10)$$

Avec : $$\lambda = \frac{\Omega_1 . R}{V_1} \qquad (2.11)$$

Ω1 : Vitesse de rotation avant le multiplicateur.

R: Rayon de l'aérogénérateur.

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

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_2 . R}{K . V_1} \right) \rho . \pi . R^2 . V_1^3 \qquad (2.12)$$

Avec : Ω2 Vitesse de rotation après multiplicateur.

Si on prend l'exemple d'un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur deλ donnée appelée λ_{opt}[34]. La vitesse de rotation optimale résultante est Ω_{opt}alors donnée par:

$$\lambda = \frac{\Omega_1 . R}{V_1} . V \qquad (2.13)$$

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominaleV_n. Pour des vitesses de vents supérieures àV_n, la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques, de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs de dimensionnement; $V_{\min}$ la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et $V_{\max}$ la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être arrêtée pour ne pas subir de dégâts [14].

La **Figure II-6** montre une caractéristique de puissance en fonction de vitesse du vent qui comporte quatre zones :

- La zone I, ou aucune puissance n'est délivrée pour des vitesses du vent inferieures à la vitesse du démarrage $V_{\min}$.
- La zone II, lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliquée.
- La zone III, ou généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et ou la puissance P_{tu} fournie reste sensiblement égale à P_n.
- La zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

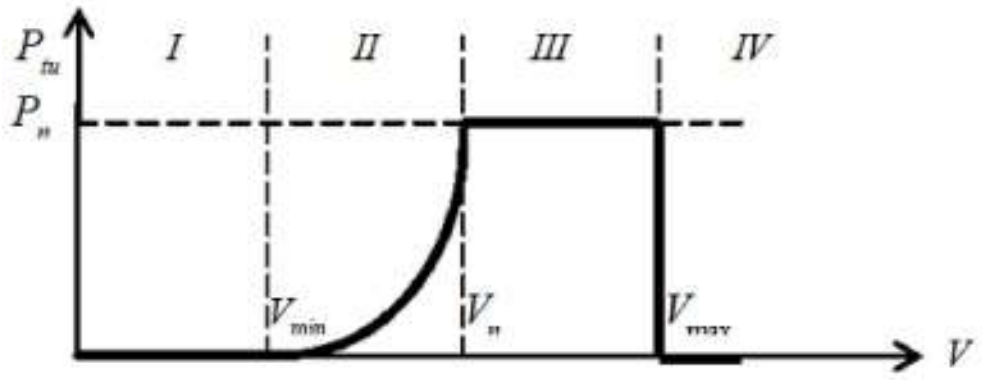


Figure II-6 *Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.*

II.3.3 Modèle de la génératrice asynchrone :

Pour une représentation parfaite du comportement de la génératrice asynchrone, il est nécessaire de faire la modéliser d'une façon correcte par un modèle assez précis comme le modèle déphasé bien détaillée dans L'ANNEXE 1.

II.3.4 Détermination de la valeur des capacités d'auto-amorçage : [57]

Considérons le schéma équivalent simplifié ramené au stator d'une phase de la génératrice asynchrone de la **Figure II-7** La machine est entraînée à la vitesse de synchronisme rendant ainsi la résistance R'_r/g infinie. Le courant *I* dans l'inductance magnétisante est par conséquent équivalent au courant traversant le condensateur.

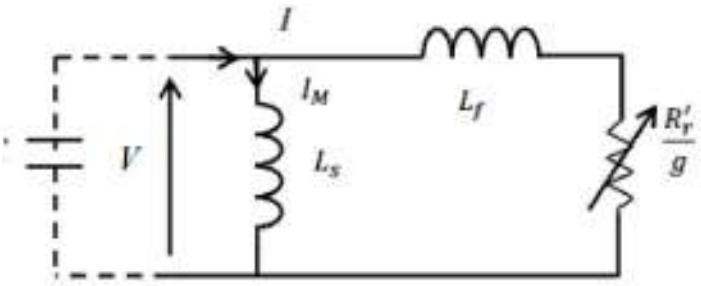


Figure II-7*Schéma équivalent simplifié d'une phase de la MAS ramené au stator*

Dans le cas où une charge purement résistive R est connectée au stator de la machine, le schéma équivalent par phase de l'ensemble machine - capacité d'auto-excitation - charge peut alors être modifié comme indiqué sur la **Figure II-7** (b)

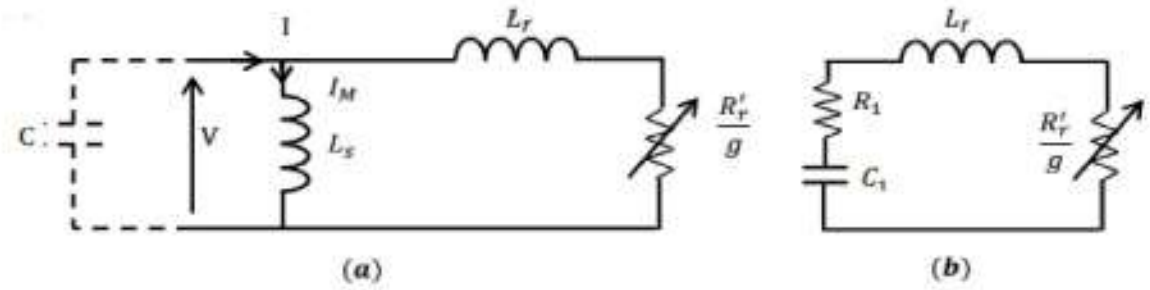


Figure II-8*Transformation du schéma équivalent*

R_1 et C_1 peuvent être exprimés en fonction des éléments du schéma équivalent classique :

$$R_1 = \frac{R}{1+\left[R\left(C.\omega_s - \frac{1}{L_s.\omega_s}\right)\right]^2} \quad ,C_1 = \frac{1+\left[R\left(C.\omega_s - \frac{1}{L_s.\omega_s}\right)\right]^2}{R^2\left(C.\omega_s - \frac{1}{L_s.\omega_s}\right)} \qquad (2.14)$$

L'auto-amorçage de la génératrice ne peut avoir lieu que si la puissance apparente qu'elle produit correspond à celle qu'elle absorbe. Pour la partie puissance réactive, on doit alors satisfaire l'égalité suivante :

(2.15) $$L_f.\omega_s - \frac{1}{C_1.\omega_s} = 0$$

Soit $$F(\omega_s) = L_f = \frac{R^2.L_s\left(L_s.C.\omega_s^2 - 1\right)}{\left(L_s.\omega_s\right)^2 + R^2\left(L_s.C.\omega_s^2 - 1\right)^2} \qquad (2.16)$$

Cette inductance L_f doit bien évidemment être positive, une condition nécessaire à l'amorçage est donc

(2.17) $$L_f.C.\omega_s^2 > 1$$

Cette condition montre que la valeur minimum conduisant à l'auto-amorçage est fonction de l'inductance cyclique statorique ainsi que de la pulsation rotorique et du glissement. La caractéristique $F(\omega_s)$ est représenté dans la **Figure II-9**

Si $F(\omega_s)$ est toujours inférieure à L_f (courbe b), il n'y a pas d'amorçage possible. Dans le cas contraire (courbe a), il existe deux pulsations $\omega 1$ et $\omega 2$ vérifiant l'équation (2.19). En pratique,

seule ω1est intéressante car ω2 correspond à un fonctionnement instable. Pour la partie puissance active, on doit satisfaire l'égalité suivante :

$$\frac{R_r'}{R} + R_1 = 0 \tag{2.18}$$

Soit

$$g = -\frac{R_r'}{R}\left[1 + R^2\left(C\omega_s - \frac{1}{M\omega_s}\right)^2\right] = -G(\omega_s) \tag{2.19}$$

La caractéristique $G(\omega_s)$(**Figure II-9**) montre que deux glissements g_1 et g_2 correspondent aux pulsations ω1etω2déduites précédemment. On vérifie bien que la pulsationω2 conduit à un glissement trop élevé.

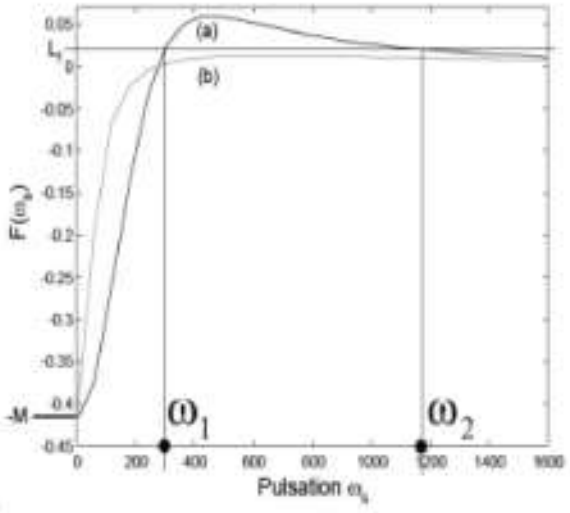


Figure II-9*Caractéristique F (ω_s)*

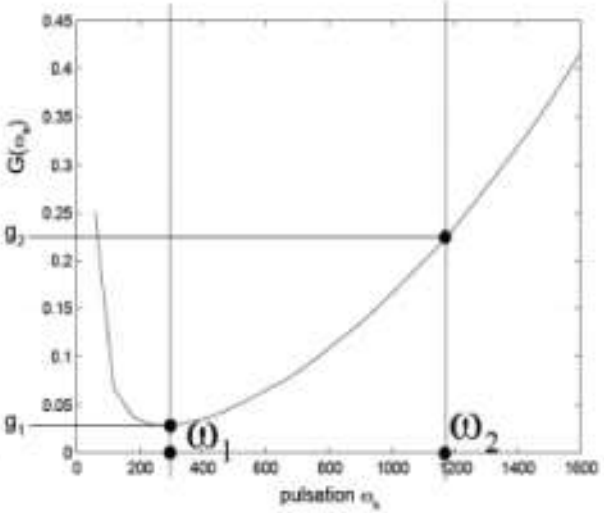


Figure II-10*Caractéristique G (ω_s)*

II.4 Choix de la machine génératrice pour une installation autonome :

Après avoir parlé des types d'aérogénérateurs qui existent on va s'orienter à étudier un type plus particulier celle de machine asynchrone à cage d'écureuil auto excité. Ses génératrices rentrent dans la construction des éoliennes qui sont utilisées pour produire de l'électricité et

alimenter des appareils électriques de manière économique et durable, principalement en milieu rural. C'est une solution parfaite lorsque le raccordement au réseau est impossible. Dans ce cas la nécessité d'avoir un outil d'électronique de puissance est indispensable ce qui mis la présence d'un système de stockage ou bien un autre système producteur de l'énergie, le cas du système hybride, l'éolienne donc n'est pas complètement autonome.

Seul un dispositif basé sur une machine asynchrone auto-excitée par un banc de capacités directement connecté sur une charge permet d'obtenir un fonctionnement purement autonome. Le phénomène d'auto-excitation est en revanche difficile à maîtriser car les variations de charge influente directement sur les valeurs de la tension et la fréquence délivrées. De plus, un dispositif d'orientation des pales de l'éolienne est nécessaire afin de maintenir une vitesse de rotation et par conséquent une fréquence délivrée fixe [32]. Afin de déterminer les performances et les limites de fonctionnement de ce dispositif, un modèle de la machine est établit dans un repère diphasé.

II.5 Modélisation du bus à CC :

Les deux convertisseurs de puissance CA/CC qui permettent la connexion du circuit rotorique de la MADA et le réseau électrique sont reliés entre eux via un bus à CC afin de permettre un transfert de puissance entre deux sources de courant avec des fréquences différentes. La figure 4.6 illustre la connexion de deux convertisseurs de puissance à travers le bus à Cc.

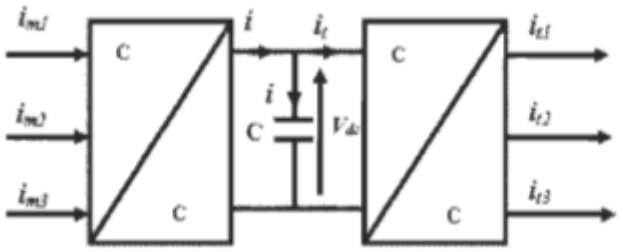


Figure II-11 *Connexion de deux convertisseurs de puissance à travers un bus à CC*

La tension du bus à CC Vdc peut être exprimée comme suit:

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C} i_c(t)dt + V_{dc}(t=0) \qquad (2.20)$$

Avec C la capacité du bus à CC, et Vdc(t=O) la tension initiale du bus continu.

L'expression de la relation (3.26) peut être représentée par la figure 4.7 suivante:

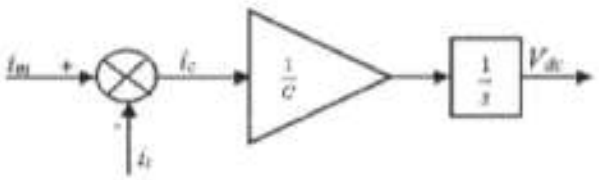


Figure II-12*Modélisation du bus CC*

II.6 Commande de l'angle d'orientation des pales (commande à pas variable) :

Il existe deux principes de contrôle aérodynamique de l'éolienne dans le but de limiter la puissance fournie, et d'assurer un fonctionnement sécuritaire du système éolien. Le système à commande d'angle d'orientation des pales (Pitch control en anglais), est un système qui utilise la variation de l'angle de calage des pales (variation de l'angle d'incidence). L'adaptation de l'angle d'incidence des pales à la vitesse du vent afin d'essayer de capturer le maximum de puissance. C'est une technique assez coûteuse, qui est utilisée pour les éoliennes à moyenne et à grande puissance. Elle permet de régler mécaniquement l'angle des pales, ce qui permet de décaler la courbe du coefficient de puissance de la voilure [05].

Ces systèmes de commande à pas variable, ont été largement étudiés dans la littérature

[06, 07]. Au départ, l'objectif était de maintenir une vitesse de rotation constante

(Éoliennes à vitesse fixe), et le rendement électrique sous une plage de vitesse de vent supérieure. Pour les éoliennes à vitesse variable, un autre principe de contrôle a été introduit dans le but de réduire la charge dans les grandes éoliennes [08]. A faibles vitesses de vent, le système d'orientation des pales est désactivé, et l'angle d'orientation reste à sa valeur optimale (0°), et la stratégie MPPT est utilisée pour extraire le maximum de puissance [09]. À des vitesses du vent plus élevées, le système de commande est activé pour limiter la puissance.

Les deux modes de contrôle travaillent parfois ensemble pour réguler la vitesse de la turbine dans la région de fort vent [10, 11].

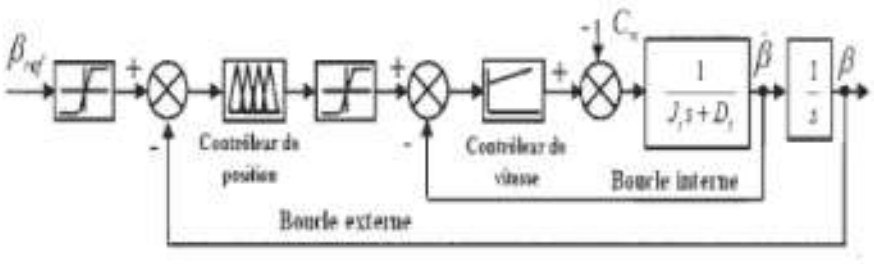


Figure II-13*Principe de commande mécanique à pas variable d'une turbine*

Étant donné qu'il y a des incertitudes sur la modélisation de la turbine, nous proposons d'utiliser deux régulateurs flous pour la boucle externe qui est le contrôle de position, et un régulateur PI pour le contrôle de la vitesse (voir figure 2.11). À noter que les gains du

régulateur PI ont été déterminés par la méthode de placement des pôles. Les caractéristiques du régulateur flou sont présentées ci-dessous. Le tableau 4.1 représente les règles de base d'inférence utilisées pour le contrôleur de position du système pitch control.

La figure 2.12 illustre la répartition de l'univers de discours des grandeurs d'entrée et de sortie du contrôleur de position flou.

Sortie		Δe(t)				
		NG	N	Z	P	PG
e(t)	NG	NG	Z	NG	Z	Z
	N	Z	N	N	Z	Z
	Z	NG	N	Z	P	PG
	P	Z	Z	P	P	Z
	PG	Z	Z	PG	Z	PG

Tableau II-1*Règles d'inférence du régulateur flou utilisé pour le contrôle de la position des pales « Pitch Control»*

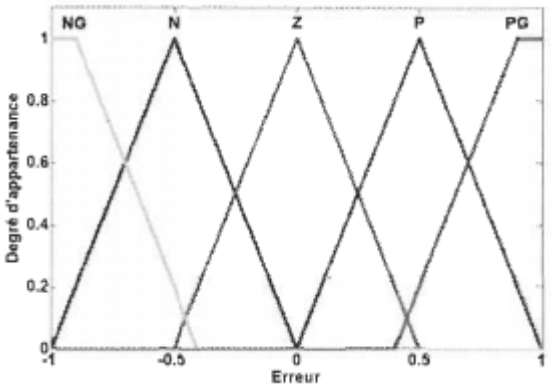


Figure II-14*Fonction d'appartenance des entrées et sortie du contrôleur de position du système « Pitch Control »*

II.7 Algorithme de poursuite de la puissance maximale de l'éolienne (MPPT) :

Afin de pouvoir capturer le maximum de la puissance éolienne, la vitesse de l'aérogénérateur doit être ajustée en permanence en fonction de la variation de la vitesse du vent. De nombreux algorithmes MPPT ont été proposés dans la littérature. Dans [12] le ratio de vitesse spécifique est fixé à sa valeur optimale λ_{opt} afin d'extraire le maximum de la puissance de sortie avec la valeur optimale du coefficient de puissance. Cette méthode présente certains inconvénients, comme l'impossibilité d'adapter la vitesse de l'éolienne en cas de variation rapide de la vitesse du vent, en raison de son inertie. Dans [02] une autre méthode est présentée où est λ_{opt} calculé à partir des racines de la dérivée seconde de la relation du coefficient de puissance Cp' Cette méthode est principalement limitée par sa complexité et sa gourmandise en temps de calcul, surtout lorsque la représentation mathématique du Cp est un polynôme de quatrième ordre, dont beaucoup de relations sont rapportés dans la littérature, comme la relation 2.4 (utilisée dans ces travaux de recherche).

Avec ces modèles de Cp, le calcul des racines de leurs dérivées secondes [12], est généralement difficiles à réaliser. Une autre technique MPPT utilise l'information sur la courbe de puissance maximale des éoliennes (puissance maximale en fonction de la vitesse de rotation), pour poursuivre le point de la puissance maximale. Les principaux

Inconvénients de cette méthode sont la nécessité de mesures expérimentales des courbes de

Puissance mécanique en fonction de la vitesse de la turbine [13], et le besoin d'un grand

Espace de mémoire.

Dans notre travail, nous proposons une nouvelle stratégie MPPT sans capteurs mécaniques, basée sur les principes de la logique floue. La valeur optimale du coefficient de puissance est fournie par : (1) l'estimation de l'ensemble des pertes de puissance dans la chaîne de conversion éolienne [13]; (2) l'estimation de la vitesse du vent comme le montre la figure 2.13. La structure de l'algorithme MPPT FL proposé est présentée dans la figure 2.14. Le principal avantage de cette stratégie de MPPT sans capteurs mécaniques, est la possibilité de suivre le point de puissance maximale tout en réduisant la taille des convertisseurs (CCM et CCR) d'environ 50% par rapport à la taille utilisée dans la littérature. Ceci entraîne une réduction significative des coûts (maintenance et refroidissement) et des pertes du système éolien [13].

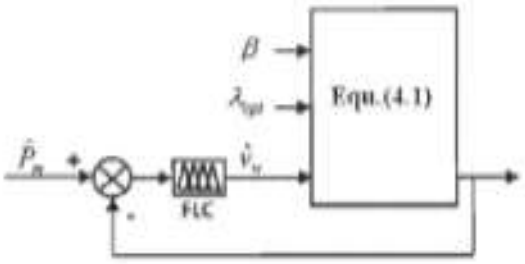


Figure II-15*Schéma bloc de la stratégie d'estimation de la vitesse du vent*

Dans ce qui suit, nous allons détailler l'algorithme MPPT FL proposé. Tout d'abord, la valeur optimale du coefficient de puissance (Cp) est exprimée par la relation suivante (voir figure 2.15):

$$C_p^{opt} = \frac{\hat{P}_{turbine} + P_{mes}}{\frac{1}{2}\rho A \hat{v}_w^3} \qquad (2.21)$$

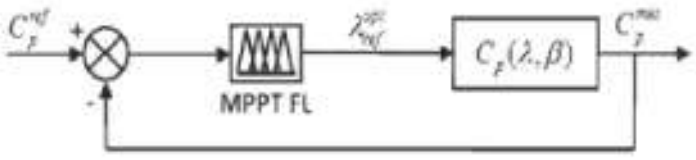


Figure II-16*Schéma bloc de la stratégie MPPT FL proposée*

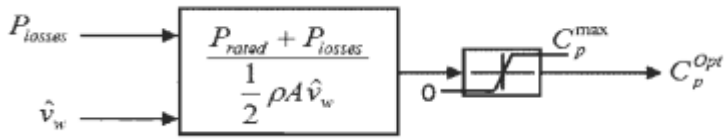


Figure II-17*Schéma bloc de la stratégie d'estimation de la vitesse du vent*

Où Cp opt est le coefficient de puissance optimal permettant l'extraction de la puissance maximale du vent, Vw est la vitesse du vent estimée, Piosses et Pnom sont respectivement les pertes de puissance estimée et la puissance nominale de sortie de la MADA.

Par la suite, nous allons utiliser de la valeur du coefficient de puissance de la relation

(2.38) et la valeur de l'angle d'orientation des pales (qui est déterminé par le système Pitch

Control) pour notre stratégie MPPT. En effet, l'algorithme MPPT FL calcule la valeur optimale du ratio de vitesse spécifique (Cp opl) qui permet de fournir la valeur optimale de l'énergie éolienne en fonction de la vitesse du vent (voir figure 2.14). La représentation mathématique du coefficient de puissance(Cp) utilisée dans cette étude est donnée par la relation 2.4. Par la suite, la vitesse de référence à imposer à la MAD A pour le suivi de la valeur maximale de l'énergie éolienne est déterminée par la relation 2.3.

II.8 Conclusion

Ce chapitre a était consacré à l'étude d'une chaine éolienne dédié à produire de l'énergie Électrique pour des zones éloignées en utilisant une turbine et une génératrice asynchrone auto excitée fonctionnant en mode autonome. Dans ce contexte, on a décrit dans un premier lieu quelques notions nécessaires à la compréhension au sujet de la technologie éolienne, les différents types d'éoliennes ainsi que les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien.

En ce qui concerne le fonctionnement autonome, la machine asynchrone à cage d'écureuil auto excité par un banc de capacités apparaît comme une solution intéressante au niveau de production de l'énergie électrique pour un système éolien, grâce à leur faible coût et la maintenance facilitée grâce à l'absence de contacts glissants. Une modélisation de cette dernière avec associer à une turbine

Chapitre III

Simulation et interprétation des résultats

III-1 Introduction :

Ces deux dernières décades, l'énergie éolienne est la SER qui a connu la plus grande progression. Les développements qu'a connus l'électronique de puissance combinée aux systèmes de plus en plus performants ont contribué à cette progression. En effet, l'utilisation d'interfaces de puissance permet un fonctionnement à vitesse variable de l'éolienne, et l'extraction du maximum de puissance. Bien qu'il soit possible de connecter les génératrices éoliennes directement au réseau (pour les éoliennes à vitesse fixe), il est préférable d'utiliser de l'électronique de puissance pour améliorer l'efficacité et le rendement du système éolien. En effet, les convertisseurs de puissance permettent un fonctionnement souple avec l'atténuation des perturbations dues aux variations brusques et aléatoire de la vitesse du vent. De plus, ces interfaces de puissance contribuent à l'amélioration de la qualité de l'onde telle que le filtrage harmonique et la contribution au contrôle de la tension. Ainsi, les systèmes éoliens peuvent participer aux services système.

Parmi les nombreuses technologies d'éoliennes fonctionnant à vitesse variable, la MADA est la machine qui a connu un grand intérêt ces deux dernières décades. En effet, cette machine a l'avantage de permettre une capacité élevée de transfert d'énergie, la réduction de la taille des convertisseurs de puissance dimensionnés à un tiers de la puissance nominale du système éolien. Alors que le stator de la MADA est directement lié au réseau, le rotor est connecté via deux convertisseurs MU (Modulation de Largeur d' Impulsion) connectés dos-à-dos, avec un condensateur de liaison à CC. La fréquence de la tension injectée au rotor est ajustée en fonction de la variation de vitesse de la turbine pour obtenir une fréquence constante aux bornes du stator.

III-2 État de l'art des systèmes de conversion électromécanique :

Pour une maximisation de la production de l'énergie éolienne et une souplesse de fonctionnement, les turbines à vitesse variable sont les plus performantes par rapport aux turbines fonctionnant à vitesse fixe [32]. En effet, la quantité de la production de l'énergie éolienne augmente jusqu'à10-15% avec les éoliennes à vitesse variable qu'avec les éoliennes à vitesse fixe.

Les systèmes éoliens peuvent être classés suivant plusieurs critères. L'un des critères est l'utilisation de boite à vitesse, qui permettent d'adapter la vitesse faible de la turbine à la

vitesse de fonctionnement élevée de certaines machines telles que la MADA. Il Y a aussi des génératrices qui peuvent fonctionner à faible vitesse du vent, telles que les Génératrices synchrones à Aimant Permanents (GSAP). L'avantage des systèmes éoliens sans boite à vitesse, est la faible maintenance, augmentant ainsi leur fiabilité. L'autre critère est l'utilisation des

systèmes de variation des angles des pales; système à décrochage naturel ; système à décrochage actif (Pitch control).

III-3 Méthodologie adoptée :

La méthode adoptée pour la simulation du modèle d'éolienne à base de génératrice asynchrone à double alimentation MADA c'est :

1- Paramètres de l'éolienne Choisis
2- Le choix d'une charge résistive pour visualisé les charges de sorties.
3- Validation des plusieurs modes de vents : fixe, variable (croissent et décroissent), faible. Avec interprétation des résultats

III-3.1-1choix d'éolienne:

- L'éolienne choisis a les caractéristiques suivantes :
- Puissance nominal: 1500 kW à vitesse de vent de 6 m/s -

Tension : 2200 Vdc configurable.

- Vitesse de démarrage : 2 m/s

III-3-2 .Descriptions des blocs utilisés en Matlab/Simulink :

III-3-2-1 Système éolien :

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.

En général, la transmission de puissance entre le moyeu et le générateur électrique est réalisée à travers un multiplicateur de vitesse de rotation.

Le schéma-bloc de l'éolienne étudiée dans le cadre de ce travail est présenté dans la Figure (III-6). Il s'agit d'une éolienne à axe horizontal, à trois pales et avec un générateur à MADA à vitesse variable.

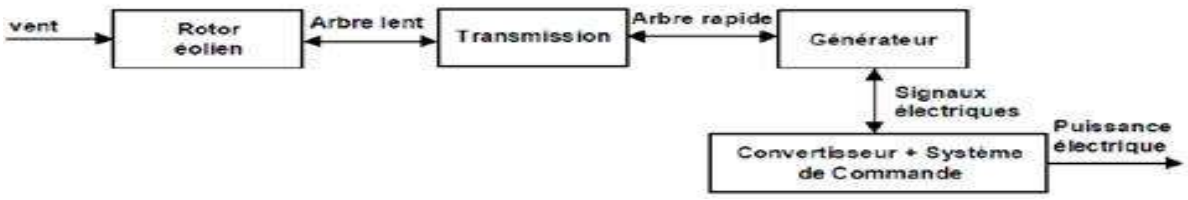
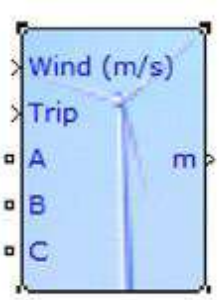


Figure III-1 : Structure du système éolien

III-3-2-1-1 Modèle éolienne utilisant SimPowerSystemToolbox :

C'est un modèle basé sur les caractéristiques de puissance à l'état d'équilibre de la Turbine. La rigidité du train d'entraînement est infinie, le coefficient de frottement et le moment d'inertie de la turbine doivent être combinés avec ceux du générateur couplé à la Turbine. L'utilisateur peut choisir les paramètres électriques et mécaniques de son éolienne. Dans ce modèle, A[illegible] les sorties du générateur triphasé. La sortie m est le vecteur de mesures, dans l[illegible] la puissance active et réactive, le couple et la vitesse de la turbine. L'entrée « [illegible] à la boucle de contrôle de la turbine, alors que « Wind » est une entrée pour la v[illegible] figure III.7).



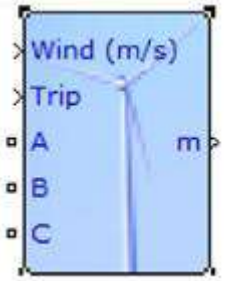


Figure III-2: Block de l'éolienne sous SimPowerSystem

III-3-2-1-2 Le modèle de turbine :

Le modèle de la turbine éolienne est illustré dans la figure (III.8). Les trois entrées sont la vitesse de la génératrice (Generator speed), l'angle d'inclinaison en degrés des pales (Pitch angle) et la vitesse du vent (Wind speed) en m/s. La sortie est le couple appliqué sur l'arbre du générateur.

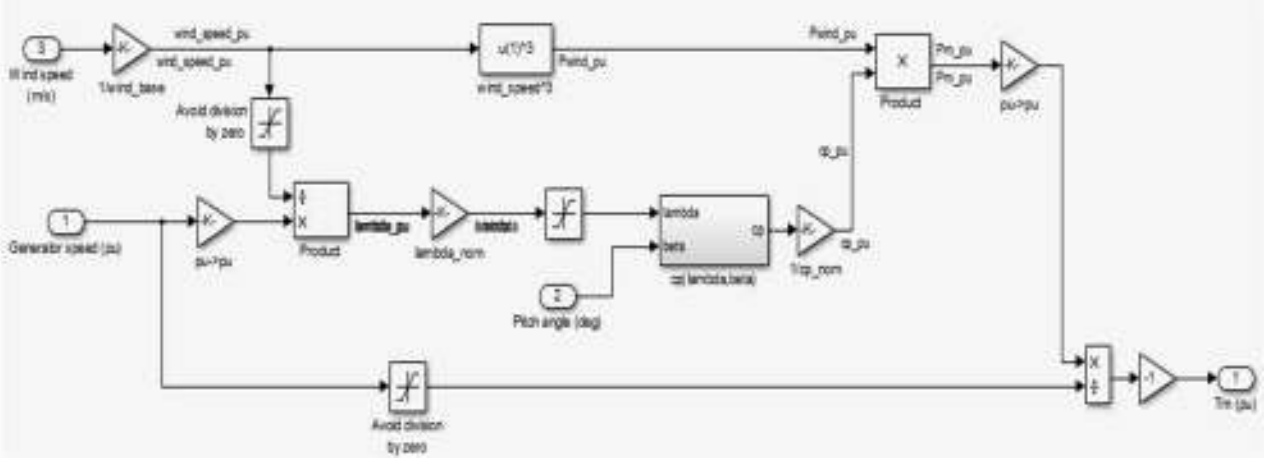


FIGURE III-3 : paramétrage d'une turbine éolienne utilisant le modèle sous SimPowerSystem

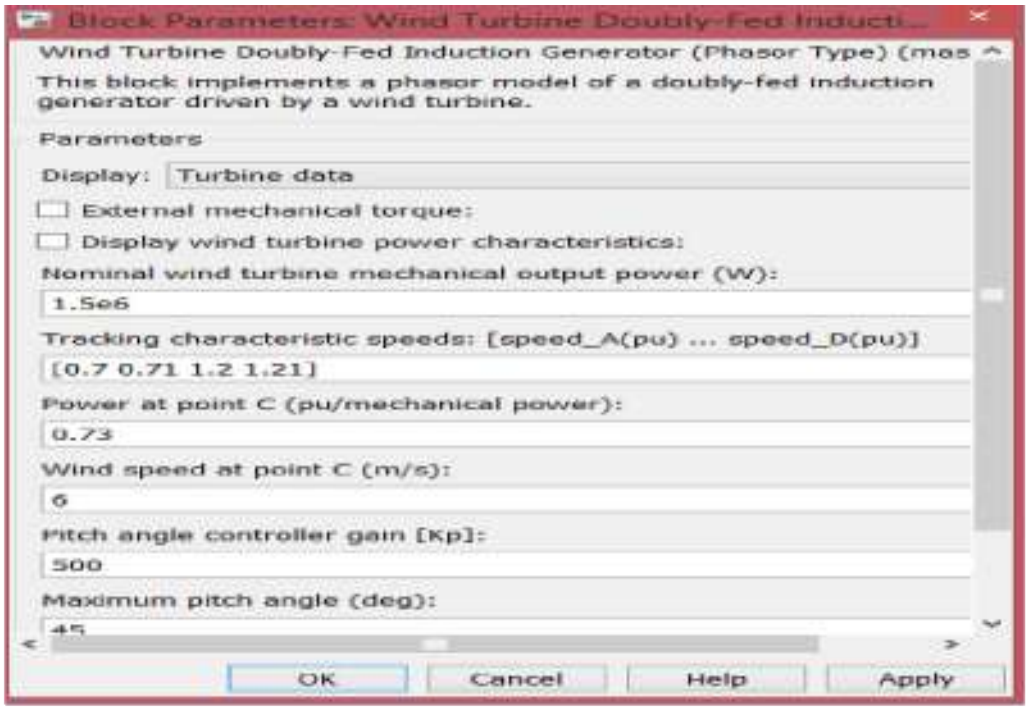


Figure III-4: Paramètres de la turbine éolienne sous SimPowerSystem

La caractéristique de cheminement est une vitesse de démarrage de 2 m/s et une vitesse nominal de 6 m/s (voir figure III.10) .

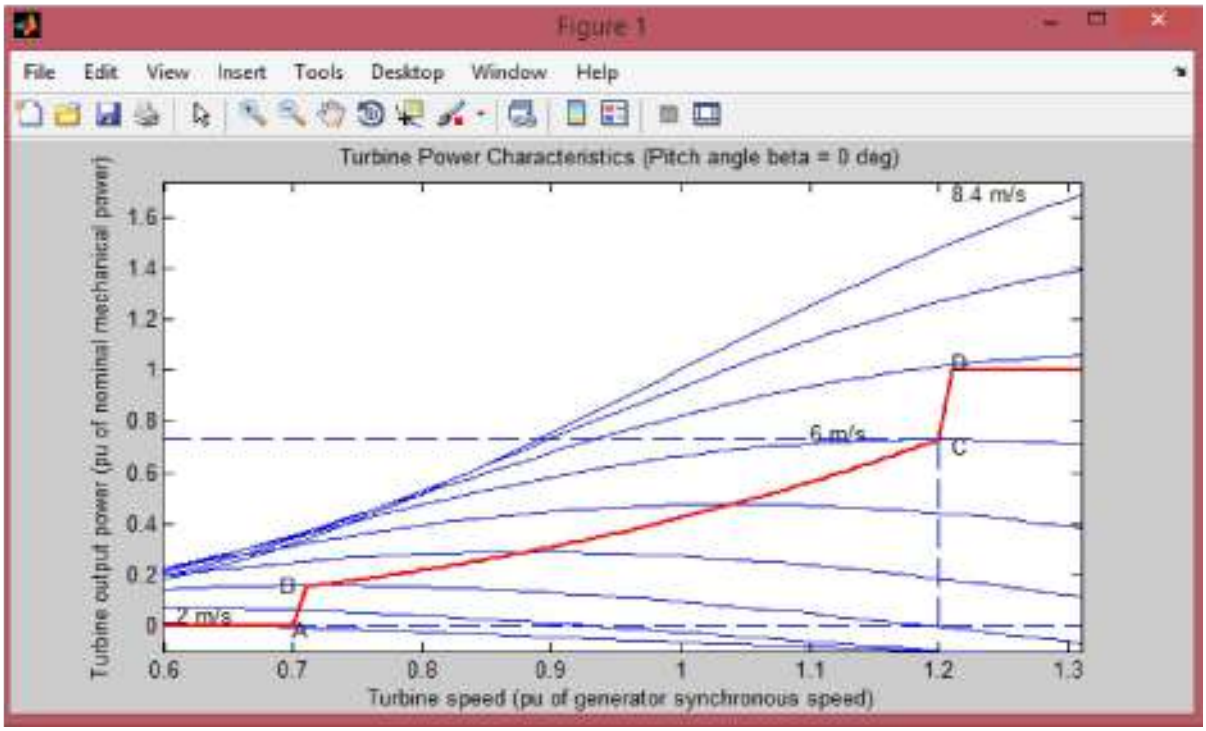
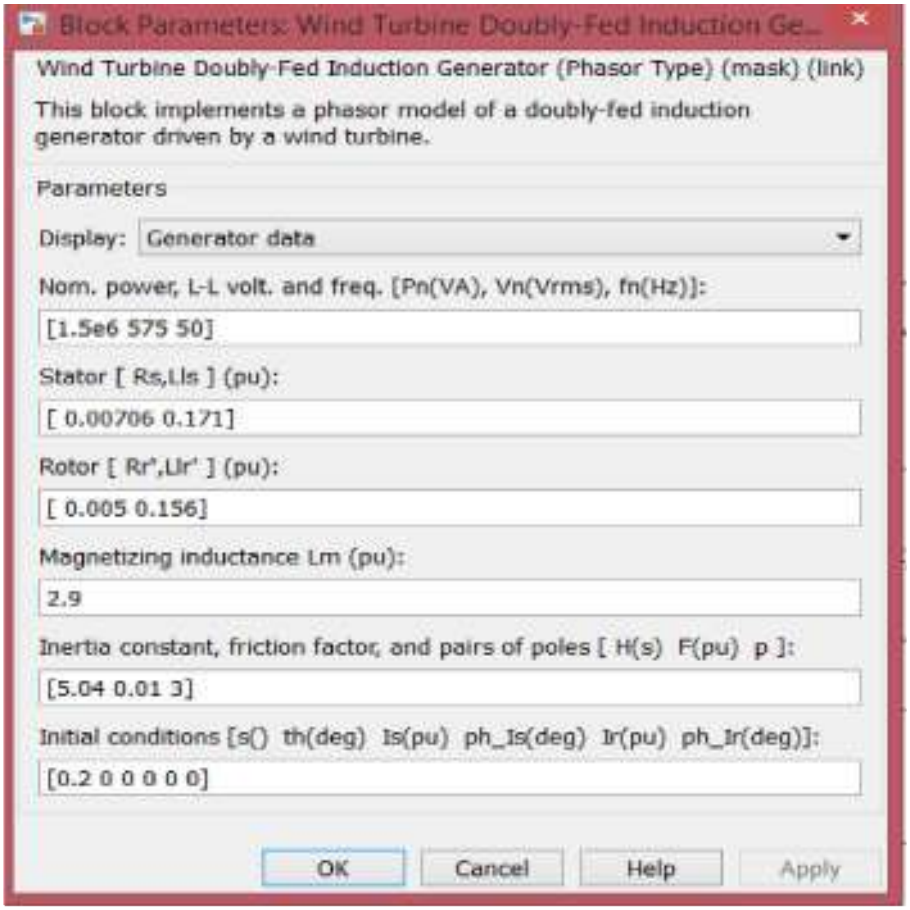


Figure III-5 : Caractéristiques de turbine et caractéristique de Cheminement



FigureIII-6 : paramètres de la génératrice sous SimPowerSystem

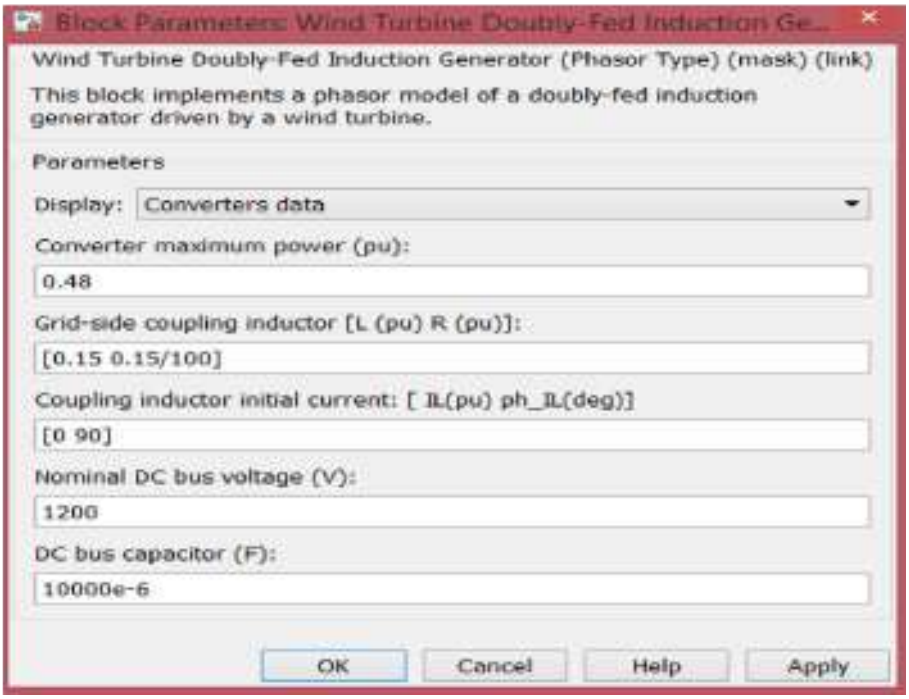


Figure III-7: Paramètres du convertisseur turbine éolienne sous SimPowerSystem

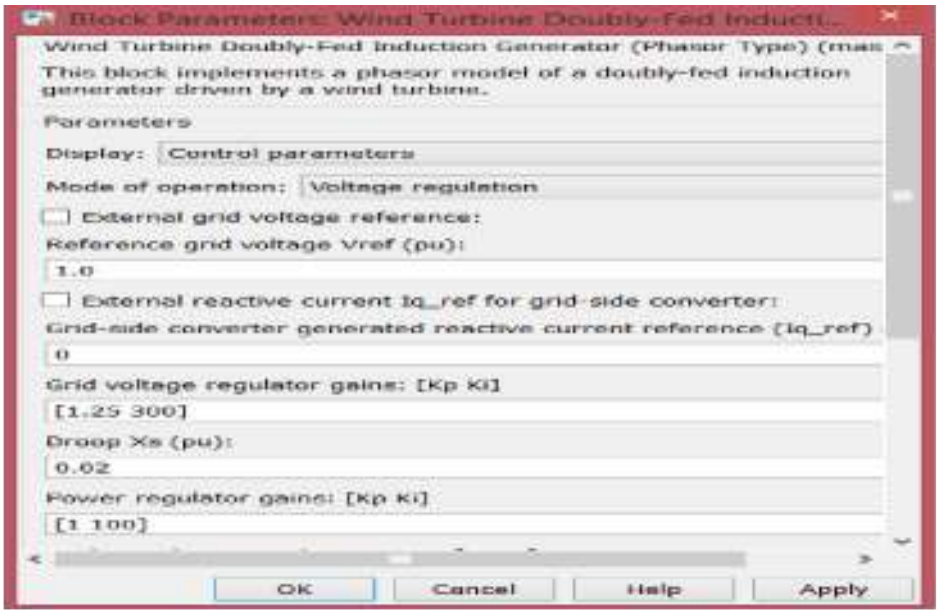


Figure III-8: Paramètres du système de contrôle de turbine éolienne sous SimPowerSystem

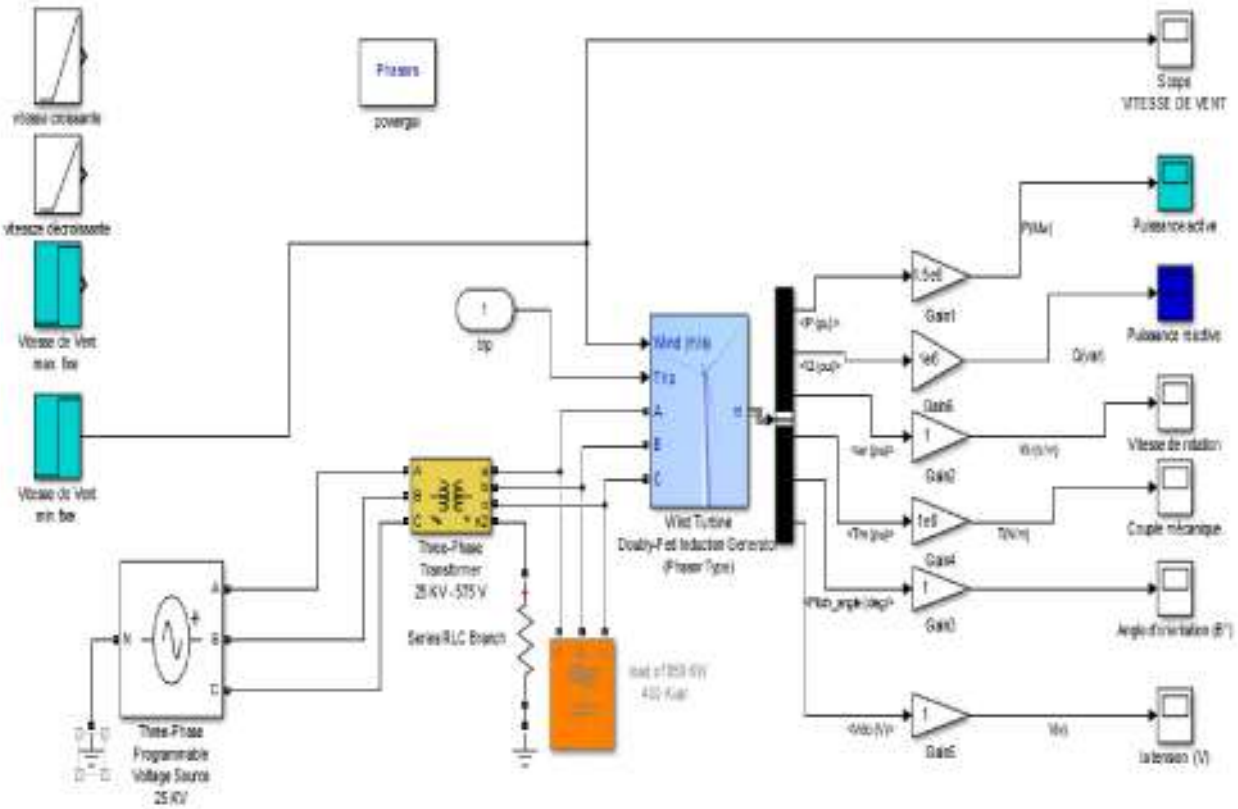


Figure III-9 : Bloc générale de simulation de système éolienne

III-4-1 Analyse du comportement dynamique du système éolienne :

Dans cette section, nous allons analyser d'abord le comportement dynamique de l'éolienne. Selon les variations climatiques (vent).

La simulation est faite en deux parties :

1- vitesse de vent croissante de 2 a 14m/s

2- vitesse de vent décroissante de14 a 2m/s

Le but de cette simulation est d'étudié l'effet de variation de vitesse de vent sur le système éolienne dans un réseau électrique, on étudiant la stabilité en tension et la variation en puissances (active et réactive), La vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique, l'angle des pales (pitch contrôle).

III-4 Interprétation des résultats :

Le réseau étudié comporte une éolienne, une source triphasée (ex : GD), des charges. La source triphasée alimente la charge à travers un transformateur réducteur de tension, et l'éolienne alimente une autre charge directement. Les paramètres de transformateur sont donnés dans l'annexe. 1

III-4-1-2 vitesse de vent croissante de 2 a 14m/s

La deuxième simulation consiste à varier la vitesse de vent entre 2 à 14 m/s

Puis on va visualiser les résultats suivants.

Paramètres de simulation : temps de simulation 50s, vitesse initiale du vent 2m/s, vitesse finale du vent 14m/s.

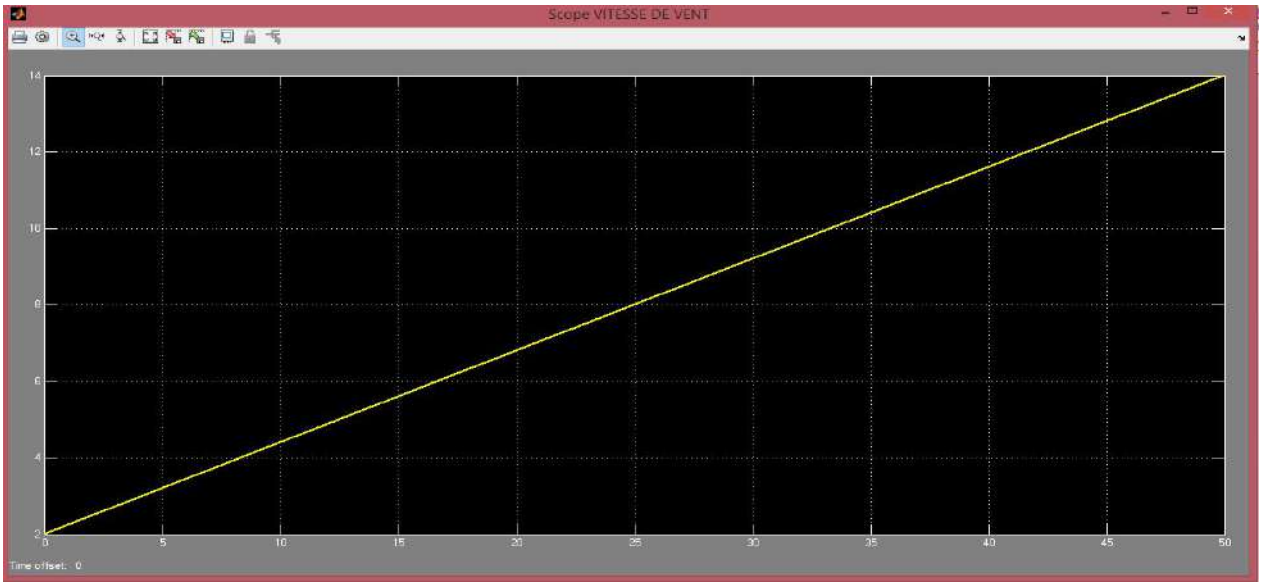
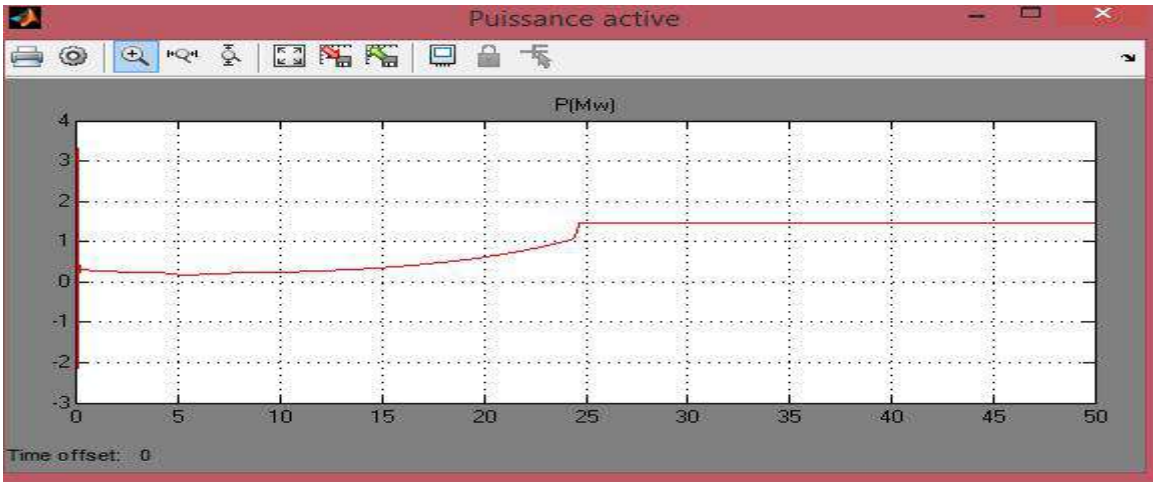


Figure III-10 vitesse de vent croissante en(M/s)



FigureIII-11 : La puissance active en(Mw)

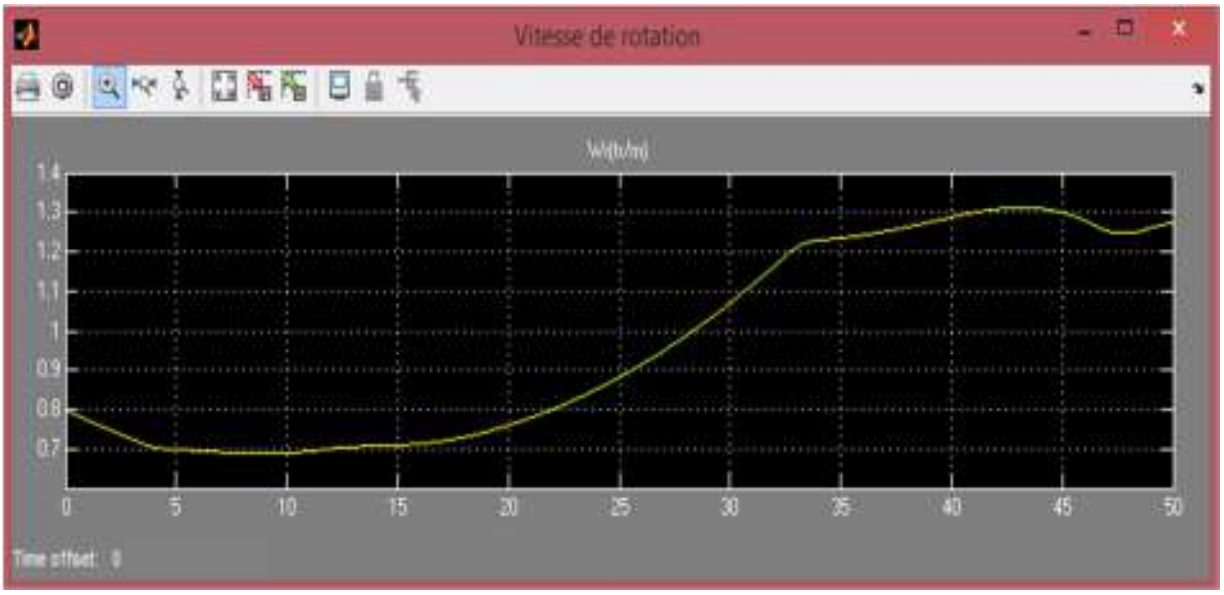


Figure III-12 vitesse de rotation de la turbine en tr/min

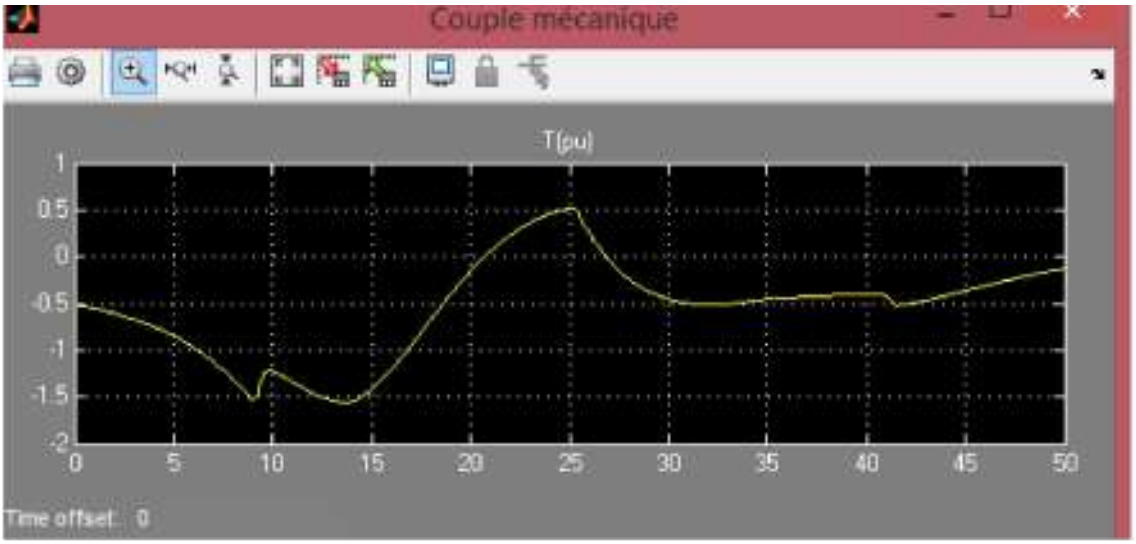


Figure III-13 couple mécanique en N.m

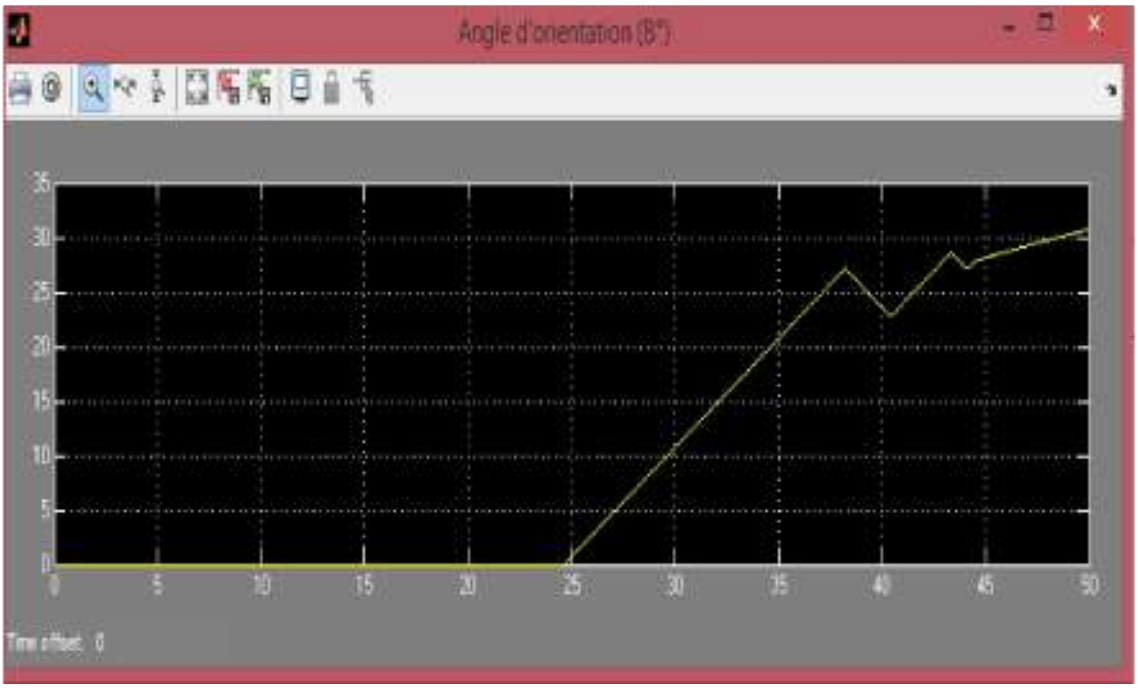


Figure III-14 variation de l'angle (B) en degré

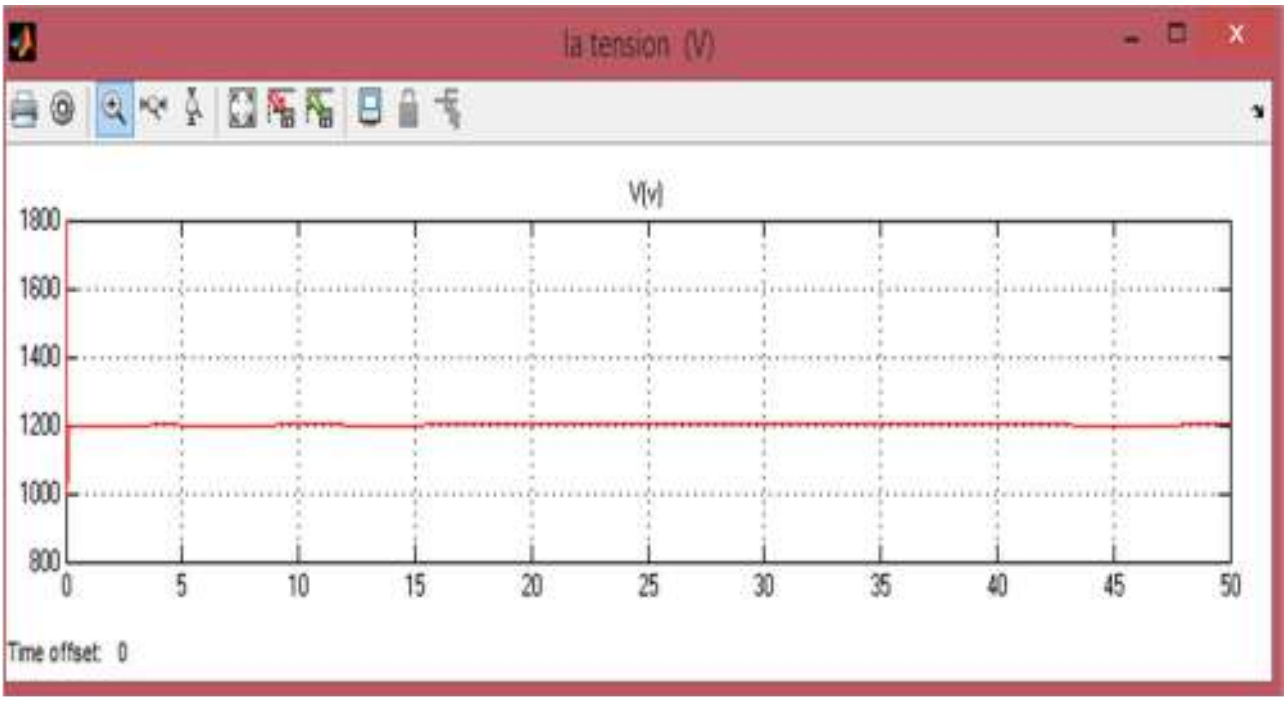


Figure III-15 La tension en(V)

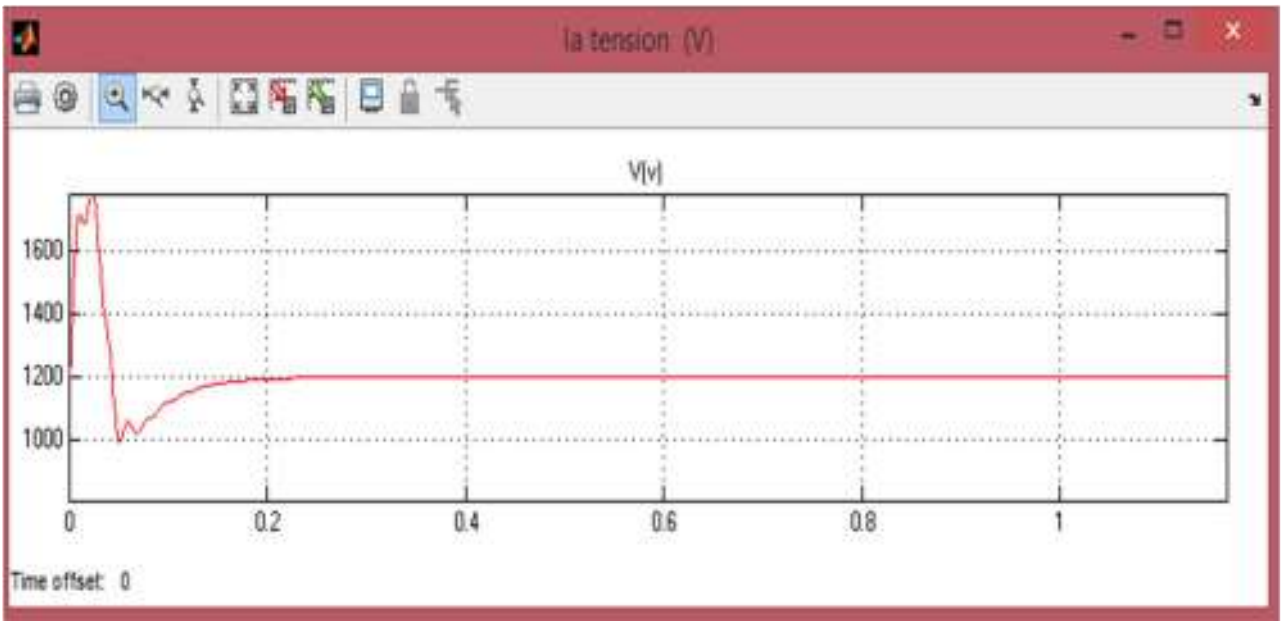


Figure III-16 Perturbation de tension au démarrage en(V)

III-4-1-3 vitesse de vent décroissante de 14 à 2m/s

La deuxième simulation consiste à varier la vitesse de vent de14 a 2m/s

Les résultats est les suivants.

Paramètres de simulation : temps de simulation 50s, vitesse initiale du vent 14m/s, vitesse finale du vent 2m/s.

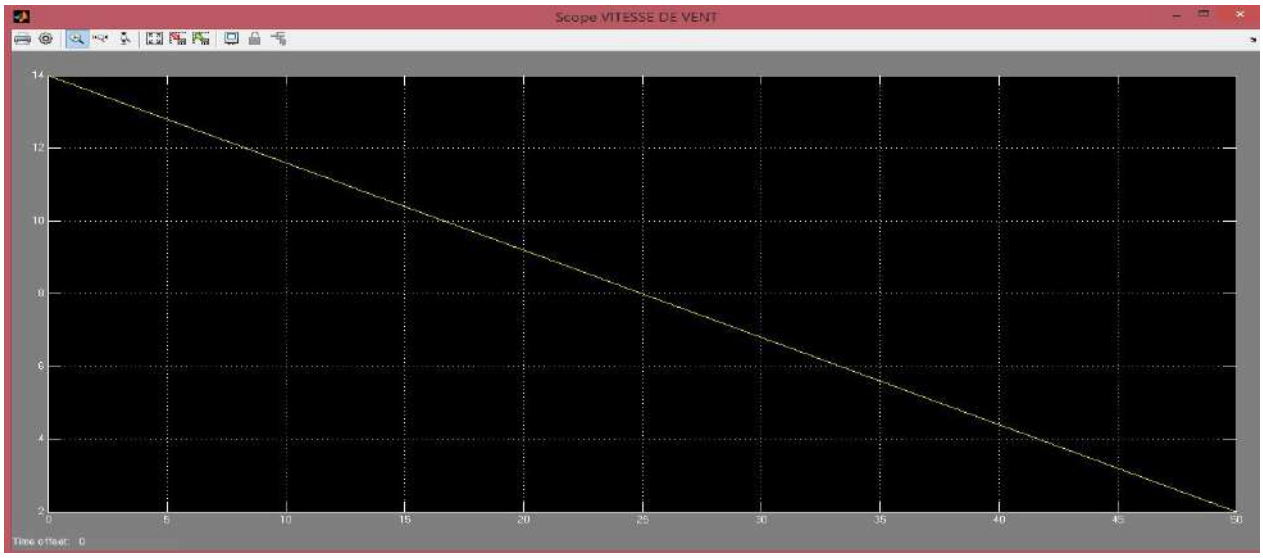


Figure III-17 vitesse de vent décroissante en(m/s)

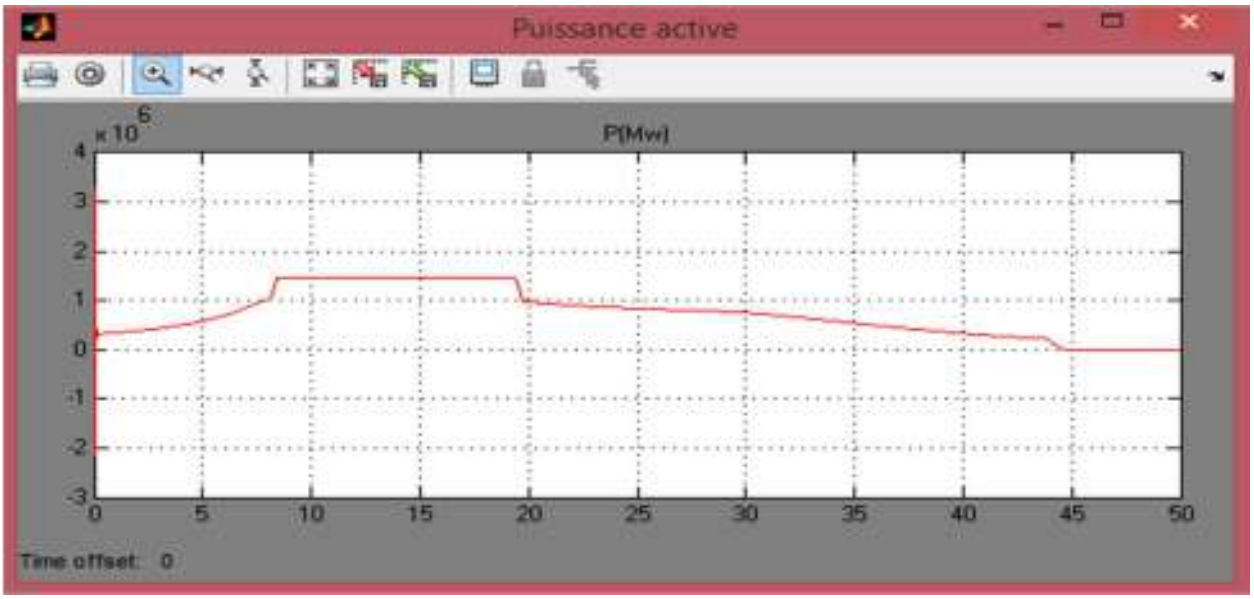


Figure III-18 puissance active en(Mw)

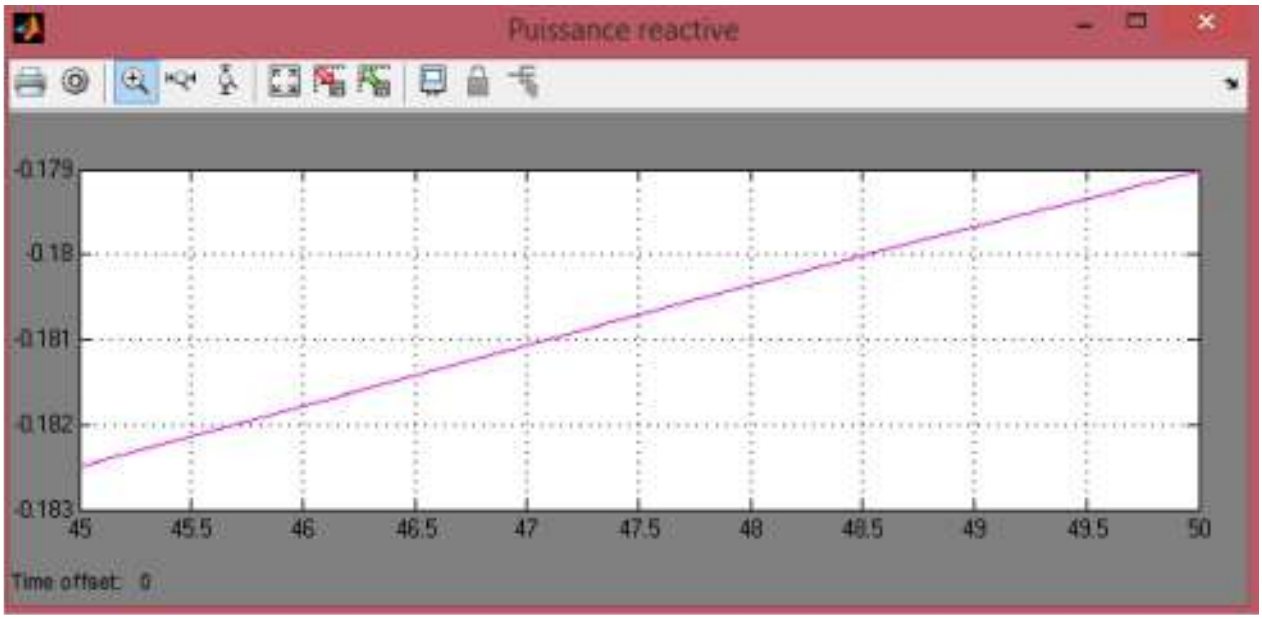
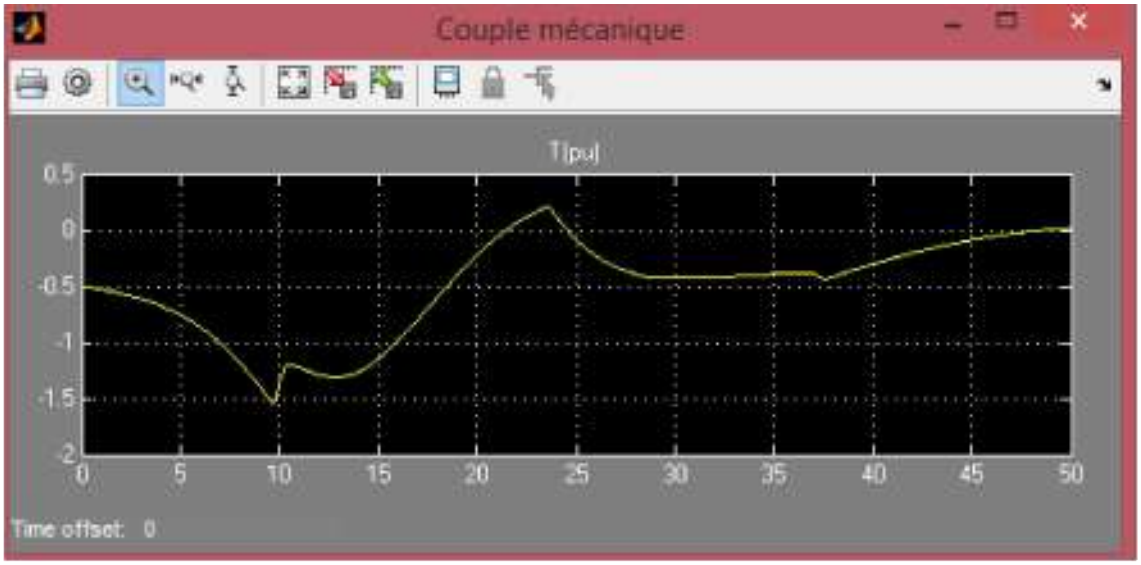


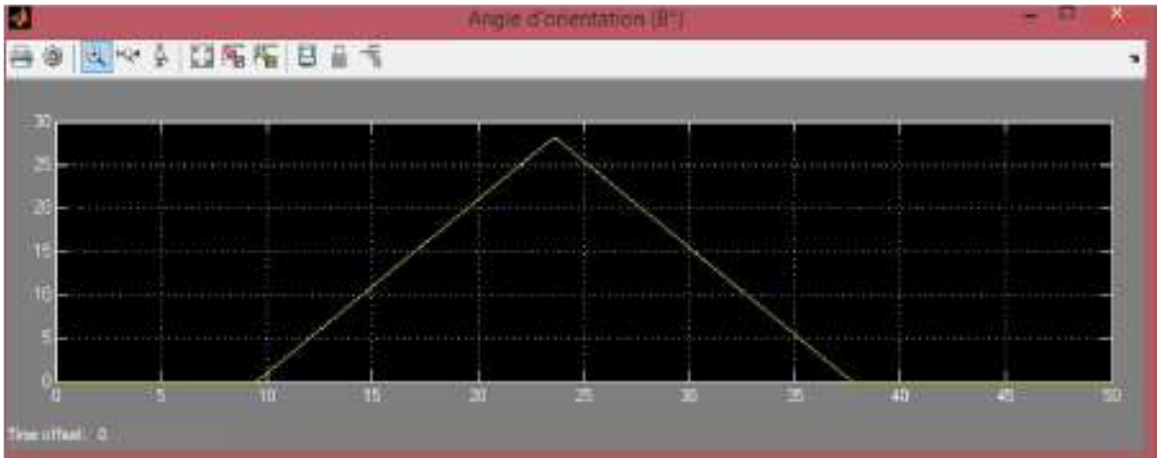
Figure III-19 puissance réactive



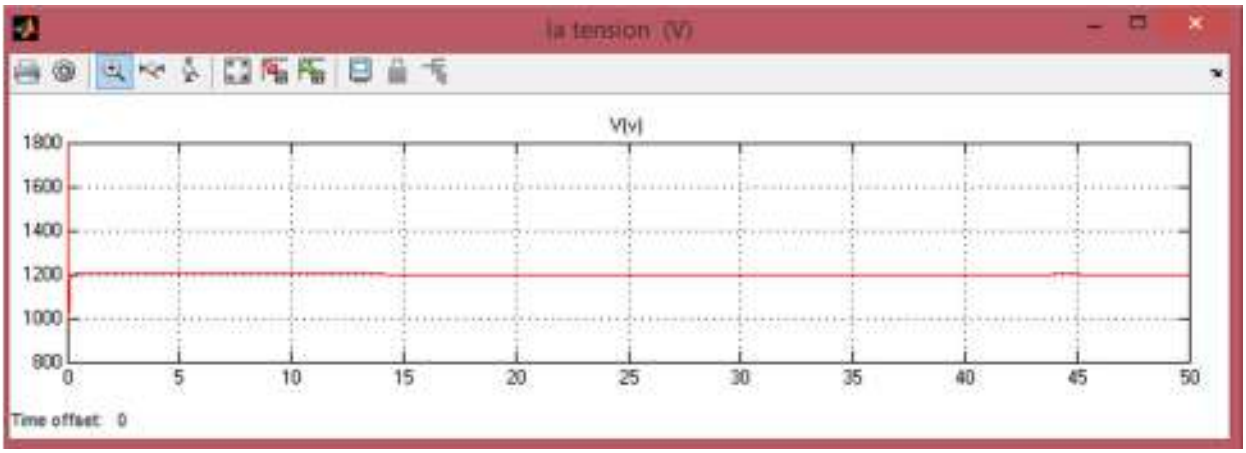
FigureIII-20 vitesse de rotation en (tr/min)



FigureIII-21 : couple mécanique Té (N.m)



FigureIII-22 : angle d'orientation



FigureIII-23 : la tension développée par la MADA (V)

III-5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation du système Éolien à base de la MADA. D'abord, une modélisation de la turbine et de la MADA a été Réalisée. En chapitre précèdent Ensuite, nous nous sommes intéressés à la présentation des différents résultats de simulation.

Les résultats obtenue montrant la souplesse de système qui soumit a plusieurs variations de vitesse de vent.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans le présent travail une étude concernant le fonctionnement d'un système éolien a été effectuée Les différents composant de système éolien, ces domaines d'application, le principe de fonctionnement De l'aérogénérateur, les avantage et les inconvénients, ces différents types on été aborder ,Des méthodes de calculs et de modélisation permettant la projection de système éolien de conversion mécanique on été présentée, Les résultats obtenus sont conforme à ceux préconisée par les constructeurs, L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels, L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols.

Pour conclure nous pouvons dire que les éoliennes sont une perspective d'avenir. Elles sont composées de beaucoup d'éléments mais en réalité leur fonctionnement est simple. De plus elles sont très intéressantes par rapport aux autres sources d'énergie comme les centrales nucléaires ou à charbon qui rejettent du CO_2 ce qui est néfaste pour l'environnement.

D'autre part, bien que les procédures pour pouvoir les installés soit assez longues, mais elles peuvent être implantées dans de nombreux endroits.

En fin nous espérant que ce modeste travail sera apprécié par nos enseignants, nos collègues étudiants du mécatronique, nous souhaitant également qu'il serve comme un document de base pour toute étude sur les éoliennes.

ANNEXE 1 :

Dans l'annexe 1, on va trouver un modèle diphasé de la machine asynchrone à cage d'écureuil, cette tache nous permet de bien représenter le comportement de la machine au niveau de simulation. Ce modèle tient compte des hypothèses simplificatrices suivantes :

- La caractéristique magnétique de la machine linéaire (circuit magnétique non saturé). Les valeurs des inductances propres et mutuelles sont indépendantes des intensités des courants. Les pertes dans le fer sont nulles.
- La variation des résistances des enroulements en fonction de la température négligeable. On prendra les valeurs correspondantes au fonctionnement sous charge nominale, après stabilisation de la température des enroulements.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer. Cela revient à considérer la variation sinusoïdale des inductances mutuelle entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.
- La symétrie de la machine.

Dans ce concept les équations générales de la machine asynchrone à cage d'écureuil dans un repère triphasé s'écrivent :

1.1 Les équations électriques :

Les équations de la tension statoriques et rotoriques sont données par

$$\begin{cases} V_{sa}(t) = R_s . i_{sa}(t) + \dfrac{d\psi_{sa}(t)}{dt} \\ V_{sb}(t) = R_s . i_{sb}(t) + \dfrac{d\psi_{sb}(t)}{dt} \\ V_{sc}(t) = R_s . i_{sc}(t) + \dfrac{d\psi_{sc}(t)}{dt} \end{cases} \text{Et} \quad \begin{cases} V_{ra}(t) = R_r . i_{ra}(t) + \dfrac{d\psi_{ra}(t)}{dt} \\ V_{rb}(t) = R_r . i_{rb}(t) + \dfrac{d\psi_{rb}(t)}{dt} \\ V_{rc}(t) = R_r . i_{rc}(t) + \dfrac{d\psi_{rc}(t)}{dt} \end{cases} \qquad (A.1)$$

Avec R_s et R_r respectivement sont les résistances statoriques et rotoriques par phase.

1.2 Les équations magnétiques :

Les équations du flux statoriques et rotoriques (équations magnétiques) peut être exprimé sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{cases}[\psi_s]=[L_s][I_s]+[M_{sr}][I_r] \\ [\psi_r]=[L_r][I_r]+[M_{rs}][I_s]\end{cases} \quad (A.2)$$

L_S l_r : Inductances propres statorique et rotorique.

M s M r : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et deux phases rotorique.

M sr : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

Avec :

$$L_s = l_s - M_s, \quad L_r = l_r - M_r, \quad M = \frac{3}{2} M_{sr} \quad (A.3)$$

$$[L_s] = M_{sr}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (A.4)$$

1.3Les équations mécaniques:

C_{em} le couple électromagnétique développé par la machine, C_r le couple résistant de la Charge, J l'inertie totale ramenée sur l'arbre de la machine et f_v le coefficient total de Frottement visqueux. Par application du principe fondamental de la dynamique, on obtient L'équation mécanique du modèle en trois phases

$$C_{em} = C_r + f_v.\omega + J.\frac{d\Omega}{dt} \quad (A.5)$$

1.4 Modèle biphasé :

L'écriture du modèle de la machine asynchrone dans un repère diphasé tournant est obtenue en utilisant les transformations normées de Park et Concordia permettant la conservation de la puissance.

La matrice $P(\theta)$ de *Park* est donnée sous la forme suivante :

$$P(\theta)=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\frac{1}{\sqrt{2}}\cos(\theta) & -\sin(\theta)\\ \frac{1}{\sqrt{2}}\cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right)\\ \frac{1}{\sqrt{2}}\cos\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right)\end{bmatrix} \qquad (A.6)$$

La matrice de Concordia (matrice de transformation directe) est donnée par :

$$[C]=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0\\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2}\\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}\end{bmatrix} \qquad (A.7)$$

Cependant les transformations proposées établissent les relations entre les flux d'axes diphasé et les flux d'axes triphasé :

$$\left[\psi_{sdq0}\right]=[P(\theta_s)]\left[\psi_{sabc}\right] \text{ et } \left[\psi_{rdq0}\right]=[P(\theta_r)]\left[\psi_{rabc}\right] \qquad (A.8)$$

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

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \dfrac{d}{dt}\psi_{ds} - \dot{\theta}_s \psi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \dfrac{d}{dt}\psi_{qs} - \dot{\theta}_s \psi_{ds} \\ V_{dr} = 0 = R_r I_{dr} + \dfrac{d}{dt}\psi_{dr} - \dot{\theta}_r \psi_{qr} \\ V_{qr} = 0 = R_r I_{qr} + \dfrac{d}{dt}\psi_{qr} - \dot{\theta}_r \psi_{dr} \end{cases} \qquad (A.9)$$

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \qquad (A.10)$$

Avec : θ Angles du champ tournant et du positon du rotor par rapport au stator.

L'équation mécanique est donnée par :

$$C_{em} = C_r + f_v.\omega + J.\frac{d\Omega}{dt} \qquad (A.11)$$

Le couple électromagnétique s'exprime en fonction des inductances cycliques, des flux et du Nombre de pair de pôles p de la machine par la relation :

$$C_{em} = \frac{\rho M}{L_s L_r - M^2}\left(\psi_{dr}.\psi_{qs} - \psi_{qr}.\psi_{ds}\right) \qquad (A.12)$$

ANNEXE 2 :

2.1Grandeurs nominales :

Tension nominale du système	*220V-380V*
Fréquence nominale	*50Hz*
Puissance nominale du MAS	*250KVA*
Puissance nominale du MS	*300KVA*
Courant nominale pour la MAS	*378A*
Courant nominale pour la MS	*454A*
Banc de capacité	*C=0,00264F*

2.2Paramètres de la machine asynchrone : les grandeurs sont en PU

Résistance statorique (R_s)	*0.016*
Résistance rotorique (R_r)	*0.016*
Inductance cyclique au stator (L_s)	*0.06*
Inductance cyclique au rotor (L_r)	*0.06*
Inductance mutuelle (L_m)	*3.5*
Pair de pôles	*2*

2.3Paramètres de la machine synchrone: les grandeurs sont en PU

Résistance statorique (R_s)	**0.0036**
Réactance $X_d, X_d^{'}, X_d^{''}$	**1.56, 0.296, 0.177**
Réactance $X_q, X_q^{'}$	**1.06, 0.177**
Réactance X_l	**0.052**
Pair de pôles	**2**

Annexe3 :

Les paramètres de simulation :

Les paramètres de transformateur 25k-575vcouplée au charge principale

