

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



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la Technologie

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

Master

En

« Génie électrique »

Option :

« Automatique et systèmes de production »

Titre :

Commande d'une éolienne basée sur la machine asynchrone à
double alimentation.

Réalisé par :
BOUDERBALA Abderahmane
LABDI Saifeddine

Encadré par : Mr K.Bourguig

Année Universitaire 2015/2016

Dédicace

Le travail modeste est dédié :

A la mémoire de mon père ;

A ma chère mère ;

*A tous mes proches de la famille « BOUDERBALA »,
et plus particulièrement, mes sœurs et mes frères
tout à son nom.*

*A tous mes chers amis et mes collègues de l'université
de khemis milina*

*Et à tous ce qui ont enseigné moi au long de ma vie
scolaire.*

Abderahmane

DÉDÉCACE

*Je dédie mon travail avant tout à mes chers Parents
qui m'ont soutenu pendant toute la durée de ces
longues études, « Que Dieux me les protègent ».*

À Mes chers Frères et Sœurs.

À toute la Famille LABDI. Spéciale.

À mes collègues dès L'université de khemis miliana.

À tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce mémoire

saïfeddine

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu, notre créateur, de nos avoir donné les forces, la volonté et le courage d'accomplir ce travail modeste.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur (Mr.Bourguig) qui proposé thème de ce mémoire, pour ses conseils et ses dirigés du début à la fin de ce travail.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Finalement, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui nous ont toujours soutenus et à tout ce qui participe de réaliser ce mémoire.

Ainsi que l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation.

LISTE DES SYMBOLES

\vec{F} : Vecteur force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable.

V_1, V_2 : Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne.

ρ : Densité de l'air 1.225 kg.m^{-3} .

S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne.

R : Rayon du rotor éolien.

G : Gain du multiplicateur.

m : Masse d'air traversant le rotor éolien.

P_m : Puissance extraite par le rotor éolien

P_{mt} : Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé.

C_p : Coefficient de puissance de l'éolienne.

λ : Vitesse relative de l'éolienne.

P_{mg} : Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice.

\vec{V} : Vecteur vitesse du vent.

β : Angle de calage des pales d'une éolienne à axe horizontal.

i : Angle d'incidence des pales d'une éolienne à axe horizontal.

\vec{V}_{rot} : Composante de la vitesse du vent due à la rotation de la turbine.

\vec{V}_{res} : Résultante des vecteurs \vec{V} et \vec{V}_{rot} .

\vec{F}_{ax} : Vecteur force représentant la poussée axiale sur une pale.

\vec{F}_{rot} : Vecteur force représentant la poussée en direction de la rotation sur la pale.

\vec{F}_{res} : Résultante de \vec{F}_{ax} et \vec{F}_{rot}

g : Glissement d'une machine asynchrone.

f, f_2 : Fréquence statorique et rotorique.

R_s, R_r : Résistance d'une phase statorique et rotorique.

L_s, L_r : Inductances cycliques statorique et rotorique.

L_m : Inductance mutuelle cyclique stator-rotor (magnétisante).

M_s, M_r : Inductances mutuelles stator-stator et rotor-rotor.

\vec{I} : Vecteur courant électrique.

C_e, C_r, C_f : Couple électromagnétique, couple résistant et couple de frottement.

J : Moment d'inertie de la machine.

f_r : Coefficient de frottements visqueux de la machine.

p : Nombre de paires de pôles de la MADA.

V_s : Module du vecteur tension statorique.

V_{DC} : Tension aux bornes du condensateur du filtre.

V_{red} : Tension redressée.

$V_{S_{A,B,C}}, V_{r_{a,b,c}}$: Tensions triphasées statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.

$I_{S_{A,B,C}}, I_{r_{a,b,c}}$: Courants triphasés statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.

$\phi_{S_{A,B,C}}, \phi_{r_{a,b,c}}$: Flux triphasés statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.

Ω, Ω_s : Vitesse de rotation de la machine, vitesse de synchronisme en rad/sec.

N_s, N_r : Vitesse de rotation de la machine, vitesse de synchronisme en tr/min.

$\omega_s, \omega_r, \omega_{sl}$: Pulsations électriques des grandeurs statoriques, rotoriques et de glissement.

$\theta_s, \theta_r, \theta_{sl}$: Angles relatifs aux pulsations : statorique, rotorique et de glissement.

θ_0 : Angle électrique initial entre stator et rotor imposé pour le filtrage actif des harmoniques.

$V_{S_{d,q}}, V_{r_{d,q}}$: Tensions statoriques et rotoriques diphasées dans un repère tournant.

$I_{S_{d,q}}, I_{r_{d,q}}$: Courants statoriques et rotoriques diphasés dans un repère tournant.

I_α, I_β : Composantes diphasées du courant dans le repère de Concordia.

$\hat{I}_\alpha, \hat{I}_\beta$: Composantes diphasées du courant filtré dans le repère de Concordia

$\phi_{S_{d,q}}, \phi_{r_{d,q}}$: Flux statoriques et rotoriques diphasés dans un repère tournant.

L_f : Inductance du filtre LC.

C_f : Capacité du filtre LC

P_s, Q_s : Puissances active et réactive statoriques de la MADA.

P_{mes}, Q_{mes} : Puissances électriques mesurées à la sortie du MADA.

P_{ref}, Q_{ref} : Puissances électriques de références de la MADA.

v_2, v_3 : Termes de couplage entre les axes d et q.

v_1, v_4 : Perturbations à rejeter.

K_{ond}, T_{ond} : Gain statique et constante de temps du modèle de l'onduleur

$\varepsilon_d, \varepsilon_q$: Perturbations représentant la somme de v_1 et des résidus de couplage.

k_p, k_i : Gains proportionnel et intégral du régulateur PI.

w_{ij} : Poids synaptiques du neurone j .

b : Biais du neurone.

k : Rang harmonique.

Table de Matière

| | |
|----------------------------|----|
| Introduction générale..... | 01 |
|----------------------------|----|

Chapitre 1 : Généralité sur les systèmes éoliens

| | |
|---|----|
| I.1. Historique..... | 04 |
| I.2. Introduction :..... | 05 |
| I.3. L'énergie éolienne en quelques chiffres :..... | 06 |
| I.3.1. L'énergie éolienne pour quoi faire ?..... | 06 |
| I.3.2. situation actuelle :..... | 07 |
| I.3.3. Développement de l'énergie éolienne dans le monde :..... | 10 |
| I.4. Définition d'un système éolien..... | 12 |
| I.5. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne :..... | 13 |
| I.5.1. Définition de l'énergie éolienne :..... | 13 |
| I.5.2. Principaux composants d'une éolienne :..... | 14 |
| I.5.3. Principe de fonctionnement d'une éolienne :..... | 16 |
| I.5.4. Emplacement des parcs éoliens :..... | 18 |
| I.5.5. Taille des aérogénérateurs :..... | 19 |
| I.6. Quelques notions sur le vent :..... | 19 |
| I.7. Les différents types d'éoliennes :..... | 21 |
| I.7.1. Eoliennes à axe vertical :..... | 21 |
| I.7.2. Eoliennes à axe horizontal :..... | 22 |
| I.8. Classement des éoliennes :..... | 24 |
| I.8.1. Les éoliennes à vitesse fixe :..... | 24 |
| I.8.1.1. Les éoliennes à décrochage aérodynamique :..... | 25 |
| I.8.1.2. Les éoliennes à pales orientables :..... | 26 |
| I.8.2. Les éoliennes à vitesse variable :..... | 27 |

| | |
|--|----|
| I.8.2.1. Principe de fonctionnement : | 27 |
| I.8.2.2. Intérêt de la vitesse variable : | 28 |
| I.9. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique : | 29 |
| I.9.1. Loi de Betz : | 29 |
| I.9.2. Modèle de la turbine par simulation : | 32 |
| I.10. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne : | 34 |
| I.10.1. Bilan des forces sur une pale : | 34 |
| I.10.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne : | 35 |
| I.10.2.1. Système à décrochage aérodynamique "stall" : | 35 |
| I.10.2.2. Système d'orientation des pales "pitch" : | 36 |
| I.11. Le multiplicateur : | 37 |
| I.12. Les dispositifs de stockage de l'énergie éolienne : | 37 |
| I.13. Avantages : | 38 |
| I.14. Inconvénients : | 39 |
| I.15. Conclusion : | 40 |

Chapitre 02 : Etude de Modélisation de la MADA

| | |
|--|----|
| II.1 Introduction : | 43 |
| II.2 Modèle de la Machine Asynchrone a Double Alimentation : | 43 |
| II.3 Hypothèses simplificatrices : | 44 |
| II.4 Modèle de la MADA dans le repère abc : | 45 |
| II.5 Changement de repère : | 47 |
| II.5.1 La transformation de Park : | 47 |
| II.6 Choix du référentiel : | 49 |
| II.6.1 Modèle biphasé de la MADA lié au champ tournant : | 50 |
| II.6.2 Mise sous forme d'équation d'état : | 51 |
| II.7 Association de la MADA avec un onduleur à MLI : | 52 |

Chapitre 3 : Commande de la génératrice Asynchrone à Double Alimentation

| | |
|---|----|
| III.1 Introduction : | 57 |
| III.2 Commande vectorielle de la MADA..... | 57 |
| III.2.1 Application de la commande vectorielle à flux statorique orienté..... | 58 |
| III.3 Hypothèse de travail : | 62 |
| III.4 Définition de cahier des charges : | 64 |
| III.5 Mise en œuvre de la régulation : | 65 |
| III.5.1 Synthèse du régulateur PI : | 65 |

Chapitre 04 : Aspect Théorique du principe du « Backstepping »

| | |
|--|----|
| IV.1 Introduction..... | 69 |
| IV.2 Principe de l'approche du Backstepping adaptative : | 69 |
| IV.2.1 Application du Backstepping adaptative pour les systèmes du second ordre : | 69 |
| IV.2.2 Application du Backstepping adaptative pour les systèmes du troisième ordre : | 73 |
| IV.3 Procédure générale de conception : | 76 |
| IV.4 Application de la commande Backstepping adaptative à la génératrice à double alimentation du contrôle de la puissance active et réactive : | 77 |
| IV.5 Résultats de simulation de la commande de la MADA par régulateurs PI..... | 79 |
| IV.6 Conclusion..... | 82 |
| Conclusion : | 83 |
| Annexe..... | 85 |
| Référence Bibliographiques..... | 86 |

Résumé :

Ce travail présente la modélisation et la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour la production de l'énergie éolienne.

Dans le but de commander ce système, un modèle a été établi pour chaque composant de l'éolienne (MADA-Onduleur).

Afin d'atteindre ce but, une commande vectorielle en puissance active et réactive statorique a été élaboré. Le réglage de cette commande a été effectuée par la synthèse de deux régulateurs : PID et Backstepping.

Les performances du dispositif ont été comparées en termes de suivi de consigne et rejet de perturbations.

Mot clé : machine asynchrone à double alimentation(MADA), éolienne, Backstepping adaptative.

Introduction générale :

L'énergie électrique est un élément crucial pour tout développement socio-économique. Elle est devenue dans la vie quotidienne des populations, notamment dans les pays développés, une forme d'énergie dont on ne peut se passer.

Vu l'ampleur de l'industrialisation de ces dernières décennies, la multiplication des appareils domestiques de plus en plus gourmands en consommation d'énergie électrique, la demande en énergie électrique est devenue très importante. Face à cela et avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructif pour l'environnement, les pays industrialisés ont massivement fait recours aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques traditionnelles, mais le risque d'accident nucléaire (comme la catastrophe de Tchernobyl à l'Ukraine du 26 avril 1986 qui reste gravée dans la mémoire commune), le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

Face à ce dilemme, il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement. C'est ainsi que les pays industrialisés se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables comme le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique, ... Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante. Après des siècles d'évolution et des recherches plus poussées depuis quelques décennies, plusieurs pays se sont, aujourd'hui résolument tournés vers l'énergie éolienne. Les plus avancés dans le domaine dans le monde sont respectivement : l'Allemagne, l'Espagne, les Etats-Unis, l'Inde, la Chine et le Danemark. Avec certains projets d'énergie éolienne développés ("offshore", au large des côtes) de grandes centrales éoliennes fournissent de l'électricité dans certaines parties du monde, à un prix concurrentiel à celui de l'énergie produite par les installations conventionnelles (par ex. : les centrales nucléaires et les centrales thermiques au mazout ou au charbon). Par contre en Afrique, le développement de l'énergie éolienne n'a connu aucune évolution et pourtant les ressources n'y manquent pas et la

technologie accessible, sauf la volonté et le manque de prise de conscience de la majorité des autorités africaines.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type asynchrone dans un système éolien. Le premier chapitre est consacré à des statistiques sur le développement de l'énergie éolienne dans le monde, puis nous allons nous intéresser à l'état actuel des avancées technologiques qui ont permis la construction et le fonctionnement de ces aérogénérateurs, suivi par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs qui leur sont associés.

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Pour atteindre ces objectifs, le second chapitre est consacré à l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) à vitesse variable dans un système éolien, la topologie et les domaines d'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation ainsi la modélisation dans un repère biphasé (q,d) lié au synchronisme à l'aide de la transformation de PARK sont proposées.

Le troisième chapitre présente une stratégie de régulateur PI, Le quatrième chapitre est consacré à une régulateur Backstepping adaptative, et interprétation des résultats.

Chapitre 01 :

GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTEMES ÉOLIENS

I.1. Historique

Le vent est engendré par les variations de la densité et de la pression de l'air, dues au réchauffement inégal de la terre par le soleil, et par la rotation de la terre; il s'agit donc d'une ressource naturelle renouvelable. Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grande quantité d'énergie. Les moulins à vent ont servi pendant des milliers d'années à capturer une partie de cette énergie pour accomplir différents travaux utiles. Les premiers moulins à vent étaient à axe vertical. Ils ont été employés dans les montagnes d'Afghanistan pour moulinier des grains depuis le 7^{ème} siècle avant Jésus Christ. Ce type de moulins est constitué d'un arbre et de lames horizontaux tournant dans le plan vertical.

A partir de la Perse et du Moyen-Orient, les moulins à vent à axe horizontal se sont répandus à travers les pays méditerranéens et l'Europe Centrale.

Le premier moulin à vent à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1180, en France en 1190, en Allemagne en 1222 et au Danemark en 1259. En Europe, les performances des moulins à vent ont été constamment améliorées entre le 12^{ème} et le 19^{ème} siècle. Vers 1800, environ 20000 moulins à vent étaient en service en France, et au Pays Bas 90% de l'énergie utilisée dans l'industrie provenait du vent. Vers la fin du 19^{ème} siècle, des moulins à vent d'un rotor de 20 à 30 mètres de diamètre étaient présents en Europe. Ils étaient utilisés non seulement pour moulinier des grains mais aussi pour le pompage d'eau.

L'industrialisation a mené à la disparition progressive des moulins à vent, même si en

1904 l'énergie éolienne fournissait encore 11% de l'énergie industrielle hollandaise et l'Allemagne avait plus de 18000 unités installées [1].

Par ailleurs, la construction d'éoliennes multipales ne se développe pas sur le vieux continent mais en Amérique où elle apparaît en 1870. Elle conquiert tout le pays et revient en Europe, lieu de sa conception, en 1876, où elle s'implante alors, sous le nom de moulin Américain.

Il ne fait aucun doute que les moulins à vent ont connu dans le passé, un

grand succès. Ils ont fourni à l'homme l'énergie mécanique qui manquait à l'époque, à la réalisation de ses desseins. Mais avec l'invention de la machine à vapeur, du moteur à explosion et du moteur diesel, le développement de l'électricité, leur exploitation est négligée et souvent abandonnée. L'utilisation du vent semble par conséquent de plus en plus délaissée et son avenir très compromis [2].

Cependant l'histoire réserve parfois des surprises, car après la crise pétrolière de 1974, avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, l'énergie éolienne revient au premier plan de l'actualité et connaît un développement galopant. On cherche surtout à l'utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques conventionnelles. Ainsi la demande mondiale d'éoliennes connaît une croissance rapide depuis une quinzaine d'années ; la majorité de la demande découle du souci d'aménager des centrales électriques utilisant des combustibles « moins polluants ». On aménage maintenant des parcs à éoliennes multiples produisant plusieurs mégawatts. Au cours des dix dernières années, la puissance typique de génération d'électricité pour une seule éolienne est passée d'environ 100 kW à 2 MW ou davantage. Entre 1995 et la fin de

2003, environ 76% des nouvelles connections d'aérogénérateurs au réseau étaient installées en Europe.

I.2. Introduction :

Bien que connue et exploitée depuis longtemps, l'énergie éolienne fut complètement négligée pendant 1^{ère} industrielle, au profit quasi exclusif, si l'on excepte l'hydroélectricité, des énergies fossiles. L'énergie cinétique du vent peut être convertie directement en énergie mécanique et être utilisable par exemple dans les anciens moulins à vent ou pour actionner des pompes. Mais, de nos jours, on la transforme en énergie électrique par l'emploi d'aérogénérateurs. Le nouvel intérêt porté à l'énergie éolienne depuis la moitié des années 70 résulte de deux préoccupations : d'une part, la protection de l'environnement et l'économie des combustibles fossiles qui en résulte. D'autre part, l'évolution des technologies rend la conversion de cette énergie de plus en plus

rentable et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux sources traditionnelles de même puissance.

Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, la technologie des aérogénérateurs continue d'évoluer [2]. Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les efforts mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. C'est le développement des variateurs électroniques qui permet de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant. Le vent est une grandeur aléatoire, de nature très fluctuante. Les variations de la puissance résultante des fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne.

De ce fait, les éoliennes sont considérées comme des génératrices de puissance variable. Connectées sur un réseau électrique, les générateurs éoliens n'imposent pas l'amplitude de la tension et ne règlent pas le rapport puissance-fréquence, autrement dit, elles ne participent pas aux services systèmes, et donc perturbent d'autant plus la stabilité des réseaux que leur taux de pénétration est important. Avec l'utilisation de l'électronique de puissance, de nouvelles technologies sont apparues pour optimiser cette génération d'énergie.

I.3. L'énergie éolienne en quelques chiffres :

I.3.1. L'énergie éolienne pour quoi faire ?

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. Depuis plus de 100 ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel.

L'énergie éolienne est considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire.

Ainsi l'homme a souvent besoin d'énergie électrique dans des proportions faibles ou importantes selon l'utilisation qu'il en fait:

Pour faire fonctionner des stations météo ou toutes autres installations électriques isolées à faible consommation, une éolienne de petite taille peut fournir cette énergie tout au long de l'année.

Pour alimenter en éclairage des maisons ou villages dans des contrées isolées exposées au vent, des installations d'éoliennes de quelques mètres de diamètre sont choses courantes.

Pour alimenter en électricité des villes tout en produisant une énergie propre, on utilise des éoliennes de plusieurs dizaines de mètres de diamètre pouvant produire jusqu'à 4.5 MW [1].

I.3.2. situation actuelle :

A l'échelle mondiale la puissance éolienne installée, insignifiante au début des années 90, atteint en fin d'année 2007 environ 93 849 MW ce qui correspond à un taux de croissance annuel moyen de 28.9 % par an depuis l'an 1993 pour une part encore très modeste de la production d'électricité mondiale. La plus grande partie de la puissance installée se trouve en Europe avec environ 57 015 MW, trois pays venant largement en tête : l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark avec respectivement environ 22 247 MW, 15 145 MW et 3 132 MW. La Grande Bretagne qui possède le premier potentiel éolien d'Europe et les Pays-Bas sont également actifs dans la filière. Hors Europe seuls les Etats-Unis ont un parc significatif de 16 819 MW, l'Inde avec 7 850 MW et la Chine avec 6000 MW. La France, avec seulement 2 455 MW de puissance installée fin 2007, figure parmi les pays européens les moins équipés (6^{ème} producteur d'énergie éolienne en Europe) [WWEA], bien que possédant le deuxième potentiel éolien d'Europe.

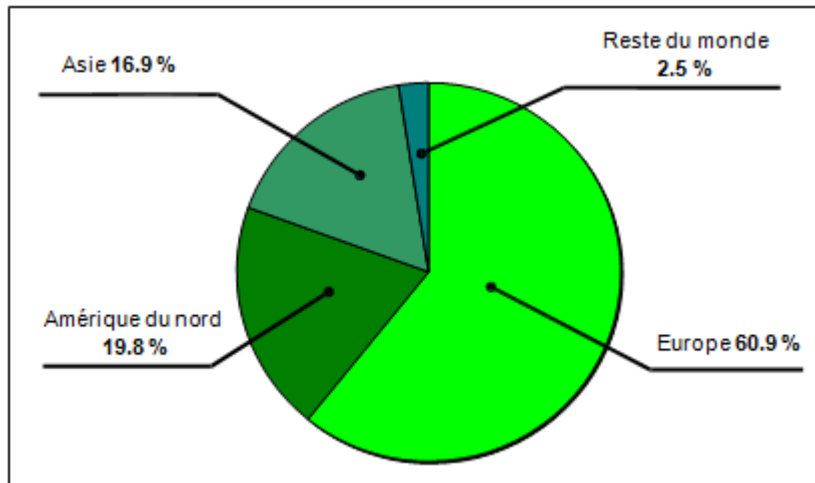


Figure I.1 : Répartition de la puissance éolienne mondiale fin 2007

À titre de comparaison, la puissance installée en énergie nucléaire est de 21 000 MW en Allemagne, de 63 000 MW en France et de 98 000 MW aux Etats-Unis (Chiffres de 2003).

Le Maroc produit 140 MW par an (2007), cette production va s'accroître dans les années à venir. Le Maroc est le premier producteur d'énergie éolienne en Afrique. Dans notre pays, les énergies renouvelables n'ont pas connu le développement que permet leur disponibilité, et qu'impose leur importance pour le développement économique et social.

Le potentiel techniquement exploitable en énergies renouvelables en Algérie est considérable et la qualité des gisements est telle que des investissements rentables peuvent être envisagés pour leur développement. Trois raisons principales plaident en faveur d'un développement des énergies renouvelables en Algérie [5]:

Elles constituent une solution économiquement viable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées notamment dans les régions du Grand Sud,

Elles permettent un développement durable du fait de leur caractère inépuisable, et de leur impact limité sur l'environnement et contribuent à la préservation de nos ressources fossiles, La valorisation de ces ressources énergétiques ne peut qu'avoir des retombées positives en matière d'équilibre régional et de création d'emplois.

L'énergie éolienne en Algérie est exploitée seulement pour le pompage de l'eau, la première expérience du pompage d'eau avec une éolienne en Afrique a été effectuée à

Adrar en 1957 à ksar Sidi-aïssa pour l'irrigation de 50 Hectares [5]. L'Algérie a un régime de vent modéré (2 à 6 m/s), selon la carte des vents présentée sur la figure I.2.

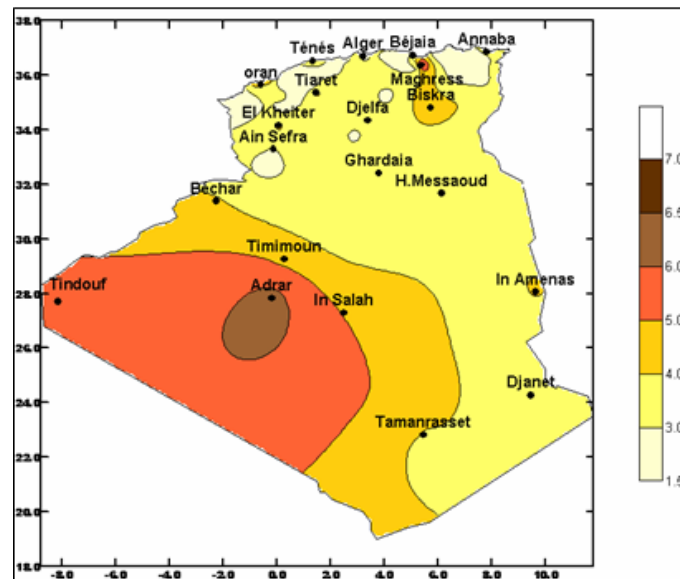


Figure I.2 : Carte de vent en Algérie.

Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux et le Sahara. Le potentiel énergétique est énorme sachant que la région d'Adrar se trouve dans un couloir de vent de 6 m/s et se prolongent jusque à 20 m/s tandis que pour In Amenas le régime n'excède pas 14 m/s [7]. Les turbines éoliennes qu'on peut utiliser pour le développement du sud Algérien sont de petite échelle, où l'installation et l'entretien sont faibles et de coût abordable. Plusieurs éoliennes sont installées actuellement à Adrar pour le pompage d'eau [5].

Ces chiffres montrent que, malgré un certain dynamisme de la filière dans plusieurs pays industrialisés où les projets se sont multipliés, sa place reste très modeste en terme de production. Son développement devrait néanmoins se poursuivre, voire s'accélérer et sans doute s'étendre en dehors du cercle des pays industrialisés, en continuant à bénéficier lorsque nécessaire d'impulsions au niveau politique, mais aussi grâce à une meilleure rentabilité des projets liée aux progrès techniques et industriels de la filière.

Sur le plan technique, la puissance unitaire des machines proposées par les constructeurs, restée longtemps inférieure au MW, est aujourd'hui couramment de 2.5 MW

et des prototypes de 5 MW sont en cours de réalisation. Ces niveaux de puissance devraient permettre d'améliorer la compétitivité des projets et d'accroître leur taille afin d'assurer, en réduisant le nombre de sites, une meilleure maîtrise des impacts environnementaux.

L'augmentation de la puissance des machines devrait également faciliter le développement des projets offshore (au bord de la mer), qui nécessitent d'importants travaux de fondation et de raccordement. Malgré le peu d'expérience et de références sur ce type d'installations, beaucoup d'espoirs sont aujourd'hui fondés sur l'éolien offshore. Ainsi l'Allemagne, qui voit la croissance de son parc à terre ralentir depuis quelques ans, mise sur la réalisation de grands parcs au large de ses côtes afin de produire en éolien 15% de ses besoins en électricité à l'horizon 2030.

I.3.3. Développement de l'énergie éolienne dans le monde :

Depuis ces dernières années, la production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier (Figure I.3). Ceci est principalement dû à deux raisons:

- Produire une énergie propre.
- Trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles.

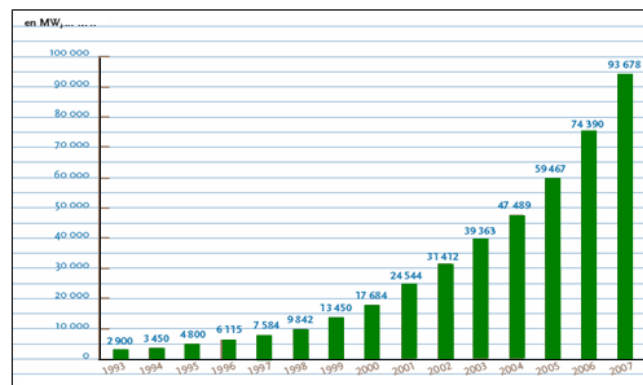


Figure I.3 : Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW.

Cependant tous les pays n'y attachent pas la même importance et n'y accordent donc pas les mêmes moyens.

L'Allemagne, leader mondial dans cette filière, continue depuis 1999 à installer une moyenne de 2 GW de puissance supplémentaire par an.

L'Espagne, depuis 2002, a adopté le rythme de l'Allemagne et développe sa puissance installée d'environ 2 GW par an également.

Le Danemark, a quasiment stoppé le développement de ses installations depuis 2003; il en est au stade d'une économie de remplacement. La production d'électricité éolienne dans ce pays représente sensiblement 20% de sa consommation d'électricité. A ce niveau, il n'est pas possible dans l'état actuel des connaissances et des techniques d'aller plus loin à cause de la variabilité imprévisible de la production d'électricité éolienne en injection directe sur le réseau.

Des recherches sont en cours pour stocker une partie de la production sous forme d'hydrogène par exemple. Ces recherches ont pour objectif de pouvoir un jour dépasser cette limite des 20 %. A noter que les émissions de CO₂ par kWh électrique du Danemark sont parmi les plus élevés d'Europe, car le reste de l'électricité y est produite par des centrales à hydrocarbure qui fonctionnent à plein régime les jours sans vent.

En 2007, la capacité éolienne installée aux États-Unis a augmenté de 45 % et 9 milliards de dollars ont été investis dans ce secteur. Les éoliennes fournissent 1 % de l'électricité américaine, soit l'équivalent de 4,5 millions de foyers.

La Chine, qui reste en 2005 le 3^{ème} plus gros producteur d'énergie électrique derrière les États-Unis (4239 TWh*) et l'Europe (3193 TWh) avec 2500 TWh produits, est devenu le 5^{ème} producteur mondial d'énergie éolienne en 2007 derrière l'Allemagne, l'Espagne ; Les États-Unis et l'Inde avec une puissance de 6000 MW. Son objectif est une puissance éolienne installée de 20 GW en 2020, soit une augmentation de plus de 1 GW par an.

Le Royaume-Uni qui voit ses ressources pétrolières de la mer du Nord diminuer rapidement année après année, a décidé d'exploiter au plus tôt son gisement éolien qui est le plus important d'Europe. Plusieurs projets en cours sont les plus importants au monde dans la situation actuelle.

La France, par sa politique de production nucléaire (98 000 MW), est en retard face à ses voisins Européens (Tableau I.1) avec 2455 MW installés jusqu'en 2007 alors que pour

2010 l'objectif est d'atteindre 13 500 MW.

| Rang | Pays (fin 2007) | Puissance (MW) |
|------|-----------------|----------------|
| 01 | Allemagne | 22 247 |
| 02 | Espagne | 15 145 |
| 03 | Danemark | 3 132 |
| 04 | Italie | 2 726 |
| 05 | Royaume-Uni | 2 389 |
| 06 | France | 2 455 |
| 07 | Portugal | 2 150 |
| 08 | Pays-Bas | 1 746 |
| 09 | Autriche | 982 |
| 10 | Grèce | 871 |
| 11 | Irlande | 805 |
| 12 | Suède | 788 |
| 13 | Belgique | 287 |

Tableau I.1 : Puissance éolienne installée dans l'Union Européenne fin 2007 en MW.

I.4. Définition d'un système éolien

Un aérogénérateur, plus communément est appelé éolien. Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, ce système connus sous l'appellation anglaise *Wind Energy Conversion Systems* (WECS), (Figure I.4). Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).

Un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

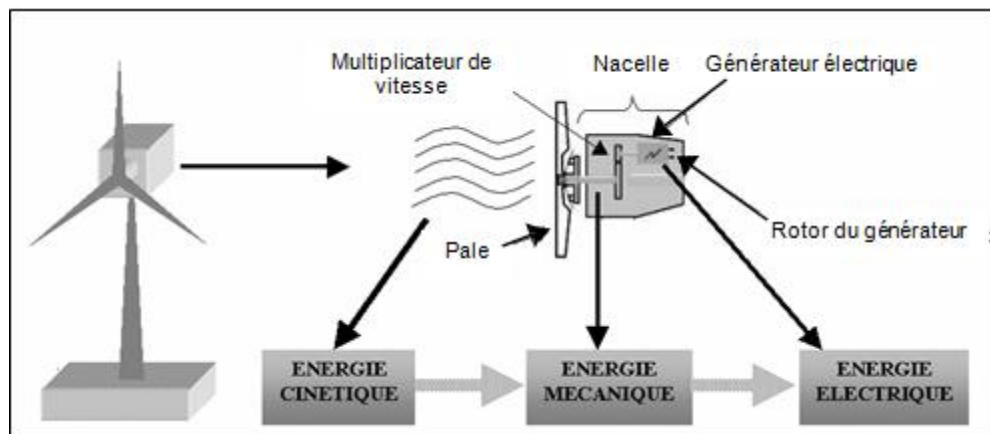


Figure I.4 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.5. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne :

I.5.1. Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [8].

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle, mât, pales et multiplicateur notamment) 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 viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

On distingue deux grands types d'éoliennes :

- Les éoliennes à axe vertical : ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [8].

- Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [3].

Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale :

- Éoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW.
- Éoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Éoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

I.5.2. Principaux composants d'une éolienne :

Une éolienne est constituée par une tour au sommet de laquelle se trouve la nacelle. Étant donné que la vitesse du vent augmente lorsque l'on s'éloigne du sol, une tour peut mesurer entre 50 et 80 m de haut.

Typiquement une éolienne de 1 MW a une hauteur de 80 mètres, ce qui correspond à la hauteur d'un immeuble de 32 étages. La tour a la forme d'un tronc en cône où, à

l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle. La nacelle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande. Tous ces éléments sont représentés sur la figure I.5.

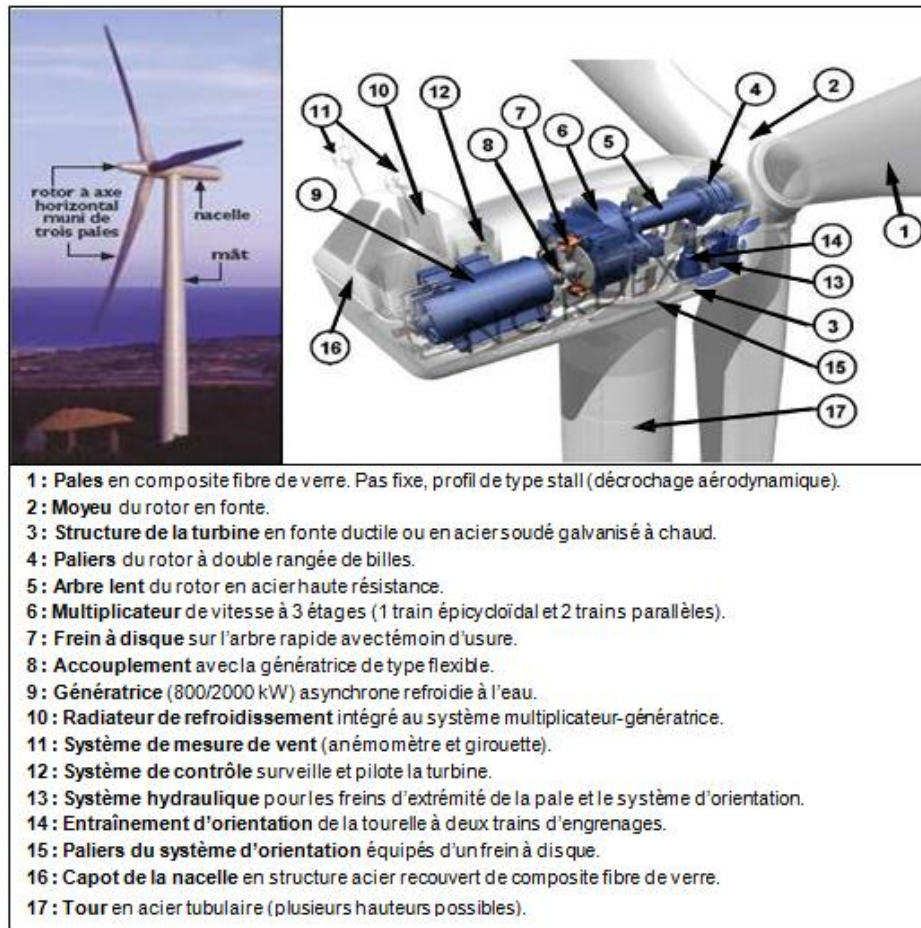


Figure I.5 : Différentes parties d'une éolienne Nordex N60 (1300 kW).

Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux:

Le mât : généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en oeuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du

rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2.3 MW: diamètre de 90 m, mât de 80 m de hauteur).

La nacelle : regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

Le rotor : formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [3].

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

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

I.5.3. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Un dispositif oriente automatiquement la nacelle face au vent grâce à une mesure de la direction du vent effectuée par une girouette située à l'arrière de la nacelle.

La turbine éolienne est munie de pales fixes ou orientables et tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 tr/min. Plus le nombre de pales est grand plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite [2]. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité. En effet, lorsque la pale supérieure atteint le point le plus extrême, elle capte la puissance maximale du vent. A ce moment, la pale inférieure traverse la zone abritée du vent par la tour. Cette disposition tend à faire fléchir l'ensemble de la turbine vers l'arrière. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales.

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

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

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

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

La génératrice (ou l'alternateur) est généralement asynchrone, et sa puissance électrique peut varier entre 600 kW et 4.5 MW.

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

Le système de contrôle-commande comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (par exemple une surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice), le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale transmis à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique.

I.5.4. Emplacement des parcs éoliens :

Les parcs éoliens se situent naturellement là où il y a un niveau de vent suffisant tout au long de l'année pour permettre une production maximale. Les côtes, les bords de mers et les plateaux offrent des conditions intéressantes en terme de vent mais il faut aussi tenir compte de l'impact sur le paysage. Pour ces raisons, lorsque c'est possible, des parcs éoliens offshore sont construits (540 MW offshore installés en Europe fin 2003). Ces derniers comportent des dizaines d'éoliennes comme on peut le voir sur la figure I.6.

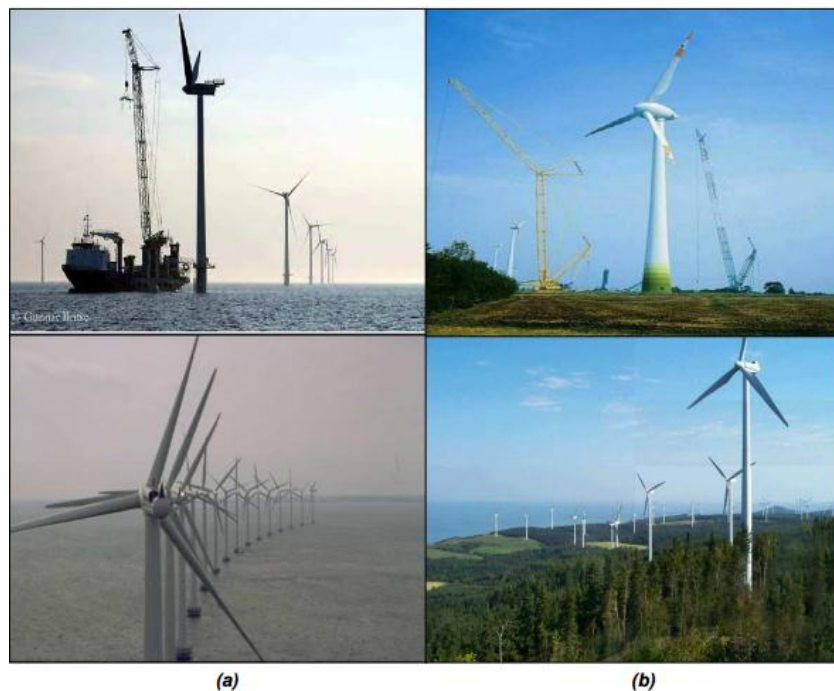


Figure I.6 : Les parcs éoliens offshore (a) et onshores (b).

I.5.5. Taille des aérogénérateurs :

Avec le développement récent et le besoin de fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent au point des éoliennes de plus en plus puissantes et donc plus grandes, ce que présente la figure I.7. Pour utiliser le maximum de la force du vent, on cherche à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum. Pour cela les éoliennes sont très haut perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent.

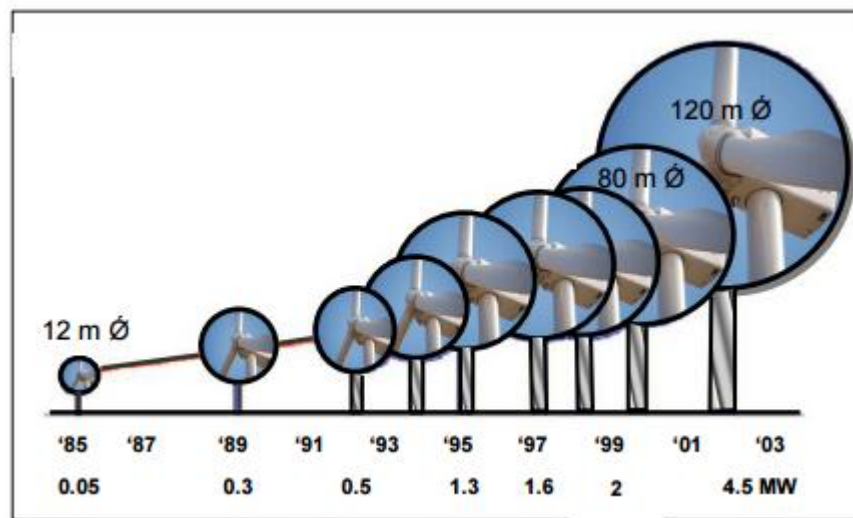


Figure : I.7 : Taille des hélices en m et puissance en MW [4].

Les plus grandes éoliennes commercialisées actuellement possèdent une hélice de plus de 100 mètres de diamètre. Cette hélice est perchée à plus de 100 mètres de hauteur pour produire jusqu'à 4.5 MW [1].

I.6. Quelques notions sur le vent :

La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers. Le vent est défini par sa direction et sa vitesse.

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant

modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents.

La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques-unes au tableau I.2 [4].

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

Tableau I.2 : Echelle Beaufort.

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude. Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s [4].

I.7. Les différents types d'éoliennes :

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

I.7.1. Eoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [9]:

Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure I.8).

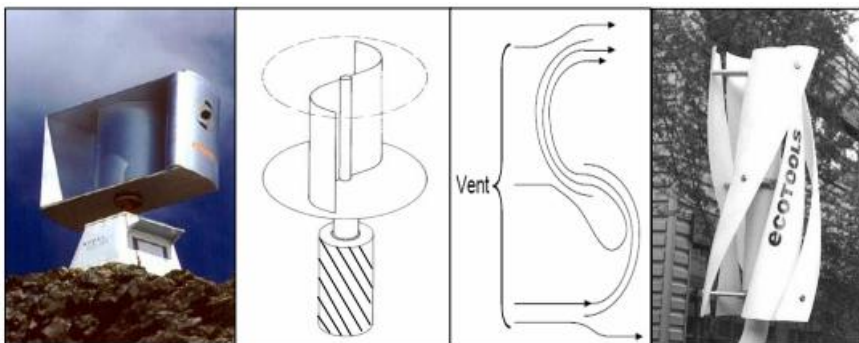


Figure I.8 : Éolienne de Savonius.

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure I.9) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du

vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

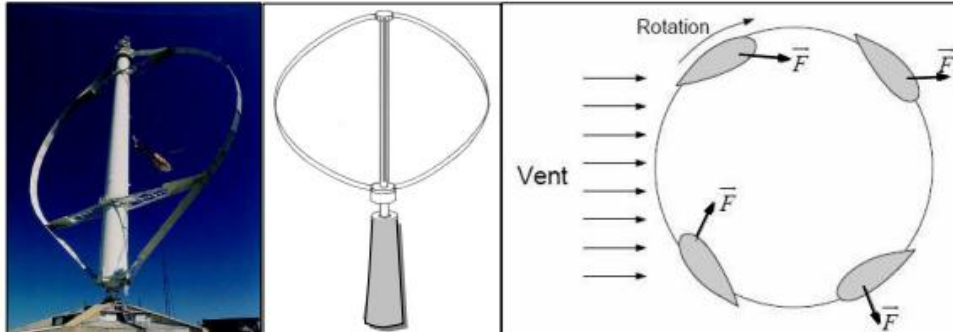


Figure I.9 : Éolienne de Darrieus

On trouve désormais des éoliennes à axes verticaux développées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Ce sont des machines de faible puissance, de 100 W à 25 kW. Elles sont destinées à des utilisations permanentes. Par exemple la charge de batteries servant à alimenter un chalet en montagne. Elles sont de conception simple et robuste et ne nécessitent pas ou peu d'entretien.

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

I.7.2. Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. 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 [3]. 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. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multi-critères [3]. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.



Figure I.10 : Éoliennes à axes horizontales.

La plupart des éoliennes actuellement installées utilisent des turbines à axe horizontal. Le tableau I.3 propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice. A titre de comparaison, la puissance d'une tranche de centrale nucléaire est de 1400 MW environ.

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

Tableau I.3 : Classification des turbines éoliennes.

I.8. Classement des éoliennes :

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse est variable. La partie suivante décrit d'une manière assez générale le fonctionnement de ces deux procédés.

I.8.1. Les éoliennes à vitesse fixe :

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse $\Omega_{méc}$ est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice (Figure I.11).

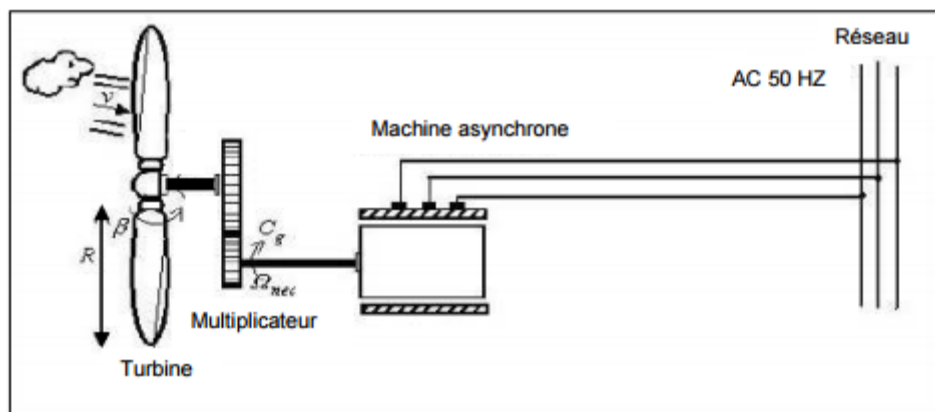


Figure I.11 : Éolienne directement connectée au réseau.

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper-synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique ($\Omega_{méc}$) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme $\Omega_s=1500$ tr / min, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne (Figure I.12) [2].

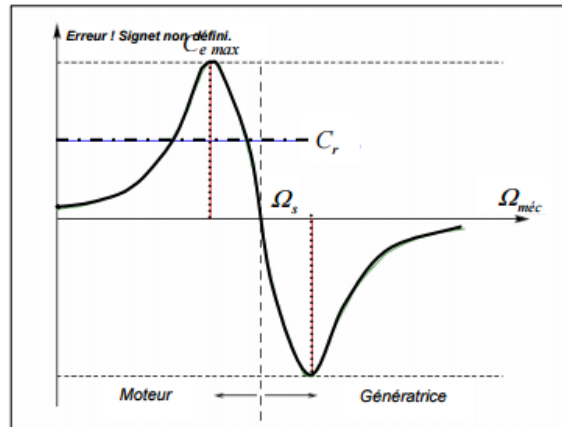


Figure I.12 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone.

On peut distinguer deux technologies d'éoliennes à vitesse fixe : Les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables.

I.8.1.1. Les éoliennes à décrochage aérodynamique :

Les éoliennes à décrochage aérodynamique (stall) génèrent une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspond en général à la puissance nominale de la machine. En dessous de cette valeur, la puissance fournie croît avec la vitesse du vent. Au-delà, la puissance fournie décroît avec la vitesse du vent (Figure I.13) [2].

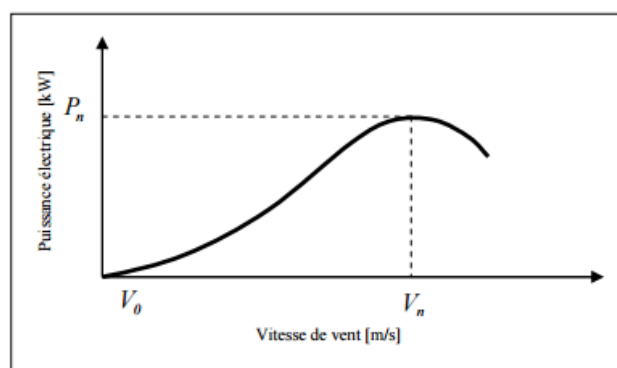


Figure I.13 : Génération à puissance électrique variable (Pales fixes, décrochage aérodynamique).

- P_n : la puissance nominale de l'éolienne.
- V_0 : la valeur de vitesse pour laquelle le rotor de la turbine commence à tourner.
- V_n : la valeur de vitesse pour laquelle la puissance nominale est atteinte.

Pour obtenir cette caractéristique de puissance, les pales (fixes) sont conçues avec un profil qui permet d'obtenir une décroissance brusque de la portance à partir d'une vitesse donnée pour laquelle la puissance doit être diminuée. Au-delà de cette vitesse de vent, la puissance diminue très rapidement et un fonctionnement à puissance nominale constante n'est donc pas possible.

I.8.1.2. Les éoliennes à pales orientables :

L'utilisation d'un système d'orientation des pales permet, par une modification aérodynamique, de maintenir constante la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent et pour une vitesse de vent supérieure à V_n (Figure I.14) [2].

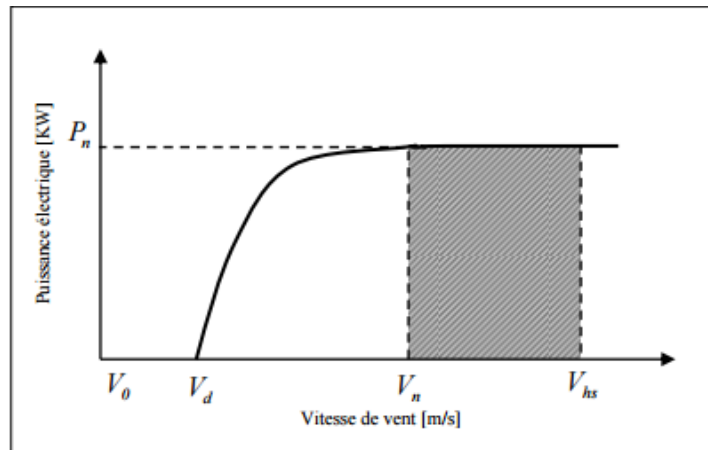


Figure I.14 : Génération à puissance électrique constante (pales orientables).

Avec :

- V_d : la vitesse pour laquelle le générateur démarre.
- V_n : la vitesse pour laquelle le générateur commence à fournir de la puissance.
- V_{hs} : la valeur de la vitesse pour laquelle la machine doit être arrêtée.

La figure I.15 montre la caractéristique mesurée de la puissance électrique produite en fonction de la vitesse du vent. Cette dernière est obtenue à partir des fichiers de vents enregistrés par E. Vasseur et J.M. Grave de NORELEC (Verquin) en 1997 sur une éolienne de 300 kW de la ferme éolienne de Dunkerque (nord du France). Les mesures de vitesses sont celles enregistrées au sommet de l'éolienne [2].

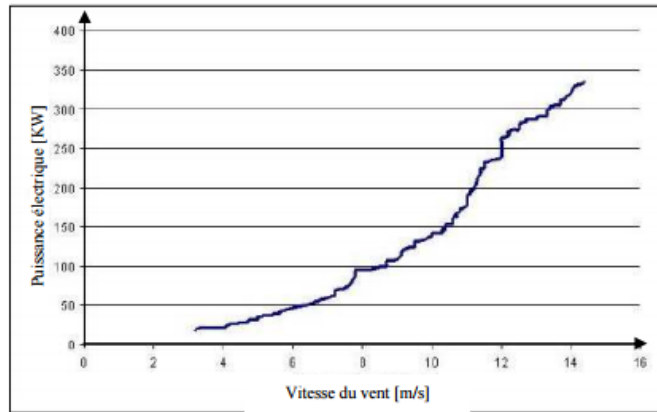


Figure I.15 : Exemple de caractéristique mesurée d'une éolienne à puissance constante située à Dunkerque.

On constate à partir de cette caractéristique que la puissance mesurée est exponentielle en fonction de la vitesse du vent, pour atteindre une valeur maximale d'environ 335 kW. L'orientation des pales n'est pas caractérisée dans ce cas.

I.8.2. Les éoliennes à vitesse variable :

I.8.2.1. Principe de fonctionnement :

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la figure I.16.

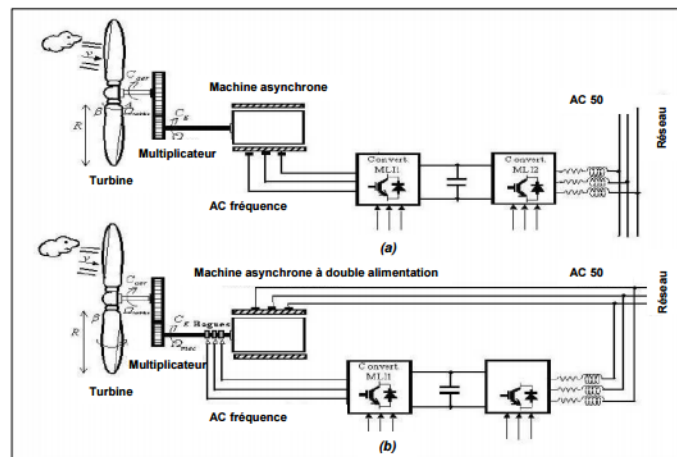


Figure I.16 : Éoliennes à vitesse variable.

La configuration de la figure I.16.a, est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques.

La configuration de la figure I.16.b, est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique.

Nous présentons sur la figure I.17 la caractéristique de la puissance mesurée en fonction de la vitesse du vent d'une éolienne réelle de Schelle de 1.5 MW basée sur une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné [2]. On constate à partir de cette figure que la puissance est limitée à sa valeur nominale pour une vitesse du vent de 12.5 m/s. L'orientation des pales est parfaitement réalisée dans ce cas.

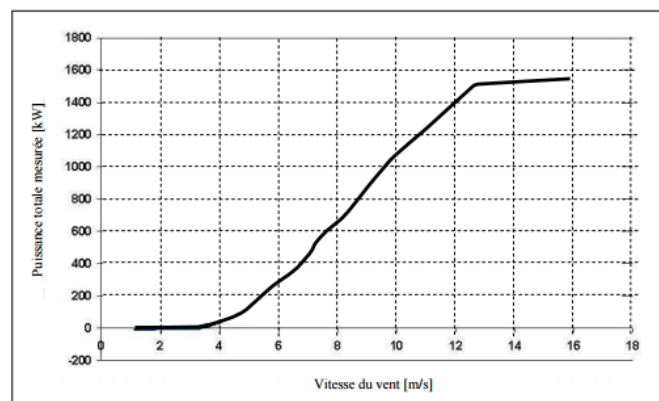


Figure I.17: Puissance totale générée mesurée en fonction de la vitesse du vent.

I.8.2.2. Intérêt de la vitesse variable :

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure I.18.

Pour une vitesse de vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 ; on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse

mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

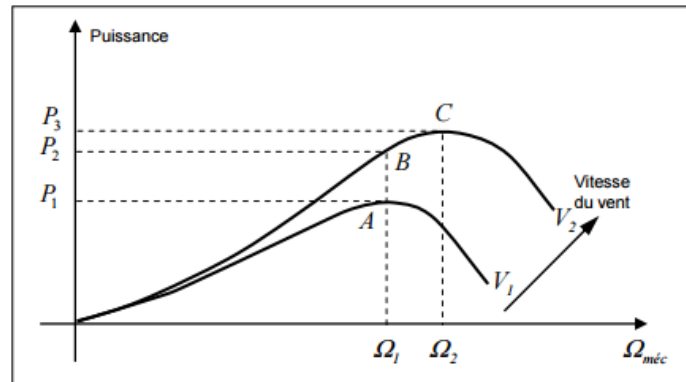


Figure I.18 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence ($\Omega_{\text{réf}}$) calculée pour maximiser la puissance extraite.

I.9. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique :

I.9.1. Loi de Betz:

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure I.19 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho S(V_1+V_2)}{2} \quad (\text{I.1})$$

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

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

Soit en remplaçant m par son expression dans (I.1):

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{I.3})$$

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 :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{I.4})$$

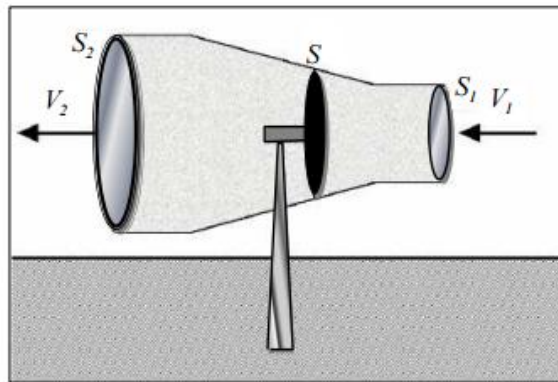


Figure I.19 : Tube de courant autour d'une éolienne.

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)\right)}{2} \quad (\text{I.5})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure I.20), on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [3].

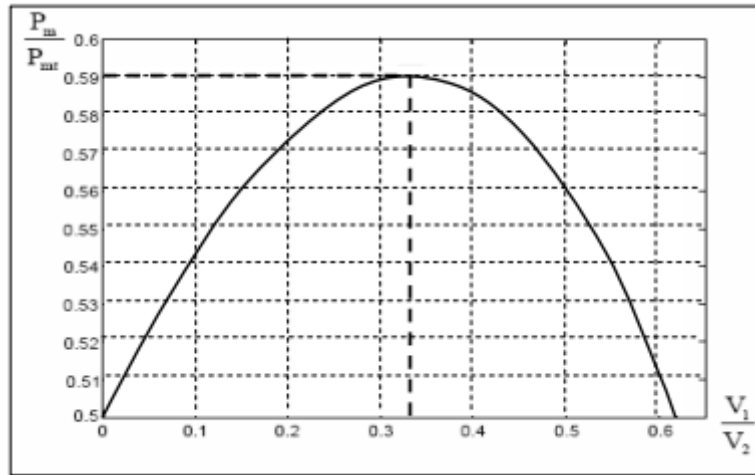


Figure I.20 : Coefficient de puissance.

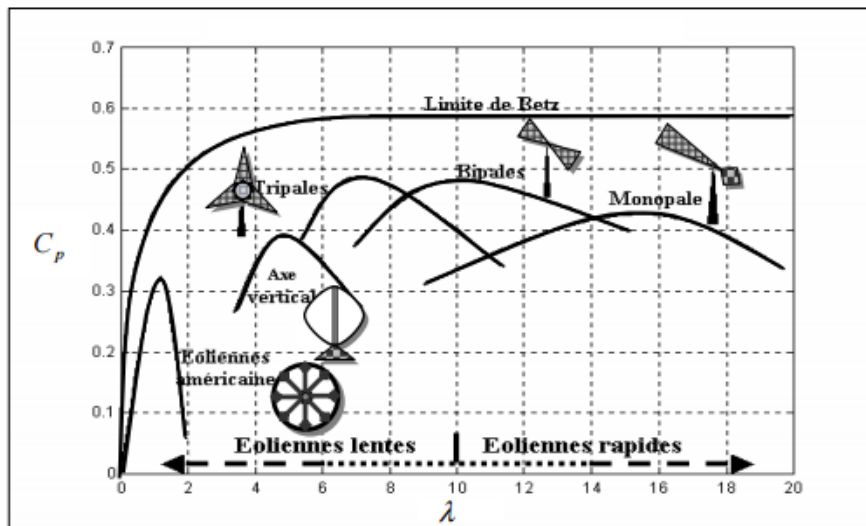


Figure I.21 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8(m). Leur coefficient de puissance (Figure I.21) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60(m) pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure I.21) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [10].

I.9.2. Modèle de la turbine par simulation :

Le modèle est basé sur les caractéristiques de puissance en état d'équilibre de la turbine. La rigidité de l'arbre d'entraînement est supposée infinie, le coefficient de frottement et l'inertie de la turbine doivent être combinés avec ceux du générateur couplé à la turbine. La puissance mécanique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (I.6)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad (I.7)$$

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur.

R : rayon de l'aérogénérateur 35.25m

ρ : densité de l'air 1.225 Kg. m⁻³

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

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad \text{et} \quad C_1 = 0.5176 ; C_2 = 116 ; C_3 = 0.4 ; C_4 = 5 ; C_5 = 21 ; C_6 = 0.0068 \quad [4].$$

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage sont illustrées sur la figure I.22. La valeur maximale de C_p ($C_{pmax} = 0.48$) est atteinte pour $\beta = 0$ et $\lambda = 8.1$. Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur nominale λ_{nom} [4].

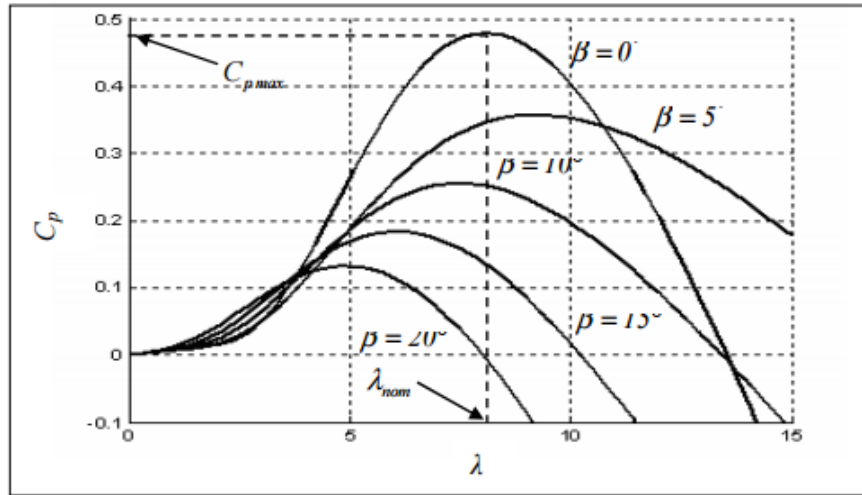


Figure I.22 : Le coefficient de puissance pour des différents angles de calages.

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

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

Avec :

Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (Figure I.23) [3], [10].

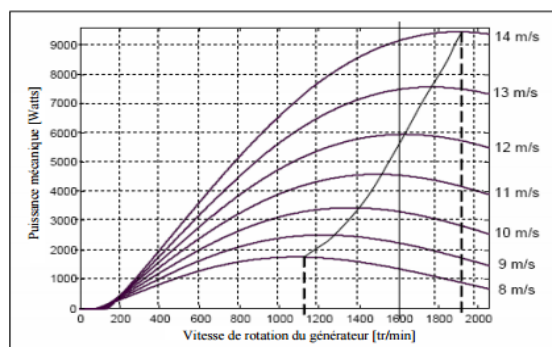


Figure I.23 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée.

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la figure I.23) les

maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple.

I.10. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne :

I.10.1. Bilan des forces sur une pale :

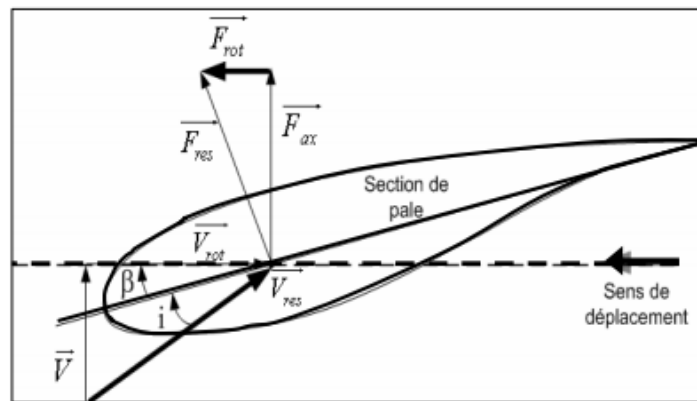


Figure I.24 : Bilan des forces sur une pale.

La figure I.24 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur [11]. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur \vec{V} . Le vecteur \vec{V}_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée \vec{V}_{res} . L'action du vent sur la pale produit une force qui se décompose en une poussée axiale \vec{F}_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation \vec{F}_{rot} qui produit effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

I.10.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne :

I.10.2.1. Système à décrochage aérodynamique "stall" :

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (Intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence " i " devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale, l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure I.25) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

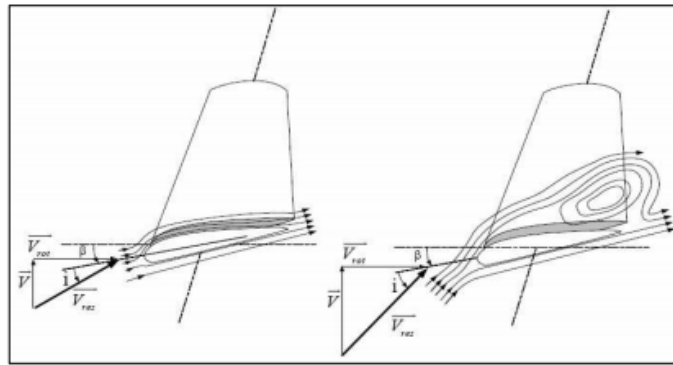


Figure I.25 : Flux d'air sur un profil de pale " stall ".

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système " stall actif ") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage β et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse du vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante [10].

I.10.2.2. Système d'orientation des pales "pitch" :

Il utilise la variation de l'angle de calage des pales (figure I.26). En variant l'angle d'incidence de la pale, on modifie le rapport entre les composantes de portance et de traînage.

L'angle d'incidence optimal conduit à la puissance maximale disponible. En général, la modification de l'angle de calage de la pale de l'éolienne permet quatre actions distinctes :

- Le démarrage à une vitesse du vent V_d plus faible ;
- L'optimisation du régime de conversion de l'énergie, quand la vitesse du vent évolue entre les limites $[V_d, V_n]$ en complément de la vitesse variable dans une plage relativement réduite (1 à 2 voire 1 à 3 pour un rapport V_n/V_d de l'ordre de 4 à 5) ;
- La régulation par limitation de la puissance pour $V > V_n$;

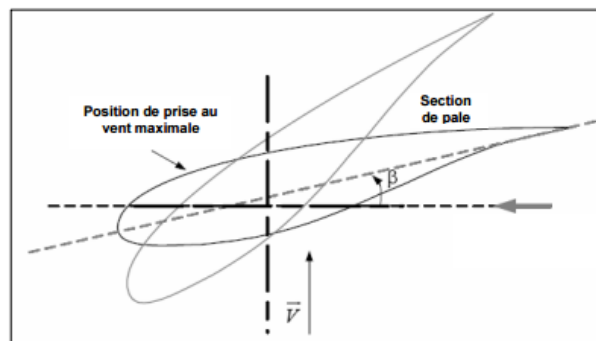


Figure I.26 : Variation de l'angle de calage d'une pale

- La protection de l'éolienne contre les vents trop violents, par la mise en « drapeau » des pales de l'hélice. On remarque que ce système intervient dans le fonctionnement de la turbine, par la variation du calage, de manière prépondérante depuis le démarrage (Figure II.27) (zone I) et dans le régime de régulation de vitesse (zone II et III) jusqu'au phénomène de décrochage aérodynamique (zone IV) de la turbine [9].

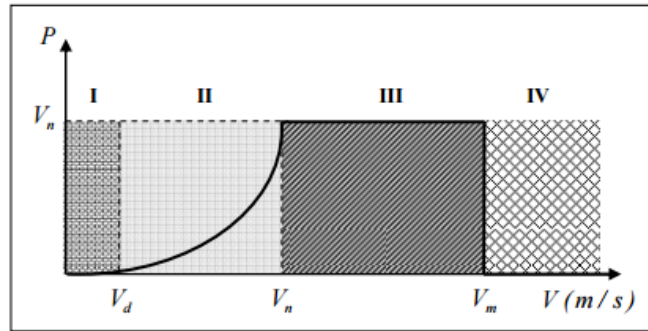


Figure II.27 : Courbe typique de régulation.

I.11. Le multiplicateur :

Les rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m ont des vitesses de rotation trop faibles pour pouvoir entraîner directement un alternateur classique. Il est donc indispensable pour ces machines d'interposer entre l'aéromoteur et l'alternateur un multiplicateur.

Trois types de multiplicateurs peuvent être utilisés avec les aéromoteurs :

- Le plus simple est le multiplicateur à engrenages à un ou plusieurs trains de roues dentées cylindriques ; d'une réalisation économique il est tout de même encombrant pour un rapport de multiplication élevé.
- L'utilisation de trains planétaires permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit. Leur utilisation se généralise ; cette technique permet de réaliser des rapports de multiplication élevés sous un encombrement réduit et avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voir coaxiaux.
- Le réducteur à couple conique permet une disposition de l'arbre de sortie perpendiculaire à l'arbre d'entrée.

I.12. Les dispositifs de stockage de l'énergie éolienne :

Une caractéristique essentielle du vent étant la discontinuité dans le temps, un certain nombre d'études ont eu pour objet d'étudier ou de mettre au point des systèmes permettant de stocker l'énergie produite par le vent et non utilisée directement pendant les périodes de

production afin d'en restituer une partie, aussi grande que possible, pendant les périodes de calme.

Il existe différentes possibilités de stockage

- Pour la production d'électricité, le système de loin le plus utilisé est celui par batterie d'accumulateurs. Celles au plomb, bien que lourdes et encombrantes, s'accommodent bien des fluctuations propres au vent. Les autres types sont mal adaptés. Toutefois, ce type de stockage ne convient que pour de petites puissances de quelques kW tout au plus
- Pour les stockages importants, on peut faire appel au pompage de l'eau entre deux réservoirs et une turbine si le terrain fournit une possibilité intéressante en dénivelé. Le simple pompage de l'eau dans un réservoir est aussi la solution pour stocker de l'eau dans le cas, par exemple, de distribution d'eau alimentaire.

Principe : l'énergie éolienne sert à remplir un réservoir de stockage dont l'eau sera turbinée pour restituer l'énergie.

- Le stockage thermique commence aussi à se développer, essentiellement pour le chauffage. Les différents types de stockage thermique existant sont utilisés : réservoir de fluides, chauffage de produits à haute capacité thermique, etc.

Principe : l'énergie produite est utilisée pour chauffer le fluide d'un réservoir qui restituera pendant les périodes sans vent l'énergie stockée.

I.13. Avantages :

Outre les nombreux avantages qu'elle partage avec les autres sources renouvelables d'énergie, l'exploitation de l'énergie du vent présente une série d'avantages propres [5]:

- Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre ;
- Elle ne nécessite aucun carburant ;
- Elle ne crée pas de gaz à effet de serre (sauf si l'on considère que ce type d'énergie est intermittent et nécessite l'utilisation de centrales thermiques constamment au ralenti afin de réguler les variations imprévisibles de la production éolienne) ;

- Chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0.8 à 0.9 tonne les émissions de CO2 rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique ;
- Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs car elle est entièrement en métal et plastique;
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations ;
- Les propriétaires fonciers reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain, ce qui augmente leur revenu ainsi que la valeur du terrain. (les loyers sont autour de 1500 à 2000 € par MW) ;
- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple;
- Les éoliennes permettent au travers de la taxe professionnelle de participer au développement local avec une contribution annuelle de l'ordre de 10 000 € par MW (ce chiffre peut varier en fonction des communautés de communes concernées). Certaines communes rurales peuvent ainsi revivre et assurer des travaux pour lesquels elles s'endettaient jusque-là;
- Une éolienne est en grande partie recyclable car construite en acier. Après son temps de fonctionnement (environ 20 ans) elle est entièrement démontable, on peut même si besoin retirer la fondation en béton. Elle n'aura laissé aucun produit contaminant autour d'elle et pourra être très facilement remplacée.

I.14. Inconvénients :

L'énergie intermittente et imprévisible produite par l'éolien nécessite une régulation par des centrales thermiques, dont les inconvénients doivent être pris en considération.

- Les riverains déplorent le bruit des éoliennes : le bruit peut être d'origine mécanique ou d'origine aérodynamique. En effet, selon l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), le niveau sonore d'une éolienne est de 50 dB à 150 mètres et devient imperceptible au-delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne ;

- La réception des ondes hertziennes peut être perturbée, ce qui provoque une image bruitée sur les récepteurs de télévision. Dans ce cas, il est fréquent que la société implantant les éoliennes finance la construction d'un nouvel émetteur de télévision ;
- Des flashes très puissants sont émis toutes les cinq secondes en haut des mats éoliens à la demande de l'aviation civile. Ces flashes perturbent la quiétude nocturne de la campagne et sont une pollution lumineuse supplémentaire ;
- Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux. La LPO (Ligue de Protection des Oiseaux) se montre favorable au développement de parcs éoliens si ceux-ci sont construits en suivant ses recommandations ;
- Les parcs éoliens produisent des interférences avec les radars et en particulier avec les radars météorologiques. En effet, les éoliennes peuvent constituer un obstacle à la propagation de l'onde. Selon la proximité et la densité du parc d'éoliennes, ceci peut constituer un blocage majeur à basse altitude donnant une zone d'ombre dans les données. De plus, comme les pales sont en rotation, le radar note leur vitesse de déplacement qui est indifférenciable d'une cible en mouvement comme la pluie. Habituellement, on filtre les échos indésirables de sol par leur vitesse Doppler. Dans le cas d'une précipitation, la vitesse enregistrée sera un mélange entre la vitesse des gouttes et celle des pales ce qui peut mener à une fausse interprétation des mouvements de l'air. Une étude sur ce possible interférence est donc nécessaire lors de l'examen d'un projet d'éoliennes ;
- Par son principe de fonctionnement même, une éolienne absorbe l'énergie du vent et le rend turbulent, créant ainsi un effet de sillage jusqu'à 10 diamètres de rotor derrière elle.

I.15. Conclusion :

Une description de l'énergie éolienne a été présentée dans ce chapitre. Dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données comme les méthodes de description du gisement éolien, des exemples d'architectures, que sa commence par les différents capteurs éoliens (à axe horizontal, vertical) en suite les caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal, et

les système de régulation et protection, aussi les génératrices adaptées avec l'éolien pour différents types et configurations, finalement en ce termine par les applications des systèmes éoliens. Le deuxième chapitre de nos travaux, est consacré à la modélisation et la simulation de la machine asynchrone à double alimentation utilisée dans un système éolien de 1.5 MW.

Chapitre 02 :

Etude de Modélisation de la MADA

II.1 Introduction :

Le système d'entraînement de la machine asynchrone intègre l'alimentation, le convertisseur statique, la machine et la commande indispensables au fonctionnement de l'ensemble. De ce fait, une modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, destinée aussi bien à l'étude de son comportement qu'à la mise en place des fonctionnements de la commande, est nécessaire pour le bon déroulement du processus d'entraînement. Notre objectif est de présenter mathématiquement une modélisation de la machine asynchrone à double alimentation sous forme d'état selon le choix des différents repères. Généralement, ces modèles sont définis dans un référentiel diphasé, soit tournant (d, q) , soit fixe au stator (α, β) . Ces référentiels sont définis à partir du référentiel triphasé naturel de la MADA à l'aide de transformations mathématiques adaptées.

II.2 Modèle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation :

Le modèle de la machine asynchrone présenté traditionnellement est un modèle en 'régime permanent'. C'est à dire que la machine est supposée fonctionner en régime établi, qu'elle est alimentée sous un système triphasé de valeurs efficaces constantes et qu'elle tourne à une vitesse constante. Les grandeurs sont alors sinusoïdales et l'approche dans l'espace complexe est valable. Ce modèle n'est plus valable si la machine est alimentée par un onduleur triphasé commandé suivant un schéma de contrôle. Le contrôle de vitesse le plus simple, dit « V/f », permet de varier la vitesse de la machine sur une large plage. C'est un contrôle scalaire. Les équations de la machine qui permettent de calculer le couple et de prévoir les points de fonctionnement sont basés sur le modèle en 'régime permanent' de la machine. Il existe un schéma de contrôle basé sur le modèle 'transitoire' ou 'dynamique' de la machine qui est le contrôle vectoriel de la machine. Ce type de contrôle permet d'avoir une dynamique de réponse plus rapide et une meilleure précision du contrôle de couple. L'étude de la machine asynchrone est basée essentiellement sur la transformée de Park qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes électriquement perpendiculaires appelés d pour l'axe direct, et q pour l'axe quadrature. La machine asynchrone est représentée sur la figure (II.1) par ces six enroulements dans l'espace électrique. L'angle θ repère le décalage de l'axe de la phase rotorique (OAR) par rapport à l'axe fixe de la phase statorique (OAS).

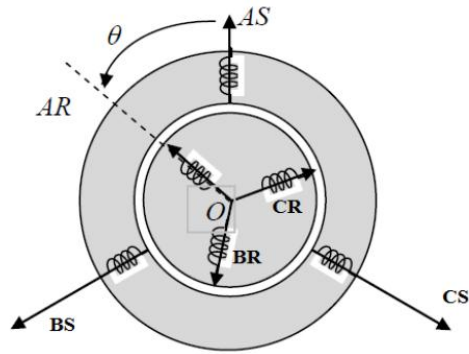


Figure (2.1): Représentation schématique du modèle d'une MADA.

II.3 Hypothèses simplificatrices :

Afin de modéliser la machine nous nous appuyeront sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont le plus couramment considérées. Ainsi nous supposerons que :

- la machine est de construction symétrique équilibrée, tant au rotor qu'au stator.
- le rotor est bobiné, les bobinages sont triphasés au stator et au rotor et possèdent p paires de pôles.
- l'entrefer est d'épaisseur et de perméabilité constante, donc que l'effet d'encoche est négligé.
- la saturation du circuit magnétique est négligeable, et sa perméabilité constante.
- les pertes ferromagnétiques dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault sont négligeables.
- les pertes mécaniques sont négligeables.
- la distribution spatiale des forces magnétomotrices dans l'entrefer est sinusoïdale.
- l'effet de peau est négligé, donc la densité de courant est uniforme dans la section des conducteurs.
- la résistance des différents enroulements de la machine est constante.
- l'influence de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte. Ces hypothèses ont pour conséquences :
 - les inductances propres entre les enroulements statoriques sont constantes.
 - les inductances propres entre les enroulements rotoriques sont constantes.

- les inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques varient de manière sinusoïdale avec la position des enroulements.

- les flux magnétiques sont additifs.

II.4 Modèle de la MADA dans le repère abc :

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations électriques des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$\left. \begin{aligned} [V_s] &= [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \\ [V_r] &= [R_s] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.1})$$

Grandeurs statoriques :

$$\left. \begin{aligned} [V_s] &= [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T \\ [I_s] &= [I_{as} \ I_{bs} \ I_{cs}]^T \\ [\phi_s] &= [\phi_{as} \ \phi_{bs} \ \phi_{cs}]^T \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.2})$$

Grandeurs rotoriques :

$$\left. \begin{aligned} [V_r] &= [V_{ar} \ V_{br} \ V_{cr}]^T \\ [I_r] &= [I_{ar} \ I_{br} \ I_{cr}]^T \\ [\phi_r] &= [\phi_{ar} \ \phi_{br} \ \phi_{cr}]^T \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.3})$$

Les flux statorique et rotorique en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes :

$$\left. \begin{aligned} [\phi_s] &= [L_s] \cdot [I_s] + [M_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\phi_r] &= [L_r] \cdot [I_r] + [M_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.4})$$

Où :

$[R_s]$, $[R_r]$: Sont les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

$[L_s]$, $[L_r]$: Sont les matrices des inductances propres statoriques et rotoriques.

$[Msr]$, $[Mrs]$: Sont les matrices des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

$[Mss]$, $[Mrr]$: Sont les matrices des inductances mutuelles statorique-statorique et rotorique-rotorique.

Avec :

$$\left. \begin{aligned} (R_S) &= [R_S] \cdot [I]_{3 \times 3} \\ (R_r) &= [R_r] \cdot [I]_{3 \times 3} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.5})$$

$$\left. \begin{aligned} (L_r) &= [L_r] \cdot [I]_{3 \times 3} \\ (L_S) &= [L_S] \cdot [I]_{3 \times 3} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.6})$$

$$[M_{SS}] = M_{SS} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 0 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$[M_{rr}] = M_{rr} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 0 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

$$[M_{sr}] = M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T \quad (\text{II.10})$$

Avec:

$[I]_{3 \times 3}$: Est la matrice identité d'ordre 3.

M : est le maximum d'inductance mutuelles entre une phase statorique et une phase rotorique.

L'énergie magnétique peut être calculée à partir de l'expression suivante :

$$W_{mag} = \frac{1}{2} ([I_S]^T \cdot [\phi_S] + [I_r]^T \cdot [\phi_r]) \quad (\text{II.11})$$

Le Couple électromagnétique s'exprime par la dérivée de l'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor :

$$C_e = \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta_{geom}} = n_p \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta_{elect}} \quad (\text{II.12})$$

On peut déduire:

$$C_e = \frac{n_p}{2} [I_s]^T \left(\frac{d[M_{sr}]}{d\theta_{elect}} \right) [I_r] \quad (\text{II.13})$$

L'équation du mouvement (mécanique) est :

$$J_m \frac{d\Omega_r}{dt} + f_m \Omega_r = C_{em} - C_r \quad (\text{II.14})$$

Où :

$$\Omega_r = \frac{W_r}{n_p} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

- J_m : Moment d'inertie de la machine,
- C_{em} : Couple électromagnétique,
- C_r : Couple résistant,
- f_m : Coefficient de frottement de la machine.

Nous constatons la complexité des équations électrique et mécanique de la machine asynchrone qui ne peuvent être facilement exploitées à cause des dimensions des matrices entrant dans les calculs et de la dépendance de la matrice inductance vis-à-vis de la position de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique qui est variable dans le temps

II.5 Changement de repère :

Le but d'un changement de repère est de rendre l'écriture des équations de la machine plus simple à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park.

II.5.1 La transformation de Park :

Afin de rechercher les lois de contrôle d'une machine à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans un repère (d, q) tournant dont l'orientation est à priori arbitraire. Ce modèle est obtenu après transformation virtuelle de la machine triphasée en une machine diphasée équivalente.

Cette transformation qui permet le passage du système triphasé au système biphasé s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires, directes et en quadrature, figure (2.2).

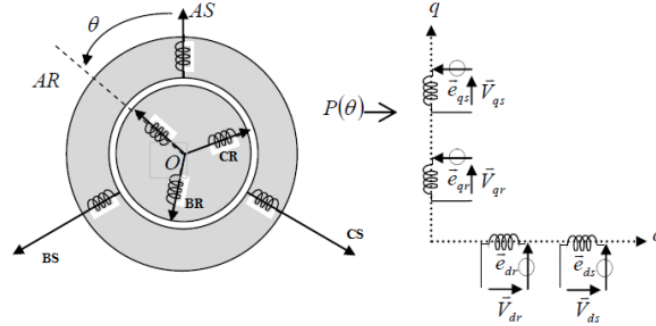


Figure (2.2): Représentation de la MADA dans le repère de Park.

Donc pour le passage du système triphasé au système biphasé on utilise la matrice $P(\theta)$:

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Le changement de variables relatifs aux courants, tensions et flux est défini par la transformation (II.17) :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Avec x : tensions, courant ou flux, et les indices suivant représentent :

- 0 : indice de l'axe homolaire.
- d : indice de l'axe direct.
- q : indice de l'axe en quadrature.

Et pour la transformation inverse on utilise la matrice $[P(\theta)]^{-1}$:

$$[P(\theta)]^{-1} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Alors les variables réels sont obtenus à partir des variables biphasées

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes (d, q)

Les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d, q) sont données par :

$$\left. \begin{aligned} V_{ds} &= R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - W_{coor} \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} &= R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - W_{coor} \cdot \phi_{ds} \\ V_{dr} &= R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (W_{coor} - W_r) \cdot \phi_{qr} \\ V_{qr} &= R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (W_{coor} - W_r) \cdot \phi_{dr} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

W_{coor} : Vitesse du système d'axe (d, q). Les expressions des flux statoriques et rotoriques dans le système (d, q)

$$\left. \begin{aligned} \phi_{ds} &= L_s \cdot I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} &= L_s \cdot I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} &= L_r \cdot I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} &= L_r \cdot I_{qr} + M I_{qs} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.21})$$

II.6 Choix du référentiel :

Pour étudier la théorie des processus transitoires des machines électriques, il est recommandé de choisir un système d'axes de référence qui permet d'aboutir au système différentiel le plus simple possible, car le résultat final est indépendant du choix du système de coordonnées. On trouve que le calcul peut être plus ou moins complexe. A partir du système d'axe (d, q) on peut avoir d'autres axes qui sont des cas particuliers. Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles

- Référentiel fixé par rapport au stator : $W_s = 0$
- Référentiel fixé par rapport au rotor : $W_r = \omega$

- Référentiel fixé par rapport aux champs tournant $W_s = \omega$

Cette dernière représentation qui fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent, la conception du contrôle vectoriel par orientation du flux nécessite ce choix et les modèles d'action dépendent de la position du référentiel par rapport aux divers axes de flux.

II.6.1 Modèle biphasé de la MADA lié au champ tournant :

On exprime les tensions par :

$$\left. \begin{aligned} V_{ds} &= R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - W_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} &= R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - W_s \cdot \phi_{ds} \\ V_{dr} &= R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (W_s - W_r) \cdot \phi_{qr} \\ V_{qr} &= R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (W_s - W_r) \cdot \phi_{dr} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.22})$$

D'autre part, on peut déduire l'expression de la puissance électromagnétique de la machine dans le repère de Park après le calcul de la puissance instantanée comme suit:

$$P(t) = \frac{3}{2} [(V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs})(V_{dr} \cdot I_{dr} + V_{qr} \cdot I_{qr})] \quad (\text{II.23})$$

En remplaçant V_{ds} , V_{qs} , V_{dr} et V_{qr} par leurs expressions, on aura :

$$P(t) = P_{js}(t) + P_{jr}(t) + P_{mgs}(t) + P_{mgr}(t) + P_{em}(t) \quad (\text{II.24})$$

- $P_{js}(t) = \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot (I_{ds}^2 + I_{qs}^2)$: représente les pertes joule dans l'enroulement du stator.
- $P_{jr}(t) = \frac{3}{2} \cdot R_r \cdot (I_{dr}^2 + I_{qr}^2)$: représente les pertes joule dans l'enroulement du rotor.
- $P_{mgs}(t) = \frac{3}{2} \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{ds} + \phi_{qs} \cdot I_{qs})$: représente l'échange de l'énergie électromagnétique avec la source statorique.
- $P_{mgr}(t) = \frac{3}{2} \cdot (\phi_{dr} \cdot I_{dr} + \phi_{qr} \cdot I_{qr})$: représente l'échange de l'énergie électromagnétique avec la source rotorique.

- $P_{em}(t) = \frac{3}{2} \cdot [-W_s \cdot \phi_{qs} \cdot I_{ds} + W_s \cdot \phi_{ds} \cdot I_{qs} - (W_s - W) \cdot \phi_{qr} \cdot I_{dr} + (W_s - W) \cdot \phi_{dr} \cdot I_{qr}]$:
représente la puissance électromagnétique.

En utilisant les expressions des flux magnétiques présentées dans (II.20), on obtient :

$$P_{em}(t) = \frac{3}{2} \cdot W \cdot (\phi_{ds} I_{qs} \phi_{qs} I_{ds}) \quad (II.25)$$

Sachant que :

$$P_{em}(t) = \Omega_r C_{em} \quad \text{Et} \quad W_r = \Omega_r \cdot n_p$$

On déduit l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = -\frac{pM}{L_s} (I_{dr} \cdot \phi_{qs} - I_{qr} \cdot \phi_{ds}) \quad (II.26)$$

Par ailleurs, les puissances active et réactive statorique est données par :

Puissance statorique:

$$\left. \begin{aligned} P_s &= V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s &= V_{ds} I_{qs} - V_{qs} I_{ds} \end{aligned} \right\} \quad (II.27)$$

II.6 Mise sous forme d'équation d'état :

Les équations (II.20) peuvent être disposées sous la forme de représentation d'état. On choisit pour vecteur d'état $= [\phi_{ds}, \phi_{qs}, I_{dr}, I_{qr}]$, on trouve les équations d'état sous forme matricielle:

$$\left. \begin{aligned} L \cdot \frac{dx}{dt} &= A \cdot x + B \cdot U \\ y &= C \cdot x \end{aligned} \right\} \quad (II.28)$$

Avec:

$$U = [V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}]^T, \quad B = [I]_{4 \times 4}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_s} & W_s & \frac{R_s M}{L_s} & 0 \\ -W_s & \frac{-R_s}{L_s} & 0 & \frac{R_s M}{L_s} \\ 0 & \frac{M}{L_s} & -R_r & \sigma \cdot (w_s - w_r) \\ -\frac{M}{L_s} (w_s - w_r) & 0 & -\sigma \cdot (w_s - w_r) & -R_r \end{bmatrix} \quad (II.29)$$

Et :

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma & 0 \\ 0 & \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{II.31})$$

$\sigma = 1 - (M^2/L_s L_r)$: Coefficient de dispersion.

II.7 Association de la MADA avec un onduleur à MLI:

Le rotor de la MADA est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un onduleur (Figure 2.3), ce dernier a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions les plus sinusoïdales possibles. A cet effet, différentes stratégies de modulation ont été proposées, parmi celle-ci, la modulation de largeur d'impulsions MLI triangulo-sinusoidal qui s'avère d'un grand intérêt pour la commande des machines électriques. En effet elle permet le réglage simultanément de la fréquence et de la tension, ainsi que de réduire ou de minimiser les oscillations sur la vitesse, le couple et les courants et par conséquent limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées) .[23].

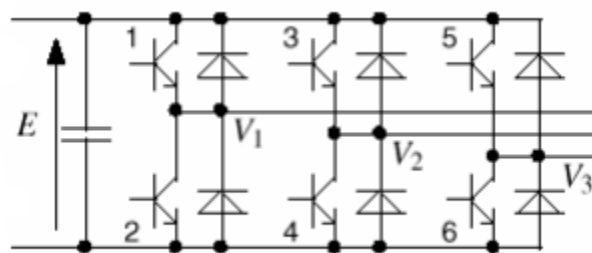


Figure (2.3):Onduleur MLI triphasé

Le principe général consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance) [6], [23].

- Cette technique repose sur la comparaison entre deux signaux (Figure 2.4) : Le premier, appelé signal de référence, représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence [23].

L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs.

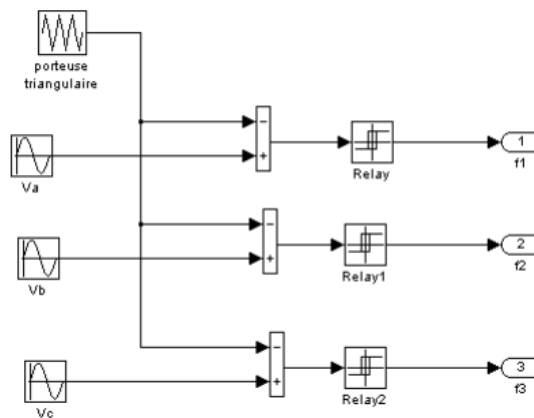


Figure (2.4):Génération des signaux de commande MLI de l'onduleur.

Le signal de sortie vaut 1 si la modulante est plus grande que la porteuse 0, sinon ; le signal de sortie change donc d'état à chaque intersection de la modulante et de la porteuse [5], [24]. La figure (2.5) représente les deux signaux à comparer (modulante et porteuse)

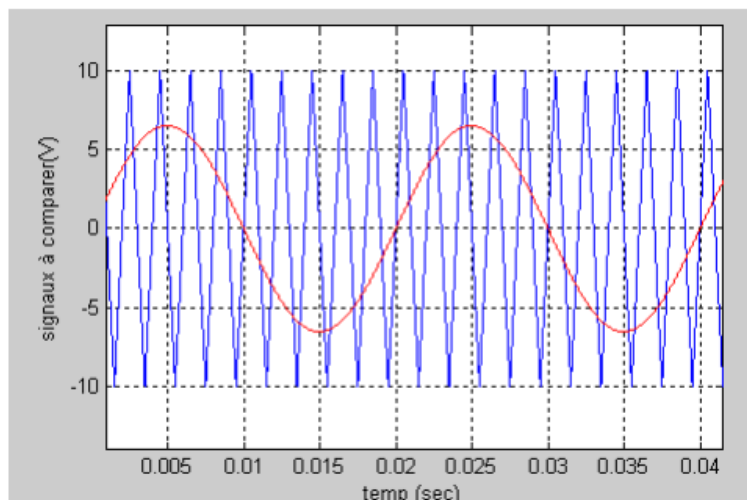


Figure (2.5):Allure des signaux modulés et porteuse.

Dans notre application, nous nous intéresserons au fonctionnement génératrice hyposynchrone, de façon à ne traiter le transfert de puissance rotorique dans une seule direction (réseau vers rotor). Le convertisseur côté réseau sera donc un simple redresseur unidirectionnel. La tension du bus continu est par conséquent fixée et nous nous intéressons uniquement au contrôle du convertisseur côté rotorique.

Le rotor de la MADA est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un onduleur. Celui-ci est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante [8], [25]:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} E \quad (\text{II.32})$$

Où f_1 , f_2 et f_3 sont des fonctions logiques correspondant à l'état des interrupteurs de l'onduleur (1 lorsque l'interrupteur haut d'un bras de l'onduleur est fermé, 0 quand il est ouvert) et E est la tension du bus continu. Dans notre étude, côté rotor, nous nous limiterons à un transfert de puissance du réseau vers le rotor. Le bus continu est donc fixe et imposé par l convertisseur côté réseau sur lequel il n'y a pas de commande. Il fonctionne donc comme un simple redresseur [8],. -L'indice de modulation « m » défini comme étant le rapport de la fréquence f_p de la porteuse (fréquence de découpage) à la fréquence f de la tension de référence [26] :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{II.32})$$

$$r = \frac{A_m}{A_p} < 1 \quad (\text{II.33})$$

Avec :

A_m : Amplitude de tension du signal de référence (modulante).

A_p : amplitude de tension du signal de la porteuse.

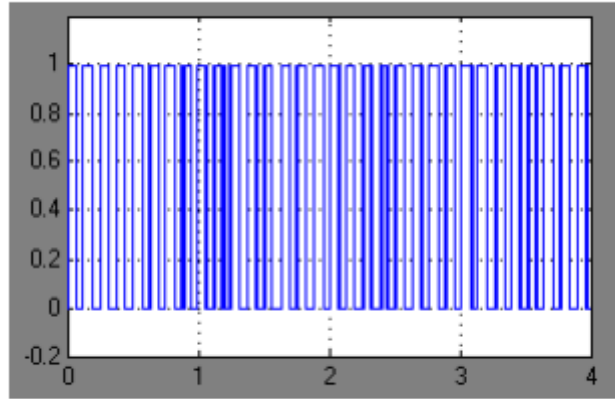


Figure (2.6):Signal de commande d'un interrupteur de l'onduleur MLI.

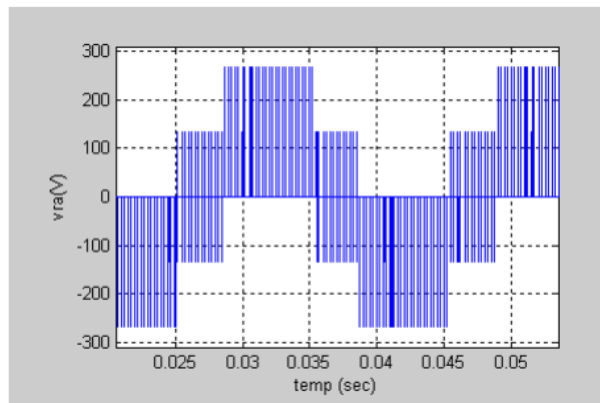


Figure (2.7):Tension d'une phase rotorique de la MADA associé à un onduleur MLI.

Chapitre 03 :

Commande de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation.

III.1 Introduction :

La modélisation de la Génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) et sa mise en équation nécessaire à la commande en puissances active et réactive ont été mises en œuvre dans le chapitre précédent. Nous allons maintenant procéder à la synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de cette commande. Les régulateurs ont, d'une part, la tâche de stabiliser le circuit de réglage, et d'autre part, ils viennent pour assurer une meilleure précision et un temps de réponse meilleur. La première priorité dans le choix de tout régulateur est de s'assurer que ce dernier nous puisse garantir une bonne stabilité tout en assurant une précision satisfaisante et acceptable. Dans ce chapitre on va étudier la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée en génératrice en utilisant deux types de régulateurs : Le régulateur Proportionnel-Intégral afin d'annuler l'erreur statique. Il servira de référence de comparaison car c'est le plus utilisé et le plus simple à synthétiser dans le domaine des réglages industriels. Afin de comparer ces performances à d'autres régulateurs plus élaborés. Il permet de prendre en compte un modèle de perturbation. Des simulations seront réalisées pour comparer ces deux régulateurs en termes de suivi de consigne, sensibilité aux perturbations.

III.2 Commande vectorielle de la MADA en puissances active et réactive:

La commande par orientation de flux (FOC) proposée par Blaschke en 1972, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones. Elle a été ces dernières années la voie de recherche la plus importante et la mieux adaptée aux exigences industrielles. L'idée fondamentale de cette méthode est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu. Elle se base sur un contrôle effectif de l'état magnétique de la machine et du couple électromagnétique [24]

Le couple électromagnétique résulte une différence de produits de deux grandeurs, réalisés à partir des courants rotoriques I_{dr}, I_{qr} et des flux statoriques Φ_{ds}, Φ_{qs} comme le rappelle l'expression (2.24). Ainsi le simple choix du repère tournant de Park (d-q) sur Φ_s (orientation du flux statorique) ou Φ_r (orientation du flux rotorique), crée un découplage naturel des grandeurs d, q qui donne une réponse très rapide du couple et permet de considérer, d'un point de vue de la conservation, la machine asynchrone comme l'association

mécanique de deux moteurs à courant continu ; dans le premier Φ_{ds} jouant le rôle du flux inducteur, I_{qr} celui du courant d'induit, respectivement Φ_{qs} et I_{dr} dans le second. C'est le principe de la commande vectorielle[23].

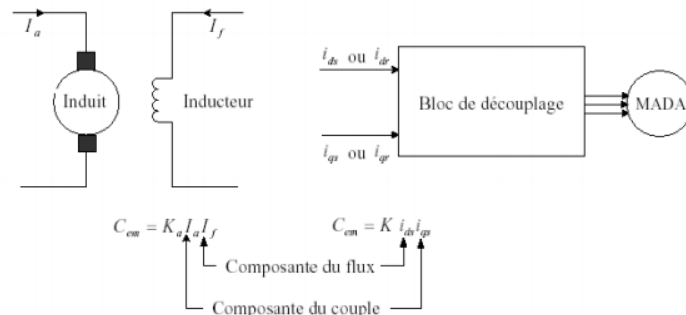


Figure (3.1): Analogie entre la commande vectorielle d'une MADA et la commande d'une MCC.

Dans le présent travail, nous nous limiterons à l'utilisation de la méthode de commande vectorielle par orientation du flux statorique. Dans l'hypothèse où le flux ψ_{ds} est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator), le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendante du courant rotorique d'axe q [8].

III.2.1. Application de la commande vectorielle à flux statorique orienté :

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques.

Pour une approche linéaire classique, la difficulté réside dans la non linéarité en sortie, la commande vectorielle contourne cette difficulté par l'orientation du flux statorique suivant l'axe d du référentiel tournant [8] (figure 3.2). D'après [8], Cette orientation conduit à :

$$\phi_{ds} = \phi_s \quad \text{Et} \quad \phi_{qs} = 0 \quad (\text{III.1})$$

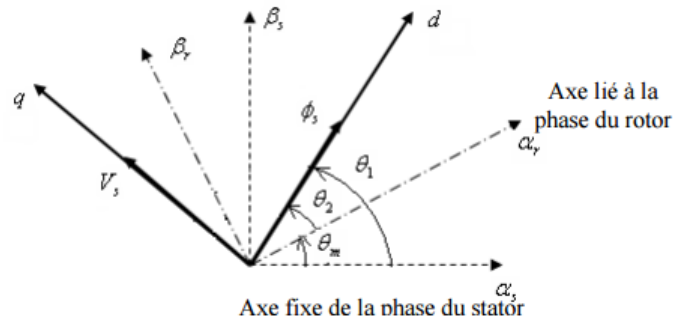


Figure (3.2):orientation du flux statorique sur l'axe d.

Le couple électromagnétique de l'équation (II.26) s'écrit alors :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{qr} \phi_{ds}) \quad (\text{III.2})$$

Et l'équation des flux statoriques d'après (II.21) devient :

$$\left. \begin{aligned} \phi_s &= -L_s I_{ds} - M I_{dr} \\ 0 &= -M I_{qr} - L_s I_{qs} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.3})$$

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple V_s , cela conduit à un flux statorique Φ_s constant. Cette considération associée à l'équation (III.2) montre que le couple électromagnétique C_{em} produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendants du courant rotorique I_{qr} [8].

De plus, la résistance statorique peut être négligée étant donné que c'est une hypothèse réaliste pour les génératrices de moyenne et forte puissance utilisées dans les éoliennes [23].

Ainsi on obtient :

$$\left. \begin{aligned} V_{ds} &= \frac{d\phi_s}{dt} \\ V_{qs} &= \omega_s \phi_s \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.4})$$

Avec l'hypothèse du flux statorique constant (donc sa dérivée est nulle) [8], on a :

$$\left. \begin{aligned} V_{ds} &= 0 \\ V_{qs} &= V_s \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.5})$$

Ainsi les courants statoriques sont exprimés en fonction des courants rotoriques :

$$\left. \begin{aligned} I_{ds} &= -\frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} &= -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.6})$$

D'après les équations (III. 4) et (III.5) on a :

$$\phi_s = \frac{V_s}{W_s} \quad (\text{III.7})$$

En remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation (III.6) les flux rotoriques deviennent :

$$\left. \begin{aligned} \phi_{dr} &= -\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + \frac{M V_s}{W_s L_s} \\ \phi_{qr} &= -\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.8})$$

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.

Les expressions des flux rotoriques d'axe d et q de l'équation (III. 9) sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation (III.4), on obtient alors:

$$\left. \begin{aligned} V_{dr} &= +R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \\ V_{qr} &= +R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + g W_s \frac{M}{L_s} \phi_s \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.9})$$

Ou :

$$g = \frac{W_s - W}{W_s} = \frac{W_r}{W_s} \quad \text{Représente le glissement de la génératrice.}$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad \text{Le coefficient de dispersion}$$

Finalement on obtient :

$$\left. \begin{aligned} I_{dr} &= \left(\frac{-1}{R_r + p L_r \sigma}\right) [V_{dr} - (g W_s L_r \sigma) I_{qr}] \\ I_{qr} &= \left(\frac{-1}{R_r + p L_r \sigma}\right) [V_{qr} + (g W_s L_r \sigma) I_{dr} - g W_s \frac{M}{L_s} \phi_s] \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.10})$$

Remarque :

Le troisième terme dans les deux équations (III.9) peut être négligé car son influence est très faible [8].

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent [8], nous pouvons donc écrire:

$$\left. \begin{aligned} V_{dr} &= -R_r I_{dr} + gW_s L_r \sigma I_{qr} \\ V_{qr} &= -R_r I_{qr} + gW_s L_r \sigma I_{dr} + gW_s \frac{M}{L_s} \phi_s \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.11})$$

D'après les équations (III.27), (III.5) et (III.6):

$$\left. \begin{aligned} P_s &= -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s &= -V_s \frac{\psi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.12})$$

A partir des équations précédentes nous pouvons élaborer un schéma bloc du système électrique de la MADA à réguler :

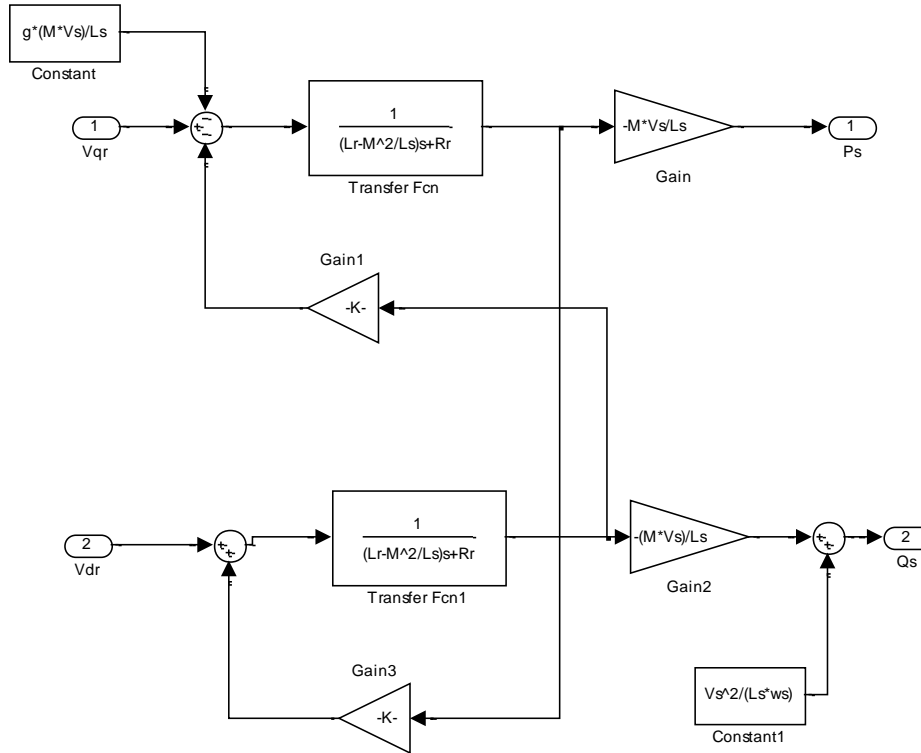


Figure (3.3):Modèle Simulink de la MADA

III.3 Hypothèse de travail :

D'après le chapitre précédent, on a obtenu le schéma bloc du système interne simplifié de la MADA après l'orientation du flux statorique suivant L'axe d (figure 3.4) avec des perturbations $\left(-g\omega_s \frac{M}{L_s} \phi_s\right)$ et $\left(\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}\right)$ qui vont être compensées.

Le terme $g\omega_s \frac{M_s \phi_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de ω représentés sur la σ rotation. L'influence des termes de couplage entre les deux axes $L_r \sigma$ est minime ce qui nous permet de commander chaque axe indépendamment avec chacun son propre régulateur ainsi nous obtenons deux systèmes mono-variables comme le montre la figure (3.4) [11].

Remarque :

On considère que la dynamique de l'onduleur est très rapide par rapport à celle de la machine. Dans ce cas, le modèle de l'onduleur est réduit à son gain statique $K_{ond} = 1$ ce qui permet de réduire l'ordre du système [11] :

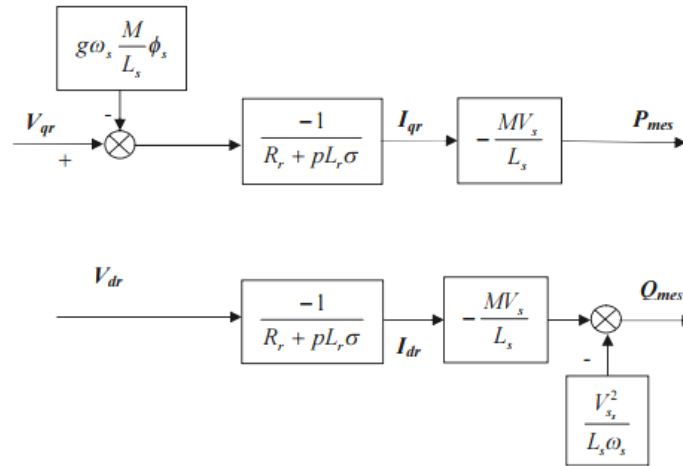


Figure (3.4) : schéma bloc de la MADA avec orientation du flux statorique et découplage des deux axes d, q

Bloc de compensation :

Avant la synthèse des régulateurs on ajoute un bloc de compensation après le régulateur PI afin de compenser les perturbations, dont les équations sont données comme suit [12]:

$$\left. \begin{aligned} e_d &= gW_s \frac{M}{L_s} \phi_s & p \rightarrow 0 \\ e_q &= \frac{V_s^2}{L_s W_s M V_s} (R_r + pL_r \sigma) \end{aligned} \right\} \quad \text{(III.13)}$$

En régime permanent $p \rightarrow 0$:

$$\left. \begin{aligned} e_d &= gW_s \frac{M}{L_s} \phi_s \\ e_q &= \frac{R_r V_s}{M W_s} \end{aligned} \right\} \quad \text{(III.14)}$$

III.4 Définition de cahier des charges :

Les principaux objectifs de la commande sont:

- **Précision:** on quantifié la Précision en comparant le signal de sortie au signal d'entrée. le signal résultant, souvent noté $\varepsilon(t)$ représente donc la différence entre la consigne et la mesure. En régime permanent, on parlera de la précision statique ou encore d'erreur statique.
- **Rapidité:** on peut juger de la rapidité d'un système en mesurant sur sa réponse indicielle, soit le temps de réponse (à 5 % ou 10%), soit le temps de montée ou encore on considérant ces deux grandeurs à la fois.
- **Rejet de perturbation:** une perturbation est un signal parasite qui vient modifier le comportement du système et que l'on traite comme une entrée subie. Rejeter une perturbation c'est faire en sorte que celle-ci n'affecte pas (ou pas trop longtemps), le fonctionnement du système
- **Desensibilisation vis-à-vis de variations paramétriques:** on dira qu'un système est sensible aux variations d'un paramètre k si ses propriétés ou son comportement est affectés par ces variations [13], [14].

La boucle de régulation de notre système doit répondre au cahier des charges suivant :

- Erreur statique nulle.
- Dynamique exigée.

Un correcteur à action proportionnelle et intégrale suffit pour l'obtention de performances tout à fait satisfaisantes. Ce correcteur introduit un pôle à l'origine. L'action de ce correcteur se fait sur les basses fréquences. La présence d'un intégrateur annule l'erreur statique, mais il ralentit le système et le déstabilise s'il est mal placé. Il n'influe pratiquement plus la phase pour les hautes fréquences.

III.5 Mise en œuvre de la régulation :

III.5.1 Synthèse du régulateur PI :

Le correcteur proportionnel-intégral est une combinaison des deux actions proportionnel et intégral. Il a pour effet d'améliorer en même temps le régime permanent et le régime transitoire [15]

Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statorique (figure 3.4), on voit apparaître le terme $\frac{MV_s}{L_s}$. Dans notre étude, on considère que la machine est connectée sur un réseau stable, la tension V_s est par conséquent constante. Alors nous n'avons pas besoin de placer un régulateur entre les courants rotoriques et les puissances [11],[01]

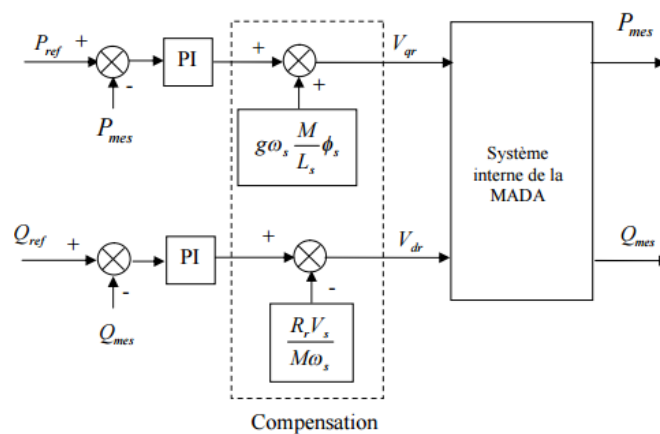


Figure (3.5): Schéma bloc de la commande de la MADA avec les régulateurs PI.

La fonction de transfert d'un régulateur PI est donnée par l'équation suivante :

$$C_{(p)} = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (\text{III.15})$$

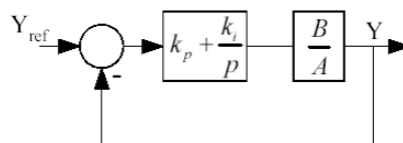


Figure (3.6): Schéma bloc d'un système régulé par PI.

Avec :

$$A = L_S R_r + p L_S L_r \sigma \quad , \quad B = M V_S \quad (\text{III.16})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$FTBO = \left(K_p + \frac{k_i}{p} \right) \left(\frac{M V_S}{L_S (R_S + p L_r \sigma)} \right) \quad (\text{III.17})$$

Exprimons les pôles et les zéros de cette fonction de transfert :

$$FTBO = \frac{k_p}{p} \left(p + \frac{k_i}{k_p} \right) \frac{M V_S}{L_S L_r \sigma \left(p + \frac{R_r}{L_r \sigma} \right)} \quad (\text{III.18})$$

Nous obtenons :

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i M V_S}{K_p L_r L_S \sigma}}{\frac{p}{K_p} p + \frac{R_r}{L_r \sigma}} \quad (\text{III.19})$$

Pour éliminer le zéro présent sur la fonction de transfert, on utilise la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, on posant :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{L_r \sigma} \quad (\text{III.20})$$

On obtient :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{M V_S}{L_r L_S \sigma}}{p} = \frac{1}{\tau_r p} \quad (\text{III.21})$$

Avec :

$$\tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_r L_S \sigma}{M V_S} \quad (\text{III.22})$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$FTBF = \frac{1}{1 + p \tau_r} \quad (\text{III.23})$$

τ_r Désigne la constante de temps du système fixé à 10 ms, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'application de production d'énergie sur le réseau avec la MADA de 7.5 KW.

Les termes k_p et k_i sont données par :

$$K_p = \frac{1}{10 \cdot 10^{-3}} \frac{L_r L_s \sigma}{M V_s} \quad (\text{III.24})$$

$$K_i = \frac{1}{10 \cdot 10^{-3}} \frac{R_r L_s}{M V_s} \quad (\text{III.25})$$

La méthode de compensation des pôles que nous avons utilisée n'est pas la seule méthode pour la synthèse du régulateur PI. Elle présente l'avantage d'être rapide à mettre en œuvre sur une fonction de transfert du premier ordre et elle s'avère suffisante [11], [01].

Chapitre 04 :

ASPECT THEORIQUE DU PRINCIPE DU «BACKSTEPPING»

IV.1 Introduction

La technique du Backstepping adaptative est une méthode de commande relativement récente des systèmes non linéaires. Elle permet, de manière séquentielle et systématique, par le choix d'une fonction de Lyapunov, de déterminer la loi de commande du système.

Son principe est d'établir d'une manière constructive la loi de commande du système non linéaire en considérant quelques variables d'état comme étant des commandes virtuelles et leurs concevoir des lois de commande intermédiaires [16], [17], [18], [19], [20].

Dans ce chapitre, il sera question d'exposer le principe de la technique du Backstepping avec application aux systèmes du second et du troisième ordre afin de se familiariser avec cette technique en vue de l'appliquer à la commande de la machine à induction.

IV.2 Principe de l'approche du Backstepping :

L'idée de base du Backstepping est de stabiliser au départ le premier sous système par une fonction stabilisante connue via une fonction de Lyapunov choisie, ensuite d'ajouter à son entrée un intégrateur. On procède de même pour le prochain sous-système augmenté et ainsi de suite pour les sous-systèmes successifs pour aboutir enfin à une fonction de Lyapunov globale donnant la loi de commande globale qui stabilise le système.

Dans cette partie, l'idée principale de la technique du Backstepping est démontrée par son application à travers deux exemples, du deuxième et du troisième ordre.

IV.2.1 Application du Backstepping adaptative pour les systèmes du second ordre :

Considérons le système suivant :

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + \phi_1(x_1)^T \theta_1 & \text{(IV.1.a)} \\ \dot{x}_2 &= u & \text{(IV.1.b)} \\ y &= x_1 & \text{(IV.1.c)} \end{aligned} \right\} \quad \text{(IV.1)}$$

Où :

u : L'entrée de commande

θ_1 : Vecteur paramétrique connu

$\varphi_1(x_1)$: Vecteur de fonction non linéaire ($\varphi_1(0) = 0$)

y : La sortie du système

Le schéma bloc du système est donné par la figure (4.1) :

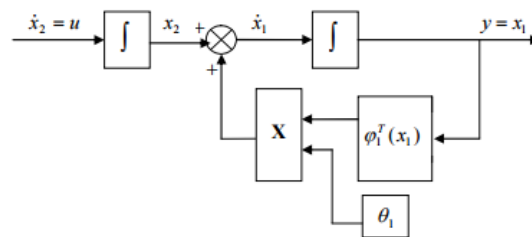


Figure (4.1) : schéma bloc du système du deuxième ordre

L'objectif de la commande est d'atteindre la convergence des erreurs vers zéro réalisant ainsi

La stabilité et l'équilibre du système ce qui permet à sa sortie y de suivre une référence

$$y_r = y_r(t)$$

Le système étant du 2ème ordre, la conception par le Backstepping est exécutée en deux étapes.

Etape 1 :

Pour le premier sous-système (I.1.a), on choisit l'état x_2 comme étant l'entrée virtuelle de l'état x_1 ,

On définit l'erreur de poursuite e_1 tel que:

$$e_1 = x_1 - y_r \quad (IV.2)$$

Et la fonction stabilisante suivante choisit de manière à éliminer le non linéarité du sous-système:

$$\begin{aligned} a_1(x_1) &= -K_1 e_1 - \phi_1(x_1)^T \theta_1 \\ &= -K_1(x_1 - y_r) - \phi_1(x_1)^T \theta_1 \end{aligned} \quad (\text{IV.3})$$

Où :

k_1 gain inférieur à 0.

Cette solution est conçue pour stabiliser le premier sous-système et puisque ce n'est pas le cas

On définit la deuxième erreur par:

$$e_2 = x_2 - a_1(x_1) - \dot{y}_r \quad (\text{IV.4})$$

e_2 Est la variable qui exprime la réalité que x_2 n'est pas la commande exacte.

On choisit la première fonction de Lyapunov :

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (\text{IV.5})$$

Sa dérivée est :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 \quad (\text{IV.6})$$

Par arrangement des équations (IV.2), (IV.3), (IV.4), on obtient l'équation:

$$\dot{e}_1 = -K_1 e_1 + e_2 \quad (\text{IV.7})$$

Et l'équation (IV.6) devient:

$$\dot{V}_1 = -K_1 e_1^2 + e_1 e_2 \quad (\text{IV.8})$$

Le terme $e_1 e_2$ sera éliminé dans l'étape suivante ou on abordera le deuxième sous-système.

Etape 2 :

La dérivée de e_2 est exprimée par:

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{a}_1 - \ddot{y}_r \\ &= \dot{x}_2 - \frac{da_1}{dx_1} \dot{x}_1 - \frac{da_1}{dy_r} \dot{y}_r - \ddot{y}_r \\ &= u - \frac{da_1}{dx_1} (x_2 + \phi_1(x_1)^T \theta_1) - \frac{da_1}{dy_1} \dot{y}_r - \ddot{y}_r \end{aligned} \quad (IV.9)$$

$$V_2 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (IV.10)$$

La dérivée de v_2 est :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 \\ &= -K_1 e_1^2 + e_2 \left[u + e_1 - \frac{da_1}{dx_1} (x_2 + \phi_1(x_1)^T \theta_1) - \frac{da_1}{dy_1} \dot{y}_r - \ddot{y}_r \right] \end{aligned} \quad (IV.11)$$

La commande u est choisie tel que $\dot{V}_2 < 0$ (condition de stabilité de Lyapunov).

Nous obtenons :

$$\begin{aligned} u &= -K_2 e_2 - e_1 + \frac{da_1}{dx_1} (x_2 + \phi_1(x_1)^T \theta_1) + \frac{da_1}{dy_1} \dot{y}_r + \ddot{y}_r \\ u &= -K_2 e_2 - e_1 + \frac{da_1}{dx_1} \dot{x}_1 + \frac{da_1}{dy_1} \dot{y}_r + \ddot{y}_r \end{aligned} \quad (IV.12)$$

Avec K_2 gain > 0

$$\dot{V}_2 = -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 < 0 \quad (IV.13)$$

Dans ces conditions:

Ce qui réalise l'équilibre et le système est stable.

L'équation (IV.9) prend la forme :

$$\dot{e}_2 = -e_1 - K_2 e_2 \quad (IV.14)$$

Le système (IV.1) en boucle fermée peut être formulé en utilisant les nouvelles coordonnées en e :

$$\dot{E}_1 = AE \quad (IV.15)$$

Avec:

$$A = \begin{bmatrix} -K_1 & 1 \\ -1 & -K_2 \end{bmatrix}, \quad E = [e_1 \quad e_2]^T$$

La solution est donnée par : $E = E(0)\exp(A.t)$ (IV.16)

Avec un bon choix des gains k_1 et k_2 (méthode de placement de pôles), la solution donnée par (IV.16) donne bien une convergence des erreurs vers zéro, donc la sortie du système $y = x_1$.

Suit la référence y_r

IV.2.2 Application du Backstepping adaptative pour les systèmes du troisième ordre :

Considérons le système du troisième ordre suivant:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + \phi_1(x_1)^T \theta_1 \\ \dot{x}_2 &= x_3 + \phi_2(x_1, x_2)^T \theta_2 \\ \dot{x}_3 &= u \end{aligned} \right\} \quad (IV.17)$$

Et :

θ_1 Et θ_2 : vecteurs de paramètres connus.

$\phi_2(x_1, x_2)$: Vecteur de fonction non linéaire ($\phi_2(0,0) = 0$)

Le système étant du 3ème ordre, la conception par le Backstepping est exécutée en trois étapes

Etape 1 :

Pour le premier sous-système, l'état x_2 est choisi comme commande virtuelle de l'état 1 . On considère l'erreur entre la variable x_1 et la grandeur de référence y_r :

$$e_1 = x_1 - y_r \quad (IV.18)$$

La première fonction de Lyapunov est :

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (\text{IV.19})$$

Sa dérivée est :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 \quad (\text{IV.20})$$

D'où :

$$\dot{e}_1 = -K_1 e_1 + e_2 \quad (\text{IV.21})$$

Etape 2 :

Considérons l'erreur e_2 définie par l'équation:

$$e_2 = x_2 - a_1(x_1) - \dot{y}_r \quad (\text{IV.22})$$

Sa dynamique est donnée par:

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{a}_1 - \ddot{y}_r \quad (\text{IV.23})$$

Prenons x_3 comme la commande virtuelle du deuxième sous-système et définissons la nouvelle erreur e_3 comme:

$$e_3 = x_3 - a_2(x_1, x_2) - \ddot{y}_r \quad (\text{IV.24})$$

Où :

$a_2(x_1, x_2)$ La fonction stabilisante donnée par l'équation:

$$a_2(x_1, x_2) = -e_1 - K_2 e_2 - \phi_2^T \theta_1 \dot{a}_1 \quad (\text{IV.25})$$

En tenant compte des équations (IV.16), (IV.22), (IV.23), (IV.24), l'équation (IV.22) devient:

$$\dot{e}_2 = -e_1 - K_2 e_2 + e_3 \quad (\text{IV.26})$$

La fonction de Lyapunov candidate est :

$$V_2 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (\text{IV.27})$$

La dérivée de v_2 est:

$$\dot{V}_2 = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 = -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 + e_2 e_3 \quad (\text{IV.28})$$

Le terme $e_2 e_3$ dans (IV.27) sera éliminé dans l'étape suivante.

Etape 3 :

C'est l'étape finale. La dérivée de l'erreur e_3 est donnée par :

$$\dot{e}_3 = \dot{x}_3 - \dot{a}_2 - \ddot{y}_r = u - \dot{a}_2 - \ddot{y}_r \quad (\text{IV.29})$$

On choisit la fonction de Lyapunov suivante:

$$V_3 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2} e_3^2 \quad (\text{IV.30})$$

Sa dérivée :

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + e_3 \dot{e}_3 \\ &= -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 + e_3 (e_2 + u - \dot{a}_2 - \ddot{y}_r) \end{aligned} \quad (\text{IV.31})$$

Pour que $\dot{v}_3 < 0$, il faut choisir la commande u tel que :

$$u = -K_3 e_3 - e_2 + \dot{a}_2 + \ddot{y}_r \quad (\text{IV.32})$$

Dans ce cas :

$$\dot{V}_3 = -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 - K_3 e_3^2 < 0 \quad (\text{IV.33})$$

Où : k_3 gain > 0

Alors, l'équation (IV.27) devient :

$$\dot{e}_3 = -K_3 e_3 - e_2 \quad (\text{IV.34})$$

La dynamique de toutes les erreurs données sous forme matricielle est donnée par:

$$\dot{E}_1 = AE \quad (\text{IV.35})$$

Avec :

$$A = \begin{bmatrix} -k_1 & 1 & 0 \\ -1 & -k_2 & 1 \\ 0 & -1 & -k_3 \end{bmatrix}, E = [e_1 \quad e_2 \quad e_3]^T$$

La solution de (IV.33) est:

$$E = E(0)\exp(A, t) \quad (\text{IV.36})$$

L'équation (IV.35) donne une convergence des erreurs vers zéro par un bon choix des gains k_1, k_2 et k_3 et la sortie du système suit sa référence

IV.3 Procédure générale de conception :

Dans cette partie, on essayera de généraliser l'application de l'approche du Backstepping pour des systèmes d'ordre n :

$$\dot{x}_1 = x_2 + \phi_1(x_1)^T \theta_1$$

$$\dot{x}_2 = x_3 + \phi_2(x_1, x_2)^T \theta_2$$

.

.

.

$$\dot{x}_n = \phi_n^T(x_1, x_2, \dots, x_n) \theta_n + g(x_1, x_2, \dots, x_n) u \quad (\text{IV.37})$$

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) \neq 0 \quad (\text{IV.38})$$

En général, la conception, par le principe du Backstepping adaptative, de la loi de commande u est exécutée en n étapes. A la $i^{\text{ème}}$ étape, un sous-système du $i^{\text{ème}}$ ordre est stabilisé par rapport à une fonction de Lyapunov v_i par la conception d'une fonction stabilisante α_i . La loi de commande est alors établie à l'étape finale [18].

L'algorithme global du Backstepping adaptative est donné par :

Par convention, on définit: $e_0 = 0$, $\alpha_0 = 0$, $e_1 = x_1 - y_r$.

$$e_i = x_i - \alpha_{i-1} - y_r^{(i-1)}$$

$$\alpha_i = -e_{i-1} - k_i e_i - \beta_i$$

Où :

$$\beta_1 = w_1, \quad \beta_i = w_i - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_j} x_{j+1} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial y_r^{(j-1)}} y_r^{(j)}, \quad 2 \leq i \leq n$$

$$w_1 = \varphi_1^T \theta_1, \quad w_i = \varphi_i^T \theta_i - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_j} (\varphi_j^T \theta_j), \quad 2 \leq i \leq n$$

$$u = \frac{1}{g} (\alpha_n + y_r^{(n)})$$

$$\dot{E} = AE.$$

Avec :

$$A = \begin{bmatrix} -k_1 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ -1 & -k_2 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & -k_3 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -k_4 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -k_n \end{bmatrix}, \quad E = [e_1 \quad e_2 \quad e_3 \quad e_4 \quad \dots \quad e_n]^T$$

$$E = E(0) \exp(At)$$

L'équilibre du système s'exprime par :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = 0 \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} [y(t) - y_r(t)] = 0, \quad \text{la sortie du système } y(t) \text{ suit sa référence } y_r(t).$$

IV.4 Application de la commande Backstepping adaptative à la génératrice a double alimentation du contrôle de la puissance active et réactive :

$$P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{rq} \quad (IV.39)$$

$$Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s} \quad (IV.40)$$

La tension rotorique sur l'axe (d ,q) donné par :

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + \delta L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \delta L_r W_s g i_{rq} \quad (\text{IV.41})$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + \delta L_r \frac{di_{rq}}{dt} - \delta L_r W_s g i_{rd} + \frac{g M V_s}{L_s} \quad (\text{IV.42})$$

La puissance active et réactive :

$$\dot{P}_s = -V_s \frac{M}{L_s} \frac{di_{rq}}{dt} \quad (\text{IV.43})$$

$$\dot{Q}_s = -V_s \frac{M}{L_s} \frac{di_{rd}}{dt} \quad (\text{IV.44})$$

On dérive l'équation (IV.43) et (IV.44) :

$$\dot{P}_s = -V_s \frac{M}{\delta L_s L_r} \left(V_{rq} - R_r i_{rq} - \delta L_r g W_s i_{rd} - \frac{g M V_s}{L_s} \right) \quad (\text{IV.45})$$

$$\dot{Q}_s = -V_s \frac{M}{\delta L_s L_r} \left(V_{rd} - R_r i_{rd} + \delta L_r g W_s i_{rq} \right) \quad (\text{IV.46})$$

Les erreurs :

$$e_1 = P_s^{ref} - P_s \quad e_2 = Q_s^{ref} - Q_s \quad (\text{IV.47})$$

Sa dérivée :

$$\dot{e}_1 = \dot{P}_s^{ref} - \dot{P}_s \quad (\text{IV.48})$$

$$\dot{e}_2 = \dot{Q}_s^{ref} - \dot{Q}_s \quad (\text{IV.49})$$

Le choix de la fonction de Lyapunov

$$V_{(e_1)} = -\frac{1}{2} e_1^2 \quad (\text{IV.50})$$

Le dérivé de cette fonction est :

$$\dot{V}_{(e_1)} = e_1 \dot{e}_1 = e_1 (\dot{P}_s^{ref} - \dot{P}_s) \quad (\text{IV.51})$$

Remplacent (IV.45) sur l'équation 1 :

$$\dot{e}_1 = \dot{P}_s^{ref} + V_s \frac{M}{\delta L_s L_r} \left(V_{rq} - R_r i_{rq} - \delta L_r g W_s i_{rd} - \frac{g M V_s}{L_s} \right) \quad (\text{IV.51})$$

$$\dot{e}_1 = -K_1 e_1 \quad (\text{IV.52})$$

On choisit K_1 positive

$$V_{rq} = -(K_1 e_1 + \dot{P}_S^{ref}) \frac{\delta L_r L_s}{M V_s} + R_r i_{rq} + \delta L_r g W_s i_{rd} + \frac{g M V_s}{L_s} \quad (\text{IV.53})$$

Le choix de la fonction de Lyapunov :

$$V_{(e_2)} = -\frac{1}{2} e_2^2 \quad (\text{IV.54})$$

Le dérivé de cette fonction est :

$$\dot{V}_{(e_2)} = e_2 \dot{e}_2 = e_2 (\dot{Q}_s^{ref} - \dot{Q}_s) \quad (\text{IV.55})$$

$$\dot{e}_2 = -K_2 e_2 \quad (\text{IV.56})$$

$$\dot{e}_2 = \dot{Q}_s^{ref} + V_s \frac{M}{\delta L_s L_r} (V_{rd} - R_r i_{rd} + \delta L_r g W_s i_{rq}) \quad (\text{IV.57})$$

$$V_{rd} = -(K_2 e_2 + \dot{Q}_s^{ref}) \frac{\delta L_r L_s}{M V_s} + R_r i_{rd} - \delta L_r g W_s i_{rq} \quad (\text{IV.58})$$

IV.5 Résultats de simulation :

Dans ce qui suit nous allons étudier les performances des différents types de commandes

Cette analyse sera réalisée par des simulations de modèle simplifié de la machine asynchrone à double alimentation présenté au chapitre 3, utilisée dans le domaine éolien. Les simulations sont effectuées sous l'environnement de logiciel MATLAB/SIMULINK

✓ Suivi de consigne

Cet essai consiste à réaliser un changement de consignes de puissance active et réactive tout en maintenant la vitesse d'entraînement de la MADA constante.

Conditions d'essai

- A l'instant $t=0.8s$ la puissance active varie de la valeur 0 W à une valeur de 5000 W
- La puissance réactive est maintenue nulle pour toute la simulation.

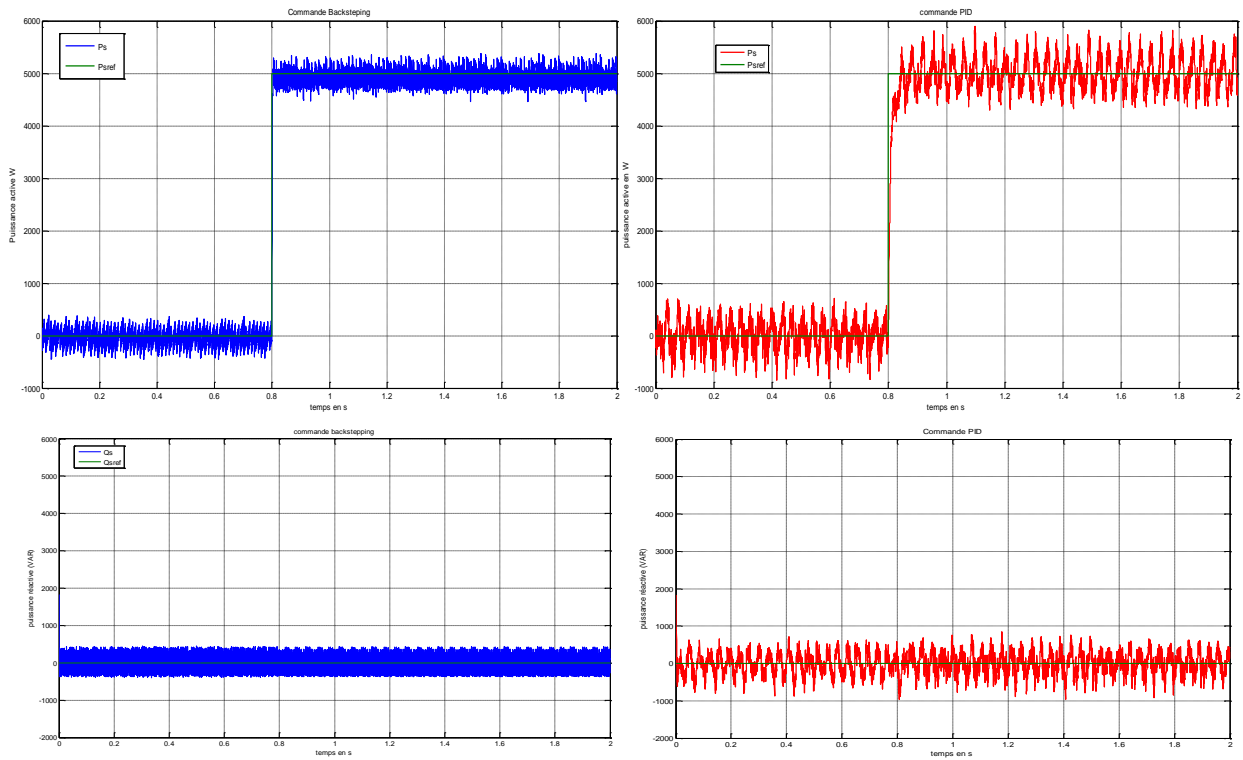


Figure 4.2 : suivi de consigne de puissance active et réactive

Résultats et interprétation :

Les figures (4.2) (4.3) (4.4) illustrent le comportement transitoire de puissance active et réactive satorique pour les deux types de commandes .En examinant l’allure de ces courbes on remarque que le temps réponse obtenu par la commande Backstepping adaptative est assez rapide par rapport au régulateur PID qui est d’environ 0.2 s.

A l’instant $t=0.8s$ le changement de consigne de la puissance active avec le régulateur PID provoque une variation de la puissance réactive avec un régime transitoire un peu prononcé qui est du à l’interaction entre les deux puissances .On peut constater que le découplage avec le régulateur PI n’est pas parfait.

On peut remarquer d’après les mêmes figures que ce changement de consigne provoque une variation de la puissance réactive mais avec une réponse transitoire meilleure par rapport au régulateur PI avec un temps de réponse inférieur et un dépassement très réduit

✓ Sensibilité aux perturbations

Cet essai nous permet de vérifier dans quelle mesure les puissances mesurées restent à leurs valeurs de consigne lorsque la vitesse de rotation de la machine varie brusquement

Conditions d'essai

- A l'instant $t=0.8s$ la puissance active varie de la valeur 0 W à une valeur de 5000 W
- La puissance réactive est maintenue nulle pour toute la simulation.
- A l'instant $t=1.5s$ la vitesse de rotation Ω varie de la valeur 1440 tr/mn à une valeur de 1590 tr/mn .

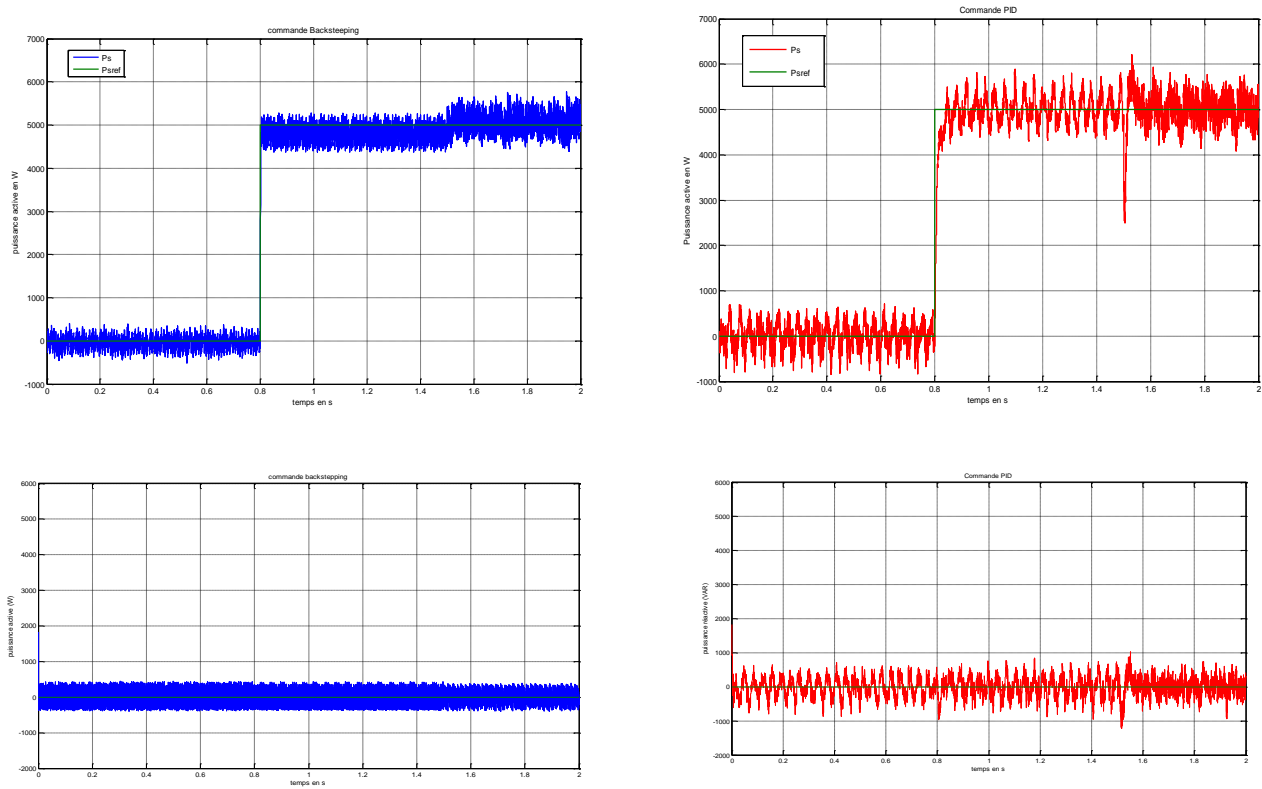
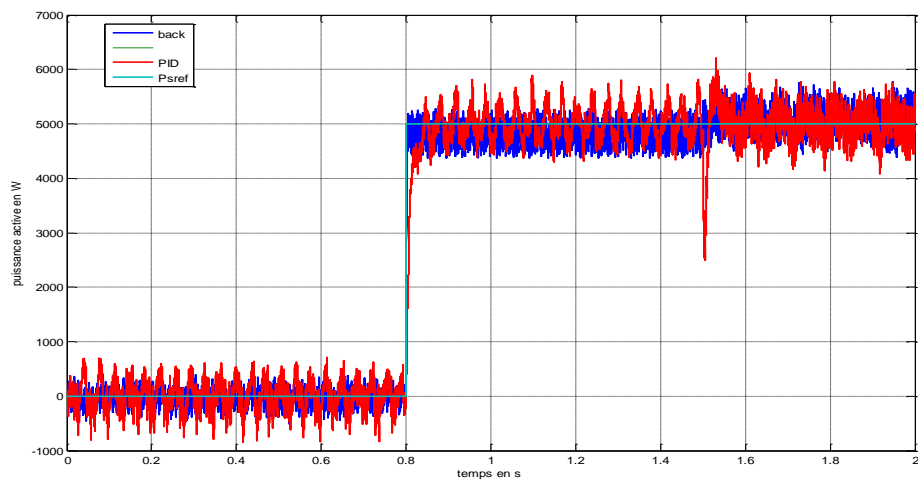


Figure 4.3 : effet sur les puissances d'une brusque variation de vitesse



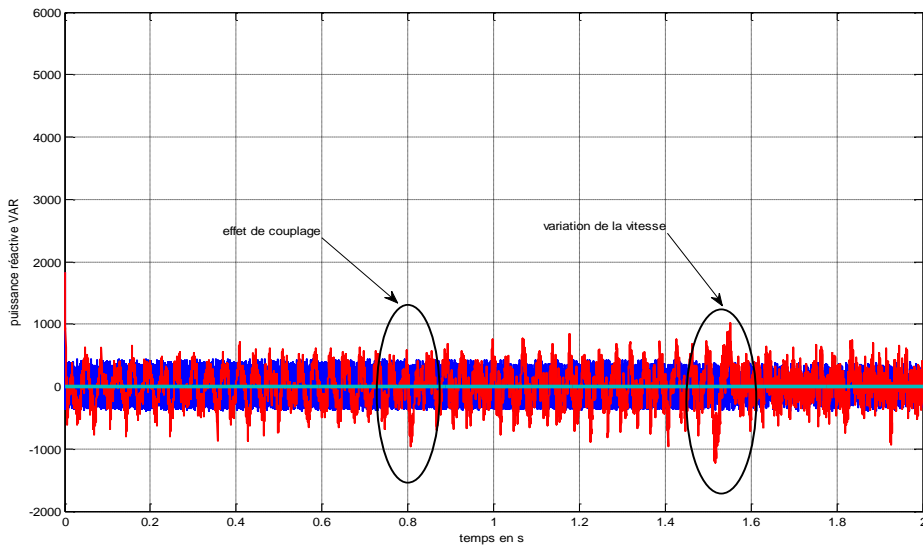


Figure 4.4 : puissance active et réactive comparaison entre les deux Commandes

Résultats et interprétation :

A travers les résultats obtenus et qui sont représentées par les figures (4.2) (4.3) (4.4) il est constaté que la machine régit différemment aux perturbations de vitesse d'entraînement suivant la commande utilisée.

Ce test montre les limites de régulateur PID qui est seulement basé sur la fonction de transfert et aucune prise en compte des perturbations. Les mesures de puissance montrent un écart important par rapport à la valeur de la référence et un temps de retour à l'écart initial important en comparaison avec l'autre commande.

IV.6 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis d'établir la synthèse de deux commandes de philosophie différentes pour la commande de la machine à double alimentation utilisée en génératrice. Un régulateur proportionnel intégral qui a servi de référence de comparaison, un régulateur Backstepping adaptative cette loi est établie étape par étape tout en assurant la stabilité de la machine en boucle fermée par un choix convenable de la fonction de Lyapunov.

Les performances offertes par le Backstepping combiné au control vectoriel pour commander la MADA sont soulignés en fin de chapitre par les résultats de simulation montrant la robustesse de cette technique pouvant remplacer avantageusement les conventionnels contrôleurs PI.

Conclusion

Le travail effectué dans ce mémoire a comme objectif la modélisation des différents composants de la production décentralisée de l'énergie éolienne et l'étude des différents systèmes de contrôle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui est la plus utilisée pour ce mode de production d'énergie électrique.

La production d'énergie électrique par éoliennes se divise en deux grandes catégories : l'éolien de proximité où les machines sont très souvent autonomes et de petites puissances, et le grand éolien où l'énergie électrique est produite directement sur le réseau de distribution avec des machines de plusieurs centaines de kW, voire de plusieurs MW.

La majeure partie des éoliennes modernes industrielles est constituée de génératrices asynchrones à double alimentation car elles apportent non seulement des solutions aux variations incessantes du vent, mais aussi permettent un transfert optimal de la puissance au réseau.

La modélisation d'une éolienne de 1.5 MW de puissance fonctionnant à vitesse variable à base d'une MADA pilotée par le rotor par un onduleur MLI. Pour simplifier le modèle de la machine nous avons établi, le modèle de la machine dans un système d'axe biphasé (q,d) lié au stator à l'aide de la transformation de PARK.

Les performances de deux commandes ont été étudiés, il s'agit de régulateur proportionnel intégral qui est le plus utilisé dans l'industrie, et du régulateur Backstepping adaptative.

Les performances offertes par le Backstepping combiné au control vectoriel pour commander la MADA sont plus robuste et plus stable par rapport le régulateur PI.

Nous signalons qui peut exister d'autres régulateurs qui donnent des performances meilleures par rapport ces derniers.

Annexe

Les paramètres :

| | |
|---------------------|---------------------------|
| $R_r = 0.62$ | Résistance rotorique |
| $R_s = 0.455\Omega$ | Résistance statorique |
| $L_s = 0.084H$ | L'inductance statorique |
| $L_r = 0.0213H$ | L'inductance rotorique |
| $g = 0.04$ | Glissement |
| $W_s = 314rad/s$ | vitesses angulaire |
| $V_s = 230V$ | La tension |
| $M = 0.078H$ | L'inductance magnétisante |
| $M_{sr} = 0.034H$ | L'inductance mutuelle |

Références bibliographiques

- [1] A. BOYETTE « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne »; Thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 11 Décembre 2006.
- [2] S. E. AIMANI « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » ; Thèse de doctorat en génie électrique, Université des sciences et technologies de Lille 1, (USTL), France.
- [3] F. POITIERS « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne »; Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 19 Décembre 2003.
- [4] A. M. SIDDO & I. S. NOUHOU « Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » ; Mémoire de fin étude d'ingénieur en électrotechnique, École Nationale Polytechnique, El-Harrach, 2007.
- [5] L. KHETTACHE « Étude et Commande d'un Système Éolien à Base d'une Machine Électrique Double Alimentée »; Mémoire de magistère en électrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna, 2007.
- [6] N. MOHAN & T. M. UNDELAND & W. P. ROBBINS « Power Electronics, Converters, Applications and design »; Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-58408-8.
- [7] N. K. MERZOUK, M. MERZOUK, B. BENYOUCEF « Perspectives du pompage éolien dans le sud Algérien » ; Projet National de Recherche, domicilié au Centre de Développement des Énergies Renouvelables, Laboratoire d'Énergie Éolienne, Alger, 2007.
- [8] J. MARTIN « Énergies éoliennes » ; Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie Énergétique pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [9] P. LECONTE, M. RAPIN, E. SZECHENYI « Éoliennes » ; Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie Mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
- [10] S. HEIER « Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems »; Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [11] F. Poitier, « étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de Doctorat de l'université de NANTE, 2003.

- [12] D. Lahouel. « Commande Non Linéaire Adaptative D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents ».thèse de magister en électrotechnique. Université de Batna, 2009.
- [13] S. Le Ballois. P. Cordon. « Automatique: système linéaire et continues». 2e edition, DUNOD, Paris, 2006.
- [14] N.ROMANI « Modélisation et Commande du Système d'Alimentation en Air pour le Module de Puissance d'un Véhicule à Pile à Combustible avec Reformeur Embarqué». Thèse De Doctorat Spécialité Physique. École Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes ». université de Paris, 2007
- [15] E. Boukas. « Systèmes asservis » Edition de polytechnique de Montréal ,1995.
- [16] S.Chaouch and M-S.Naït-Saïd, " Backstepping control design for position and speed tracking of DC motors " Asian journal of information technology, Medwell journals, 2006.
- [17] J.J.Slotine, "Applied nonlinear control", Prentice Hall, 1991
- [18] A.R.Benaskour, "Aspects de l'application du backstepping adaptatif à la commande décentralisée des systèmes non linéaires", Thèse PhD, Université Laval, Canada, Février 2000.
- [19] L.Douha, "Commande adaptative par backstepping en utilisant les réseaux de neurones", Mémoire de magister, Université de Batna, Mai 2004.
- [20] M.Mokhtari, "Commande adaptative des systèmes non linéaires backstepping", Mémoire de magister, Université de Batna, Septembre 2003.
- [21] <http://www.mtaterre.fr/dossier-mois/archives/chap/682/Le-fonctionnement-de-l-energie-eolienne>
- [22] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne>
- [23] Mme KELKOUL Bahia, « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation », Université de Tlemcen, 2011 .
- [24] A. Merabet. « Commande non linéaire à modèle prédictif pour une machine asynchrone ». Thèse de Doctorat. Université du QUÉBEC; 2007.
- [25] F. Iov, A. D. Hansen, P. Sørensen, Frede Blaabjerg. « Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink General Overview and Description of the Models ». Aalborg University, March 2004.
- [26]: A. Talha *, F. Bouchafaa *, E.M. Berkouk **, M.S. Boucherit **, C. Kouroughli*. « Nouvelle stratégie de la modulation calculée pour l'onduleur à sept niveaux à structure NPC ». 3rd International