

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Année : 2019

Faculté : Sciences de l'Ingénierat
Département : Electronique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

Intitulé :

**Estimation de la vitesse de la machine d'une
éolienne**

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Automatique
Spécialité : Automatique & Systèmes

Par : IZGHECHE yousra

DEVANT Le JURY

Président : S.BEN MOUSSA

Directrice de mémoire : K. BEDOUD MCA Unité de Recherche URMA/CRTI

Examineur : R. LAAKEL Dr

Examineur : A. AIZEM Dr

Résumé :

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire est l'étude d'un observateur flou pour générer une vitesse de rotation mécanique de référence, afin qu'on puisse par la suite augmenter la fiabilité du système de commande MPPT. La modélisation et la commande d'une chaîne de conversion à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) suivie d'un convertisseur (MLI) pour contrôler les puissances active et réactive (P ; Q) a été entreprise.

Chaque partie de la chaîne est présentée et son modèle mathématique est développée. Des programmes de simulations sont conséquemment, mis au point et qui grâce auquel on présente les résultats de simulations.

Mots clefs : *Eolienne, modélisation, machine asynchrone double alimentation (MADA), commande MPPT, commande vectorielle, puissance active et réactive, régulateur.*

ملخص

ملخص:

الهدف من العمل المقدم في هذه الأطروحة هو دراسة مراقب غامض لتوليد سرعة دوران ميكانيكية مرجعية ،حتى تتمكن لاحقاً من زيادة موثوقية نظام التحكم MPPT. تم إجراء النمذجة والتحكم في سلسلة التحويل استناداً إلى جهاز تغذية غير متزامن مزدوج (MADA) متبوعاً بمحول (MLI) للتحكم في القوى النشطة والتفاعلية (P ; Q).

يتم تقديم كل جزء من السلسلة ويتم تطوير نموذجها الرياضي. وبالتالي يتم تطوير برامج لمحاكاة وبفضل تقديم نتائج المحاكاة.

الكلمات المفتاحية: التوربينات الريحية، النمذجة، الآلة غير المتزامنة ذات القدرة المزدوجة (MADA) ،تحكم MPPT ،التحكم في النواقل، الطاقة الفعالة والتفاعلية، منظم.

Abstract

Abstract:

The objective of the work presented in this thesis is the study of a fuzzy observer to generate a reference mechanical rotation speed, so that we can subsequently increase the reliability of the MPPT control system. Modeling and control of a conversion chain based on a dual feed asynchronous machine (MADA) followed by a converter (MLI) to control the active and reactive powers (P; Q) was undertaken.

Each part of the chain is presented and its mathematical model is developed. Simulation programs are consequently developed and thanks to which the results of simulations are presented.

Key words: Wind turbine, modeling, dual power asynchronous machine (MADA), MPPT control, vector control, active and reactive power, regulator.

Dédicace

Je dédie ce travail

A mes très chers et précieux parents qui m'ont toujours soutenu, et à l'intérêt qu'ils ont toujours porté pour mes études, je ne les remercierais jamais assez, pour tout ce qu'ils font. Que dieu me les protège

A ma grand-mère

A Mon frère HOUSSEM

A ma très chères cousine dans ma vie : RABEB

A tous mes amies : WAFA , NADA

Enfin Je voudrais remercier tous les gens qui sont entrés dans ma vie, et qui l'ont ainsi rendu magnifique

Remerciements

Je tiens à remercier le bon DIEU qui m'a donné la patience et le courage pour mener ce travail jusqu'au bout.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements, au DR. K.BEDOUD, d'avoir accepté de m'encadrer pour mon mémoire, ainsi que pour son soutien, ses remarques pertinentes, son encouragement, ses conseils et pour son suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire dans les meilleures conditions.

J'adresse également mes remerciements à tous les membres de jury: SAMIR BEN MOUSSA, Dr. LAAKEL RABEH, et le Dr. AIT AIZEM qui ont fait l'honneur de juger ce travail, Nous tenons aussi à remercier l'ensemble des membres du jury

Je remercie également mes parents pour la confiance qu'ils ont su placé en moi, pour les bonnes valeurs qu'ils ont pu m'inculquer, soyez-en fiers. Je ne saurais vous récompenser pour tout ce que vous avez fait pour moi depuis toujours, seulement considérez ce mémoire comme gage de ma gratitude et mon humilité face à votre présence, vos encouragements, vos bénédictions et tous vos sacrifices. Qu'Allah vous rétribue de la meilleure manière.

Pour terminer, on tient à remercier tous nos amis qui nous ont aidés et nous ont apportés leur soutien moral et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin de ce travail.

Table des matières

Introduction Générale.....	1
Chapitre I	Notions fondamentales
1.1. Introduction	2
1.1.1. L'énergie éolienne à l'échelle mondiale.....	3
1.1.2. Installation de l'énergie éolienne dans le monde.....	3
1.1.3. Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne.....	6
1.2. Principaux composants d'une éolienne.....	6
1.3. Différents types d'éoliennes.....	8
1.3.1. Eoliennes à axe horizontal.....	8
1.3.2. Eoliennes à axe vertical.....	9
1.4. Concessions d'éoliennes.....	11
1.5. Principe de conversion de l'énergie éolienne éolien.....	11
1.5.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.....	12
1.5.2. Loi de Betz.....	13
1.6. Eolienne à base de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).....	14
1.6.1. Structure de la MADA.....	15
1.7. Conclusion.....	15
Chapitre II :	Description et modélisation de la chaîne de conversion éolienne
2.1. Introduction.....	16
2.2. Description de la chaîne de conversion.....	16
2.3. Modélisation de la chaîne de conversion.....	17
2.3.1. Modélisation de la turbine	17
2.3.2. Modelisation du multiplicateur.....	20
2.3.3. Modélisation de la MADA.....	21
2.3.4. Modélisation de l'onduleur triphasé à MLI	
2.4. Modélisation de l'onduleur.....	25
2.4. Conclusion.....	30

Table des matières

Chapitre III	Commande de la chaîne de conversion
3.1.	Introduction..... 31
3.2.	Commande MPPT 31
3.3.	Technique de commande MPPT..... 32
3.3.1.	MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation..... 33
3.3.2.	MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation..... 35
3.4.	Commande vectorielle de la MADA 38
3.5.	Résultats de Simulation 45
3.6.	Conclusion 49
Chapitre IV	Le point maximum de puissance maximum à base d'observateur flou
4.1.	Introduction..... 50
4.2.	Bases générales de la logique floue..... 50
4.2.1	Ensembles flous..... 50
4.2.2	Variables linguistiques 52
4.2.3	Fonction d'appartenance..... 52
4.3.	Structure interne d'un système flou 53
4.3.1.	Base de connaissances (règles) 53
4.3.2.	Fuzzification 54
4.3.3.	Moteur d'inférence flou 54
4.3.4.	Defuzzification..... 54
4.4.	Le principe de la méthode Perturbation et observation (P&O)..... 55
4.5.	Structure de l'observateur 55
4.6.	Résultats et discussions..... 58
4.7.	Conclusion..... 59
	Conclusion générale..... 60
	Références..... 61
	Annexe.....

LISTE DES FIGURES

Liste Des Figures

Chapitre I

Aperçu sur l'énergie éolienne

Fig.1. 1 Puissance éolienne installée dans le monde fin 2016 (en MW)

Fig.1. 2 Répartition mondiale du marché éolien en 2016

Fig.1. 3 Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW

Fig.1. 4 Eléments constituant une éolienne

Fig.1. 5 Les deux types des éoliennes

Fig.1. 6 Eoliennes à axe horizontal

Fig.1. 7 Eoliennes à axe vertical de type Savonius

Fig.1. 8 Eoliennes à axe vertical de type Darrieus

Fig.1. 9 principe de la conversion de l'énergie éolienne

Fig.1. 10 Colonne d'air animée d'une vitesse

Fig.1. 11 Tube de courant autour d'une éolienne

Fig.1. 12 Structure du système de génération éolienne à base de MADA

Fig.1. 13 Représentation de la machine asynchrone à double alimentation

LISTE DES FIGURES

Chapitre II

Modélisation de la chaîne de conversion

Fig 2. 1 Schéma de description de la chaîne de conversion

Fig 2. 2 Schéma de la turbine éolienne

Fig.2. 3 Organigramme de simulation de la turbine éolienne

Fig 2. 4 Coefficients de puissance(C_p) en fonction de la vitesse spécifique(λ)pour différentes (β)

Fig 2. 5 Partie mécanique de la turbine éolienne

Fig 2. 6 Schéma bloc du modèle de la turbine

Fig 2. 7 Représentation de la MADA : a) dans le repère (abc), b) dans (dq)

Fig 2. 8 Schéma simplifié de l'onduleur à MLI sinus – triangle

Fig 2. 9 Commande MLI de l'onduleur

Fig 2. 10 Allure des signaux modulés et de la porteuse

Fig 2. 11 Intervalles de conduction d'interrupteur K1

Fig 2. 12 Intervalles de conduction d'interrupteur K4

Fig 2. 13 Tension simple

Fig 2.14 : Tension composée

LISTE DES FIGURES

Chapitre III

Commande du système

- Fig 3.1 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable
- Fig 3.2 Diagramme de conversion de puissance
- Fig 3.3 Stratégies de commande de la turbine étudiée
- Fig 3.4 MPPT sans asservissement de la vitesse
- Fig 3.5 Schéma bloc de MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation
- Fig 3.6 Régulation de la vitesse
- Fig 3.7 Schéma fonctionnel du correcteur PI
- Fig 3.8 Référentiel diphasé d-q lié au champ tournant statorique
- Fig 3.9 Structure du modèle de la MADA à orientation du flux statorique
- Fig 3.10 Schéma bloc de la commande du convertisseur coté MADA
- Fig 3.11 Contrôle des courants rotorique
- Fig 3.12 Puissances statorique : a) active , b) réactive
- Fig 3.13 Puissances rotorique : a) active , b) réactive
- Fig 3.14 Courants statorique : a) axe d , b) axe q
- Fig 3.15 Courants rotorique : a) axe d , b) axe q

LISTE DES FIGURES

Chapiter VI

MPPT avec observateur

Fig 4. 1 Représentation de la température d'un corps par les ensembles classiques et flous

Fig 4.2 Variable linguistique

Fig.4.3 Représentation de plusieurs ensembles flous

Fig 4.4 Structure interne d'un système flou

Fig 4.5 Defuzzification par centre de gravité

Fig 4.6 Schéma de principe de la méthode P&O

Fig 4.7 Schéma bloc du modèle de l'observateur flou de la vitesse de rotation

Fig 4.8 Fonction d'appartenance des deux entrées : a) ΔP , b) $\Delta\Omega_{mec}$

Fig 4.9 Fonction d'appartenance de la sortie $\Delta\Omega_{mec_ref}$

Fig 4.10 Surface des règles

Fig 4.12 Vitesse du vent estimée

Fig 4.13 Vitesse de rotation estimée

Liste des abréviations et symboles

Liste des abréviations

<i>MADA</i>	Machine Asynchrone à Double Alimentation.
<i>GADA</i>	Générateur Asynchrone à Double Alimentation.
<i>DFIG</i>	Double Fed Induction Generator.
<i>MLI</i>	Modulation de largeur d'impulsion.
<i>PWM</i>	Pulse-width modulation.
<i>PI</i>	Correcteur Proportionnelle Intégrateur.
<i>DFIM</i>	Double Fed Induction Motor
<i>IGBT</i>	Insulated Gate Bipolar Transistor

Symbols

<i>V</i>	La vitesse du vent.
<i>S</i>	La surface des pales
ρ	Densité du vent.
<i>f</i>	Fréquence de rotation du rotor
<i>g</i>	Le glissement
<i>P</i>	Nombre de paires de pôles
ω_r	Pulsation rotorique
ω_s	Pulsation statorique
$\Omega_{méc}$	Vitesse mécanique de rotation
P_s	Puissance active statorique
P_{tur}	Puissance turbine
P_r	Puissance rotorique
Q_s	Puissance réactive statorique
Q_r	Puissance réactive rotorique
C_{em}	Couple électromagnétique
C_g	Couple de la génératrice
R_s	Résistance statorique
R_r	Résistance rotorique
<i>G</i>	gain de multiplicateur
C_c	Coefficient de couple

Liste des abréviations et symboles

C_p	Coefficient de puissance
G	gain de multiplicateur
R	Rayon de la turbine éolienne
β	Angle de calage des pales de la turbine
J_t	moment d'inertie de la turbine
J	Moment d'inertie
θ	Déphasage entre les axes statorique et rotorique
θ_s	Le déphasage entre les axes statorique et d
θ_r	Déphasage entre les axes rotorique et d
i_{sd}	Courant statorique sur l'axe d
i_{sq}	Courant statorique sur l'axe q
i_{rd}	Courants rotorique sur l'axe d
i_{rq}	Courant rotorique sur l'axe q
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants statoriques
i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}	Courants rotoriques
V_{ds}	La tension statorique sur l'axe d
V_{qs}	La tension statorique sur l'axe q
V_{dr}	La tension rotorique sur l'axe d
V_{qr}	La tension rotorique sur l'axe q
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	Tensions d'alimentations des phases statoriques
V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}	Tensions d'alimentations des phases rotoriques
F	Coefficient de frottement
U_d	Source de tension continue de l'onduleur
φ_{sq}	Flux statorique sur l'axe q
φ_{sd}	Flux statorique sur l'axe d
φ_{rd}	Flux rotorique sur l'axe d
φ_{rq}	Flux rotorique sur l'axe q
$\Omega_{méc_ref}$	Vitesse mécanique de rotation de référence
L_s	Inductance propre d'une phase statorique
L_r	Inductance propre d'une phase rotorique
L_m	Inductance mutuelle
L_{ss}	Matrice des inductances statoriques

Liste des abréviations et symboles

L_{rr}	Matrice des inductances rotoriques
M_{sr}	Inductance mutuelle stator- rotor
M_{rs}	Inductance mutuelle rotor – stator
M_s	Inductance mutuelle entre les enroulements du stator.
M_r	Inductance mutuelle entre les enroulements du rotor
V_s	Tension appliquée au stator
V_r	Tension appliquée au rotor
T_e	Période d'échantillonnage
S_{abc}	Grandeurs booléennes de commande des bras de l'onduleur
(d , q)	Axes longitudinal et en quadrature du repère de Park.
(x , y)	Axes correspondants au référentiel fixe par rapport au rotor
K_p	Gain de l'action proportionnel du régulateur.
K_i	Gain de l'action intégrale du régulateur PI.
v_1	Gain La surface de glissement de puissance active.
v_2	Gain La surface de glissement de puissance réactive.
FTBF	Fonction de Transfer en Boucle Ouverte.
FTBO	Fonction de Transfer en Boucle Fermée.
(α, β)	Axes correspondant au référentiel lie au stator

Introduction générale

La consommation mondiale de l'énergie a connu une augmentation énorme ces dernières années à cause de l'industrialisation massive qui a tendance de s'amplifier de plus en plus. Les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique dénotent encore une fois l'importance des énergies renouvelables. Parmi les énergies dites renouvelable et non polluantes, l'énergie éolienne est une des plus prometteuses des énergies renouvelables pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Parmi les énergies les plus prometteuses est celle de l'éolienne qui représente une alternative intéressante notamment pour la production de l'énergie électrique. L'évolution des éoliennes a connu un essor ces dernières années, que ce soit sur le plan de leur utilisation dans le monde ou sur le plan de leur conception où ils ont passé de la petite éolienne isolée aux grands parcs des aérogénérateurs connectés sur le réseau électrique.

D'autre part, il paraît nécessaire de disposer d'un outil de simulation capable de modéliser l'ensemble de la chaîne de conversion d'énergie et de prévoir ses performances. L'objectif général de cette étude est d'optimiser la conversion électromécanique d'énergie des éoliennes, l'élaboration de stratégies appropriées de contrôle.

De nos jours, les systèmes éoliens à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) sont les plus utilisées notamment dans les grands parcs éoliens, et cela, grâce aux avantages que la MADA présente. Cette machine fonctionne à une fréquence fixe pour une vitesse d'entraînement variable grâce à un contrôle de courants rotoriques par des convertisseurs dimensionnés à des puissances réduites.

L'étude de ce travail réalisé au sein du département d'électronique de l'université Badji-Mokhtar-Annaba, dans le cadre du mémoire de fin d'études master 2 a pour objectif principal, d'étudier la commande de puissance active et réactive d'une éolienne basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

Pour ce faire, le contenu du mémoire est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente des généralités sur les systèmes éoliens ;

Introduction générale

- Le deuxième chapitre comporte la modélisation des éléments de la chaîne de conversion (turbine +MADA+convertisseur MLI) ;
 - Le troisième chapitre concerne la commande de la chaîne de conversion (turbine+MADA + contrôle du convertisseur coté MADA). Ce travail a été validé par simulation sous Matlab /Simulink.
 - Le quatrième chapitre est consacré à la réalisation d'un observateur à base de la logique flou.
 - Finalement, une conclusion générale sur les travaux réalisés est présentée.
-

1.1. Introduction

Dans un monde variable et qui se développe jours après jours, le besoin en de nouvelles sources d'énergies est nécessaire pour la production d'électricité. A cause du tarissement de l'énergie fossile dans le monde, les chercheurs s'intéressent de plus en plus à d'autres sources d'énergie dites renouvelables au détriment des sources d'énergie traditionnelle [24].

Les énergies renouvelables sont propres et inépuisables. Et vu que les autres sources d'énergie sont à coût élevé, plusieurs pays ont encouragé les chercheurs d'étudier et développer des systèmes de conversion d'énergie renouvelables (énergie solaire, énergie éolienne, hydraulique, géothermiqueetc) [33].

L'énergie éolienne est une énergie intermittente "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse. 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. Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux [22].

Les énergies éoliennes peuvent contribuer avec une part significative aux nouvelles sources d'énergie n'émettant pas de gaz à effet de serre. Leur exploitation raisonnée permet de produire de l'électricité. Ces énergies renouvelables théoriquement exploitables sont nombreuses et variées [20].

Les systèmes éoliens se développent ainsi plus rapidement, car on peut désormais s'appuyer sur des techniques faibles et éprouvées, de plus le potentiel énergétique mondial de cette énergie est estimé à une puissance de 5300 TWh, ce qui représente un gisement énergétique non négligeable et très prometteur [25].

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux les statistiques de l'éoliennes avec leurs constitutions, leurs principes de conversion de l'énergie, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent.

La dernière partie de ce chapitre illustre la structures de la machines asynchrones à double alimentation, leur principe de fonctionnement, leurs applications et leur intérêt.

1.1.1. L'énergie éolienne à l'échelle mondiale

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 [33].

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 aux vents, 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

1.1.2. Installation de l'énergie éolienne dans le monde

Le marché mondial de l'éolien semble avoir trouvé ses premières limites. Après avoir augmenté de manière quasi continue depuis le début des années 2000 pour atteindre 64,4 GW en 2015, les premières estimations font état pour 2016 d'un marché annuel de 54,2 GW, en recul par rapport au marché de l'année précédente. Ces résultats permettent cependant au parc éolien mondial d'augmenter de 12,4 % pour s'établir désormais à 486,7 GW [40].

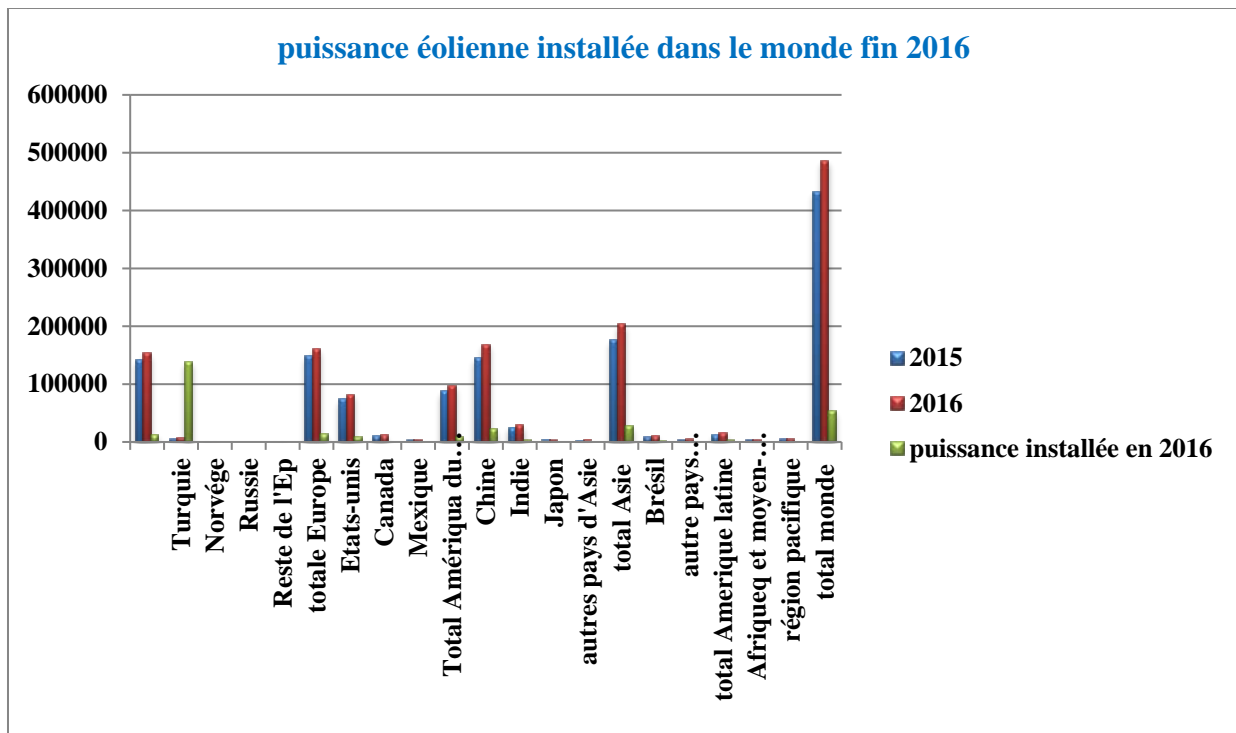


Fig.1.1 : Puissance éolienne installée dans le monde fin 2016 (en MW).

Une analyse géographique plus globale confirme que le marché de l'éolien reste plus que jamais tiré par l'Asie qui a représenté en 2016 un peu plus de la moitié (51,1 %) de la puissance éolienne installée dans le monde (Fig.1.2) L'Europe est restée la seconde place forte de l'énergie éolienne avec près du quart (24,9 %), devantant l'Amérique du Nord (17,3 %) et le reste du monde (6,7 %) [40].

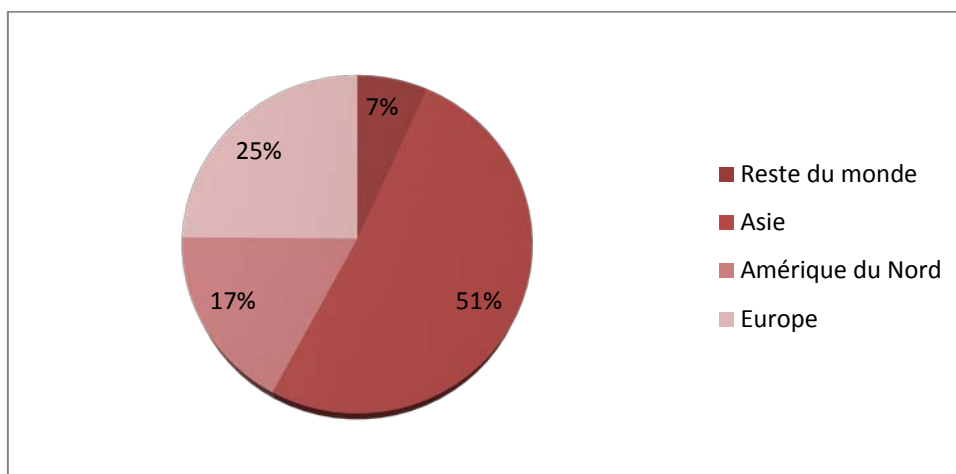


Fig.1.2 : Répartition mondiale du marché éolien en 2016

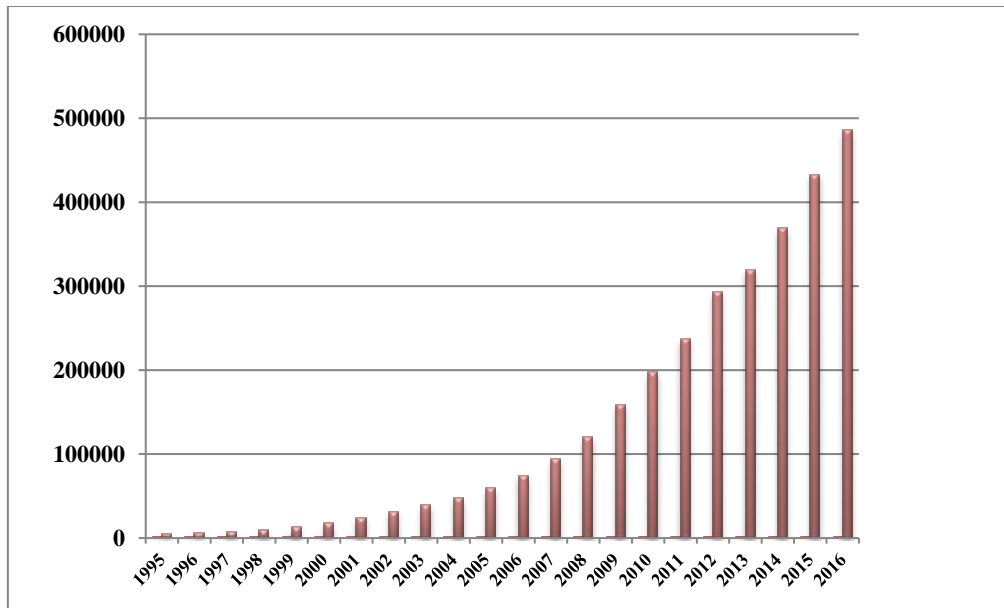


Fig.1.3 : Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW.

En Afrique Le Maroc, deuxième producteur d'énergie éolienne du continent après l'Egypte, avait (en 2007) 140 MW de puissance installée et a atteint 480 MW en 2012. Cette production va s'accroître dans les années à venir pour maintenir le Maroc le premier producteur d'énergie éolienne en Afrique. Le plus grand parc éolien marocain est composé de 165 aérogénérateurs. Donc, pour l'Algérie on a trois raisons principales qui plaident en faveur du développement des énergies renouvelables :

- ✓ 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 aussi leurs 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 a été exploitée uniquement et seulement pour le pompage de l'eau, la première expérience a été effectuée à Adrar en 1957 à ksar Sidi-Aïssa pour l'irrigation de 50 Hectares de terres agricoles [5].L'Algérie est confrontée actuellement à une obligation stratégique de la diversification de ses sources d'énergie, non seulement en termes de moyens financiers dont l'objectif n'est pas uniquement d'économiser ses réserves énergétiques, mais aussi de bénéficier le plus rapidement du transfert technologique dans ce domaine en partenariat avec les firmes internationales leaders [20].

Devant les recommandations des pouvoirs publics (Loi du 03 Février 2011), SONELGAZ ambitionne d'atteindre en 2015 un taux d'intégration de 6 % pour la production de l'énergie électrique à travers l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne et prévoit de porter ce chiffre à 10 % en 2027.

1.1.3. Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne

Avantages

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable qui ne produit ni pollution ni déchets, de plus elle rembourse sa dette énergétique, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à fabrication en quelques mois [5].
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie qui respecte l'environnement [8].
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant [9].
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre (pas d'émissions de gaz, pas de particules).
- ✓ L'énergie éolienne produit de l'électricité : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols [12].

Inconvénients

- ✓ l'énergie éolienne est une énergie intermittente et difficilement prévisible [5].
- ✓
- ✓ Le coût de l'énergie éolienne est plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [8].
- ✓ L'impact visuel, « ça reste néanmoins un thème subjectif » [9].
- ✓ La qualité de la puissance électrique : la puissance électrique produite par les Aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne [18].

1.2. Principaux Composants d'une éolienne

Une éolienne est constituée principalement de trois éléments principaux : le rotor, la nacelle et la tour. Chacune de ces éléments doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système avec un faible coût d'investissement [24] :

- ✓ **Tour ou 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 et bénéficier au maximum de l'énergie du vent.
- ✓ **Nacelle** : regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le générateur est généralement une machine synchrone ou asynchrone.
- ✓ **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 [45].

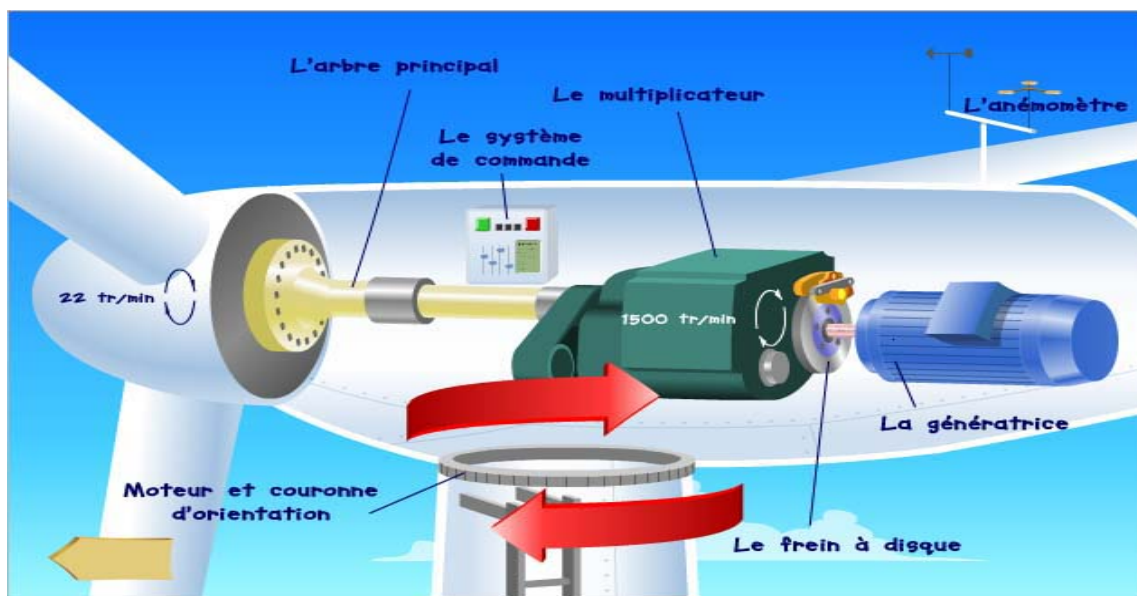


Fig.

1.4 : Eléments constituant une éolienne.

- ✓ **Multiplicateur**: sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.
- ✓ **Système de refroidissement**: se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.
- ✓ **Génératrice électrique**: c'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW.
- ✓ **Système de commande**: qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.
- ✓ **Arbre**: qui relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

- ✓ **Système d'orientation des pâles:** qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique). En plus de ces éléments, la turbine est munie des pâles fixes ou orientables et qui tournent à des vitesses nominales inférieures à 40 tr/min [25].

1.3. Différents types d'éoliennes

Il existe deux grandes familles d'éoliennes certaines ont un axe horizontal, parallèle au sol, et d'autres ont un axe vertical, perpendiculaire au sol.

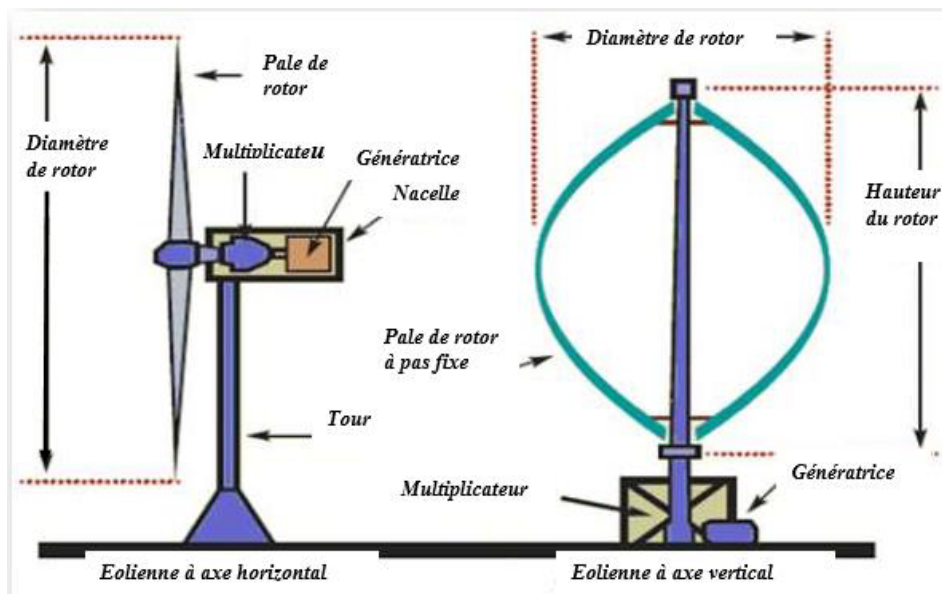


Fig.1.5 : Les deux types des éoliennes

1.3.1. Eoliennes à axe horizontal

Elles sont souvent appelées "éolienne à hélices" et sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles s'orientent suivant la direction du vent. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois (les plus courantes) ou plusieurs pales. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Elles sont implantées dans les zones rurales ou en mer car elles nécessitent de la place [4].

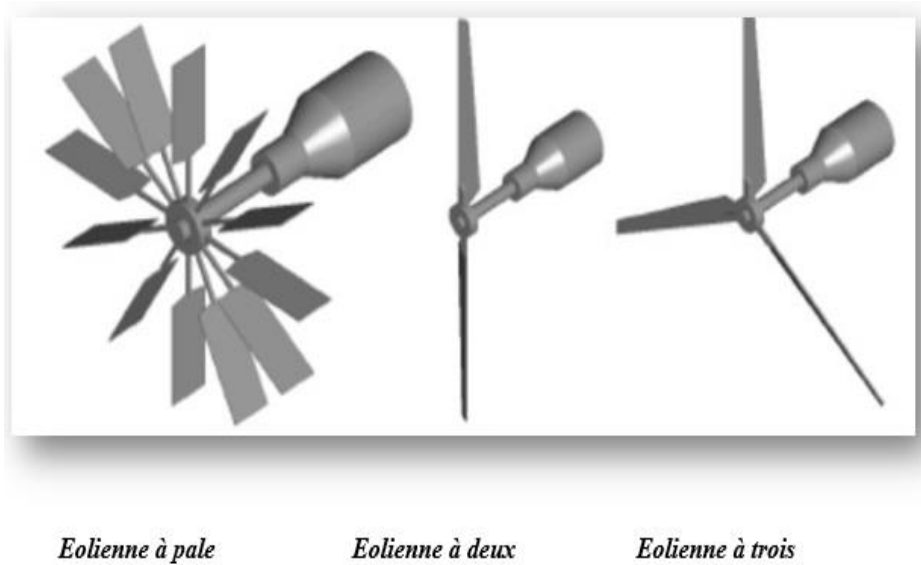


Fig.1.6 : Eoliennes à axe horizontal

Les principaux avantages des éoliennes à axe horizontal sont les suivants :

- ✓ Rendement plus élevé.
- ✓ Plus facile à accès au vent.
- ✓ Auto démarrage possible.

Inconvénients :

- ✓ Coût d'installation plus Elevé
- ✓ Un mât plus fort pour supporter le poids lourd de la nacelle.
- ✓ Orientation nécessaire
- ✓ Nécessite de longs câbles électriques

1.3.2. Eolienne à axe vertical

Elles ont été les premières structures utilisées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir des organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. Il existe deux types d'éoliennes verticales, les éoliennes de Savonius (inventés par le finlandais Siguard Savonius en 1924), Elles sont basées sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure [10].

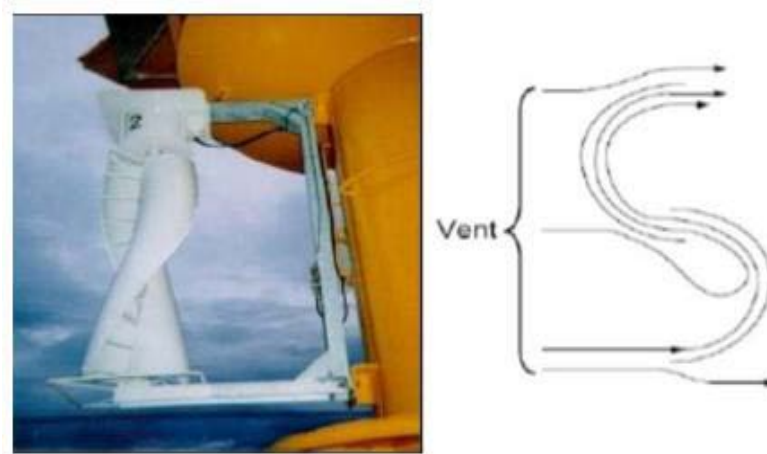


Fig.1.7 : Eoliennes à axe vertical de type Savonius

Les principaux avantages des éoliennes à axe vertical sont les suivants :

- ✓ Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien
- ✓ La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction.

Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants:

- ✓ Faible rendement et fluctuations importantes de puissance.
- ✓ Occupation importante du terrain pour les puissances élevées.
- ✓ Faible vitesse du vent à proximité du sol.

Les éoliennes de Darrieus (conçu par l'ingénieur français George Darrieus). Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction de l'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (Fig 1.8). La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.

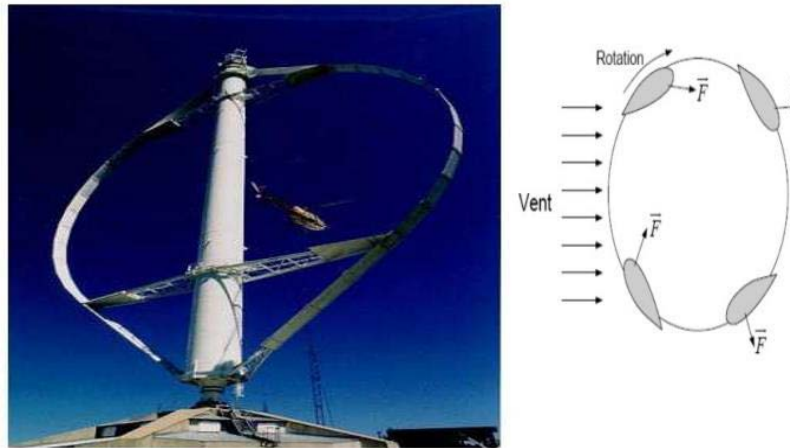


Fig.1.8 : Eoliennes à axe vertical de type Darrieus

1.4. Concessions d'éoliennes

L'exploitation de l'énergie électrique produite par une éolienne peut se faire de trois manières :

- ✓ **Systèmes isolés** : L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés comme : l'alimentation des îles par l'énergie électrique, le pompage d'eau pour l'irrigation des champs agricoles, l'alimentation en électricité des voiliers, des phares et des balises.
- ✓ **Systèmes Hybrides** : Les systèmes hybrides sont employés dans des petits systèmes destinés à desservir un nombre plus grand d'utilisateurs. Pour travailler avec des charges à courant alternatif, le système hybride aussi a besoin d'un onduleur.
- ✓ **Systèmes Liés au Réseau** : Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie, c.-à-d toute la génération est livrée directement au réseau électrique. Ces systèmes nécessitent un convertisseur statique. [8] [9] [10]

1.5. Principe de conversion de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes:

- ✓ Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.

- ✓ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique. Le fonctionnement général est illustré par la Fig.1.9 L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique. [20]

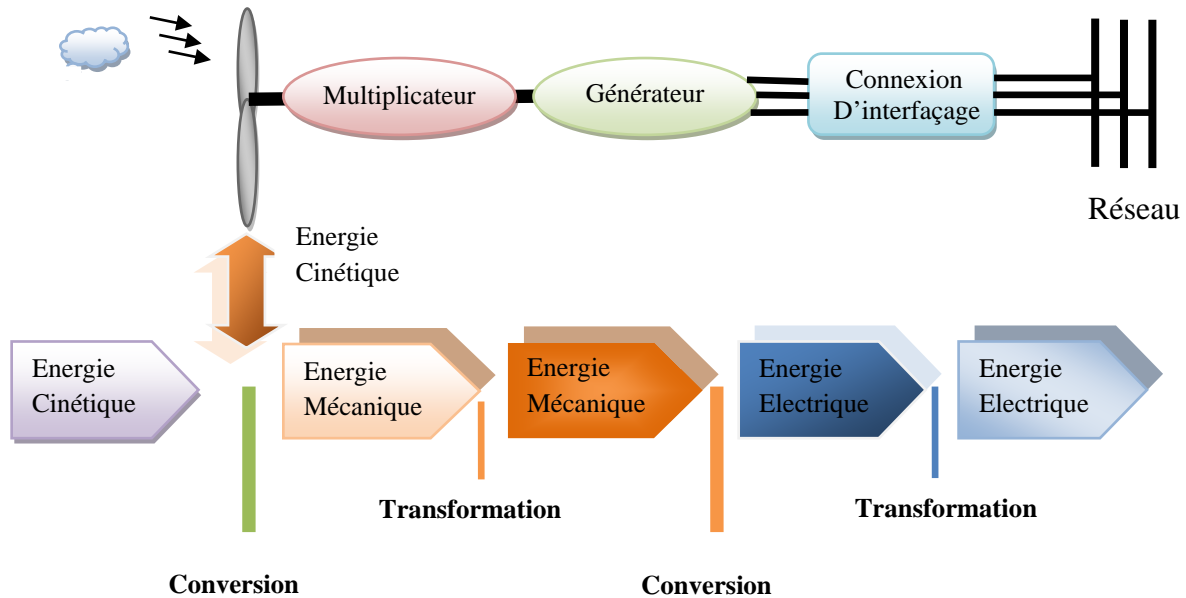


Fig.1.9 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne

1.5.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dl , de section S , de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v , s'écrit :

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S dl v^2 \quad (1.1)$$

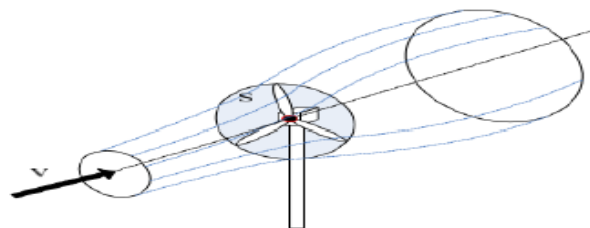


Fig.1.10 Colonne d'air animée d'une vitesse

La puissance P_m extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

En écrivant $dl = vdt$ on déduit l'expression de P_m :

$$P_m = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (1.2)$$

ρ : Masse volumique de l'air en (Kg/m^3)

v : Vitesse instantanée du vent en (m/s)

dE_c : En joules

1.5.2. Loi de Betz

Une éolienne ne peut exploiter toute l'énergie contenue dans le courant d'air qui la traverse. En 1926, le physicien allemand Albert Betz a prouvé qu'une éolienne ne peut récupérer au maximum que $(16/27)$ ième de l'énergie contenue dans le vent. Nous considérons que le flux d'air qui va traverser la surface balayée par les pales est assimilé à un tube (une veine de vent). Considérons le système éolien à axe horizontal représenté à la Fig.1.11 où on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. Désignons par V la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, par S_1 et S_2 les sections amont et aval du tube d'air et par S la surface balayée par l'hélice [25].

La production d'énergie se fait par prélèvement d'énergie cinétique à la traversée de l'aérogénérateur. En réalité, la totalité de la vitesse du vent n'est pas utilisée pour faire tourner les pales, puisque le vent continu à souffler à la vitesse V_2 après avoir traversé l'aérogénérateur. Nous pouvons dire que pendant une seconde, le volume d'air déplacé est égal à la surface de la section du tube (surface balayée par les pales) S , multiplié par la vitesse V .

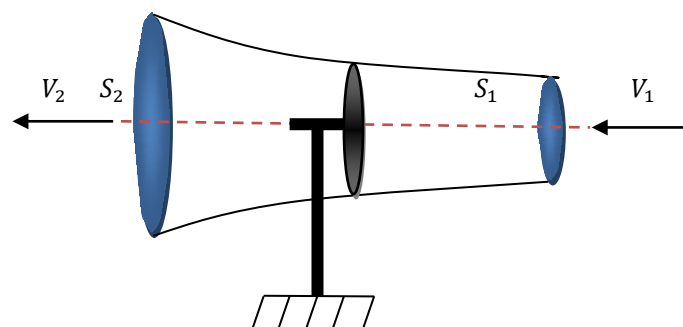


Fig.1.11 : Tube de courant autour d'une éolienne

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface, et la vitesse moyenne

$$m = \frac{\rho S(v_1 + v_2)}{2} \quad (1.3)$$

La puissance réelle extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent en amont et en aval

$$P_m = \frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (1.4)$$

En remplaçant m par son expression dans (1.4) :

$$P_m = \frac{\rho S(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (1.5)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit la vitesse v_1 , la puissance P_t , correspondante serait alors :

$$P_t = \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad (1.6)$$

1.6 Eolienne à base de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

La Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) a suscité un intérêt particulier surtout en tant que génératrice dans le domaine de l'énergie A cause des inconvénients du système éolien à vitesse fixe, les industriels ont développés d'autres systèmes plus performants fonctionnant pour une gamme de vitesse plus large. Ces systèmes sont basés sur l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent en ajustant en permanence la vitesse de la génératrice à celle du vent. Cette technique s'effectue par des commandes sur la chaîne globale du système à savoir : la turbine, le générateur et le convertisseur utilisé qui sert à synchroniser la fréquence et l'amplitude générés par le générateur avec celles du réseau [3]. La Fig.1.12 montre la structure de génération éolienne à base de MADA :

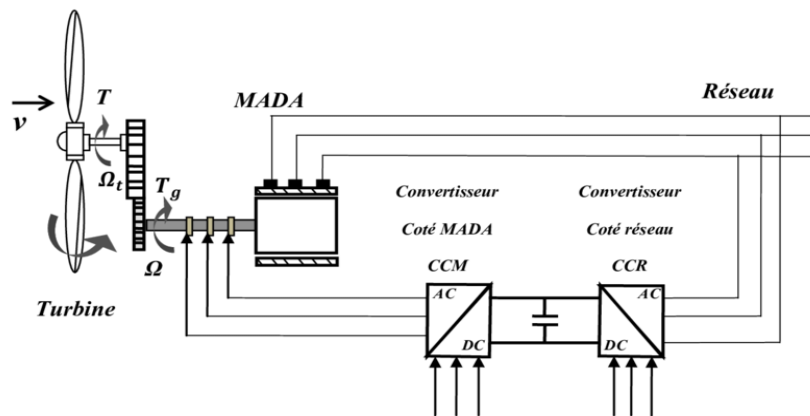


Fig.1.12 : Structure du système de génération éolienne à base de MADA

1.6.1. Structure de la MADA

Elle possède un stator identique à celui d'une machine asynchrone classique ou d'une machine synchrone. La différence réside dans le rotor composé d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques et connectés en étoile. Leurs extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais (Fig. 1.13), ce qui permet d'accéder aux grandeurs rotoriques [10].

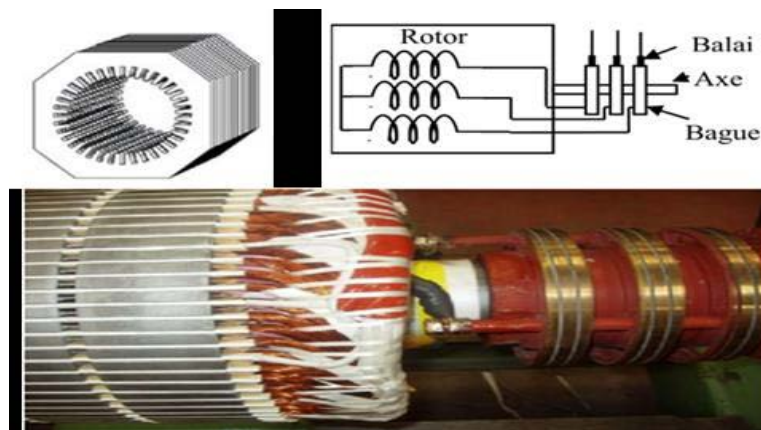


Fig.1.13 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un état de l'art de l'énergie éolienne. La description ainsi que l'évaluation de l'énergie éolienne dans le monde et notamment en Algérie ont été

présentée. En outre, on a exposé une synthèse sur les différents types d'éoliennes selon la disposition géométrique tout en soulignant les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe horizontal. Selon ce que nous avons présenté, on conclut que la machine asynchrone à double alimentation est largement utilisée pour la production de l'énergie éolienne. Dans le reste de ce travail, on s'intéresse, particulièrement, à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation.

2.1. Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien. Cette étape permet de premier lieu d'abord de comprendre le comportement dynamique et l'interaction électromécanique de la génératrice. Avec le modèle approprié, nous pouvons nous orienter facilement à une commande optimale. Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation de la turbine éolienne. Notre choix se porte sur la génératrice asynchrone à double alimentation de part sa robustesse, qui a été justifiée dans le premier chapitre [27]. La Machine Asynchrone Doublement Alimentée a suscité un grand intérêt sur tout en tant que génératrice dans le domaine des énergies renouvelables. Nous considérons ensuite la modélisation et la commande en MLI de l'onduleur en tension ainsi que la turbine. Des résultats de simulation permettront de juger l'efficacité de ce modèle [8].

2.2. Description de la chaîne de conversion

La chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basé sur une MADA, est illustré sur la figure.2.1 La turbine éolienne entraîne la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur ou une boîte de vitesse (BDV) [41]. Le stator de la MADA est directement raccordé au réseau électrique, tandis que son rotor est connecté au deux convertisseurs statiques bidirectionnels triphasés commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), mis en cascade à travers un bus continu. [23]. La tension du bus continu est par conséquent fixée et nous nous intéressons uniquement au contrôle du convertisseur côté rotorique [38].

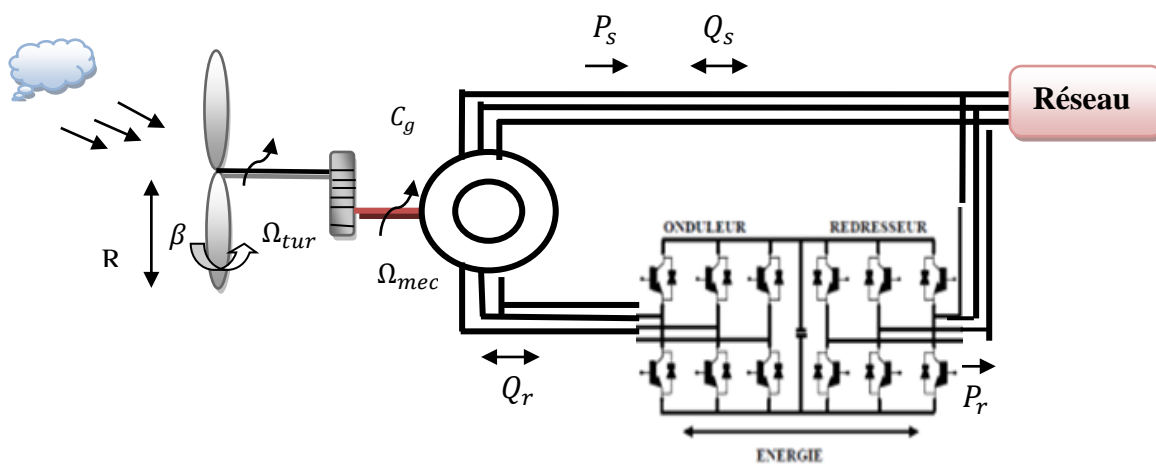


Fig. 2.1 : Schéma de description de la chaîne de conversion

2.3. Modélisation de la chaîne de conversion

Un modèle dynamique rassemblant tous ces paramètres est nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine, et le recours à la modélisation est devenu une nécessité pour contrôler ces performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles voulues [9].

2.3.1. Modélisation de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend deux pales orientables et de longueur R (voir figure 2.2). elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_{tur} qui est relié à un multiplicateur de gain (G). Le multiplicateur entraîne une génératrice électrique. Les variables d'entrée et de sortie de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit :

- ✓ Vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
- ✓ Quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.
- ✓ Vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales et l'angle de calage.

Les variables de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlés en variant les variables d'entrées précédentes. L'organigramme de simulation de la turbine est illustré par la figure 2.3.

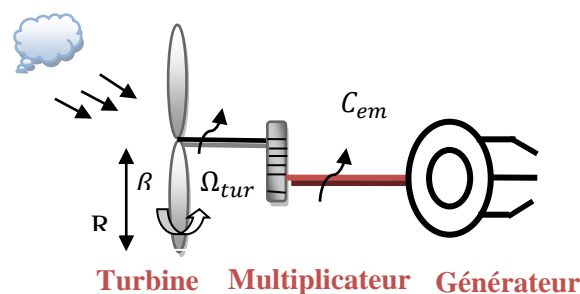


Fig. 2.2 : Schéma de la turbine éolienne

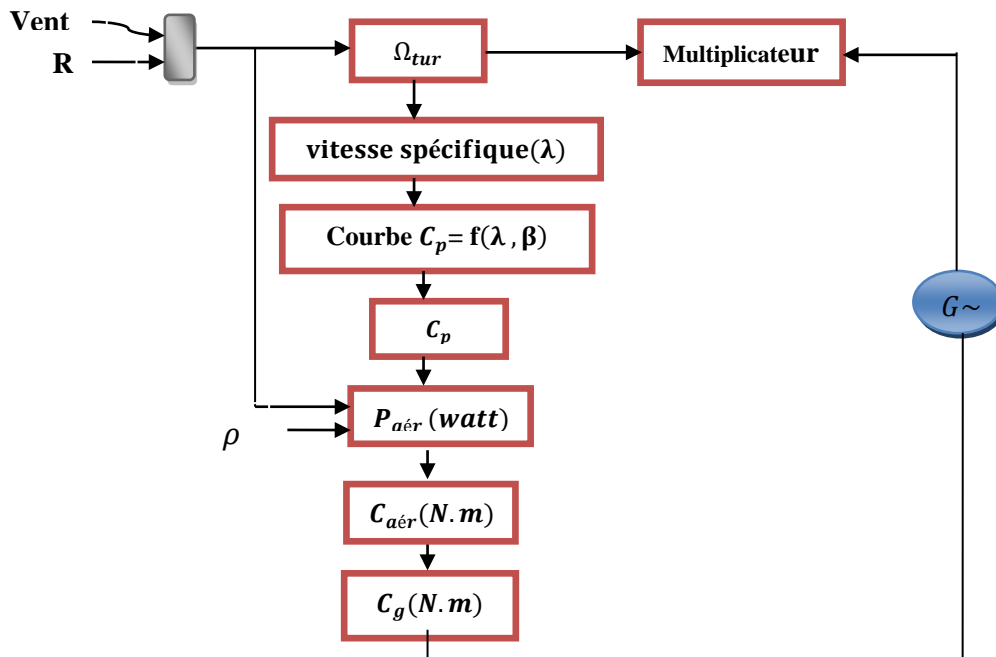


Fig. 2.3 : Organigramme de simulation de la turbine éolienne

La puissance instantanée de l'éolienne est définie par :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (2.1)$$

S : la surface balayée par les pales de la turbine [m^2]

ρ : la masse volumique de l'air ($\rho=1.225kg / m^3$ à la pression atmosphérique).

V : vitesse du vent [m / s] .

Dans un système éolien, à cause des différentes pertes, la puissance extraite disponible sur le rotor de la turbine, est inférieure à la puissance incidente. La puissance extraite s'exprime par [18] :

$$P_{tur} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_p (\lambda, \beta) \cdot V^3 \quad (2.2)$$

On définit le coefficient de puissance $C_p (\lambda, \beta)$ comme le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible. Il dépend de la caractéristique de la turbine peut être exprimé par la relation suivante [9-10] :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{tur}}{V} \quad (2.3)$$

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante [20]:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \times \beta - C_4 \right) \times \exp\left(-\frac{C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \times \lambda \quad (2.4)$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \times \beta^3} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.5)$$

$$C_1 = 0.5179; C_2 = 116; C_3 = 0.4; C_4 = 5; C_5 = 21; C_6 = 0.0068 \quad [4]$$

La figure 2.4 représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse, et de l'angle de l'orientation de la pale β .

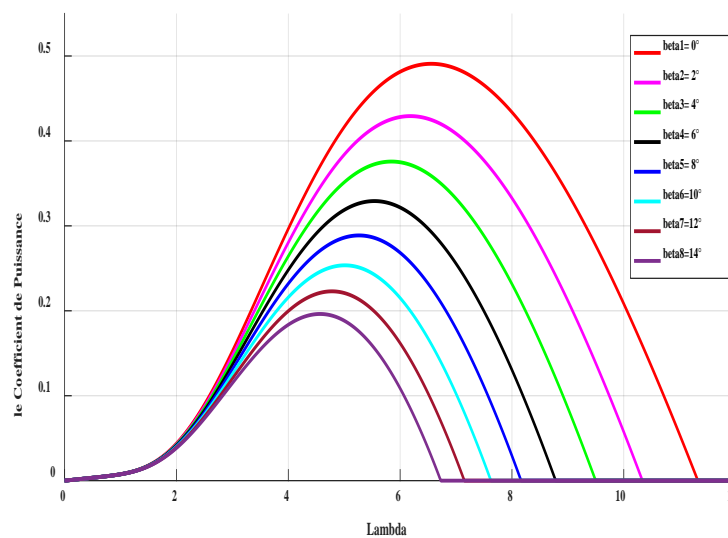


Fig. 2.4 : Coefficients de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ pour différentes

β

D'après la courbe du coefficient de puissance obtenue nous pouvons statuer que cette courbe possède un point optimal ($\lambda_{opt} = 7.1, C_{pmax} = 0.48$) correspondant au rendement maximal de la turbine. Sur ce point, le maximum de la puissance mécanique peut être récupéré à partir de la puissance disponible dans le vent [12].

2.3.2. Modélisation du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à la vitesse de la génératrice (voir Fig 2.5). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [12] :

$$C_m = \frac{C_{tur}}{G} \quad (2.6)$$

$$\Omega_{tur} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.7)$$

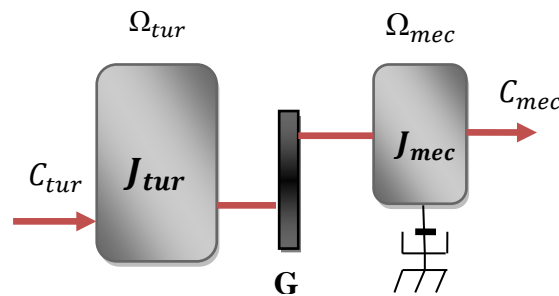


Fig. 2.5 : Partie mécanique de la turbine éolienne

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{tur}}{G^2} + J_g \quad (2.8)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évaluation de la vitesse mécanique à partir de la turbine du couple mécanique totale (C_{mec}) appliqué au rotor:

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (2.9)$$

J : inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant les inerties de la turbine, de la génératrice, des deux arbres et de multiplicateur ;

f : coefficient de frottement total du couplage mécanique ;

Le couple mécanique déduit de cette représentation simplifiée est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (2.10)$$

C_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice ;

C_g : Le couple issu du multiplicateur ;

C_f : Le couple résistant dû aux frottements ;

$$C_f = f \Omega_{mec}$$

(2.11)

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont donc : le couple issu du multiplicateur et le couple électromagnétique. En se basant sur ce qui a précédé, la turbine d'une éolienne à axe horizontal à vitesse variable peut être modélisée comme le montre le schéma bloc de la Fig 2.6.

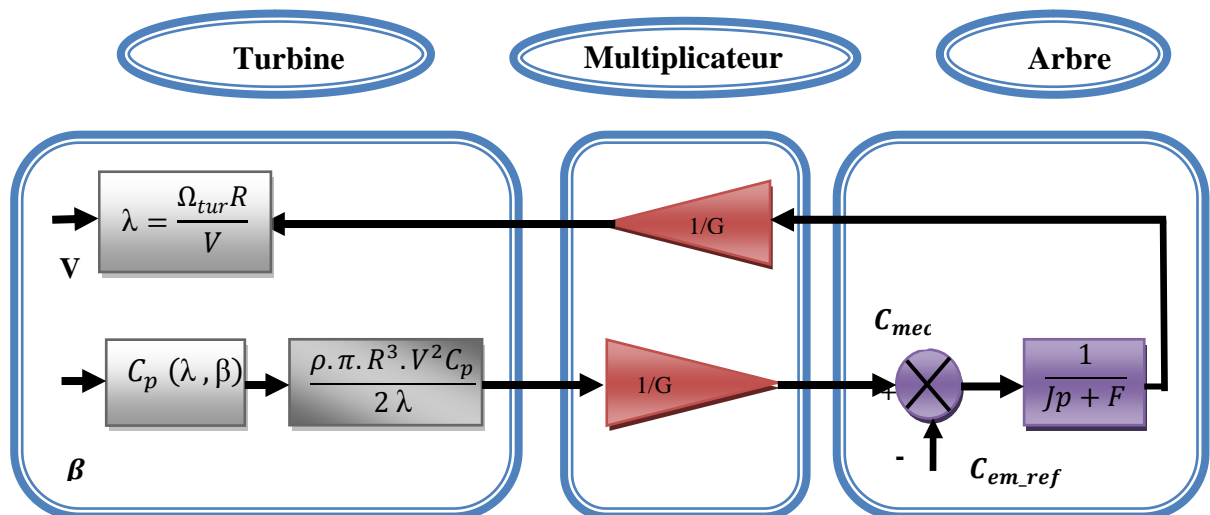


Fig. 2.6 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

2.3.3. Modélisation de la MADA

La génératrice asynchrone à double alimentation étant un système non linéaire très complexe, sa modélisation nécessite l'introduction de certaines hypothèses simplificatrices sans trop exagérer pour avoir un modèle le plus proche possible de la réalité. Afin d'établir un modèle simple de la MADA, nous avons pris en considération certaines hypothèses simplificatrices à savoir [18] :

- La géométrie de la machine est symétrique.

- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, au stator et au rotor, la saturation est négligeable.
- La densité de courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires.
- Les résistances des enroulements ne dépendent pas de la température.
- Les forces magnétomotrices créent par le stator ou le rotor a une répartition sinusoïdale.
- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme.

La figure 2.7 montre la représentation de la MADA.

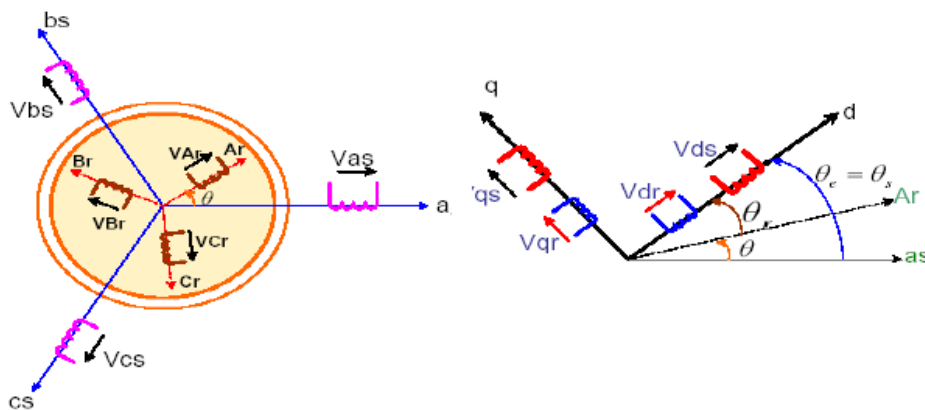


Fig. 2.7 : Représentation de la MADA : a) dans le repère (abc), b) dans (dq)

Le modèle mathématique de la MADA est donné par :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad (2.12)$$

Avec :

$$\begin{aligned} [V_s] &= \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} & ; & [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} & ; & [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \\ [V_r] &= \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} & ; & [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} & ; & [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Où R_s et R_r sont respectivement la résistance des enroulements statoriques et rotoriques. Les équations des flux sont données par :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (2.13)$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

Où :

L_{ss} , L_{rr} : sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.

M_s , M_r : sont les inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.

V_s et V_r : tensions simples statoriques et rotoriques.

I_s et I_r : courants de phase statoriques et rotoriques.

φ_s et φ_r : flux respectivement statoriques et rotoriques.

$[M_{sr}]$: matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor donnée par :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = [M_{max}] \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Avec :

$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$ et $[M_{sr}]$: inductance mutuelle stator-rotor.

M_{max} : mutuelle max entre une phase statorique et une phase rotorique.

L'équation mécanique de la machine est représenté par :

$$C_{em} = C_r + f_r \Omega - J \frac{d\Omega}{d\theta} \quad (2.14)$$

Avec respectivement :

C_{em} : Le couple électromagnétique de la machine ;

C_r : Le couple résistant ;

f_r : le coefficient de frottement visqueux de la MADA ;

Ω : la vitesse de rotation de l'axe de la MADA ;

$J \frac{d\Omega}{d\theta}$: l'inertie des parties tournantes.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p [I_s]^t \frac{d\Omega}{d\theta} [[M_{sr}] \cdot [I_r]] \quad (2.15)$$

p : nombre de paires de pôles de la MADA

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet de transformer les grandeurs statoriques et rotoriques triphasées en grandeurs équivalentes représentées dans un repère orthogonal.

Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif (repère (a, b, c)) à un système biphasé (repère (d, q)), et obtenir un système d'équation à coefficients constants. La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Et on a aussi : $[x_{dq0}] = [x_{abc}][P(\theta)]$

$[P(\theta)]$: permet la conservation des puissances lors du passage du système triphasé au système biphasé .

θ : angle entre le repère du système triphasé à transformer et le repère de Park

En appliquant cette transformation sur chacun des vecteurs tensions, courants et flux statoriques et rotoriques, on obtient les équations des flux et des tensions :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} & \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} & \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (2.17)$$

Avec :

L_r et L_s : inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine.

L_m : inductance mutuelle.

φ_{sd} , φ_{sq} , φ_{rd} et φ_{rq} : flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_e \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_e \varphi_{sd} \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_e - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_e - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (2.19)$$

Où $\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt}$ et $\omega = \frac{d\theta}{dt}$: sont respectivement les pulsations électriques et mécanique.

Tel que $\theta_e = \theta_r + \theta$. En choisissant le repère lié au champ tournant ($\omega_e = \omega_s$), car c'est le mieux adapté lors d'une étude de la commande des machines [40], on obtient les équations générales de la MADA :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (2.20)$$

Avec:

V_{sd} , V_{sq} , V_{rd} et V_{rq} sont les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature du système diphasé ;

ω_s et ω_r sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques. L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = PL_m L_s (i_{rd} \varphi_{sd} - i_{rq} \varphi_{sd}) \quad (2.21)$$

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} \\ Q_s = V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (2.22)$$

2.3.4. Modélisation de l'onduleur triphasé à MLI

L'onduleur de tension est un convertisseur statique qui permet de fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglables à partir d'une source de tension continue. L'onduleur de tension est constitué de cellule de commutation généralement à transistor thyristor. La Fig 2.8 montre le circuit d'un onduleur triphasé à structure de tension. Les interrupteurs IGBT sont réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture. Le stockage de l'énergie du côté continu est réalisé grâce à un condensateur placé en parallèle avec la tension maintenue à une valeur quasi constante [3].

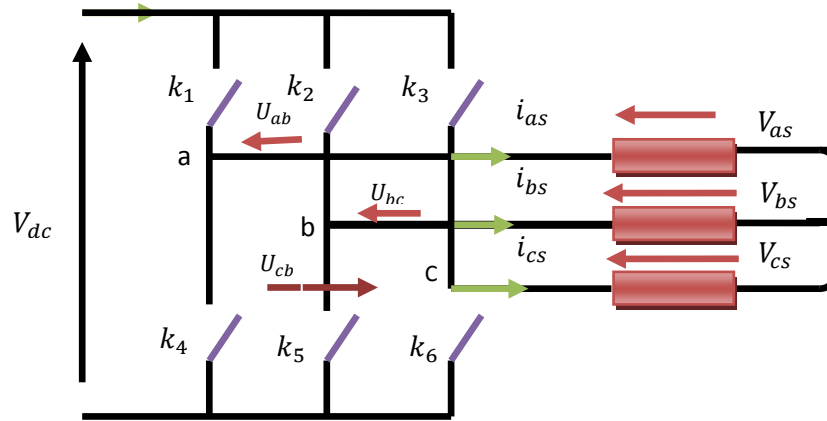


Fig. 2. 8 : Schéma simplifié de l'onduleur à MLI sinus – triangle

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique qui détermine sont états de conduction :

$$F_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } K_1 \text{ est fermé et } K_4 \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{si } K_4 \text{ est fermé et } K_1 \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (2.23)$$

$$F_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } K_2 \text{ est fermé et } K_5 \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{si } K_5 \text{ est fermé et } K_2 \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (2.24)$$

$$F_3 = \begin{cases} 1 & \text{si } K_3 \text{ est fermé et } K_6 \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{si } K_6 \text{ est fermé et } K_3 \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (2.25)$$

Ainsi les tensions de ligne sont donnée par :

$$U_{ab} = V_{as} - V_{bs} = V_{dc}(F_1 - F_2) \quad (2.26)$$

$$U_{bc} = V_{bs} - V_{cs} = V_{dc}(F_2 - F_3) \quad (2.27)$$

$$U_{ca} = V_{cs} - V_{as} = V_{dc}(F_3 - F_1) \quad (2.28)$$

Dans l'hypothèse que les tensions V_{as} , V_{bs} et V_{cs} forment un système triphasé de tension équilibré alors :

$$V_{as} = \frac{V_{dc}}{3}(2F_1 - F_2 - F_3) \quad (2.29)$$

$$V_{bs} = \frac{V_{dc}}{3}(2F_2 - F_1 - F_3) \quad (2.30)$$

$$V_{cs} = \frac{V_{dc}}{3}(2F_3 - F_1 - F_2) \quad (2.31)$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

V_{dc} : tension d'alimentation continue de l'onduleur.

F_1 , F_2 et F_3 sont des fonctions logiques correspondant à l'état des interrupteurs de l'onduleur.

2.4. Commande de l'onduleur

L'onduleur est le plus souvent commandé par la technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), c'est-à-dire, qu'au lieu de former chaque alternance des tensions de sortie d'un seul créneau rectangulaire, on la forme d'une succession de créneau de largeurs convenables. Cela permet d'obtenir des tensions ne contenant pas d'harmoniques à basses fréquences. La technique de modulation de largeur d'impulsion retenue dans cette étude est la méthode à MLI *triangulo-sinusoidale*. Le schéma équivalent de l'onduleur est représenté par la figure ci-dessous. Le principe de modulation MLI repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation généralement de forme triangulaire). Dans ce travail, on va utiliser la MLI naturelle en se basant sur la comparaison entre deux signaux pour commander chaque bras de convertisseur :

- 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 [24].

La figure 2.8 montre le système de commande MLI sous Matlab/Simulink.

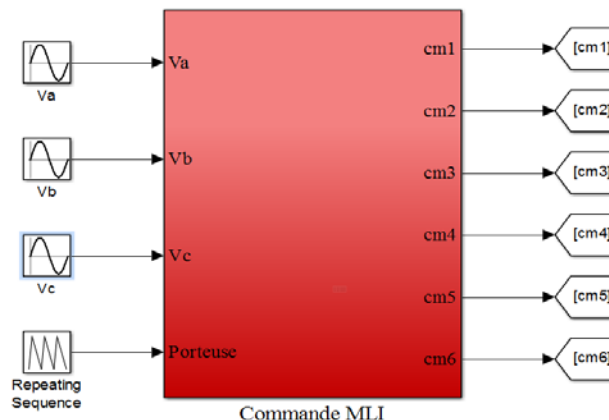


Fig. 2.9 : Commande MLI de l'onduleur

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 [6], [25]. La figure 2.10 représente les deux signaux à comparer (modulante et porteuse).

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 [47] :

$$m = \frac{f_p}{f}$$

(2.33)

$$r = \frac{A_m}{A_p} < 1 \quad (2.34)$$

Avec :

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

A_p : Amplitude de tension du signal de la porteuse.

Les figures 2.10, 2.11 et 2.12 présentent, respectivement, les signaux de la commande MLI, l'état de commutation de l'interrupteur du haut d'un bras du convertisseur et l'état de commutation de l'interrupteur du bas.

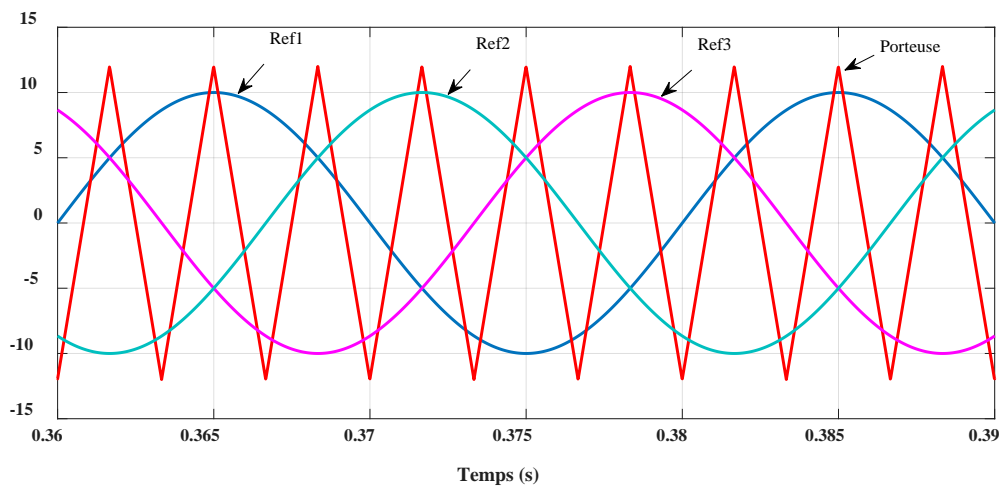


Fig. 2.10 : Allure des signaux modulés et porteuse.

Les figure 3.12 et 3.13 présente, respectivement, les tensions v_a et v_{ab} .

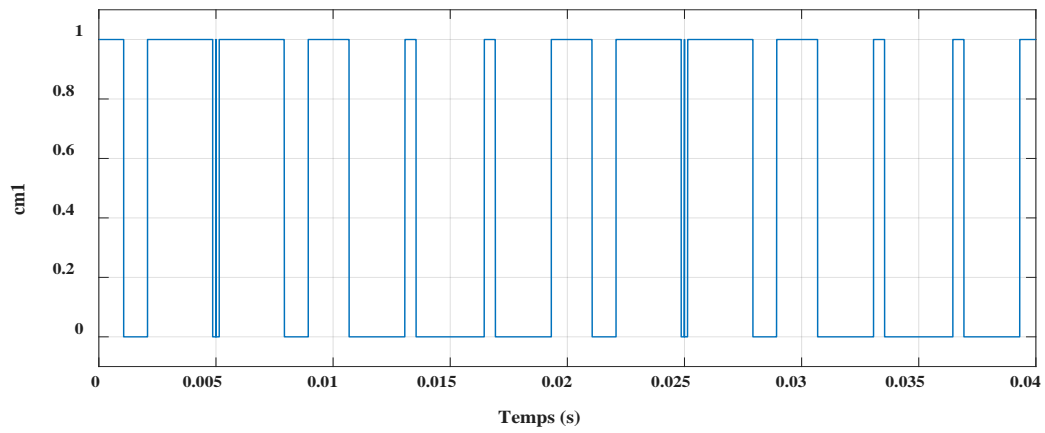


Fig 2.11 : Intervalles de conduction d'interrupteur K1

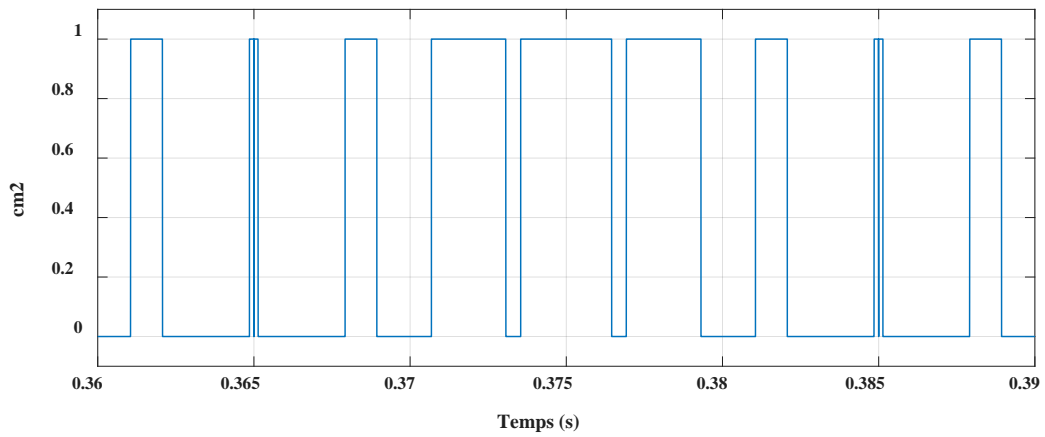


Fig 2.12 : Intervalles de conduction d'interrupteur

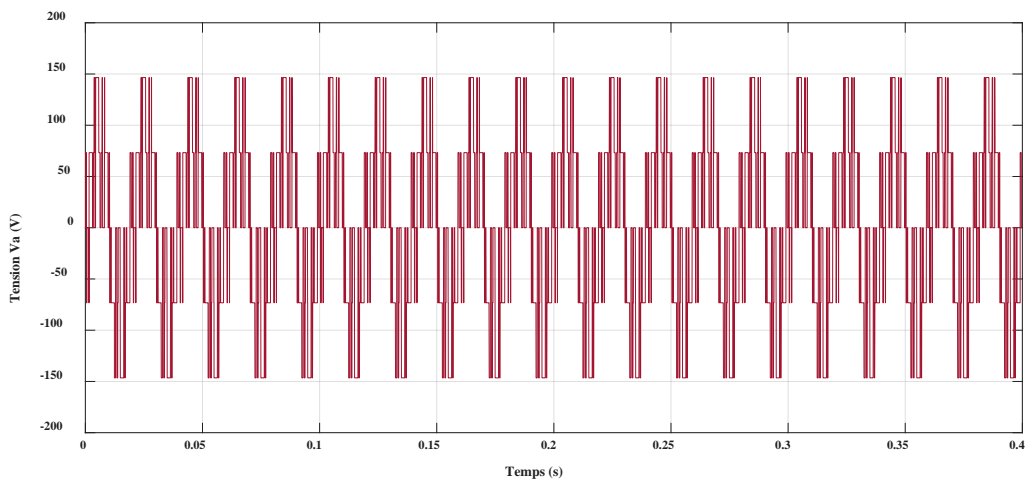


Fig. 2.13 : Tension simple.

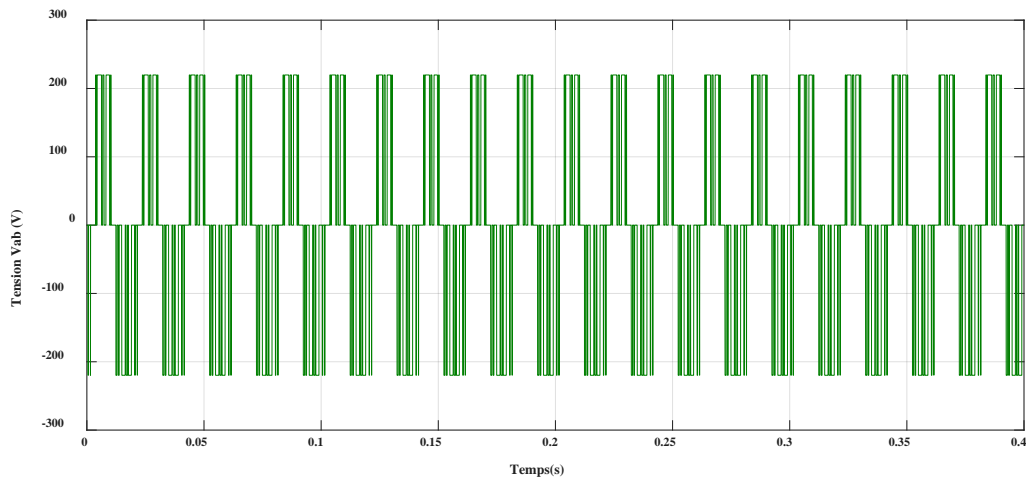


Fig. 2.14 : Tension composée

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, une brève description de la chaîne de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation a été présentée. La modélisation des deux parties : mécanique et électrique a été développée ainsi que la partie commande de l'onduleur à MLI. L'alimentation d'un moteur asynchrone par un convertisseur statique montre l'existence de trop d'oscillations donc d'harmonique dans l'onde de courant qui est l'origine de pulsation du couple. Ces dernières ne gênent pas le fonctionnement de la machine, puisqu'elle est destinée à travailler à haute fréquence. Pour des raisons de rendement, et d'encombrement réduit, l'onduleur à MLI présente une meilleure solution dans les domaines de moyennes et faibles puissances.

3.1. Introduction

Plusieurs algorithmes de commande du système éolien ont été proposés à travers la littérature que ce soit pour un système éolien alimentant une charge isolée ou connecté au réseau. Dans ce chapitre, on s'intéresse principalement à la commande de toute la chaîne de conversion de l'énergie éolienne : commande MPPT pour la maximisation de la puissance extraite du vent et la commande des courants rotorique, afin qu'on puisse contrôler les deux puissances active et réactive. En effet, le contrôle vectoriel, basé sur l'orientation du flux statorique permet de contrôler de manière indépendante la puissance active et réactive, et le control du convertisseur côté machine.

3.2 Commande MPPT

L'objectif visé dans la commande des éoliennes est de maximiser, tant que possible, leurs exploitation. Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon la vitesse du vent en trois zones (Fig.3.1) [10, 16, 25].

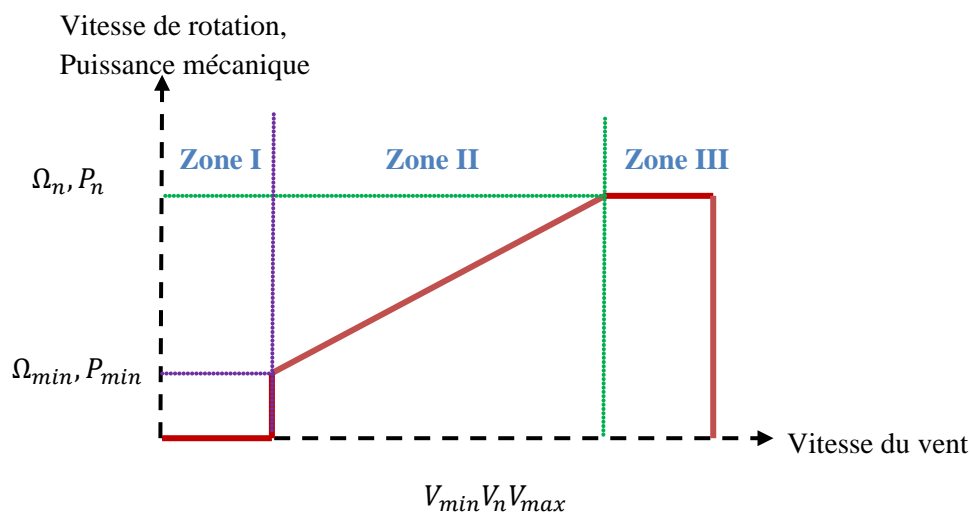


Fig. 3.1 : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

- **Zone I** : La vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne, la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à 0.
- **Zone II** : Le vent atteint une vitesse minimale V_{min} pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le

maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale (V_n) correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique (P_n) et de la vitesse de rotation (Ω_n).

- **Zone III** : Le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leurs valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales β). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale (V_{max}), une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci. Pour cette zone il existe différentes stratégies de commande [11] pour contrôler le couple électromagnétique appliqué au rotor de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), de manière à régler la vitesse de rotation pour maximiser la puissance électrique produite [16,21, 24].

3.3. Techniques de commande MPPT

La puissance capturée par la turbine éolienne peut être maximisée en ajustant sur le coefficient de puissance C_p . L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser la puissance extraite. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence. En régime permanent, la puissance aérodynamique (P_{aer}) diminuée par des pertes (Représentées par les frottements visqueux) est convertie directement en puissance électrique (voir figure 3.2).

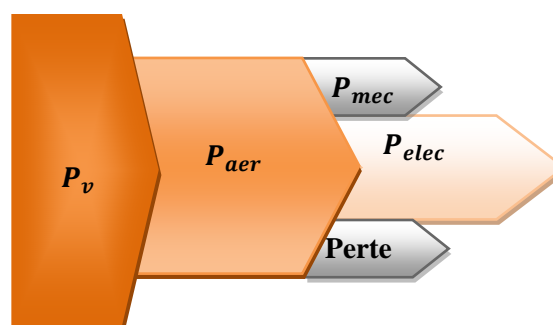


Fig. 3.2 : Diagramme de conversion de puissance

$$P_{elc} = P_{aer} - P_{pertes} \quad (3.1)$$

La puissance mécanique stockée dans l'inertie totale J et apparaissant sur l'arbre de la génératrice P_{mec} est exprimée comme étant le produit entre le couple mécanique C_{mec} et la vitesse mécanique Ω_{mec} :

$$P_{mec} = C_{mec} \Omega_{mec} \quad (3.2)$$

La figure 3.3 illustre les différentes stratégies de contrôle du couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique (Fig 3.3) de manière permettant de maximiser la puissance électrique générée [11] :

- La Commande avec asservissement de la vitesse mécanique.
- La Commande sans asservissement de la vitesse mécanique.

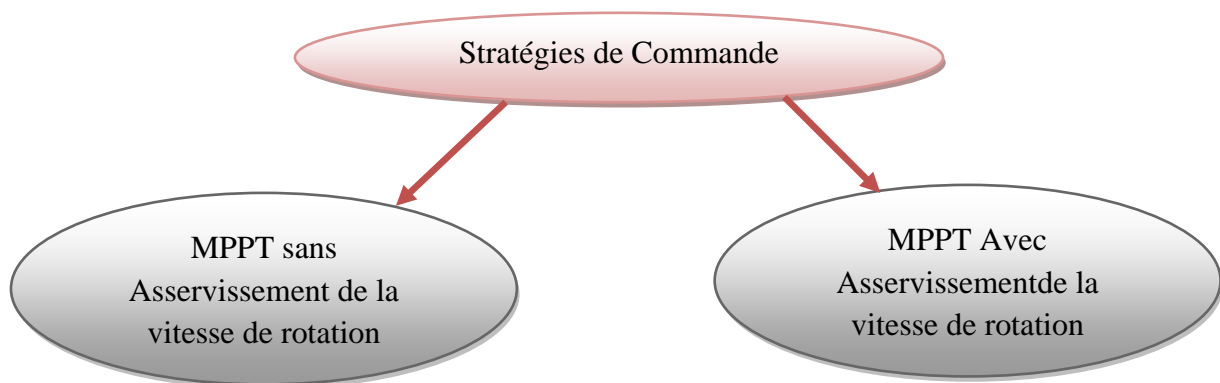


Fig. 3.3 : Stratégies de commande MPPT

Dans la suite de ce chapitre, nous intéresserons au contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation

3.3.1. MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation

En pratique, une mesure de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Dans ce cas, une mesure erronée de la vitesse conduit à une dégradation de la puissance extraite selon la technique MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation. C'est la raison pour laquelle la majorité des turbines éoliennes installées dans le monde sont contrôlées par la technique MPPT sans

asservissement de la vitesse de rotation [28-30]. Le couple aérodynamique de référence peut être déterminé par l'expression suivante :

$$C_{mec_ref} = \frac{1}{2} C_p \rho S \frac{V^3}{\Omega_{tur}} \tag{3.3}$$

La vitesse Ω_{tur} est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{tur} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \tag{3.4}$$

La vitesse du vent peut être donnée par l'équation :

$$V_v = \frac{\Omega_{tur} R}{\lambda} \tag{3.5}$$

En utilisant (3.4) et (3.5), on obtient une expression globale du couple électromagnétique de référence :

$$C_{mec_ref} = \frac{1}{2} \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \rho \pi R^5 \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \tag{3.6}$$

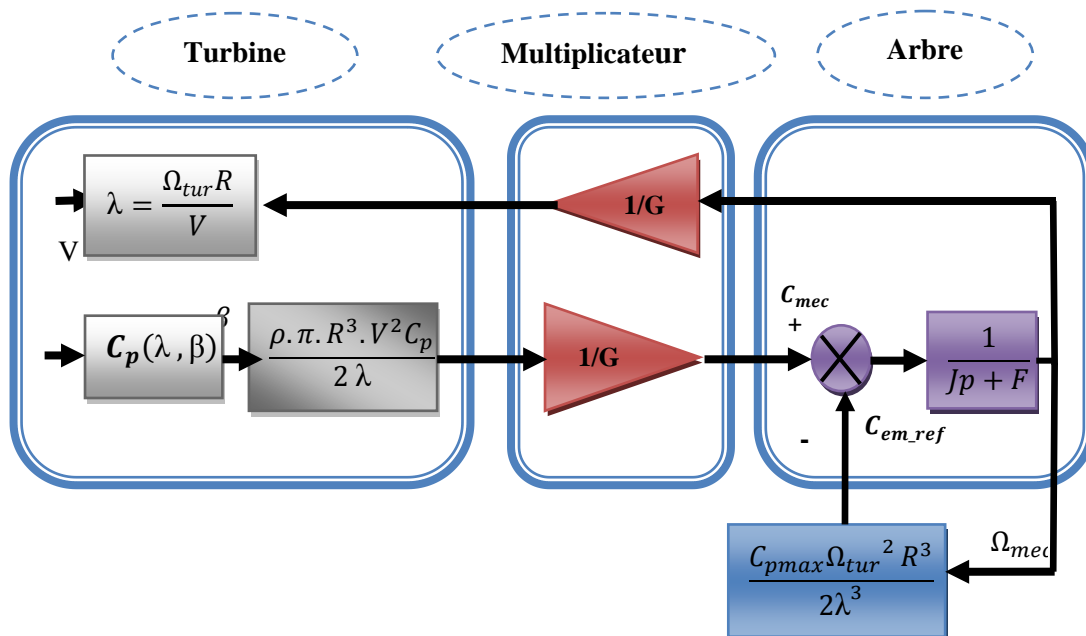


Fig. 3.4 : MPPT sans asservissement de la vitesse

3.3.2. MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation

Cette stratégie de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, on va utiliser un asservissement de vitesse [13, 25, 31]. Le correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches [29] :

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

Différentes technologies de correcteurs peuvent être considérées pour l'asservissement de la vitesse. On suppose le couple électromagnétique égale à sa référence:

$$C_{mec} = C_{mec_ref} \quad (3.7)$$

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J_t} (C_{mec} + C_{em} - f\Omega_{mec}) \quad (3.8)$$

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{mec_ref} = (C(p) \cdot \Omega_{mec_ref} - \Omega_{mec}) \quad (3.9)$$

Avec :

$C(p)$: correcteur du système.

La vitesse mécanique de référence est exprimée par la relation suivante :

$$\Omega_{mec_ref} = G\Omega_{tur_ref} \quad (3.10)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondante à la valeur optimale du rapport de vitesse λ_{opt} on fixe l'angle de calage β^0 à 0.

$$\Omega_{tur_ref} = \frac{\lambda_{opt} V_v}{R} \quad (3.11)$$

Le schéma bloc de la commande de la vitesse mécanique est représenté par la figure 3.5.

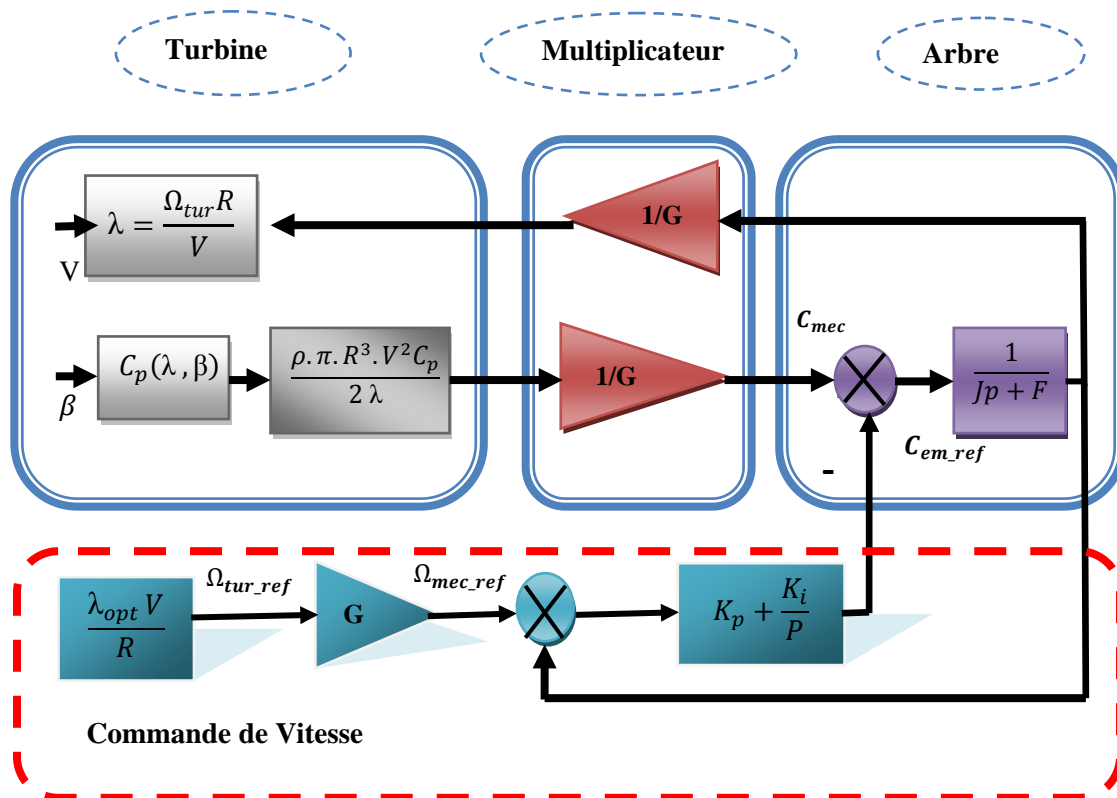


Fig. 3.5 : Schéma bloc de MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation

Synthèse du régulateur

Le schéma fonctionnel du contrôle de la vitesse est donné par la figure 3.6 :

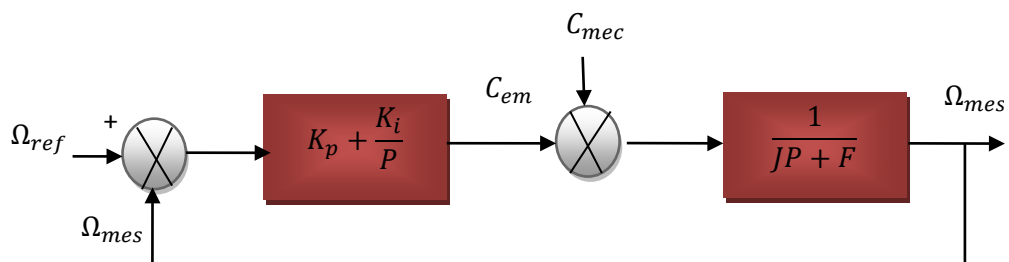


Fig. 3.6 : Régulation de la vitesse.

Le régulateur proportionnel intégral (PI) a fait ses preuves pour des applications industrielles. L'action proportionnelle agit principalement sur le gain du système asservi et permet d'améliorer la précision et la rapidité du système et augmente l'instabilité du système.

Il existe plusieurs méthodes pour la détermination des paramètres K_p et K_i du régulateur PI. Les méthodes : placement de pôles et compensation de pôles sont les plus utilisées.

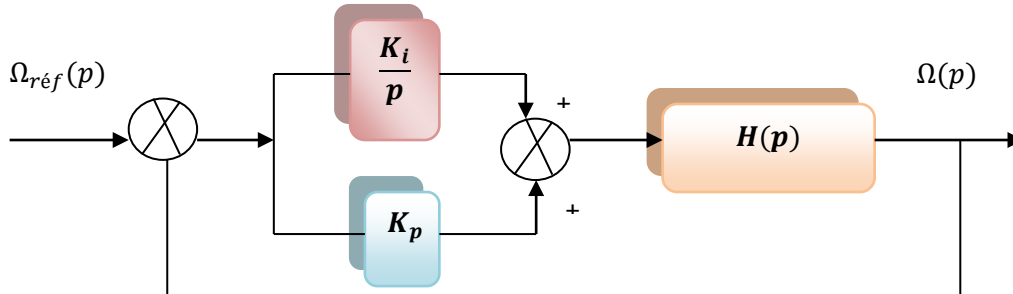


Fig. 3.7 :Schéma fonctionnel du correcteur PI

Dans cette partie on s'intéresse à la méthode de placement de pôle. La fonction de transfert est donnée par [38] :

$$\left(K_p + \frac{K_i}{P}\right) = \frac{K_p}{P} \left(P + \frac{K_i}{K_p}\right) \quad (3.12)$$

On suppose que la perturbation est nulle:

$$C_{mec} = 0 \quad (3.13)$$

La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte est donnée par :

$$FTBO_{\Omega} = \frac{K_p}{P} \left(P + \frac{K_i}{K_p}\right) \left(\frac{1}{JP+F}\right) \quad (3.14)$$

La fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée est donnée par:

$$FTBF_{\Omega} = \frac{\Omega(P)}{\Omega_{ref}(P)} = \frac{\frac{K_p}{P} \left(P + \frac{K_i}{K_p}\right)}{JP^2 + (F+K_p)P + K_i} \quad (3.15)$$

La $FTBF_{\Omega}$ possède une dynamique de 2ème ordre, par identification à la forme canonique du 2ème ordre l'équation caractéristique peut être représentée comme suit :

$$\frac{1}{\omega_0^2} P^2 + \left(\frac{2\varepsilon}{\omega_0}\right) P + 1 \quad (3.16)$$

Alors :

$$\frac{J}{K_i} = \frac{1}{\omega_0^2} \quad (3.17)$$

$$\frac{F+K_p}{K_i} = \frac{2\varepsilon}{\omega_0} \quad (3.18)$$

Où :

$$K_i = J\omega_0^2 \quad (3.19)$$

$$K_p = \frac{2\varepsilon K_i}{\omega_0} - F \quad (3.20)$$

ε : Coefficient d'amortissement.

Pour obtenir la réponse optimal on choisit le coefficient d'amortissement $\varepsilon = 0.7$ et un temps de réponse égale à 5%.

$$t_r = \frac{3}{\varepsilon\omega_0} \quad (3.21)$$

$$\omega_0 = \frac{3}{\varepsilon(t_m/2)} \quad (3.23)$$

3.4. Commande vectorielle de la MADA

L'objectif principal de la commande vectorielle des machines à courant alternatif est d'améliorer leur comportement statique et dynamique, grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu. Il s'agira donc de retrouver la quadrature entre le courant et le flux, naturellement découplés pour une machine à courant continu (courant producteur de flux et le courant producteur de couple). Dans notre cas le découplage se fait entre la puissance active et réactive du stator. La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes ($d-q$) où l'un de ces axes coïncide avec la direction désirée du flux qui peut être rotorique, statorique ou d'entrefer. Ce repère nous permet d'avoir deux composantes directe et en quadrature, l'une de flux statorique et l'autre de courant rotorique. Le système d'équations différentielles de la génératrice décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant est donné par :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (3.24)$$

En choisissant le référentiel diphasé (d -q) (voir Fig 3.8) lié au champ tournant et en plaçant le vecteur flux statorique φ_s sur l'axe d, on peut écrire :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s \\ \varphi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (3.25)$$

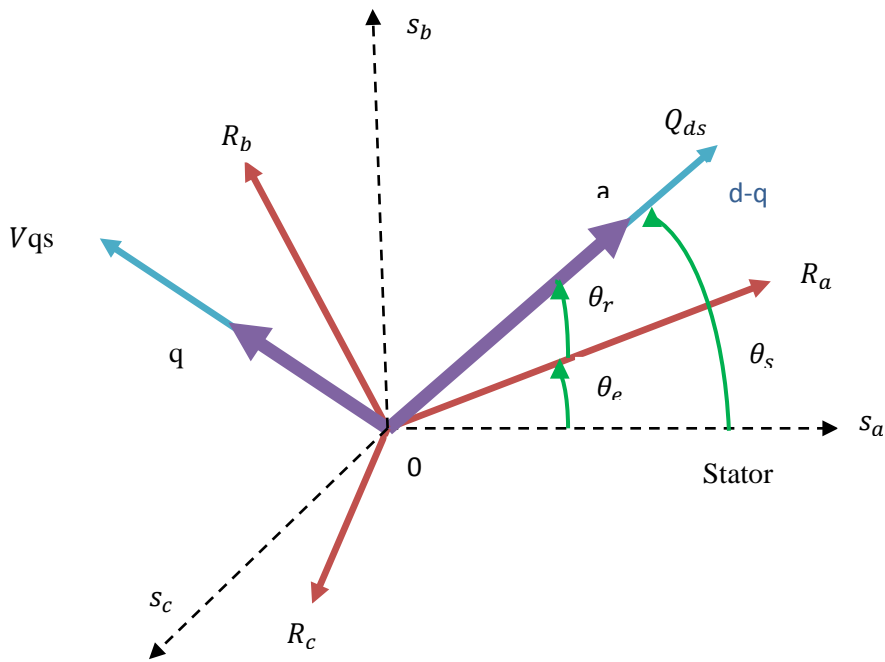


Fig.3.8 : Référentiel diphasé d-q lié au champ tournant statorique

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (3.26)$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (3.27)$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = -L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ 0 = -L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \varphi_{sd} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (3.28)$$

Nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotorique comme suit :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{L_m}{L_s} i_{rd} - \frac{\varphi_s}{L_s} \\ i_{sq} = \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (3.29)$$

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

$$\begin{cases} P_s = -V_{sd} i_{sd} - V_{sq} i_{sq} \\ Q_s = -V_{sq} i_{sd} + V_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (3.30)$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P_s = -V_s i_{sq} \\ Q_s = -V_s i_{sd} \end{cases} \quad (3.31)$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{L_m}{L_s} i_{rd} \end{cases} \quad (3.32)$$

Avec :

$$V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \Rightarrow \varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (3.33)$$

En considérant la mutuelle constante L_m , le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe 'q' et la puissance réactive au courant rotorique d'axe 'd' à la constante $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ imposée par le réseau.

Les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) i_{rd} + \frac{V_s L_m}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) i_{rq} \end{cases} \quad (3.34)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \left(i_{rd} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) + \frac{V_s L_m}{\omega_s L_s} \right) - \omega_r \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d i_{rq}}{dt} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) + \omega_r \left(i_{rd} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) + \frac{V_s L_m}{\omega_s L_s} \right) \end{cases} \quad (3.35)$$

Avec :

$$\omega_r = g \omega_s$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \left(i_{rd} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) + \frac{V_s L_m}{\omega_s L_s} \right) - g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d i_{rq}}{dt} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) + g \omega_s \left(i_{rd} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) + \frac{V_s L_m}{\omega_s L_s} \right) \end{cases} \quad (3.36)$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_{rd} + g \frac{V_s L_m}{L_s} \end{cases} \quad (3.37)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = [R_r + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) s] i_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = [R_r + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) s] i_{rq} + g \omega_s \left(i_{rd} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \right) + g \frac{V_s L_m}{L_s} \end{cases} \quad (3.38)$$

$\left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)$ Terme de couplage entre les deux axes. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser. V_{rd} Et V_{rq} : les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques désirés.

Nous pouvons écrire les tensions statoriques et rotoriques simplifiées comme suit :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma \cdot L_r \frac{di_{rd}}{dt} + e_{rd} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma \cdot L_r \frac{di_{rq}}{dt} + e_{rq} + e_\varphi \end{cases} \quad (3.39)$$

Avec :

$$\begin{cases} e_{rd} = -\sigma \cdot L_r \cdot \omega_r \cdot i_{rq} \\ e_{rq} = \sigma \cdot L_r \cdot \omega_r \cdot i_{rd} \\ e_\varphi = \omega_r \cdot \frac{L_m}{L_s} \varphi_{sd} \\ \sigma = 1 - \left(\frac{L_m}{\sqrt{L_s L_r}} \right)^2 \end{cases} \quad (3.40)$$

La structure du modèle de la MADA à orientation du flux statorique est représentée par la figure 3.9.

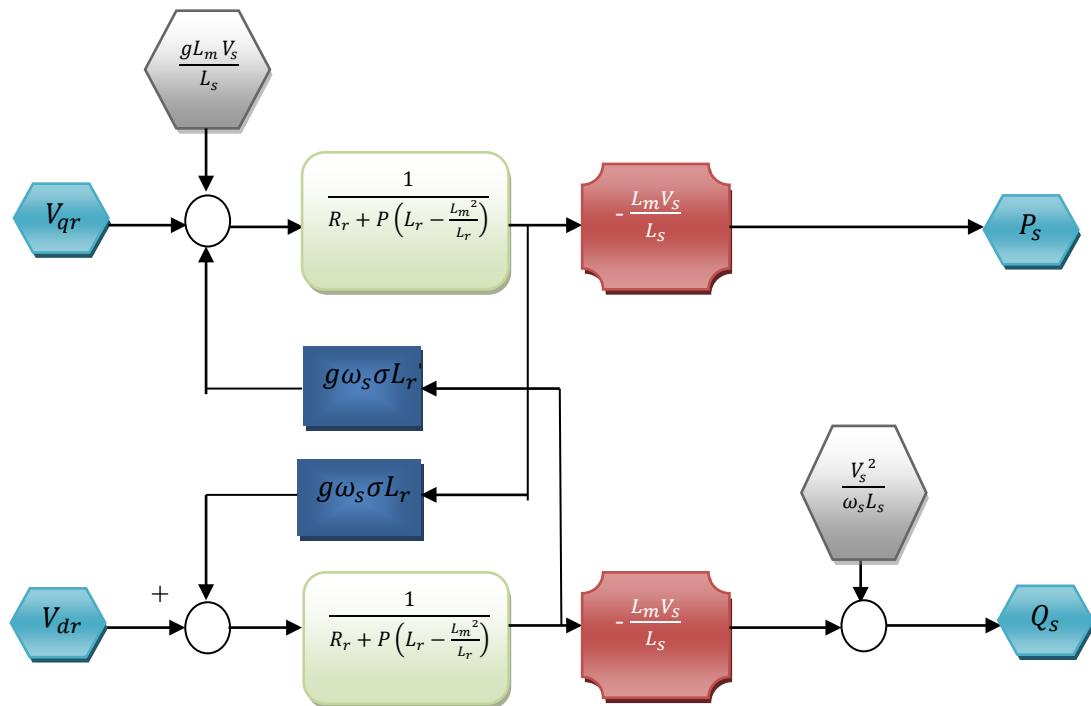


Fig. 3.9 : Structure du modèle de la MADA à orientation du flux statorique

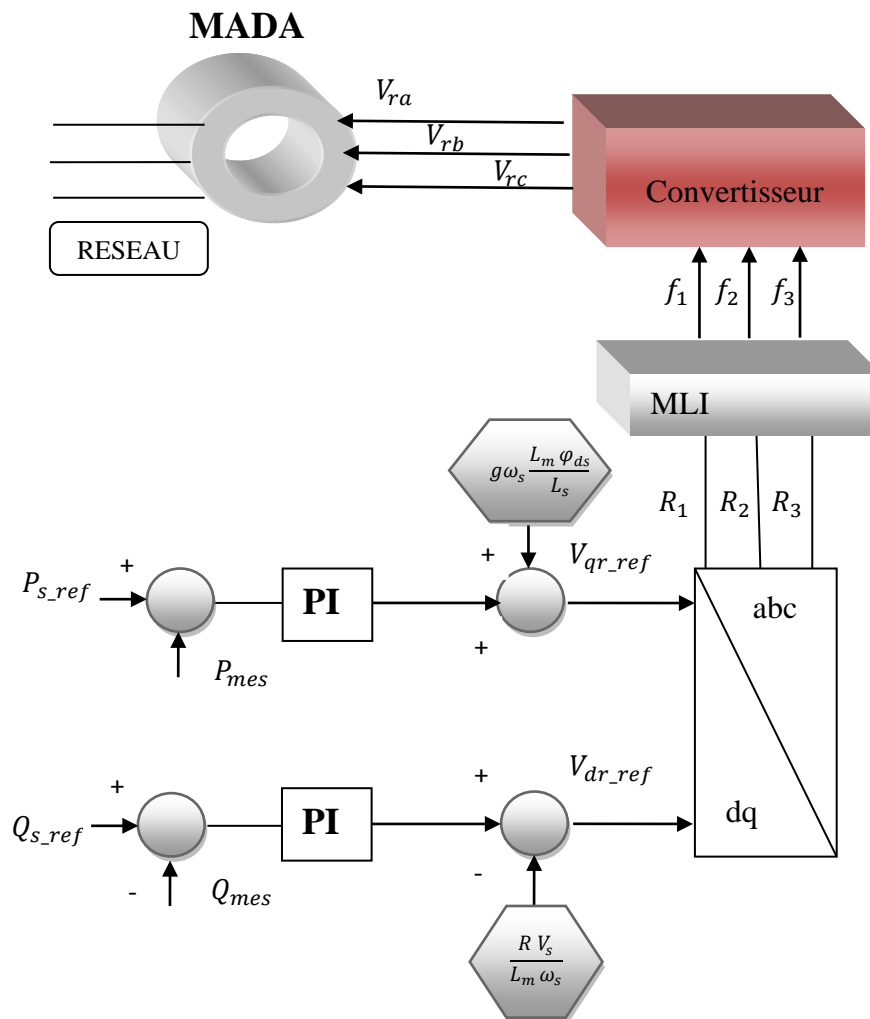


Fig. 3.10 : Schéma bloc de la commande du convertisseur côté MADA

Ce schéma de la figure 3.10, fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques.

La Figure 3.11 montre une partie de notre système bouclé, corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{K_i}{s}$, correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la Figure 3.10

$$\begin{cases} i_{rq_ref} = \frac{\varphi_{sd}}{L_m} - \frac{L_s}{L_m V_{sq}} Q_{s_ref} \\ i_{rd_ref} = -\frac{L_s}{L_m V_{sq}} P_{s_ref} \end{cases} \quad (3.42)$$

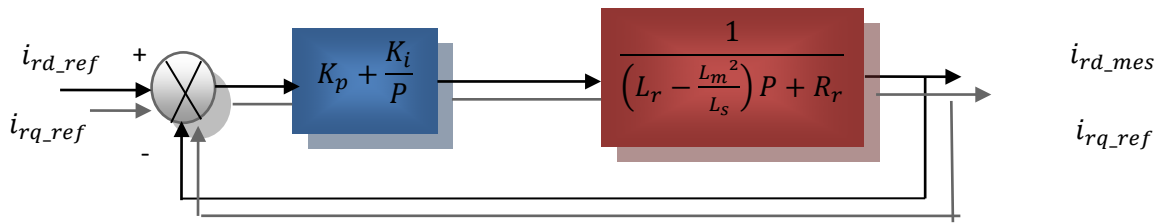


Fig. 3.11 :Contrôle des courants rotorique

La fonction transfert en Boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{P + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{P}{K_p}} \cdot \frac{\frac{L_m V_s}{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}}{P + \frac{L_s L_m}{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}} \quad (3.43)$$

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})} \quad (3.44)$$

Notons toutefois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante. Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_p \cdot \frac{L_m V_s}{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}}{P} \quad (3.45)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r} \quad (3.46)$$

Avec :

$$\tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}{L_m V_s} \quad (3.47)$$

$$\begin{cases} K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s(L_r - L_m^2)}{L_m V_s} \\ K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s R_r}{L_m V_s} \end{cases} \quad (3.48)$$

3.5. Résultats et discussions

Les figures 3.12 et 3.13 représentent les résultats des puissances de la simulation obtenue par la commande du convertisseur côté machine. La commande permet de découpler les expressions de la puissance active et réactive du générateur ou encore celle du flux et du couple. Afin d'avoir, un facteur de puissance unitaire au point de raccordement de l'éolienne avec le réseau électrique on fixe la puissance réactive de référence à $Q_{s-ref}=0$. Et, on varie la puissance réactive statorique de référence (Q_{s-ref}) dans la partie contrôle du convertisseur côté MADA. Nous remarquons que les puissances suivent parfaitement leurs grandeurs de référence, Où, le changement d'une grandeur n'influence pas le changement de l'autre, ce qui démontre que les deux puissances active et réactive peuvent être contrôlées indépendamment. La composante quadrature du courant rotorique contrôle la puissance active, et la composante directe contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau. Les résultats obtenus ont montré que les puissances actives et réactives du système éolien pouvaient être contrôlées de façon indépendante tout en garantissant une puissance active optimale fournie au réseau électrique. Les figures 3.14 et 3.15 montrent clairement que l'utilisation de la commande arrive à maintenir les courant de l'axe d et q à leurs valeurs désirées ce qui indique un bon contrôle de la machine.

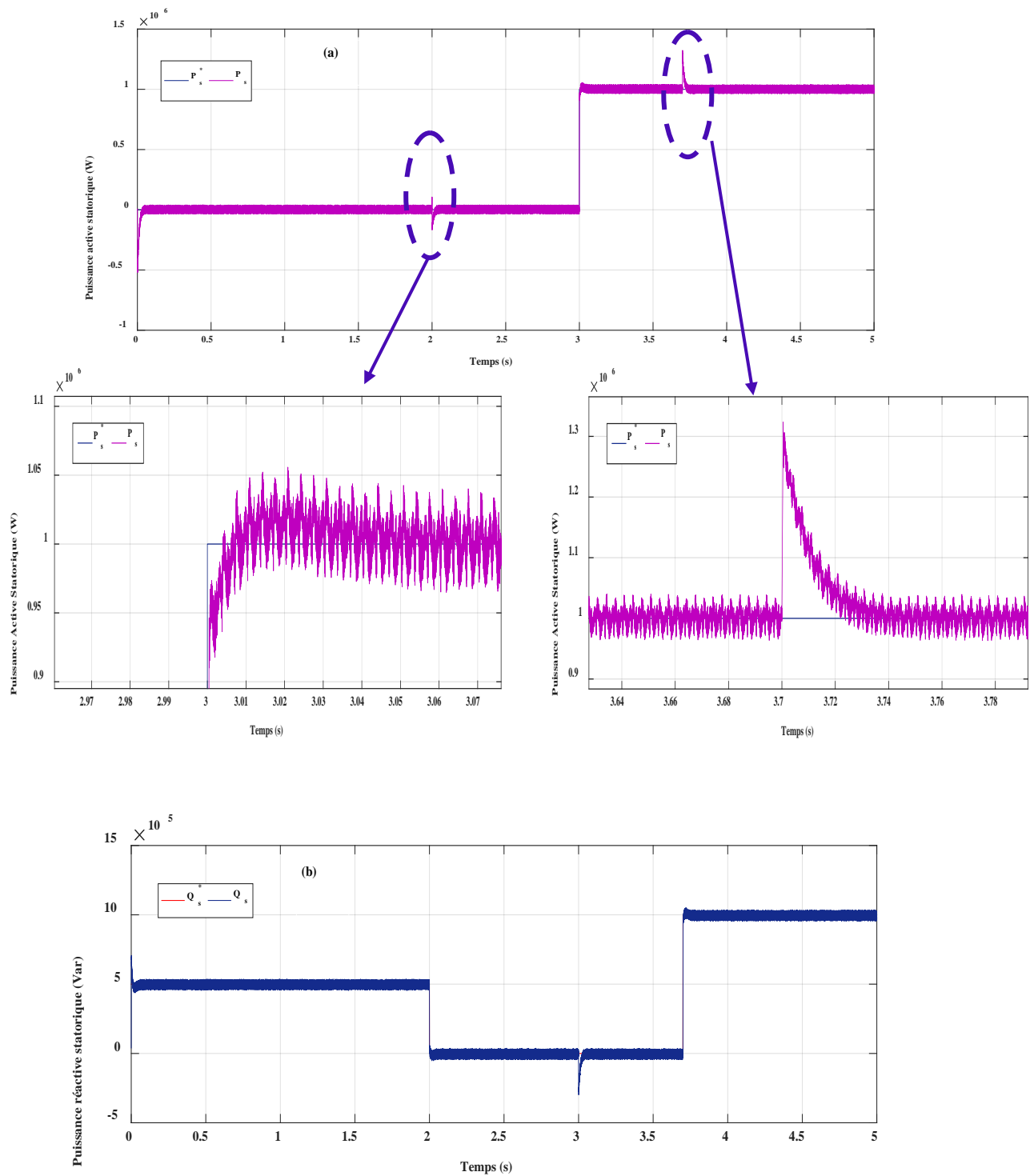


Fig. 3.12 : Puissances statorique : a) active , b) réactive

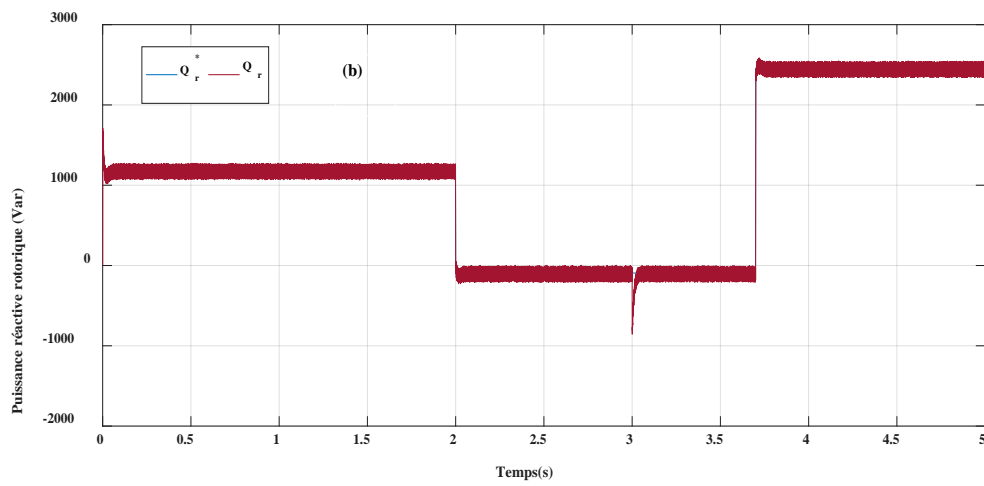
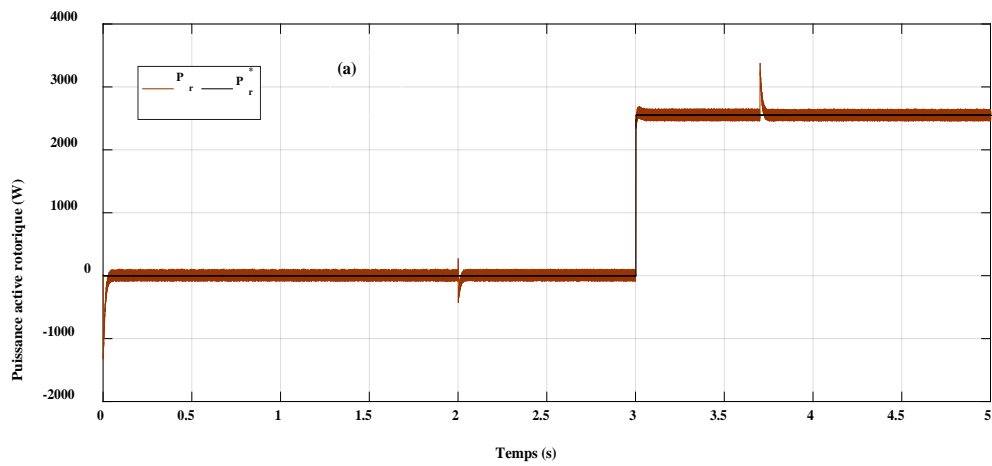
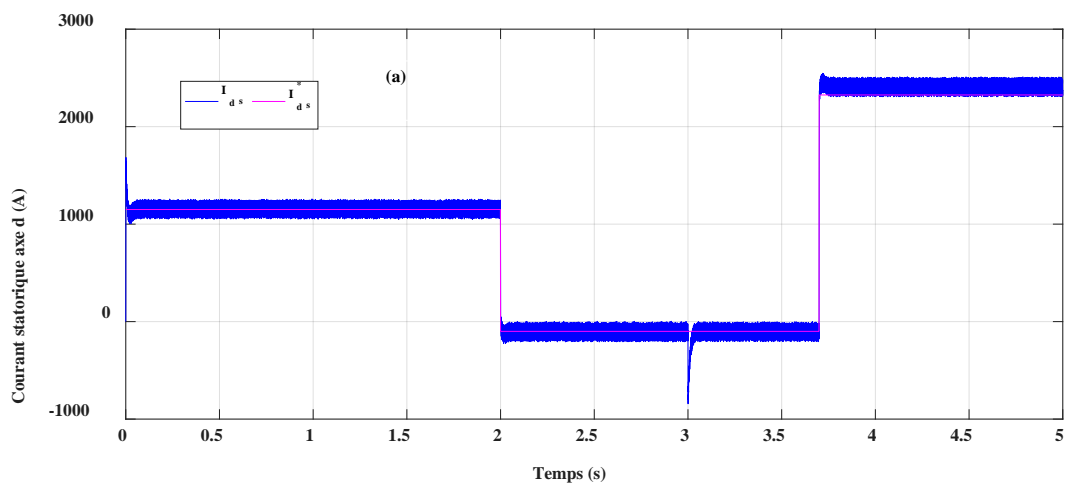


Fig. 3.13 Puissances rotorique : a) active , b) réactive



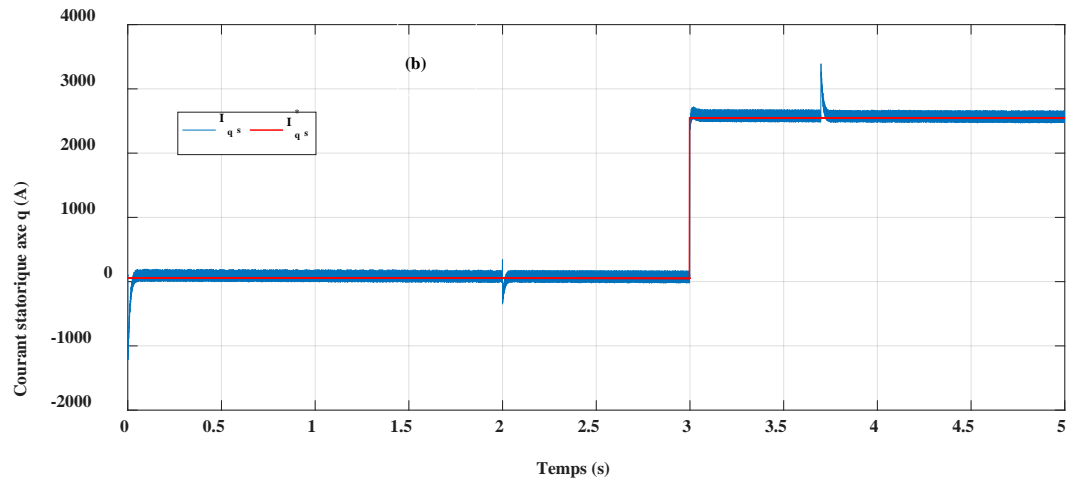


Fig. 3.14 Courants statorique : a) axe d , b) axe q

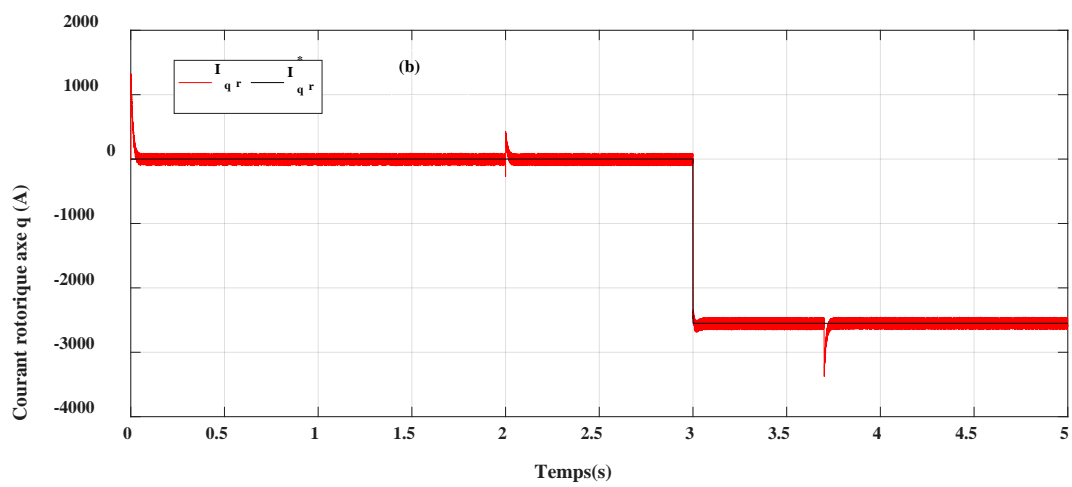
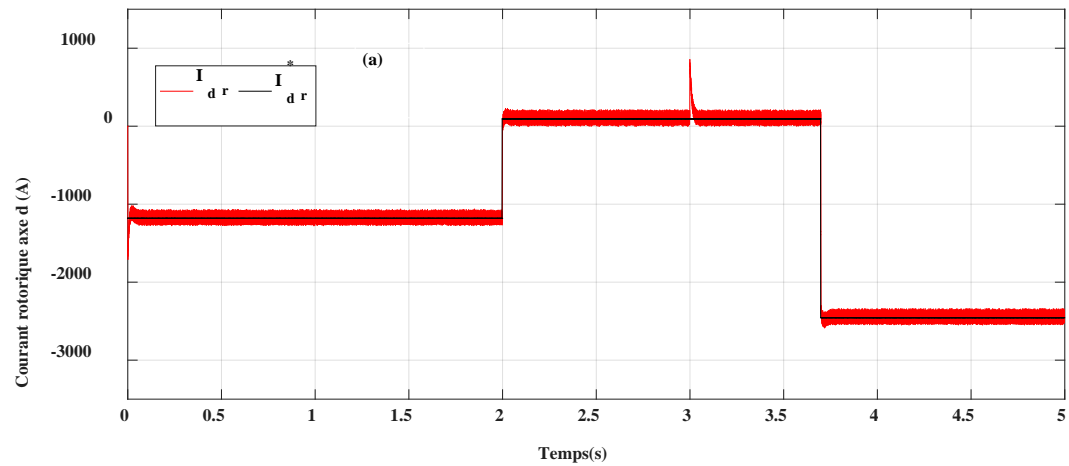


Fig. 3.15 Courants rotorique : a) axe d , b) axe q

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit et développé un algorithme de contrôle pour convertisseur côté MADA et l'MPPT permettant ainsi le contrôle des courants rotoriques et aussi le contrôle de la vitesse de rotation tout en garantissant un fonctionnement optimal de l'éolienne. Finalement, la stratégie de commande citées auparavant, a été validés et développés sur une éolienne sous Matlab/Simulink pour une vitesse de vent de 8 m/s. A partir des résultats obtenus, on note que les puissances actives et réactives du système éolien pouvaient être contrôlées indépendamment.

4.1. Introduction

Le raisonnement humain est basé sur des données imprécises ou incomplètes. L'idée de la logique floue est de transmettre cette richesse de raisonnement humain à un ordinateur sous forme de règles « Si.....Alors ». Dans le domaine technologique, le mot flou est un terme technique représentant l'ambiguïté ou le caractère vague des intuitions humaines plutôt que la probabilité. Aujourd'hui, les systèmes de : contrôle, commande et surveillance basés sur la logique floue sont de plus en plus importants surtout quand il s'agit des processus complexes et difficiles à modéliser mathématiquement. Les bases théoriques de la logique floue ont été établies au début des années 1965 par le professeur Lotfi Zadeh de l'université Berkeley de Californie, cette technique associe les notions de « sous-ensemble flou » et de « théorie des possibilités ». En 1970, c'était la première application de la logique floue dans les systèmes experts d'aide à la décision en médecine, puis en 1975 Mamdani a réalisé une régulation floue d'une chaudière à vapeur. Les Japonais, en 1985 étaient les premiers à avoir utilisé la logique floue dans les produits grand public « Fuzzy Logic Inside [23]. L'objectif visé par ce travail est l'amélioration des performances du système de commande tel que la précision, la stabilité, la rapidité, la robustesse et la fiabilité. Pour répondre à ces exigences, nous sommes, essentiellement, intéressés au développement d'un observateur basé sur la technique de la logique floue pour la génération de la vitesse de rotation de référence sans recours à la mesure de la vitesse du vent.

4.2. Bases générales de la logique floue

4.2.1. Ensembles flous

La notion d'ensemble flou a été proposée par Zadeh (Zadeh, 1965) en introduisant un caractère graduel de l'appartenance d'un élément à un ensemble donné. Cela permet une meilleure représentation des termes et des connaissances vagues que nous, les humains, manipulons au quotidien. Mathématiquement, un ensemble flou A d'un univers de discours U , est caractérisé par une fonction d'appartenance, notée μ_A , à valeur dans l'intervalle $[0,1]$ et qui associe à chaque élément x de U un degré d'appartenance $\mu_A(x)$ indiquant le niveau d'appartenance de x à A . $\mu_A(x) = 1$ et $\mu_A(x) = 0$ correspondent respectivement à l'appartenance et la non-appartenance. De plus, on peut introduire une fonction caractéristique pour A , notée comme suit :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in U \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.1)$$

Exemple: Evaluation de la température d'un corps (Fig 4.1):

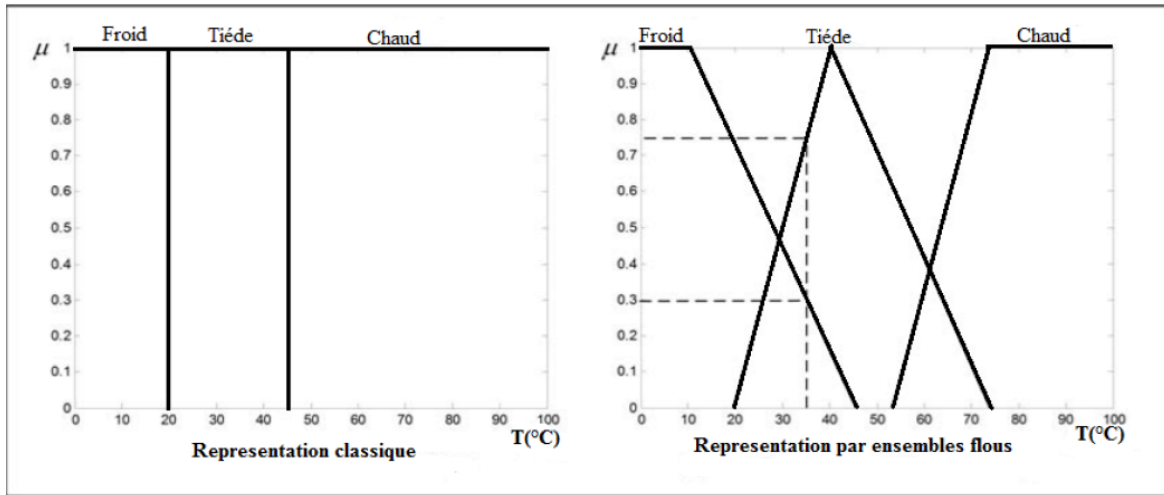


Fig. 4. 1 : Représentation de la température d'un corps par les ensembles classiques et flous

Dans un ensemble flou « l'appartenance à l'ensemble » d'un élément x est graduelle, laquelle est caractérisée par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$. Cette dernière définit mathématiquement l'ensemble flou sur l'univers de référence U . $\mu_A(x)$ mesure le degré d'appartenance d'un élément x à A . Donc un ensemble flou peut être représenté comme l'ensemble de paires ordonnées $(x, \mu_A(x))$.

D'où:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\} \quad (4.2)$$

Si l'ensemble U de référence est discret alors :

$$A = \sum \mu(x_i) / x_i \quad (4.3)$$

Si l'ensemble U de référence est continu alors :

$$A = \int \mu(x) / x \quad (4.4)$$

Les ensembles flous sont un moyen de réaliser l'interface entre l'information numérique (quantitative) et l'information symbolique (linguistique).

4.2.2. Variable linguistique

La variable linguistique représente un phénomène ou une grandeur ; la description de la variation de ces variables en utilisant les termes linguistiques : « quelque, beaucoup, souvent », « grand, moyen, petit » ce sont les valeurs linguistiques. Afin de permettre un traitement numérique, on définit les sous-ensembles (A_1, A_2, \dots) par leurs fonctions d'appartenances (μ_1, μ_2, \dots). La Figure 4.2 illustre un exemple de la variable linguistique 'température' avec ses 3 termes linguistiques 'faible', 'moyenne' et 'haute'

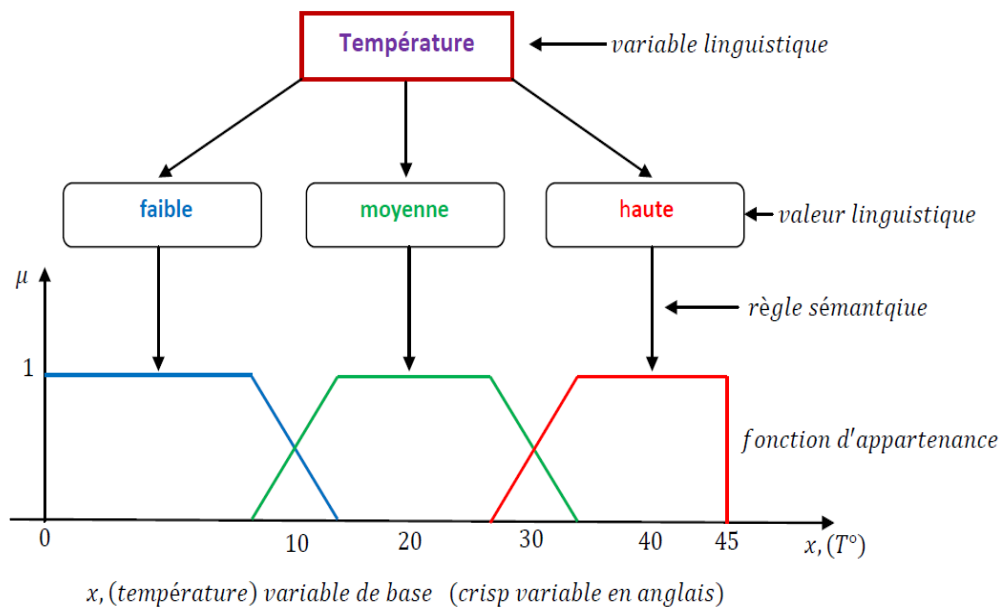


Fig. 4.2 : Variable linguistique [13]

Il est généralement imposé que les ensembles flous A_i doivent satisfaire la condition suivante:

$$\forall x, \exists i, \mu A_i(x) \neq 0 \quad (4.5)$$

4.2.3. Fonction d'appartenance

On représente les variables linguistiques par leurs fonctions d'appartenances. Donc à chaque sous-ensemble flou A_i est associée une fonction d'appartenance $\mu A_i(x)$ où x est la variable linguistique. Tel que, à chaque point x est associé une valeur précise de $\mu A_i(x)$ qui désigne, le degré d'appartenance de x à A_i . La fonction d'appartenance (voir figure 4.3) peut être représenté par plusieurs formes : Triangulaire, trapézoïdale, gaussienne ; On peut définir d'autres formes de fonctions d'appartenance, mais dans le réglage par logique floue, les formes déjà citées sont largement suffisantes pour délimiter les ensembles flous [15].

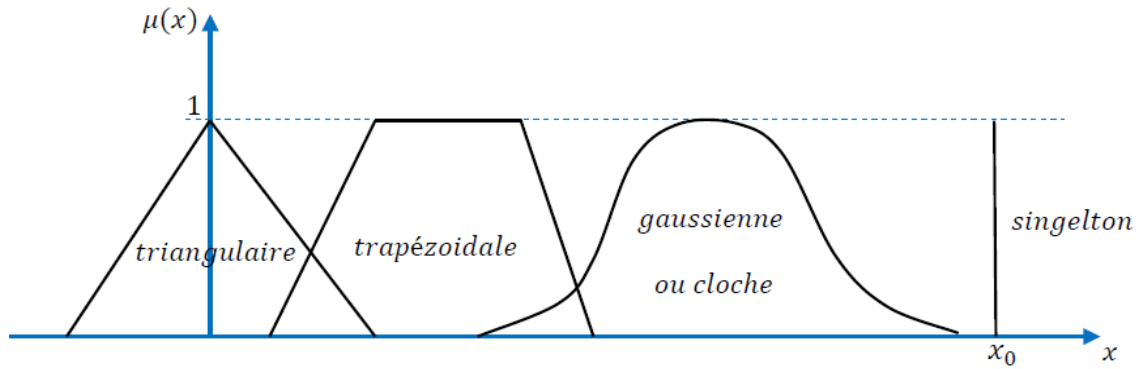


Fig.4.3 : Représentation de plusieurs ensembles flous [15]

4.3. Structure interne d'un système flou

De manière classique, le fonctionnement interne d'un système flou repose sur la structure présentée par la figure 4.4 qui inclut quatre blocs [23] :

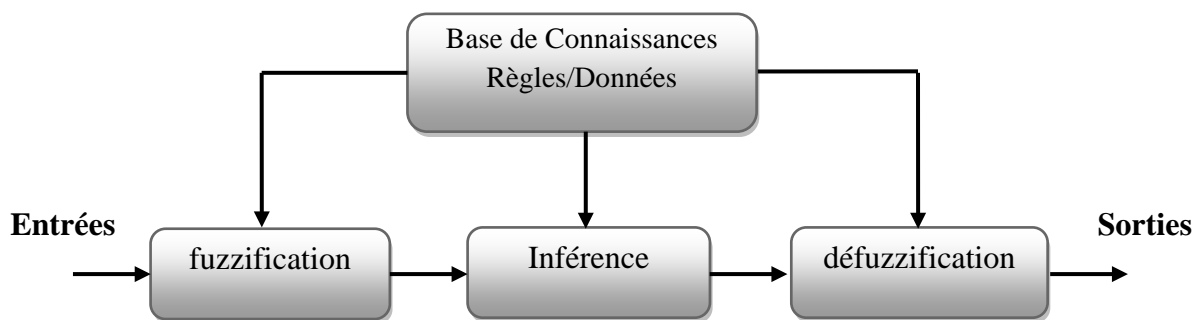


Fig. 4.4 : Structure interne d'un système flou

- La base de connaissances.
- La fuzzification des variables d'entrée, avec éventuellement un prétraitement de l'information.
- L'inférence à partir d'une base de connaissance.
- La défuzzification, avec éventuellement un post-traitement de l'information.

4.3.1. Base de connaissances (règles)

La logique floue a pour objectif de formaliser et de mettre en œuvre la façon de raisonner d'un être humain. En cela, elle peut être classée dans le domaine de l'intelligence artificielle.

L'outil le plus utilisé dans les applications de la logique est la base de règles floues. Une base de règles floues est composée de règles qui sont généralement utilisées en parallèle mais peuvent également être enchaînées dans certaines applications. Une règle est du type : SI 'prédicat' ALORS 'conclusion'.

4.3.2. Fuzzification

C'est la transformation des grandeurs physiques (entrées) en valeurs linguistiques (sous-ensemble flou) représentées par leurs fonctions d'appartenance qui peuvent être traitées ensuite, par le mécanisme d'inférence.

4.3.3. Moteur d'inférence flou

C'est un mécanisme de décision. Il permet à partir d'un fait observé de la base des règles floues, une décision en exploitant le raisonnement approximatif. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces opérateurs dans une inférence et qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance.

- ✓ Méthode d'inférence Max
- ✓ Méthode d'inférence Min
- ✓ Méthode d'inférence somme

4.3.4. Defuzzification

À la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opération ou commander un actionneur. Il existe plusieurs méthodes, la plus souvent rencontrée étant le calcul du « centre de gravité » de l'ensemble flou » (Fig. 4.5).

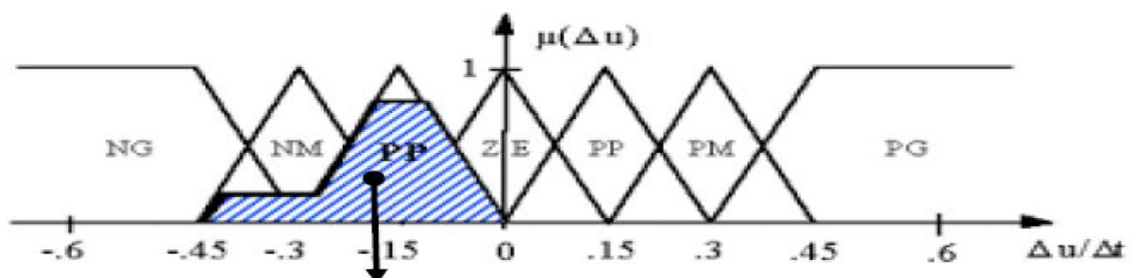


Fig. 4.5 : Defuzzification par centre de gravité

4.4. Le Principe de la méthode Perturbation et observation

La recherche du point de fonctionnement optimal par la méthode Perturbation et Observation (P et O) est largement utilisée dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. Le principe de cette méthode s'articule sur la perturbation de la variable de contrôle et observer les changements qui en résultent dans la fonction cible, et cela, jusqu'à la pente devient zéro. En effet, si le point de fonctionnement est à droite du point max l'observateur doit se déplacer vers la gauche pour se rapprocher du sommet et vice versa. Si le point de fonctionnement est de l'autre côté [47]. La figure (4.6) montre le principe de la méthode de P & O.

Fig. 4.6 : Schéma de principe de la méthode P & O

La problématique est d'arriver à force un compromis entre le pas de variation (Δ) et la vitesse de convergence et aussi l'efficacité. Par ailleurs, un pas élevé implique une réponse rapide mais plus d'oscillations autour du point recherché, par conséquent, moins d'efficacité et vice versa [48]. Dans cette étude le pas de variation pour les deux entrées et la sortie peuvent être fixés à base de l'observateur flou.

4.5. Structure de l'observateur

Le but principal de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est d'extraire la puissance mécanique maximale de la turbine éolienne. La figure (4.7) illustre la structure de

la commande étudiée à base d'un algorithme de supervision flou, Afin de générer la vitesse de rotation mécanique de référence permettant de maximiser la puissance extraite. L'avantage de cette structure et d'assurer, sans la connaissance de la vitesse du vent, un fonctionnement autour de point maximale de la puissance.

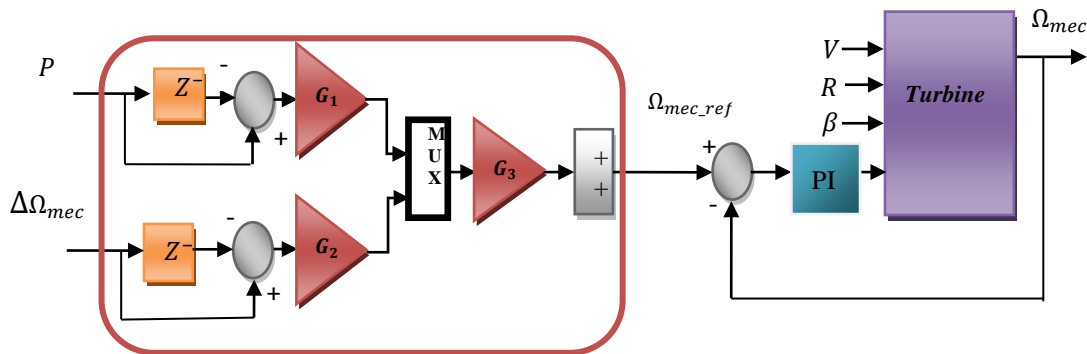


Fig. 4.7 : Schéma bloc du modèle de l'observateur flou de la vitesse de rotation

Dans ce travail la variation de la puissance (ΔP) et la variation de la vitesse de rotation mécanique ($\Delta\Omega_{mec}$) sont les entrées de l'observateur flou. toutefois, la sortie de l'observateur est la variation de la vitesse de rotation mécanique de référence ($\Delta\Omega_{mec_ref}$), G_1 , G_2 et G_3 sont les gains de l'observateur. Le tableau (4.9) présente les règles floues.

Tab. 4.9 : Table des règles

ΔP $\Delta\Omega_m$	GN	MN	PN	Z	PP	MP	GP
N	GP	MP	PP	Z	PN	MN	GN
Z	MN	MN	PN	Z	PP	MP	GP
P	GN	PN	PN	Z	MP	MP	MP

Avec :

- ✓ GN : Grand Négatif
- ✓ MN : Moyen Négatif

- ✓ PN : Petit Négatif
- ✓ Z : Zéro
- ✓ GP : Grand Positif
- ✓ MP : Moyen Positif
- ✓ PP : Petit Positif

Les entrées et les sorties de l'observateur sont données par les équations (4.8) , (4.9) et (4.10)

$$\Delta P = P(k) - P(k-1) \quad (4.8)$$

$$\Delta \Omega_{mec} = \Omega_{mec}(k) - \Omega_{mec}(k - 1) \quad (4.9)$$

$$\Delta \Omega_{mec_ref} = \Omega_{mec_ref}(k - 1) - \Omega_{mec_ref} \quad (4.10)$$

Les fonctions d'appartenances et la surface de l'observateur sont données par les figures (4.8) ,(4.9) et (4.10) , respectivement.

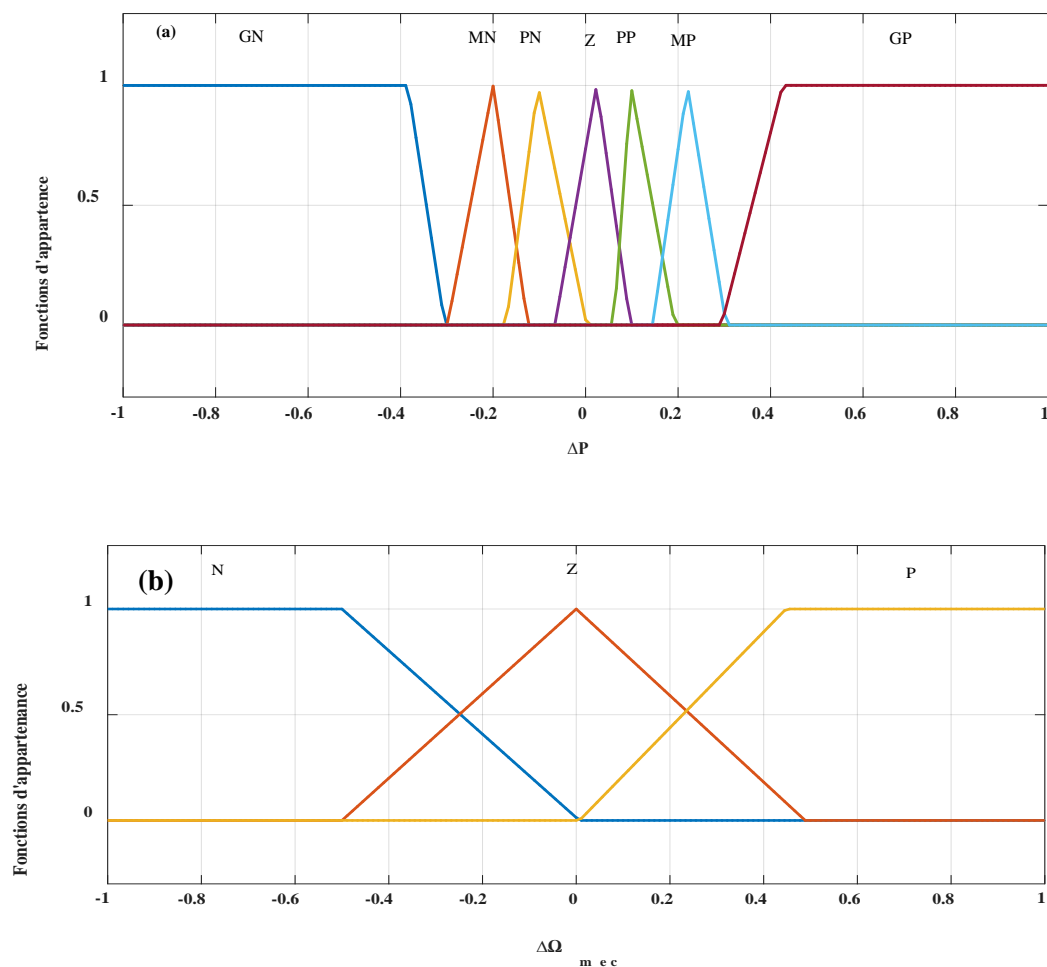


Fig. 4.8 : Fonction d'appartenance des deux entrées : a) ΔP , b) $\Delta \Omega_{mec}$

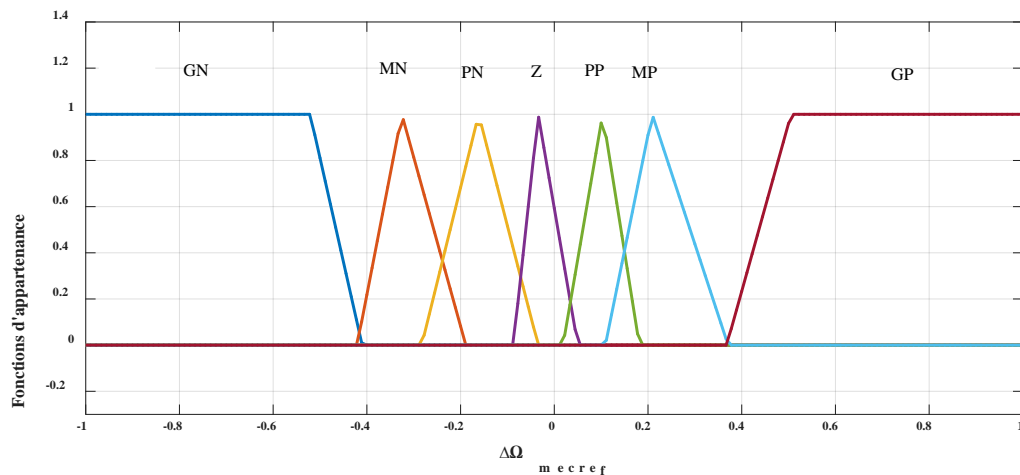


Fig. 4.9 : Fonction d'appartenance de la sortie $\Delta\Omega_{mec_ref}$

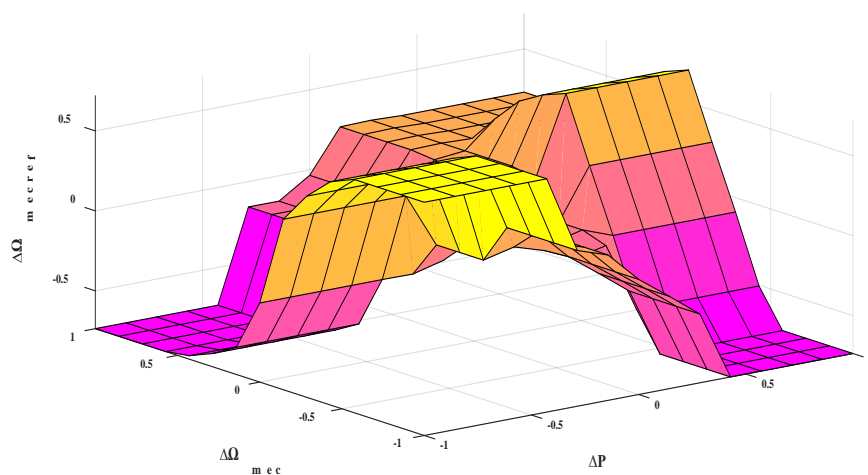


Fig. 4.10 : Surface des règles

4.6. Résultats et discussions

Dans ce chapitre nous avons considéré un vent variable de 8.3 m/s à 10.5m/s . pour la première vitesse. La vitesse de rotation se stabilise après un régime transitoire à la valeur 1555 tr/min , puis l'orsque le vent augmente pour atteindre 1957 tr/min environ les figures (4.11) et (4.12) présentent les vitesses du vent et les vitesses de rotation (estimer, mesurer) respectivement. On constate que l'eschelon de la vitesse de rotation estimé est imposé par l'observateur flou est bien suivis par la commande.

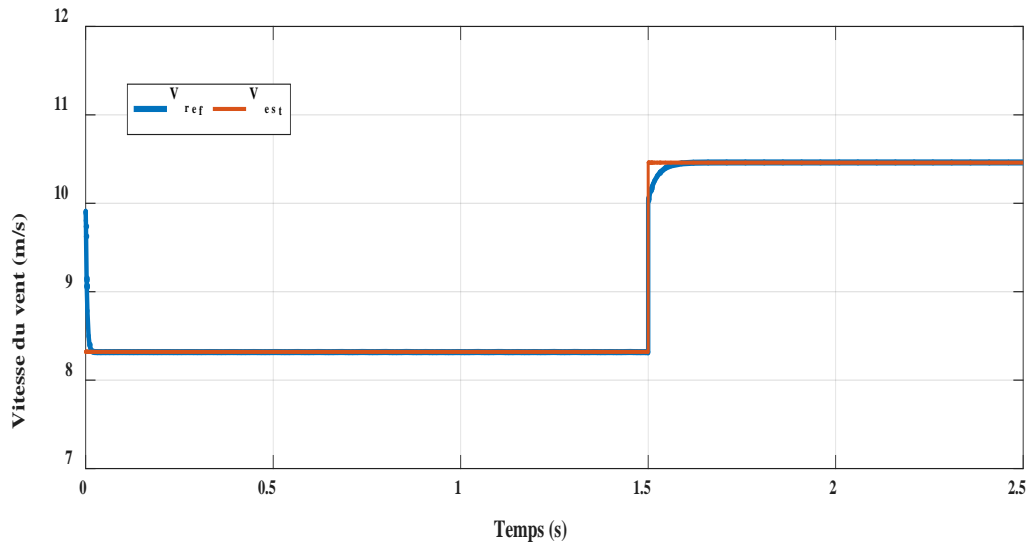


Fig. 4.11 : Vitesse du vent estimée

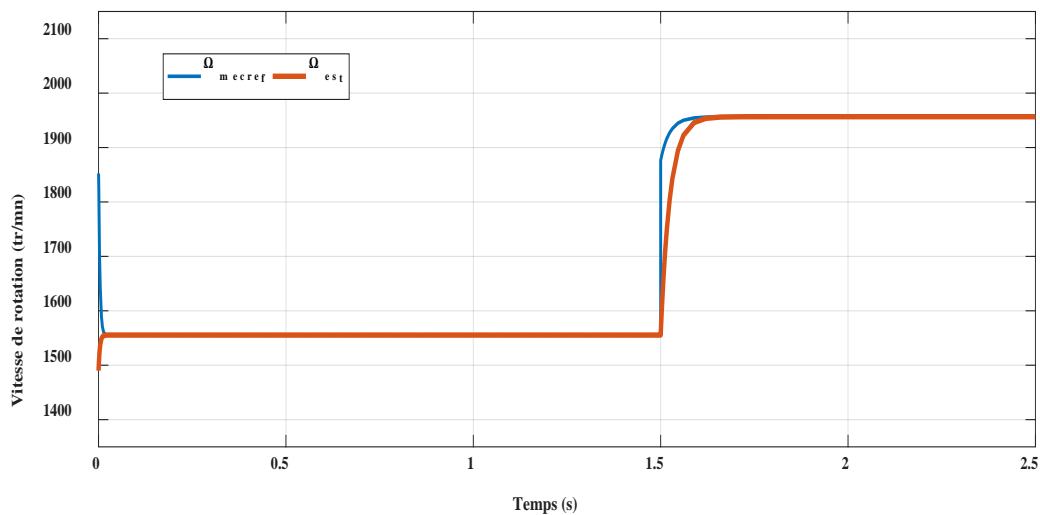


Fig. 4.12 : Vitesse de rotation estimée

4.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de la commande MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation mécanique on se basent sur la technique P&O pour estimation de la vitesse de rotation de référence à base d'un observateur flou. Cette approche peut contrôler la vitesse de rotation mécanique sous la mesure de la vitesse du vent pour générer la vitesse de rotation de référence et obtenir par conséquent, de meilleures performances .

Conclusion générale

Le présent travail a permis de contrôler les puissances d'une génératrice dans une chaîne de production d'énergie éolienne.

L'objectif de notre travail a consisté à : modéliser et commander une chaîne de conversion ainsi que la réalisation d'un observateur flou pour la commande MPPT.

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur l'énergie éolienne :

- On a présenté une description sur l'énergie éolienne de manière générale ;
- Quelques notes sur l'évaluation mondiale et en Algérie de l'énergie éolienne ;
- On a étudié les différents types de turbines éoliennes.

Le deuxième chapitre présente la modélisation du système de conversion, on y trouve :

- La modélisation de la turbine se compose de trois pales orientables, le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique et l'arbre relie la partie mécanique avec la partie électrique ou bien relie la turbine avec le générateur ;
- Modélisation de la machine à double alimentation (MADA), on procède à la mise en équations de la machine asynchrone afin de simplifier les équations de cette machine, nous utiliserons la transformation de Park. Elle permet le passage du repère abc au repère dq ;
- Modélisation du convertisseur MLI ;
- Etude du fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable et simulation sous l'environnement MatLab /simulink.

Dans le troisième chapitre, on a expliqué la stratégie de la commande MPPT et la commande vectorielle du générateur asynchrone à double alimentation indépendant des puissances active et réactive. De plus, on a présenté la commande de redresseur MLI pour contrôler les puissances active et réactive et les courants rotoriques.

Dans le quatrième chapitre, on a vu le principe de la commande MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation mécanique. L'approche P&O permet de contrôler la vitesse de rotation mécanique sous la mesure de la vitesse du vent pour générer la vitesse de rotation de référence et obtenir par conséquent, de meilleures performances.

Références

- [1] K.Bedoud , “Modélisation et Commande d’une chaîne de conversion d’énergie renouvelable“ , Thèse de doctorat Option : Automatique Industrielle , Université d’Annaba, 2016.
- [2] T. Ghennam , “Supervision d’une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d’un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation ”, Thèse de doctorat , spécialité : Génie Electrique, Ecole Militaire Polytechnique d’Alger ,Ecole Centrale de Lille, 2011
- [3] Frédéric POITIERS, “étude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne
-machine asynchrone à cage autonome
-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau ”, thèse de doctorat, Spécialité : Electronique et Génie Electrique, Université de Nantes ,2003
- [4] M. Singh, E. Muljadi, J. Jonkman, et V. Gevorgian, “Simulation for Wind Turbine Generators—With FAST and MATLAB-Simulink Modules” , *Energy Laboratory*, April 2014
- [5] N.Kasbadji Merzouk “Evaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie“ thèse de doctorat , option : Physique énergétique et matériaux, Université de Tlemcen, 2006.
- [6] Peter Fogh Odgaard ,Jakob Stoustrup, “Orthogonal Bases used for Feed Forward Control of Wind Turbines” , *Aalborg University, 9220 Aalborg East, Denmark* ,September 2, 2011.
- [7] Davigny A ,“ Participation aux services système de fermes éoliennes a vitesse Variable intégrant un stockage inertiel d’énergie” , Thèse de doctorat. France: USTL Lille; 2007.
- [8] Boyette A. Contrôle-commande d'un générateur asynchrone a double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne , these de Doctorat , 2006. Université de Nancy (France).
- [9] B. Bossoufi , M. Karim, A. Lagrioui, M. Taoussi, A. Derouich, “Observer backstepping control of DFIG-Generators for wind turbines variable-speed: FPGA-based implementation ”,*Renewable Energy* 81 (2015) 903_917
- [10] N. Medjenah, Ch. Hamoudi , “Amélioration de la performance de la commande des

Références

puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée ” , Mémoire de Master ,Option : Commande Electrique, Université Mohamed Boudiaf - M’SILA ,2017 / 2018 .

[11] Sibonelo G. Magagula, “Power Efficiency Optimization of Switched Reluctance Generator (SRG) Using Power Disturbance Maximum Power Point Tracking (MPPT)” *International Journal of Computer Electrical Engineering*, 2017.

[12] Dr. I. Al-Bahadly, “ Modelling and Control Design of Pitch-Controlled Variable Speed Wind Turbines” April, 2011 .

[13] Neetu Singh, Dr. Bhupal Singh M.Tech Scholar, “Design and Modeling of Wind Energy Conversion System Based on PMSG Using MPPT Technique” *Journal of Scientific Research Engineering & Technology*, Vol .5, Issue 2, February 2016 .

[14] R. SADAOUI “Analyse et commande de la machine asynchrone à double alimentation” , Thèse de doctorat , Option : Génie Electrique, Université du Québec 2017.

[15] G. Madhusudhana Rao, S. Sundeep & B. V. Sanker RAM , “Neuro-Fuzzy Logic control of MPPT for inverter based wind generators” , *International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research (IJEEER)*, Vol. 5, Issue 6, Dec 2015, 37-52 .

[16] A. Tamaarat * et A. Benakcha, “Performance de la commande des puissances active et réactive dans une éolienne basée sur une MADA” , *Revue des Energies Renouvelables Vol. 20 N°4 (2017) 635 – 647*

[17] T. Ouchbel, S. Zouggar, M. Seddik, M. Oukili et M. El Hafyani, “Régulation de la puissance d’une éolienne asynchrone à vitesse variable à l’aide d’un compensateur statique d’énergie réactive (SVC)” , *Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°3 (2012) 439 – 450*

[18] K. Belmokhtar, M. L. Doumbia “Modélisation et commande d’un système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation pour la fourniture de puissances au réseau électrique” , *Journal of Scientific Research N° 0 vol. 2 (2010)*

[19] A. Boumaiza, F. Arbaoui, M. L. Saïdi, “ Diagnostic des défauts à base d’observateur dans un système éolien” , *Mediterranean Journal of Modeling and Simulation (MJMS) 01 (2014) 045–055*

[20] B. Benyachou, F. Ait Ouhrouch, K. Gueraoui, B. Bahrar , “ Modélisation sous MATLAB/SIMULINK d’une turbine éolienne reliée à une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)” , 13ème Congrès de Mécanique 11 - 14 Avril 2017.

Références

- [21] S. Fergane, “Commande MPPT d’un Aérogénérateur basée sur des observateurs neuro-flou” , Mémoire de Master ,Option : Automatique, Université Abderrahmane Mira Bejaia 2012/2013
- [22] F. Dione, “Etude d’une chaîne de conversion d’énergie éolienne A base de machine synchrone à aimants permanents” , Mémoire de Master ,Option : Electrotechnique Industrielle Université d’Annaba 2018 .
- [23] M. Bechouche ali “Utilisation des techniques avancées pour l’observation et la commande d’une machine asynchrone :Application à une éolienne” , Thèse de doctorat, Option : Electrotechnique, Université de Mouloud Mammeri de Tizi–Ouzou.
- [24] A. Tamaarat, “Modélisation et Commande d’un système de conversion d’énergie éolienne à base d’une MADA ” , Thèse de doctorat, Option : Electrotechnique, Université Mohamed Khider Biskra .
- [25] M. Smaïl et A. Benatiallah, “Modélisation d’une chaîne de conversion éolienne équipée D’une machine asynchrone double alimentation” , *Revue des Energies Renouvelables ICESD’11 (2011) 233 – 238.*
- [26] K. Z. Østergaard, P. Brath, J. Stoustrup, “Estimation of effective wind speed” , Journal of Physics: Conférence Series **75** (2007) 012082 .
- [27] K. OUARI , “ Etude et Commande d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)” , Mémoire de Master, Option : Commande des Système Electrique Et Technique de Haute Tension, Université A/Mira de Bejaia, 2016/2017.
- [28] M. Addour et L. Allouti , “Etude et maximisation d’un système éolien” , Mémoire de Master, Option : Energies Renouvelables, Université A/Mira de Bejaia, 2013.
- [29] “Wind Speed and Rotor Position Sensorless Control for Direct-Drive PMG Wind Turbines ” IEEE Transactions on industry applications, vol. 48, no. 1, january/february 2012.
- [30] R. Sitharthan and 2Dr. M. Geethanjali “ ANFIS based Wind Speed Sensor-less MPPT Controller for Variable Speed Wind Energy Conversion Systems” , Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 8(18) December 2014, Pages: 14-23.
- [31] K. Belmokhtar, M.L. Doumbia et K. Agbossou, “Novel fuzzy logic based sensorless maximum power point tracking strategy for wind turbine systems driven DFIG (doubly-fed induction generator)” , Energy 76 (2014) 679_693.
- [32] N. HAMDI, “Modélisation et commande des génératrices éoliennes” ,Mémoire de Magister, Option : Electrotechnique, Université Mentouri de Constantine 2008.

Références

- [33] L. Khelfat, “Etude et Simulation d’une éolienne à base d’une Machine Asynchrone Doublement Alimentée”, Mémoire de Master, Option : Electronique de Puissance, Université Badji Mokhtar- Annaba,2017 .
- [34] A.Melloul, “Simulation et diagnostic d’une machine asynchrone à double alimentation d’une éolienne”, Mémoire de Magister, Option : Electrotechnique, Université Ferhat Abbas Sétif, 2011.
- [35] I. Meghlaoui, “Modélisation et simulation d’une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal” , Mémoire de Magister, Option : Electromécanique, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2009.
- [36] H. CAMBLONG, “Modélisation et commande de systèmes éoliens”, Thèse de doctorat, Université du Havre,2009.
- [37] A. Guasmi et S. Guelmine “ Modélisation et commande du système de conversion éolienne basé sur une GADA” ,Mémoire de Master, Option : Réseaux Electriques, Université Mohamed Boudiaf - M’Sila .
- [38] P. Krafczyk, “Modélisation et mise en oeuvre d’une chaîne de production éolienne à base de la MADA”, Thèse de doctorat, Option : Electrotechnique Université de Lorraine ,2013 .
- [39] Y. Soufi , M. Bechaouet, A. Boukadoum , T. Bahi “Fuzzy logic control of Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic system” , vol N°2, 2014
- [40] R. Mammad,” Etude et simulation de la robustesse d’une commande pour éolienne à base de MADA en présence des incertitudes des paramètres et/ou des perturbations présente dans le réseau électrique”, Thèse de doctorat, Option : Electrotechnique, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2016 – 2017
- [41] K. Bedoud, R. Lakel, M. Ali-Rachedi, S. Lekhchined et T.Bahi , “ Modélisation d’une chaine de conversion d’énergie éolienne Basée sur une machine asynchrone à double alimentation” , 2013.
- [42] Z. Gadouche, C. Belfedal, T. Allaoui, B. Belabbas, “Commande de Puissance Active et Réactive d’une MADA utilisée dans un système éolien”, The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies, Ghardaïa, 2014 .
- [43] B.Bossoufi, M.Karim, S.Ionita, A.Lagrioui, “Nonlinear Non Adaptive Backstepping with Sliding-Mode Torque Control Approach for PMSM Motor” Journal of Journal of Electrical Systems JES, pp236-248. Vol.8 No.2, June 2012 .
- [44] F. Z. TRIA “Contribution à la commande d’un système éolien basé sur une MADA

Références

Par différentes techniques'', Thèse de doctorat, Option : maîtrise d'énergie , Université d'El-oued , 2012/2013.

[45] M. Malki et S. A. Belarbi, "Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret'', Thèse de doctorat, Option : Commande de Machine Electrique, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, 2013/2014.

[46] B. Kelkoul, "Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation'', Magister API, Option : Automatique, Université de Tlemcen, 2011.

[47] A. Dida et D.Ben Attous , "Adaptive hill-climb searching method for MPPT algorithm based DFIG system using fuzzy logic controller'', Int J Syst Assur Eng Manag (January 2017) 8(Supp. 1): S424-S434.

[48] B.Meghni et D.Ahmad Tahaer Azar, "A second-order sliding mode and fuzzy logic control to optimal energy management in wind turbine with battery storage'', Neural comput & Applic , 2017.

Annexe

Les paramètres de la chaîne de conversion :

$$R_r = 0.021\Omega$$

$$R_s = 0.012\Omega$$

$$L_m = 0.0135 \text{ H}$$

$$L_s = 0.0137 \text{ H}$$

$$L_r = 0.0135 \text{ H}$$

$$J = 1000 \text{ Kg.m}^2$$

$$F = 0.003 \text{ N.m.S/rad}$$

$$R = 35.5 \text{ m}$$

$$G = 90$$

$$P = 2$$

$$\text{Vitesse du vent } V = 8 \text{ m/s}$$

$$\text{Tension statorique } V_s = 398 \text{ V}$$

$$\text{Fréquence nominale } f = 50 \text{ Hz}$$

$$t_r = 0.001$$

$$S = 1 - ((L_m * L_m) / (L_s * L_r))$$

$$K_p = S * L_r / t_r$$

$$K_i = R_r / t_r$$

$$W_s = 2 * \pi * f$$