



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

Spécialité : Électrotechnique

Option : Commande électrique

Présenté par :

MEBREBECH MOHAMED NABIL

MERAH OUSSAMA

Sujet du mémoire

Commande avancée d'une éolienne à vitesse variable

Soutenu publiquement le : 25 / 06 / 2023 devant le jury composé de :

M, Meslem.Y	Pr	Président
M,Belfdhal.S	MCB	Encadrant
M,Mihoub.Y	MCA	Examineur
M,Ogab.C	Pr	Examineur

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail:

❖ *A mon cher père, à ma chère mère, pour leur tendresse, leurs conseils, leurs sacrifices, leur présence à mes côtés et leur soutien, auxquels je dois ce que je suis et à qui je souhaite une longue vie pleine de bonheur et de santé. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon éternelle reconnaissance et de ma profonde affection.*

❖ *A Mes frères.*

❖ *A Mes sœurs.*

A toute ma famille.

*Sans oublier mon binôme **nabil**, sa famille et tous mes Amis(e)*



*MERAH
OUSSAMA*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail:

❖ *A mon cher père, à ma chère mère, pour leur tendresse, leurs conseils, leurs sacrifices, leur présence à mes côtés et leur soutien, auxquels je dois ce que je suis et à qui je souhaite une longue vie pleine de bonheur et de santé. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon éternelle reconnaissance et de ma profonde affection.*

❖ *A Mes frères.*

❖ *A Mes sœurs.*

A toute ma famille.

*Sans oublier mon binôme **oussama**, sa famille et tous mes Amis(e)*

MEBREBECHE MOHAMED NABIL



Remerciements

Nous remercions le DIEU le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage afin d'accomplir ce modeste travail

*Nos remerciements vont à Notre encadrant
Dr BELFDAL SAIF EDDINE pour nous avoir orientés et
donnés de précieux conseils .Nous le prions de bien vouloir
agréer le témoignage de notre plus vive reconnaissance*

*Nous apportons aussi nos vifs remerciements aux personnels
enseignants de l'Université
Ibn KHaloun -Tiaret-*

*Nous remercions chaleureusement les membres du jury pour leur
regard critique et plus que pertinent sur l'ensemble de notre
travail.*

*A toute la promotion de **2022/2023***

- Table des matières
- Liste des figures
- Liste des tableaux
- La table des symboles
- Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur L'énergie éolienne

▪ I.1 Introduction	01
▪ À propos de l'énergie éolienne.....	01
▪ I.3 Définition de l'énergie éolienne	02
▪ I.4 Aperçu sur les Aérogénérateurs	03
▪ I.4.1 Aérogénérateurs	03
▪ I.4.2 Différents type d'éoliennes.....	04
▪ I.4.2.1 Éolienne a axe vertical.....	04
▪ I.4.2.1.a. les Avantages de la structure à axe vertical	05
▪ I.4.2.1.b les Inconvénients de la structure à axe vertical	06
▪ I.4.2.2 Eoliennes à axe horizontal	06
▪ I.4.2.2.a. les Avantages de la structure à axe horizontales	07
▪ I.4.2.2.b. les Inconvénients de la structure à axe vertical	08
▪ I.5 Principaux composants d'une éolienne	08
▪ I.6 chaine de conversion de l'énergie éolienne	10
▪ I.6.1 principe de conversion de l'énergie éolienne	10
▪ I.6.2 Modélisation du vent	11
▪ I.6.3 La puissance extraite du vent.....	12
▪ I.6.4 Loi de Betz.....	12
▪ I.6.5 Coefficient de vitesse spécifique.....	14
▪ I.6.6 Coefficient de puissance	14
▪ I.6.7 Bilan des forces sur une pale	16
▪ I.7.1 Modèle de la turbine éolienne	16
▪ I.7.2 Modélisation de la turbine(partie mécanique)	17
▪ I.7.3 Model le du multiplicateur	18
▪ I.7.4 Modèle de l'arbre mécanique	19
▪ I.8 Modes de fonctionnement de la turbine éolienne	19
▪ I.8.1 Principe de la MPPT	20
▪ I.8.2 Algorithme de suivi de la puissance maximale	21
▪ I.9 Conclusion	24

Chapitre II : Modélisation de la Machine Asynchrone à Double alimentation

▪ II.1 Introduction	26
▪ II.2 Machine asynchrone à double alimentation de type rotor bobiné	27
▪ II.2.1 Structure de la machine	27
▪ II.2.2 Description des composants de la machine	28
▪ II.2.3 La double alimentation.....	28
▪ II.3 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA	29
▪ II.4 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	30
▪ II.4.1 Hypothèses simplificatrices.....	31
▪ II.4.2 Equations électriques de la MADA	32
▪ II.5 Modèle triphasé de la MADA	33
▪ II.5.1 La transformation de Park	34
▪ II.5.2 Equation mécanique.....	35
▪ II.5.3 Expression de la puissance active et réactive	36
▪ II.5.4 Expression du couple électromagnétique	36
▪ II.6 la représentation d'état de la machine.....	36
▪ II.7 La chaîne de conversion.....	38
▪ II.8 Principe de la commande vectorielle	39
▪ II.8.1 Relations entre puissances statoriques et courant rotoriques	41
▪ II.8.2 Relations entre tensions rotoriques et courant rotoriques	41
▪ II.9.1 Commande vectorielle directe en P et Q de la MADA en génératrice	41
▪ II.9.2 Commande directe avec boucle de courant.....	42
▪ II.9.3 Commande indirecte	43
▪ II.10 Synthèse des régulateurs	43
▪ II.11. Modélisation du convertisseur côté rotor.....	45
▪ II.12 Contrôle du convertisseur.....	46
▪ II.13 Résultats	48
▪ II.14 Interprétations	52
▪ II.15 Conclusion.....	53

Chapitre III : Commande par mode glissant et logique flou

▪ III.1 Commande mode glissant	55
▪ III.1.2 Principe de la commande mode glissant.....	55
▪ III.1.3 Conception de la commande par mode glissant	55
▪ III.1.3.1 Choix des surfaces de glissant.....	55
▪ III.1.3.2 Conditions D'existence et de convergence du régime glissant	56

▪ III.1.3.2.1 Approche direct	56
▪ III.1.3.2.2 Approche LYAPUNOV	56
▪ III.1.3.2.3 Détermination de a loi de commande	57
▪ III.1.4 Elimination du phénomène dubroutement chatternig.....	58
▪ III.1.4.1 Proposition de slotine.....	59
▪ III.1.4.2 Proposition de harshima.....	60
▪ III.1.5 Structure de commande par mode glissant	60
▪ III.1.5.1Structure avec la commutation au niveau el organe	60
▪ III.1.5.2 Structure par commutation au niveau d une contre réaction d état	61
▪ III.1.5.3 Structure de régulation avec ajout de la commode équivalence	62
▪ III.1.6 Applications de la commande mode glissant a la MADA.....	62
▪ III.1.6.1 Choix des surfaces de glissants	63
▪ III.1.6.2Conditions Convergences	63
▪ III.1.6.3loi de la commande par mode glissant.....	63
▪ III.1.7 Résultats	66
▪ III.1.8 Interprétations.....	68
▪ III.2 Commande par logique floue	69
▪ III.2.1 Introduction	69
▪ III.2.2 Principe de la logique floue.....	69
▪ III.2.3 Structure d'un régulateur floue	70
▪ III.2.4 Eléments de base de la logique floue.....	72
▪ III.2.4.1Univers De discours	72
▪ III.2.4.2 fonction d appartenances.....	72
▪ III.2.4.3 Formulation mathématique des fonctions d appartenance	74
▪ III.2.5 Variable linguistiques	74
▪ III.2.6 Opérateurs de la logique floue	74
▪ III.2.7 Application de la commande par la logique floue à la MADA	75
▪ III.2.8 Structure de base d un contrôleur floue de courant	76
▪ III.2.9 Résultats	79
▪ III.2.10 Interprétations.....	80
▪ III.2.11 Conclusion.....	80
▪ Conclusion générale	82
▪ Suggestions et perspectives	83
▪ Résumé	84
▪ ANNEXE.....	85
▪ Bibliographie	87

Liste des figures

Chapitre I :Généralités sur L'énergie éolienne

▪ Figure I.1:Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde	02
▪ Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	03
▪ Figure I.3: Correspondance taille et puissance des éoliennes.....	04
▪ Figure I.4 : Eoliennes à axe vertical.....	05
▪ Figure I.5 :Éoliennes à axes horizontales	07
▪ Figure I.6 : Composants d'une éolienne NORDEXS77/1500KW	08
▪ Figure I.7 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.....	09
▪ Figure I.8 :Principe de la conversion de l'énergie éolienne	11
▪ Figure I.9 :Evolution du vent.....	12
▪ Figure I.10 :Tube de courant autour d'une éolienne.....	13
▪ Figure I.11 :Coefficient de puissance pour différents types d'éoliens	15
▪ Figure I.12 :Variation de l'angle de calage d'une pale	16
▪ Figure I.13 : Le schéma bloc qui représente la turbine éolienne	16
▪ Figure I.14 :Coefficient de puissance de l'éolienne.....	17
▪ Figure I.15 :Modèle mécanique de la turbine	18
▪ Figure I.16 :Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne	20
▪ Figure I.17 :Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse....	21
▪ Figure I.18 :Ajustement du point de fonctionnement la turbine pour le suivi de puissance maximal.....	23
▪ Figure I.19 :Organigramme représentant l'algorithme de la MPPT appliqué	24

Chapitre II :Modélisation de la Machine Asynchrone à Double alimentation

▪ Figure II.1 :Représentation de la machine asynchrone à double alimentation	27
▪ Figure II.2 :Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice	27
▪ Figure II.3 :Les quatre modes de fonctionnement d'une MADA.....	29
▪ Figure II.4 : Représentation des enroulements de la MADA.....	31
▪ Figure II.5 :Schéma des enroulements de la MADA	32
▪ Figure II.6 :Modèle dynamique dans une MADA à trois axes.....	33
▪ Figure II.7 :Repère de PARK	34
▪ Figure II.8 :Schéma synoptique pour un fonctionnement en génératrice de la MADA.....	38
▪ Figure II.9:Principe de la commande vectorielle	39
▪ Figure II.10:Orientation de la tension et de flux statorique	40
▪ Figure II.11:Commande vectorielle en puissance sans boucle de courant.....	42
▪ Figure II.12:Commande en puissance avec boucle de courant	42

▪ Figure II 13:Commande en puissance indirecte	43
▪ Figure II 14:Schéma bloc d'un système régulé par un PI	44
▪ Figure II 15:Le convertisseur coté rotor de la MADA	45
▪ Figure II 16: Principe de la MLI	47
▪ Figure II 17:Asservissement du système éolien Turbine-MADA	47
▪ Figure II 18: La vitesse du vent	48
▪ Figure II 19: La puissance de la turbine	48
▪ Figure II 20: Le coefficient de puissance	49
▪ Figure II 21: a)La vitesse mécanique de la turbine	49
▪ Figure II 22: a) La puissance active de la MADA b) La puissance réactive de la MADA	50
▪ Figure II 23: a) courant rotorique direct et quadratique	51
▪ Figure II 24: Vitesse électrique de la MADA	51

Chapitre III : Commande par mode glissant et logique flou

▪ Figure III 1:Commande équivalente U_{eq}	57
▪ Figure III 2:Fonction sign	58
▪ Figure III 3: Phénomène de broutement	59
▪ Figure III 4:Fonction T : (A) - un seuil ; (b) - deux seuils (zone morte).....	59
▪ Figure III 5:Fonction $\text{Cont}(\varepsilon > \text{petit})$	60
▪ Figure III 6: Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande.....	61
▪ Figure III 7: Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état.....	61
▪ Figure III 8: Structure de régulation par ajout de la commande équivalente	62
▪ Figure III 9 : Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant	65
▪ Figure III 10:a) Puissance active statorique de la MADA; b) Puissance réactive statorique.....	66
▪ Figure III 11: a) Courant rotorique quadratique de la MADA; b) Courant rotorique direct de la MADA	66
▪ Figure III 12: La vitesse mécanique de la turbine.....	67
▪ Figure III 13: Coefficient de puissance	67
▪ Figure III 14:a)Schéma synoptique d'un contrôleur flou,b)Configuration d'un contrôleur flou	70
▪ Figure III 15:Exemples des fonctions d'appartenances monotones décroissantes	73
▪ Figure III 16:Exemples des fonctions d'appartenances monotones croissantes	73
▪ Figure III 17:Exemples des fonctions d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale et gaussienne	73
▪ Figure III 18:Fonctions d'appartenance triangulaire et trapézoïdale.....	74
▪ Figure III 19:Schéma bloc de la structure de commande floue	75
▪ Figure III 20: schéma synoptique d'un régulateur flou des puissances actives et réactive	76
▪ Figure III 21:Les fonctions d'appartenances utilisées par le contrôle	77
▪ Figure III 22: Puissance active statorique de la MADA.....	79
▪ Figure III 23:a)Courant rotorique direct de la MADA; b) Courant rotorique quadratique de la MADA	79

Liste des tableaux

- Tableau III.1 : Méthode usuelles de l'inférence floue 70
- Tableau III.2 : Table des règles de décision pour le contrôleur des puissances 78

Liste des abréviations

- MADA: Machine asynchrone à double alimentation
- MAS : Machine asynchrone
- IGBT: Insulated gate bipolar transistor
- MLI: Modulation de largeur d'impulsions
- GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation.
- MCC : Machine à courant continue.
- PI : Proportionnel intégral
- FTBO : Fonction de Transfert en Boucle Ouverte.
- FTBF : Fonction de Transfert en Boucle Fermée.
- V : Vitesse du vent
- β : Angle d'orientation des pales
- R : Rayon de la pale
- Ω_{turbine} : Vitesse angulaire de la turbine
- C_g : Couple résistant (issu du multiplicateur)
- Ω_{mec} : Vitesse mécanique de la génératrice
- Ω_{ref} : Vitesse mécanique de référence
- G : Gain du multiplicateur
- P_{eol} : Puissance de l'éolienne
- ρ : Masse volumique de l'air en température ambiante
- S : Surface circulaire balayée par la turbine
- λ : Ratio de vitesse
- J_{tur} : Inertie de la turbine
- C_{mec} : Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne
- C_{em} : Couple électromagnétique
- P_{ele} : Puissance électrique générée par l'éolienne
- j: Inertie totale sur l'arbre
- MPPT: Maximum Power Point tracking
- P_{mec} : Puissance mécanique fournie par l'arbre
- Ω_{tur} : Vitesse angulaire de la turbine

- C_p : Coefficient de puissance de la turbine
- P_s : Puissance active statorique
- θ : Angle entre le repère statorique et le repère rotorique
- g : Glissement du rotor par rapport au stator de la machine
- ω_s : Pulsation des grandeurs électriques statoriques
- ω_r : Pulsation des grandeurs électriques rotoriques
- p : Nombre de paires de pôles
- P_{ref} : Puissance active de référence
- Q_{ref} : Puissance réactive de référence
- J : Moment d'inertie du volant
- σ : Coefficient de dispersion

Introduction Générale

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable qui connaît un développement rapide dans le domaine de la production d'électricité. Les éoliennes, qui transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en électricité, jouent un rôle essentiel dans ce processus. Pour maximiser leur rendement et optimiser leur fonctionnement, différentes stratégies de commande sont utilisées.

Le premier chapitre de ce travail présente une classification des différents types d'éoliennes en fonction de leur configuration, de leur orientation des pales (horizontale ou verticale) . Chaque type d'éolienne présente des avantages et des inconvénients spécifiques, en fonction des conditions de vent, de l'espace disponible et des contraintes technologiques.

Le deuxième chapitre se concentre sur la technologie des éoliennes à axe horizontal avec un focus particulier sur les éoliennes à double alimentation (MADA - Multi Alimentation Double Alimentation). Cette technologie permet de maximiser le rendement énergétique en utilisant deux sources d'alimentation : l'énergie éolienne et une source d'alimentation électrique auxiliaire. Le régulateur PI (proportionnel-intégral) est largement utilisé pour la commande de ces éoliennes, permettant de maintenir une vitesse de rotation optimale et de réguler la puissance électrique générée.

Le troisième chapitre nous étudions l'utilisation du mode glissement comme méthode de contrôle vectoriel pour les éoliennes. Nous analyserons les performances du système en utilisant le mode glissant et évaluerons son efficacité pour améliorer la réponse du système et traiter les perturbations externes. Ensuite, nous appliquerons la logique floue comme alternative à la situation de glissement, où la logique floue est basée sur des règles floues qui prennent en compte les changements de variables systémiques et les différentes conditions de fonctionnement. Nous évaluerons les performances du système après application de la logique floue et les comparerons à celles du mode glissant, afin de déterminer lequel d'entre eux offre les meilleures performances pour améliorer l'efficacité des vecteurs éoliens. Cette approche progressive vise à améliorer le système de contrôle et à augmenter la puissance des porteurs d'éoliennes de manière efficace et adaptative aux changements de l'environnement et des conditions d'exploitation.

Chapitre I
Généralités sur
L'énergie éolienne

I.1 Introduction

L'une des énergies renouvelables est l'énergie éolienne, qui repose sur la puissance du vent pour produire de l'énergie. Les éoliennes, composées de grandes pales, L'énergie électrique est générée par l'énergie mécanique générée en captant l'énergie cinétique du vent. C'est une alternative propre et durable aux sources d'énergie fossile, car elle ne produit pas de gaz à effet de serre ni de pollution atmosphérique significative. Les parcs éoliens, situés dans des zones ventées, regroupent plusieurs éoliennes pour maximiser la production d'électricité. L'énergie éolienne est une ressource permanente et contribue à réduire la dépendance aux combustibles fossiles. Malgré certains défis, tels que la variation de la production en fonction des conditions météorologiques, l'énergie éolienne continue de croître en popularité en tant que solution énergétique durable. Elle joue un rôle essentiel dans la transition vers une économie plus verte [1].

Pour cela nous énoncerons en première partie une généralité sur l'énergie éolienne, la technologie des aérogénérateurs de grande puissance, ensuite nous intéressons plus particulièrement aux éoliennes à vitesse variable.

I.2 À propos de l'énergie éolienne

En 2021, le secteur éolien a enregistré une croissance notable malgré des obstacles. Selon le Conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC), 93,6 GW de nouvelles capacités éoliennes ont été mises en service, marquant la deuxième meilleure performance de l'histoire après 2020. Cela a porté la capacité éolienne mondiale installée à 837 GW à la fin de l'année, soit une augmentation de 12% par rapport à 2020.

Les nouvelles installations étaient principalement terrestres, avec l'ajout de 72,5 GW, bien que cela représente une baisse de 18% par rapport à l'année précédente. Cette diminution est principalement due à un ralentissement en Chine et aux États-Unis, deux des principaux marchés du secteur. En Chine, la fin des tarifs d'achat garantis en 2021 a entraîné une chute de 39% des installations par rapport à l'année précédente.

En revanche, l'éolien offshore a connu une année remarquable, avec 21,1 GW de nouvelles installations, près de trois fois plus que l'année précédente. À la fin de 2021, la capacité éolienne offshore cumulée dans le monde atteignait 57 GW, témoignant d'un intérêt croissant pour cette technologie.

Malgré les défis rencontrés sur certains marchés, la croissance continue du secteur éolien souligne son importance croissante dans le mix énergétique mondial et son rôle essentiel dans la transition vers une économie plus durable et à faible émission de carbone [2].

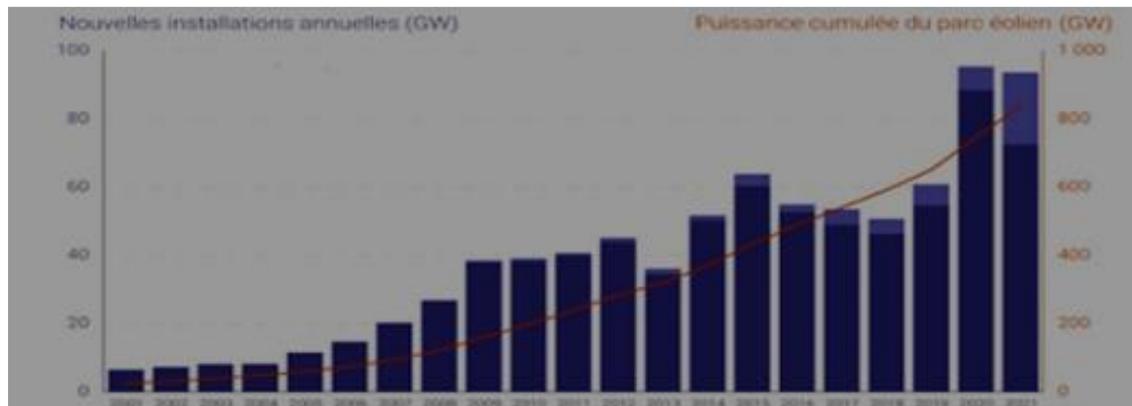


Figure I.1 : Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde [2].

I.3 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable qui est obtenue en convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, en utilisant ce qu'on appelle des éoliennes. Les éoliennes sont constituées d'un ensemble de pales qui tournent lorsque le vent souffle. Lorsque les pales tournent, elles entraînent un générateur qui génère de l'électricité. Le vent est une source d'énergie naturelle riche et renouvelable. Le vent est créé à la suite des changements de densité et de pression de l'air causés par le réchauffement inégal de la Terre par le Soleil et la rotation de la Terre. Le vent contient une grande quantité d'énergie. Les moulins à vent sont utilisés depuis des milliers d'années pour exploiter une partie de cette énergie pour divers travaux utiles. Les éoliennes, également appelées éoliennes, visent à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Les composants des éoliennes sont spécialement conçus pour maximiser la conversion d'énergie et, en général, il doit y avoir un bon ajustement entre les caractéristiques de couple et la vitesse de la turbine et du générateur. Cela comprend une bonne adéquation entre la puissance générée par le vent et la vitesse de rotation des turbines et leur capacité à produire de l'électricité. Idéalement, les éoliennes devraient inclure une combinaison de composants importants [4].

Les éoliennes les plus courantes sont appelées éoliennes, Son rôle est de produire de l'électricité grâce à l'énergie cinétique. Conçue avec différents composants pour une efficacité maximale, l'adéquation entre le couple et la vitesse de la turbine et de l'alternateur est importante pour maximiser la puissance. Pour atteindre cet objectif, une éolienne doit disposer d'un système de commande mécanique et d'un système de commande électrique.

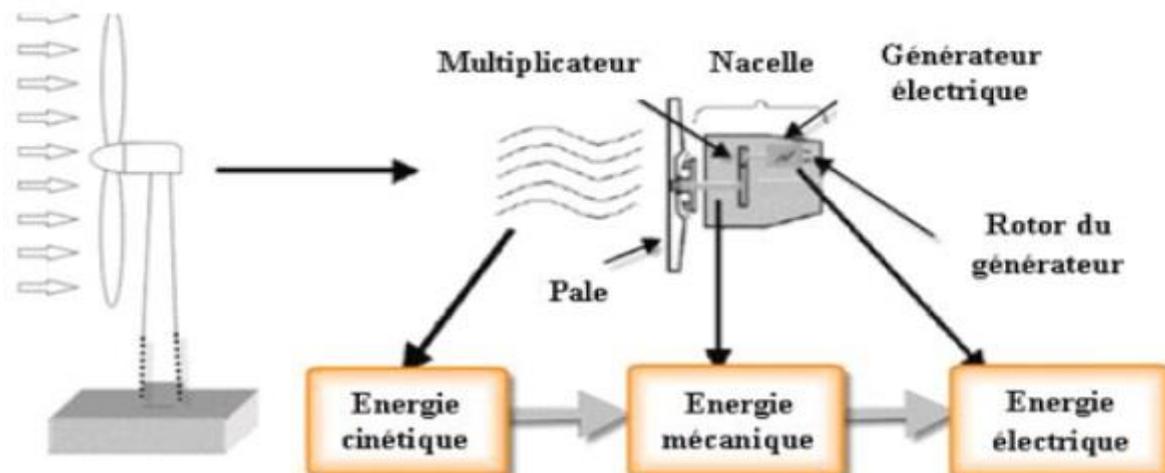


Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [5].

I.4 Aperçu Sur Aéro-générateur

I.4.1 Aéro-générateurs

Une éolienne est un dispositif qui capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en énergie mécanique disponible. Cette énergie est amplifiée par un système d'engrenages, qui à son tour est transmis à un arbre rotatif relié à un générateur qui se charge de la convertir en énergie électrique [4].

Les éoliennes sont classées selon leur puissance nominale en trois catégories [6] :

- Eoliennes de petites puissances : $P < 40 \text{ kW}$.
- Eoliennes de moyennes puissances : $40 \text{ kW} < P < 1 \text{ MW}$.
- Eoliennes de fortes puissances : $P > 1 \text{ MW}$.

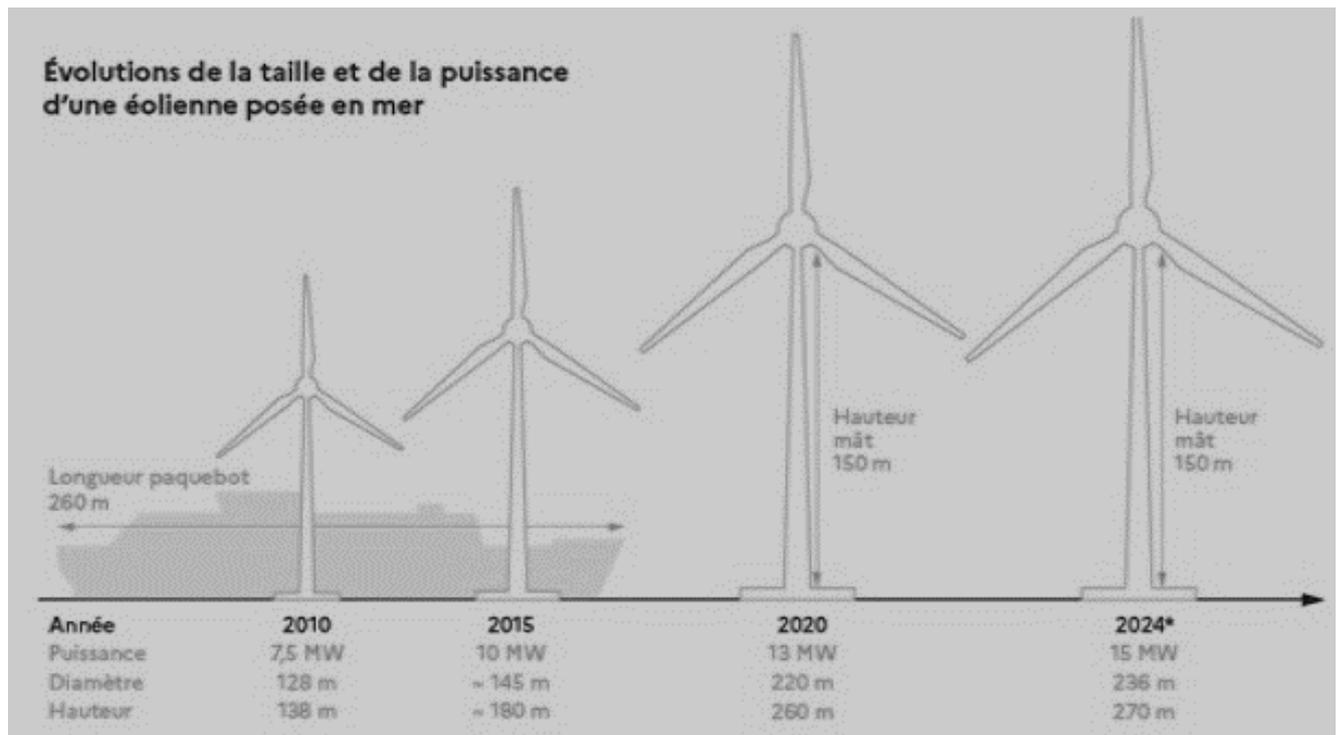


Figure I.3 : Correspondance taille et puissance des éoliennes [7].

I.4.2 Différents types D'Éoliennes

Il existe deux types :

- Éoliennes à axe horizontal (HAWT).
- Éoliennes à axe vertical (VAWT)

I.4.2.1 Éoliennes à axe vertical

C'est le premier type d'éolienne qui a été utilisé pour convertir l'énergie éolienne. Le rotor est installé perpendiculairement au sol. Il est situé sur l'arbre du système et la poussée axiale du vent est la base de son travail. Il se compose de plusieurs pales aux caractéristiques dynamiques. Le nombre de pales varie de 1 à 3pales Les plus utilisées sont les 3 pales car c'est un compromis entre facteur de puissance, coût et vitesse de rotation Capteur de vent Il est moins sensible aux contraintes mécaniques [8].

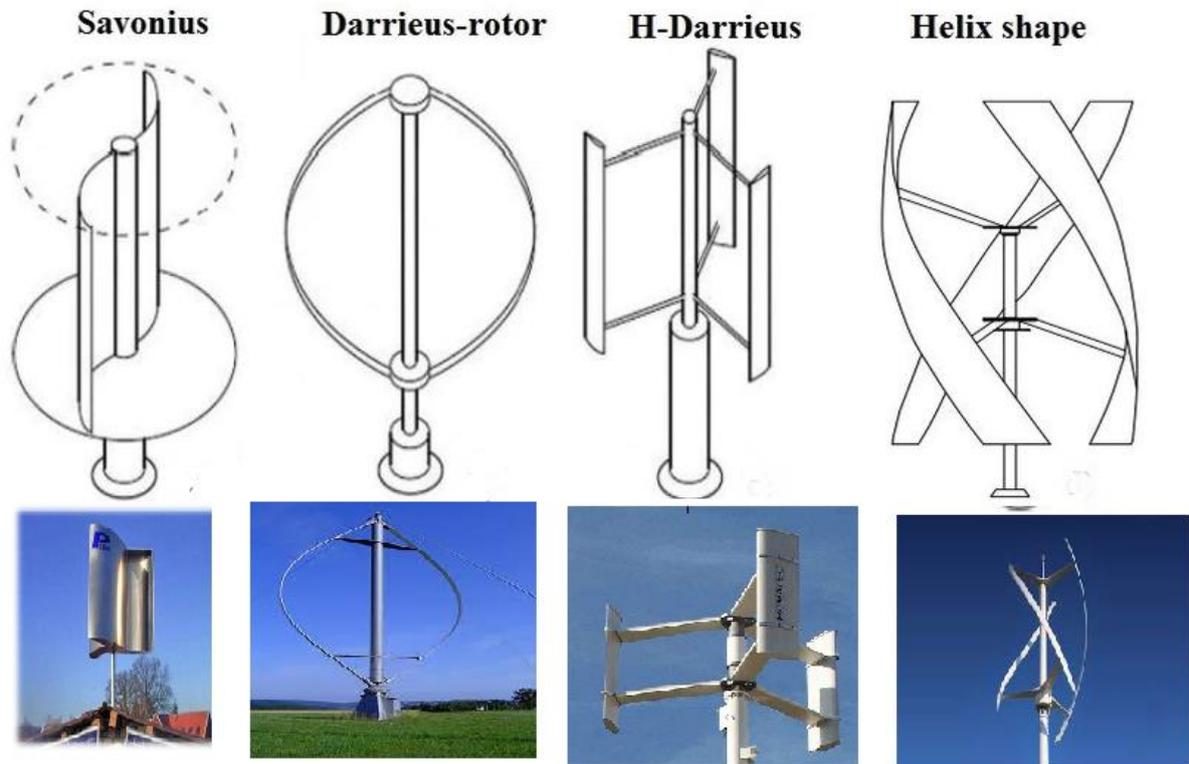


Figure I.4 : éoliennes à axe vertical.

I.4.2.1.a les Avantages de la structure à axe vertical

Résistance accrue : L'axe vertical peut résister efficacement aux forces verticales et aux charges concentrées. Elle est particulièrement adaptée aux bâtiments à plusieurs étages, aux ponts et aux structures de grande hauteur, où la résistance aux charges verticales est primordiale.

- **Stabilité améliorée** : En raison de sa conception verticale, cette structure offre une stabilité accrue par rapport aux structures horizontales. Elle est moins susceptible d'être affectée par des forces horizontales telles que les vents latéraux ou les séismes.
- **Flexibilité architecturale** : La structure à axe vertical offre une grande flexibilité en termes de conception architecturale. Elle permet la création de formes variées et originales, car elle ne nécessite pas de murs porteurs traditionnels. Cela permet aux architectes d'explorer des concepts novateurs et de réaliser des bâtiments uniques.

- Utilisation efficace de l'espace : La structure à axe vertical permet une utilisation plus efficace de l'espace intérieur, car elle ne nécessite pas de poteaux ou de murs porteurs supplémentaires. Cela permet de créer des espaces ouverts et polyvalents, favorisant la circulation et l'adaptabilité des lieux.
- Construction simplifiée : La construction d'une structure à axe vertical est généralement plus simple et plus rapide que celle d'autres types de structures. La conception et la mise en œuvre de ce type de structure sont souvent plus efficaces, ce qui peut entraîner des économies de coûts et de temps de construction.
- Maintenance réduite : En raison de sa conception robuste, la structure à axe vertical nécessite généralement moins d'entretien et de réparations que d'autres structures. Cela peut contribuer à des économies à long terme en termes de coûts d'entretien et de durabilité de la structure.

I.4.2.1.b les Inconvénients de la structure à axe vertical

- moins efficace
- Moins puissant, car il ralentit dans le relief, et cela est dû à sa conception verticale, car il fonctionne avec des vents proches du sol.
- Il nécessite plus d'espace.

I.4.2.2 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont des dispositifs utilisés pour convertir l'énergie éolienne en électricité. Le rotor est monté horizontalement et les pales tournent perpendiculairement à la direction du vent. Ils offrent un rendement énergétique élevé, une efficacité éolienne variable et peuvent être installés sur une large plage, ils sont moins sujets à la fatigue [8].



Figure I.5 : Éoliennes à axes horizontales.

I.4.2.2.a les Avantages de la structure à axe horizontales :

- **Résistance aux charges horizontales :** La structure à axe horizontal est conçue pour résister efficacement aux forces horizontales telles que les vents, les séismes et les charges latérales. Elle offre une stabilité supérieure dans des conditions où les forces horizontales sont prédominantes.
- **Flexibilité de l'aménagement intérieur :** Grâce à l'absence de piliers centraux ou d'éléments porteurs verticaux, la structure à axe horizontal offre une grande flexibilité pour l'aménagement intérieur. Les espaces peuvent être aménagés de manière libre et modulable, permettant des configurations personnalisées en fonction des besoins spécifiques.
- **Adaptabilité aux changements futurs :** La structure à axe horizontal permet des extensions et des modifications relativement plus faciles à réaliser par rapport à d'autres types de structures. Les éléments horizontaux tels que les poutres et les cadres offrent une souplesse de conception qui facilite les ajouts ou les réaménagements ultérieurs.
- **Large portée sans obstructions :** La conception horizontale de la structure permet de créer des espaces ouverts et de grande envergure sans obstructions visuelles majeures. Cela permet une meilleure circulation, une plus grande luminosité naturelle et une impression d'espace plus vaste.
- **Facilité de construction :** La construction d'une structure à axe horizontal est souvent plus simple et plus rapide que celle d'autres types de structures. Les éléments

horizontaux peuvent être préfabriqués et assemblés sur place avec une efficacité de construction accrue.

- Maintenance et réparations simplifiées : En raison de la simplicité de conception et de la facilité d'accès aux éléments horizontaux, la maintenance et les réparations de la structure à axe horizontal sont généralement plus simples à effectuer. Cela peut réduire les coûts et le temps d'arrêt associés à l'entretien régulier ou aux travaux de réparation.

I.4.2.2.b les Inconvénients de la structure à axe horizontal

- Nuisances sonores
- La difficulté d'intervention pour la maintenance des appareils qui se trouvent au sommet de la tour.
- La nécessité d'un système d'orientation des pales.

I.5 Principaux composants d'une éolienne

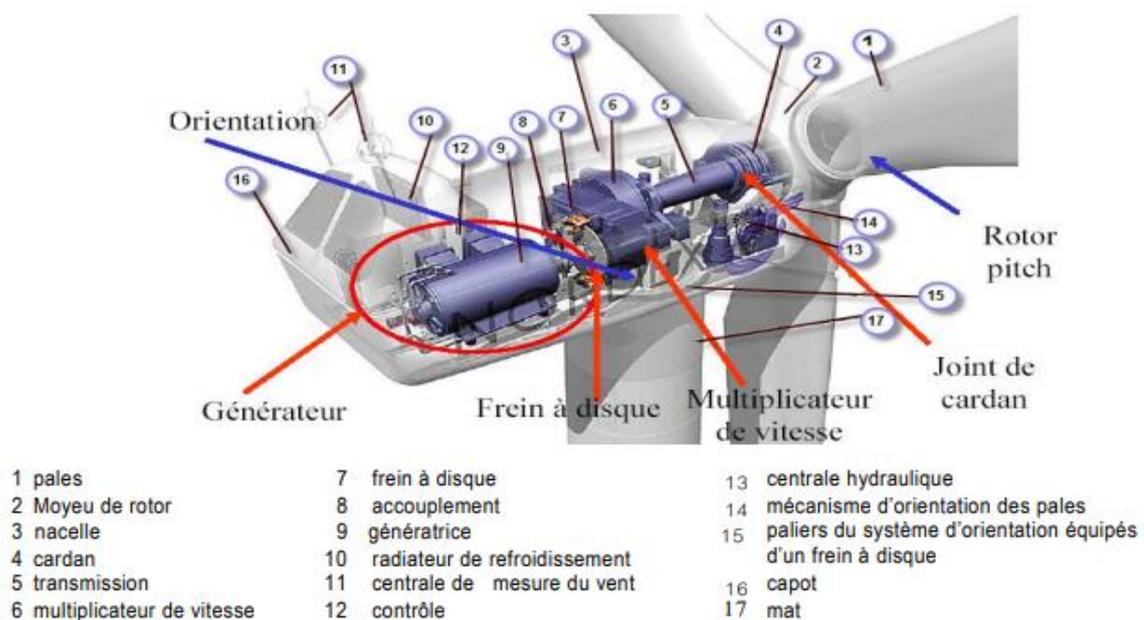


Figure I.6 : Composants d'une éolienne NORDEX S77/1500KW [9].

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux :

Le mât : Il s'agit de la structure verticale qui supporte l'éolienne. Le mât est généralement en acier ou en béton et sa hauteur varie en fonction de la taille de l'éolienne. Ils sont conçus pour offrir une stabilité et une résistance suffisantes pour soutenir les composants.

Les pales : Les pales sont les éléments aérodynamiques de l'éolienne. Elles sont fixées à un moyeu central et leur forme est conçue pour capter l'énergie du vent. Les pales sont généralement en fibre de verre renforcée ou en matériaux composites pour allier légèreté et résistance.

La nacelle : La nacelle abrite les composants essentiels de l'éolienne, y compris le générateur, l'axe principal, le système de contrôle et les équipements électriques. Elle est généralement placée au sommet du mât et est conçue pour permettre une rotation afin de faire face à la direction du vent. La nacelle est également équipée d'un mécanisme d'orientation pour maximiser la capture de l'énergie éolienne.

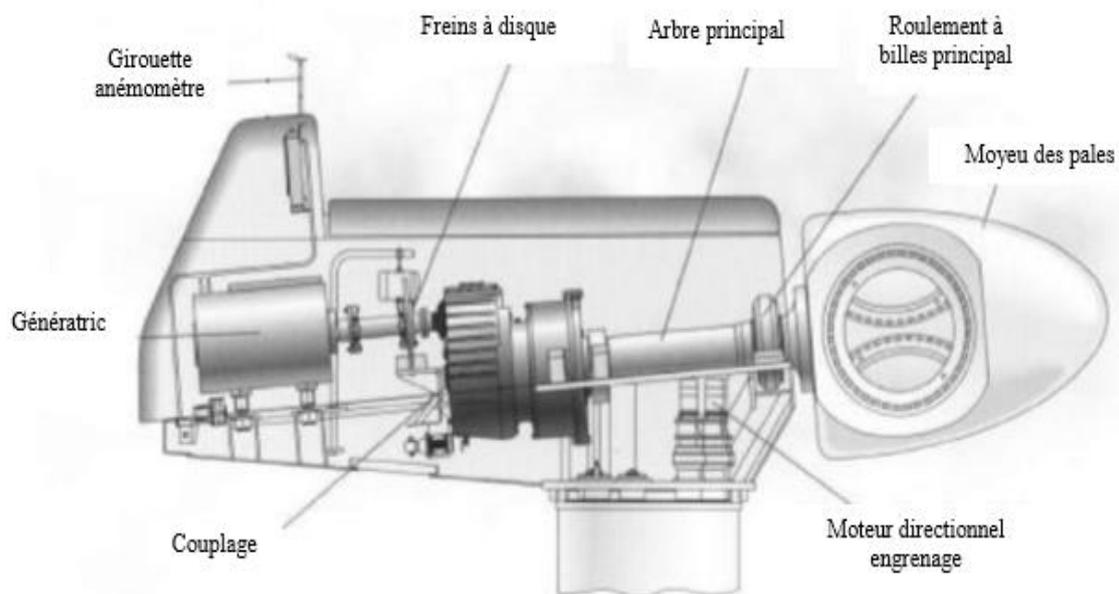


Figure I.7 :Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne[10].

La nacelle se compose des éléments suivants

- **Le générateur** : C'est un transducteur électromécanique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Le générateur utilisé dans cette étude est le MADA.
- **Le multiplicateur de vitesse** : est chargé d'adapter la vitesse de la turbine à la vitesse du générateur.
- **Le système de refroidissement** : est chargé de refroidir la boîte de vitesses et se compose d'un ventilateur électrique pour refroidir le générateur et l'huile (radiateurs).
- **Le système de commande** : sert à contrôler en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne. En cas de dysfonctionnement, il intervient automatiquement pour l'arrêt.

- **L'arbre** : Il assure le raccordement du multiplicateur et le freinage aérodynamique de la turbine au moyen d'un système hydraulique.
- **Le dispositif d'orientation de la nacelle** : C'est celui qui garantit et permet la rotation de la nacelle autour de l'extrémité supérieure de la tour au moyen de moteurs électriques via une couronne dentée.
- **Le dispositif d'orientation de la nacelle** : La présence de moteurs électriques permet à la nacelle de tourner autour de son extrémité supérieure de la tour au moyen d'un engrenage annulaire.
- **Le système d'orientation des pâles** : est celui qui permet de contrôler l'énergie cinétique captée par les éoliennes.

I.6 Chaîne de conversion de l'énergie éolienne

base à savoir :

- Une turbine est la partie chargée de convertir l'énergie éolienne en énergie mécanique.
- Une transmission mécanique.
- Une génératrice.
- Un système de liaison électrique.

Système de distribution d'électricité basé sur l'utilisation d'éoliennes, il existe deux principaux groupes d'éoliennes :

- Les éoliennes raccordées au réseau.
- Les éoliennes autonomes.

I.6.1 Principe de conversion de l'énergie éolienne

Capter l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie mécanique, tel est le principe de la conversion de l'énergie éolienne. où électrique. Les éoliennes sont conçues pour capter le vent et faire tourner leurs pales grâce à la force de poussée du vent. Le mouvement des pales est ensuite transmis à un arbre principal, qui convertit le mouvement de rotation en énergie mécanique. Cette énergie peut être utilisée pour alimenter un générateur électrique. Le générateur convertit alors l'énergie mécanique en énergie électrique, qui peut être utilisée directement ou stockée pour une utilisation ultérieure. Ce processus permet de produire de l'électricité propre et renouvelable à partir du vent.

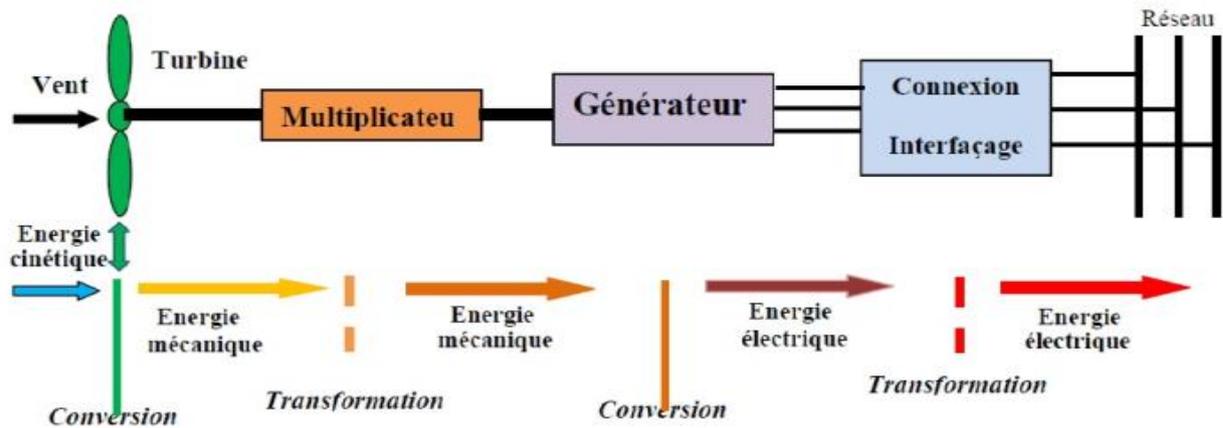


Figure I.8 : principe de la conversion de l'énergie éolienne [11].

I.6.2 Modélisation du vent

La ressource éolienne, en termes de distribution constante, est au cœur du modèle éolien et donc essentielle pour le calcul de la production et de la rentabilité de l'électricité, dans des conditions optimales, est le cube de la vitesse du vent. Vecteur tridimensionnel de la vitesse du vent. Cependant, la direction du vecteur vitesse du vent considéré dans ce modèle est limitée à une dimension [12].

La fonction numérique suivante représente la vitesse du vent en fonction du temps :

$$V = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(w_k t) \quad (\text{I.1})$$

Avec

A: Valeur moyenne de la vitesse du vent

a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre n

w_k : Pulsation de l'harmonique de l'ordre n

i : le Rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent .

La vitesse du vent a été modélisée en utilisant plusieurs combinaisons voire la figure (I.9).

$$V(t) = 6.5 + (0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t)) \quad (\text{I.2})$$

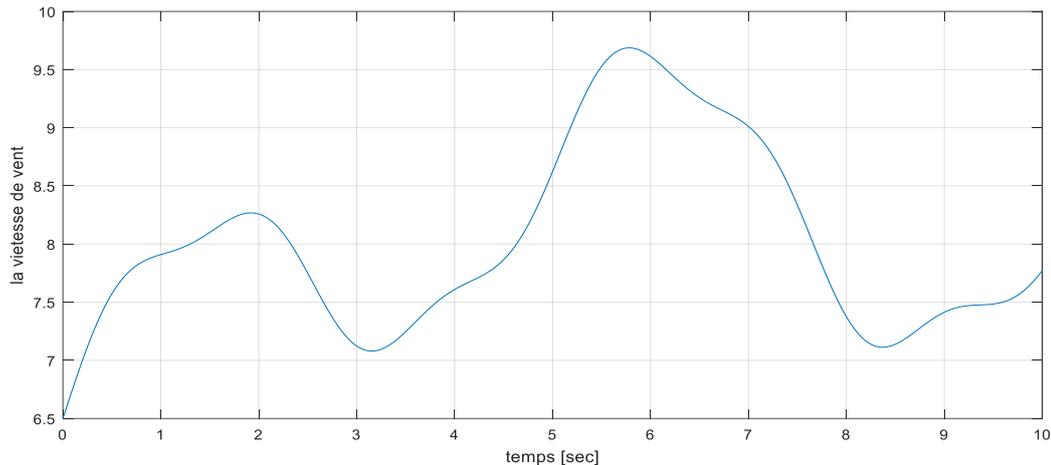


Figure I.9 : Evolution du vent.

I.6.3 La puissance extraite du vent

La puissance extraite du vent dépend de plusieurs facteurs, notamment de la vitesse du vent, de la densité de l'air et de la surface balayée par les pales de l'éolienne. La formule générale pour calculer la puissance extraite est :

$$P_{v=\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{I.3})$$

Avec

ρ : la masse volumique d'air (Kg/m^3).

V : la vitesse du vent (m/s).

S : Exprime la surface utile traversée par le vent.

$$S = 2R \cdot H \quad (\text{I.4})$$

R : le Rayon de la voile (m).

H : hauteur de la voile (m).

I.6.4 Loi de Betz

La loi de Betz stipule qu'une éolienne ne peut pas convertir plus de $16/27$ (ou 59 %) de l'énergie cinétique contenue dans le vent en énergie mécanique. Cette loi a été formulée pour la première fois par le scientifique allemand Albert Betz en 1929[13].

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (I.10) sur lequel on a représenté la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur V_1 et V_2 en aval.

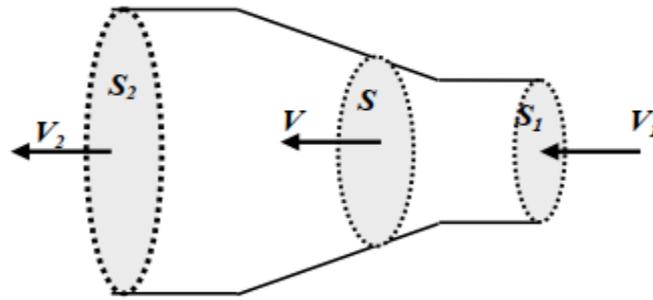


Figure I.10 : Tube de courant autour d'une éolienne.

Nous exprimons la masse d'air en mouvement par la densité ρ traversant la surface S des pales par seconde :

$$m = \frac{\rho * S * (v_1 + v_2)}{2} \quad (I.5)$$

La variabilité de l'énergie éolienne est à la base de la puissance extraite des éoliennes, selon le théorème de Betz :

$$P_m = \frac{m * (v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (I.6)$$

En remplaçant m par son équivalent, on trouve:

$$P_m = \frac{\rho * S * (v_1 + v_2) * (v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (I.7)$$

La puissance correspondante P Betz après qu'un vent théoriquement non perturbé traverse cette même surface S sans réduction de vitesse V :

$$P_{betz} = \frac{1}{2} \rho S V^3 * C_p \quad (I.8)$$

Avec :

$C_{P_{Betz}}$: coefficient de puissance de Betz.

Par conséquent, même si l'extraction de puissance sans pertes est possible, seulement 59% de l'énergie éolienne pourrait être utilisée par une éolienne [13].

I.6.5 Coefficient de vitesse spécifique

Le coefficient de vitesse spécifique λ est un facteur utilisé dans l'analyse des éoliennes et est défini comme le rapport de la vitesse tangentielle en bout de pales $R_v \Omega$ à la vitesse du vent instantanée (V).

Le coefficient de vitesse spécifique λ est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_v}{v} \quad (1.9)$$

Où

R_v : représente la distance entre le centre de l'éolienne et le bout des pales (rayon de l'éolienne (m)).

Ω_t : la vitesse angulaire des pales de l'éolienne (exprimée en rad/s).

V : la vitesse instantanée du vent à l'emplacement de l'éolienne.

I.6.6 Coefficient de puissance

Le rapport entre la puissance totale théoriquement disponible et la puissance extraite du vent est appelé facteur de puissance.

$$C_P = \frac{P_{\text{éol}}}{P_v} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) \quad (I.10)$$

La turbine la plus utilisée est la turbine tripale, car elle permet d'équilibrer le coût de l'aérogénérateur avec les vibrations causées par la rotation et d'assurer le facteur de puissance élevé qui décroît lentement avec l'augmentation de la vitesse du vent. Ces éoliennes sont généralement conçues pour fonctionner à des vitesses de vent supérieures à 3 m/s,

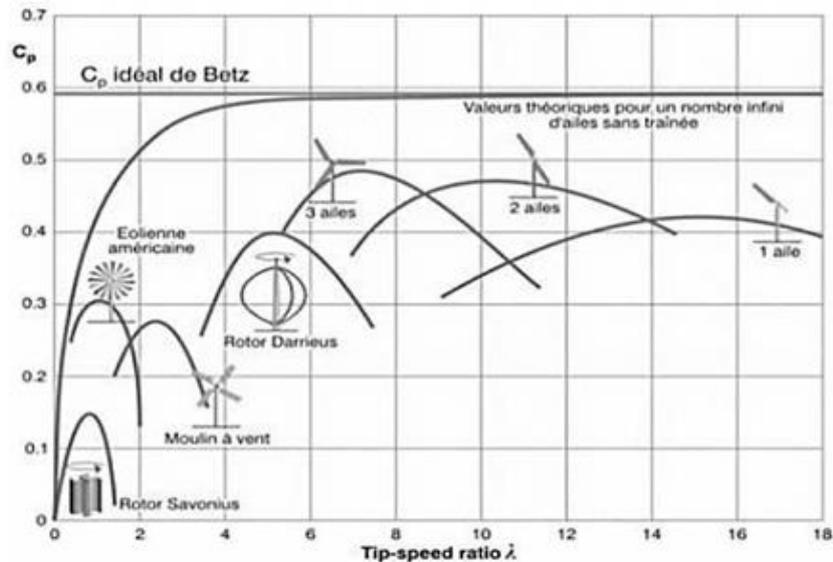


Figure I.11 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [4].

La figure I.11 montre que les valeurs maximales de C_p se produisent pour des valeurs de λ plus élevées dans le cas des éoliennes à axe horizontal. Ainsi, pour une vitesse de vent donnée, le rotor doit tourner à une vitesse relativement plus élevée pour obtenir les meilleures valeurs d'efficacité aérodynamique. Cette caractéristique permet d'utiliser l'éolienne avec un générateur, où le rapport de conversion de la boîte de vitesses peut être plus faible si nécessaire.

Ce que nous pouvons également reconnaître, c'est que le point optimal ($C_{p\ opt}, \lambda_{opt}$) Chaque éolienne a un point unique et précis, qui est exploité par certains systèmes de contrôle (tels que le contrôle de l'angle de décrochage et le contrôle du générateur) qui s'efforcent de suivre ce point aussi près que possible afin d'optimiser le fonctionnement et de maximiser la puissance produite et la puissance fournie.

I.6.7 Bilan des forces sur une pale

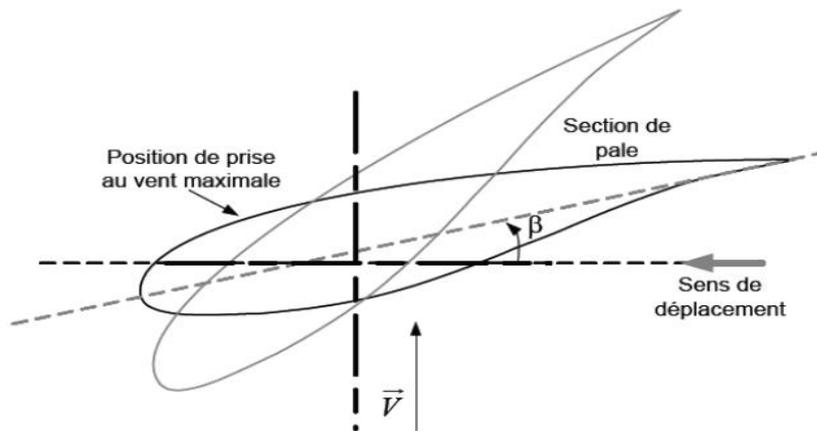


Figure. I.12 : Variation de l'angle de calage d'une pale [11].

Ce mécanisme de régulation utilise l'orientation des pales par rapport au vent pour maintenir une vitesse de rotation constante. Lorsque le vent varie, le système ajuste l'angle des pales afin de tirer le meilleur parti de la force du vent et de contrôler la production d'énergie, notamment lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale. Cette régulation en temps réel permet d'optimiser l'efficacité de l'éolienne en adaptant l'angle des pales pour maintenir une vitesse de rotation stable, ce qui se traduit par une production d'énergie cohérente et optimale.

I.7.1 Modèle de la turbine éolienne

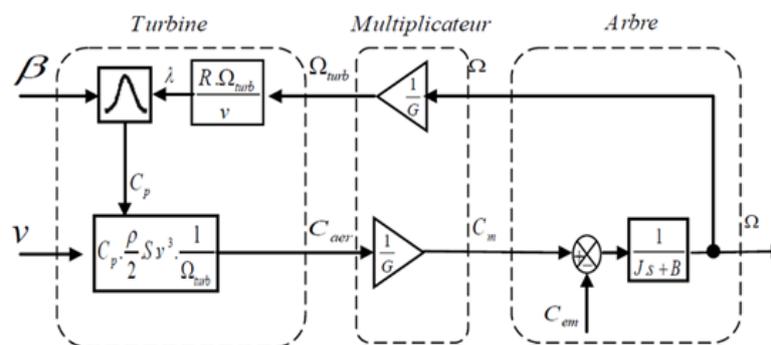


Figure I.13 : Les schéma bloc qui représente la turbine éolienne.

Le coefficient de puissance de la turbine utilisé dans notre étude est donné comme suit :

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(c_2 \frac{1}{\lambda} - c_3 \beta - c_4 \right) \exp\left(\frac{-c_5}{\lambda}\right) + c_6 \lambda \quad (I.11)$$

Avec

$$C_1=0.5176, \quad C_2=116,3=0.4, \quad C_4=5, \quad C_5=21, \quad C_6=0.0068[13].$$

Dans cette formule, le paramètre λi dépend également de λ et β .

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035^2}{1 + \beta^2}$$

La figure (I.14) illustre les courbes de $C_p(\lambda, \beta)$ pour plusieurs valeurs de β (deg) obtenues par la relation précédente :

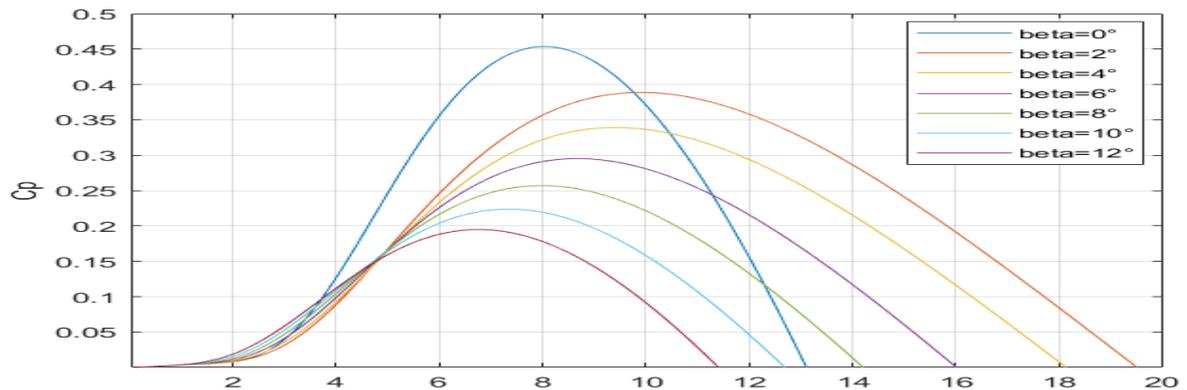


Figure I.14 : Coefficient de puissance de l'éolienne.

I.7.2 Modélisation de la turbine (partie mécanique)

La partie mécanique de la turbine est composée de trois pales orientables, chacune ayant une longueur R , Elles sont montées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation Ω_t , qui est connecté à un multiplicateur de gain G , Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique. Les trois pales sont considérées comme étant identiques. De plus, nous supposons une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales, assurant ainsi l'égalité de toutes les forces de poussée.

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la MADA (arbre rapide) (Figure I.15) [14].

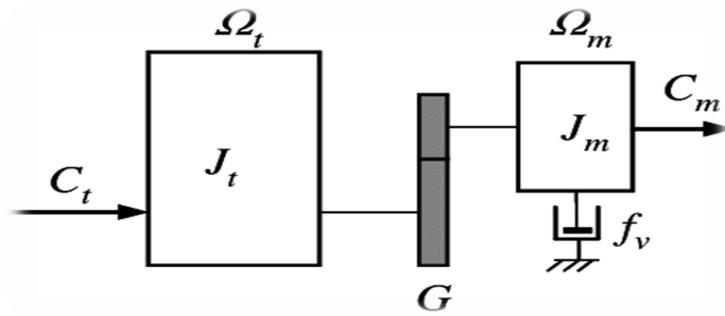


Figure I.15 : Modèle mécanique de la turbine [14].

Avec :

J_t : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne ;

J_m : Le moment d'inertie de la génératrice ;

f_v : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice ;

C_m : Le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice après multiplicateur ;

Ω_m : La vitesse de rotation de la génératrice ;

G : Le gain du multiplicateur de vitesse ;

I.7.3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur assure la connexion entre la turbine et le générateur. Il est considéré comme rigide et est représenté par un simple coefficient de transmission. Les effets de l'élasticité et du frottement dans le multiplicateur sont négligés. Les pertes d'énergie dans le multiplicateur sont considérées comme négligeables. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de transmission du multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur[15].

$$G = \frac{\Omega_g}{\Omega_t}$$

$$C_g = \frac{C_t}{G}$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_g}{G}$$

Avec

C : Couple de la turbine ;

C_g : Couple après multiplicateur ;

G : Le gain du multiplicateur ;

I.7.4 Modèle de l'arbre mécanique

La transmission mécanique peut être modélisée comme suit [15].

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_{méc} = C_g - C_{em} - C_f \quad (I.12)$$

La variation de la vitesse mécanique Ω_g est influencée par plusieurs facteurs. Tout d'abord, elle est déterminée par la somme du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice C_{em} . C_{em} est une combinaison du couple de la turbine, qui agit après le multiplicateur, du couple électromagnétique produit par la génératrice, et du couple de frottement visqueux C_f . C_{em} représente les pertes dues au frottement et est décrit plus en détail dans la référence [15].

$$C_f = f_v \Omega_g \quad (I.13)$$

I.8 Modes de fonctionnement de la turbine éolienne

Les systèmes d'éoliennes à vitesse variable offrent la possibilité d'exploiter au maximum la puissance disponible du vent, ce qui permet d'augmenter la quantité d'énergie captée. La configuration d'un système de conversion d'énergie éolienne et les stratégies de contrôle pour suivre les points de puissance maximale sont cruciaux pour atteindre une plus grande efficacité énergétique. Pour maximiser la capture d'énergie éolienne disponible, un contrôle de suivi du point de puissance maximale (MPPT) est nécessaire. Ce contrôle ajuste la vitesse de rotation de l'éolienne en fonction des variations de la vitesse du vent, assurant ainsi le maintien du rapport de vitesse en bout de pale à sa valeur optimale. Les générateurs à aimant permanent à entraînement direct sont capables de fonctionner dans une large plage de vitesses. Selon l'intensité du vent, les générateurs d'éoliennes doivent être contrôlés pour fonctionner dans quatre modes différents [8], comme illustré dans la figure (I.16) :

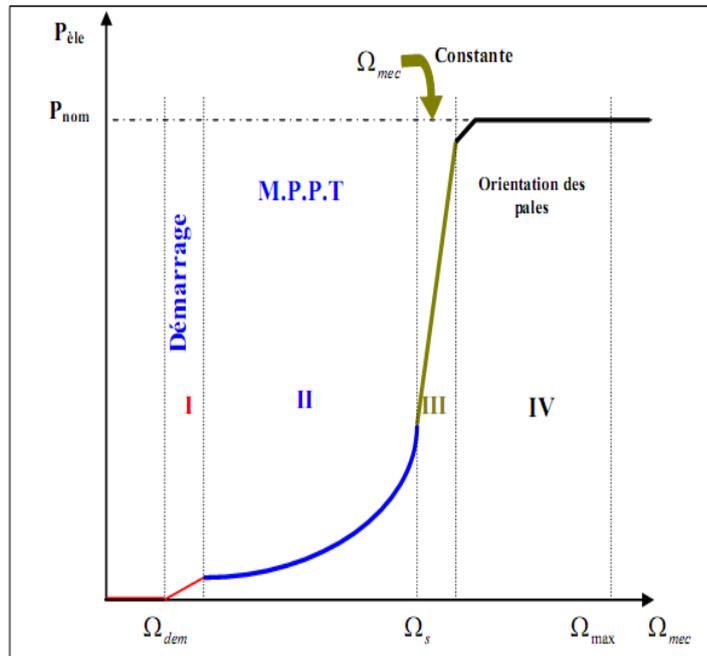


Figure I.16 : Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne [16].

- **Zone 1** : La vitesse du vent est très faible et les éoliennes ont besoin d'une certaine vitesse pour commencer à produire de l'électricité, la puissance générée par les éoliennes est presque inexistante. [8] [16][17].
- **Zone 2** : Le point de puissance maximale correspond à la vitesse du vent qui permet aux éoliennes de fonctionner avec une efficacité maximale. Lorsque la vitesse du vent augmente, la puissance générée par l'éolienne atteint son maximum. Dans cette zone, les éoliennes ajustent l'angle de leurs pales pour extraire le maximum d'énergie du vent et la convertir en électricité[16][17].
- **Zone 3** : la vitesse du vent est constante et la puissance du générateur atteint sa valeur maximale à 90% de la puissance nominale. P_{nom} .[16][17].
- **Zone 4** : Lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse de coupure, les freins sont activés pour arrêter l'éolienne et prévenir tout dommage structurel ou situation dangereuse[8].

I.8.1 Principe de la MPPT

La MPPT (Maximum Power Point Tracking) est d'optimiser la production d'énergie d'une éolienne en ajustant la vitesse de rotation de la turbine pour atteindre le point de puissance maximale. La MPPT est basée sur l'idée que chaque combinaison de vitesse du vent et de vitesse de rotation de la turbine correspond à un point de fonctionnement spécifique, avec une puissance générée associée.

L'équation donne la puissance correspondant à une vitesse de vent V . Si le rapport de vitesse λ est maintenu à sa valeur optimale λ_{opt} , le coefficient de puissance est à sa valeur maximal $Cp_{max}=cp(\lambda_{opt})$ ainsi que la puissance de l'éolienne [16][17].

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} Cp_{max} \rho \pi R^2 V^3 \tag{I.14}$$

Maximisation de puissance avec asservissement

Dans la structure présentée par la figure (I.17) ; la vitesse de rotation de référence est définie comme consigne à appliquer au régulateur du couple électromagnétique, pour traquer en permanence et efficacement la puissance maximale.

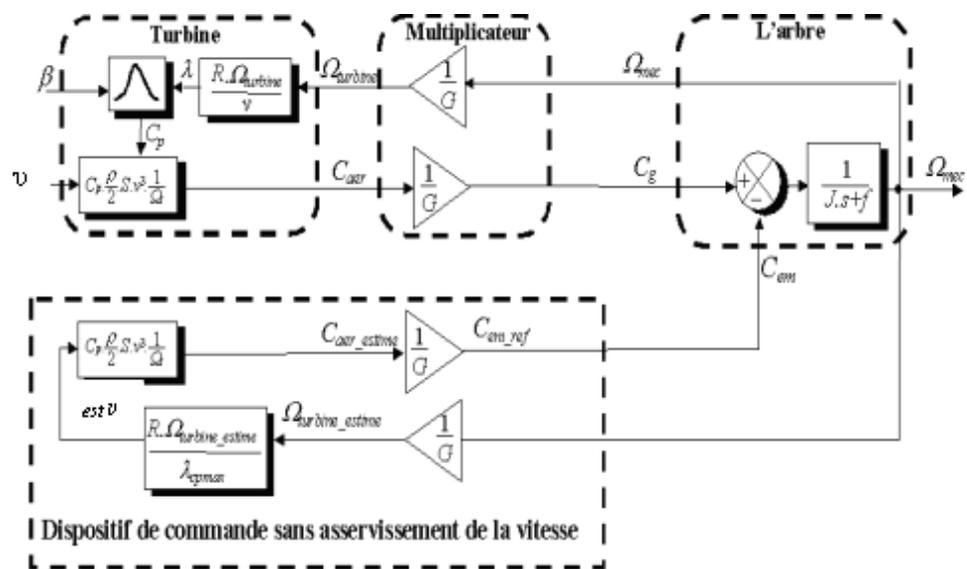


Figure I.17 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse [16].

I.8.2 Algorithme de suivi de la puissance maximale

La figure (I.18) illustre la puissance de sortie d'une éolienne par rapport à la vitesse du rotor tandis que la vitesse du vent est passé de V_2 à V_3 tel que $V_3 > V_2 > V_1$ [16].

Comme on peut le voir sur la figure (I.18), si la vitesse du vent est v_1 , la puissance maximale que pourrait être capturée correspond à la vitesse du rotor Ω_1 le point de fonctionnement du système est le point A.

Si la vitesse du vent change à v_2 gardant la même vitesse de rotation Ω_1 , le point de fonctionnement du système est le point B qui ne correspond pas à la puissance maximale.

Alors la vitesse de rotation doit être augmenté, passant de Ω_1 à Ω_2 qui aboutit au point de fonctionnement C.

La puissance disponible fournie par la turbine dépend et varie selon la vitesse du vent. La puissance de sortie de l'éolienne ne peut pas dépasser la puissance de vent disponible, mais elle peut être réduite par l'angle de calage des pales.

Les pertes associées peuvent être évitées par l'utilisation de point de puissance maximale (MPPT), qui assure toujours un transfert d'énergie au maximum des éoliennes au réseau [16].

La méthode de "Perturbation et d'observation" est une stratégie d'extraction de puissance plus souple car elle peut être appliquée aux différents systèmes de conversion éolienne et de plus elle est plus facile à mettre en œuvre. Cette technique comprend plusieurs étapes, qui sont :

1. Choisir la vitesse de référence initiale du rotor et mesurer la puissance de sortie du générateur éolien qui correspond.
2. Augmenter ou diminuer la vitesse du rotor d'un pas de référence et mesurer les puissances de sortie de nouveau.
3. Calculer les écarts de puissance et de vitesse et les grandeurs $Sign(\Delta P)$ et $Sign(\Delta \Omega)$.
4. Calculer la vitesse de rotation de référence comme suit :

$$\Omega_{ref}(n) = \Omega_{ref}(n-1) \cdot Sign(\Delta P) \cdot Sign(\Delta \Omega) \cdot \Omega_{step} .$$

5. Répéter les trois étapes jusqu'au point de fonctionnement optimal.

La figure (I.18) est utilisée pour rendre cet algorithme plus clair. Supposons que la vitesse du vent est v_1 et le point de fonctionnement de l'éolienne est le point A, représentée par (Ω_A, P_A) dans la courbe caractéristique $P=f(\Omega)$. Aussi, nous supposons que la vitesse de la turbine est augmentée par Ω_{step} , qui donne le point Ω_B la nouvelle vitesse. Le nouveau point de fonctionnement sera (Ω_B, P_B) Ce qui donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P = P_B - P_A > 0 \Rightarrow sign(\Delta P) = 1 \\ \Delta \Omega = \Omega_B - \Omega_A > 0 \Rightarrow sign(\Delta \Omega) = 1 \end{array} \right\} \Rightarrow \Omega_{ref} = \Omega_B + \Omega_{step} \quad (I.15)$$

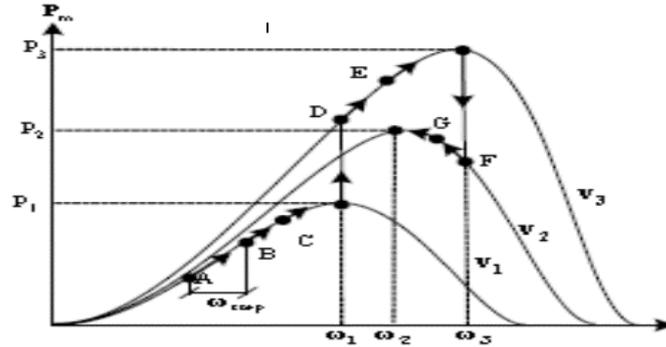


Figure I.18 : Ajustement du point de fonctionnement la turbine pour le suivi de puissance maximale[16].

Après la première itération, le point de fonctionnement devient (Ω_C, P_C) . L'itératif se poursuivra jusqu'à ce que le point de fonctionnement du système se trouve au (Ω_1, P_1) , correspondant à la puissance maximale pour la vitesse du vent de V_1 . Si la vitesse du vent varie à V_3 , le point sera recherché à partir de (Ω_D, P_D) qui entraîne à :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P = P_D - P_1 > 0 \Rightarrow \text{sign}(\Delta P) = 1 \\ \Delta \Omega = \Omega_D - \Omega_1 = 0 \Rightarrow \text{sign}(\Delta \Omega) = 1 \end{array} \right\} \Rightarrow \Omega_{ref} = \Omega_1 + \Omega_{step} \quad (I.16)$$

Le prochain point sera (Ω_E, P_E) et de même ce processus se poursuivra de la même manière comme il est expliqué, jusqu'à ce que le point de fonctionnement définitif soit trouvé à (Ω_3, P_3) , correspondant à la puissance maximale capturée pour la vitesse du vent V_3 . Maintenant, si la vitesse du vent varie à V_2 , le point de fonctionnement se déplacera à (Ω_F, P_F) , qui se traduit par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P = P_F - P_3 < 0 \Rightarrow \text{sign}(\Delta P) = -1 \\ \Delta \Omega = \Omega_F - \Omega_3 = 0 \Rightarrow \text{sign}(\Delta \Omega) = 1 \end{array} \right\} \Rightarrow \Omega_{ref} = \Omega_3 - \Omega_{step} \quad (I.17)$$

Dans ce cas, la vitesse de la turbine devrait diminuer et le point d'exploitation devrait s'établir (Ω_G, P_G) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P = P_G - P_F > 0 \Rightarrow \text{sign}(\Delta P) = 1 \\ \Delta \Omega = \Omega_G - \Omega_F < 0 \Rightarrow \text{sign}(\Delta \Omega) = -1 \end{array} \right\} \Rightarrow \Omega_{ref} = \Omega_3 - \Omega_{step} \quad (I.18)$$

Le principe de l'algorithme P&O peut être résumé par l'organigramme démontré à la figure (I.19).

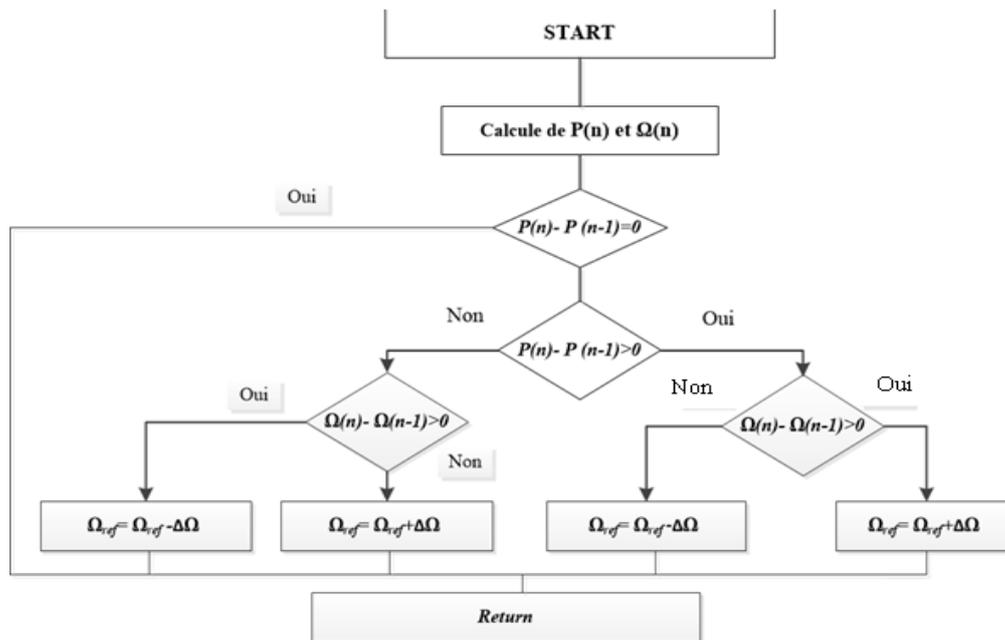


Figure I.19 : Organigramme représentant l'algorithme de la MPPT appliqué (P&O)[16].

Dans ce cas, la vitesse de référence diminue et décale le point de fonctionnement vers

(Ω_G, P_G) . Ce processus se poursuivra jusqu'à ce qu'au point (Ω_2, P_2) , c'est le point souhaité le vent de vitesse V_2 .

I.9 Conclusion

Ce chapitre présente un état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne, en mettant en évidence les différentes structures existantes, notamment les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous avons également abordé la théorie de BETZ, qui décrit l'évolution théorique des performances des systèmes éoliens et définit un coefficient de performance maximum de 0,59, qui demeure inatteignable pour les éoliennes industrielles actuelles.

Enfin, nous avons également discuté les conditions de fonctionnement des éoliennes, en tenant compte de différents facteurs tels que la vitesse du vent, la puissance générée et les mécanismes de régulation pour assurer un fonctionnement sûr et efficace.

Chapitre II

Modélisation de la

MADA

*(Modélisation de la Machine
Asynchrone à Double alimentation)*

II.1 Introduction

La machine asynchrone à double alimentation est une variante de la machine asynchrone classique, également connue sous le nom de machine asynchrone à rotor bobiné. Elle se distingue par le fait qu'elle possède deux sources d'alimentation distinctes pour son stator et son rotor, ce qui lui confère des caractéristiques et des avantages spécifiques.

En termes simples, la machine asynchrone à double alimentation combine les avantages des machines asynchrones et des machines synchrones. Elle permet un meilleur contrôle du couple, une meilleure régulation de la vitesse et une meilleure efficacité énergétique par rapport aux machines asynchrones conventionnelles.

La principale différence réside dans l'ajout d'un convertisseur de fréquence (généralement un convertisseur de puissance) dans le circuit du rotor de la machine. Ce convertisseur permet de contrôler la fréquence et la tension appliquées au rotor de manière indépendante de celles du stator. Par conséquent, la machine peut fonctionner avec un glissement proche de zéro, ce qui améliore considérablement son rendement.

En utilisant cette configuration à double alimentation, il devient possible de contrôler la vitesse de rotation de la machine de manière plus précise et d'obtenir un couple de démarrage plus élevé par rapport aux machines asynchrones traditionnelles. Cela rend la machine asynchrone à double alimentation très adaptée à certaines applications spécifiques, telles que les éoliennes, les systèmes de propulsion marins, les systèmes de transport ferroviaire, etc.

En résumé, la machine asynchrone à double alimentation est une innovation technologique qui permet d'améliorer les performances des machines asynchrones en ajoutant un convertisseur de puissance sur le rotor. Cela offre un contrôle plus précis de la vitesse, un couple de démarrage élevé et une meilleure efficacité énergétique. Ces caractéristiques en font un choix attractif pour de nombreuses applications industrielles et renouvelables.

II.2 Machine asynchrone à double alimentation de type rotor bobiné

II.2.1 Structure de la machine

La machine asynchrone à double alimentation possède un stator comme les machines triphasées traditionnelles (à cage asynchrone ou synchrone), et elle est constituée de tôles magnétiques empilées et d'encoches dans lesquelles sont insérés les bobinages [18].

La particularité de cette machine réside dans le fait que le rotor n'est plus une cage que l'on va rapporter moulée dans les fentes d'un empilement de plaques, au contraire la partie mobile est constituée de trois rouleaux reliés à une étoile dont les extrémités sont reliées à des anneaux, lors de la rotation de la machine la brosse frotte contre ces anneaux reliés [18] (figure II.1).

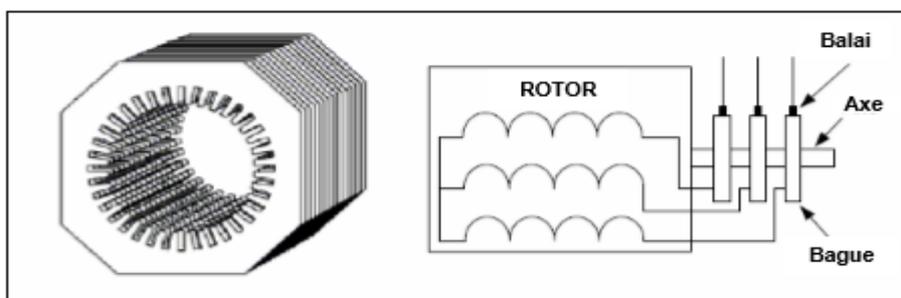


Figure II.1 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation [18].

La principale utilité de la machine asynchrone à rotor bobiné en mode moteur réside dans sa capacité à ajuster les caractéristiques du bobinage du rotor. Cela inclut la possibilité de connecter des rhéostats pour limiter le courant et augmenter le couple au démarrage, ainsi que d'élargir la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de perdre l'énergie du rotor sous forme de chaleur dans des résistances, l'utilisation d'un convertisseur permet de réinjecter cette énergie dans le réseau électrique, améliorant ainsi le rendement de la machine. Ce concept est connu sous le nom de cascade hypo-synchrone [18] (Figure II.2).

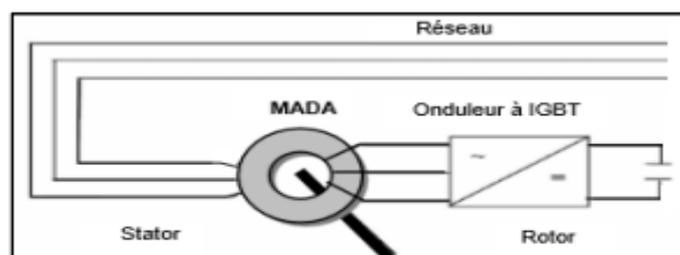


Figure II.2: Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice.

En exploitant la réversibilité de ce principe, il est également possible d'utiliser la machine asynchrone à rotor bobiné en tant que génératrice à vitesse variable.

II.2.2 Description des composants de la MADA

Le circuit du stator est connecté directement au réseau, tandis que le circuit du rotor est connecté au réseau par des convertisseurs de puissance.

Les composants de transformateur de puissance :

- Un redresseur : Il contrôle le couple électromagnétique C_{em} et la force réactive Q_s échangés entre le stator et le transformateur situé côté rotor.
- Un bus continu.
- Un onduleur: Un onduleur joue un rôle crucial dans le contrôle de la tension, représentée par le vecteur courant continu, ainsi que de la puissance réactive entre le réseau et le rotor, qui est positionné à proximité du réseau. Il est important de noter que les convertisseurs sont commandés à l'aide d'une modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM), permettant un contrôle précis et efficace de ces paramètres. [19].

II.2.3 La double alimentation

L'une des solutions pour obtenir des vitesses variables en combinant un convertisseur de DFIG (Doubly Fed Induction Generator) lorsqu'elle est utilisée comme génératrice dans la production d'énergie éolienne, ou de DFIM (Doubly Fed Induction Motor) pour des applications d'entraînement à vitesse variable, est un type de machine électrique qui appartient à la famille des machines à courant alternatif à double alimentation [20].

La première apparition de la MADA remonte à 1899; il s'agit non pas d'une nouvelle structure, mais d'un nouveau mode d'alimentation. Elle se compose principalement de deux parties : un stator triphasé, identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor qui tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par un entrefer. Les circuits électriques du stator sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle), à la seule différence que celui du rotor est relié aux bagues sur lesquelles glissent des balais [20].

Cette machine peut fonctionner aussi bien comme générateur que comme moteur. Dans le cas de la MADA, le stator est connecté directement au réseau électrique, tandis que le rotor est connecté à un convertisseur de puissance [20].

Dans les moteurs à double alimentation, l'alimentation est appliquée (ou recueillie) à la fois au niveau des enroulements du stator et du rotor. Le réseau alimente les bobines du stator, tandis que le régulateur de fréquence alimente le rotor [21].

II.3 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA

La commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est efficace lorsque le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Étant capable de fonctionner à la fois comme moteur et comme générateur à des vitesses tant hypo-synchrones que hyper-synchrones, la MADA présente quatre modes opérationnels distincts. La commande de la MADA dans ces différents modes peut être illustrée à travers la figure (II.3). Dans cette figure, P_s , P_r et P_m désignent respectivement les puissances du stator, du rotor et mécanique [20][18][16].

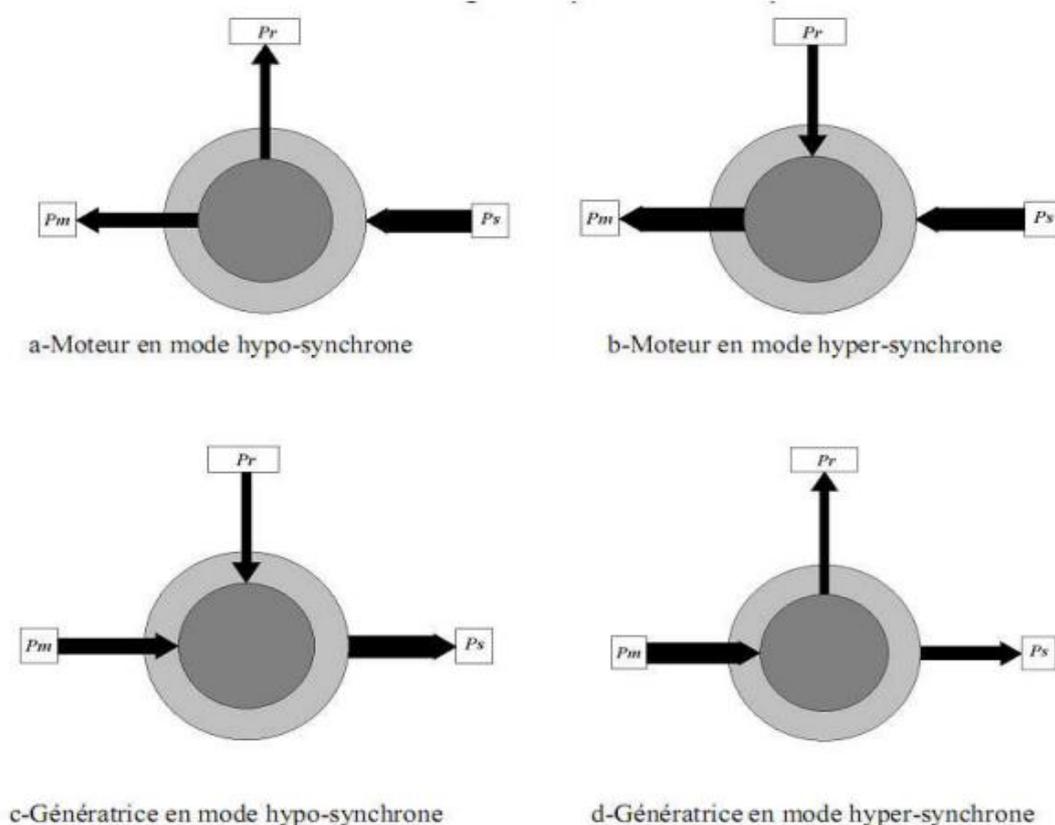


Figure II.3 : Les quatre modes de fonctionnement d'une MADA [4].

Où :

P_s : Puissance statorique.

P_r : Puissance rotorique.

P_m : Puissance mécanique

a) Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone :

Dans un moteur asynchrone à cage, la puissance électrique est fournie par le réseau au stator, générant ainsi un champ magnétique tournant. La puissance de glissement, résultant de la différence entre la vitesse de rotation du champ magnétique du stator et celle du rotor, est utilisée pour le travail mécanique mais elle n'est pas renvoyée au réseau. La vitesse de rotation du rotor est toujours légèrement inférieure à la vitesse synchrone. Lorsque le moteur fonctionne de cette manière, la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor, sous forme de chaleur [22].

b) Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone:

L'énergie électrique est principalement fournie par le réseau au stator, où elle génère un champ magnétique rotatif, ce qui produit un couple moteur qui fait tourner le rotor. La vitesse de la machine est supérieure à la vitesse de synchronisation, une machine à cage asynchrone ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [23].

c) Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone:

La puissance est distribuée du stator au réseau, la puissance passant par le stator est partiellement absorbée par le noyau de la chaîne de sorte que la vitesse du rotor est inférieure à la vitesse de synchronisation, la machine à cage asynchrone ne peut pas fonctionner dans ce mode [22].

d) Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone:

La vitesse de synchronisation est inférieure à la vitesse de la machine, la machine asynchrone à cage fonctionne dans les mêmes conditions, mais l'énergie de glissement est dissipée par les pertes Joule dans le rotor [23].

II.4 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Comme indiqué précédemment, la machine asynchrone à double alimentation (MADA) est essentiellement une version conventionnelle de la machine asynchrone (MAS) avec un rotor

accessible et identique au stator. Ainsi, le modèle de la MADA est similaire à celui de la MAS, à l'exception des tensions rotoriques non nulles. Le stator est composé de 3 De même, le rotor (ou rotor bobiné) est équipé de 3 enroulements triphasés ayant le même nombre de pôles que le stator, et dont les axes magnétiques Oa, Ob et Oc sont également décalés de 120° dans l'espace. L'angle θ représente la position angulaire du rotor par rapport au stator, et c'est ce qui définit la vitesse angulaire de la machine [13].

Avec :

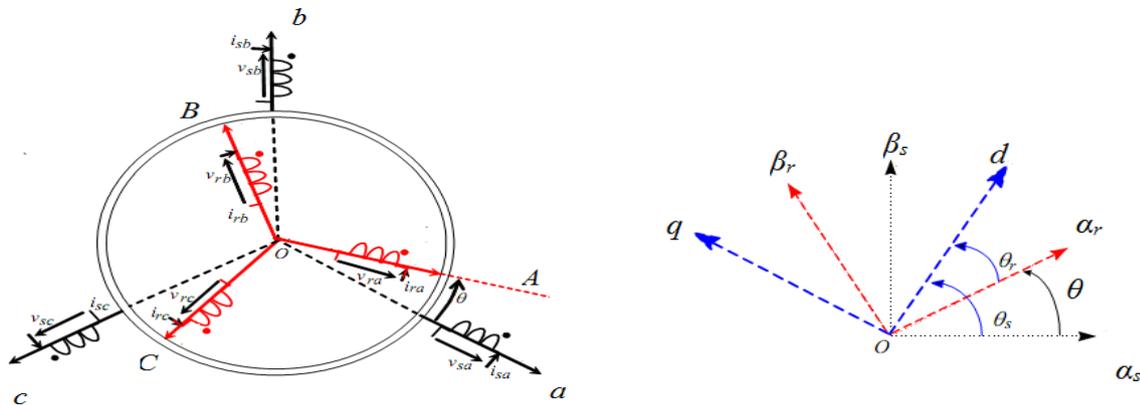
La vitesse est :

$$\Omega_s = \frac{W_s}{P}$$

ω est la vitesse de rotation angulaire mécanique, et P c'est le nombre de paires de pôles.

$$\Omega_{mec} = \frac{d\theta}{dt}$$

θ : est l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique



a) Enroulements de la MADA dans le repère naturel b) Représentation dans le repère triphasé

Figure II.4 : Représentation des enroulements de la MADA[16].

II.4.1Hypothèses simplificatrices

En tenant compte de ces hypothèses supplémentaires :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé et les pertes fer sont négligeables.

- Les résistances des enroulements restent constantes indépendamment de la température.
- La densité de courant dans la section des conducteurs est uniforme, ce qui signifie que l'effet de peau est négligeable.
- On sait que la f.e.m. générée par chaque étage des sponsors a une distribution sinusoïdale [13].
- de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

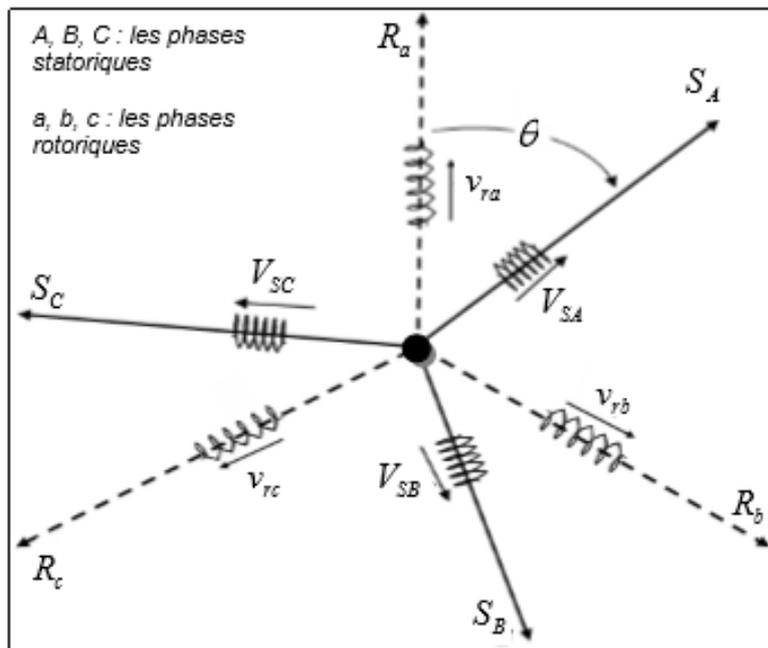


Figure II.5 : Schéma des enroulements de la MADA.

II.4.2 Equations électriques de la MADA

La loi d'Ohm et la loi de Faraday sont fondamentales pour relier les tensions aux bobinages aux flux et aux courants totaux dans ces derniers. Selon les conventions utilisées, deux équations matricielles peuvent être formulées pour exprimer les tensions sur les différents enroulements. Ces équations permettent de modéliser le comportement électromagnétique de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et de comprendre son fonctionnement dans différents scénarios [18].

Les flux sont donnés par

Les relations entre les flux et les courants sont les suivantes

Au stator :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & Msr & Msr & L_m \cos(\theta) & L_m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ Msr & L_s & Msr & L_m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_m \cos(\theta) & L_m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ Msr & Msr & L_s & L_m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_m \cos & L_m \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (II.1)$$

Au rotor :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_m \cos(\theta) & L_m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_r & M_{sr} & M_{sr} \\ L_m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_m \cos(\theta) & L_m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} & L_r & M_{sr} \\ L_m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_m \cos(\theta) & M_{sr} & M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \\ I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Equation électrique de la machine :

Dans les conditions précédentes les équations sous forme matricielle s'écrivent :
Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Où R_s est la résistance des enroulements du stator

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Où R_r est la résistance des enroulements du rotor.

II.5 Modèle triphasé de la MADA

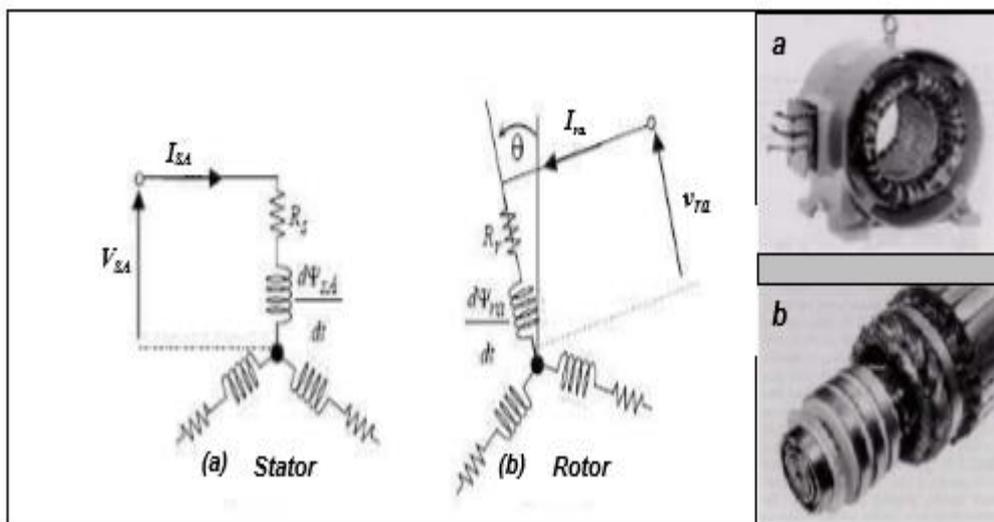


Figure II.6 : Modèle dynamique dans une MADA à trois axes [18].

II.5.1 La transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique essentiel qui facilite la conversion d'un système triphasé en un système biphasé. Elle permet de ramener les variables du repère triphasé (a, b, c) sur les axes d'un repère biphasé tournant d-q. Grâce à cette transformation, les grandeurs statoriques et rotoriques sont exprimées dans un même repère, ce qui simplifie considérablement l'analyse du système [18], comme illustré dans la Figure II.7.

Les vitesses angulaires de rotation sont obtenues telles que :

Pour $\Theta_s = \theta$

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_{sl}}{dt} = \omega_{sl} \\ \omega_s = \omega_{sl} + \omega_r \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

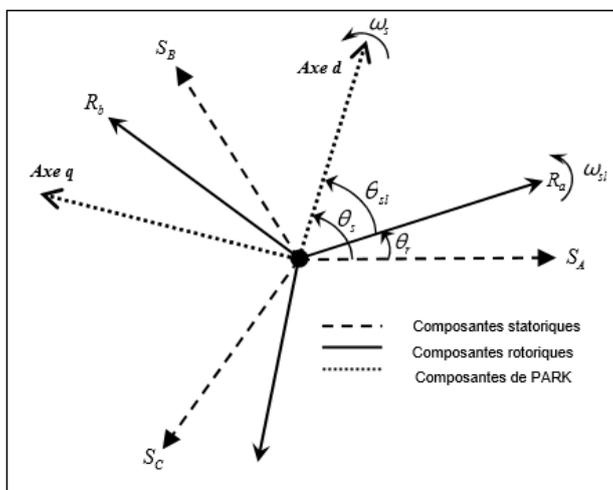


Figure II.7: Repère de PARK.

En appliquant la transformation de Park et en tenant compte des hypothèses simplificatrices citées précédemment.

Nous pouvons établir les expressions des tensions statoriques et rotoriques dans le repère tournant (d,q) quelconque :

Au stator :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt}(\varphi_{sd}) - w_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt}(\varphi_{sq}) + w_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}(\varphi_{rd}) - w_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt}(\varphi_{rq}) + w_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Les équations reliant différents courants doivent être prises en compte

(I_{si} ; I_{ri} , $i \in (d, q)$)aux flux (φ_{si} ; φ_{ri} ; $i \in (d, q)$) statoriques et rotoriques qui interagissent dans la machine:

Au stator :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M_{sr} I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M_{sr} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Au rotor :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M_{sr} I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M_{sr} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Où :

L_s : inductance propre cyclique du stator.

L_r : inductance propre cyclique du rotor.

L_m : inductance mutuelle cyclique stator-rotor.

II.5.2 Equation mécanique

Après avoir appliqué les relations dynamiques de base à la machine, on obtient l'équation mécanique suivante:

$$\frac{j}{p} \frac{d(\omega_r)}{dt} = C_e - C_r - C_f \quad (\text{II.10})$$

Où :

J : moment d'inertie des parties tournantes (du moteur avec la charge) ;

C_r : couple résistant ;

C_f : couple de frottement ;

Le couple de frottement est donné par :

$$C_f = \frac{f_r}{p} \omega_r = f_s \Omega_r \quad (\text{II.11})$$

Avec :

f_r : Coefficient de frottement visqueux.

Enfin l'équation mécanique peut être formulée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \left(\frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} \right) = -\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (\varphi_{rd} I_{sq} - \varphi_{rq} I_{sd}) - C_r - f_r \quad (\text{II.12})$$

Cette équation permet de modéliser le comportement dynamique de la machine asynchrone à double alimentation et d'étudier son fonctionnement sous différentes conditions de charge et de vitesse.

II.5.3 Expression de la puissance active et réactive

La puissance active et réactive au stator est définie comme :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_{sd} = V_s I_{sd} - V_{sq} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

La puissance active et réactive au rotor est définie comme :

$$\begin{cases} P_r = V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq} \\ Q_{rd} = V_{rd} I_{rd} - V_{rq} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

II.5.4 Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = P(\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{II.15})$$

II.6 La représentation d'état de la machine

La manière dont la MADA représente l'état d'un système électrique est influencée par deux aspects : le choix du repère et des variables d'état. Traditionnellement, le repère (d, q) est privilégié car il offre une solution générale pour formuler les équations. Quant aux variables d'état, elles sont sélectionnées en fonction des objectifs spécifiques, que ce soit pour le contrôle ou pour l'observation du système. Cette sélection détermine le vecteur d'état utilisé dans le modèle complet, qui capture l'état global du système électrique en considérant les quatre variables pertinentes. $[I_{sd}, I_{rq}, \varphi_{sd}, \varphi_{rq}]^T$

$$\begin{cases} I_{rd} = \frac{1}{L_r} \varphi_{rd} - \frac{L_m}{L_r} I_{sd} \\ I_{rq} = \frac{1}{L_r} \varphi_{rq} - \frac{L_m}{L_r} I_{sq} \\ \varphi_{sd} = L_s \sigma I_{sd} + \frac{L_m}{L_r} \varphi_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s \sigma I_{sq} + \frac{L_m}{L_r} \varphi_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

avec

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (\text{II.17})$$

En remplaçant φ_{sd} et φ_{sq} en fonction de φ_{rd} et φ_{rq} dans le système (II.8), on aboutit aux équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \sigma \frac{dI_{sd}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_{rq} \left[L_s \sigma I_{sq} + \frac{L_m}{L_r} \varphi_{rq} \right] \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \sigma \frac{dI_{sq}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \omega_{rq} \left[L_s \sigma I_{sd} + \frac{L_m}{L_r} \varphi_{rd} \right] \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \varphi_{rd} = -R_r I_{rd} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rq} + V_{rd} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{rq} = -R_r I_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rd} + V_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

On écrit le modèle de la machine utilisée pour la commande sous forme d'un système d'équations d'état :

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases}$$

Avec :

X : vecteur d'état du système : $[I_{sd}, I_{rq}, \varphi_{sd}, \varphi_{rq}]^T$

A : matrice d'état du système.

B : matrice de commande.

U : vecteur de commande : $[V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}]^T$

Y : vecteur de sortie.

C : matrice d'observation.

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda & \omega_s & \frac{K}{T_r} & \omega_r K \\ -\omega_s & -\lambda & -\omega_r K & \frac{K}{T_r} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega_{sl} \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & -\omega_{sl} & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$\text{Avec } Tr = \frac{L_r}{R_r} \quad ; Ts = \frac{L_s}{R_s} \quad ; \quad \lambda = \frac{1}{\sigma Tr} \quad ; \quad K = \frac{1}{\sigma Ts L_r}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & K & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & K \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

La décomposition des équations d'état nous donne :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_{sd} = -\lambda I_{sd} + \omega_s I_{sq} + \frac{K}{T_r} \varphi_{rd} + \omega_r K \varphi_{rq} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd} + K V_{rd} \\ \frac{d}{dt} I_{sq} = -\lambda I_{sq} - \omega_s I_{sd} + \frac{K}{T_r} \varphi_{rq} + \omega_r K \varphi_{rd} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq} + K V_{rq} \end{cases} \quad (II.22)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \varphi_{rd} = \frac{L_m}{T_r} I_{sd} - \frac{1}{T_r} \varphi_{rd} + \omega_{rd} \varphi_{rq} + V_{rd} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{rq} = \frac{L_m}{T_r} I_{sq} - \frac{1}{T_r} \varphi_{rq} - \omega_{si} \varphi_{rd} + V_{rq} \end{cases} \quad (II.23)$$

L'équation mécanique régissant la partie tournante de la machine est donnée par :

$$\frac{d\Omega}{dt} = -\frac{3}{2} p \frac{L_m}{J L_s} (\varphi_{rd} I_{sq} - \varphi_{rq} I_{sd}) - \frac{C_r}{J} - \frac{f_r}{J} \Omega \quad (II.24)$$

Notez que le générateur a une valeur négative lorsqu'il est allumé.

Notons aussi que ce couple représente le couple résistant pour la turbine éolienne.

Dans le reste de ce travail on le note par C_r .

II.7 La chaîne de conversion

Le processus est réalisé à l'aide de deux transformateurs, dont l'un est rotatif composé d'un redresseur à diode, d'un filtre passe-bas et d'un onduleur IGBTs (Transistors bipolaires à gâchette isolée) et le second est un fixe qui est directement connecté aux sources triphasées. La modulation par largeur d'impulsion (MLI) utilisée est régulière, triangulaire, symétrique [18], (Figure II.8).

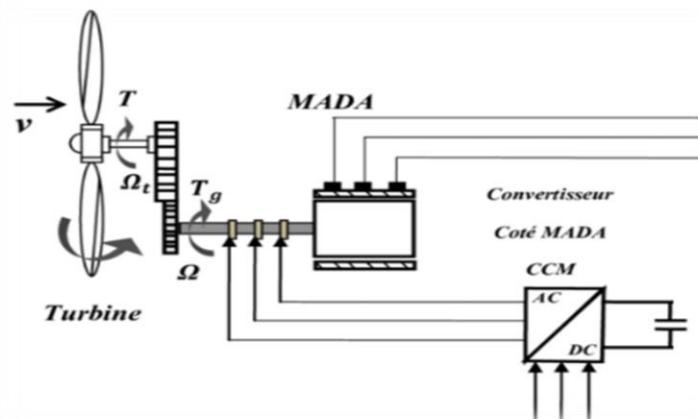


Figure II.8 : Schéma synoptique pour un fonctionnement en génératrice de la MADA.

Caractéristiques requises pour un actionneur électrique :

- Un système permanent est similaire à un système dynamique avec un petit nombre de variables et d'ondulations.
- Des constantes de temps électrique et mécanique faibles.
- L'alimentation triphasée est symétrique et de fréquence et d'amplitude constante.

II.8 Principe de la commande vectorielle

La MADA est un système non linéaire, nous obtenons sa puissance réactive m par le produit croisé entre les tensions et les courants,. Ceci rend la commande de la MADA difficile. La commande vectorielle (la commande par orientation de flux) est utilisée afin d'éliminer cette difficulté. Cette commande est similaire au principe d'une commande à courant continu d'excitation séparée.. La puissance active dépend uniquement du courant rotorique I_{rq} et la puissance réactive dépend uniquement du courant I (figure II.9) [24].

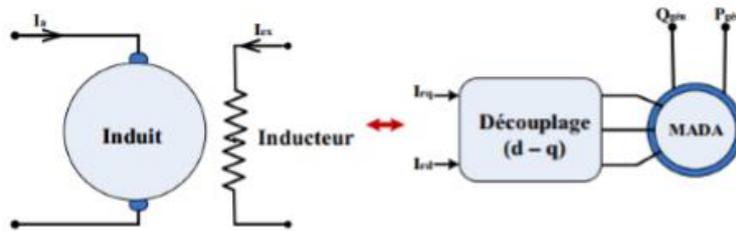


Figure II.9 : Principe de la commande vectorielle [24].

Dans ce travail, on choisit l'orientation du flux statorique suivant l'axe d référentiel diphasé (d,q) lié au champ tournant.

On a donc :

$$\varphi_{sd} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{sq} = 0$$

Les équations (II.3) et (II.5) deviennent :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{sq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (II.25)$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} = \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} = 0 \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq} \end{cases} \quad (II.26)$$

L'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la figure (II 10)

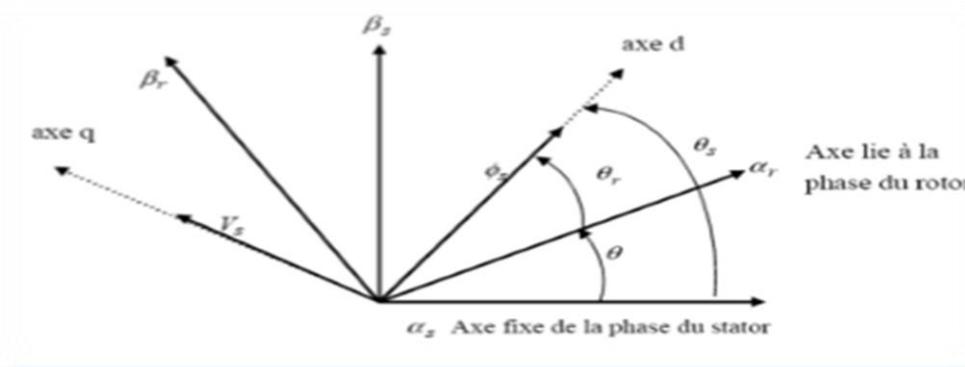


Figure II.10 : Orientation de la tension de flux statorique.

Le couple mécanique est donné par la relation suivante :

$$C_{méc} = -\frac{3}{2} \cdot p \cdot (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) = -\frac{3}{2} \cdot p \cdot (\varphi_{rq} I_{rd} - \varphi_{rd} I_{rq}) = C_r + j \frac{d\Omega}{dt} + f_r \Omega \quad (\text{II.27})$$

En explicitant les flux statoriques et rotoriques on vérifie que :

$$\begin{aligned} C_{méc} &= C_e = -\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (\varphi_{rd} I_{sq} - \varphi_{rq} I_{sd}) \\ &= -\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (\varphi_{sd} I_{rq} - \varphi_{sq} I_{rd}) \end{aligned} \quad (\text{II.28})$$

En appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine les équations (II.4), (II.5) et (II.7) deviennent :

$$C_e = -\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (\varphi_{sd} I_{rq}) \quad (\text{II.29})$$

Rappelons que ce couple représente une perturbation pour la turbine éolienne et prend une valeur négative.

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = w_s \varphi_s \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

$$\begin{cases} \varphi_s = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

À partir de système des équations (II.10), on obtient les expressions suivantes :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

II.8.1 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \\ Q_s = V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{sd}=0$) donne :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = V_s \frac{\varphi_s}{L_s} - V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

En tirant $\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ de l'équation (III.9), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \quad (\text{II.35})$$

II.8.2 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

Nous exprimons la tension tournante à l'aide des équations (II.5) (II.11) (II.4) :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left[L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right] \frac{d}{dt} I_{rd} - g \omega_s \left[L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right] I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left[L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right] \frac{d}{dt} I_{rq} + g \omega_s \left[L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right] I_{rd} + g_s \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire [25]:

$$\begin{cases} V_{rf} = R_r I_{rd} - g \omega_s \left[L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right] I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \omega_s \left[L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right] I_{rd} + g \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Où g correspond au glissement de la machine asynchrone.

V_{rd} et V_{rq} : diphasées des tensions rotoriques .

$g(L_m V_s)/L_s$: représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation

II.9.1 Commande vectorielle directe en P et Q de la MADA en génératrice

Le schéma explicatif de cette méthode est représenté dans la Figure II.11.

Nous présumons toujours que la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est connectée à un réseau stable et puissant, ce qui maintient le terme de couplage imposé par ce dernier constant [26][16].

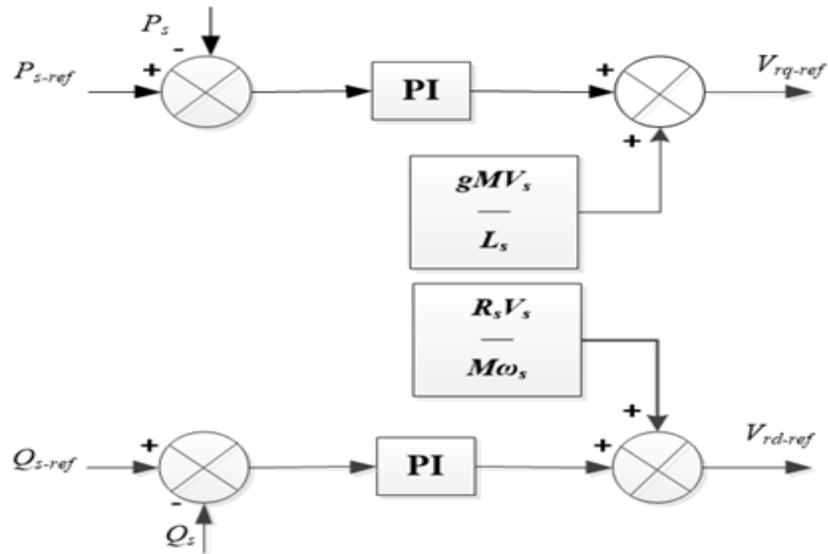


Figure II.11 : Commande vectorielle en puissance sans boucle courant [16].

II.9.2 Commande directe avec boucle de courant

Dans cette nouvelle approche de commande, contrairement à la méthode précédente, nous introduisons une boucle de régulation au niveau des courants rotoriques. Ainsi, chaque axe du repère de Park est doté de deux régulateurs [26][16] Figure II.12.

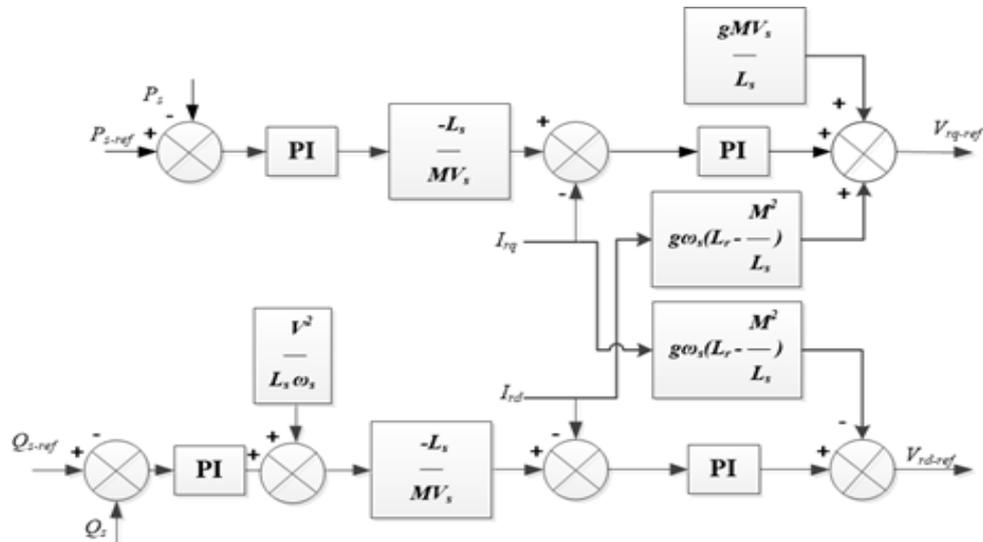


Figure II.12 : Commande vectorielle en puissance avec de boucle courant [16].

II.9.3 Commande indirecte

En substituant les courants aux références des puissances active et réactive, le schéma bloc proposé est obtenu. Cependant, cette configuration demeure fiable uniquement lorsque le réseau électrique maintient sa stabilité en termes de tension et de fréquence. Toute instabilité dans le réseau entraînerait une erreur dans le suivi des consignes de puissance active et réactive [26].figure (II.13).

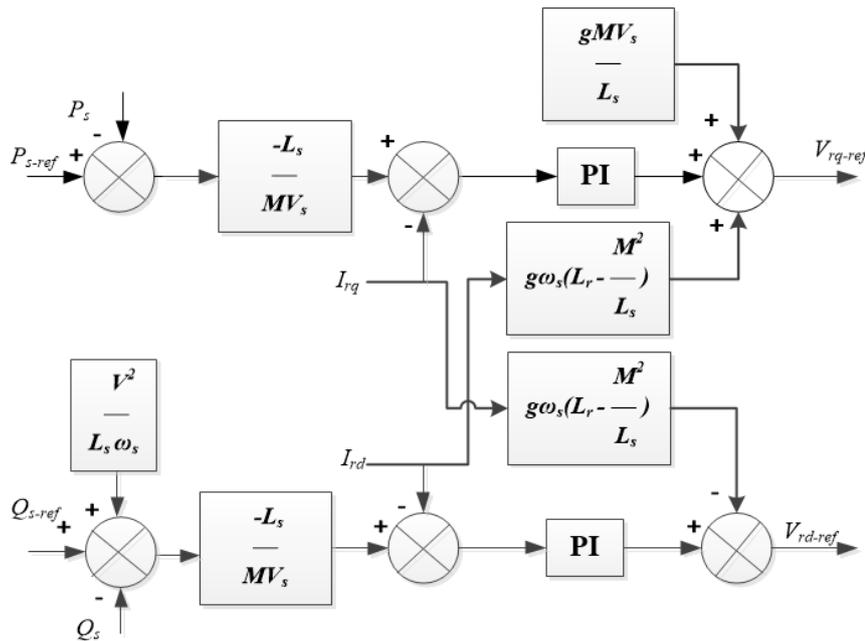


Figure II.13 : Commande indirecte en puissance

II.10 Synthèse des régulateurs

Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral (PI)

La rapidité et la simplicité du régulateur PI constituent ses principales performances pour lesquelles on l'utilise dans la commande de la MADA.

Le schéma suivant montre la boucle de régulation du système corrigé par le PI.

T_n : la constante de temps de dosage de la corrélation d'intégration.

T_i : la constante de temps d'intégration.

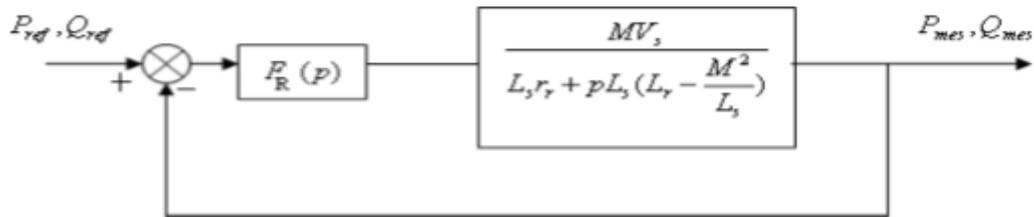


Figure. II.14 : Schéma bloc d'un système régulé par un PI.

La fonction de transfert en boucle fermée suivante :

$$FTBF = \frac{S + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{S}{K_p}} \cdot \frac{\frac{V_s L_m}{L_s(L_r - L_m^2/L_s)}}{S + \frac{R_r}{(L_r - L_m^2/L_s)}}$$

Pour éliminer le zéro de la fonction de transfert, nous optons pour la méthode de compensation des pôles pour la synthèse du régulateur. Cela se traduit par l'équation suivante :

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

Fonction de transfert en boucle ouverte devient alors :

$$FTBF = F_0(t) = \frac{\frac{V_s L_m}{L_s(L_r - L_m^2/L_s)}}{\frac{S}{K_p}}$$

Il est à noter que la compensation des constantes de temps est négligeable si les paramètres machine sont connus car les gains des débogueurs dépendent directement de ces paramètres, la compensation est moins efficace si ce n'est pas le cas. [26].

En boucle fermée, on obtient la fonction de transfert suivante :

$$FTBF = \frac{F_0(t)}{1+F_0(t)} = \frac{1}{1+\tau_r S} \quad \text{Avec} \quad \tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s(L_r - M^2/L_s)}{V_s M}$$

τ_r : temps de réponse du système. On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$\begin{cases} K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{V_s M}{L_s (L_r - M^2/L_s)} \\ K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{V_s M} \end{cases}$$

II.11 Modélisation du convertisseur côté rotor

L'onduleur triphasé à deux niveaux de tensions est constitué d'une source de tension continue et de six interrupteurs montés en pont. La tension continue est généralement obtenue par un redresseur triphasé à diodes. Celui-ci est très utilisé en MLI pour l'alimentation des récepteurs triphasés équilibrés à tension et fréquence variables [26].

La figure (II.15) Schéma de principe d'un onduleur de tension classique à deux étages fournissant au rotor d'une machine asynchrone une double alimentation équilibrée, connectée en étoile et sans neutre de retour.

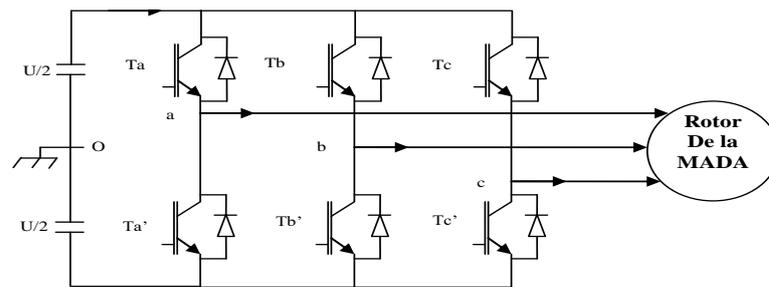


Figure II.15 Le convertisseur coté rotor de la MADA.

On définit les fonctions logiques de connexion par (i=1,2,3)

$$F_k = \begin{cases} 0 & \text{si } T_k \text{ est fermé et } T'_k \text{ est ouvert} \\ 1 & \text{si } T_k \text{ est ouvert et } T'_k \text{ est fermé} \end{cases}$$

La phase k (k=a, b, c) de l'onduleur peut délivrer instantanément une tension de sortie, V_{k0} , possédant deux niveaux distincts 0 ou U :

$$V_{k0} = F_k U$$

Équations de tension (II.38).

$$V_{an} = \frac{U}{3} (2.F_a - F_b - F_c)$$

$$V_{bn} = \frac{U}{3} (2.F_b - F_a - F_c)$$

$$V_{cn} = \frac{U}{3} (2.F_c - F_b - F_a)$$

(II.38)

La relation De courant I_{m-mac} Comme suit :

$$I_{m-mac} = F_a i_a + F_b i_b + F_c i_c \quad (II.39)$$

II.12 Contrôle du convertisseur

Un onduleur de tension à porteuse permet de commander la transmission des machines asynchrones à double alimentation. Le transformateur est commandé en tension. Le principe de cette stratégie repose sur la variation d'amplitude de la référence, et la fixation de celle de la porteuse, qui est représentée par un signal triangulaire.

Le bloc de commande du convertisseur reçoit les tensions de référence pour les trois phases. Ces tensions sont comparées avec le signal triangulaire (porteuse) et, en fonction du signal d'erreur, on commande les semi-conducteurs (interrupteurs) de l'onduleur.

Deux paramètres caractérisent cette technique :

- L'indice de modulation « m » qui représente le rapport entre la fréquence de la porteuse « f_p » à la fréquence de la référence « f » désirée.
- Le coefficient de réglage en tension qui représente le rapport entre l'amplitude de l'onde de référence à la valeur de crête de l'onde porteuse.

L'algorithme de commande de cette stratégie est très simple, il est résumé comme suit

- si $V_{ref} > V_p$ – le transistor du haut du bras de pont conduit,
- si $V_{ref} < V_p$ – le transistor du bas du bras de pont conduit,

où

V_{ref} représente une des trois tensions de référence

V_p représente le signal triangulaire ou l'onde porteuse.

La Figure II.16 présente le fonctionnement fondamental de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ainsi que les variations de tension de sortie de l'onduleur. Un avantage majeur de la MLI est sa capacité à maintenir une fréquence de commutation constante, réglée par l'onde porteuse .

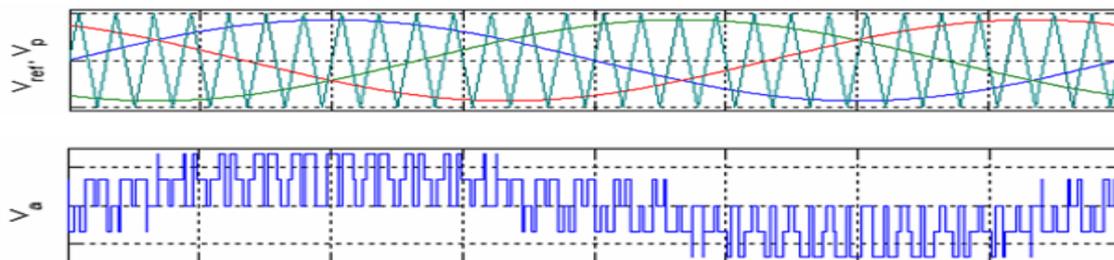


Figure II.16 :Principe de la MLI.

La configuration du système de conversion éolienne (turbine-MADA) à contrôler est représentée dans la figure (II.17):

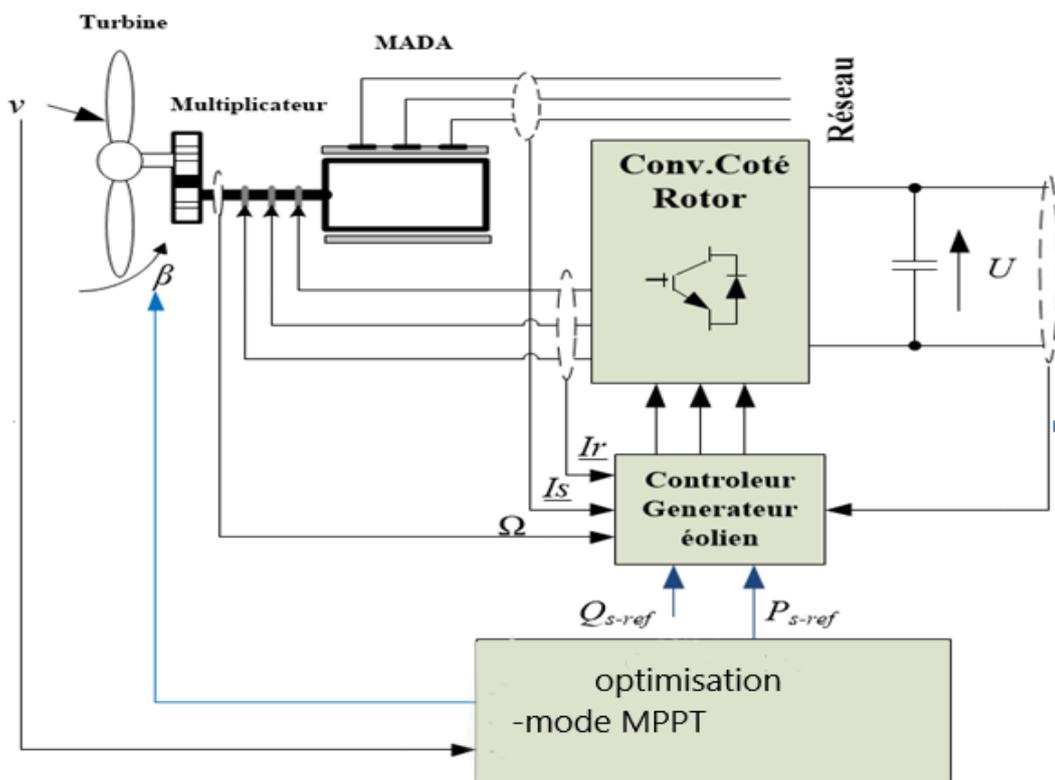


Figure II.17 : Asservissement du système éolien Turbine-MADA.

II.13 Résultats

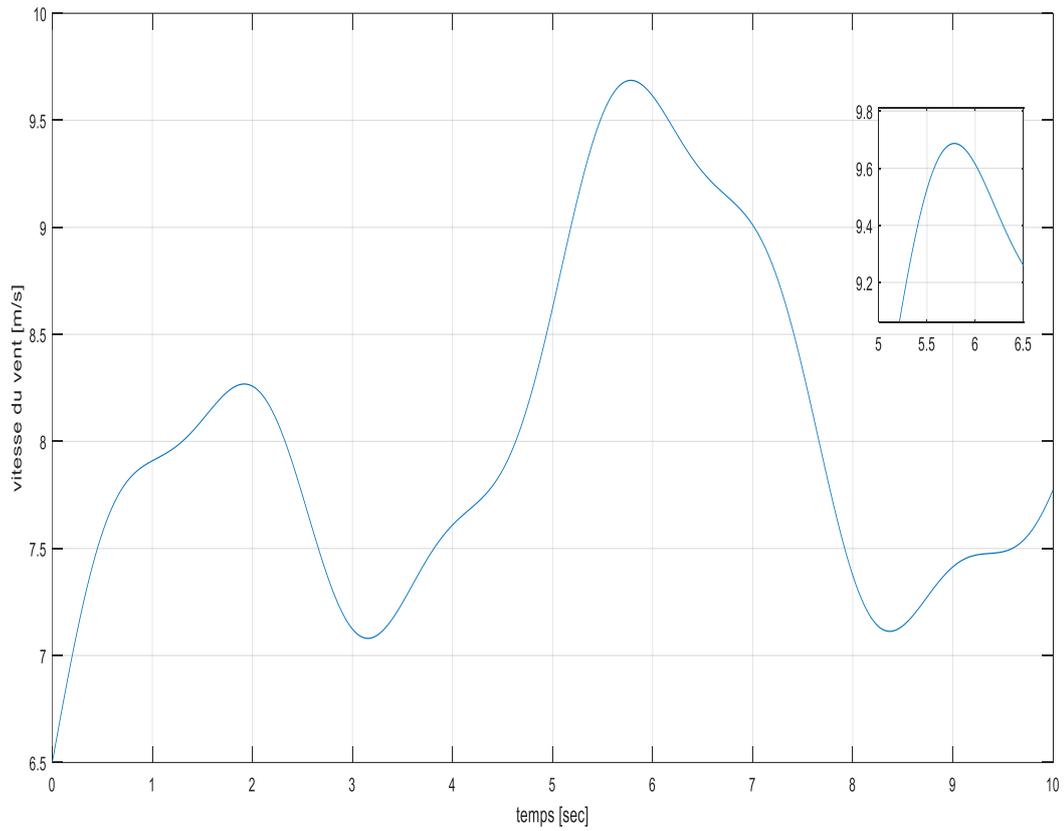


Figure II.18 La vitesse du vent.

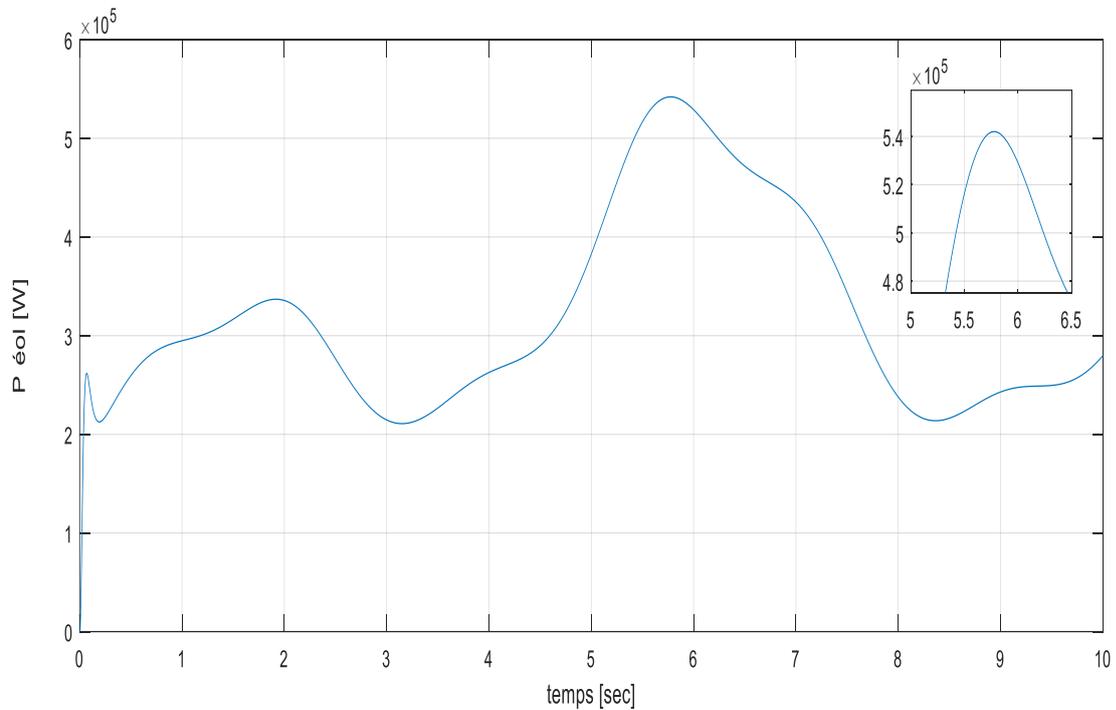


Figure II.19 : La puissance de la turbine.

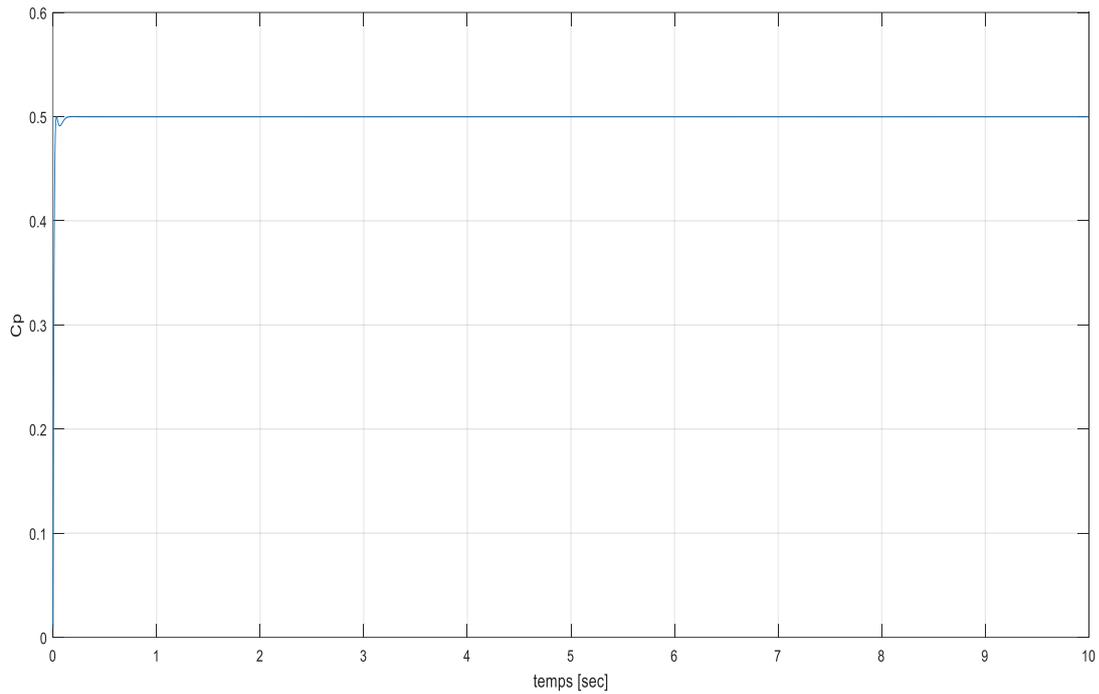


Figure II.20 : Le coefficient de puissance.

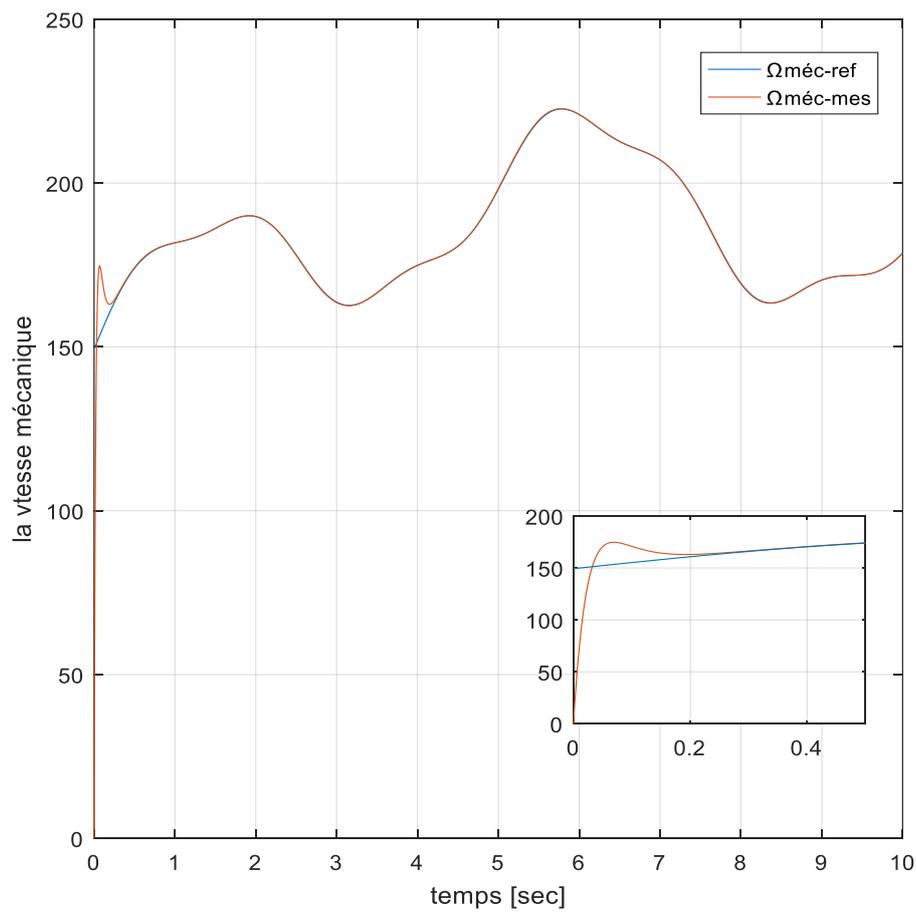


Figure II.21 : a) La vitesse mécanique de la turbine.

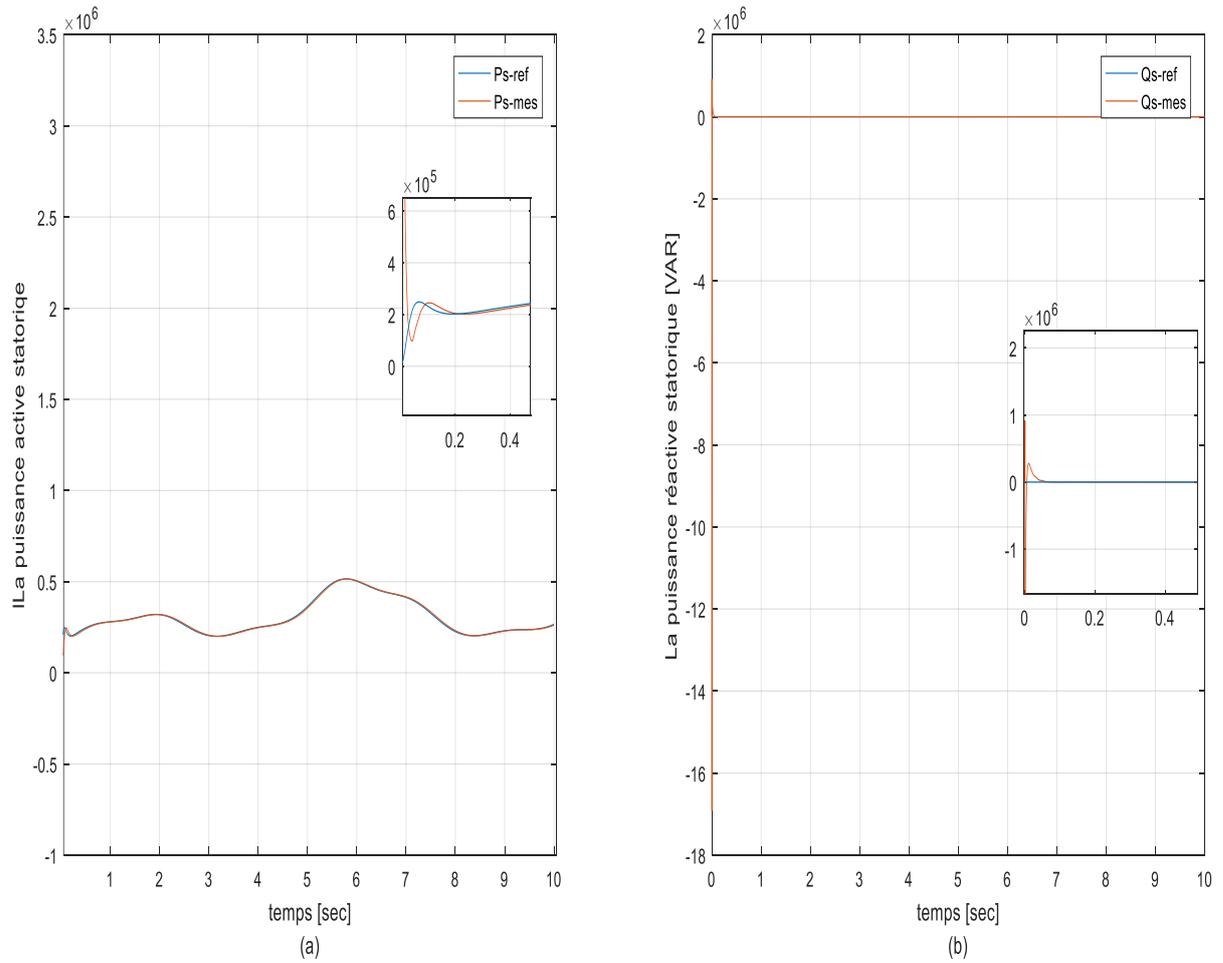


Figure II.22 :a)La puissance active de la MADA. b) La puissance réactive de la MADA.

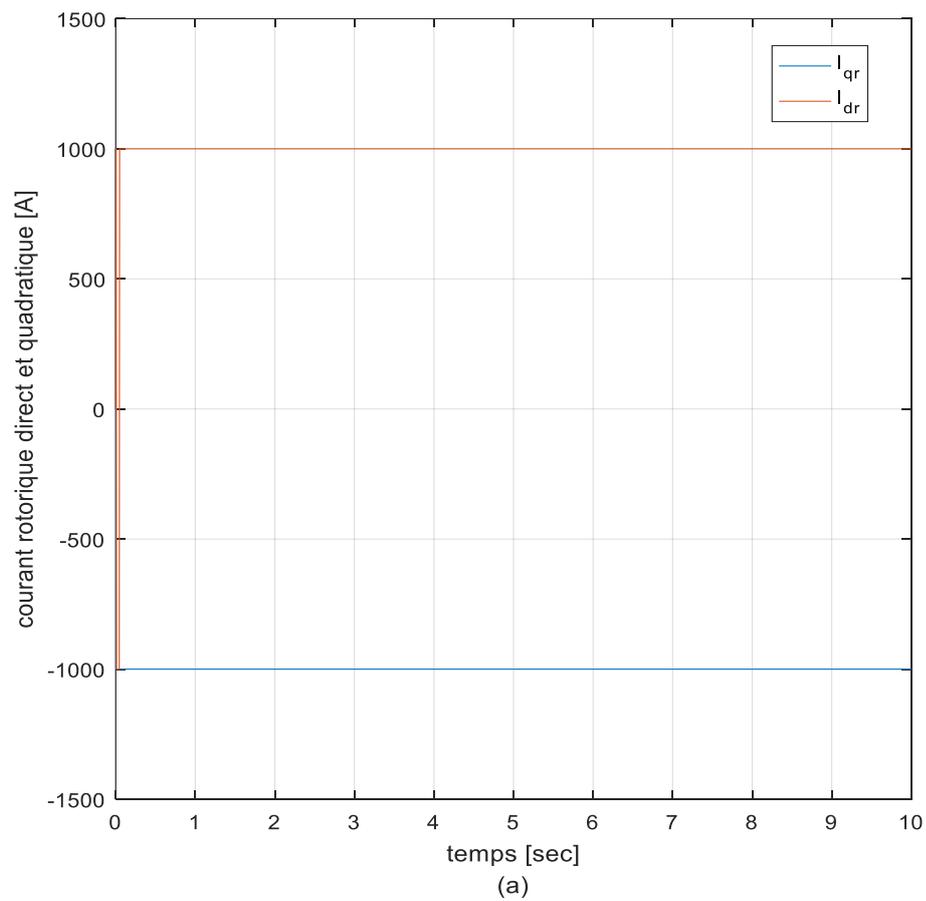


Figure II.23 courant rotorique direct et quadratique.

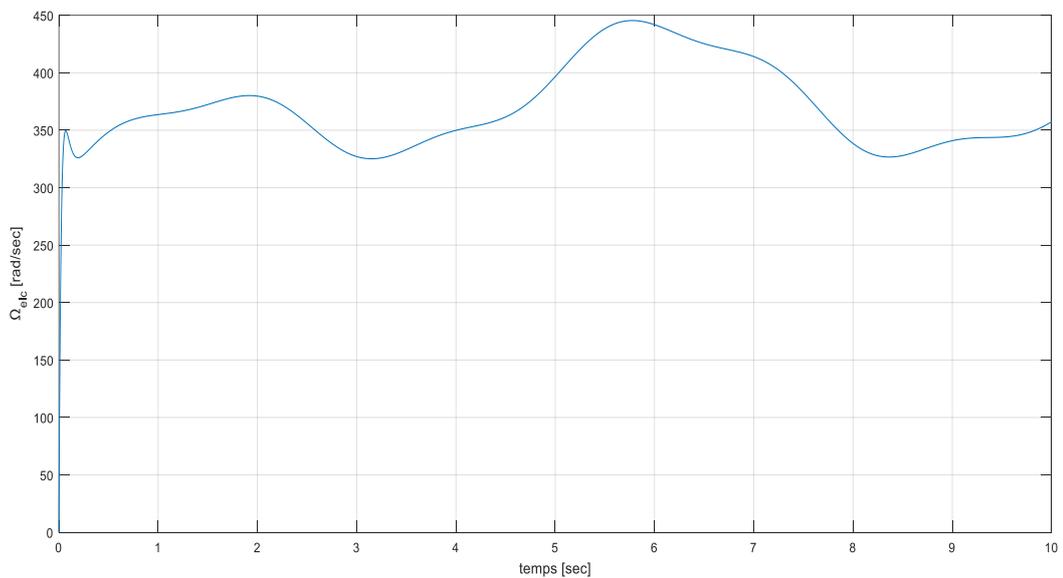


Figure II.24 Vitesse électrique de la MADA.

II.14 Interprétations

L'étude du modèle du système, représenté par la Figure (II.17), a été réalisée en utilisant MATLAB/Simulink pour simuler le comportement de la chaîne turbine-MADA et évaluer l'efficacité de l'algorithme d'optimisation. Selon la vitesse du vent et la puissance active développée par le générateur éolien, l'algorithme ajuste le fonctionnement de la turbine en fixant une consigne de vitesse de rotation pour la MADA. La référence de puissance réactive est maintenue à zéro pour un fonctionnement à facteur de puissance unitaire, tandis que la tension du bus continu est maintenue constante à 2KV.

Le profil du vent utilisé pour la simulation est illustré par la Figure (II.18), conçu pour obtenir différents modes de fonctionnement. Les résultats de la simulation, résumés des Figures (II.19) à (II.22), montrent que la puissance active générée par l'aérogénérateur varie autour de sa valeur de référence, tandis que la puissance réactive varie autour de zéro, conformément aux lois de commande adoptées.

Lorsque la vitesse du vent dépasse 7.1 m/s, l'algorithme vise à maintenir une référence de puissance n'excédant pas la puissance nominale de 0.54 MW. Cette puissance est appliquée à la MADA, comme le montre la Figure (II.22.a), où l'on observe une bonne adaptation de la puissance grâce à la commande vectorielle de la MADA. Pour des vitesses de vent produisant une puissance inférieure à la puissance nominale, l'algorithme active le système en mode MPPT, comme indiqué par le coefficient de puissance (de valeur 0.49 environ) dans la Figure (II.20).

Enfin, les courants rotoriques direct et quadratique, qui correspondent respectivement à la puissance réactive et active statoriques, sont maintenus proches de leurs références, assurant ainsi une protection efficace de la MADA.

II.15 Conclusions

L'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation dans les éoliennes présente de nombreux avantages, du fait de sa capacité à contrôler précisément la vitesse de rotation et à fournir un couple élevé, cette technologie améliore l'énergie éolienne en électricité,

La machine asynchrone à double alimentation a l'avantage d'ajuster automatiquement la vitesse de rotation afin d'augmenter la production d'énergie lorsque la vitesse est différente.

Le rotor inverseur nous permet d'adapter la vitesse de rotation aux conditions de vent, assurant ainsi l'utilisation efficace du vent Ressource.

La machine asynchrone à double alimentation apporte également une meilleure stabilité au réseau électrique grâce à son contrôle avancé de la puissance réactive, elle permet de réguler les fluctuations de puissance et sa stabilité, essentielle pour les réseaux éoliens.

En termes d'efficacité énergétique, la machine asynchrone à double alimentation présente un rendement supérieur à celui des machines asynchrones traditionnelles, ce qui contribue à une meilleure utilisation de l'énergie éolienne disponible.

Chapitre III :
Commande par mode
glissant et logique
floue

III.1 Commande par mode glissant

La technologie des modes de glissement est une stratégie de contrôle avancée utilisée pour diriger un système vers une surface de glissement et le stabiliser à cet endroit. Cette technique repose sur l'utilisation du concept d'un modèle de glissement qui change en fonction de l'état du système, ce qui permet de diriger efficacement et rapidement le système vers la surface de glissement. Cette technique permet de contrôler les systèmes non linéaires et de les rendre résistants aux bruits et aux perturbations. [27][28][29].

III.1.2 Principe de la commande mode glissant

L'idée fondamentale de cette approche est de définir une surface appelée surface de glissement $S(x, t)$ pour diriger et attirer la dynamique (l'état) du système vers une région spécifique, suivie d'une loi de commande $U(x, t)$ pour maintenir le système dans cette région (toutes les trajectoires sur cette surface).

La conception d'un contrôleur glissant comporte deux phases principales : la détermination de la sélection et du nombre de surfaces et la définition de la loi de contrôle [27] [29] [30].

III.1.3 Conception de la commande par mode glissant

La conception d'une commande à mode glissant comprend trois étapes intégrées de sélection des surfaces : la détermination des conditions d'existence et de convergence, la détermination de la loi de commande et la minimisation des perturbations. Ces processus intégrés garantissent une conception efficace de la commande qui peut guider le système vers la performance requise tout en maintenant sa stabilité et en minimisant les perturbations dans le système. [27] [31][32].

III.1.3.1 Choix des surfaces de glissant

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces, mais également leurs formes en fonction de l'application et de l'objectif visé. Le procédé le plus judicieux et le plus simple consiste à choisir une surface de commutation égale au vecteur erreur du vecteur d'état. Considérons le système non linéaire [33] défini par les équations suivantes :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (III.1)$$

Avec

$[X]$: représente le vecteur d'état.

$[U]$: Le vecteur de commande.

Le choix de la surface de glissement dépend du nombre et de la forme des fonctions requises, lesquels varient en fonction de l'application et de l'objectif spécifique. Pour un système linéaire, la surface de glissement est une fonction scalaire qui permet à la variable à réguler de glisser sur cette surface et de converger vers l'origine du plan de phase [32].

En ce qui concerne la forme non linéaire, elle peut être définie comme une fonction de l'erreur sur la variable à réguler x et peut être exprimée comme suit :

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

λ : Le gain positif.

r : est le degré relatif

$e(X) = X - X^*$: L'écart de la variable à réguler correspond à la différence entre la variable à réguler elle-même et sa référence.

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro. Cette surface représente une équation différentielle linéaire dont la solution unique est $S(x)=0$. Pour ce faire, il est nécessaire de choisir un paramètre adéquat, ce qui équivaut à résoudre un problème de poursuite de trajectoire. Cette poursuite est équivalente à une linéarisation exacte de l'écart, tout en garantissant la convergence vers zéro de manière stable et rapide [29] [32].

III.1.3.2 Conditions d'existence et de convergence du régime glissant

III.1.3.2.1 Approche direct

L'approche directe, la plus ancienne, a été proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin. Bien qu'elle soit globale, elle ne garantit pas un temps d'accès fini [QQ]. Cette approche est exprimée par :

$$S(x)\dot{S}(x) < 0$$

III.1.3.2.2 Approche LYAPUNOV

L'idée est de choisir cette fonction pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence, et de concevoir une commande uu telle que le carré de la surface correspond à une fonction de Lyapunov[33]. et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction $\dot{V}(X) < 0$

La fonction de Lyapunov :

$$V(x) = \frac{1}{2} s(x)^2 \quad (\text{III.3})$$

Sa dérivée :

$$\dot{V}(x) = s(x)\dot{s}(x) \quad (\text{III.4})$$

Pour que la fonction candidate de Lyapunov puisse décroître et converger vers zéro (pour garantir l'existence du mode de glissant), il suffit d'assurer que [33] :

$$\dot{s}(x)s(x) < 0 \quad (\text{III.5})$$

III.1.3.2.3 Détermination de a loi de commande

La méthode de commande par mode glissant se divise en deux parties distinctes. La première étape consiste à effectuer une linéarisation précise (U_{eq}), tandis que la seconde partie vise à la stabilisation (ΔU). Cette dernière est particulièrement cruciale dans le processus de réglage par mode glissant, car elle permet de compenser les erreurs du modèle et de repousser les perturbations externes [34] [35].

Donc :

$$U(t) = \Delta U + U_{eq} \quad (\text{III.6})$$

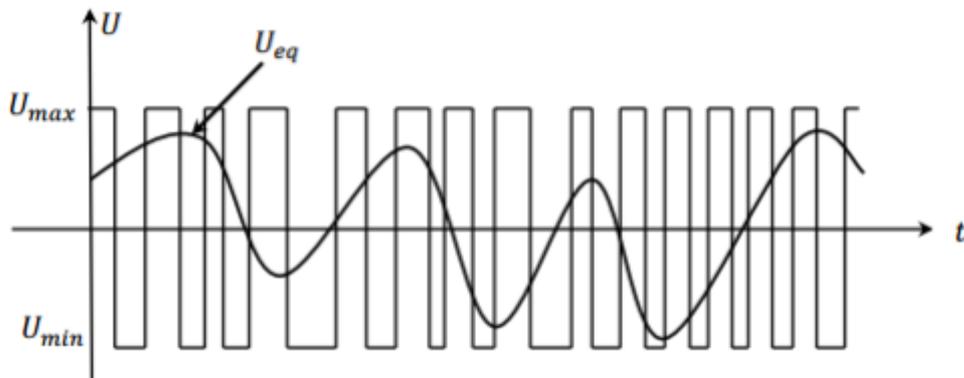


Figure III 1: Commande équivalente U_{eq} [35].

La dérivée de la surface $S(x)$ est :

$$\dot{S}(x) = \frac{ds}{dt} = \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (\text{III.7})$$

En remplaçant (III. 1) et (III. 6) dans (III. 7), on trouve :

$$\dot{S}(x) = \frac{ds}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} ([A][X] + [B]U_{eq}) + \frac{ds}{dt} [B]\Delta U \quad (\text{III.8})$$

D'après le mode de glissement et le régime permanent

$$U_{eq} = -\left(\frac{\partial s}{\partial x} [B]\right)^{-1} \left(\frac{\partial s}{\partial x} [A][X]\right) \quad (\text{III.9})$$

Avec la condition que

$$\frac{\partial s}{\partial x} [B] \neq 0 \quad (\text{III.10})$$

Nous obtenons la nouvelle équation pour la dérivée de la surface après avoir substitué l'équation (III.8) dans le mode de convergence[36]:

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} [B]\Delta U \quad (\text{III.11})$$

Et la condition d'attractivité $S(X)\dot{S}(X) \leq 0$ Devient :

$$S(X) \frac{\partial s}{\partial x} [B]\Delta U < 0 \quad (\text{III.12})$$

Pour réaliser ce qui précède, le signe de ΔU et $S(X) \frac{\partial s}{\partial x} [B]$ est sont opposé, La forme du la commande discrète c'est fonction sign[36], Figure (III.2).

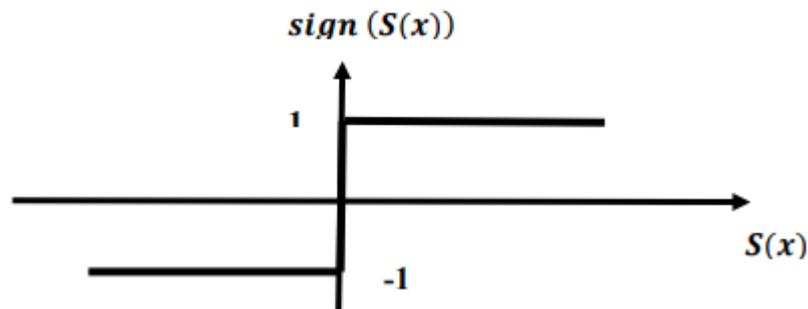


Figure III 2: Fonction sign[36].

$$\Delta U = K_x \text{sign } S(X) \quad (\text{III.13})$$

Donc ; Le signe de K_x est choisi opposé au signe d'est choisi opposé au signe de $\frac{\partial s}{\partial x} [B]$.

III.1.4 Elimination du phénomène du broutement chatternig

En pratique, l'organe de commutation est souvent construit à partir de relais, lesquels peuvent présenter des imperfections telles que des retards de commutation. Dans de telles situations, la trajectoire de phase du régime glissant reste à proximité de la surface de

commutation, entraînant des oscillations indésirables. Ces oscillations compromettent la précision du système tout en menaçant sa stabilité[37].

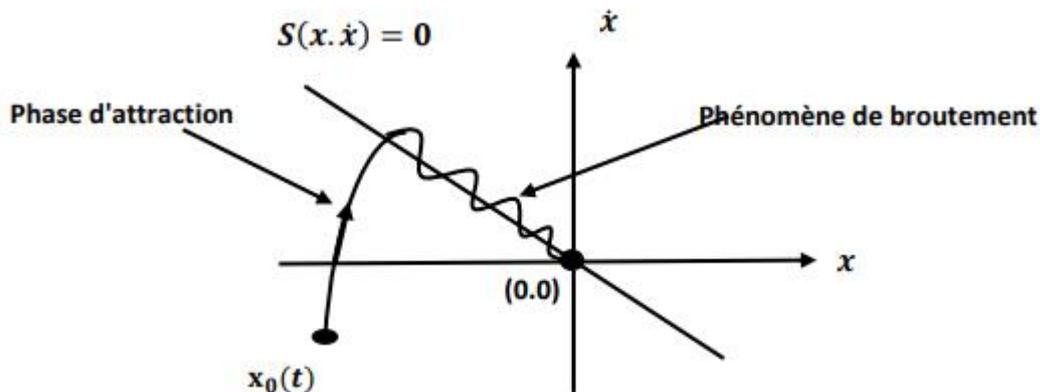


Figure III 3 : Phénomène de broutement [37].

III.1.4.1 Proposition de slotine

L'un des principaux désavantages du réglage par mode de glissement est le phénomène du chattering, car il peut entraîner des dommages aux actionneurs en raison d'oscillations excessivement fréquentes. Cela peut compromettre le fonctionnement et les performances du système. Pour atténuer ces oscillations, plusieurs solutions ont été proposées, telles que le remplacement de la fonction "signe" par une fonction de saturation caractérisée par un ou deux seuils. Cette approche vise à réduire l'amplitude des oscillations, contribuant ainsi à améliorer la stabilité et la fiabilité du système [37].

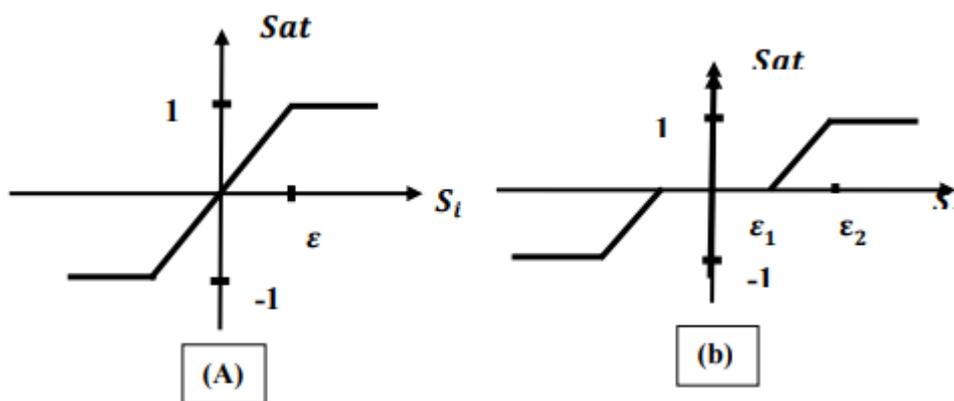


Figure III 4: Fonction T : (A) - un seuil ; (b) - deux seuils (zone morte).

Dans ce cas, la commande devient :

$$Sat(S) \begin{cases} -1 & si & s \leq -\epsilon \\ \frac{s}{\epsilon} & si & -\epsilon < s < \epsilon \\ -1 & si & s \leq -\epsilon \end{cases} \quad (III.14)$$

$$sat(s) \begin{cases} 0 & si & |s| \leq \epsilon 1 \\ \frac{s}{\epsilon} & si & \epsilon 1 < |s| < \epsilon 2 \\ sign(s) & si & s > \epsilon 2 \end{cases} \quad (III.15)$$

III.1.4.2 Proposition de harshima

On peut aussi la remplacer par une fonction «*sign*» par une fonction de lissage appelée «*cont*»

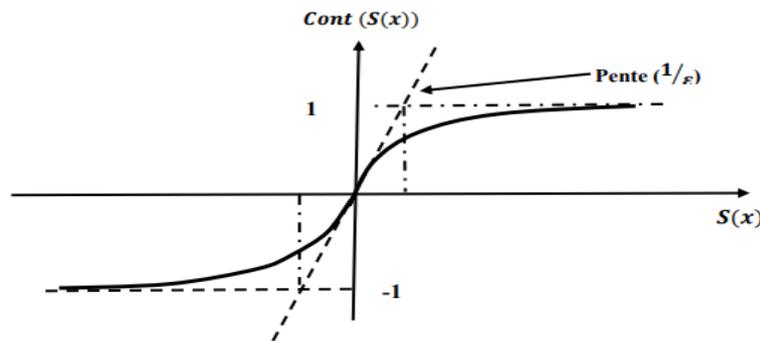


Figure III.5: Fonction Cont (ϵ > et petit).

Dans ce cas, la commande devient : $\Delta U = -K_x cont(\epsilon > et petit)$

$$cont(s) \begin{cases} \frac{s(x)}{|s(x)| + \epsilon} & si & |s| < \epsilon \\ sign(s) & sino \end{cases} \quad (III.16)$$

III.1.5 Structure de commande par mode glissant

III.1.5.1.1 Structure avec la commutation au niveau el organe commande

Le schéma d'une configuration de commande par commutation au niveau de l'organe de commande est illustré dans la figure (III.6). Ce type de structure de commande est largement répandu et couramment utilisé. Il implique une commutation tout ou rien des interrupteurs de puissance, ce qui est communément utilisé dans de nombreuses applications de variateurs de vitesse. Cette approche a également été appliquée à la commande de moteurs pas à pas [38].

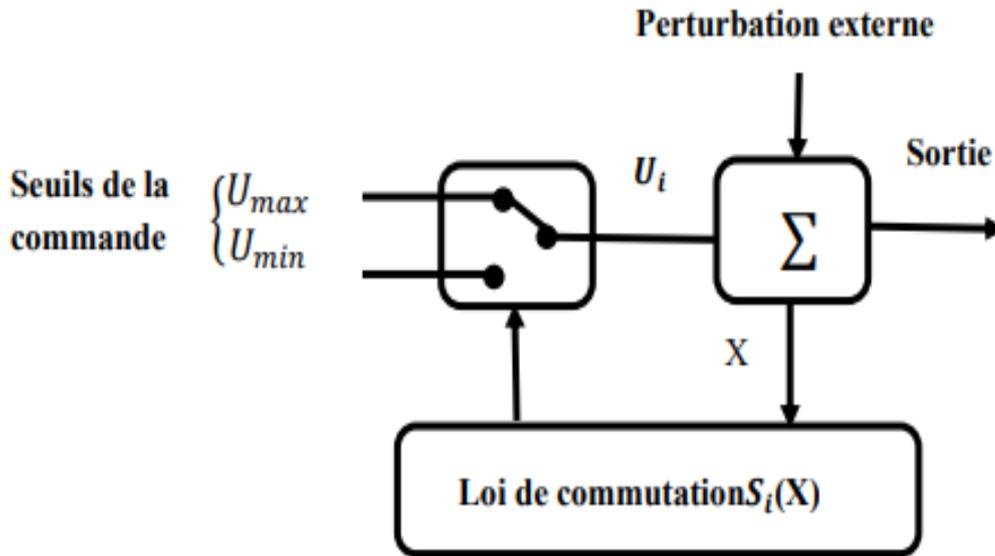


Figure III.6: Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande[38].

III.1.5.2 Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état

Le schéma de cette structure est présenté dans la figure (III.7). Selon des recherches antérieures, cette configuration est la moins contraignante en termes de sollicitation de la commande. Elle a été utilisée dans le contrôle de moteurs à courant continu et à aimants permanents, ainsi que dans celui de machines à induction. Un ouvrage a été dédié à ce type de commande, qui repose sur la commande par contre-réaction d'état classique, où l'ajustement de la dynamique du système est effectué par les gains de réglage. La non-linéarité résulte de la commutation entre ces gains, ce qui crée une commutation au niveau de la dynamique du système[38].

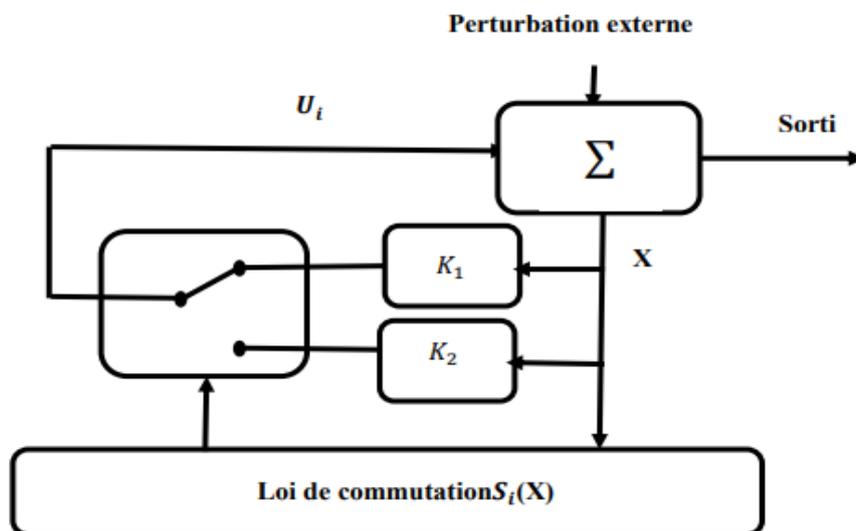


Figure III.7: Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état[38].

III.1.5.3 Structure de régulation avec ajout de la commande équivalence

La Figure III.8 présente le schéma bloc décrivant le principe de fonctionnement de la structure de régulation avec l'incorporation de la commande équivalente.[29] [39] [40].

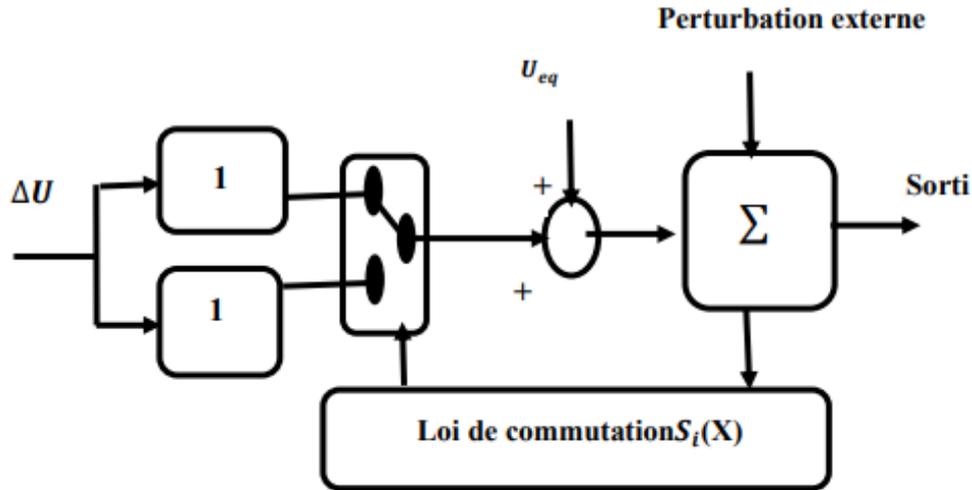


Figure III.8: Structure de régulation par ajout de la commande équivalente[39].

III.1.6 Applications de la commande mode glissant a la MADA

Le modèle utilisé est le modèle à flux statorique orienté présenté précédemment dont les grandeurs électriques sont toutes exprimées dans un repère fixe lié au stator au repère (d,q) [39]. Le modèle d'état est donné comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

- Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques[39] :

$$\begin{cases} P_s^{ref} = -\frac{V_s M}{L_s} I_{rq}^{ref} \\ \varphi_s^{ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s M} - \frac{V_s}{L_s} I_{rd}^{ref} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

$$\begin{cases} I_{rq}^{ref} = -\frac{L_s}{V_s M} P_s^{ref} \\ I_{rd}^{ref} = \frac{V_s}{\omega_s M} - \frac{L_s}{V_s M} Q_s^{ref} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

- Equations des dérivées de courants rotoriques[39]. :

$$\begin{cases} \frac{dI_{rd}}{dt} = \left(V_{rd} - R_r \cdot I_{rd} + g \cdot \omega_s L_r \cdot \sigma I_{rq} \right) \frac{1}{L_r \sigma} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} = \left(V_{rq} - R_r I_{rq} - g \cdot \omega_s \cdot L_r \sigma \cdot I_{rd} - g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \right) \frac{1}{L_r \sigma} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

III.1.6.1 Choix des surfaces de glissants

La puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q , et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d . Pour contrôler la puissance [RR], on prend $n=1$

Les expressions de la surface de contrôle des puissances active et réactive sont [39] :

$$s(P) = (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) \quad (III.21)$$

$$s(Q) = (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) \quad (III.22)$$

III.1.6.2 Conditions de convergence

Pour que les variables choisies convergent vers leurs valeurs de référence, il faut que les deux surfaces de glissement soient nulles [39] :

$$\begin{cases} s(P) = 0 \\ s(Q) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{d}{dt}(I_{rq}^{ref} - I_{rq}) = 0 \\ \frac{d}{dt}(I_{rd}^{ref} - I_{rd}) = 0 \end{cases} \quad (III.23)$$

Lorsque les conditions de convergences sont satisfaites, les puissances active et réactive tendent exponentiellement vers leurs valeurs de références, et pour suivre ces valeurs, il suffit de rendre la surface de glissement attractive et invariante. Le mode glissant est réalisé à condition que la relation d'attractivité de Lyapunov soit inférieure à zéro [RR]; c'est-à-dire $s(x) \cdot \dot{s}(x) \leq 0$.

III.1.6.3 Loi de la commande par mode glissant

L'algorithme de commande est défini par les relations [39] :

$$V_{rq} = V_{rq-Equi} + V_{rq-attr} \quad (III.24)$$

$$V_{rd} = V_{rd-Equi} + V_{rd-attr} \quad (III.25)$$

V_{rq} et V_{rd} : les tensions de commandes.

$V_{rq-Equi}$ et $V_{rd-Equi}$: les tensions de commandes équivalentes.

$V_{rq-attr}$ et $V_{rd-attr}$: les tensions de commandes de commutations.

- Contrôle de la puissance active :

Pour contrôler la puissance active, on prend $r = 1$. L'expression de la surface de glissement devient [39]:

$$s(P) = (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) \quad (III.26)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{s}(P) = (\dot{I}_{rq}^{ref} - \dot{I}_{rq}) \quad (III.27)$$

En remplaçant les dérivées des courants et des courants de références I_{rq}^{ref} et I_{rq} par leurs expressions données par les équations (III. 32) et (III. 33), on obtient [39] :

$$\dot{s}(P) = \left(-\frac{L_s}{MV_s} P_{rq}^{ref} - \frac{1}{L_r \sigma} (V_{rq} - R_r I_{rq} - g w_s L_r I_{rd} - g \frac{MV_s}{L_s}) \right) \quad (III.28)$$

$$\dot{s}(P) = \left(-\frac{L_s}{MV_s} P_{rq}^{ref} - \frac{1}{L_r \sigma} V_{rq} - \frac{1}{L_r \sigma} (-R_r I_{rq} - g w_s L_r I_{rd} - g \frac{MV_s}{L_s}) \right) \quad (III.29)$$

$$\dot{S}(P) = -v_1 \text{sign}(s(P)) \quad (III.30)$$

$$-\frac{L_s}{MV_s} P_{rq}^{ref} - \frac{1}{L_r \sigma} V_{rq} - \frac{1}{L_r \sigma} (-R_r I_{rq} - g w_s L_r I_{rd} - g \frac{MV_s}{L_s}) = -v_1 \text{sign}(s(P)) \quad (III.31)$$

$$V_{rq} = -\frac{L_s L_r \sigma}{MV_s} P_{rq}^{ref} - (-R_r I_{rq} - g w_s L_r \sigma I_{rd} - g \frac{MV_s}{L_s}) + L_r \sigma v_1 \text{sign}(s(P)) \quad (III.32)$$

$$V_{rq} = -\frac{L_s L_r \sigma}{MV_s} P_{rq}^{ref} + R_r I_{rq} + g w_s L_r \sigma I_{rd} + g \frac{MV_s}{L_s} + L_r \sigma v_1 \text{sign}(s(P)) \quad (III.33)$$

$$\begin{cases} V_{rq-Equi} = -\frac{L_s L_r \sigma}{MV_s} P_{rq}^{ref} + R_r I_{rq} + g w_s L_r \sigma I_{rd} + g \frac{MV_s}{L_s} \\ V_{rq-attr} = L_r \sigma v_1 \text{sign}(s(P)) \end{cases} \quad (III.34)$$

- Contrôle de la puissance réactive :

De la même manière que précédemment, pour contrôler la puissance réactive on prend

$r = 1$. Expression de la surface de glissement déviant[39]

$$s(Q) = (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) \quad (III.35)$$

Sa dérivée est:

$$\dot{s}(Q) = (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) \quad (III.36)$$

En remplaçant les dérivées des courants et des courants de références I_{rq}^{ref} et I_{rd} leurs expressions données par les équations (III. 32)(III. 33), on obtient :

$$\dot{s}(Q) = \left(\left(\frac{V_s}{w_s M} - \frac{L_s}{V_s M} Q_S^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \sigma} (V_{rd} - R_r I_{rd} + g w_s L_r \sigma I_{rq}) \right) \quad (III.37)$$

$$\dot{s}(Q) = \left(\left(\frac{V_s}{w_s M} - \frac{L_s}{V_s M} Q_S^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \sigma} V_{rd} - \frac{1}{L_r \sigma} (-R_r I_{rd} + g w_s L_r \sigma I_{rq}) \right) \quad (III.38)$$

$$\dot{s}(Q) = -v_2 \text{sign}(s(Q)) \quad (III.39)$$

$$\left(\frac{V_s}{w_s M} - \frac{L_s}{V_s M} Q_S^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \sigma} (-R_r I_{rd} + g w_s L_r \sigma I_{rq}) = -v_2 \text{sign}(s(Q)) \quad (III.40)$$

$$V_{rd} = L_r \sigma \left(\frac{V_s}{w_s M} - \frac{L_s}{V_s M} Q_S^{ref} \right) - (R_r I_{rd} + g w_s L_r \sigma I_{rq}) + L_r \sigma v_2 \text{sign}(s(Q)) \quad (III.41)$$

III.1.7 Résultats

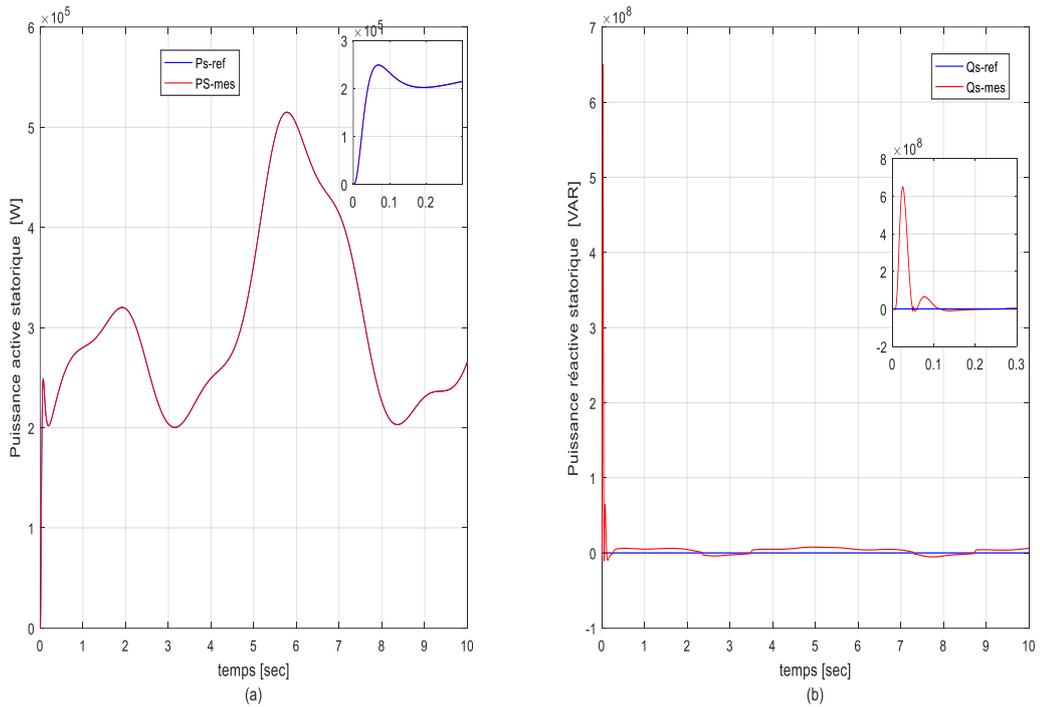


Figure III.10 : a) Puissance active statorique de la MADA.

b) Puissance réactive statorique de la MADA.

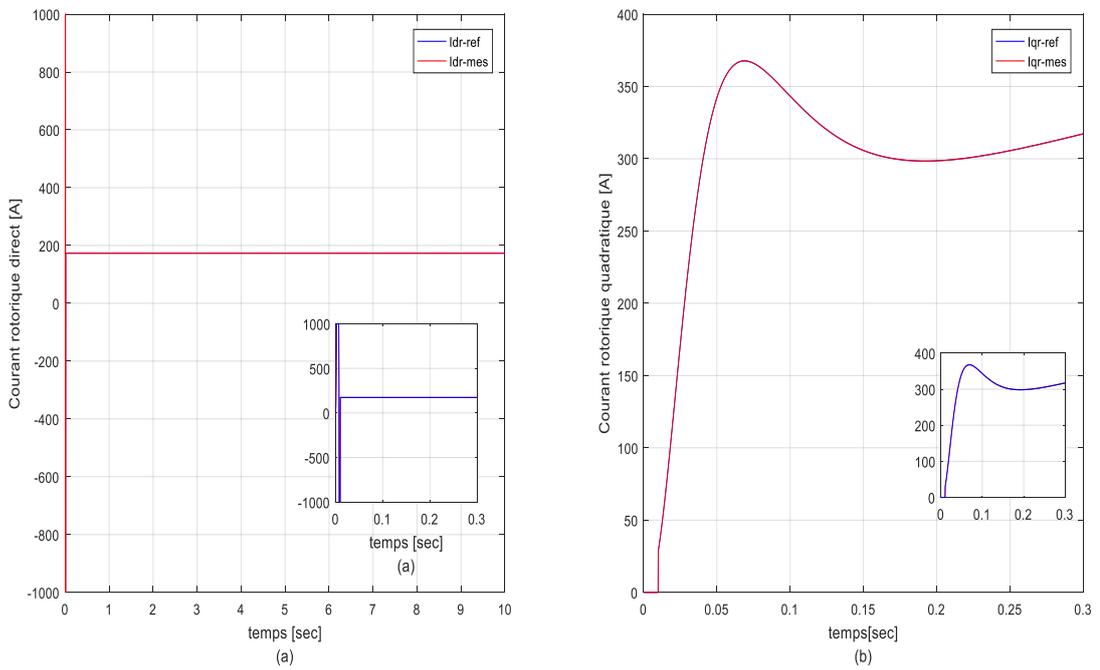


Figure III.11 : a) Courant rotorique quadratique de la MADA.

b) Courant rotorique direct de la MADA.

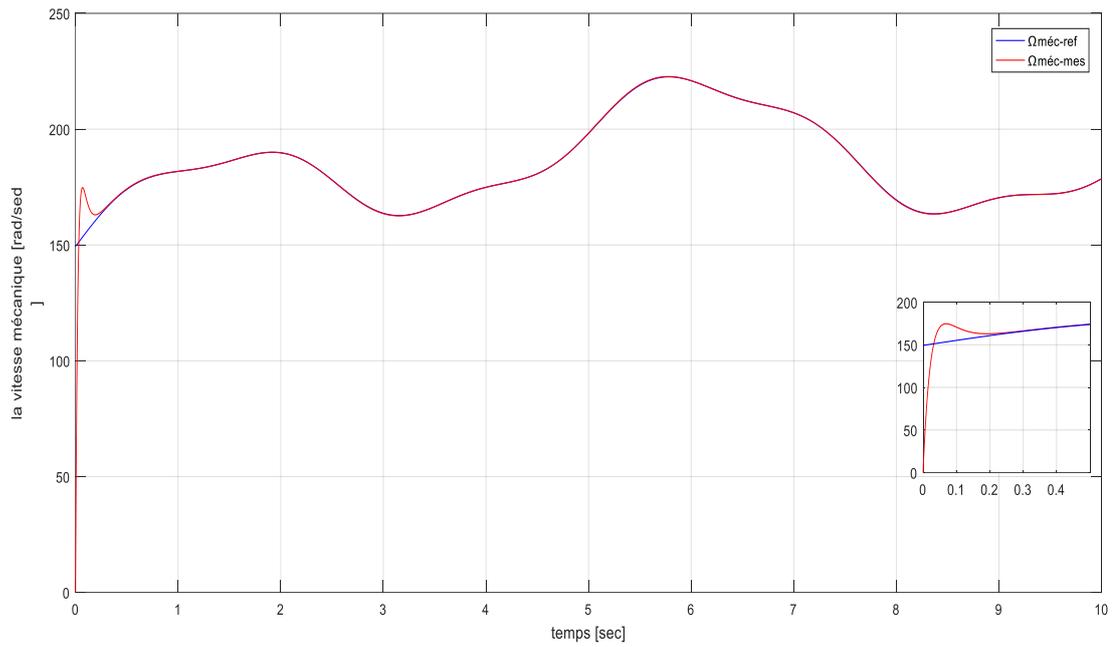


Figure III.12 : La vitesse mécanique de la turbine.

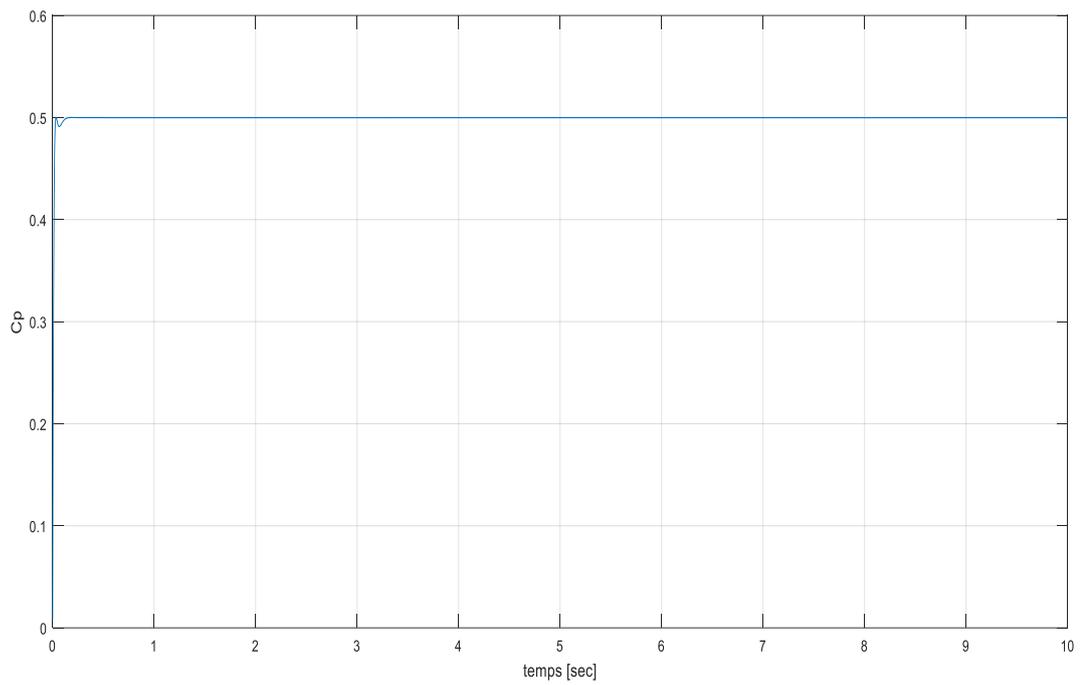


Figure III.13 : Coefficient de puissance.

III.1.8 Interprétations

A vitesse du vent dépassant 7.1 m/s, l'algorithme tend à maintenir une référence de puissance ne dépassant pas la puissance nominale de 0.54MW. Cette puissance va être appliquée à la MADA comme illustré à la Figure (III 10) là où on peut voir une amélioration remarquable des résultats obtenus par mode glissant par rapport à la commande vectorielle à savoir :

- une réponse rapide pour le régime transitoire et pour le changement des consignes
- une minimisation maximale d'erreur entre les valeurs de consignes et celle mesurées (presque nulle) ;
- Une réduction importante des oscillations des puissances.

Les Figure (III 12) représenter La vitesse mécanique de la turbin et figure (III12) représente Coefficient de puissance justifiant le fonctionnement en mode MPPT. Les courants rotoriques direct et quadratique qui sont les images de la puissance réactive et active statoriques, respectivement sont bien maintenus dans leurs références ce qui constitue un moyen de protection de la MADA. D'après les courbes des figure (III.10) Les résultats obtenus par la simulation, montre clairement que l'utilisation de la commande arrive à maintenir les puissances actives et réactive à leurs valeurs désirées.

III.2 Commande par logique floue

Cette méthode de commande représente une solution attrayante pour obtenir des performances efficaces dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable utilisant la machine asynchrone double alimentation. Notre objectif est d'appliquer cette approche de commande non linéaire afin de surveiller et d'améliorer la qualité de l'énergie produite. Pour ce faire, nous prévoyons d'adopter la structure de la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance, en substituant les régulateurs proportionnels-intégrateurs (PI) par des régulateurs flous. Dans la suite de notre étude, nous aborderons les concepts fondamentaux de la logique floue, notamment les ensembles flous, les fonctions d'appartenance, les variables linguistiques et les opérateurs caractéristiques de cette approche. Ensuite, nous détaillerons la structure de la commande floue, et nous expliquerons les processus de fuzzification, d'inférence floue et de défuzzification qui permettent de manipuler efficacement la commande pour obtenir un réglage indépendant des puissances active et réactive[39].

III.2.1 Introduction

La logique floue, introduite en 1965 par Lotfi Zadeh, est une description mathématique basée sur la théorie des ensembles flous. À ses débuts, cette approche n'a pas été largement acceptée en raison de la prédominance des ordinateurs binaires. Contrairement à ces derniers, la logique floue permet de traiter des variables dont les valeurs ne sont pas strictement binaires, mais peuvent varier dans une plage continue entre 0 et 1. Son objectif principal est similaire à celui de l'automatique classique, à savoir la gestion de processus en fonction de consignes données, mais elle tire souvent parti des connaissances des experts ou des opérateurs qualifiés travaillant sur le processus. Cette approche permet de prendre en compte des aspects plus nuancés et des variables moins précises, ce qui peut être avantageux dans des domaines où les données ne sont pas clairement définies ou fluctuent dans le temps [41].

III.2.2. Principe de la logique floue

La logique floue est une forme de logique à valeurs multiples où les valeurs de vérité des variables peuvent prendre des nombres réels entre 0 et 1, ce qui est considéré comme "flou". En comparaison, dans la logique booléenne traditionnelle, les valeurs de vérité des variables ne peuvent être que 0 ou 1, souvent désignées comme des valeurs "nettes". La logique floue permet de gérer le concept de vérité partielle, où la valeur de vérité peut se situer entre

totalemment vrai et totalemment faux. De plus, lorsqu'on utilise des variables linguistiques, ces degrés de vérité peuvent être gérés par des fonctions spécifiques, appelées fonctions d'appartenance, qui décrivent la manière dont un élément appartient à un ensemble flou [42].

III.2.3. Structure d'un régulateur flou

Le schéma synoptique général d'un contrôleur flou est représenté dans la figure suivante :

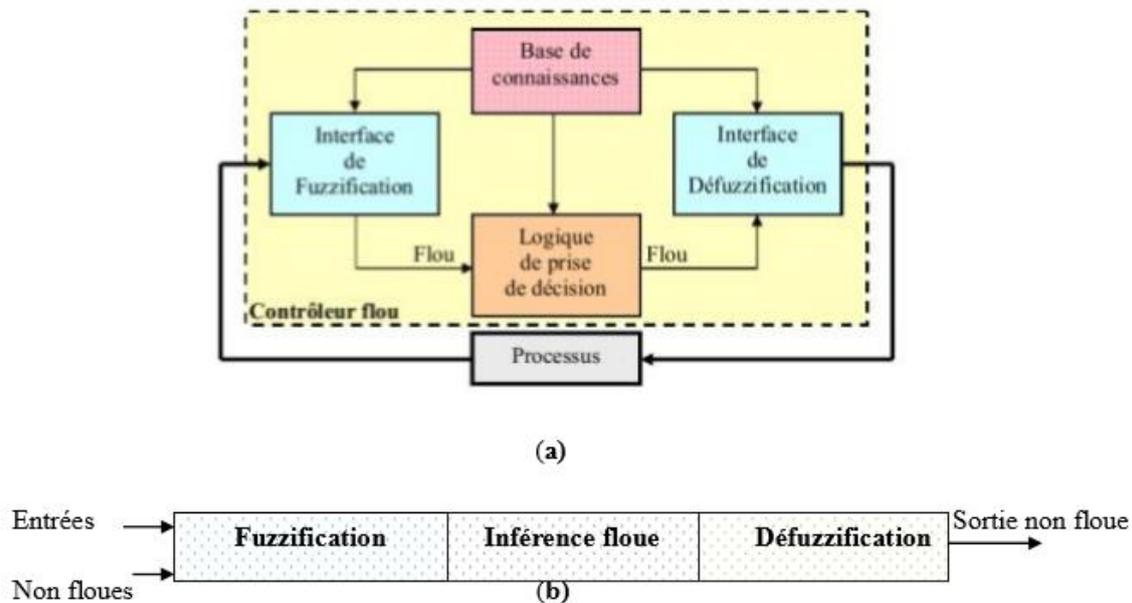


Figure III.14 : a) Schéma synoptique d'un contrôleur flou. b) Configuration d'un contrôleur flou [42]

Comme il est indiqué sur la Figure (III.14), le régulateur par logique floue est composé donc de quatre éléments de base :

- Fuzzification

L'objectif de la fuzzification est de convertir les valeurs numériques des grandeurs physiques d'entrée en des grandeurs floues représentées par des termes linguistiques ou symboliques, afin de les rendre compatibles avec les étapes d'inférence de la commande floue. Les valeurs physiques sont normalisées dans une plage de variation typiquement entre -1 et 1, appelée univers de discours, puis converties en ensembles flous caractérisés par des fonctions d'appartenance linguistiques. Le nombre d'ensembles dépend de la précision requise et des spécifications du réglage souhaité. Deux approches principales de fuzzification sont couramment utilisées : la fuzzification singleton, qui attribue à chaque grandeur d'entrée une seule catégorie linguistique, et la fuzzification non-singleton, qui permet à une grandeur

d'entrée de contribuer à plusieurs ensembles flous simultanément en fonction de sa valeur d'appartenance respective.[30][43].

- Moteur d'inférence floue

Les méthodes d'inférences permettent la réalisation des différents opérateurs ET, OU, ALORS, ... intervenant dans les règles d'inférences et s'appliquant aux fonctions d'appartenances [41] [44].

La première méthode d'inférence Max- Min(Méthode de Mamdani)Et la deuxième d'inférence Max- Produit(Méthode de Larsen) La troisième méthode de d'inférence Somme-Produit[41] [44].

Le tableau suivant présente les méthodes de raisonnement logique « ET, OU, et ALORS»

Operateurs flous Méthodes d'inférence	ET	OU	ALORS
Max-Min	Minimum	Maximum	Minimum
Max-Produit	Minimum	Maximum	Produit
Somme-Produit	Produit	Moyenne	Produit

Tableau III.1 :les méthodes de raisonnement logique[46].

-Base de connaissances (règles) :

La base de connaissances, dans le cadre de la logique floue, englobe toutes les informations pertinentes concernant le domaine d'application et les objectifs de commande prévus. Elle est généralement constituée des éléments suivants [46] [47] :

a) Une base de données : Cette partie fournit les définitions nécessaires utilisées par les règles floues. Elle comprend notamment :

La normalisation des univers de discours, qui consiste à définir la plage de valeurs acceptables pour les variables d'entrée et de sortie du système.

Le choix des fonctions d'appartenance, qui déterminent comment les valeurs des variables sont associées à des termes linguistiques ou des ensembles flous.

b) Une base de règles floues : Cette section caractérise la stratégie de commande à travers un ensemble de règles conditionnelles. Elle comprend :

Le choix des variables d'entrée, qui sont les paramètres utilisés pour évaluer l'état du système. La source des règles floues de contrôle, qui sont des déclarations conditionnelles décrivant comment les variables d'entrée influent sur les variables de sortie et définissant ainsi le comportement du système [46] [47].

En combinant ces deux éléments, la base de connaissances permet au système basé sur la logique floue de prendre des décisions et de contrôler efficacement le processus en fonction des conditions et des objectifs spécifiques [46] [47].

III.2.4 Eléments de base de la logique floue

III.2.4.1 Univers De discours

L'univers de discours, dans le contexte de la logique floue, représente l'ensemble des valeurs réelles qu'une variable floue, généralement notée x , peut prendre. Le degré d'appartenance de chaque élément x à un ensemble flou A est représenté par la fonction $\mu_A(x)$, où x est la valeur de x [43].

En pratique, le domaine de définition de la fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ peut être restreint à un sous-ensemble de l'univers de discours. Ainsi, plusieurs fonctions d'appartenance peuvent caractériser différents sous-ensembles flous [43].

En associant tous ces sous-ensembles flous de l'univers de discours, on obtient l'ensemble flou complet de la variable floue x . Cette approche permet de modéliser de manière flexible les concepts et les variables dans un système basé sur la logique floue, en tenant compte de la variabilité et de l'incertitude des données [43].

III.2.4.2 Fonctions d'appartenances

Les fonctions d'appartenance sont un élément clé de la logique floue. Elles permettent de décrire la manière dont les éléments d'un ensemble flou appartiennent à cet ensemble avec un degré d'appartenance. Chaque ensemble flou est associé à une fonction d'appartenance qui attribue à chaque élément un nombre réel compris entre 0 et 1, représentant le degré d'appartenance de cet élément à l'ensemble.

Les fonctions d'appartenance peuvent prendre différentes formes en fonction du type d'ensemble flou considéré. Voici quelques formes couramment utilisées :

- Monotones (décroissantes ou croissantes), comme la montre les figure (III.15 et III.16).
- Triangulaires (figure III.17.a).
- Trapézoïdales (figure III.17.b).
- En forme de cloche (Gaussiennes), (figure III.17.c).

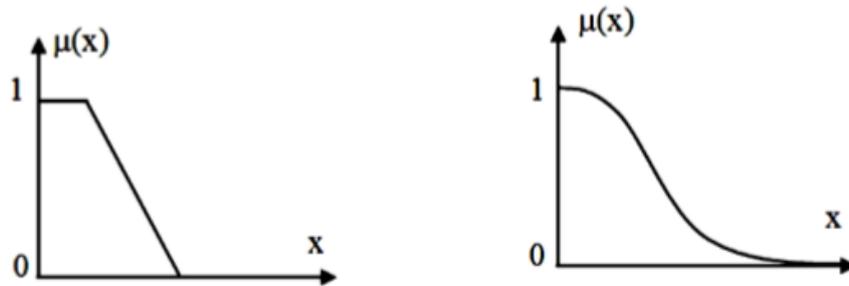


Figure III.15: Exemples des fonctions d'appartenance monotones décroissantes.

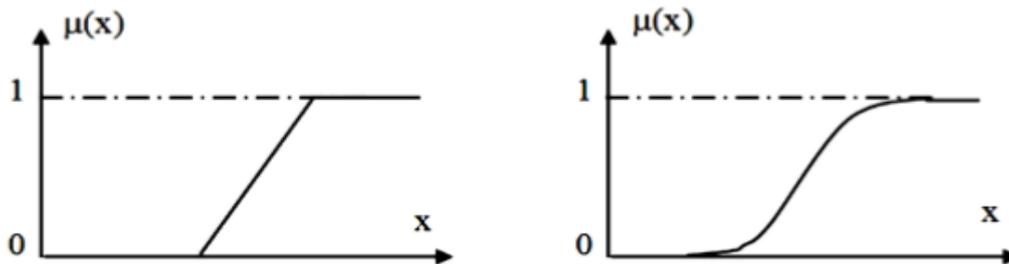


Figure III.16: Exemples des fonctions d'appartenance monotones croissantes.

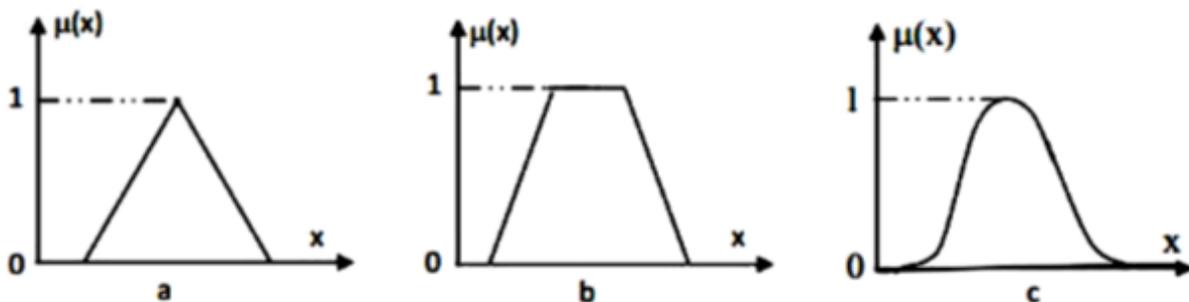


Figure III.17 : Exemples des fonctions d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale et gaussienne).

III.2.4.3 Formulation mathématique des fonctions d'appartenance



Figure III 18: Fonctions d'appartenance triangulaire et trapézoïdale.

Fonction triangulaire : L'allure de cette fonction est définie par trois paramètres {a, b, c}

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{III.44})$$

Fonction trapézoïdale : Elle est définie par quatre paramètres {a, b, c, d}

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (\text{III.45})$$

III.2.5 Variables linguistiques

Chaque variable linguistique en logique floue est caractérisée par un triplé : le nom de la variable (comme "âge", "température", "vitesse"), l'univers de discours dans lequel elle opère, et l'ensemble des valeurs linguistiques qu'elle peut prendre. Par exemple, si la vitesse est une variable linguistique, ses valeurs peuvent être décrites par des termes tels que "lente", "moyenne", "rapide", etc. Ces termes permettent de décrire de manière qualitative les valeurs de la variable dans un langage compréhensible par les humains[48].

III.2.6 Opérateurs de la logique floue

Dans la théorie des ensembles classiques, les opérations telles que l'égalité, l'inclusion, ainsi que les concepts d'intersection, d'union et de complémentation sont exprimés par les opérateurs ET, OU et NON dans la logique booléenne. Ces mêmes opérations existent également en logique floue, où des opérateurs similaires aux opérateurs de la logique booléenne sont conçus dans le but de maintenir un ensemble de propriétés spécifiques, tout en permettant de retrouver les opérations de base de la logique classique [48][49].

III.2.7 Application de la commande par la logique floue à la MADA

Pour mettre en œuvre cette méthode dans notre système, nous avons adopté la même architecture de commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance décrite dans le chapitre précédent, mais avec une modification consistant à remplacer les régulateurs proportionnels-intégrateurs (PI) par des régulateurs flous du même type (régulateur de type Mamdani à sept classes), qui partagent les mêmes fonctions d'appartenance. La variation se situe au niveau des paramètres de normalisation (facteurs d'échelle). Le fonctionnement de ces régulateurs est similaire à celui des contrôleurs de courant [41] [50].

L'objectif principal de notre étude est de mettre en œuvre cette commande afin de réguler de manière continue et indépendante les puissances active et réactive produites par la machine asynchrone à flux orienté. Pour cela, nous avons réalisé des simulations en supposant les mêmes conditions et en utilisant les mêmes profils que ceux précédemment utilisés. L'objectif est d'évaluer les nouvelles performances en termes de suivi de consigne, de régulation, ainsi que la robustesse du système sous cette nouvelle commande [41] [50].

- Pour la boucle de courant, les variables d'entrées sont :

L'erreur de courant

$$e_I = I_{rq}^{ref} - I_{rq} \tag{III.46}$$

La variation de l'erreur de courant $\Delta e_I = e_I(k) - e_I(k - 1)$ (III.47) Le schéma bloc de la commande avec les régulateurs floue est illustré par la Figure(III.19)

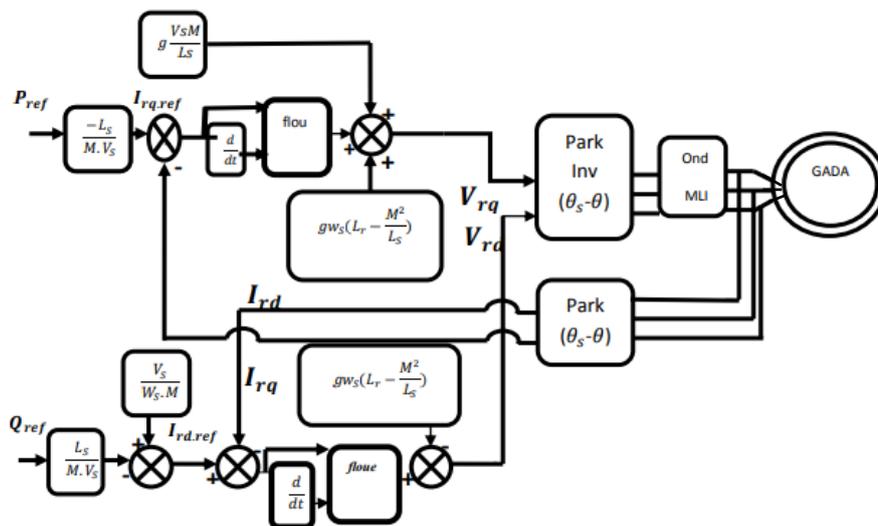


Figure III.19 : Schéma bloc de la structure de commande floue.

III.2.8 Structure de base d'un contrôleur flou de courant

Dans le système examiné dans cette étude, deux régulateurs indépendants basés sur la logique floue sont mis en œuvre pour générer les tensions de référence nécessaires afin de contrôler les puissances active et réactive dans le stator de la MADA (P_s, Q_s).

Comme illustré dans la figure (III.7), dans le contrôleur flou CF, la valeur de référence $r(t)$ est comparée à la valeur réelle (mesurée) $y(t)$ pour calculer l'erreur $e(t)$. De plus, cette erreur est comparée avec l'erreur précédente $e(t-1)$ pour obtenir la variation de l'erreur $\Delta e(t)$.

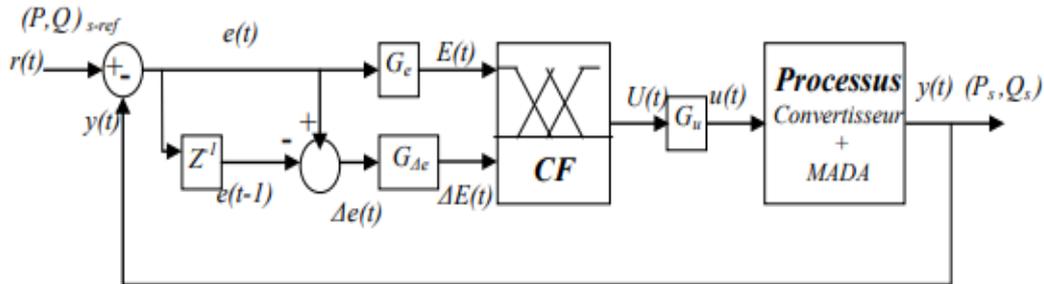


Figure III 20: schéma synoptique d'un régulateur flou des puissances active et réactive.

Les deux entrées du contrôleur flou (CF) sont l'erreur de la puissance et sa variation.

La sortie du régulateur correspond à la commande. Ces trois grandeurs sont normalisées comme suit :

$$E = G_e e, \quad \Delta e = G_{\Delta e}, \quad U = G_u U$$

Ou, $G_e, G_{\Delta e}$ et G_u sont des facteurs d'échelle ou des gain de normalisation associés à $e(t), \Delta e(t), u(t)$ respectivement.

Les grandeurs $[E(t), \Delta e(t), u(t)]$ indicées sont les donc les grandeurs normalisées à l'entrée et à la sortie de CF.

L'erreur et sa variation est donné par l'expression suivante :

$$E(t) = G_e[r(t) - y(t)] \tag{III.48}$$

$$\Delta E(t) = G_{\Delta e}[e(t) - e(t - 1)] \tag{III.49}$$

❖ **Bloc de fuzzification de l'erreur et de sa variation, pour**

- Le choix des variables linguistiques (NG : négatif grand ; NP : négatif petit ; EZ : environ de zéro ; PP : positif petit ; PG : positif grand)
- Le choix de la forme des fonctions d'appartenances (forme trapézoïdale).

❖ Bloc de défuzzification de la variation de la commande

Lors du calcul de la sortie floue, celle-ci doit être convertie en une valeur numérique (volume réel). Il existe différentes manières de réaliser cette transition. Dans cette étape, la valeur réelle de la variable de sortie est obtenue en utilisant la méthode du centre de gravité. [30][51].

Les ensembles flous des variables d'entrée, de sortie et leurs fonctions d'appartenance sont présentés comme suit :

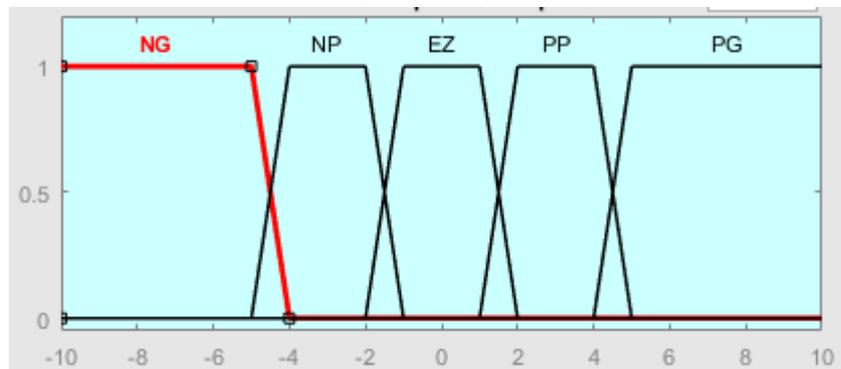
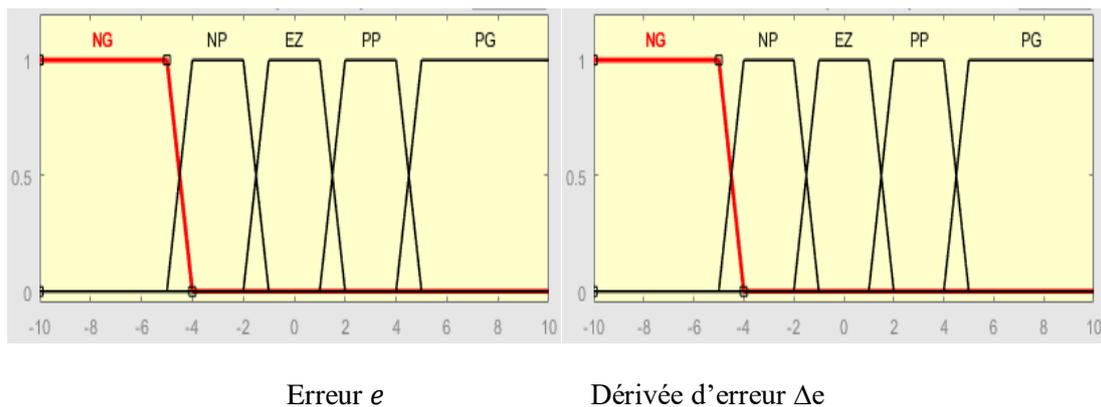


Figure III 21: Les fonctions d'appartenance utilisées par le contrôle.

- Choix des gains de normalisation : $K_e \text{ initial} = \frac{1}{|2 \times e_{max}|}$ et $K_{de} \text{ initial} = \frac{1}{|\Delta e_{max}|}$

❖ Table des règles

La table des règles définit les conditions d'inférence pour le système de contrôle flou. Chaque ligne de la table correspond à une règle de décision basée sur les valeurs des variables d'entrée et de sortie. Les règles déterminent comment les entrées sont traduites en sorties en fonction des connaissances expertes ou des exigences du système.

E ΔE	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	NG	NG	NP	NP	ZE
NP	NG	NP	NP	ZE	PP
ZE	NP	NP	ZE	PP	PP
PP	NP	ZE	PP	PP	PG
PG	ZE	PP	PP	PG	PG

Table III 2: Table des règles de décision pour le contrôleur des puissances.

- ❖ D'un bloc intégrateur utilisé pour intégrer la variation de la commande numérique résultante et de son application au système que nous voulons commander.

III.2.9 Résultats

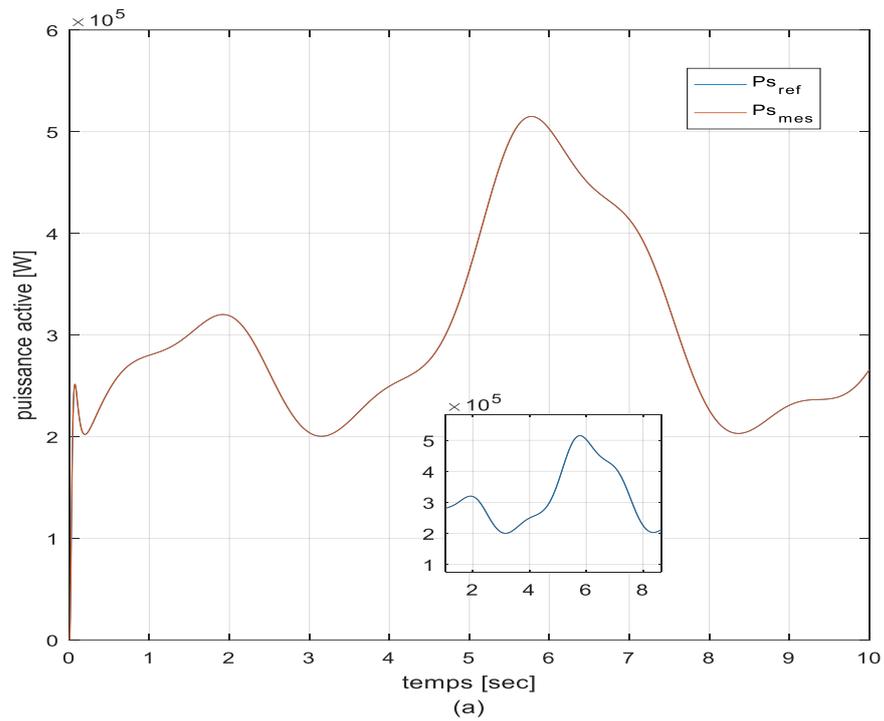


Figure III22) Puissance active statorique de la MADA.

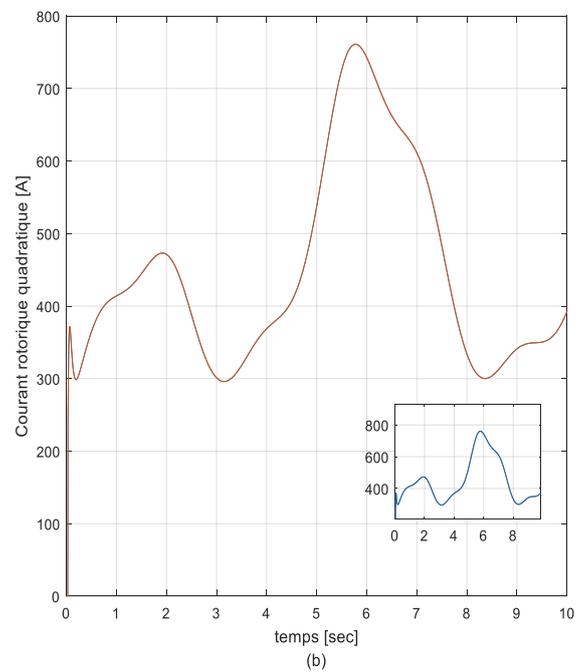
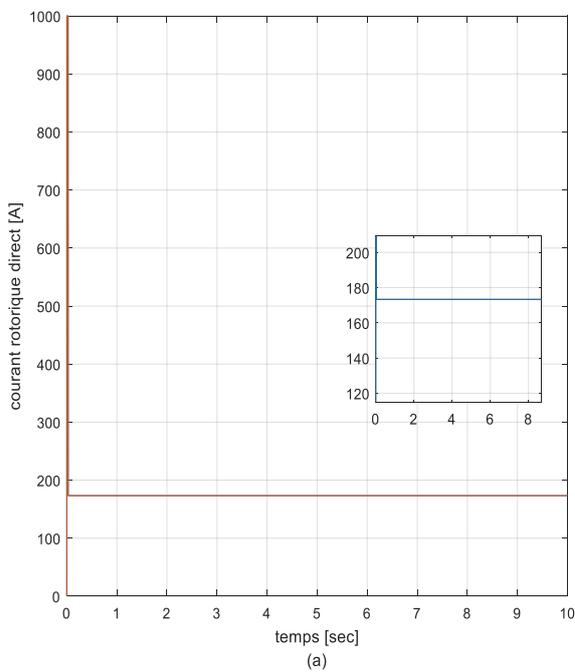


Figure III 23 a) Courant rotorique direct de la MADA. b) Courant rotorique quadratique de la MADA.

III.2.10 Interprétations

On peut voir qu'il y a un suivi parfait de la courbe de mesure par rapport à la courbe de référence, que se soit pour les courants rotoriques ou pour les puissances où la valeur la plus élevée de la puissance est enregistrée à 0.52 MW entre 5 et 7 seconds et la valeur la plus basse enregistrée est à 0.2MW.

Les résultats des simulations indiquent clairement que la nouvelle commande présente des performances supérieures aux commandes précédentes (régulateur PI et mode glissant).

Les erreurs de suivi sont faibles et les dépassements sont acceptables, tandis que les temps de réponse du régime transitoire sont réduits.

Ces simulations mettent en évidence la robustesse de la commande floue en termes de découplage.

La commande floue se distingue par sa robustesse, souplesse, implémentation rapide.

III.2.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux techniques de commande différentes pour contrôler de manière indépendante les puissances active et réactive générées par la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans un système de production d'énergie éolienne.

Dans un premier temps, nous avons étudié la commande par mode glissant, en définissant son principe de commande et en expliquant sa conception (choix de la surface de commutation et de la loi de commande). Nous avons également abordé le phénomène de "chattering" qui résulte de cette loi de commande. L'application de cette commande à flux orienté sur le système nous a permis de régler de manière indépendante les puissances produites par la MADA. Les résultats des simulations ont montré que la technique du mode glissant présente de bonnes performances en termes de dépassement, de temps de réponse et de précision de poursuite. Elle offre une meilleure fiabilité par rapport à la commande classique.

Dans la deuxième étape, nous avons présenté la technique de commande par logique floue. Nous avons introduit les notions théoriques de la logique floue, telles que les fonctions d'appartenance, les variables linguistiques et les opérateurs utilisés dans ce type de logique. Ensuite, nous avons présenté la structure de la commande floue, qui comprend les étapes de fuzzification, d'inférence floue et de défuzzification, permettant de synthétiser une commande floue à sept fonctions d'appartenance pour le réglage indépendant des puissances générées. En

conclusion, la commande par logique floue, basée sur des régulateurs flous, offre une robustesse en boucle fermée à tout instant, ce qui en fait une méthode efficace.

Les deux techniques de commande présentées, à savoir la commande par mode glissant et la commande par logique floue, ont démontré de bonnes performances en termes de poursuite de consigne et de temps de réponse dans le contrôle indépendant des puissances active et réactive générées par la MADA en vue de la production d'énergie éolienne.

Conclusion General

Le but de ce travail était l'étude et simulation d'un système de production d'énergie éolienne. Nous avons modélisé la machine asynchrone double alimentation ensuite utiliser ces modèles pour élaborer trois stratégies de commande qui permettent l'amélioration de la qualité de production de l'énergie électrique.

Dans le premier chapitre, nous avons entamé ce travail par un rappel sur l'énergie éolienne et les systèmes utilisées pour produire cette énergie, Puis, on a présenté une description générale du système choisi pour notre étude.

Le deuxième chapitre était consacré à la modélisation complète des composants du système, en mettant l'accent sur la machine asynchrone à double alimentation connectée au réseau. Nous avons appliqué la commande vectorielle, qui permet de contrôler les grandeurs statoriques en fonction des grandeurs rotoriques, assurant ainsi un pilotage efficace de la machine. Cette technique a été utilisée pour réguler de manière indépendante les échanges de puissance statorique avec le réseau. Les simulations numériques ont démontré l'efficacité de cette commande. Pour améliorer davantage les performances, deux autres techniques de commande ont été développées et présentées dans le troisième chapitre.

La première technique est la commande par mode glissant, pour laquelle nous avons exposé les principes théoriques avant de l'appliquer au système. La seconde est la commande par logique floue, pour laquelle nous avons rappelé les concepts de base de la théorie de la commande floue, puis nous l'avons appliquée à la même structure que la commande vectorielle, en remplaçant les régulateurs PI par des régulateurs flous.

Ces deux nouvelles techniques de commande avaient pour objectif de contrôler de manière indépendante les puissances active et réactive générées par la machine asynchrone à double alimentation. Les résultats des simulations ont confirmé les bonnes performances de ces commandes.

En résumé, ce travail a porté sur la modélisation et la simulation d'un système de production d'énergie éolienne utilisant la machine asynchrone à double alimentation. Différentes techniques de commande, telles que la commande vectorielle, la commande par mode glissant et la commande par logique floue, ont été développées pour améliorer la qualité de la production d'énergie électrique. Les simulations ont démontré l'efficacité de ces commandes dans le contrôle indépendant des puissances active et réactive

Suggestions et perspectives

Afin d'améliorer les résultats on peut appliquer une commande hybride entre glissant-flou.

La commande hybride combinant la logique floue et le mode glissant permet d'améliorer le contrôle des systèmes dynamiques. Ce système exploite la capacité d'adaptation et de traitement de l'incertitude du sol en rondins, ainsi que la précision et la réactivation du mode glissant.

Le flux logique permet de présenter les connaissances et les variables avec des valeurs non précises, qui permettent de gérer l'incertitude et les variations dans les entrées et les environnementales du système. Le mode glissant ajuste le contrôleur pour réduire l'écart entre la valeur désirée et la valeur réelle de la variable contrôlée. Cela vous permet d'observer une réponse rapide et précise du système, en raison de la présence de changements rapides ou d'incertitudes.

Cette approche permet d'obtenir d'excellentes performances et une adaptation efficace aux différentes variations et conditions du système.

Résumé

Le contrôle avancé des éoliennes à vitesse variable représente une avancée majeure dans le domaine de l'énergie éolienne. En optimisant la régulation de la vitesse de rotation et en utilisant des technologies de contrôle avancées et des mécanismes d'intégration pour optimiser et gérer les fluctuations du vent, cette approche augmente l'efficacité énergétique et la production d'électricité. De plus, la surveillance et les diagnostics en temps réel garantissent une plus grande fiabilité et aident à anticiper les problèmes potentiels. Ainsi, le contrôle avancé contribue à maximiser les performances des éoliennes à vitesse variable, favorisant ainsi l'exploitation durable des ressources éoliennes pour la production d'énergie renouvelable.

Mots clés :

Eolienne, MPPT, machine asynchrone à double alimentation, mode glissant, logique floue.

Summary

The advanced control of variable speed wind turbines represents a major advance in the field of wind energy. By optimizing rotational speed regulation, and using advanced control technologies and integration mechanisms to optimize and manage wind fluctuations, this approach increases energy efficiency and electricity production. In addition, real-time monitoring and diagnostics ensure greater reliability and help anticipate potential problems. Thus, advanced control contributes to maximizing the performance of variable speed wind turbines, thus promoting sustainable exploitation of wind resources for renewable energy production.

Keywords :

Wind power, maximum power point tracking, doubly fed induction generator, sliding mode, fuzzy logic.

ملخص

يمثل التحكم المتقدم في توربينات الرياح المتغيرة السرعة تقدمًا كبيرًا في مجال طاقة الرياح. من خلال تحسين تنظيم سرعة الدوران، واستخدام تقنيات التحكم المتقدمة وآليات التكامل لتحسين إدارة تقلبات الرياح، يزيد هذا النهج من كفاءة الطاقة وإنتاج الكهرباء. بالإضافة إلى ذلك، تضمن عمليات المراقبة والتشخيص في الوقت الفعلي قدرًا أكبر من الموثوقية وتساعد في توقع المشاكل. وبالتالي، يساهم التحكم المتقدم في تعظيم أداء توربينات الرياح المتغيرة السرعة، وبالتالي تعزيز الاستغلال المستدام لموارد الرياح لإنتاج الطاقة المتجددة.

الكلمات الرئيسية:

نظام طاقة الرياح، أقصى نقطة قوة تتبع، المولدة غير المتزامنة المضاعفة التغذية. الوضع المنزلق، المنطق الغامض

ANNEXE A

Paramètres de la chaîne de conversion

I.1 La turbine :

- Nombre de pales=3.
- Rayon de la turbine : $R=35.25$ m.
- Gain du multiplicateur de vitesse : $G=90$.
- Inertie de l'arbre (Turbine+MADA) : $t_{J_tot}= 1000$ kg/m².
- Densité volumique de l'air $\rho =1.22$ Kg/m³.

I.2 la machine asynchrone à double alimentation :

- Puissance nominale : $P_MADA=1.5$ MW.
- Résistance statorique : $R_s =0.012\Omega$.
- Résistance rotorique : $R_r =0.021\Omega$.
- Inductance mutuelle : $L_m =0.035$ H.
- Inductance statorique : $L_s=0.035+2.037.10^{-4}$ H.
- Inductance rotorique : $L_r=0.035+1.75.10^{-4}$ H.
- Le nombre de pair de pôles : $P=2$.
- Le coefficient de frottement de la MADA : $f=0.0024$ N.m.s/rd.
- La tension délivrée par le réseau $V_s=690$ V .
- La fréquence de 50Hz.

ANNEXE B

Calcul des régulateurs utilisés

Les régulateurs utilisés sont de type Proportionnel-intégrale (PI) pour sa simplicité et sa facilité à mettre en œuvre (figure a).

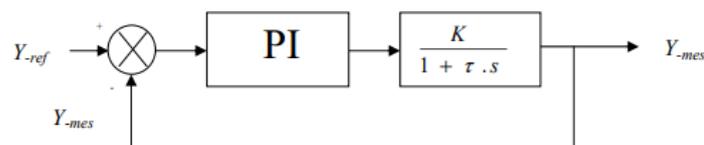


Figure a Schéma de régulation avec un PI.

La fonction de transfert du régulateur PI est donnée par :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

Avec :

K_p : Gain proportionnel du correcteur.

K_i : Gain intégral du correcteur.

Considérant le système à corriger de fonction de transfert $F(s)$ tel que :

$$F(s) = \frac{K}{1 + \tau \cdot s}$$

La fonction de transfert du système en boucle ouverte s'écrit :

$$F_{bo}(s) = \frac{K(K_p + \frac{K_i}{s})}{1 + \tau \cdot s} = \frac{K(K_p s + K_i)}{s(1 + \tau \cdot s)} = K \cdot K_i \cdot \frac{1 + \frac{K_p}{K_i} s}{s(1 + \tau \cdot s)}$$

Compensant la constante du temps du processus τ avec la constante du temps du correcteur

$\frac{K_p}{K_i}$ nous obtenons la fonction de transfert en boucle fermée comme suit :

$$F_{bf}(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_i \cdot K} \cdot s}$$

Le temps de réponse du système à 5% près de la consigne est de trois fois la constante du Temps.

On écrit :

$$\tau_r = 3 \cdot \frac{1}{K_i \cdot K}$$

Remplaçant K_i par sa valeur on trouve :

$$\tau_r = 3 \cdot \frac{\tau}{K_p \cdot K}$$

En fin les gains du correcteur trouvés par :

$$K_p = 3 \cdot \frac{\tau}{\tau_r \cdot K} \text{ et } K_i = 3 \cdot \frac{\tau}{\tau_r \cdot K}$$

Référence bibliographie

- [1] ABDELHAMID LILIA: « Contribution à l'Etude des Performances des Générateurs Electromagnétiques Utilisés dans les Systèmes Eoliens ». Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, Université de Batna, 2008.
- [2]-benkaddouroussamaabdelbaricheradidaymen, « conception, calcul et simulation d'une éolienne de faible puissance », mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme master ; echahidhammalakhdar el oued.
- [3].<https://www.connaissancedesenergies.org/eolien-dans-le-monde-les-nouvelles-installations-en-2021-en-infographies-220610>
- [4]-benmakhloufalaheddine, etude, « modélisation et simulation d'un aérogénérateur asynchrone», mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme master ; universite d'adrar,2018.
- [5]https://www.researchgate.net/figure/Conversion-de-lenergie-cinetique-du-vent_fig1_272668603
- [6]-arkoubabderrahim , benzemma moussa , « Etude d'une éolienne de petite puissance à base d'une machine synchrone à aimants permanents », mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme master ; abderrahmane mira de bejaia,2018.
- [7]<https://ledrenche.fr/faut-il-developper-leolien-offshore/>
- [8]-saidimohammedlarb ,arbaouifayçal, « modélisation et commande d'un système de conversion d'énergieéolienne», présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat 3ème cycle; universitebadjimokhtar - annaba,2021.
- [9]-azzoztamaarat, « intitulé modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une mada»,these de diplome de doctorat en sciences en electrotechnique; université mohamedkhider biskra,2015.
- [10] <http://electronique1.blogspot.com/2011/02/principales-composantes-des-eoliennes.html>
- [11] I. MUNTEANU, A. I. BRATCU, N.A CUTULULIS, E. CEANGĂ. « Optimal control of wind energy systems ». Springer 2008.
- [12] PENA. R.S, CLARE. J. C, ASHER. G. M, "A Doubly Fed Induction Generator Using Back-to Back PWM Converters Supplying an Isolated Load from a Variable Speed Wind Turbine",IEE Proceedings, Electrical Power Applications, Vol. 143, N° 5, pp. 380-387, September.1996.
- [13]-boumaizachaoukikheroufiahmed, « production de l'énergie par éolienne»,mémoire de diplôme de master; université badjimokhtar - annaba,2021.
- [14]-melle. hiberwafa, analyse harmonique dans un réseau électrique avec une production d'énergie éolienne »,mémoire de diplome magister en electrotechnique; universite setif1 ufas,2013.
- [15]. I.HAMZAOUI, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur", thèse de magistère, ENP, Janvier 2008.
- [16] BELFEDHAL ABDELKADER SEIFEDDINE«Modélisation et commande d'une chaîne éolienne avec intégration du stockage inertiel » Magister Ecole doctorale de Génie Electrique;Université Ibn Khaldoun Tiaret ;2010
- [17] EL-AMRIA ZEGHLACHE, SALWA LACHI«Commande par la logique floue d'une chaîne de conversion éolienne »Mémoire de Fin d'Etudes En Vue de l'obtention du Diplôme MASTER ;Université Mohamed Boudiaf-M'sila.

- [18] DJERIRI YOUCEF «Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien »UNIVERSITÉ DJILLALI LIABES DE SIDI BEL-ABBÈS ; Mémoire de Magister ;2009
- [19] ABDEL GHANI AISSAOUI, HAMZA ABID, MOHAMED ABID, AHMED TAHOUR « commande par la logique floue et mode glissant d'une machine synchrone autopilotée », Université Sidi Bel Abbas ; Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. etÉnerg., 52, 1, p. 89–103, Bucarest, 2007
- [20] -GUELLAADEM Abla KERBOUB Sirine, « Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)», Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER, Université de Ghardaïa,2019.
- [21] HELLER. M AND W. SCHUMACHER, « Stability analysis of doubly-fed induction machines in stator flux reference frame'», Proc. EPE (Trondheim), vol. 2, p. 707-710, 1997
- [22] MOUSSAOUI TAHA YACINE «Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne» Mémoire de fin étude en génie électrique, Université d'EL-Oued, 09 sept 2015.
- [23] MOHAMMED MALKI «Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret» Mémoire Master en Electrotechnique, Université AboubekrBelkaid Tlemcen, 20/10/2014.
- [24] R. ROUABIH « Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée » Thèse de Doctorat de l'Université de Batna, 2016.
- [25] F.D. BIANCHI, H. De Battista, R.J. Mantz, « Wind turbine control Systems, principes, Modelling and Gain Scheduling Design ». Springer 2007.
- [26] Ben kademSomia Ben mebarek «Commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne » MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER ACADEMIQUE; Université Ahmed Draïa Adrar ,2018.
- [27] BENNOUR CHERIF "Simulation de la commande vectorielle par régulateurs àmode glissant d'une chaîne éolienne à base d'un machine asynchrone à double alimentation" ; thèse de Magister,Université Mohamed Khider – Biskra, 2012.
- [28] ZOUAOUI YAMINA « commande par mode glissant des courant statoriques de la machine asynchrone" ; thèse de Magister, université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [29] MEDJENAH NADIA,HAMOUDI CHAHIRA «Amélioration de la performance de la commande des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée» UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA;Master Académique ;2017.
- [30] ROUABHI RIYADH « Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée » ; thèse de doctorat,université Batna 2,2016.
- [31] SAIBI Hayat KASSOURI Dalila«Commande par mode glissant d'ordre fractionnaire d'un réseau électrique» DIPLOME Master Académique en Automatique Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou , 2018.
- [32] Hadji abdelmelek et Amirat Boudjema«commande des systèmes non linéaires par mode glissant» DIPLOME MÉMOIRE MASTER ACADEMIQUE , UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA ,2020 .

- [33] Melle ABDELLI Houari«Commande par Mode de Glissement d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation» Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran.
- [34] C. Aribi, M. Hamlaoui « Commande par mode glissant doté à action intégrale application à la machine asynchrone à double alimentation (MADA) » mémoire de master, L'université Mohammed Boudiaf De M'sila, 2018.
- [35] BOUADJELTakieddine , MEKRACHE Alaa e dinne« Commande par Mode Glissant Dynamique de la Machine Asynchrone à Double Alimentation –MADA »mémoire de master, UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL, 2022.
- [36] TALBI Sabrina Siham, ZEGRANE Nawel«Commande par Mode Glissant d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice asynchrone à Double Alimentation»mémoire de master, UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET, 2017.
- [37] Me / M. OUAAR«Etude d'une loi de commande Robuste pour le pilotage d'un drone quadricoptère»mémoire de master, Université de Jijel, 2020.
- [38] BEKAKRA Ahmed ,SEBBAK Mohammed Ismail , ZERIG Sadok«Commande par mode glissant sans capteur de la machine Asynchrone»mémoire de MASTER ACADEMIQUE, Université de Jijel L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued 1, 2019.
- [39] ROUABHI RIYADHContrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée»Magister en Electrotechnique,– Université de M'sila, 2016.
- [40] BOUGUERRA ABDERRAHMEN « Commande Tolérante aux Défauts d'un Appareil à Vol Vertical » ; doctorat en sciences,université Mohamed Boudiaf de m'sila ,2015.
- [41] El-amriaZeghlache ,Salwa Lachi «Commande par la logique floue d'une chaîne de conversion éolienne» ; Diplôme MASTER,universitéMohamed Boudiaf de m'sila .
- [42] LATRECHE MOHAMMED TAHAR, « Commande floue de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012.
- [44] S. Tamert, G. Torchiat,«Autopilotage Vectoriel d'une Machine Asynchrone par la Commande floue," Mémoire de master en électrotechnique, Université Abderrahmane Mira - Bejaia, 2013.
- [45] EL-AMRIA ZEGHLACHE, SALWA LACHI«Commande par la logique floue d'une chaîne de conversion éolienne »Mémoire de Fin d'Etudes En Vue de l'obtention du Diplôme MASTER ;Université Mohamed Boudiaf-M'sila.
- [46] A. Debouze, A. Kelaiaia, « Commande floue des machines électrique» Mémoire de Master, Université des Science et de la Technologie 8Mai 1945 - Guelma, 2019.
- [47] HITOUM Houda, BELDI Rahma «La commande floue : Application à la régulation de température » Mémoire de Master, Universitaire AbdelhafidBoussouf -Mila, 2020.
- [48] BELFEDAL Saliha «Modélisation et la commande floue - glissant d'un moteur à courant continu» Mémoire de Master, Université AboubakrBelkaïd–Tlemcen, 2021.
- [49] Mecherneneabdelkader, Concepts de la logique floue , cour m2_ELT_CE - CE921, Université Abou-BekrBelkaïd - Tlemcen Année universitaire 2020 / 2021.
- [50] R. Rouabih «Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitessevariable basé sur une machine asynchrone double alimentée» Thèse de Doctorat de l'Université de Batna, 2016.

- [51] LOUKAL KELTOUM«Commande Robuste des Machines Asynchrones à Double Alimentation à Base des systèmes Flous Type Deux », thèse doctorat, Université Mohamed Boudiaf de m'sila ; 2017
- [52] - A. S. BELFEDHAL, E.M.BERKOUK, Y. MESSLEM, « Supervisory control of grid connected hybrid renewable energy system », Mediterranean journal of measurement and control, Vol.13, No. 3, pp. 812–823, 2017.
- [53]-A. S. BELFEDHAL, E.M.BERKOUK, Y. MESSLEM, « Analysis of grid connected hybrid renewable energy system», Journal of Renewable and Sustainable Energy, 11,014702, 2019.