

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université Ahmed Draïa Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et Technologies

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE
L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER ACADÉMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electriques

Thème:

**Commande non linéaires d'une éolienne basé sur
la machine asynchrone double alimentation**

Présenté par : ARAMA Mohamed Amin

Soutenu :

Devant le jury :

Promoteur :	Dr. ARAMA Fatima Zohra	MCA	Université D'adrar
Examineur:	Dr. Makhloufi Salim	MCA	Université D'adrar
Examineur:	Dr. YAICHI Brahim	MCB	Université D'adrar

Année Universitaire : 2020/2021

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne populaire et démocratique
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE AHMED DRAYA - ADRAR
BIBLIOTHÈQUE CENTRALE
Service de recherche bibliographique
N°.....B.C/S.R.B//U.A/2021



جامعة احمد دراية - ادرار
المكتبة المركزية
مصلحة البحث البيبليوغرافي
الرقم.....م.م/م.ب.ب/ج.أ/2021

شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذة(ة): عزامة نازمة زهدرة

المشرف مذكرة الماستر.

الموسومة بـ: Commande non linéaires d'une éolienne basse sur la machine asynchrone double alimentation

من إنجاز الطالب(ة): عزامة محمد أمين

و الطالب(ة):

كلية: علوم والتكنولوجيا

القسم: العلوم والتكنولوجيا

التخصص: Commandes électriques

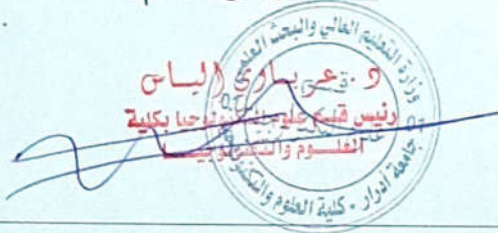
تاريخ تقييم / مناقشة:

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها. و بإمكانهم إيداع النسخ الورقية (02) والإلكترونية (PDF).

- امضاء المشرف:

ادرار في: 2021/11/07/06

مساعد رئيس القسم:



ملاحظة: لا تقبل أي شهادة بدون التوقيع والمصادقة.

Scanned by TapScanner

Remerciements

Avant tout, je remercie DIEU le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

J'aimerais dans ces quelques lignes remercier toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement ces deux années, tout au niveau humain qu'au niveau scientifique.

Je voudrais aussi à remercier Dr F.Z .ARAMA Maîtres de conférences à l'Université d'ADRAR pour avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse ainsi que pour ces nombreux conseils.

Je remercie Messieurs Dr. Makhloufi S et Dr.YAICHI B. pour avoir bien voulu se détache, pour quelque temps, de leurs activités très prenantes afin d'examiner ce travail et siège dans ce jury

Enfin j'adresse mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de pré ou de loin à l'élaboration de ce mémoire

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire :

A ma mère, pour tout l'amour et l'affection que tu m'as donnée pour les valeureux conseils et leur présence à cote de moi dans les moments durs.

A mon père, en reconnaissance des effets et sacrifices qu'il m'a cessé de consentir.

A mes chères sœurs : Houda, Feyrouz

Ainsi qu'a tous ceux que je n'ai pas cités



ARAMA MOHAMED AMIN

Sommaire

Introduction generale	1
Chapitre I Généralités sur les systèmes éoliens	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Historique et croissance de l’exploitation de l’énergie éolienne	4
I.3 Définition de l’énergie éolienne.....	5
I.4 Les avantages et inconvénients de l’énergie éolienne.	6
I.5 Les différents types d’une éolienne	6
I.5.1. les éoliennes à axes horizontal.....	6
I.5.1.1 Architecture d’une éolienne à axe horizontal	7
I.5.1.2 Les Avantages et les inconvénients d’une éolienne à axe horizontal	9
I.5.2. Les éoliennes à axes Vertical.....	10
I.5.3. Les petites éoliennes	11
I.6 Zone de fonctionnement	11
I.7 Classement des éoliennes.	12
I.7.1 Fonctionnement a vitesse fixe	13
I.7.2 Fonctionnement a vitesse variable	13
I.8 Synthèse de différentes machines utilisée dans le système éolienne.....	15
I.9 Eolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation (MADA).....	15
I.9.1 Mode de fonctionnement de la MADA	16
I.9.1.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	16
I.9.1.2 Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone	17
I.9.1.3 Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone	17
I.9.1.4 Fonctionnement en Mode Générateur Hyper-Synchrone	18
I.10 Les avantages et inconvénients de la MADA	18
I.11 Applications des éoliennes.....	19
I.12 Conclusion	20

Chapitre II Modélisation et commande MPPT de la turbine

II.1 Introduction.....	22
II.2 Description du système éolien.....	22
II.3 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique.....	23
II.3.1 Loi de Betz.....	23
II.3.2 Le coefficient de couple.....	25
II.4 Modélisation de la turbine éolienne.....	25
II.4.1 Modèle aérodynamique de la turbine.....	26
II.4.1.1 Modèle du vent.....	26
II.4.1.2 La puissance aérodynamique.....	26
II.4.1.3 Le couple aérodynamique.....	27
II.4.2 Modélisation mécanique de la turbine.....	27
II.4.2.1 Modèle du multiplicateur.....	29
II.4.2.2 Equation dynamique de l'arbre de transmission.....	29
II.5 Stratégies de commande de la turbine éolienne.....	30
II.5.1 Caractéristique puissance vitesse d'éoliennes de grande puissance.....	30
II.5.2 Technique d'extraction de maximum de puissance.....	31
II.5.2.1 Maximisation de puissance avec asservissement de la vitesse mécanique.....	31
II.5.2.2 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	32
II.6 Résultats de simulation.....	33
II.7. Conclusion.....	37

Chapitre III Commande linéaire du système éolien à base de la GADA

III.1 Introduction.....	38
III.2 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation MADA.....	38
III.2.1 Historique.....	38
III.2.2 Hypothèses simplificatrices.....	38
III.2.3 Modèle de la machine asynchrone triphasé.....	39
III.2.4 Modèle de la MADA dans le repère de Park.....	41
III.3 Commandes linéaires des puissances de la GADA.....	43
III.3.1 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	43

III.3.2 La commande vectorielle directe	47
III.3.3.1 Commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.....	48
III.3.4 Synthèse des régulateurs	48
III.4 Résultats de simulation	49
III.5 Conclusion.....	59
Chapitre IV Commande non linéaire du système éolien à base de la GADA	
IV.1 Introduction.....	62
IV.2 Commande par mode glissant.....	62
IV.3 Généralités sur la théorie du contrôle par mode de glissement	63
IV.3.1 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande.....	63
IV.3.2 Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état	63
IV.3.3 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la commande équivalente.....	64
IV.4 Trajectoires dans le plan de phase	65
IV.5 Conception de la commande par mode de glissement.....	65
IV.5.1 Choix de la surface de glissement.....	66
IV.5.2 Conditions de convergence	66
IV.5.2.1 La fonction discrète de commutation.....	66
IV.5.2.2 La fonction de Lyapunov.....	66
IV.5.3.1 La commande équivalente.....	68
IV.5.3.2 La commande discontinue.....	68
IV.6 Application du mode glissant pour la commande de la puissance active et réactive de la GADA:	70
IV.6.1 Contrôle de la puissance active.....	70
IV.6.2 Contrôle de la puissance réactive.....	70
IV.7 Simulations et interprétations des résultats.....	72
IV.8 Conclusion	76
Conclusion Générale	77
Annexes.....	79
Bibliographie.....	84

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1: Conversion de l'énergie cinétique du vent	5
Figure I. 2: Principaux composants d'une éolienne	7
Figure I. 3: composent de la nacelle	9
Figure I. 4: Les éoliennes à axes Vertical	11
Figure I. 5: Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent	12
Figure I. 6: Eolienne à vitesse fixe.	13
Figure I. 7: Eolienne fonctionnant à vitesse variable.....	14
Figure I. 8: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	16
Figure I. 9: Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.....	17
Figure I. 10: Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.....	17
Figure I. 11: Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.	18
Figure I. 12: Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.	18

Chapitre II

Figure .II. 1 Système éolien à vitesse variable basé sur GADA.....	22
Figure .II. 2 : Tube de courant autour d'une éolienne.....	23
Figure .II. 3 : Coefficient de puissance.....	24
Figure .II. 4 Schéma de la turbine éolienne	25
Figure .II. 5 :Modèle aérodynamique de la turbine éolienne.....	27
Figure .II. 6 : Système mécanique de l'éolienne	28
Figure .II. 7 : Schéma bloc de modèle de la turbine.....	30
Figure .II. 8 : Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne de grande puissance.	30
Figure .II. 9 : schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse	32
Figure .II. 10 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse	33
Figure .II. 11 : Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.....	33
Figure .II. 12 : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.	34
Figure .II. 13 : Simulation du profile de la vitesse du vent.....	35
Figure .II. 14 : la vitesse mécanique	35
Figure .II. 15 :l'erreur de couple	35
Figure .II. 16 : coefficient de puissance en fonction de temps	36
Figure .II. 17 : la vitesse Ratio en fonction.....	36
Figure .II. 18 : la vitesse mécanique	36
Figure .II. 19 :l'erreur de couple	36
Figure .II. 20 coefficient de puissance en fonction de temps.....	36
Figure .II. 21 : la vitesse Ratio en fonction.....	36

Chapitre III

Figure III. 1 :Angles de Park des grandeurs statoriques et rotoriques	42
Figure III. 2: Orientation du flux statorique sur l'axe d.....	44
Figure III. 3: Schéma bloc du système à réguler.	46

Figure III. 4: schéma bloc de la commande directe.....	47
Figure III. 5: schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance	48
Figure III. 6: Système régulé par un PI.	49
Figure III. 7: Schéma bloc global du système étudié.	50
Figure III. 8: Puissance Active et Réactive de la génératrice éolienne.	51
Figure III. 9: Suivi de consigne des puissances actives (W) en fonction du temps (s).	52
Figure III. 10: Suivi de consigne des puissances réactives (VAR) en fonction du temps (s).	52
Figure III. 11: Suivi de consigne des puissances actives (W) en fonction du temps (s).	53
Figure III. 12: Suivi de consigne des puissances réactives (VAR) en fonction du temps (s).	53
Figure III. 13: Suivi de consigne des puissances actives (W) en fonction du temps (s).	55
Figure III. 14: Suivi de consigne des puissances réactives (VAR) en fonction du temps (s).	55
Figure III. 15: Suivi de consigne des puissances actives (W) en fonction du temps (s).	56
Figure III. 16: Suivi de consigne des puissances réactives (VAR) en fonction du temps (s).	56
Figure III. 17: Suivi de consigne des puissances actives (W) en fonction du temps (s).	57
Figure III. 18: Suivi de consigne des puissances réactives (VAR) en fonction du temps (s).	57
Figure III. 19: Suivi de consigne des puissances actives (W) en fonction du temps (s).	58
Figure III. 20: Suivi de consigne des puissances réactives (VAR) en fonction du temps (s).	58

Chapitre IV

Figure. IV. 1 : Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande.	63
Figure. IV. 2 : Structure de régulation par commutation au niveau d'une contre réaction d'état.	64
Figure. IV. 3 : Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la commande équivalent.....	64
Figure. IV. 4 : Les modes de trajectoire dans le plan de phase.	65
Figure. IV. 5 : Trajectoire de l'état vis-à-vis la surface de glissement.	67
Figure. IV. 6 : Représentation de la fonction « SIGN ».	68
Figure. IV. 7 : Fonction de saturation	69
Figure. IV. 8 : Schéma bloc de la commande par mode glissant de la GADA.....	72
Figure. IV. 9 : Suivi de consigne des puissances active et réactive par RMG.....	73
Figure. IV. 10 : Suivi de consigne des puissances active et réactive par RMG.....	73
Figure. IV. 11 : Suivi de consigne des puissances active et réactive par RMG.....	74
Figure. IV. 12 : Suivi de consigne des puissances active et réactive par RMG.....	74
Figure. IV. 13 : Suivi de consigne des puissances active et réactive par RMG.....	75
Figure. IV. 14 : Suivi de consigne des puissances active et réactive par RMG.....	75

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Avantages et inconvénients des différentes machines 15
Tableau I. 2: mode opération de la MADA 16
Tableau. Annexe A. 1: Paramètres de la GADA.80
Tableau. Annexe A. 2: Paramètres de la turbine. 80
Tableau. Annexe A. 3: Paramètres de la turbine. 80

Tableau. Annexe B. 1: Paramètres du régulateurs RMG 83

NOTATIONS

Acronyme	Signification
MADA	: M achine A synchrone à D ouble A limentation.
GADA	: G énératrice A synchrone à D ouble A limentation.
DFIM	: D oubly F ed I nduction M achine.
MAS	: M achine A synchrone.
MS	: M achine S ynchrone.
MCC	: M achine à C ourant C ontinue.
MLI	: M odulation de L argeur d' Impulsion.
IGBT	: I nsulated G ate B ipolar T ransistor.
PI	: P roportionnel I ntégral.
FTBO	: F onction de T ransfert en B oucle O uverte.
FTBF	: F onction de T ransfert en B oucle F ermée.

LISTE DES SYMBOLES

F	: Vecteur force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable.
ρ	: Densité de l'air 1.225 kg.m^{-3} .
S	: Surface balayée par le rotor de l'éolienne.
R	: Rayon du rotor éolien.
G	: Gain du multiplicateur.
m	: Masse d'air traversant le rotor éolien.
P_m	: Puissance extraite par le rotor éolien.
P_{mt}	: Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé.
C_p	: Coefficient de puissance de l'éolienne.
λ	: Vitesse relative de l'éolienne.
P_{mg}	: Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice.
V	: Vecteur vitesse du vent.
β	: Angle de calage des pales d'une éolienne à axe horizontal.
i	: Angle d'incidence des pales d'une éolienne à axe horizontal.
G	: Glissement d'une machine asynchrone.
f, f_2	: Fréquence statorique et rotorique.
R_s, R_r	: Résistance d'une phase statorique et rotorique.
L_s, L_r	: Inductances cycliques statorique et rotorique.
L_m	: Inductance mutuelle cyclique stator-rotor (magnétisante).
M_s, M_r	: Inductances mutuelles stator-stator et rotot-rotor.
I	: Vecteur courant électrique.
C_e, C_r, C_f	: Couple électromagnétique, couple résistant et couple de frottement.
J	: Moment d'inertie de la machine.
f_r	: Coefficient de frottements visqueux de la machine.
p	: Nombre de paires de pôles de la GADA.
V_s	: Module du vecteur tension statorique.

- V_{DC} : Tension aux bornes du capacité du filtre.
- V_{red} : Tension redressé.
- $V_{S a,b,c}, V_{ra,b,c}$: Tensions triphasées statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.
- $I_{S a,b,c}, I_{ra,b,c}$: Courants triphasées statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.
- $\phi_{S a,b,c}, \phi_{ra,b,c}$: Flux triphasées statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.
- Ω, Ω_s : Vitesse de rotation de la machine, vitesse de synchronisme en rad/sec.
- N_s, N_r : Vitesse de rotation de la machine, vitesse de synchronisme en tr/min.
- ω_s, ω_r : Pulsations électriques des grandeurs statoriques, rotoriques .
- $V_{Sd,q}, V_{rd,q}$: Tensions statoriques et rotoriques diphasées dans un repère tournant.
- $I_{Sd,q}, I_{rd,q}$: Courants statoriques et rotoriques diphasés dans un repère tournant.
- $\phi_{Sd,q}, \phi_{rd,q}$: Flux statoriques et rotoriques diphasés dans un repère tournant.
- L_f : Inductance du filtre LC.
- C_f : Capacité du filtre LC.
- P_s, Q_s : Puissances active et réactive statoriques de la GADA.
- P_{mes}, Q_{mes} : Puissances électriques mesurées à la sortie du GADA.
- P_{ref}, Q_{ref} : Puissances électriques de références de la GADA.
-

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

L'approvisionnement actuel en énergie dépend principalement des sources d'énergie fossiles telles que le pétrole, le gaz naturel, le charbon. Ces combustibles fossiles ont mis des milliers d'années à se former, les combustibles fossiles peuvent être décrits comme de la biomasse stockée pendant une longue période. Une énorme quantité de combustibles fossiles est déjà épuisée au XXe siècle. Mais en raison de la demande croissante, l'extraction de combustibles fossiles deviendra plus risquée et coûteuse à l'avenir[1].

Si la consommation de combustibles fossiles continue comme aujourd'hui, toutes les ressources disponibles seront exploitées d'ici le XXIe siècle. Les combustibles fossiles ne seront plus disponibles comme source d'énergie pour les générations futures.

Tout cela suggère que les sources d'énergie renouvelables sont une meilleure alternative pour stimuler la demande croissante d'énergie. Parmi les sources d'énergie renouvelables disponibles, l'énergie éolienne est devenue l'une des sources d'énergie renouvelable les plus importantes et les plus prometteuses dans le monde. Cette énergie est une source d'électricité gratuite, renouvelable, propre et non polluante.

La production d'énergie éolienne utilise des turbines à vitesse fixe ou à vitesse variable. Le système d'éolienne à vitesse variable basé sur GADA est devenu la configuration la plus populaire dans le système de conversion d'énergie éolienne en raison de ses mérites de fonctionnement à une large plage de variation de vitesse vent, contrôle de puissance active/réactive découplé, capacité de capture de puissance maximale, contrainte mécanique réduite, l'utilisation du convertisseur généralement 30 % de la capacité du générateur et une perte de puissance réduite par rapport à d'autres solutions telles que les générateurs à induction à vitesse fixe. Tous les avantages mentionnés ci-dessus du GADA sont possibles grâce au schéma de contrôle qui peut être mis en œuvre dans les convertisseurs de rotor du GADA. Par conséquent, la méthode de contrôle de ce convertisseur joue un rôle important dans l'obtention de meilleures performances de le système GADA [2].

L'objectif de notre étude est la simulation d'un système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation. Pour cela nous procédons à la modélisation de système de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine et utilisé la technique de maximisation de puissance MPPT. Puis nous procédons à la mise en place de stratégies de commande permettant le fonctionnement en génératrice de la GADA en

contrôlant indépendamment les puissances active et réactive générées par la machine asynchrone.

Le présent travail est structuré en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre présente des généralités sur les systèmes éoliens et de l'état actuel des avancées technologiques, suivi par les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs qui leur sont associés.

Le second chapitre est consacré à la modélisation du système éolien à travers les équations et les concepts physiques régissant son fonctionnement, on présente la modélisation de la turbine. Afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée, nous appliquant des différentes stratégies Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T.) tel que le contrôle par et sans asservissement de la vitesse mécanique

Le troisième chapitre porte sur la modélisation de la génératrice asynchrone (GADA) en régime dynamique, en utilisant la transformation de Park sous certaines hypothèses simplificatrices. Ensuite, nous avons présente les différentes commandes vectorielles du GADA telles que la commande directe et indirecte avec le régulateur Proportionnel Intégral (PI). Ces commandes sont comparées en termes de poursuite de trajectoire, la robustesse et le rejet de perturbation

Le quatrième chapitre aborde la commande par mode glissement de la GADA. Nous présenterons en premier lieu un rappel théorique de la commande par mode glissant. Nous aborderons ensuite la conception de l'algorithme de commande avec ses différentes étapes. Ainsi, une simulation de ce régulateur est présentée.

On clôture notre travail par une conclusion

Chapitre I
Généralités sur les systèmes
éoliens

I.1 Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante [3].

L'objectif principal des systèmes éoliens est la transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'énergie éolienne, non polluante et économique a suscité un très grand intérêt et a exigé aux constructeurs de réfléchir toujours à de nouvelles solutions robustes, permettant l'extraction du maximum d'énergie et l'étude des différents systèmes réalisables [4].

Ce premier chapitre est consacré à des rappels sur les systèmes éoliens à travers les équations et les concepts physiques régissant leur fonctionnement.

I.2 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable [4].

Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le danois Poul La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité.

Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1^{ère} et la 2^{ème} guerre mondiale avec une grande échelle.

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui oblige plusieurs pays de commencer l'investissement pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements, on cite le premier marché important de la Californie entre 1980 et 1986,

notamment au début avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines (avec un total de 7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de (386 MW) en 1985.

Après ces années, le marché européen a réellement décollé, ce qui permet un développement important de cette industrie de l'éolienne et surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont une contribution importante au marché mondial qui atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004 avec une croissance moyenne annuelle de 7500 MW.

I.3 Définition de l'énergie éolienne:

Un aérogénérateur plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

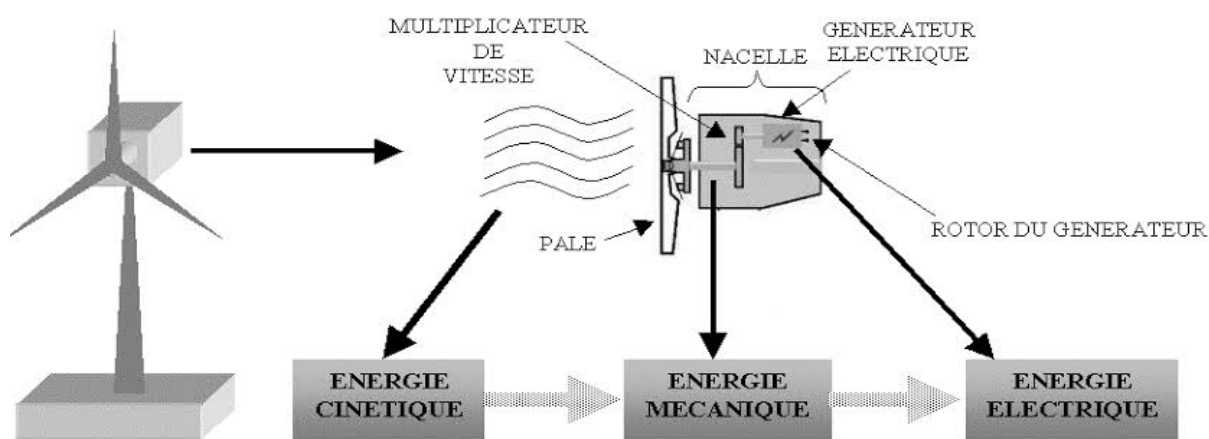


Figure I. 1: Conversion de l'énergie cinétique du vent [3].

Selon la gamme de puissance produite par l'aérogénérateur, on distingue les catégories des éoliennes suivantes [5]:

- ✓ *Eoliennes de petite puissance* : couvre la gamme de puissance de 20W à 50KW réparties en trois catégories : micro éoliennes, 100W maximum, mini éoliennes de 100W à 10kW et petites éoliennes de 10 à 50KW.
- ✓ *Eoliennes de moyenne puissance* : de 50 à quelques centaines de kW.
- ✓ *Eoliennes de forte puissance* : supérieure à 1 MW.

I.4 Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

I.4.1 Les avantages

- ✓ l'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du Co2 [5].
- ✓ L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radio actifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- ✓ Le mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires.

I.4.2 Les inconvénients

- ✓ la nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- ✓ Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- ✓ Le bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des multiplicateurs.

I.5 Les différents types d'une éolienne

Il y a 3 types des éoliennes :

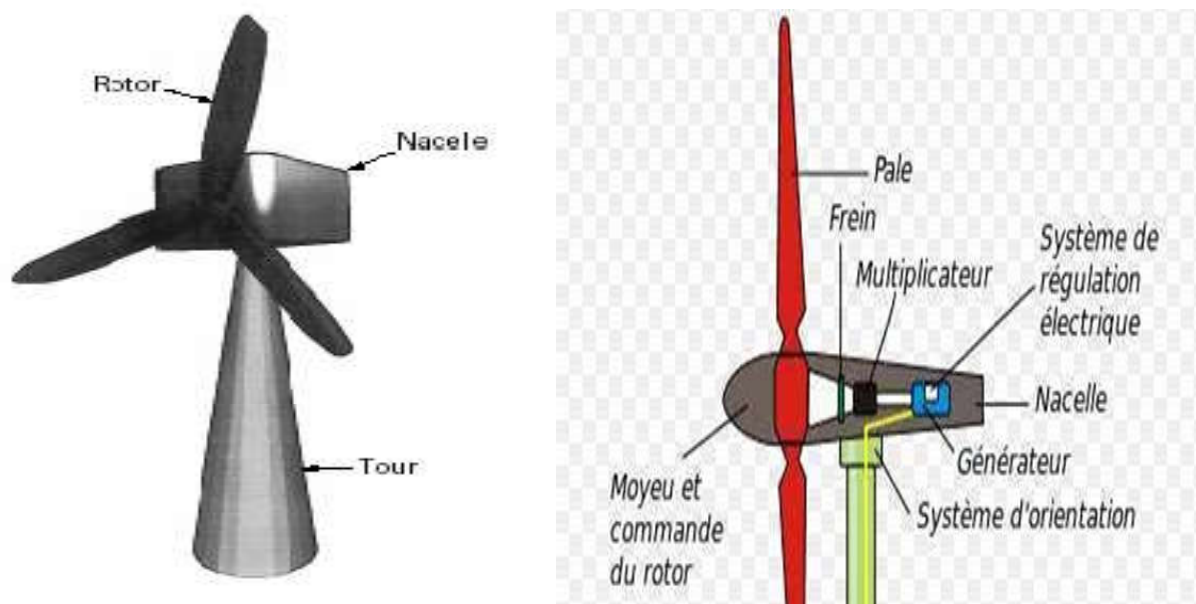
- ❖ éolienne à axe horizontal
- ❖ éolienne à axe vertical
- ❖ Petite éolienne

I.5.1. les éoliennes à axes horizontal

L'éolienne se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical qui doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [6] .

I.5.1.1 Architecture d'une éolienne à axe horizontal

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le *rotor*, la *nacelle* et la *tour*, comme illustré sur la Figure I.2 [5].



a) Eolienne à trois pales

b) Eléments d'une nacelle

Figure I. 2: Principaux composants d'une éolienne [5].

A- Le rotor (moyeu et pales):

Le rotor transforme l'énergie du vent en énergie mécanique, il est constitué par des pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu, l'énergie captée est en fonction de surface balayée par l'hélice et la vitesse du vent [6].

- ✓ **Les pales:** Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.
- ✓ **Le moyeu:** C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent

B- La nacelle:

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques [5]. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La Figure I.3 présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :

- ✓ **le multiplicateur de vitesse** : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.
- ✓ **L'arbre secondaire** comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- ✓ **la génératrice**: Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.
- ✓ **un contrôleur électronique** : chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor, nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir
- ✓ **divers dispositifs de refroidissement** (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile.
- ✓ **le dispositif d'orientation de la nacelle** : Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée ; cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance.

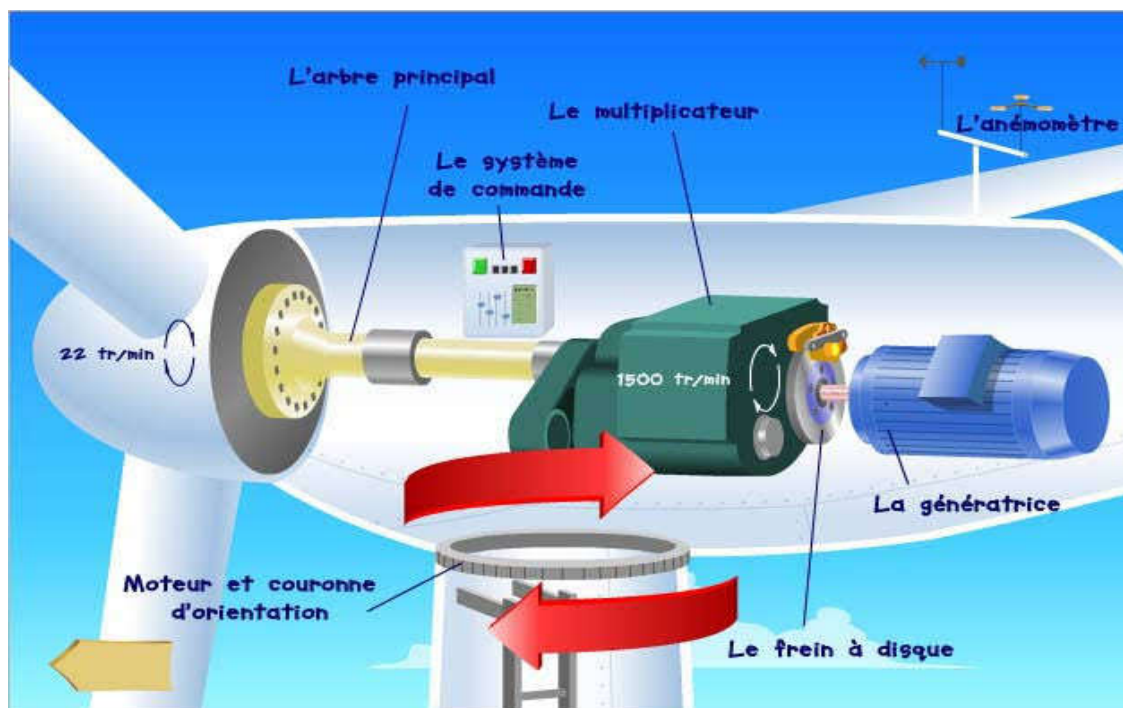


Figure I. 3: composent de la nacelle [6] .

C- Le mât (la tour):

Généralement un tube d'acier, ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la qualité de matière mise en œuvre présente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur [6].

I.5.1.2 Les Avantages et les inconvénients d'une éolienne à axe horizontal

➤ Les Avantages:

Ces éoliennes captent le vent en hauteur et loin du sol; à cette hauteur le vent est beaucoup moins ralenti par le relief. A dimension d'hélice identique, on pourra produire plus de puissance par le biais de cette structure par rapport aux éoliennes à axe vertical.

Un autre avantage, et non des moindres, est l'emprise au sol qui est très faible par rapport aux éoliennes à axe vertical. Ici, seule la tour occupe de la place au sol et contient généralement tous les systèmes de raccordement. Ainsi il n'est pas nécessaire de rajouter un local électrique et l'emprise au sol est vraiment minimale [7].

➤ Les Inconvénient :

Conception plus complexe à exiger en raison du besoin de commandes des pales

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [7].

I.5.2. Les éoliennes à axes Vertical

Elles sont très peu mises en œuvre de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Elles fonctionnent sur le même principe que les roues hydrauliques avec une direction du vent perpendiculaire à l'axe de rotation. La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice au sol directement, mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol, moins fort qu'en hauteur car freiné par le relief [7].

De par son axe vertical, il y a symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor. Par contre, ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production.

En ce qui concerne leur implantation, elles ont une emprise au sol plus importante que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur de grandes distances. En effet, les câbles des haubans doivent passer au-dessus des pales. Cela représente un inconvénient majeur pour une implantation sur un site agricole par exemple.

Tous ces inconvénients alliés à la faible efficacité de la conversion d'énergie ont fortement limités le développement de ces éoliennes, laissant place aux aérogénérateurs à axe horizontal.

Le seul modèle construit de manière industrielle fut *l'éolienne de Darrieus*, présenté sur la Figure I.4 (a), d'après l'ingénieur français Georges Darrieus qui en breveta la conception en 1931. La compagnie américaine FloWind fabriquait cette éolienne jusqu'à en 1997. Elle se caractérise avec ses 2 ou 3 pales en forme de C.

On trouve désormais des éoliennes à axes verticaux développées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Ce sont des machines de faible puissance, de 100W à 25kW. Elles sont destinées à des utilisations permanentes, par exemple la charge de batteries servant à alimenter un chalet en montagne (Figure I.4 (b)). Elles sont de conception simple et robuste et ne nécessitent pas ou peu d'entretien.



a) Eolienne de Darrieus de 100 m de diamètre



b) Petite éolienne à axe vertical.

Figure I. 4: Les éoliennes à axes Vertical [7] .

I.5.3. Les petites éoliennes

Ils sont utilisé pour alimenter des appareille électrique de manières économiques (domestique) [6].

I.6 Zone de fonctionnement

La puissance éolienne extraite s'exprime par :

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

La relation (I.1) indique que la puissance éolienne captée est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Donc, il existe pour la puissance éolienne nominale P_n une vitesse du vent nominale pour laquelle l'aérogénérateur est bien dimensionné dans ses divers éléments. C'est pour cela que la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin de maintenir la vitesse à sa valeur nominale et d'éviter toute destruction mécanique [4].

A côté de la vitesse nominale V_n on spécifie aussi :

- La vitesse de démarrage V_d qui représente la vitesse de début de fonctionnement ;
- La vitesse maximale du vent V_{max} pour laquelle la turbine ne convertit plus d'énergie éolienne, pour des raisons de sécurité de fonctionnement.

Les vitesses V_d , V_n et V_{max} définissent quatre zones de fonctionnement sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent (Figure I.5) :

- **La zone I** : où $P_t = 0$, la turbine ne fonctionne pas ;

- **La zone II** : la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent ;
- **La zone III** : la vitesse de rotation est maintenue constante et la puissance P_t fournie reste égale à P_m ;
- **La zone IV** : il faut arrêter le transfert d'énergie par un système de sureté.

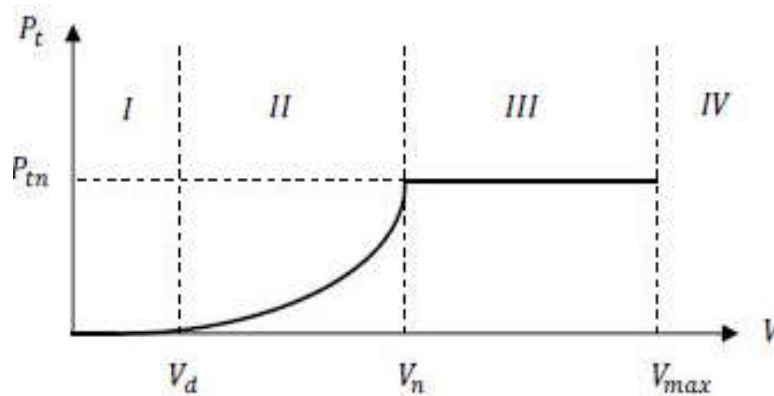


Figure I. 5: Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent [4].

Pour contrôler la puissance aérodynamique capturée et la limiter lorsque la vitesse du vent est très élevée, on peut utiliser l'une des deux techniques de contrôle connues surtout dans les grandes turbines sous les noms de "*Pitch Control*" et "*Stall Control*".

I.7 Classement des éoliennes

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration [5]. Les avantages et inconvénients de chaque configuration peuvent se résumer comme suit :

I.7.1 Fonctionnement a vitesse fixe

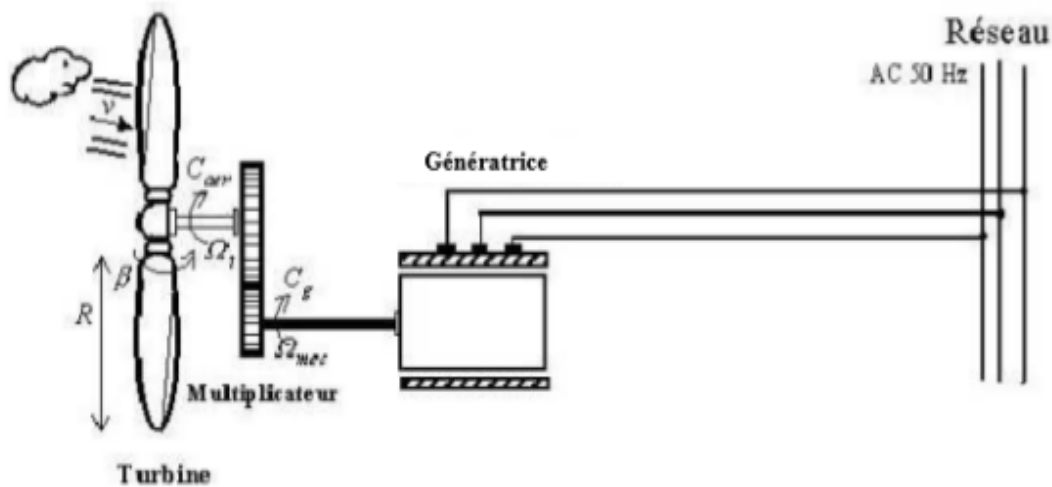


Figure I. 6: Eolienne à vitesse fixe[6].

➤ Les avantages:

Les avantages principaux de ce type :

- ✓ système électrique plus simple.
- ✓ moins cher.
- ✓ pas besoin de système électronique.
- ✓ plus fiable (moins d'entretien).

➤ Les inconvénients:

- ✓ L'énergie captée n'est pas forcément optimale.
- ✓ Difficulté de contrôler la puissance transmise au réseau.
- ✓ Présence des efforts et oscillations du couple dans le train de puissance.

I.7.2 Fonctionnement a vitesse variable

Constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [6].

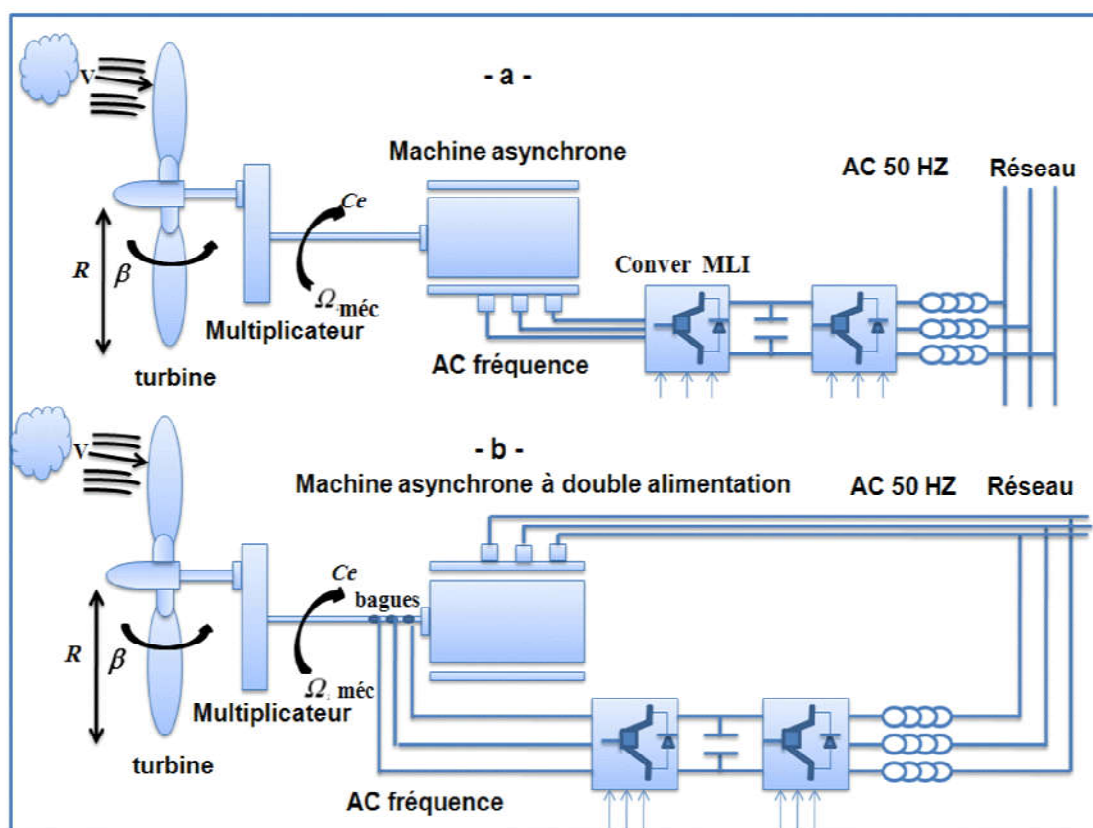


Figure I. 7: Eolienne fonctionnant à vitesse variable[6].

✚ **Avantages principaux de ce type:**

- ✓ Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor.
- ✓ Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.
- ✓ Réduction des contraintes mécaniques subites par le train de puissance. Les turbulences et rafales de vent peuvent être absorbées, l'énergie absorbée du vent est donc emmagasinée dans l'inertie mécanique de la turbine, réduisant ainsi les oscillations de couple
- ✓ Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- ✓ Ce type de machines offre une constante de temps plus grande du système de contrôle de l'angle de calage, ce qui réduit sa complexité
- ✓ Réduction des bruits acoustiques.

✚ **Inconvénients :**

- Utilisation de machines spéciales.
- Coûts supplémentaires plus importants (convertisseur, commande,..).
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.
- Gestion du transfert de puissance entre les convertisseurs, et placement au point de puissance optimum de l'éolienne.

I.8 Synthèse de différentes machines utilisée dans le système éolienne

Le tableau I.5 rappelle les différentes caractéristiques des différentes éoliennes.

Tableau I. 1. Avantages et inconvénients des différentes machines [6].

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
MAS Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> - Machine robuste. - Faible coût. - Pas d'électronique de puissance 	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance extraite non optimisée. - Maintenance boîte de vitesse. - Pas de contrôle de l'énergie réactive. -Magnétisation de la machine imposée par le réseau.
MADA Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement à vitesse variable - Puissance extraite optimisée. - Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale. - Machine standard. - connexion de la machine plus facile à gérer. - Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau. 	<ul style="list-style-type: none"> - Maintenance boîte de vitesse. - Prix de l'électronique de puissance. - Contrôle - commande complexe. - Contact glissant bagues – balais
MSAP Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse. - Puissance extraite optimisée pour les vents faibles. - Connexion de la machine facile à gérer - Possibilité d'absence de boîte de vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix de l'électronique de puissance. - Machine spécifique. - Grand diamètre de machine. - Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice.

I.9 Eolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine doublement alimentée pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies éoliennes ou

en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [6].

I.9.1 Mode de fonctionnement de la MADA

La MADA est parfaitement commandé ; si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine [8]. Dans cette dernière, P_s , P_r et P_m désignent respectivement les puissances du stator, du rotor et mécanique.

		Modes	
		Moteur $P_m > 0$	Générateur $P_m < 0$
Régime	Hypo-synchrone $P_s = -(P_m - P_r)$	$P_s < 0$ et $P_r > 0$	$P_s > 0$ et $P_r < 0$
	Hyper-synchrone $P_m = -(P_s - P_r)$	$P_s < 0$ et $P_r < 0$	$P_s > 0$ et $P_r > 0$

Tableau I. 2: mode opération de la MADA[9]

La machine asynchrone à double alimentation avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants (Figure I.8)

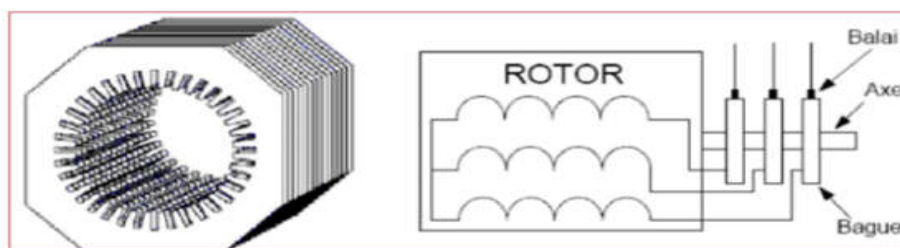


Figure I. 8: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

I.9.1.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

La figure I.9 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement

moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [10].

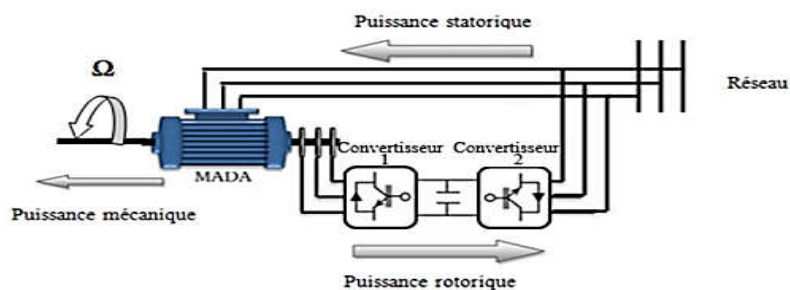


Figure I. 9: Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.

I.9.1.2 Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone

La figure I.10 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement [11].

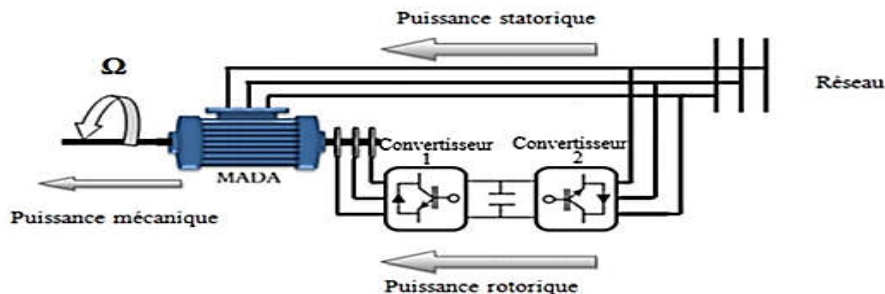


Figure I. 10: Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.

I.9.1.3 Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone

La figure I.11 montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est alors absorbée par le rotor. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [12].

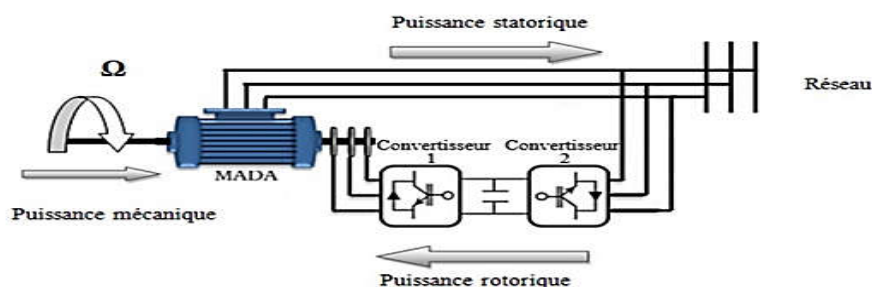


Figure I. 11: Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.

I.9.1.4 Fonctionnement en Mode Générateur Hyper-Synchrone

La figure I.12 montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

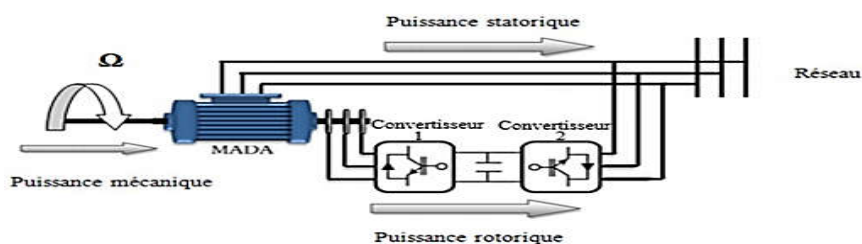


Figure I. 12: Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.

I.10 Les avantages et inconvénients de la MADA

I.10.1 Les avantages

Les principaux avantages de la MADA sont [6] :

- ✓ L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine.
- ✓ La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesse.
- ✓ Dans la MADA, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur rotorique de

haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en terme de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement

- ✓ L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rétorques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.
- ✓ En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorque à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.
- ✓ Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau
- ✓ Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation.

I.10.2 Les Inconvénients :

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants [7] :

- ✓ Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix. Pourtant certaines études prétendent le contraire.
- ✓ Nécessite une maintenance périodique ce qui va augmenter le cout d'exploitation.

I.11 Applications des éoliennes

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes :

- ❖ Systèmes isolés.
- ❖ Systèmes hybrides
- ❖ Systèmes reliés au réseau

Les systèmes obéissent à une configuration de base : ils ont besoin d'une unité de contrôle de puissance et, dans certains cas, d'une unité de stockage[6].

I.12 Conclusion

Ce chapitre représente une généralité sur les éoliennes d'une façon générale, nous avons commencé par définir les éoliennes, ensuite nous avons représenté les types des éoliennes (éolienne à axe vertical et éolienne à axe horizontal), et puis nous avons cité les avantages et les inconvénients de différentes machines utilisées dans le système éoliennes plus importants . Le plus intéressant c'est la machine asynchrone à double alimentation où on s'intéresse à l'utiliser dans notre travail. Finalement, ce chapitre inclut les avantages et inconvénients de la MADA et les applications de l'énergie éolienne.

Chapitre II
Modélisation et commande
MPPT de la turbine

II.1 Introduction

Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, la turbine et la génératrice sont les éléments les plus importants, puisque la turbine assure une transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui permet de faire tourner le rotor de la génératrice et cette dernière est la composante qui assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien. Cette étape permet de comprendre le comportement dynamique et l'interaction électromécanique de la génératrice. Avec le choix d'un modèle approprié, nous pouvons nous orienter facilement vers une commande optimale.

II.2 Description du système éolien

La figure (II.1) présente une configuration classique de la turbine éolienne utilisant une GADA. La GADA est un générateur à rotor bobiné avec un système de balais et de bagues (slip rings). Le stator de la machine est directement connecté au réseau électrique et le rotor connecté au réseau à travers une chaîne de convertisseur électronique de puissance à fréquence variable. Afin d'obtenir des vitesses de rotation hyper-asynchrone et hypo-synchrone, la chaîne de conversion électronique associée au rotor doit être bidirectionnelle. Cela est effectué à partir d'un convertisseur back-to-back qui est constitué par deux convertisseurs de tension, coté rotor ou machine « CCM » et coté réseau « CCR » avec un bus continu en commun. Le convertisseur de tension coté réseau est connecté à celui-ci via trois bobines permettant de filtrer les harmonique du courant [13] [14].

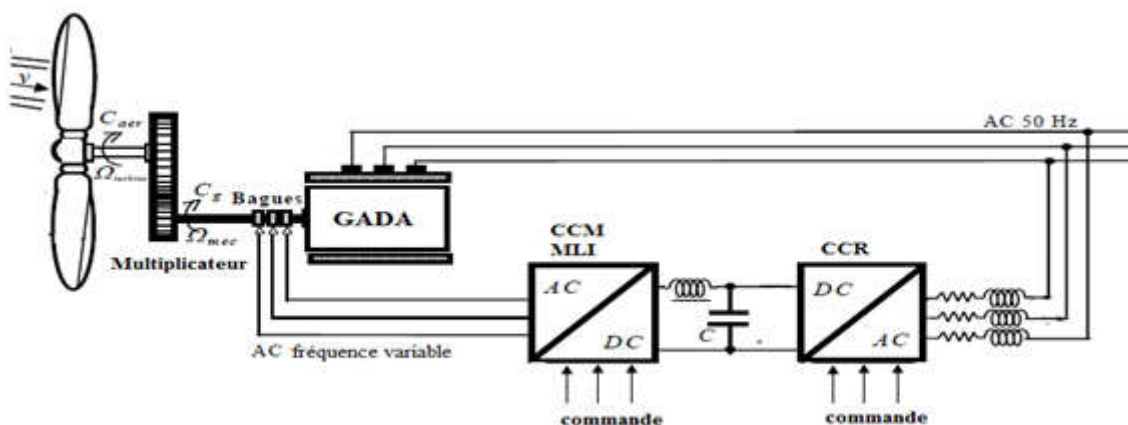


Figure .II. 1 Système éolien à vitesse variable basé sur GADA

II.3 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique

II.3.1 Loi de Betz

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

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

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

$$P_t = \frac{1}{2}m(V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II. 2})$$

Soit en remplaçant m par son expression donc :

$$P_t = \frac{1}{4}\rho S(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II. 3})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_V correspondante serait alors :

$$P_V = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{II. 4})$$

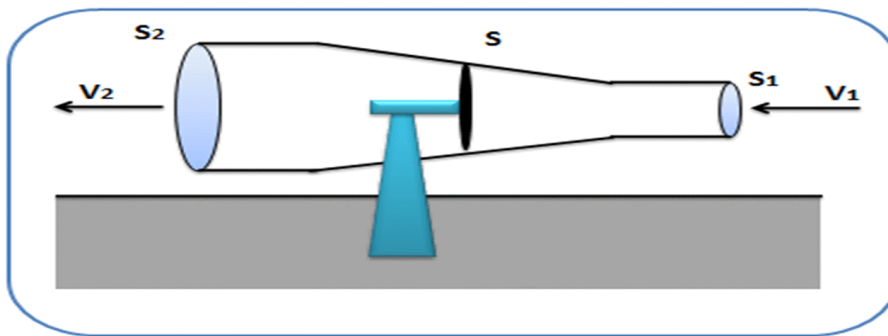


Figure .II. 2 : Tube de courant autour d'une éolienne.

Le ratio entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé est exprimé par :

$$\frac{P_t}{P_v} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{V_2^2}{V_1^2} \right) \left(1 + \frac{V_2}{V_1} \right) \quad (\text{II. 5})$$

Comme on peut le noter, cette fonction atteint son maximum pour $(V_2/V_1 = 1/3)$ et la valeur maximale de la puissance extractible du vent est 0.59 de la puissance totale contenue dans le vent.

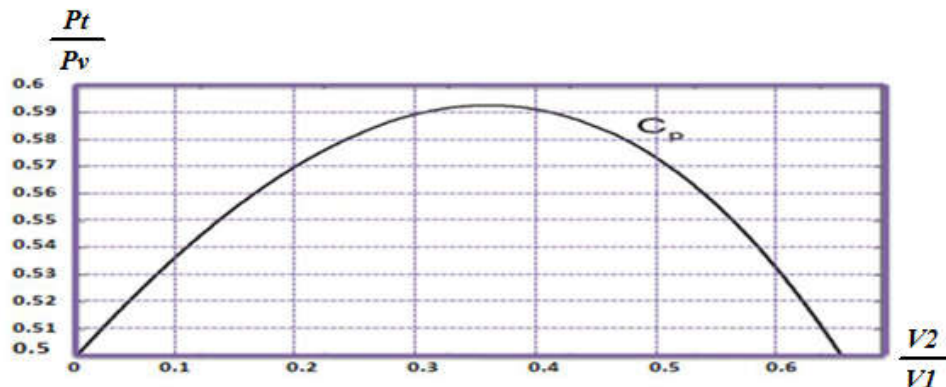


Figure .II. 3 : Coefficient de puissance

Cependant, d'après la figure II.3 on peut constater que pratiquement le dispositif de conversion extrait une puissance P_t inférieure à la puissance P_v . On définit alors un coefficient de puissance de l'aérogénérateur par la relation suivante :

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} \quad (\text{II. 6})$$

Avec $C_p < 1$.

On peut écrire donc

$$P_t = C_p P_v \quad (\text{II. 7})$$

En remplaçant P_v par son expression dans (1.5), on obtient :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \rho S V^3 \quad (\text{II. 8})$$

La valeur de ce coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ comme suit :

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (\text{II. 9})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V} \quad (\text{II. 10})$$

Où, $R\Omega_t$ est la vitesse linéaire périphérique en bout de pale de l'hélice.

On note que ce coefficient de puissance C_p peut évoluer pour le même type de turbine en fonction du nombre des pales 1, 2, 3 et 4 mais sa valeur reste bien en dessous de la limite de Betz (0.59). Et pour la même turbine, ce coefficient peut varier aussi en fonction de l'angle de calage qui indique le degré d'inclinaison des pales à chaque fois.

II.3.2 Le coefficient de couple

Le coefficient de couple C_m , est assez proche du coefficient de puissance C_p où l'expression du couple est la suivante

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{R}{\lambda} \frac{P_t}{v} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 \quad (\text{II. 11})$$

La valeur du coefficient de couple C_m est déterminée par la formule qui suit

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{C_t}{\frac{1}{2} \rho S R v^2} \quad (\text{II. 12})$$

Avec

c_m : Le coefficient couple de la turbine éolienne

Le coefficient C_m , est connue le coefficient C_p fonction de la vitesse du vent v et de la vitesse de rotation de la turbine Ω_t [12].

II.4 Modélisation de la turbine éolienne

Le dispositif étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant trois pales orientables de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_{turbine} qui est relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique [9] (Figure(II.4))

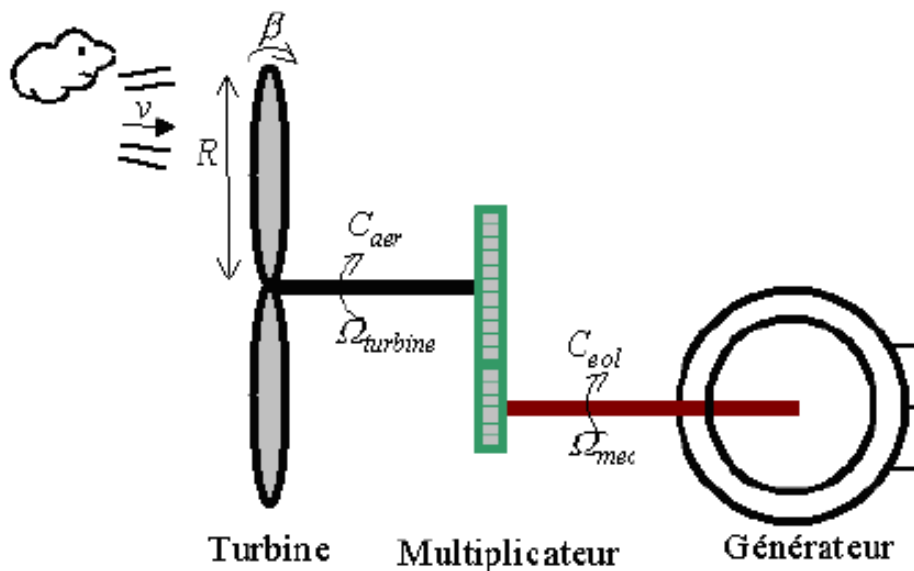


Figure .II. 4 Schéma de la turbine éolienne

II.4.1 Modèle aérodynamique de la turbine

II.4.1.1 Modèle du vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. C'est l'entrée du système qu'on étudie. La mesure exacte du vent à la hauteur des turbines est assez complexe. Cependant; le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques[4]. Des différentes approches utilisées dans les littératures pour la génération d'une série synthétique de vent, dans notre cas, la vitesse de vent sera modélisée par une somme de plusieurs harmoniques.

Le profil de vent peut être modélisé par une fonction scalaire qui évolue dans le temps, modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques, conformément à [15] [16] :

$$V(t) = 8.2 + 2 \sin(\omega t) - 1.75 \sin(3\omega t) + 1.5 \sin(5\omega t) - 1.25 \sin(10\omega t) + \sin(30\omega t) + 0.5 \sin(50\omega t) + 0.25 \sin(100\omega t) \quad (\text{II. 13})$$

$$\text{Avec : } \omega = \frac{2\pi}{10}$$

II.4.1.2 La puissance aérodynamique

La puissance éolienne du vent est en fonction de trois paramètres: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [17].

Et la puissance aérodynamique au niveau du rotor de la turbine s'écrit sous la forme suivante [18]:

$$P_t = C_p P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II. 14})$$

Le rendement aérodynamique de l'éolienne est exprimé par $C_p(\lambda, \beta)$, ce coefficient dépend du ratio λ , qui représente le rapport entre la vitesse à l'extrémité des pales et la vitesse du vent, et de l'angle d'orientation des pales β [19] [20]. Il est défini par l'équation (II.10) .

Dans ce travail, nous avons appliqué de $C_p(\lambda, \beta)$, une forme qui a été proposée par [21]:

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left[\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right] \exp \left[\frac{-C_5}{\lambda_i} \right] + C_6 \lambda \quad (\text{II. 15})$$

$$\text{Avec : } \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II. 16})$$

Et $C_1 = 0.5176$; $C_2 = 116$; $C_3 = 0.4$; $C_4 = 5$; $C_5 = 21$; $C_6 = 0.0068$.

II.4.1.3 Le couple aérodynamique

L'énergie cinétique du vent capturée par l'aéroturbine se transforme en énergie mécanique qui se traduit par un couple moteur C_t faisant tourner le rotor à une vitesse Ω_t . cependant, il est plus aisé d'utiliser le coefficient de couple C_c afin d'avoir un générateur de couple et non plus un générateur de puissance qui sera couplé à un générateur électrique, donc le couple aérodynamique s'exprime de la façon suivante[22] :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} \quad (\text{II. 17})$$

On peut réécrire l'expression du couple aérodynamique sous la forme :

$$C_t = \frac{1}{2} \cdot C_c(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \pi R^3 V^2}{\Omega_t} \quad (\text{II. 18})$$

Où

$$C_c(\lambda, \beta) = \frac{c_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (\text{II. 19})$$

$C_c(\lambda, \beta)$ est le coefficient du couple aérodynamique.

Le schéma bloc qui représente le modèle aérodynamique est illustré sur la figure (II.5)

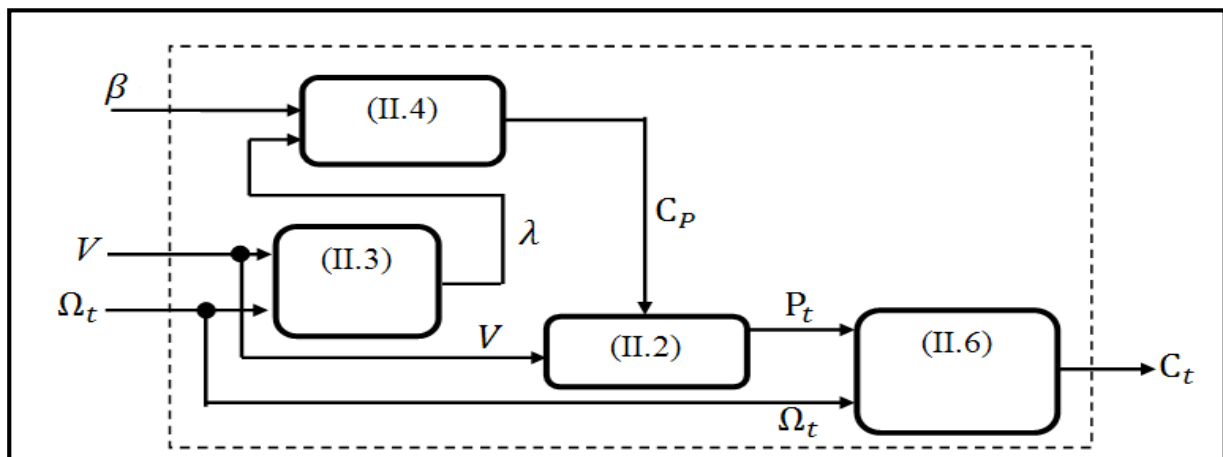


Figure .II. 5 :Modèle aérodynamique de la turbine éolienne

II.4.2 Modélisation mécanique de la turbine

Le système mécanique de l'éolienne est composé de quatre organes et peut être représenté comme illustré sur la figure (II.6) [4][8] .

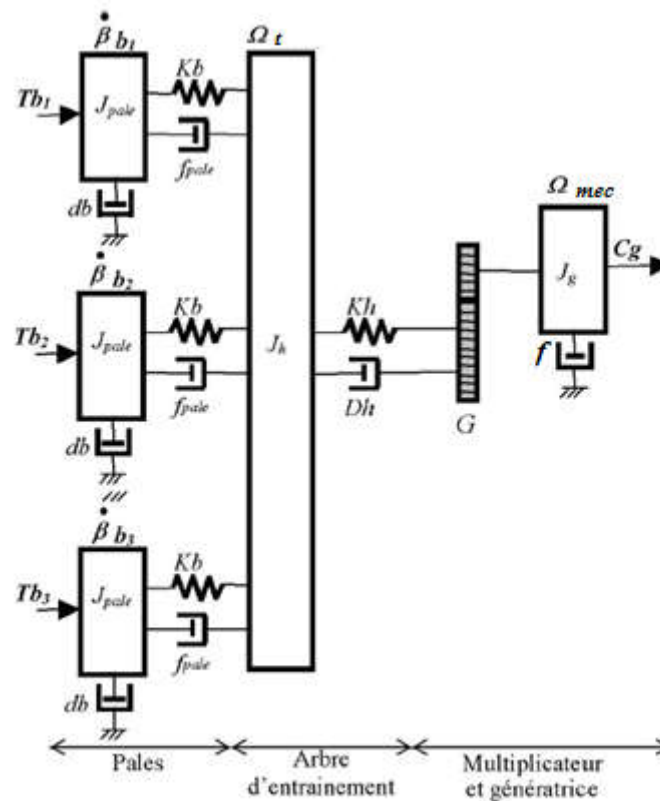


Figure .II. 6 : Système mécanique de l'éolienne

1- Trois pales considérées de conception identique et ayant les mêmes paramètres à savoir l'inertie J_{pale} , élasticité Kb , et coefficient de frottement db . Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées $\dot{\beta} b_1$, $\dot{\beta} b_2$, $\dot{\beta} b_3$. Chaque pale reçoit une force Tb_1 , Tb_2 , Tb_3 qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée.

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

- son inertie J_h
- son élasticité Kh
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur Dh

3- le multiplicateur de vitesse, de gain G .

4- Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie J_g
- un coefficient de frottement f .

II.4.2.1 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est l'intermédiaire entre la turbine et le générateur. Il a pour but de régler la vitesse de la turbine Ω_t assez lente à la vitesse de la génératrice Ω_{mec} . Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Il s'agit d'un dispositif très complexe que nous avons modélisé très simplement par les deux équations suivantes :

$$G = \frac{C_t}{C_m} \quad (\text{II. 20})$$

$$\Omega_{mec} = G * \Omega_t \quad (\text{II. 21})$$

II.4.2.2 Equation dynamique de l'arbre de transmission

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II. 22})$$

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

f : le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

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

$$C_{mec} = C_m - C_{em} - C_f \quad (\text{II. 23})$$

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

C_m : Le couple issu du multiplicateur.

C_f : Le couple résistant dû aux frottements.

$$C_f = f \Omega_{mec} \quad (\text{II. 24})$$

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont donc: le couple issu du multiplicateur C_m et le couple électromagnétique C_{em} .

Le schéma bloc de la figure (II.7) correspond à la modélisation aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Il montre que la vitesse de rotation Ω_{mec} de la génératrice, donc de la turbine, peut être contrôlée par action sur le couple électromagnétique C_{em} de la génératrice, ou par action sur l'angle de calage β .

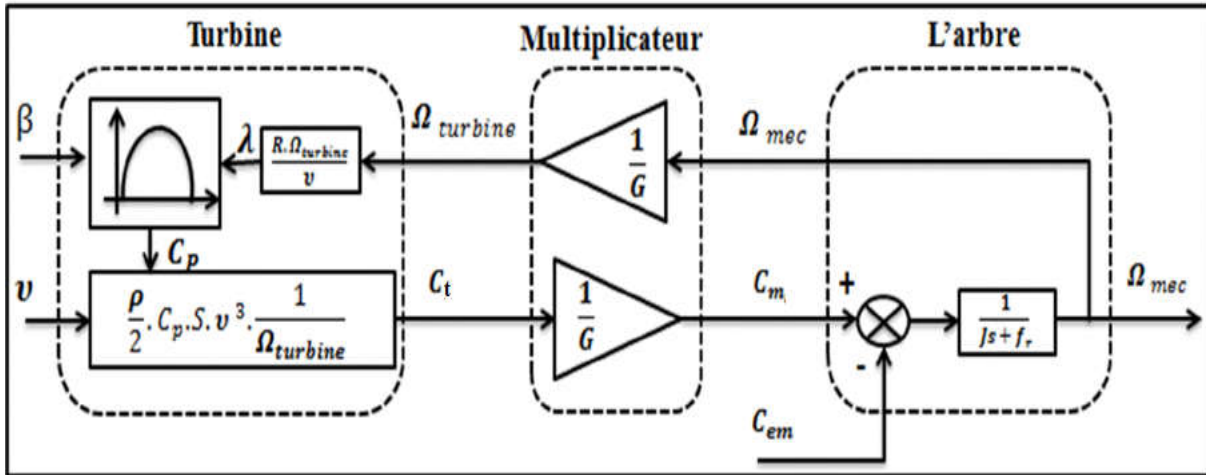


Figure .II. 7 : Schéma bloc de modèle de la turbine.

II.5 Stratégies de commande de la turbine éolienne

II.5.1 Caractéristique puissance vitesse d'éoliennes de grande puissance

La caractéristique Puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones principales de fonctionnement (figure (II.8))

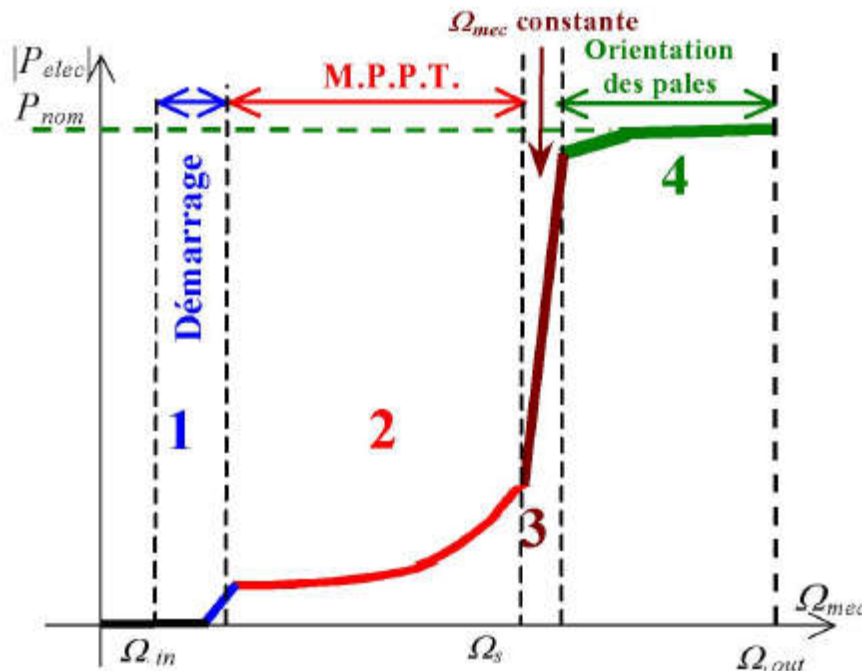


Figure .II. 8 : Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne de grande puissance.

- **Zone 1** : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω_{in} .
- **Zone 2** : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué. Pour

extraire le maximum de la puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, c'est à dire $\beta=2^\circ$. Ce processus continue jusqu'à atteindre une certaine valeur de la vitesse mécanique.

- **Zone 3** : Au delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .
- **Zone 4** : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales (pitch control).
- Au delà de la vitesse Ω_{out} , un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

II.5.2 Technique d'extraction de maximum de puissance

Dans cette partie, nous présenterons différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T.) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne. On distingue deux familles de structures de commande qui sont maintenant expliquées [9] (Figure (II.8)) :

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

II.5.2.1 Maximisation de puissance avec asservissement de la vitesse mécanique

Le correcteur de vitesse constitue la partie « intelligente » de l'asservissement dans cette méthode de maximisation de puissance.

L'action du correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches :

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

La représentation simplifiée sous forme de schéma blocs est donnée en figure (II.9).

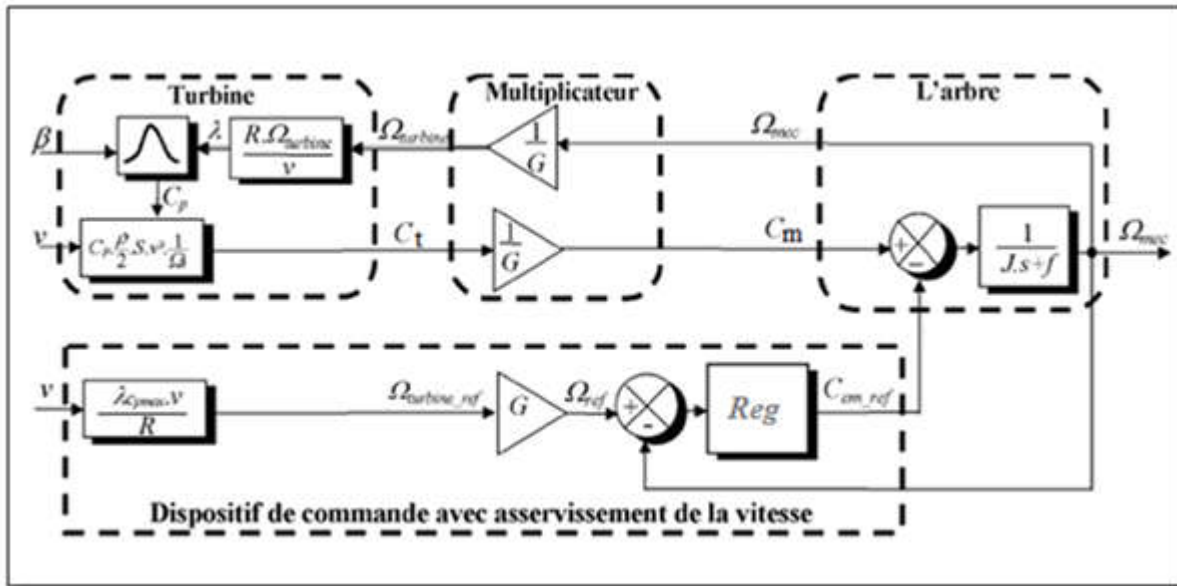


Figure .II. 9 : schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse

Différentes technologies de correcteurs peuvent être considérées pour l'asservissement de la vitesse.

II.5.2.2 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

Etant donné que la technique précédente de maximisation de puissance repose sur la connaissance précise de la vitesse du vent.

Et qu'en pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui erroné la lecture de la vitesse du vent.
- Le diamètre de la surface balayée par les pales étant important, une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [9].

Cette seconde structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent.

La représentation sous forme de schéma-blocs est montrée à la figure (II.10)

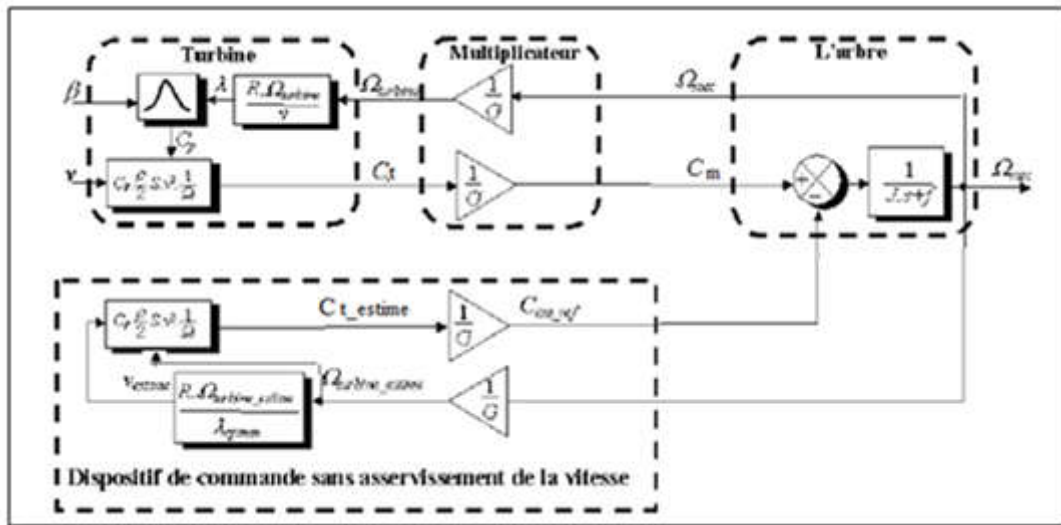


Figure .II. 10 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

II.6 Résultats de simulation

Afin de valider Le système étudié, les deux techniques d'extraction de maximum de puissance sont simulées à l'aide de MATLAB/SIMULINK. Tel que les figures. II. 11 et 12 représentent respectivement les contrôles MPPT sans et avec asservissement de la vitesse mécanique

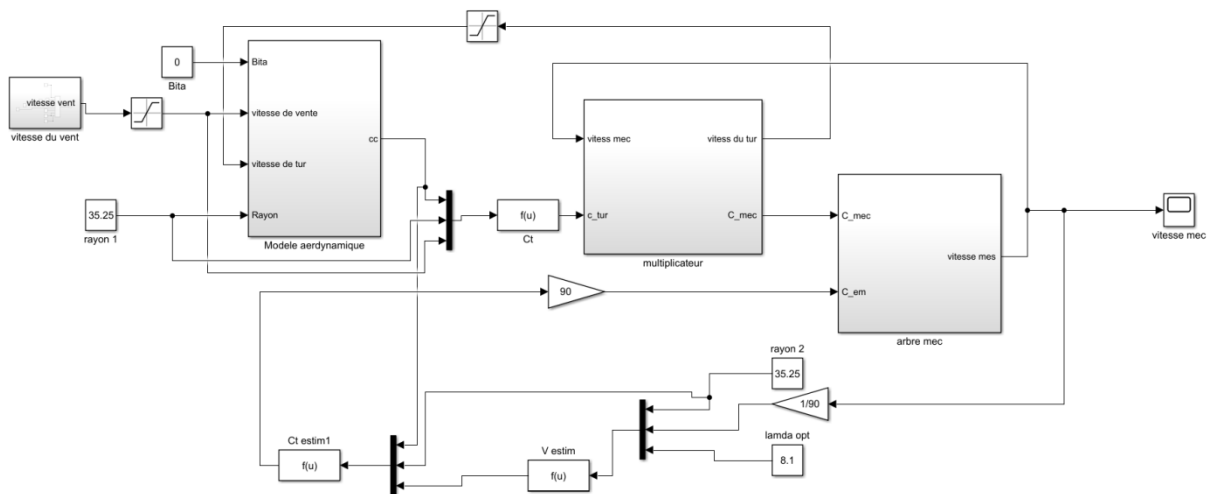


Figure .II. 11 : Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.

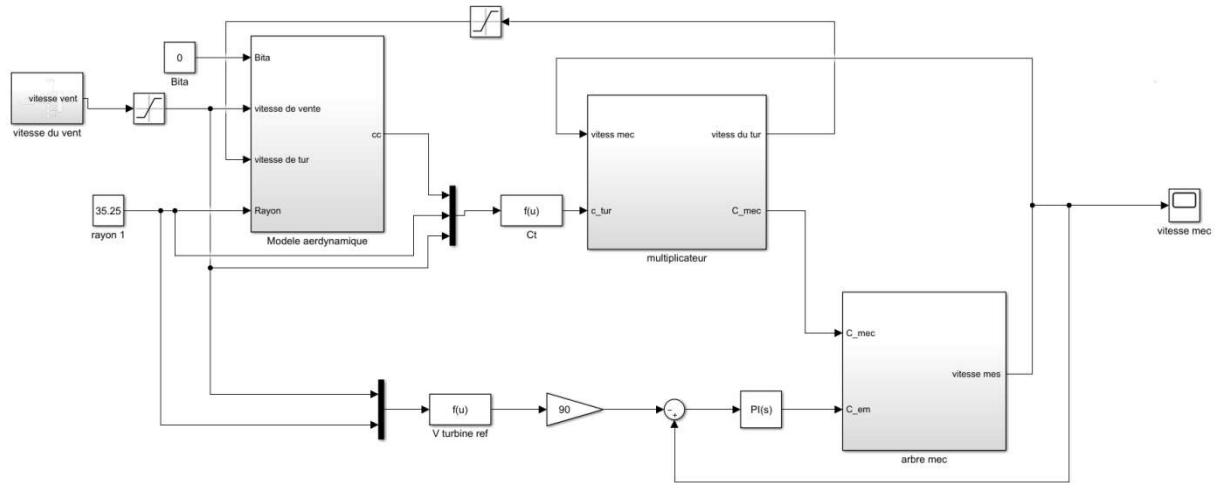


Figure .II. 12 : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.

Les caractéristiques C_p , pour différentes valeurs de l'angle de calage β , sont illustrés sur la Figure.II.13. La valeur maximale de C_p ($C_{pmax} = 0.48$) est atteinte pour $\beta = 0$ et $\lambda = 8.1$. Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur optimale λ_{opt} [4].

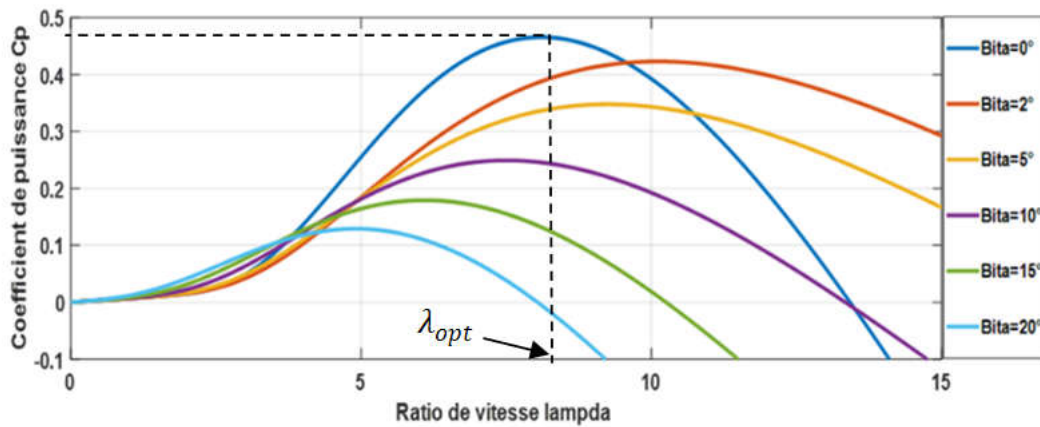


Figure .II. 13 : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β

Ces deux structures de commandes ont été simulées en considérant le profil de vent moyen autour de 8.2m/s (figure II.14). Nous montrons les résultats obtenus pour les différentes stratégies de commande utilisées.

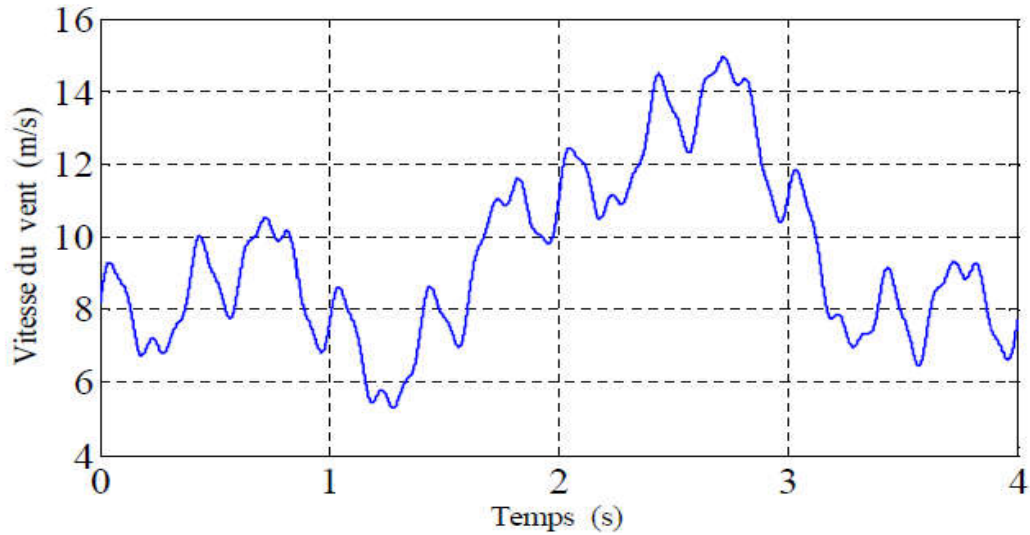


Figure .II. 14 : Simulation du profil de la vitesse du vent.

II.6.1 Résultats obtenus avec la structure de commande sans asservissement de vitesse :

Les résultats de simulation correspondant à cet algorithme de commande montrent que les variations de la vitesse mécanique sont adaptées à la variation de la vitesse du vent (figure II.15). L'erreur est négligeable entre le couple électromagnétique mesuré et estimé ce qui signifie que l'extraction de puissance maximale est assurée par se contrôle (figure II.16), et que le coefficient de puissance est maximal (figure II.17) et la vitesse ratio est optimal (figure II.18) mais il y a des oscillations dans les deux courbes.

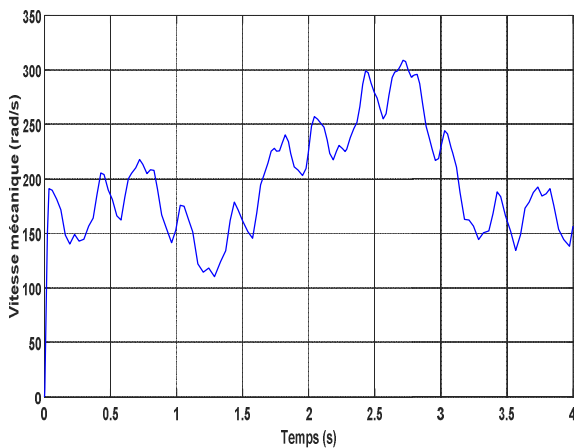


Figure .II. 15 : la vitesse mécanique

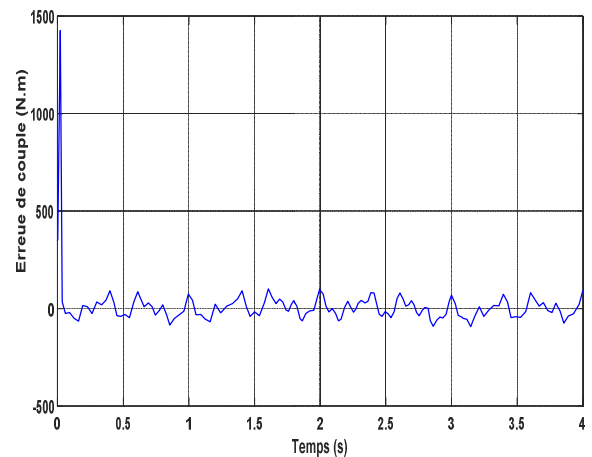


Figure .II. 16 :l'erreur de couple
Electromagnétique

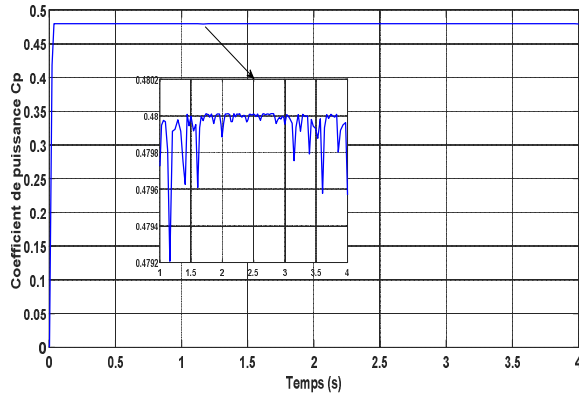


Figure .II. 17 : coefficient de puissance en fonction de temps

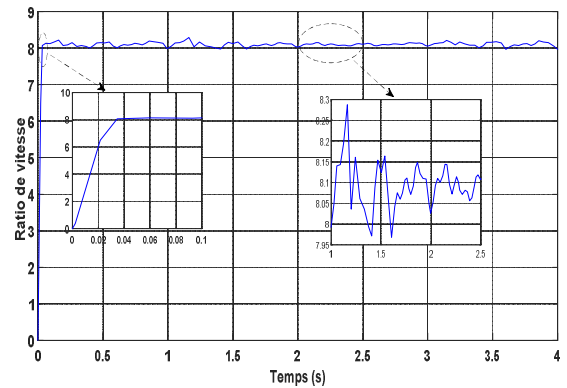


Figure .II. 18 : la vitesse Ratio en fonction de temps

II.6.2 Résultats obtenus avec la structure de commande avec asservissement de vitesse

Les résultats de simulation avec le même profil du vent inhérents à cet algorithme sont montrés sur les figures II.19, II.20, II.21 et II.22.

Les résultats obtenus montrent les meilleures performances statiques et dynamiques, meilleure poursuite de la consigne contrôlée (vitesse) et un temps de réponse souhaitable offertes par le régulateur PI, avec la minimisation des oscillations en régime permanent au niveau de coefficient de puissance et ratio de vitesse , en plus l'erreur de couple est adjacente à zéro plus rapidement.

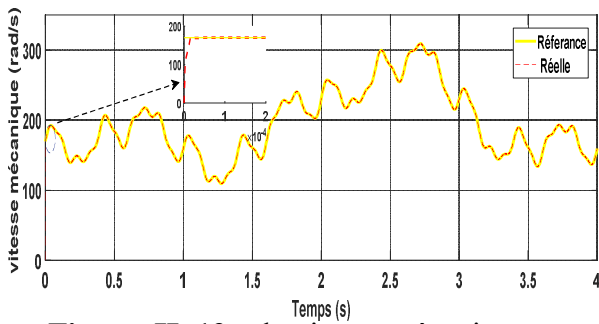


Figure .II. 19 : la vitesse mécanique

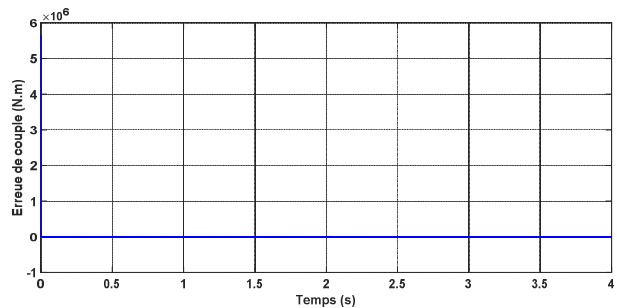


Figure .II. 20 : l'erreur de couple

Electromagnétique

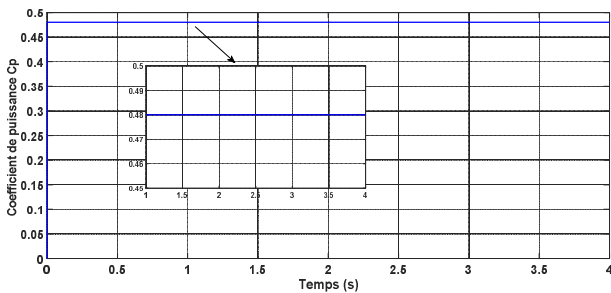


Figure .II. 21 : coefficient de puissance en fonction de temps

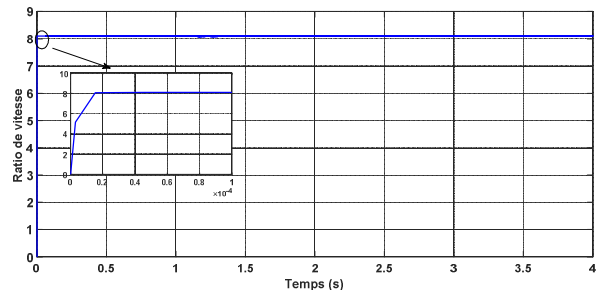


Figure .II. 22 : la vitesse Ratio en fonction de temps

II.7. Conclusion

Ce second chapitre a été dédié à la présente le modèle mathématique de la turbine tel que la modélisation aérodynamique et mécanique de la turbine qui est basé sur quelque hypothèses simplificatrices

Afin de maximiser la puissance électrique générée on a utilisé la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T.) avec et sans asservissement de vitesse

Les résultats obtenus montrent que la structure **avec asservissement de vitesse** donne des meilleures performances statiques et dynamiques, meilleure poursuite de la consigne contrôlée (vitesse) et un temps de réponse souhaitable offertes par le régulateur PI, cette technique repose sur la connaissance précise de la vitesse du vent, mais en pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser

Chapitre III
Commande *linéaire* du
ystème éolien à base de la
GADA

III.1 Introduction

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 11KW reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Étant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance.

Dans ce qui suit, on présente la modélisation de la machine asynchrone double alimentée par un onduleur à MLI commandé par la commande vectorielle.

III.2 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation MADA

III.2.1 Historique

Connue depuis 1899, la Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA), DFIM (de l'anglais, Doubly Fed Induction Machine), est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures : le stator et le rotor. Elle a été d'abord étudiée pour être utilisée en tant que moteur à grande vitesse. Les problèmes d'instabilités rencontrés dès lors l'ont fait abandonner pour un temps. Grâce au progrès des technologies de l'électronique de puissance et de la microinformatique, diverses applications de la MADA sont alors devenues possibles dont l'intérêt réside principalement dans les possibilités de contrôle du flux des puissances pour les régimes caractéristiques hypo et hyper-synchrones, cela étant aussi bien dans les fonctionnements moteur que générateur. Dans ce contexte, la théorie de l'orientation du flux, apparue dans le début des années 70 du vingtième siècle, appliquée à la MADA avec succès a donné lieu à un outil puissant pour son contrôle [22].

III.2.2 Hypothèses simplificatrices

Pour commander la machine asynchrone à double alimentation, comme bien d'autres procédés, il nous faut disposer de son modèle avec une connaissance plus ou moins précise des éléments le constituant. Mathématiquement, on peut représenter la GADA par un modèle entrées sorties sous forme de fonction de transfert ou encore sous forme standard d'équations en variables d'état.

De ce fait, il est réaliste de poser des conditions et des hypothèses pour écrire le modèle comportemental. Une première difficulté réside dans la commande de cette machine à

cause du couplage du flux magnétique et du couple électromagnétique ; la deuxième est liée à l'identification des paramètres [23].

La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation est établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes [24] :

- On suppose les circuits magnétiques non saturés (perméabilité constante), et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordres linéaires.
- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, où l'effet de peau est négligé.
- Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.
- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- On considère que la machine fonctionne en régime équilibré.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité des flux ;
- La constance des inductances propres ;
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique entre leurs axes magnétiques.

III.2.3 Modèle de la machine asynchrone triphasé

Comme toutes les autres machines, la machine asynchrone double alimentée (MADA) est une machine réversible qui peut fonctionner en mode génératrice (GADA). En cas où on inverse son couple en injectant un couple moteur au lieu d'un couple résistant au niveau de son arbre, elle garde toujours son propre modèle [25].

En prenant en compte les hypothèses simplificatrices citées précédemment, on peut exprimer le modèle de cette machine en se basant sur les relations suivantes :

➤ Les tensions statoriques et rotoriques sont données par la forme matricielle suivante:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad (\text{III. 1})$$

Avec

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{III. 2})$$

Les flux statorique et rotorique sont exprimés en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles comme suit:

$$\begin{cases} [\phi_S] = [L_S] \cdot [I_S] + [M_{SR}] \cdot [I_R] \\ [\phi_R] = [L_R] \cdot [I_R] + [M_{RS}] \cdot [I_S] \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

Où : $[L_S]$ et $[L_R]$ sont les matrices des inductances statoriques et rotoriques, elles sont données par :

$$[L_S] = \begin{bmatrix} l_S & m_S & m_S \\ m_S & l_S & m_S \\ m_S & m_S & l_S \end{bmatrix} ; \quad [L_R] = \begin{bmatrix} l_R & m_R & m_R \\ m_R & l_R & m_R \\ m_R & m_R & l_R \end{bmatrix} \quad (\text{III. 4})$$

Et $[M_{SR}]$ est la matrice des inductances mutuelles, entre le stator et le rotor, elle est donnée par :

$$[M_{SR}] = m_{SR} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{III. 5})$$

Avec :

$$[M_{SR}] = [M_{RS}] = [L_m] \quad (\text{III. 6})$$

➤ Equation mécanique :

L'équation mécanique reflétant le mouvement de rotation de l'arbre du moteur électrique est donné par le couple électromagnétique:

$$C_{em} = \frac{1}{2} \cdot [I_S]^T \cdot \left\{ \frac{d}{d\theta} [L] \right\} \cdot [I_R] \quad (\text{III. 7})$$

avec

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_S] & [L_m] \\ [L_m] & [L_R] \end{bmatrix} \quad (\text{III. 8})$$

et :

$$[I] = [I_{SA} \ I_{SB} \ I_{SC} \ I_{Ra} \ I_{Rb} \ I_{Rc}]^T = \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} \quad (\text{III. 9})$$

Les matrices $[L_S]$ et $[L_R]$ ne contiennent que des termes constants lorsque l'angle θ varie, cela permet de simplifier l'expression du couple soit:

$$C_{em} = \frac{1}{2} \cdot [I_S]^T \cdot \left\{ \frac{d}{d\theta} [L_m] \right\} \cdot [I_R] \quad (\text{III. 10})$$

On peut également exprimer le couple électromagnétique en fonction du couple résistant C_r créée par la charge mécanique du moteur, du moment d'inertie de toutes les parties tournantes et du coefficient de frottement visqueux f :

$$C_{em} = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega + C_r \quad (\text{III. 11})$$

Au regard de ces résultats, nous pouvons noter d'une part, que le nombre de variable important, et d'autre part le système est complexe. En effet, nous aboutissons à un ensemble de huit équations, six de nature électrique et deux pour le couple électromagnétique. Il est clair que les équations (III.1) et (II.3) sont à coefficients variables, puisque la matrice des mutuelles inductances contient des termes qui sont fonction de θ , et donc fonction du temps. C'est cela justement qui rend la résolution analytique de ce système d'équations très difficile.

III.2.4 Modèle de la MADA dans le repère de Park

La transformation de Park constitue d'une transformation triphasée - biphasée, suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère $(\alpha-\beta)$, puis vers le repère $(d-q)$. Le repère $(\alpha-\beta)$ est fixe par rapport au repère (abc) , par contre le repère $(d-q)$ est mobile il forme avec le repère fixe $(\alpha-\beta)$ un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park [25].

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variables faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et l'axe du repère de Park $(d-q-o)$.

Pour réaliser cette transformation algébrique on utilise les matrices de Park directe (III.12) et inverse (III.13) :

$$[P(\theta)] = \sqrt{(2/3)} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos (\theta - 2\pi/3) & \cos (\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin (\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 12})$$

L'angle θ dans la matrice de Park $[Ap]$ prend la valeur (θ_s) pour les grandeurs statoriques et $(\theta_s - \theta_r)$ pour les grandeurs rotoriques.

D'autre part :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{(2/3)} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & \cos \theta & -\sin \theta \\ 1/\sqrt{2} & \cos (\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & \cos (\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{III. 13})$$

Alors le modèle de la GADA dans un repère tournant diphasé $(d-q)$ en utilisant les transformations de Park est définie par:

➤ Les équations des tensions statoriques et rotoriques [22] :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \dot{\theta}_s \cdot \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \dot{\theta}_s \cdot \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \dot{\theta}_r \cdot \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \dot{\theta}_r \cdot \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III. 14})$$

➤ Les flux statoriques et rotoriques

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + L_m \cdot I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + L_m \cdot I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + L_m \cdot I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + L_m \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III. 15})$$

Les angles de Park relatifs aux grandeurs statoriques et rotoriques sont liés, d'après la Figure II.12, par la relation :

$$\theta_s = \theta_e + \theta_r \quad (\text{III. 16})$$

Avec respectivement:

V_{sd}, V_{sq}, V_{rd} et V_{rq} les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadratures du système diphasé.

I_{sd}, I_{sq}, I_{rd} et I_{rq} les courants statoriques et rotoriques directs et en quadratures du système diphasé.

θ_s : l'angle électrique du champ tournant statorique,

θ_r : l'angle électrique du champ tournant rotorique.

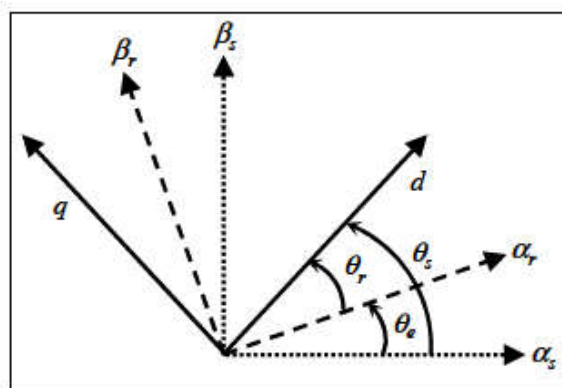


Figure III. 1 :Angles de Park des grandeurs statoriques et rotoriques .

Le couple électromagnétique C_{em} peut être exprimé, à partir des flux et des courants statoriques, par :

$$C_{em} = p \cdot (\varphi_{sd} \cdot I_{sq} - \varphi_{sq} \cdot I_{sd}) \quad (\text{III. 17})$$

En faisant un choix de variables et en remplaçant les flux par leurs expressions données par les relations (II.30) on peut établir d'autres expressions pour le couple :

$$C_{em} = p \cdot (\varphi_{rd} \cdot I_{rq} - \varphi_{rq} \cdot I_{rd}) \quad (\text{III. 18})$$

$$C_{em} = p \cdot L_m (I_{sq} \cdot I_{rd} - I_{sd} \cdot I_{rq}) \quad (\text{III. 19})$$

$$C_{em} = p \cdot \frac{L_m}{L_r} (\varphi_{sq} \cdot I_{rd} - \varphi_{sd} \cdot I_{rq}) \quad (\text{III. 20})$$

$$C_{em} = p \cdot \frac{L_m}{L_r} (\varphi_{rd} \cdot I_{sq} - \varphi_{rq} \cdot I_{sd}) \quad (\text{III. 21})$$

Ces expressions pourront être à la base de recherche de stratégie de commande de la machine. Pour compléter le modèle nous pouvons ajouter la relation fondamentale de la dynamique pour les corps en rotation [22] :

$$C_e = j \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega - C_r \quad (\text{III. 22})$$

Le bilan de puissance côté stator et rotor en est [26]:

Côté stator

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III. 23})$$

Côté rotor :

$$\begin{cases} P_r = V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq} \\ Q_r = V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III. 24})$$

III.3 Commandes linéaires des puissances de la GADA

La difficulté qui réside dans la commande d'une machine asynchrone est le fait que son modèle mathématique, dans la configuration de Park, est multi-variable et fortement couplé, c'est-à-dire qu'il existe un couplage complexe entre les deux armatures stator et rotor et entre l'axe d et q. Ce n'est que vers les années 70 que BLACSHKE a réussi à réaliser la première commande découplée de la machine asynchrone appelée la commande vectorielle à flux orienté.

Cette commande est une solution plus attractive pour des applications à haute performance comme l'entraînement à vitesse variable et les systèmes de l'énergie. Pour le cas du contrôle vectoriel de la GADA, il sera question de maîtriser les échanges d'énergie et notamment les transferts de puissances statorique active et réactive envoyées sur le réseau.

III.3.1 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple, une grande plage de commande de vitesse et une haute efficacité pour une grande plage de charge en régime permanent.

Nous considérons que la GADA fonctionne en mode hyper-synchrone, ce qui permet un transfert optimal de puissance en utilisant la commande vectorielle avec orientation du flux statorique. A cet effet nous allons, donc déterminer les équations qui lient les puissances actives et réactives statoriques aux grandeurs rotoriques sur lesquelles nous agissons pour commander la machine.

- Il s'agit d'obtenir un certain découplage entre le stator et le rotor afin que l'expression du couple soit similaire à celle du couple de la machine à courant continu. Le principe consiste à orienter le flux statorique suivant l'axe d du référentiel tournant (figure III.1). On a donc : $\phi_{qs} = 0$ et par suite $\phi_{ds} = \phi_s$.
- Souvent dans le cas d'une GADA de moyenne et de grande puissance, la résistance statorique R_s est négligée tout en considérant le flux statorique constant (cette condition est assurée dans le cas d'un réseau stable connecté au stator de la GADA)[25].

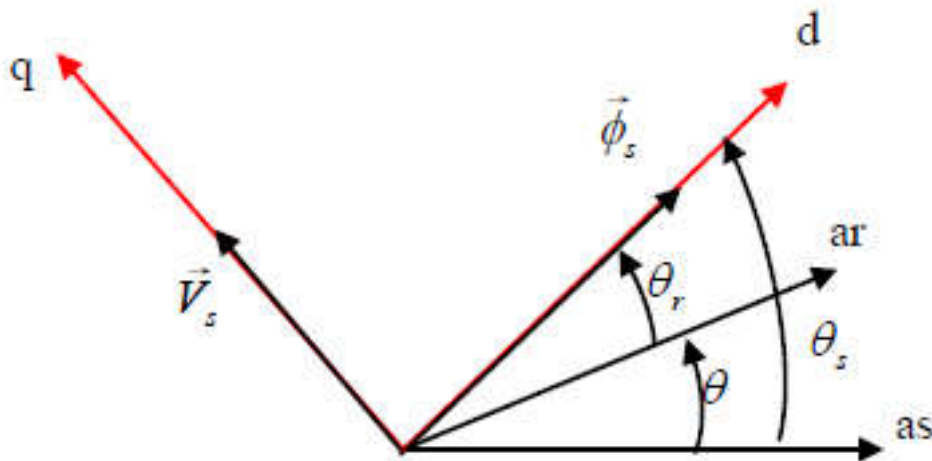


Figure III. 2: Orientation du flux statorique sur l'axe d.

Sous ces hypothèses, les équations (III.14)et (III.15)deviennent :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \cdot \phi_s \end{cases} \quad (III. 25)$$

$$\begin{cases} \phi_s = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \\ 0 = L_m I_{qr} + L_s I_{qs} \end{cases} \quad (III. 26)$$

L'équation (III.26) nous permet d'écrire :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (III. 27)$$

$$C_{em} = p \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{qr}) \quad (\text{III. 28})$$

Ainsi dans ce repère, en prenant en considération les hypothèses émises, les puissances active et réactive deviennent alors :

$$\begin{cases} P_s = V_s \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_s \cdot I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III. 29})$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (III.27) dans l'équation (III.29) nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot I_{qr} \\ Q_s = V_s \cdot \frac{\phi_s}{L_s} - V_s \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot I_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 30})$$

En tirant $\phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ de l'équation (III.25), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{V_s L_m}{L_s} \cdot I_{dr} \quad (\text{III. 31})$$

Par ailleurs, on pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, en remplaçant dans l'équation (III.14) les valeurs des courants statoriques de l'équation (III.27) et en remplaçant le résultat ainsi obtenu dans l'équation (III.32)

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \times I_{rd} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) \times \frac{dI_{rd}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) \times I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \times I_{rq} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) \times \frac{dI_{rq}}{dt} + g\omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) \times I_{rd} + g\omega_s \times \frac{L_m \times V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III. 32})$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \times I_{rd} - g\omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) \times I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \times I_{rq} + g\omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) \times I_{rd} + g\omega_s \times \frac{L_m \times V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III. 33})$$

V_{rd} et V_{rq} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $\left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right)$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche le terme $g\omega_s \frac{L_m V_s}{\omega_s L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur [3].

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques

fournis. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la génératrice asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite comme le montre la figure (III.3).

Sachant que s dans la figure présente l'opérateur de LAPLACE, et les termes de couplage sont désignés par v_2, v_3 et les f.e.m's par v_1 et v_4 .

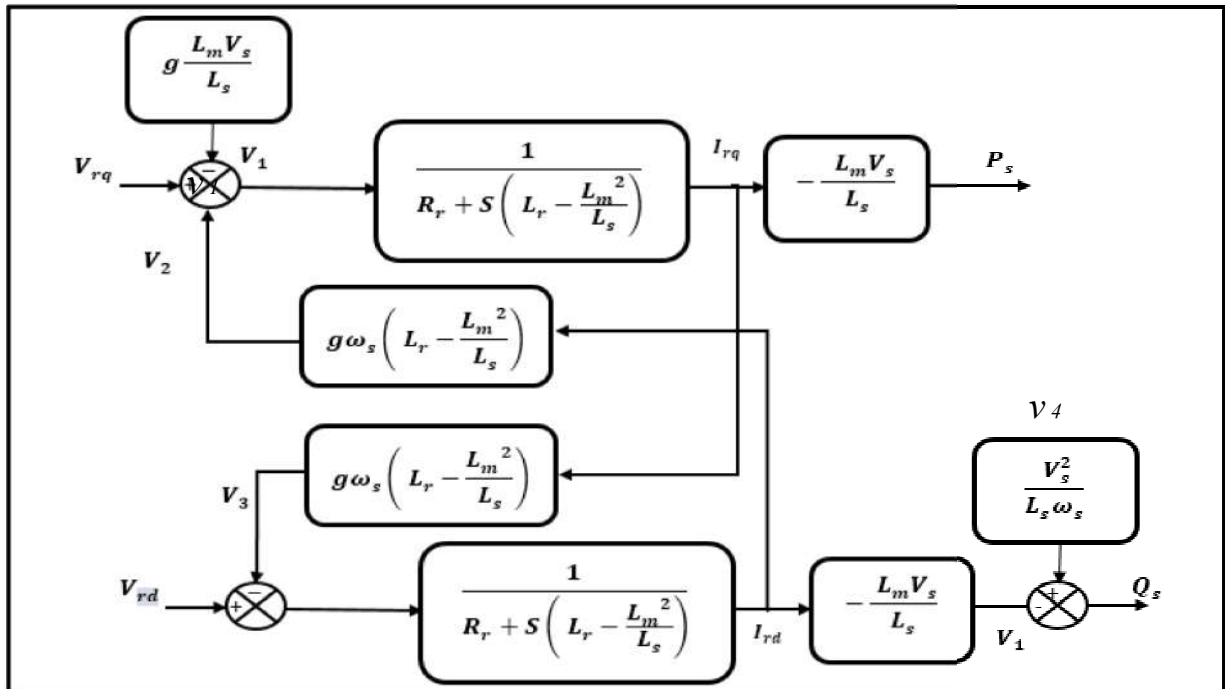


Figure III. 3:Schéma bloc du système à réguler.

Dans ce schéma nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances active et réactive statoriques. Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle, étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe "q" rotorique et la puissance réactive pour l'axe "d" rotorique. A cet effet, deux modes de contrôle sont proposées [27] :

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée **méthode directe** car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine. L'avantage de cette technique est qu'elle dépend moins des variations paramétriques.
- La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler

les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode sera appelée **méthode indirecte**

III.3.2 La commande vectorielle directe

Cette méthode de commande a été proposée par Blaschke. Dans ce cas, la connaissance du module de flux et de sa phase est requise pour assurer un découplage entre le couple et le flux quelque soit le régime transitoire effectué.

L'intérêt que présente cette Méthode est la simplicité de sa mise en œuvre et de prendre beaucoup moins ou dépend moins les variations de paramètres de la machine [25]. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est que les capteurs sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans des conditions sévères telles que les vibrations et les échauffements excessifs. De plus, les signaux captés sont entachés des harmoniques et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables automatiquement [6].

La figure (III.4) présente le schéma bloc de la commande directe de GADA

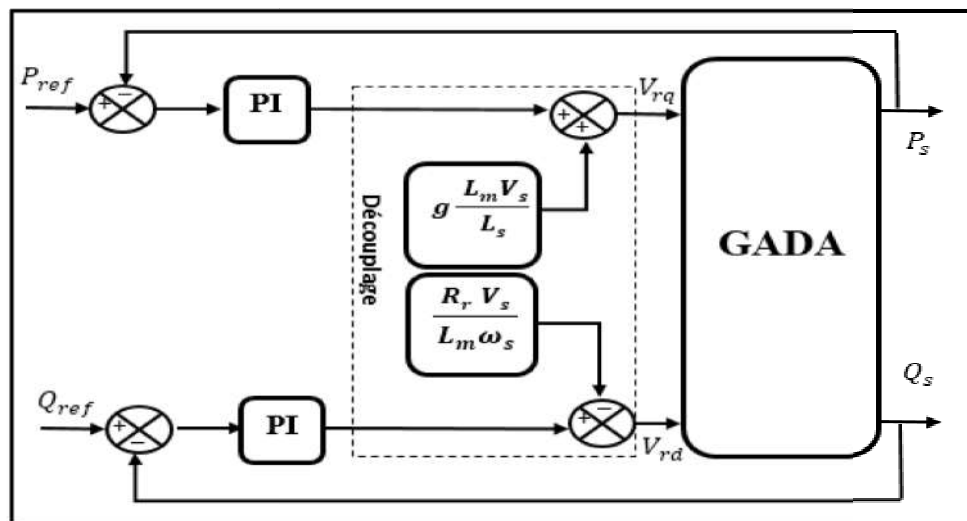


Figure III. 4:schéma bloc de la commande directe.

III.3.3 Commande vectorielle indirecte

Le flux est régulé en boucle ouverte. Il n'est ni mesuré ni estimé. Les grandeurs (tensions ou courants) assurant l'orientation du flux et le découplage sont évaluées à partir des équations de la machine en régime transitoire[26]. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [23] [28].

La méthode indirecte consiste à reproduire en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler [7].

On reproduit ainsi le schéma bloc du système en sens inverse en aboutissant à un modèle qui correspond à celui de la machine

III.3.3.1 Commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} et les puissances Q_s et P_s en boucle fermé. Le schéma simplifié de l'ensemble commande-bloc découplage-machine [29] [30] est illustré sur la figure (III.5).

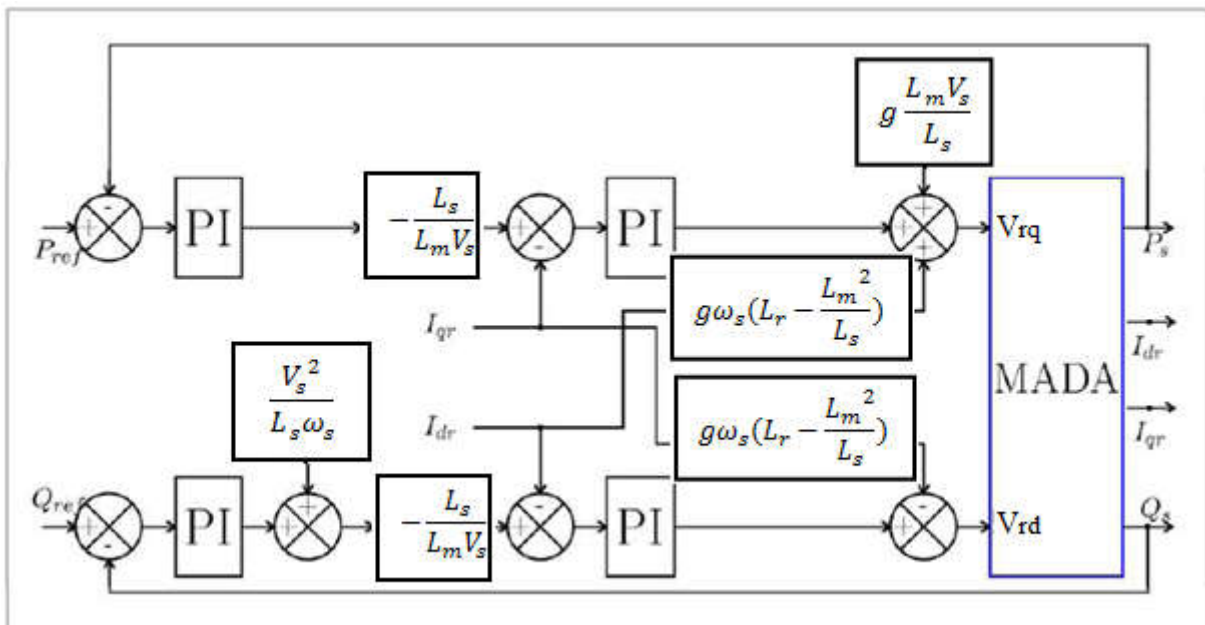


Figure III. 5: schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance

III.3.4 Synthèse des régulateurs

La synthèse des régulateurs est la même pour chaque type de structures (directe et indirecte). Rappelons que la synthèse des régulateurs sera effectuée sur la base du modèle simplifié (c'est-à-dire celui établi en négligeant la résistance d'une phase statorique), non pas sur le modèle réel de la machine.

Pour le réglage des puissances active et réactive de la GADA on utilise ee régulateur Proportionnel Intégral (PI), il est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. C'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système éolien [31].

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de la conception des régulateurs PI. Dans ce qui suit, nous nous intéressons à la méthode de conception qui est basée sur la compensation de la constante de temps du régulateur avec celle du processus de la grandeur à réguler [32]. La figure III.6 montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{K_i}{s}$.

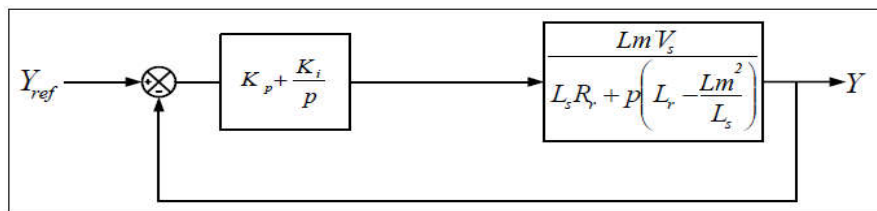


Figure III. 6: Système régulé par un PI.

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec le régulateur PI s'écrit alors :

$$FTBO = \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \times \frac{\frac{LmVs}{Ls(Lr - \frac{Lm^2}{Ls})}}{p + \frac{LsRr}{Ls(Lr - \frac{Lm^2}{Ls})}} \quad (III. 34)$$

La méthode de compensation des pôles est celle choisie pour la synthèse des régulateurs. Ainsi nous aurons l'égalité suivante :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{LsRr}{Ls(Lr - \frac{Lm^2}{Ls})} \quad (III. 35)$$

En effectuant la compensation de la fonction de transfert en boucle ouverte, celle-ci devient :

$$FTBO = \frac{k_p \times \frac{LmVs}{Ls(Lr - \frac{Lm^2}{Ls})}}{p} \quad (III. 36)$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime par:

$$FTBO = \frac{1}{1 + p\tau_r} \text{ Avec } \tau_r = \frac{1}{k_p} \times \frac{Ls(Lr - \frac{Lm^2}{Ls})}{LmVs} \quad (III. 37)$$

On obtient:

$$\begin{cases} K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{Ls(Lr - \frac{Lm^2}{Ls})}{Lm \times Vs} \\ K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{RrLs}{Lm \times Vs} \end{cases} \quad (III. 38)$$

III.4 Résultats de simulation

III.4.1 Simulation du système éolien en boucle ouvert

Le schéma bloc global du système étudié sous MATLAB/SIMULINK est donné à la figure III.7. La turbine éolienne couplé avec la machine asynchrone à double alimentation

(GADA) ; Le stator de la machine est connecté directement au réseau triphasé, le rotor alimenté par un onduleur triphasé à deux niveaux commandé par MLI, leur modulation est donner en détaille dans l'annexe.

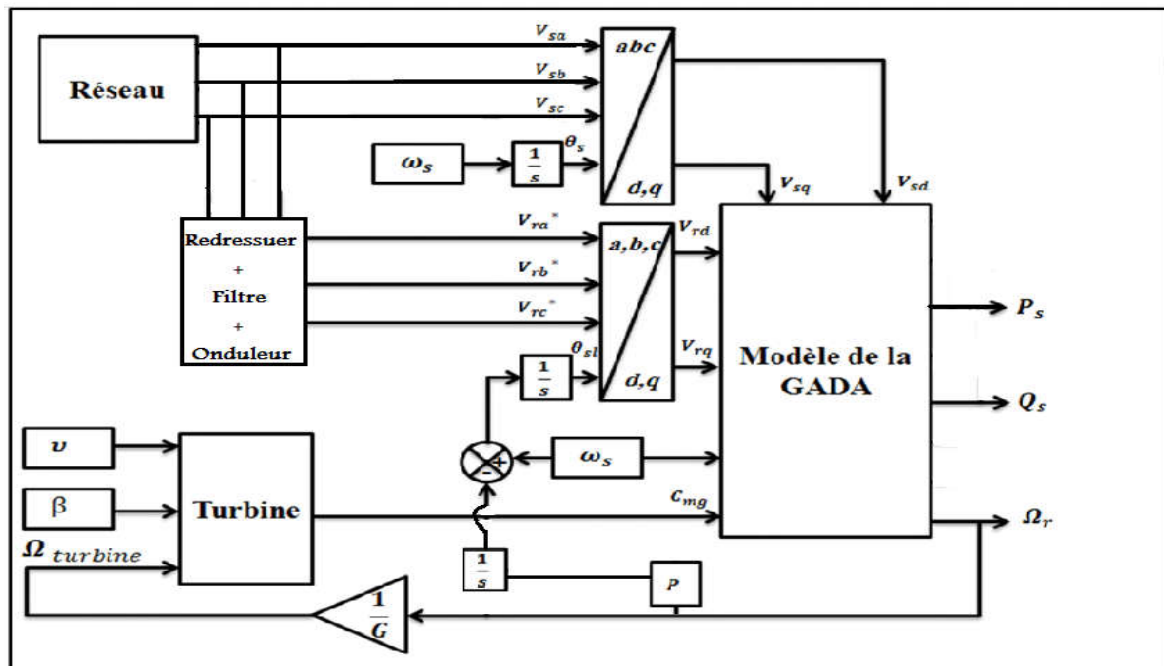


Figure III. 7: Schéma bloc global du système étudié.

Conditions d'essai :

- Vitesse du vent moyenne est de 16 m/s.
- Angle de calage des pales β est de 5° .
- Tension coté rotor est de 120V.
- Fréquence de modulation est de 5 kHz.

La figure (III.8) présente les puissances active et réactive du système éolien en boucle ouverte. Des fluctuations sont présentées au niveau des puissances dues à la technique MLI à cause de la commutation des interrupteurs de l'onduleur.

Notons aussi que la machine génère de l'énergie réactive ce qui donne un facteur de puissance plus loin de l'unité et détériore le facteur de puissance global du réseau

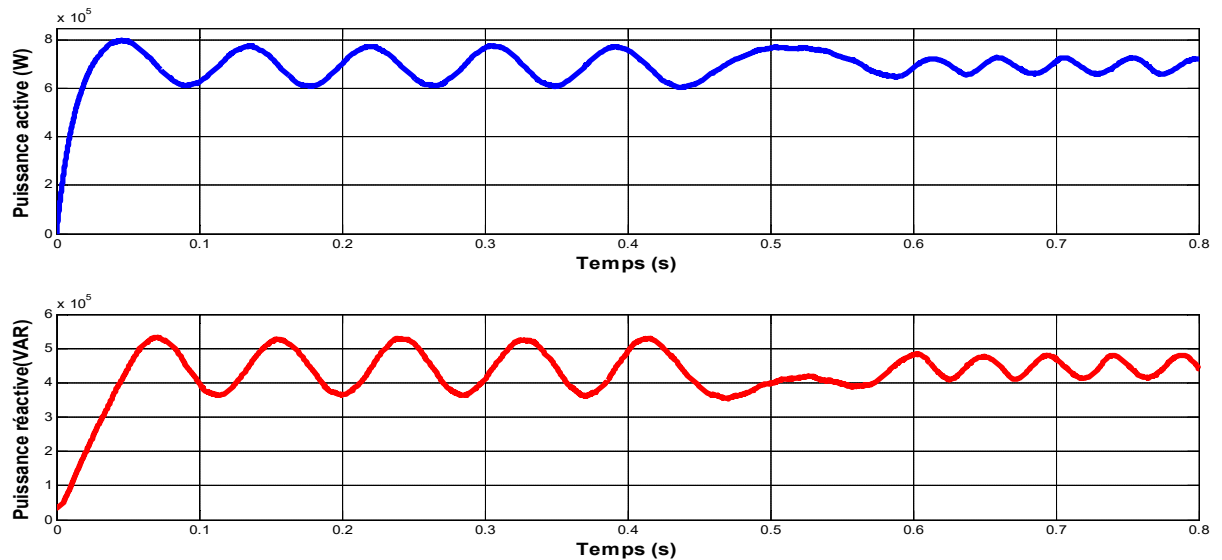


Figure III. 8: Puissance Active et Réactive de la génératrice éolienne.

III.4.2 Simulation de la commande vectorielle directe et indirecte

La simulation des commandes vectorielles directe et indirecte de la GADA, associée au système éolien avec le régulateur PI est présentée dans les figures suivantes. Nous avons donc soumis ce système à des échelons de puissance active et réactive afin d'observer son comportement. De plus ces simulations sont effectuées en deux manières:

- **Avec l'intégration de l'onduleur**

Dans cet essai le rotor de la MADA est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un onduleur de tension à deux niveaux commandé par la technique MLI (naturelle).

- **Sans prise en compte de l'onduleur**

Afin de mieux apprécier les performances des régulateurs dans la configuration du système éolien.

Test en poursuite

Cet essai consiste à réaliser des échelons de puissances actives et réactives tout en maintenant une vitesse d'entraînement de la MADA constante.

Les résultats de la simulation présentent les différentes courbes des puissances active et réactive générées au niveau du stator de la GADA.

Simulation des commandes avec prise de compte de l'onduleur

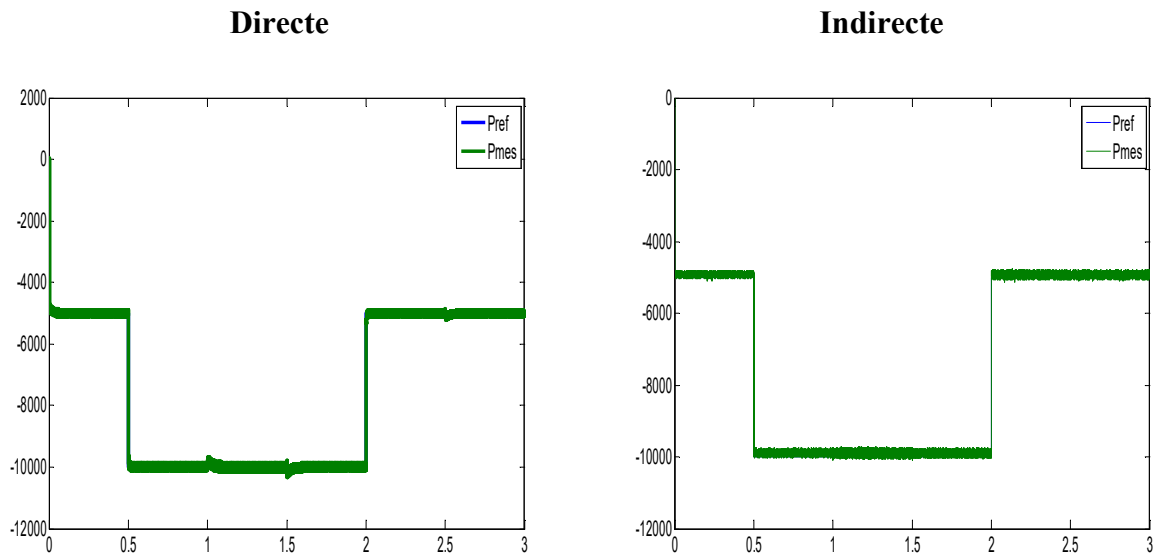


Figure III. 9: Suivi de consigne des puissances actives (W) en fonction du temps (s).

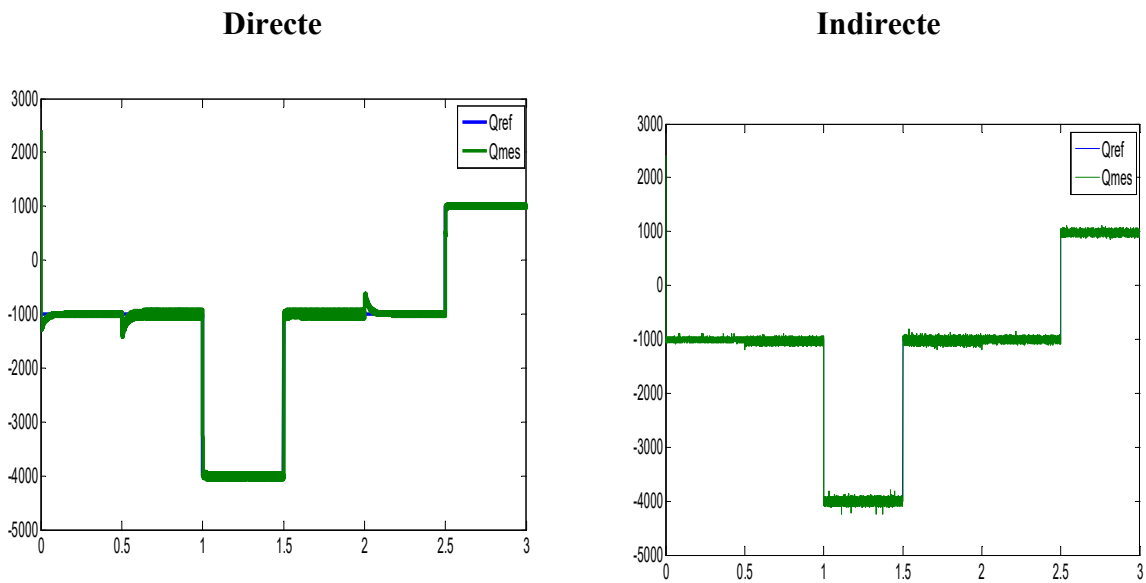


Figure III. 10: Suivi de consigne des puissances réactives (VAR) en fonction du temps (s).

Simulation des commandes sans prise en compte de l'onduleur

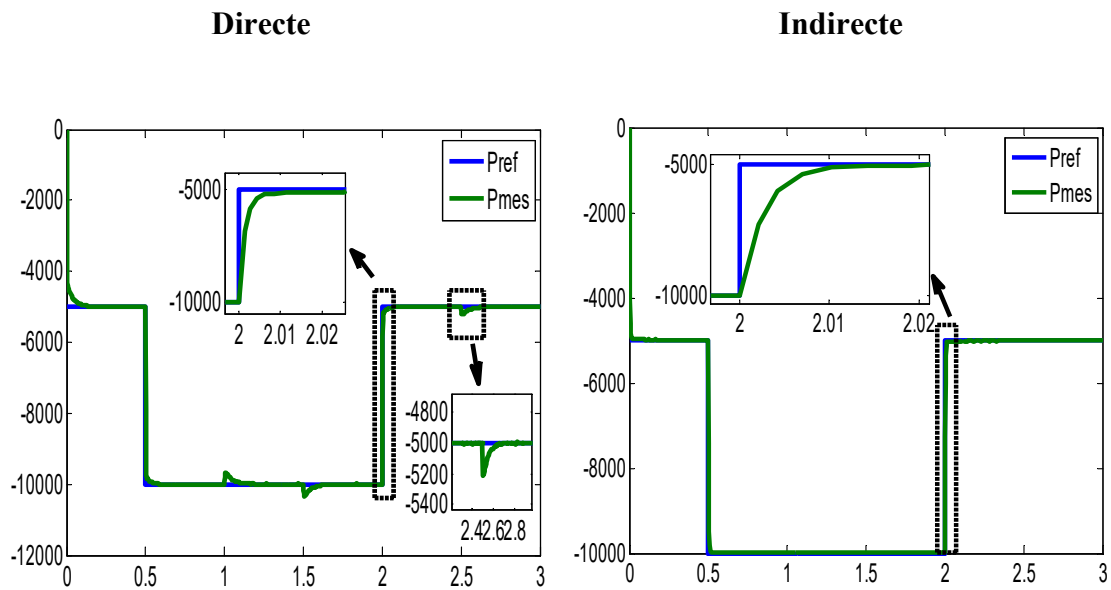


Figure III. 11: Suivi de consigne des puissances actives (W) en fonction du temps (s).

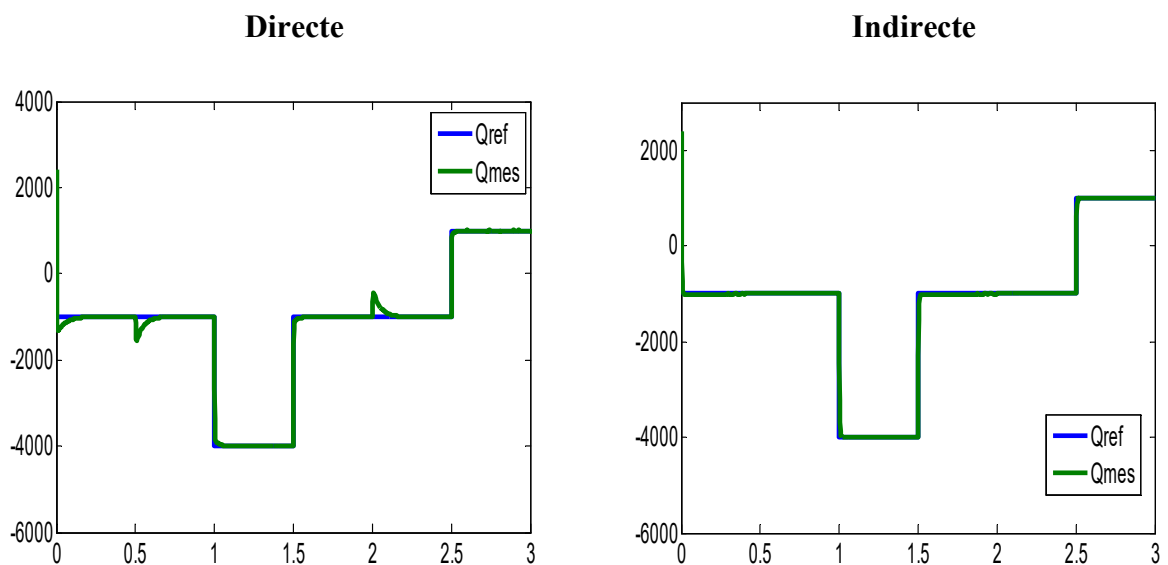


Figure III. 12: Suivi de consigne des puissances réactives (VAR) en fonction du temps (s).

Le figure III.9, 10, 11 et 12 présente les résultats de simulation de la commande directe et indirecte de la génératrice asynchrone à double alimentation avec et sans onduleur.

Le signe négatif de la puissance réactive montre que la génératrice fonctionne en mode capacitif; dans le cas où elle fonctionne en mode inductif la puissance devient automatiquement positive.

On voit bien que dans le cas de la commande directe les puissances active et réactive du système suivent les échelons de référence avec une erreur statique non nulle et une dynamique qui réagit rapidement.

Dans la commande indirecte de la génératrice asynchrone à double alimentation. Les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive sans erreur statique avec un temps de réponse lente.

En ce qui concerne le découplage entre les axes directs et quadratures, il est à noter que celui-ci est faible dans le graphe de la puissance active. Cependant dans celui de la puissance réactive l'influence de l'échelon de P y est plus remarquable. Néanmoins cette influence est moins conséquente dans la commande indirecte.

Test de robustesse

L'essai de robustesse consiste à faire varier les paramètres du modèle de la MADA utilisée. En effet les calculs des régulateurs sont basés sur des fonctions de transfert dont les paramètres sont supposés fixes. Toutefois, dans un système réel, ces paramètres sont soumis à des variations entraînées par différents phénomènes physiques (saturation des inductances, échauffement des résistances...).

De haut en bas: Influence de la variation de la résistance rotorique R_r de + 50 % de sa valeur nominale; Influences des variations des inductances respectivement statoriques (L_s), rotoriques (L_r) de 20 % de leur valeur nominale et l'inductance mutuelles (L_m) de -20%.

L'influence de la variation de la résistance rotorique R_r de +50%

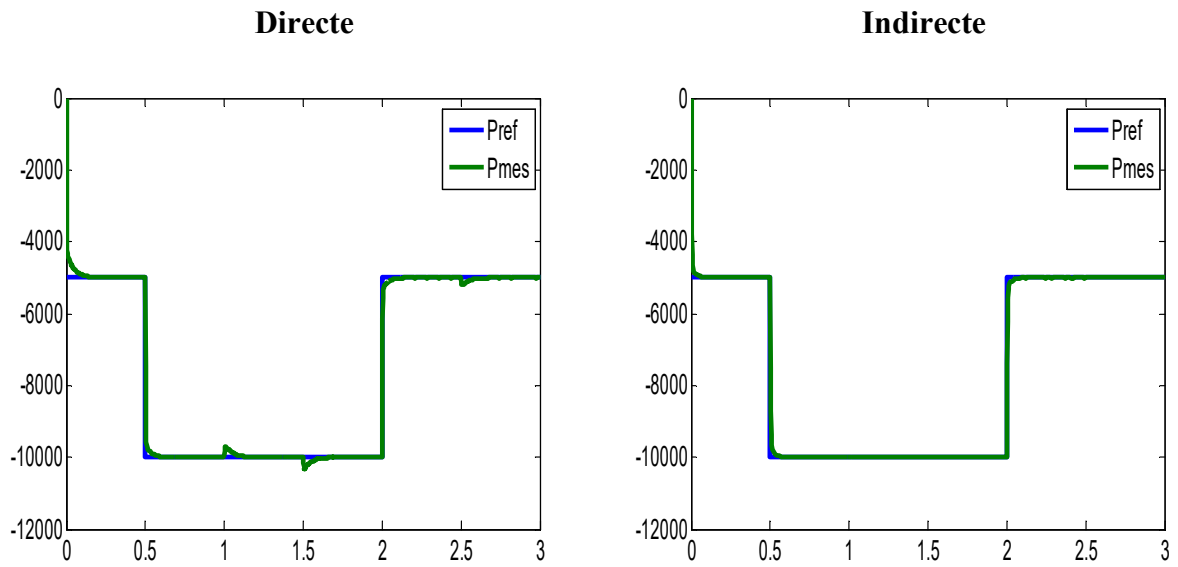


Figure III. 13: Suivi de consigne des puissances actives (W) en fonction du temps (s).

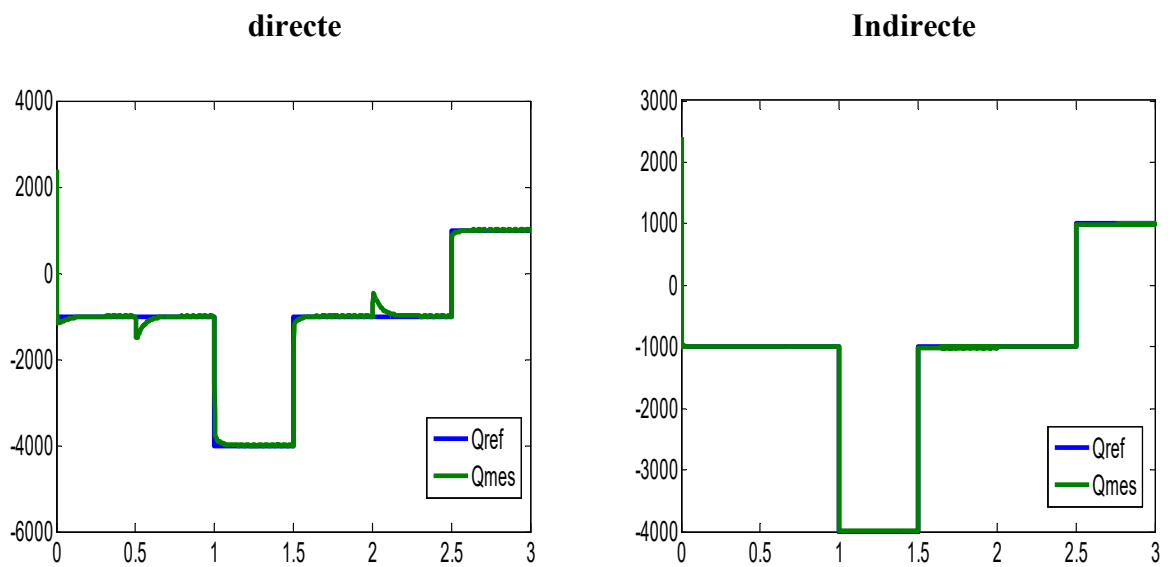


Figure III. 14: Suivi de consigne des puissances réactives (VAR) en fonction du temps (s).

L'influence de la variation de l'inductance statorique L_s de +20%

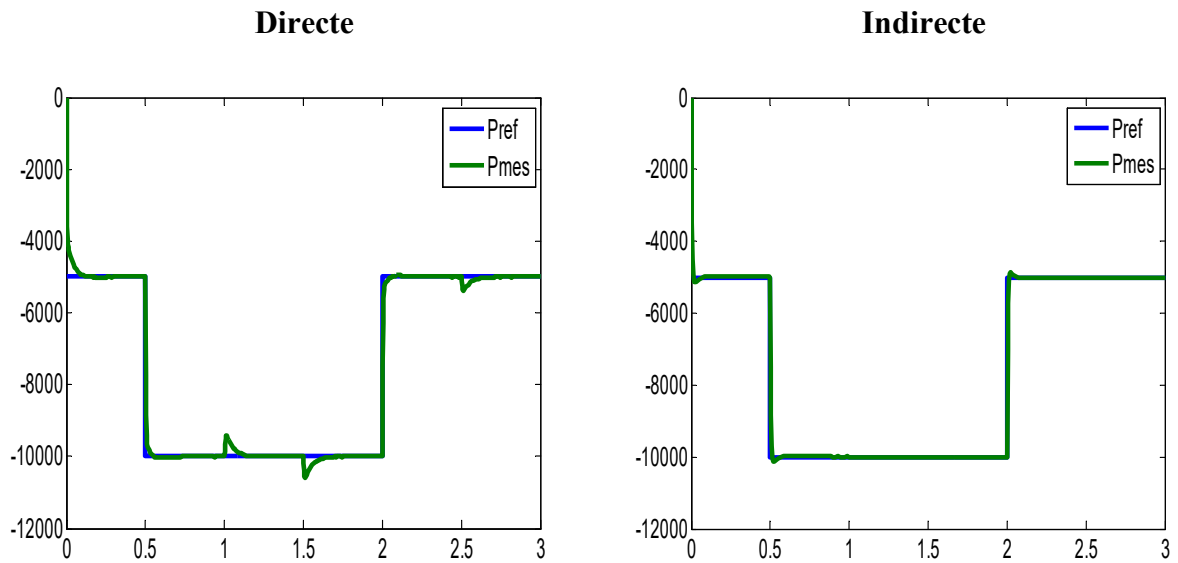


Figure III. 15: Suivi de consigne des puissances actives (W) en fonction du temps (s).

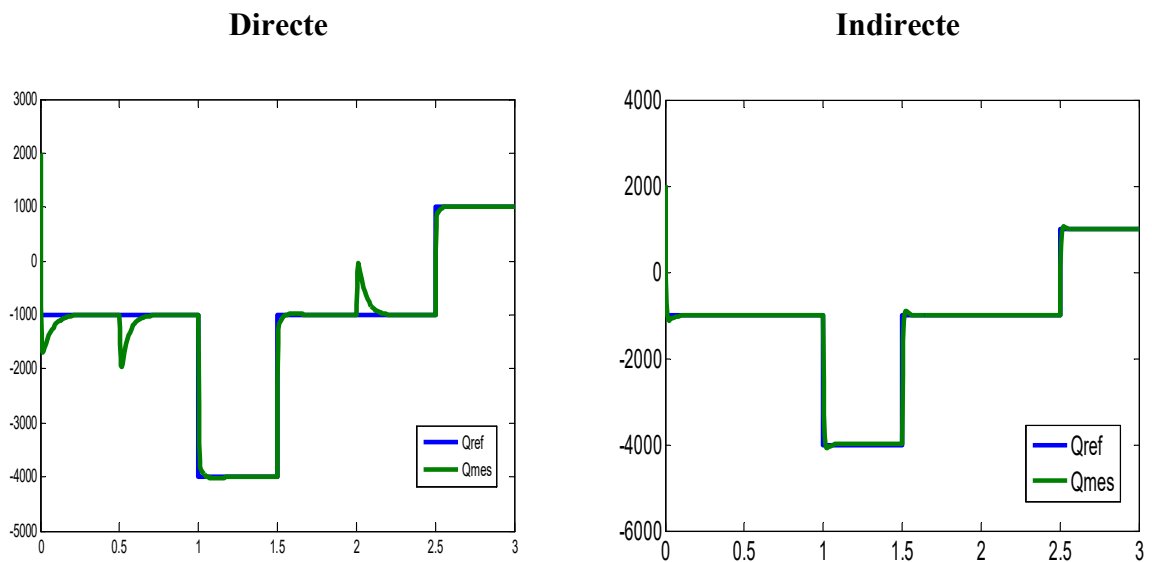


Figure III. 16: Suivi de consigne des puissances réactives (VAR) en fonction du temps (s).

L'influence de la variation de l'inductance rotorique L_r de +20%

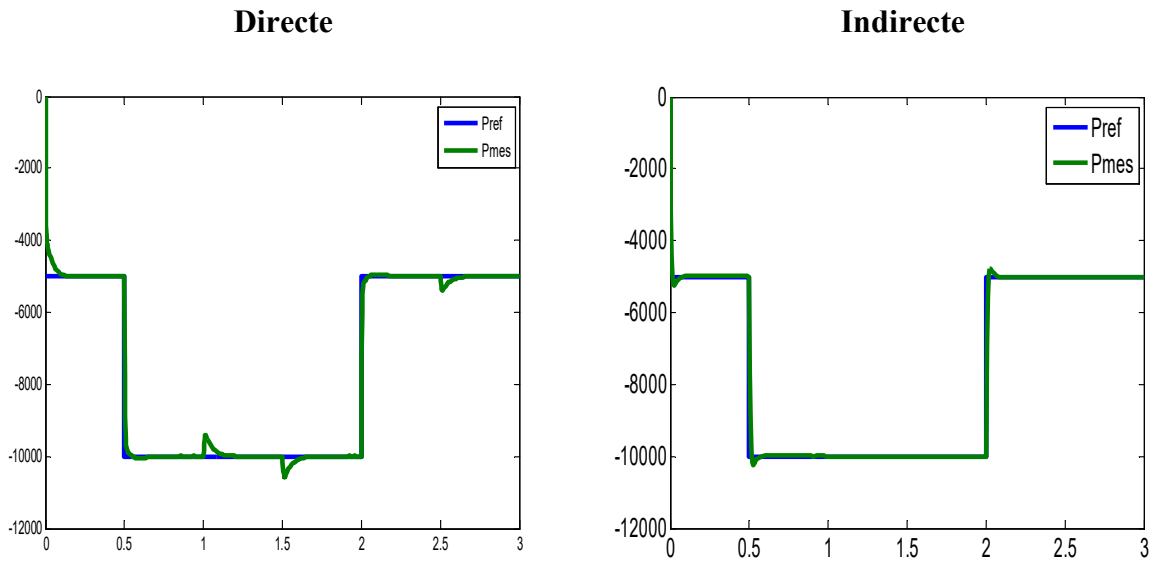


Figure III. 17: Suivi de consigne des puissances actives (W) en fonction du temps (s).

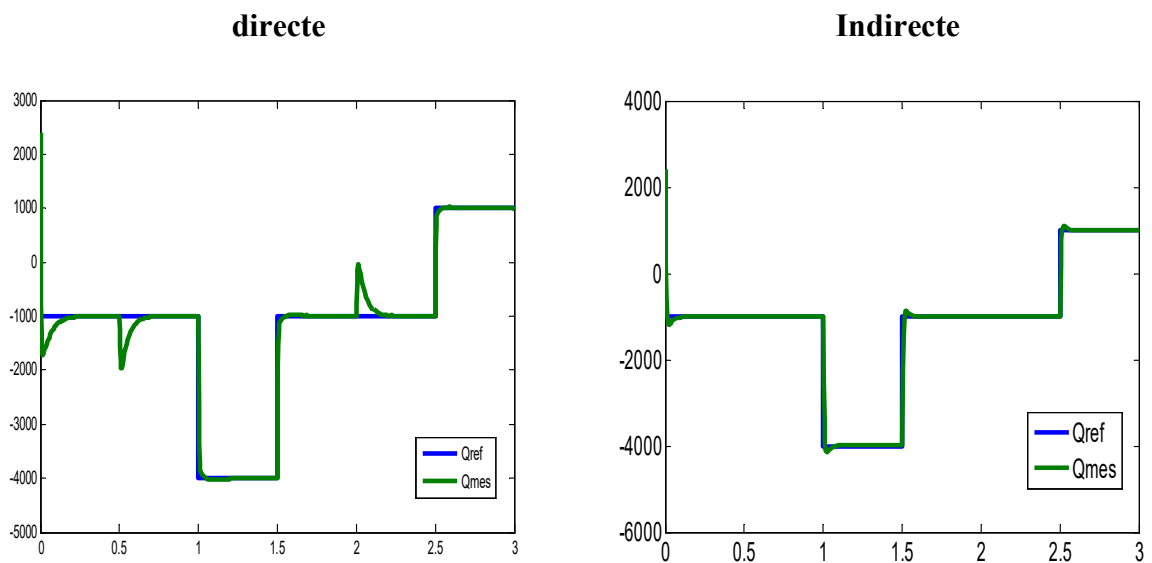


Figure III. 18: Suivi de consigne des puissances réactives (VAR) en fonction du temps (s).

L'influence de la variation de l'inductance mutuelle L_m de -20%

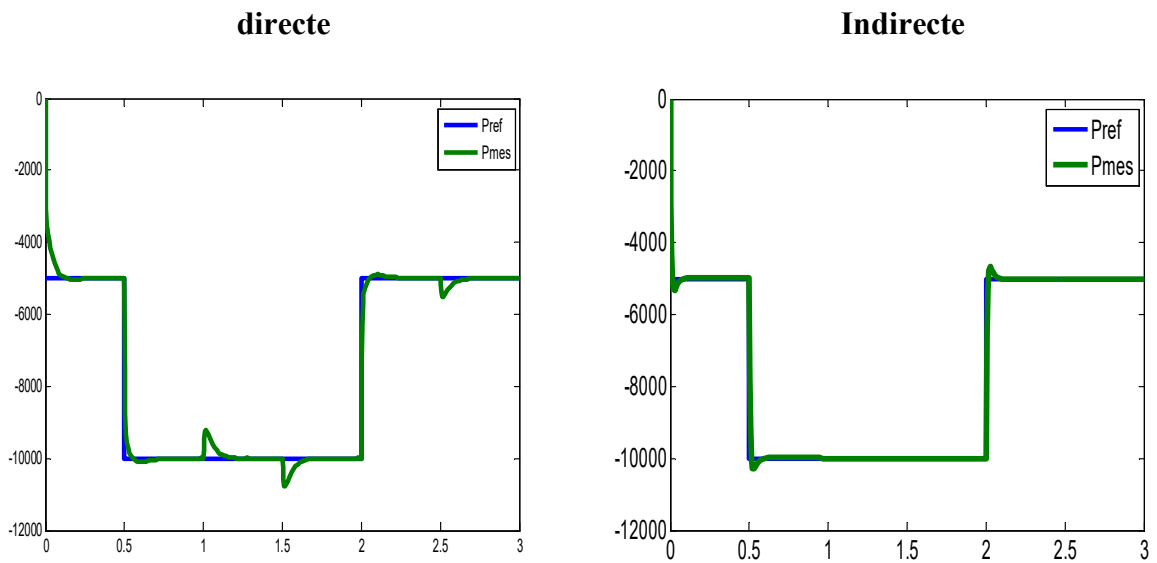


Figure III. 19: Suivi de consigne des puissances actives (W) en fonction du temps (s).

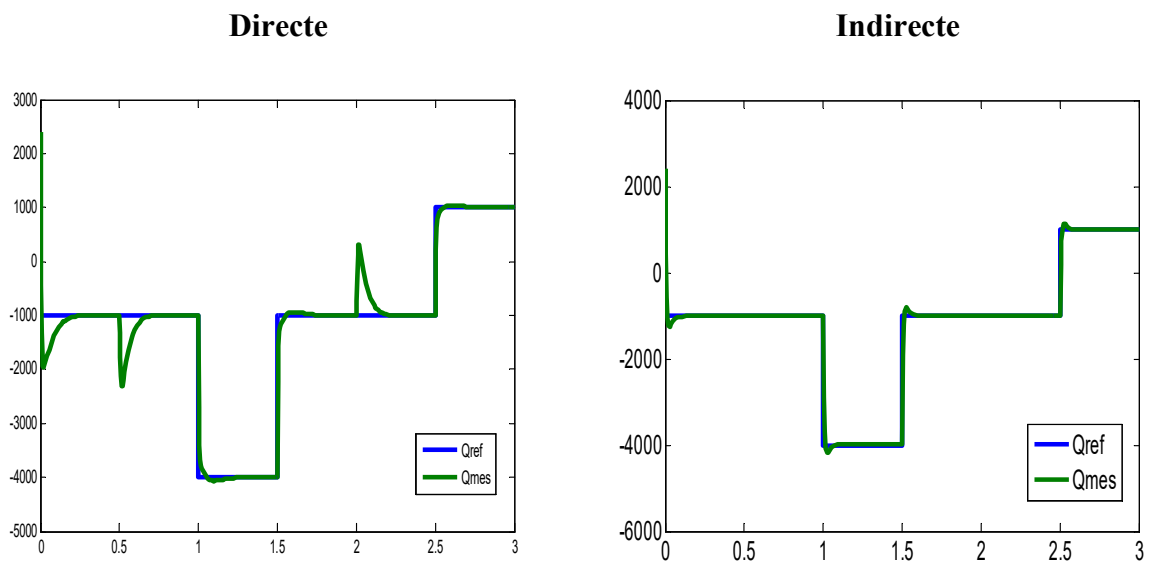


Figure III. 20: Suivi de consigne des puissances réactives (VAR) en fonction du temps (s).

On remarque sur les figures III.12 et III.13 que la variation de la résistance rotorique R_r de +50% de sa valeur nominale qui correspond au cas d'échauffement du bobinage rotorique, n'affecte pas le système qui parvient tout de même à garantir le contrôle de puissance. Cette variation n'a aucun effet sur le fonctionnement de la génératrice car les puissances active et réactive viennent à suivre leurs consignes correctement.

Dans le cas de la variation des inductances (Figures III.14, III.15, III.16, III.17, III.18 et III.19), une erreur statique apparaît dans le suivi de consignes de la puissance réactive lors de l'utilisation de la commande indirecte en boucle de puissance ouverte. Celle-ci est due au changement des inductances qui fausse l'estimation du courant rotorique à partir des puissances de référence. Cette erreur apparaît dans l'énergie réactive et non dans l'énergie active en raison du changement avec la même proportion de l'inductance cyclique mutuelle et de l'inductance cyclique statorique.

Pour pallier au phénomène de l'apparition de l'erreur statique avec la variation des inductances, le bouclage de la puissance dans la commande indirecte s'avère une solution robuste et efficace. La commande directe offre aussi une robustesse avérée, cependant elle possède des inconvénients tels que la fragilité devant les perturbations et le couplage très visible entre les axes directs et quadrature qui la marginalisent au profit de la commande indirecte. Le fait d'avoir une commande indirecte avec deux boucles imbriquées permet justement d'augmenter un peu la robustesse de système car la perturbation subie par la machine est automatiquement corrigée par le régulateur supplémentaire de la boucle intérieure.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, On a présenté le modèle réel de la machine auquel on a appliqué la transformation de Park pour le rendre linéaire et plus adapté à la commande.

Les résultats obtenus en simulation montrent des fluctuations au niveau des puissances dues à la technique MLI (naturelle) à cause de la commutation des interrupteurs.

Sachant que le modèle de la MADA est fortement couplé et le facteur de puissance statorique est détérioré, il est utile de trouver une méthode de commande permettant de rendre le contrôle de la puissance active et réactive indépendant en fonctionnement génératrice et qui permet de faire fonctionner la machine à facteur de puissance unitaire au stator.

La commande vectorielle directe et indirecte basées sur la technique d'orientation du flux statorique et qui permettent un fonctionnement à facteur de puissance unitaire

L'objet de cette commande est le découplage des puissances active et réactive par le régulateur PI qui contrôle l'échange de puissances active et réactive entre le stator de la machine et le réseau en modifiant l'amplitude et la fréquence des tensions rotoriques.

Bien que le mode direct offre une simplicité de mise en œuvre avec des résultats convenables, le mode indirect, en revanche, justifie sa supériorité par la possibilité de contrôler les courants et de les limiter afin de protéger le bobinage rotorique de la machine.

D'autre part la commande indirecte nous permet, en association avec le bouclage des puissances, d'avoir un système performant. Elle est certes plus complexe à mettre en œuvre, mais permettra d'avoir un fonctionnement optimal du système de génération électrique en minimisant les éventuels.

Chapitre IV
Commande non linéaire du
système éolien à base de la
GADA

IV.1 Introduction

Dans la formulation de n'importe quel problème de commande il y a typiquement des anomalies entre le système réel et le modèle mathématique développé pour la conception de contrôle. Cette distinction peut être due à la variation des paramètres de la dynamique du système ou à l'approximation du comportement complexe de système par un modèle. Ceci a mené à un intérêt intense pour l'élaboration des méthodes de contrôle robustes qui cherchent à résoudre ce problème.

Les lois de commande classique du type PI donnent de bons résultats dans le cas des systèmes Linéaires à paramètres constants ; pour des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants, ces lois de commande classique peuvent être insuffisantes car elles sont non robustes surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques du système sont strictes. Dans ce cas, on doit faire appel à des lois de commandes insensibles aux variations de paramètres, aux perturbations et aux non linéarités [33].

En effet, des techniques de commande sont demandées, dans le but de résoudre le problème des variations paramétriques, avec une erreur statique nulle, une réponse ferme et rapide, un système de contrôle stable et robuste. Cette méthode s'appelle la commande par mode glissant connue par sa simplicité et sa robustesse. Elle a été inventée pour la première fois en union soviétique dans le but de résoudre les problèmes de plusieurs applications .

Dans ce chapitre, nous présentons une étude théorique sur la commande à structure variable, afin de mettre en œuvre cette technique adaptée à la commande de la puissance active et réactive développées par la GADA. De plus, les performances apportées par cette technique de commande par rapport celle du chapitre précédant seront examinées.

IV.2 Commande par mode glissant

La commande par mode de glissement. C'est un cas particulier de la commande à structure variable. Cette commande est devenue l'une des techniques de contrôle les plus populaires pour une large gamme de classes des systèmes non linéaires.

Elle se distingue par sa simplicité de mise en œuvre, une très bonne réponse dynamique, mais surtout par sa robustesse en vers les incertitudes internes, traduites par une insensibilité aux variations de paramètres du système à commander, et vis-à-vis des perturbations externes [34] [35]. La synthèse d'une telle commande se fait de manière

systematique et basée sur la théorie de Lyapunov. Cette loi de commande fait l'objet de plusieurs travaux de recherche .

IV.3 Généralités sur la théorie du contrôle par mode de glissement

Dans la commande par mode de glissement on trouve trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes :

- Une configuration qui correspond à la structure la plus simple ou la commutation a lieu au niveau de l'organe de commande lui-même. On l'appellera, structure par commutation au niveau de l'organe de commande.
- Une structure fait intervenir la commutation au niveau d'une contre-réaction d'état.
- Une structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la "commande équivalente" [36].

IV.3.1 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande

Cette structure de commande est la plus classique et la plus utilisée. Elle correspond au fonctionnement tout ou rien des interrupteur de puissance associés dans une grande majorité d'applications aux variations de vitesse. Elle a été utilisée pour la commande du moteur pas à pas [37]. Le schéma de cette structure est donné sur la figure(IV.1)

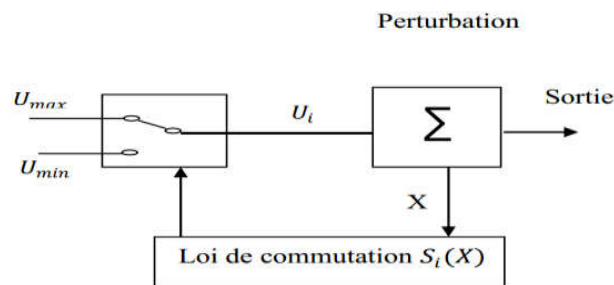


Figure. IV. 1 : Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande.

IV.3.2 Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état

La Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état s'appuie sur la commande par contre réaction d'état classique ou le réglage de la dynamique du système est réalisé par les gains de réglage. La non linéarité provient de la commutation entre les gains donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du système [37]. Cette structure est moins exigeante au niveau de la sollicitation de la commande.

Elle a été mise en œuvre dans la commande de moteurs à courant continu et à aimants permanents, ainsi que dans la commande de machines à induction.

Nous pourrions consulter le schéma d'une telle structure sur la figure (IV.2),

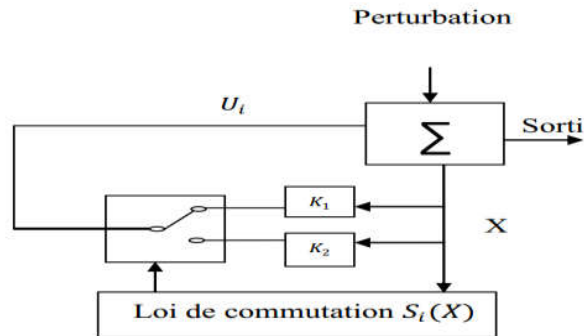


Figure. IV. 2 Structure de régulation par commutation au niveau d'une contre réaction d'état.

IV.3.3 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la commande équivalente

Elle permet de repositionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente c'est la valeur désirée du système en régime permanent. L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente[37]. Cette structure, présente un réel avantage Avec ajout de la commande équivalente (figure IV. 3)

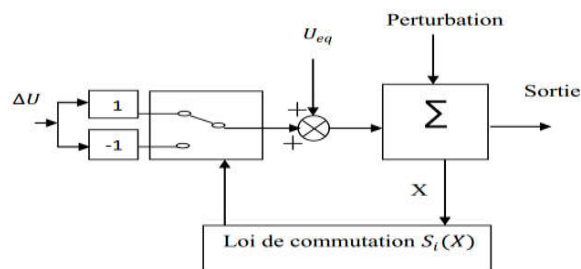


Figure. IV. 3 :Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la commande équivalent.

U :vecteur de commande.

U_{eq} : vecteur de commande équivalente.

ΔU : vecteur de commande discontinu.

X : vecteur de variables.

S_i : vecteur surface de commutation

IV.4 Trajectoires dans le plan de phase

La technique de la commande par mode glissant consiste à ramener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée jusqu'au point d'équilibre [38]. Cette trajectoire est constituée de trois parties distinctes (Figure.IV.4) :

- ✓ **Le mode de convergence (MC):** ou le mode non glissant ou la variable à réguler se déplace à partir d'un état initial vers la surface de commutation.
- ✓ **Mode de glissement (MG):** C'est le mouvement (comportement) du système le long de la surface de commutation. La dynamique dans ce mode dépend du choix de la surface de glissement.
- ✓ **Le mode de régime permanent (MRP):** Il est nécessaire pour l'étude du comportement d'un système autour du point d'équilibre

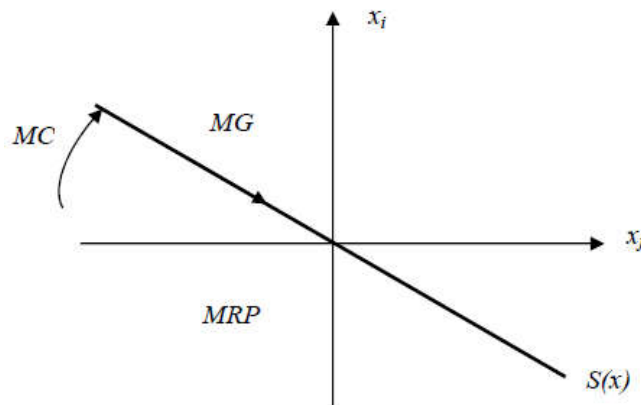


Figure. IV. 4 : Les modes de trajectoire dans le plan de phase.

IV.5 Conception de la commande par mode de glissement

La conception des régulateurs par les modes glissants prend en charge les problèmes de stabilité et des performances désirées d'une façon systématique dans son approche, qui s'effectue principalement en trois étapes complémentaires définies par

1. Le choix de la surface.
2. L'établissement des conditions d'existence de la convergence.
3. La détermination de la loi de commande.

IV.5.1 Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre nécessaire de ses surfaces et également leur forme, en fonction de l'application et de l'objectif visé.

La surface de glissement est une fonction scalaire telle que l'erreur sur la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase. Ainsi, la surface représente le comportement dynamique désire [39]. Nous trouvons dans la littérature de différentes formes de la surface, dont chacune donne de meilleures performances pour certaines utilisations. Dans ce travail, nous nous intéressons à une surface de forme non linéaire.

Slotine a proposé une forme générale qui consiste à définir une fonction scalaire des surfaces de glissement dans le plan de phase dans le but d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de consigne x_d cette fonction est donnée par l'équation:

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

Avec :

$e(x)$: L'écart de la variable à régler $e(x) = x_{ref} - x$.

λ_x : Une constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré.

r : Degré relatif, égale au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

IV.5.2 Conditions de convergence

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. Il existe deux considérations pour assurer le mode de convergence [40].

IV.5.2.1 La fonction discrète de commutation

L'approche directe qui est la plus ancienne, a été proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin. Elle est globale mais ne garantit pas, en revanche un temps d'accès fini. Elle est exprimée par[41] :

$$\dot{s}(x) \cdot s(x) < 0 \quad (\text{IV. 2})$$

IV.5.2.2 La fonction de Lyapunov

L'approche de Lyapunov qui est une condition globale d'accès au mode glissant. Il s'agit de choisir une fonction scalaire positive appelée fonction de Lyapunov qui peut être donnée par

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

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 U telle que le carré de la surface correspond à une fonction de Lyapunov. La dérivée de la fonction $V(x)$ donne :

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

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 : $s(x) \cdot \dot{s}(x) < 0$

Cette équation montre que le carré de la distance vers la surface, mesuré par $S^2(x)$, diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux côtés (Figure VI.5). Cette condition suppose un régime glissant idéal.

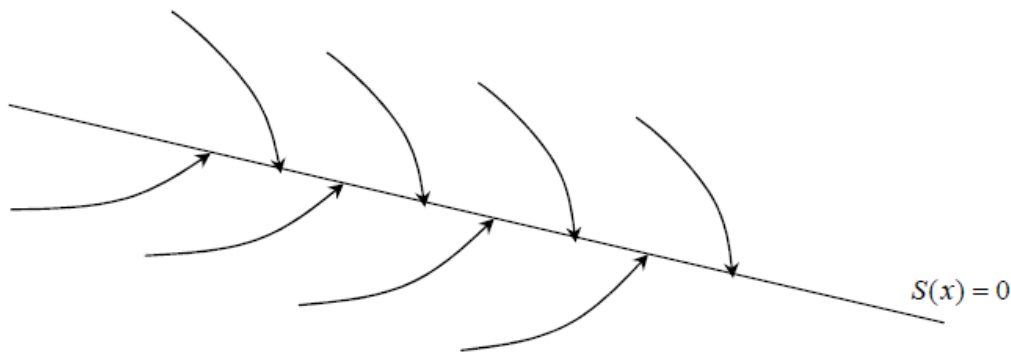


Figure. IV. 5 :Trajectoire de l'état vis-à-vis la surface de glissement.

IV.5.3 Détermination de la loi de commande

Si la surface de glissement est choisie, ainsi que le critère de convergence, donc il reste à déterminer la commande nécessaire pour ramener la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence des modes glissants.

La structure d'un contrôleur par mode de glissement est constitué de deux parties, une concernant la linéarisation exacte (U_{eq}) et l'autre la stabilité (U_n) . Cette dernière est très importante dans la commande par mode de glissement, car elle est utilisée pour éliminer les effets d'imprécision du modèle et de rejeter les perturbations extérieures [42].

La loi de commande par Mode Glissant est donnée par la formule suivante :

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_N \quad (\text{IV. 5})$$

IV.5.3.1 La commande équivalente

Filipov et Utkin ont proposée la commande équivalente $u_{eq}(t)$. Cette commande est considérée comme la plus directe et la plus simple. Elle est calculée en reconnaissant que le comportement du système durant le mode de glissement est décrit par: $\dot{S}(x) = 0$. La composante équivalente peut être interprétée comme la valeur moyenne modulée.

Nous avons :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \{f(x, t) + g(x, t)u_{eq}(t)\} + \frac{\partial S}{\partial x} \{g(x, t)u_N\} \quad (IV. 6)$$

En mode de glissement et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle (car la surface est égale à zéro). Ainsi, nous obtenons :

$$u_{eq}(t) = -\left\{\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)\right\}^{-1} \left\{\frac{\partial S}{\partial x} f(x, t)\right\}, \quad u_N = 0 \quad (IV. 7)$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant le terme u_{eq} par sa valeur (VI.7) dans l'équation (VI.6). Donc, nous obtenons une nouvelle expression de la dérivée de la surface, soit :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \{g(x, t)u_N\} \quad (IV. 8)$$

IV.5.3.2 La commande discontinue

$u_N(t)$ est un terme introduit pour satisfaire la condition de convergence $S(x)\dot{S}(x) < 0$. Il détermine ainsi le comportement dynamique du système durant le mode de convergence, donc pour garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement et il est donné par : $\dot{S}(x) = u_N$.

Le problème revient à trouver u_N tel quel :

$$S(x)\dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial S}{\partial x} \{g(x, t)u_N\} < 0 \quad (IV. 9)$$

La solution la plus simple est de choisir u_N sous la forme de relais (Figure.IV.6). Dans ce cas, la commande s'écrit comme suit :

$$u_N = K \text{sign}(S(x)) \quad (IV. 10)$$

$$\text{sing}(S) = \begin{cases} 1 & \text{si } S > 0 \\ -1 & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (IV. 11)$$

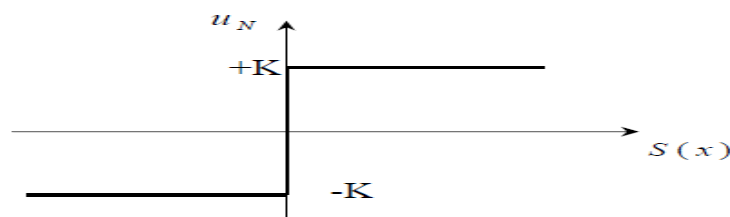


Figure. IV. 6 : Représentation de la fonction « SIGN ».

En remplaçant l'expression (VI.10) dans (VI.9), on obtient :

$$S(x)\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) K |S(x)| < 0 \quad (\text{IV. 12})$$

Où le facteur $\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)$ est toujours négatif pour la classe de système que nous considérons.

k : est une constante qui représente le gain de la commande discontinue. Le gain K est choisi positif pour satisfaire la condition (IV.12).

La commutation de commande entre $+K$ et $-K$ instantanément (fréquence infinie), fait apparaissent des oscillations de très haute fréquence appelées « *broutement* » ou « *Chattering* » dans le mode de glissement.

Ce phénomène de chattering ou broutement est un sérieux obstacle pour les applications de commande par mode de glissement, car les oscillations dues à ce phénomène peuvent nuire le fonctionnement du circuit de puissance. Ce phénomène est presque toujours problématique et des efforts de recherche significatifs ont été dirigés de sorte à éliminer ou du moins réduire ses effets[43].

Une méthode qui permet de réduire l'effet du broutement est de remplacer la fonction discontinue par une fonction de saturation, adéquate qui filtre les hautes fréquences. On donne par l'équation (IV.13) un exemple de fonction de saturation (Figure IV.7).

- Fonction SAT :

$$\text{sat} = \begin{cases} K & \text{si } S(x) > \epsilon \\ -K & \text{si } S(x) < -\epsilon \\ \frac{K \cdot S(x)}{\epsilon} & \text{si } |S(x)| \leq \epsilon \end{cases} \quad (\text{IV. 13})$$

ϵ : Un paramètre petit et positif.

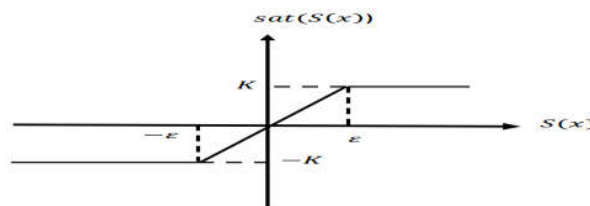


Figure. IV. 7 :Fonction de saturation .

IV.6 Application du mode glissant pour la commande de la puissance active et réactive de la GADA:

IV.6.1 Contrôle de la puissance active

Pour contrôler la puissance on prend le degré relatif de la surface est égal à ($r=1$). L'expression de la surface de contrôle de la puissance active a pour forme [44] :

$$S(P) = P_{sref} - P_s \quad (IV. 14)$$

La dérivée de la surface est :

$$S(\dot{P}) = P_{sref} - \dot{P}_s \quad (IV. 15)$$

On remplace l'expression de la puissance (IV.15) devient :

$$S(\dot{P}) = P_{sref} - V_s \frac{L_m}{L_s} I_{qr} \quad (IV. 16)$$

On calcule l'expression du courant de l'équation de la tension V_{qr} :

$$S(\dot{P}) = P_{sref} - V_s \frac{L_m}{L_s} (V_{qr} - R_r I_{qr}) \quad (IV. 17)$$

En remplaçant l'expression de V_{qr} par $V_{rreq} + V_{rqn}$, la commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$S(\dot{P}) = P_{sref} - V_s \frac{L_m}{L_s} ((V_{rreq} + V_{rqn}) - R_r I_{qr}) \quad (IV. 18)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$$S(P)=0 ; \dot{S}(P) = 0 \text{ et } V_{rqn} = 0$$

On tire de l'équation précédente la grandeur de commande équivalente V_{rreq} qui s'écrit :

$$V_{rreq} = \frac{-P(\dot{s})_{sref}(L_s L_r \sigma)}{L_m V_s} + R_r I_{qr} \quad (IV. 19)$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition $S(P) \cdot \dot{S}(P) \leq 0$ soit vérifiée, on pose:

$$S(\dot{P}) = \frac{-V_s \cdot L_m}{L_s L_r \sigma} V_{rqn} \quad (IV. 20)$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_{rqn} = K \cdot \text{sat}(S) \quad (IV. 21)$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre K doit être positif.

IV.6.2 Contrôle de la puissance réactive

Pour contrôler la puissance on prend $r=1$, l'expression de la surface de contrôle de la puissance réactive a pour forme :

$$S(Q) = Q_{sref} - Q_s \quad (IV. 22)$$

La dérivée de la surface est :

$$S(\dot{Q}) = Q_{sref} \dot{Q}_s - \dot{Q}_s \quad (IV. 23)$$

On remplace l'expression de la puissance (IV.23) devient :

$$S(\dot{Q}) = Q_{sref} \dot{Q}_s - V_s \frac{L_m}{L_s} I_{dr} \dot{Q}_s \quad (IV. 24)$$

On tire l'expression du courant de l'équation de la tension V_{dr} :

$$S(\dot{Q}) = Q_{sref} \dot{Q}_s - V_s \frac{L_m}{L_s L_r \sigma} (V_{dr} - R_r I_{dr}) \quad (IV. 25)$$

En remplaçant l'expression de V_{dr} par $V_{rdeq} + V_{rdn}$ la commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$S(\dot{Q}) = Q_{sref} \dot{Q}_s - V_s \frac{L_m}{L_s L_r \sigma} ((V_{rdeq} + V_{rdn}) - R_r I_{dr}) \quad (IV. 26)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$$S(Q)=0 ; \dot{S}(Q) = 0 \text{ et } V_{rdn} = 0 \quad (IV. 27)$$

On tire de l'équation précédente la grandeur de commande équivalente qui s'écrit :

$$V_{rdeq} = \frac{-Q(s)_{sref}(L_s L_r \sigma)}{L_m V_s} + R_r I_{dr} \quad (IV. 28)$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition $Q_{sref} \dot{Q}_s \leq 0$ soit vérifiée, on pose:

$$S(\dot{Q}) = \frac{-V_s \cdot L_m}{L_s L_r \sigma} V_{rdn} \quad (IV. 29)$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_{rdn} = K \cdot \text{sat}(S) \quad (IV. 30)$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre K doit être positif.

Le schéma bloc de la commande par mode glissant de la GADA est illustré sur la figure VI.10

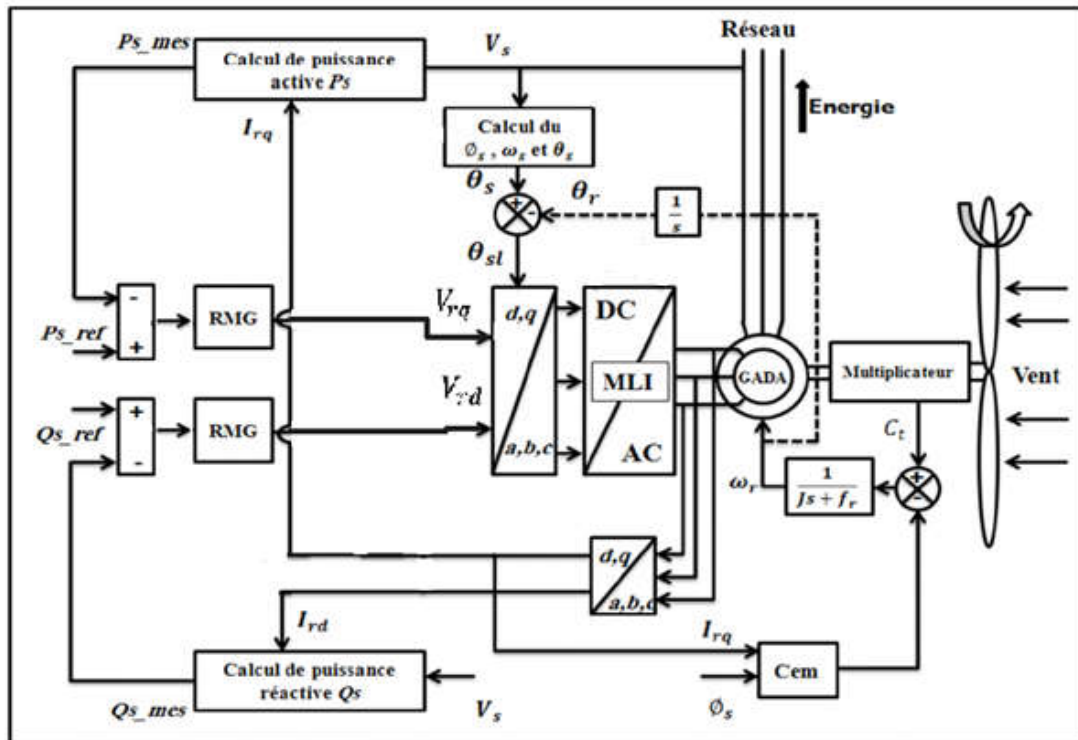


Figure. IV. 8 : Schéma bloc de la commande par mode glissant de la GADA.

IV.7 Simulations et interprétations des résultats

Afin de tester les performances et la robustesse de la commande des puissances par mode glissant de la génératrice asynchrone à double alimentation, des séries de simulations numériques ont été effectuées.

IV.7.1 Test en poursuite pour le régulateur Mode Glissant

Les mêmes consignes appliquées à la commande précédente sont appliquées aussi pour la commande par mode glissant.

Avec onduleur

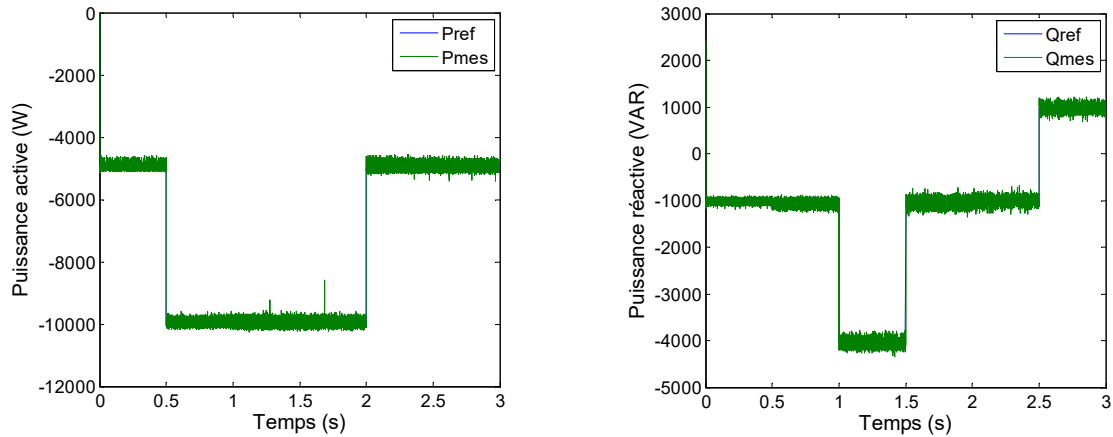


Figure. IV. 9 : Suivi de consigne des puissances active et réactive par RMG.

La pris en compte de l'onduleur rotorique dans les simulations induit des perturbations qui ne permettent pas de distinguer des différences de comportements entre les régulateurs en termes de temps de réponse. Toutefois, on peut constater l'absence de dépassements importants et une bonne régularité des signaux de puissance. La présence de l'onduleur et du modèle de l'aérogénérateur ont permis d'effectuer une simulation dans des conditions proches de celles d'un système éolien réel.

Sans onduleur

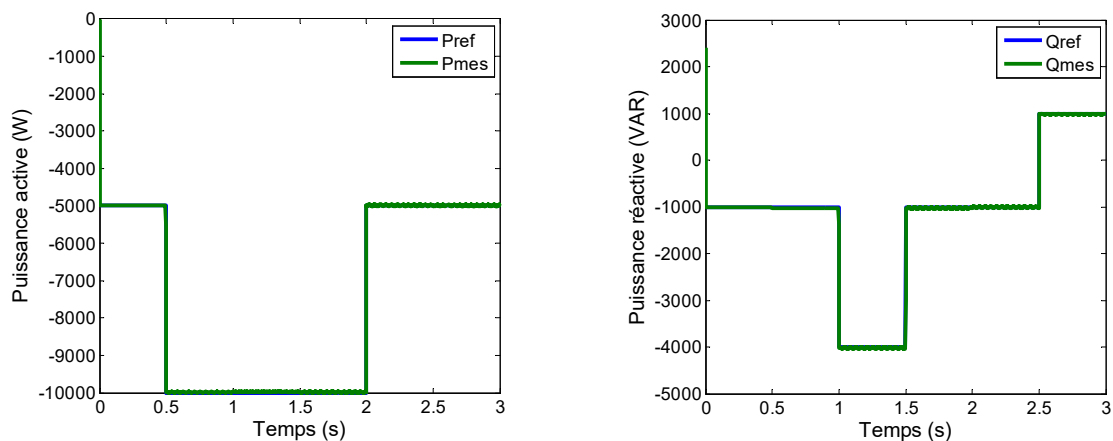


Figure. IV. 10 : Suivi de consigne des puissances active et réactive par RMG.

On remarque que les puissances active et réactive poursuivent parfaitement la réponse désirée. Par rapport aux résultats des commandes directe et indirecte cette commande présente plus d'avantages, on remarque que les dépassements sont complètement effacés et le temps de réponse devient rapide avec une erreur statique presque nulle.

IV.7.2 Test de robustesse

Pour tester la robustesse du régulateur RMG, il faut soumettre le régulateur aux mêmes variations appliquées au régulateur PI. Les tests de robustesse ont été effectués sans onduleur.

On remarque sur la figure VI.11 que la variation de la résistance rotorique n'a quasiment aucune influence sur le fonctionnement de la génératrice car les deux boucles de régulations nous permettent de rattraper les erreurs dues aux termes de compensation qui ne sont plus en rapport avec la bonne valeur de la résistance.

L'influence de la variation de la résistance rotorique R_r de +50%

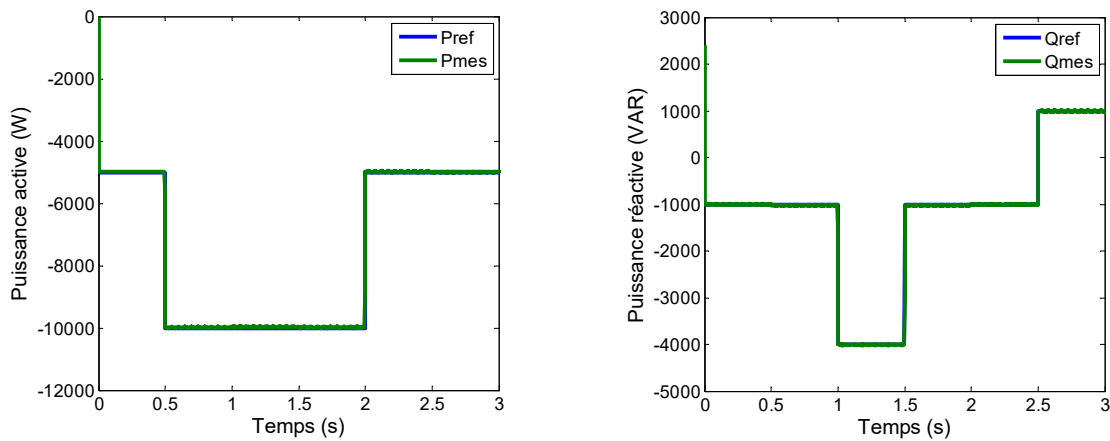


Figure. IV. 11 : Suivi de consigne des puissances active et réactive par RMG.

L'influence de la variation de l'inductance statorique L_s de +20%

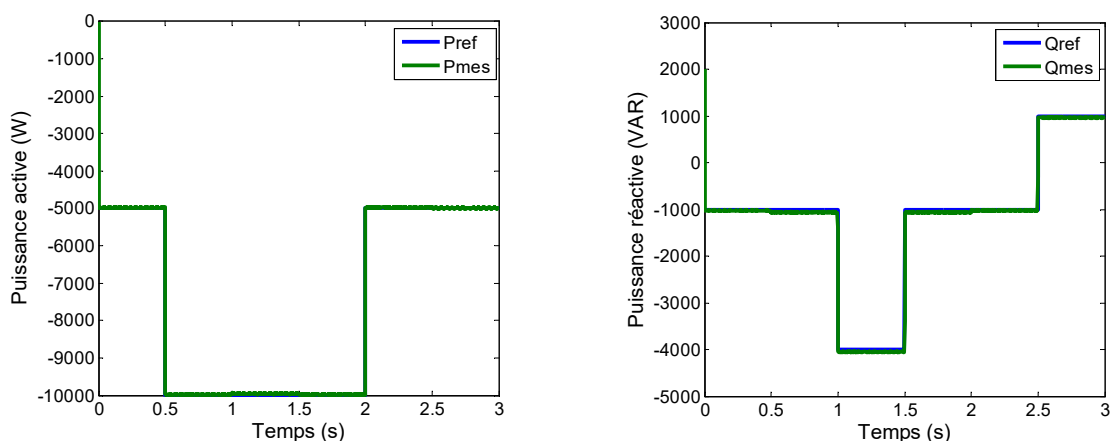


Figure. IV. 12 : Suivi de consigne des puissances active et réactive par RMG.

L'influence de la variation de l'inductance rotorique L_r de +20%

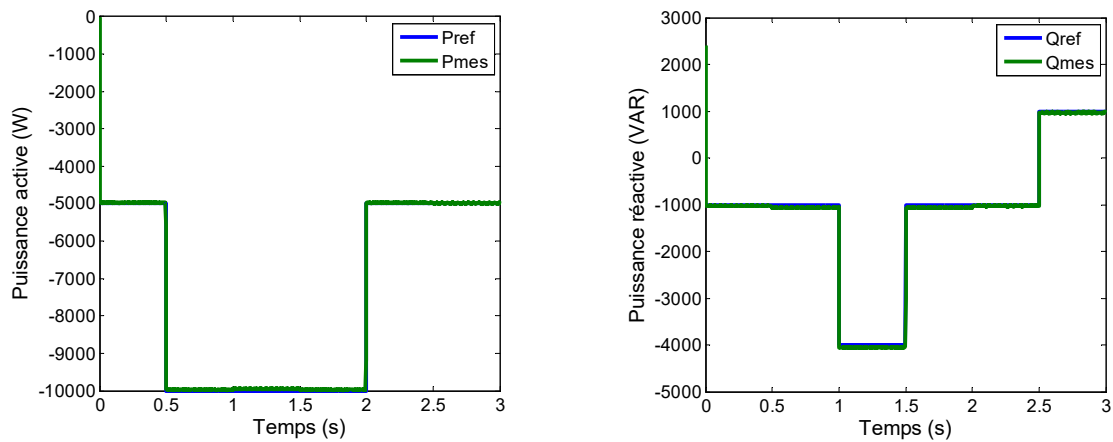


Figure. IV. 13 : Suivi de consigne des puissances active et réactive par RMG.

L'influence de la variation de l'inductance mutuelle L_m de -20%

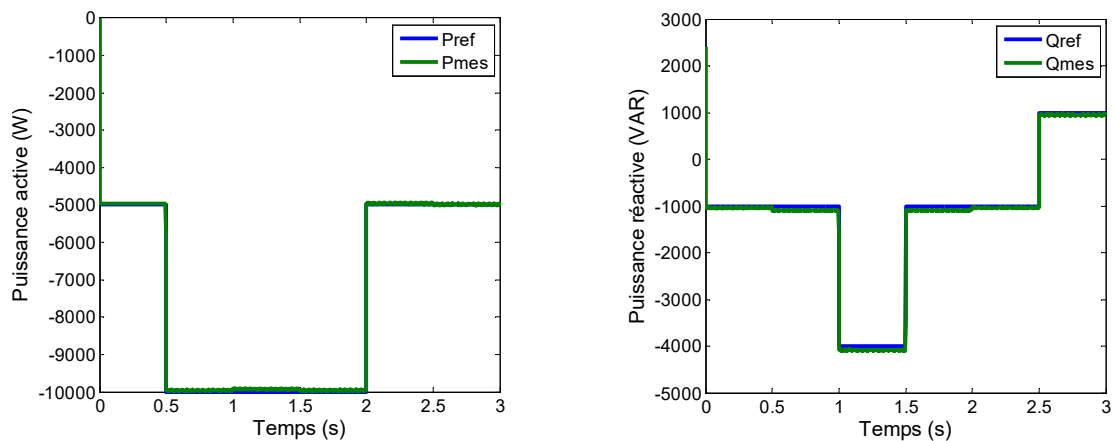


Figure. IV. 14 : Suivi de consigne des puissances active et réactive par RMG.

Les résultats des simulations obtenues montrent la robustesse du régulateur Mode Glissant face aux variations des paramètres de la machine. Lors des variations des résistances rotorique et des inductances mutuelles, nous avons constaté aucun effet sur le suivi des consignes. Il a été noté que le réglage des puissances par mode glissant présente des hautes performances avec un temps de réponse rapide et une grande robustesse vis-à-vis la variation des paramètres de la machine.

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre, la technique de la mode glissant est exposée et testés, les résultats de simulation nous ont permis de juger les qualités de la commande à base du RMG. A travers les caractéristiques de réponse, on observe des bonnes performances même en présence des variations de consigne. La poursuite en puissance est sans dépassement. Le découplage, la stabilité et la convergence vers l'équilibre sont assurés. De plus, ce contrôle présente un algorithme de commande robuste très simple et qui a l'avantage d'être facilement implantable dans une commande par ordinateur.

Conclusion Générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce mémoire, le travail exposé est une contribution aux techniques de commande d'un système éolien à base de la génératrice double alimentation.

Un modèle de la turbine éolienne a été établi dans le but d'appliquer la technique de commande Maximum Power Point Tracking (MPPT) avec et sans asservissement de vitesse.

En suite, afin de mieux commander l'aérogénérateur asynchrone à double alimentation, on a appliqué la technique de la commande vectorielle directe et indirecte par le régulateur PI pour contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le stator de la génératrice et le réseau. Ces deux commandes ont été testés et comparés afin d'analyser leurs performances en suivi de consigne, robustesse et rejet de perturbation.

La commande indirecte ayant été retenue par son contrôle des courants rotorique afin de protéger le bobinage rotorique de la machine, bien que le mode direct offre une simplicité de mise en œuvre avec des résultats convenables.

Nous nous sommes intéressés à l'application des techniques de commande robuste. Une commande à structure variable par mode de glissement a été appliquée à la GADA.

Les résultats obtenus ont montrés que cette technique de réglage apporte des améliorations remarquables, et que le régulateur RMG est robuste vis-à-vis des variations paramétrique mais le découplage n'est pas totalement maintenir lors le changement de consigne.

Annexes

ANNEXE A : Paramètres du système éolien

1. Paramètres de le GADA

Significations	Symboles	Unités
Nombre de paire de pôles	P	2
Résistance statorique par phase	R _s	0.455 Ω
Résistance rotorique par phase	R _r	0.19 Ω
Inductance propre statorique par phase	L _s	0.07 H
Inductance propre rotorique par phase	L _r	0.0213 H
La mutuelle inductance entre phases statoriques et rotoriques	L _m	0.034 H
Constante de temps statorique	T _s	L _s /R _s
Constante de temps rototorique	T _r	L _r /R _r
Coefficient de dispersion de Bondel	σ	1-(L _m ² /(L _s .L _r))
Frottement visqueux	f	0.0024 N.m /s
Glissement	g	0.03

Tableau. Annexe A. 1: Paramètres de la GADA.

2. Paramètres de la turbine

Significations	Symboles	Unités
Rayon de l'éolienne	R	35.25m
Surface de balayage des pales	S	πR ²
Gain du multiplicateur de vitesse	G	90
La densité d'air	ρ	1.22 Kg/m ³
Inertie de l'arbre	J	1000 Kg.m ²

Tableau. Annexe A. 2: Paramètres de la turbine.

3. Paramètres du filtre

Significations	Symboles	Unités
Capacité du filtre	C _f	600 mF
Inductance du filtre	L _f	0,075 H

Tableau. Annexe A. 3: Paramètres de la turbine.

ANNEXE B : Modélisation de l'onduleur

Pour simplifier l'étude supposons que:

- La commutation des interrupteurs est instantanée,
- la chute de tension aux bornes des interrupteurs (K_{ci} , $c \in [1,2,3]$, $i \in [1,2]$) est négligeable
- la charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande S_{ia} , S_{ib} , S_{ic} :

- $S_i = 1$, Le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- $S_i = 0$, Le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Les trois tensions composées V_{bc} , V_{ca} et V_{ab} sont définies par les relations suivantes en tenant compte du point fictif « o ».

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{AO} + V_{OB} \\ V_{BA} = V_{BO} + V_{OC} \\ V_{CA} = V_{CO} + V_{OA} \end{cases} \quad (\text{Annexe B.1})$$

Soit « n » le point neutre du côté alternatif (GADA), alors on a :

$$\begin{cases} V_{AO} = V_{AN} + V_{NO} \\ V_{BO} = V_{BN} + V_{NO} \\ V_{CO} = V_{CN} + V_{NO} \end{cases} \quad (\text{Annexe B.2})$$

La charge est considérée équilibrée, il l'en résulte

$$V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0 \quad (\text{Annexe B.3})$$

La substitution de (Annexe B.2) dans (Annexe B.3) nous donne :

$$V_{ON} = -\frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad (\text{Annexe B.4})$$

En remplaçant (I Annexe B.4) dans (Annexe B.2) on obtient :

$$\begin{cases} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = -\frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C = -\frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (\text{Annexe B.5})$$

On peut écrire le système (Annexe B.5) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{Annexe B.6})$$

avec :

$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{V_{DC}}{2} S_1 \\ V_{BO} = \frac{V_{DC}}{2} S_2 \\ V_{CO} = \frac{V_{DC}}{2} S_3 \end{cases} \quad (\text{Annexe B.7})$$

tel que :

$$\begin{cases} S_1 = 1 \text{ si } k_1 \text{ fermé} & \text{si non } S_1 = -1 \\ S_2 = 1 \text{ si } k_2 \text{ fermé} & \text{si non } S_2 = -1 \\ S_3 = 1 \text{ si } k_3 \text{ fermé} & \text{si non } S_3 = -1 \end{cases}$$

On remplace (II.88) dans (II.87), on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{Annexe B.8})$$

Dans notre cas, la commande des interrupteurs de l'onduleur est réalisée par l'utilisation de la commande à modulation par largeur d'impulsion ou MLI.

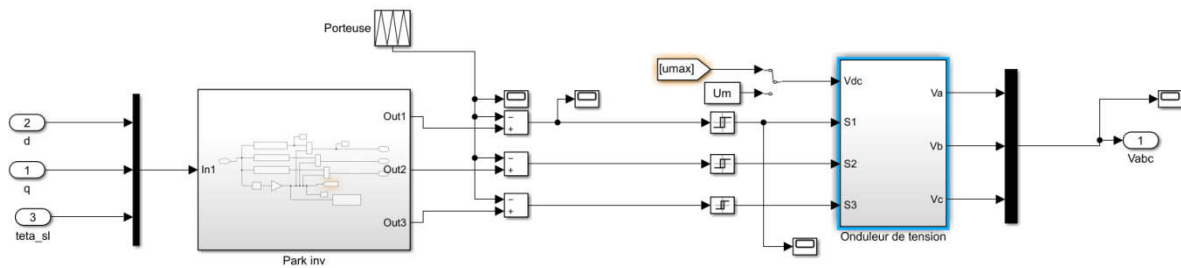


Figure Annexe B.1 : bloc de simulation de l'onduleur.

ANNEXE C : Paramètres des régulateurs

1. Paramètres des régulateurs PI

Les gains du correcteur PI sont calculé pour un temps de réponse $t_r=0.001$ (s) ; ils sont identiques pour l'axe d et l'axe q.

1.1 Commande directe :

$$\begin{cases} K_p = -0.03(V.s)^{-1} \\ K_i = -0.7(A.s)^{-1} \end{cases}$$

1.2 Commande indirecte:

$$\begin{cases} K_p = 1.2(V.s)^{-1} \\ K_i = 0.03(A.s)^{-1} \end{cases}$$

1.3 Paramètres du régulateur RMG

Le tableau ci-dessus illustre les paramètres du régulateur Mode Glissant

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>
Gain K1	500
Gain K2	150

Tableau. Annexe C. 1: Paramètres du régulateurs RMG

Bibliographie

- [1] M. Adel, Abdelbaset; Yehia S., A.-H. M. . El-Sayed, and A. E. H. A. Ahmed, *Wind Driven Doubly Fed Induction Generator*, Springer I. 2018.
- [2] Jens Fortmann, *Modeling of Wind Turbines with Doubly Fed Generator System*. 2015.
- [3] Frédéric POITIERS, “ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L’UTILISATION DE L’ENERGIE EOLIENNE -Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau,” UNIVERSITE DE NANTES ECOLE, 2003.
- [4] B. TOUAL, “Modélisation et Commande Floue Optimisée d ’ une Génératrice à Double Alimentation , Application à un Système Eolien à Vitesse Variable,” Université de Batna, 2010.
- [5] M. MAYOUF, “Contribution A La Modélisation De L ’aérogénérateur Synchrone A Aimants Permanents,” l’Université de Biskra, 2008.
- [6] D. KAOUA and Y. ZIDELMAL, “Commande linéaire d’un éolienne basé sur la machine asynchrone double alimentation,” Université Ahmed Draïa Adrar, 2020.
- [7] A. BOYETTE, “Contrôle-commande d ’ un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne,” l ’ Université Henri Poincaré , Nancy 1, 2006.
- [8] N. HAMDI, “« Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur,” UNIVERSITÉ MENTOURI de CONSTANTINE, 2008.
- [9] S. El Aimani, “Modélisation de Différentes Technologies d’Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension,” de l’Ecole Centrale de Lille (ECL) Co habilité avec l’Université des Sciences et Technologies de Lille I(USTL), 2004.
- [10] B. HAMAN, “Contrôle robuste d’aérogénérateur,” Ecole Normale Supérieure de l’Enseignement Technique d’Oran, 2012.
- [11] D. Tarek, “Etude et Commande d’un Système Eolien à Base d’une Génératrice Asynchrone,” Université de Batna, 2009.
- [12] L. Khettache, “Etude et Commande d’un Système Eolien à Base d’une Machine Electrique,” UNIVERSITE DE BATNA, 2007.
- [13] A. GAILLARD, “Système éolien basé sur une MADA : contribution à l ’ étude de la qualité de l ’ énergie électrique et de la continuité de service,” Université Henri Poincaré , Nancy-I, 2010.
- [14] K. FERKOUS, “Etude d’une chaine de conversion d’énergie eolienne,” UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, 2009.
- [15] A. Abdelli, B. Sareni, and X. Roboam, “Optimization of a Small Passive Wind Turbine Generator with Multiobjective Genetic Algorithms,” *Proc Int J Appl Electromagn Mech*, vol. 26, n° %1, pp. 175–182, 2007.
- [16] A. Dahbi, N. Nait-Said, and M. S. Nait-Said, “A novel combined MPPT-pitch angle control for wide range variable speed wind turbine based on neural network,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 22, pp. 9427–9442, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.105.
- [17] F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed, and H. Benalla, “Modélisation, simulation et contrôle d’une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation,” *Rev. des Energies Renouvelables*, vol. 14 N°1, no. 5532, pp. 109–120, 2011, doi: 10.1136/bmj.1.5532.113-c.
- [18] B. Yang, L. Jiang, L. Wang, W. Yao, and Q. H. Wu, “Nonlinear maximum power point tracking control and modal analysis of DFIG based wind turbine,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 74, pp. 429–436, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.07.036.

- [19] V. Nayanar, N. Kumaresan, and N. Ammasai Gounden, "A Single-Sensor-Based MPPT Controller for Wind-Driven Induction Generators Supplying DC Microgrid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 2, pp. 1161–1172, 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2420568.
- [20] S. Ganjefar and A. A. Ghasemi, "A novel-strategy controller design for maximum power extraction in stand-alone windmill systems," *Energy*, vol. 76, pp. 326–335, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.08.024.
- [21] B. E. Elnaghi, F. A. Elkader, M. M. Ismail, and A. E. Kalas, "Adaptation of PI controller used with combination of perturbation and observation method and feedback method for DFIG," *Electr. Eng.*, vol. 100, no. 2, pp. 1047–1058, 2018, doi: 10.1007/s00202-017-0565-8.
- [22] M. BENMEZIANE, "Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation MADA," Ecole Nationale Polytechnique d'Oran.
- [23] E. Youcef, "Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté," l'Université de Batna, 2009.
- [24] B. Farid, "Commande Intelligente D'une Association Convertisseur Statique Machine Asynchrone à Double Alimentation," Université de Batna, 2009.
- [25] Z. KOUKI and FATIMA ZOHRA BENMEBARK, "Memoire de fin d'etude en vue de l'obtention du diplôme de master en commande électrique," UNIVERSITE AHMED DRAIYA ADRAR, 2020.
- [26] A. Fatima Zohra, "COMMANDE ROBUSTE D'AEROGENERATEURS DESTINES A LA PRODUCTION D'ENERGIE," UNIVERSITE DE TAHRI Mohamed - BECHAR, 2018.
- [27] T. GHENNAM, "Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation Soutenue," Ecole Militaire Polytechnique d'Alger et Ecole Centrale de Lille, 2011.
- [28] A. Hmocene, "Contribution a la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement Remerciements," Université de Batna, 2008.
- [29] Y. DJERIRI, "Commande vpar réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien," Thèse de Magister en Électrotechnique, Université Djillali Liabes de Sidi Bel-Abbés, 2009.
- [30] A. MOUSSA SIDDO, "Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne Remerciements : Nous adressons nos vifs remerciements à :," Polytechnique, Ecole Nationale, 2007.
- [31] D. Achour, M. Kesraoui, and A. Chaib, "Supervisory control of a grid-connected wind turbine generator," *Wind Eng.*, vol. 40, no. 6, pp. 483–496, 2016, doi: 10.1177/0309524X16671083.
- [32] B. S. Rajpurohit and S. N. Singh, "Performance analysis of unified doubly-fed induction generator for wind power application," *Wind Eng.*, vol. 39, no. 5, pp. 533–548, 2015, doi: 10.1260/0309-524X.39.5.533.
- [33] T. Laamayad, "Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode Glissant. Apport de la Logique floue," Université de Batna, 2014.
- [34] P.-E. VIDAL, "Commande non-linéaire d'une machine asynchrone a double alimentation Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation," Thèse Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [35] M. Badreddine and K. Abdeldjalil, "Cammande d'un réseau électrique par mode glissant statique en régime transitoire," Université de Djilali Bounaama Khemis Miliana, 2017.
- [36] A. Hussain, "Contribution à la commande adaptative robuste par modes glissants,"

- Université de Reims Champagne Ardenne, 2009.
- [37] L. Abderrahmane and B. Mohammed, “Commande d \hat{e}^{TM} une éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA),” Université Ahmed Draïa Adrar, 2019.
- [38] W. Belmenaouar, “Commande dynamique en mode glissant de la machine synchrone à aimants permanents alimentée en tension,” UNIVERSITE M’HAMED BOUGARA-BOUMERDES, 2017.
- [39] H. Bouchareb, “Observateur non linéaire mode glissant,” UNIVERSITE FERHAT ABBAS -SETIF 1-, 2013.
- [40] I. Deghboudj, “COMMANDE DES SYSTEMES NON LINEAIRES Au nom de dieu clément et miséricordieux,” UNIVERSITE CONSTANTINE 1 FACULTE, 2013.
- [41] A. G. Aissaoui, H. Abid, M. Abid, and A. Tahour, “Commande par la logique floue et mode glissant d’une machine synchrone autopilotée,” *Autom. ordinateurs Command.*, vol. 52 n 1, pp. 89–103, 2007, [Online]. Available: <http://revue.elth.pub.ro/upload/403500art10.pdf>.
- [42] I. BAKHTI, “ETUDE DE DIFFERENTES COMMANDES Non Lineaires De La Machine Asynchrone Avec Observation DE FLUX ET DE VITESSE,” UNIVERSITE DE BATNA, 2011.
- [43] Y. KEBBATI, “Commande en Mode Glissant avec Observateur Robuste Associée à un Estimateur pour le Diagnostic du Moteur Asynchrone,” UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D’ORAN MOHAMED BOUDIAF USTO, 2013.
- [44] B. Hamane, M. L. Doumbia, M. Bouhamida, A. Draou, H. Chaoui, and M. Benghanem, “Comparative study of PI, RST, sliding mode and fuzzy supervisory controllers for DFIG based wind energy conversion system,” *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 5, no. 4, pp. 1174–1185, 2015, doi: 10.20508/ijrer.85354.

Résumé : Ce mémoire est consacré à la production d'électricité par un système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation. L'objectif est divisé en deux, premièrement pour appliqué des technique afin de maximisé la puissance capté telle que les commande MPPT avec et sans asservissement de vitesse. Le deuxième objectif de ce travail est de contrôler l'échange de puissance entre le stator de la génératrice et le réseau en agissant sur les signaux rotoriques à travers un convertisseur. Dans cette optique la commande vectorielle des puissances active et réactive statoriques a été étudiée en utilisant commande directe et indirecte avec le régulateur classiques Proportionnel- Intégral, et puis on applique la commande non linéaire par mode glissant. Les performances du dispositif sont analysées et comparées en termes de suivi de consigne, robustesse, et rejet de perturbations.

Mots clés :

Eolien, MPPT, machine asynchrone à double alimentation, commande vectorielle , mode glissant (MG),

Abstract: This document is devoted the electrical energy using wind energy system based on a doubly fed induction generator. The objective is divided into two, first is to apply techniques to maximum power point tracking MPPT with and without speed control. The second objective of this work is to control the exchange of power between the stator of the generator and the network by acting on the rotor converter.

In this perspective, the vectorial control of the stator active and reactive powers has been studied using direct and indirect control with the conventional Proportional-Integral regulator, and then the nonlinear control is applied by sliding mode. The performances of the system are analyzed and compared in terms of reference tracking, robustness, and disturbances rejection.

Keywords :

Wind turbine, MPPT doubly-fed induction machine, vector control, sliding mode.

ملخص: هذه المذكرة تقدم إنتاج الكهرباء للشبكة الكهربائية اعتمادا على الماكينة اللاتزامنية ثنائية التغذية، هذه الماكينة مستعملة في نظام هوائي، كان الهدف مقسما لجزئين، الاول من اجل الحصول على أقصى قدر من طاقة الرياح بواسطة استراتيجية MPPT مع او بدون

التحكم في سرعه. هدفنا الثاني كان تطبيق تقنية التحكم الشعاعي للطاقة التفاعلية و الردية باستعمال التحكم المباشر والغير مباشر مع المنظمات الكلاسيكية و الغير خطي من خلال التحكم الانزلاقي ، كما قمنا بتحليل ومقارنة ادات هذه المنظمات المستعملة في النظام المذكور سالفًا. وقد تم تحليل أداء الجهاز ومقارنة من حيث تتبع، لاصلايه و رفض الاضراب **الكلمات المفتاحية:** الهوائيه، الحصول على أقصى قدر من طاقة الرياح استراتيجيه MPPT، التحكم الشعاعي، التحكم الانزلاقي