



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industrielle

Spécialité : Maintenance Fiabilité et Qualité

Thème

Commande des puissances actives et réactives d'un système d'aérogénérateur

Présenté et soutenu publiquement par :

BEKHEDDA Wafaa & MESSALITI Ouail

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr: METAHRI Dhiyaeddine	MCB	Mohammed Ben Ahmed Oran 02	Président
Mr. TARFAYA Anis	MCB	Mohammed Ben Ahmed Oran 02	Encadreur
Mr: BOUCHAALA Mohammed Abdelghani	MCB	Mohammed Ben Ahmed Oran 02	Examineur

Année 2022/2023

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes chères mamans Aicha, Fatma qui ont œuvré pour ma réussite, par leurs amour, leurs soutiens, tous les sacrifices consentis et leurs précieux conseils, pour toute leurs assistances et leurs présences dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude, merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de vous.

Mes chers parents,

Mon Grand-père, tu m'as appris beaucoup de choses. Vous m'avez montré l'importance de la générosité, de l'humilité et de la persévérance. Votre vie a été un exemple vivant de force et de courage, et je suis fière d'être votre petite-fille. Que Dieu te bénisse.

Mon père abas et ma mère djemaa, je tiens à vous exprimer ma gratitude la plus sincère pour votre soutien, votre amour et votre dévouement inconditionnels.

Toutes mes chères sœurs et tous mes chers frères bien-aimés, à ceux dont les noms sont écrits dans mon cœur, que l'Allah vous protège.

A mon âme sœur Hafida Bekhedda.

Aux mes familles OUAILI et BEKHEDDA.

Mes chers amis, pour exprimer toute ma gratitude et mon amour envers chacune d'entre vous. Vous êtes mes confidentes. À travers les rires partagés, les aventures mémorables et les moments de pure complicité.

wafaa

Dédicace

*A mes très chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour,
leur prières tout au long de mes études,*

A mes sœurs,

A tous mes amis sans aucune exception,

Et à vous chers lecteurs

Ouail

Remerciement :

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

La louange est à Allah l'unique et la paix et le salut qui n'a point de messager après lui et sur sa famille, ses compagnons et tous ceux qui suivent son chemin jusqu'au jour de la résurrection.

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant qui nous a donné la foi, le courage et la patience durant toutes ces années d'études et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous adressons tout d'abord nous vifs remerciements à notre encadreur Monsieur Tarfaya Anis, Professeur à l'institut de maintenance et sécurité industrielle. Pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de rapporter ce mémoire, et pour ses conseils et encouragements réguliers, sa bienveillance, gentillesse, ses qualités scientifiques et humaines ont toujours été une source de motivation.

Nos remerciements aux :

- ❖ Membres de jury pour leur temps et leur expertise lors de l'évaluation de notre mémoire,
- ❖ Les enseignants et le personnel administratif du département de l'électromécanique de l'IMSI,
- ❖ Nous sommes infiniment reconnaissants envers nos familles pour leur soutien indéfectible et leur amour inconditionnel tout au long de notre réalisation de ce mémoire.
- ❖ Les collègues pour leurs amitiés et collaborations,
- ❖ Je tiens de remercier « Groupement : Sonatrach-Eni » d'avoir facilité le déroulement de mon stage pratique et me donne l'opportunité à tenter une nouvelle expérience qui a été pleine d'informations, de conseils et de partage.

Du fond du cœur, je remercie toutes les personnes m'ayant aidé de près ou de loin à mener ce travail.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire se focalise sur la modélisation et la simulation d'une éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA). La modélisation mathématique de la machine et du système associé, comprenant la turbine, la charge et le convertisseur, est essentielle pour étudier les systèmes aérogénérateur de manière générale. Il permet de décrire en détail l'ensemble de la machine et du système, ce qui permet de prédire les performances dynamiques et statiques de l'éolienne.

La commande vectorielle en puissance de la MADA, avec orientation du flux statorique, représente un choix judicieux pour notre étude. Cette commande est réalisée à l'aide de régulateurs classiques tels que le régulateur PI. Elle offre la possibilité de définir des consignes indépendantes pour la puissance active et la puissance réactive, ce qui permet de régler en permanence la valeur de la puissance réactive fournie par la machine au réseau électrique. Deux méthodes ont été présentées pour la commande de la MADA afin d'améliorer le facteur de puissance du réseau et de garantir le réglage du bus continu. Ces méthodes sont la commande directe et la commande indirecte. Les résultats obtenus lors de la simulation de ces deux méthodes de commande ont été présentés et analysés. Ils démontrent l'efficacité de la commande vectorielle en puissance pour la MADA, en termes de réduction de la distorsion harmonique totale (THD) et de satisfaction des exigences de la distribution électrique.

Mots clés

Energie renouvelable, Aérogénérateur, MADA, PI , modélisation, simulation.

ملخص

يركز العمل المقدم في هذه الأطروحة على نمذجة ومحاكاة توربينات الرياح على أساس آلة غير متزامنة مزدوجة التغذية MADA. تعد النمذجة الرياضية للآلة والنظام المرتبط بها ، بما في ذلك التوربين والحمل والمحول ، ضرورية لدراسة أنظمة طاقة الرياح بشكل عام. إنه يجعل من الممكن وصف بالتفصيل كل من الآلة والنظام المرتبط بها، مما يسمح بالتنبؤ بكل من الأداء الديناميكي والثابت لتوربينات الرياح.

يمثل التحكم في طاقة النواقل في MADA ، مع توجيه تدفق الجزء الثابت، خيارًا حكيمًا لدراستنا. يتم إجراء هذا التحكم باستخدام منظمات تقليدية منظم PI. يوفر إمكانية تحديد نقاط ضبط مستقلة للقوة النشطة والقوة التفاعلية، مما يجعل من الممكن بشكل دائم ضبط قيمة الطاقة التفاعلية التي توفرها الآلة للشبكة الكهربائية. تم تقديم طريقتين للتحكم في MADA لتحسين معامل القدرة للشبكة ولضمان ضبط ناقل التيار المستمر. هذه الطرق هي التحكم المباشر و التحكم غير المباشر. تم عرض وتحليل النتائج التي تم الحصول عليها أثناء محاكاة هاتين الطريقتين. لقد أثبتوا فعالية التحكم في طاقة النواقل في MADA من حيث تقليل التشوه التوافقي الكلي (THD) وتلبية متطلبات توزيع الطاقة.

الكلمات المفتاحية : الطاقات المتجددة , مولد الرياح , آلة لا التزامنية مضاعفة التغذية, PI , النمذجة , محاكاة .

Abstract

The work presented in this thesis focuses on the modeling and simulation of a wind turbine based on a doubly fed induction generator (DFIG). The mathematical modeling of the machine and its associated system, including the turbine, load, and converter, is essential for studying wind turbine systems in general. It provides a detailed description of the machine and system, allowing for the prediction of both dynamic and static performances of the wind turbine.

The power vector control of the DFIG, with stator flux orientation, is a judicious choice for our study. This control is implemented using classical regulators such as the PI controller. It offers the possibility to set independent set points for active power and reactive power, enabling continuous adjustment of the reactive power supplied by the machine to the electrical grid. Two methods have been presented for controlling the DFIG to improve the power factor of the grid and ensure continuous bus regulation. These methods are direct control and indirect control. The simulation results of these two control methods have been presented and analyzed. They demonstrate the effectiveness of power vector control for the DFIG in terms of reducing total harmonic distortion (THD) and meeting the requirements of the power distribution system.

Keywords

Renewable energy, Wind generator, DFIM, PI, modeling, simulation.

Sommaire

Sommaire

Dédicace.....	
Remerciement	
Résumé.....	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des abréviations et symboles.....	
Introduction générale	1

CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

I.1 .Introduction	2
I.2 .Les différentes sources des énergies renouvelables	3
I.2.1 .Énergie solaire.....	3
I.2.1.1.Énergie solaire thermique.....	3
I.2.1.2.Énergie solaire thermodynamique	3
I.2.1.3.Energie solaire photovoltaïque	3
I.2.2 .L'énergie de la biomasse.....	3
I.2.3 .Énergie hydraulique	4
I.2.4 .Géothermie	5
I.2.5 .Energie éolienne	5
I.3 .Historique de l'énergie éolienne.....	6
I.4 .Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	10
I.5 .Gisement Eolien en Algérie	11
I.6 .Conclusion.....	13

CHAPITRE II:ETAT DE L'ART SUR LES AEROGENERATEUR

II.1 .Introduction	14
II.2 .L'énergie de vent.....	14

Sommaire

II.2.1 Direction et vitesse du vent	15
II.2.2 .L'énergie disponible dans le vent.....	17
II.2.3 Notions aérodynamiques « théorie de Betz »	18
II.3 .Différents types d'aérogénérateurs.....	20
II.3.1 .Selon axe	20
II.3.1 .1. Les éoliennes à axe horizontal.....	20
II.3.1 .2. Les éoliennes à axe vertical.....	22
II.3.1 .2.1. L'éolienne Darrieus	22
II.3.1 .2.2. L'éolienne verticale Savonius	22
II.3.1 .2.3. L'éolienne à voilures tournantes	22
II.3.2 .Selon vitesse	23
II.3.2 .1.Les éoliennes à vitesse fixe	23
II.3.2 .2.Les éoliennes à vitesse variables	23
II.4 . La constitution d'une éolienne à axe horizontal [32] [33] :	25
II.5 . Topologies des génératrices éoliennes	27
II.5.1 .Éoliennes utilisant les machines asynchrones	27
II.5.2 .Éoliennes utilisant les machines synchrones.....	27
II.6 .La machine doublement alimentée :.....	27
II.6.1 . Structure de la MADA	28
II.6.2 .Principe de fonctionnement.....	29
II.6.3 .Modes de fonctionnement de la MADA	30
II.6.3 .1. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	30
II.6.3 .2.Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	30
II.6.3 .3. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	31
II.6.3 .4. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	31
II.6.4 .Domaines d'application de la MADA.....	32
II.6.5 .Avantages et inconvénients de la MADA	33

Sommaire

II.6.5 .1.Avantages	33
II.6.5 .2.Inconvénients.....	34
II.7 .Conclusion.....	34

CHAPITRE III : ETUDE ET MODELISATION DE LA CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE

III.1. Introduction.....	35
III.2. Description de système	36
III.3. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne basée sur la GADA	37
III.3.1. Modèle de vitesse du vent.....	37
III.3.2. Modélisation de la turbine éolienne	38
III.3.3. Modèle de la partie mécanique	42
III.3.3.1. Modèle du multiplicateur	42
III.3.3.2.Modèle de l'arbre mécanique La modélisation de la transmission mécanique se résume de la manière suivante:.....	43
III.4 .Stratégie de commande de la turbine	44
III.4.1. Stratégie de maximisation de puissance "MPPT"	45
III.4.2. Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation mécanique.....	46
III.4.3.Résultats obtenus par simulation	48
III.5. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	50
III.5.1 Hypothèses simplificatrices	50
III.5.2. Modèle de la MADA dans le repère triphasé.....	51
III.5.3. Mise en équations électriques	51
III.5.4 .Utilisation de la transformée de PARK à la MADA.....	53
III.6.Association de la MADA avec le convertisseur d'alimentation.....	56
III.6.1.Association onduleur – MADA (rotor).....	56
III.6.2. Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).....	60
III.6.3.Résultats de simulation	61

Sommaire

III.7.Conclusion	62
------------------------	----

CHAPITRE IV : COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA

IV.1.Introduction :	63
IV.2.Commande vectorielle de la génératrice GADA :	63
IV.2.1 Principes et objectifs de la commande vectorielle :	64
IV.2.2 Modèle de la génératrice MADA avec orientation du flux statorique :	64
IV.2.3 Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques :	66
IV.2.3.1 Relation entre les courants statoriques et rotoriques :	66
IV.2.3.2 Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques :	67
IV.2.4 Expressions des tensions et courants rotoriques :	67
IV.3 .Principe de Contrôle indépendant des puissances active et réactive :	68
IV.3.1 Commande vectorielle directe des puissances :	68
IV.3.2 Commande vectorielle indirecte des puissances :	69
IV.3.3.Synthèse et conception du régulateur (PI) :	70
IV.3.3.1.Objectif du correcteur PI :	70
IV.3.3.2.Synthèse du correcteur PI :	70
IV.4 Résultats de simulation :	71
IV.5. Conclusion :	77
Conclusion générale	79
ANNEXES	
Bibliographie	

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Moudre les grains en Afghanistan 1977[10].....	6
Figure I.2 : Exemples de moulins à vent.....	7
Figure I.3 : Capacité éolienne cumulée dans le monde entier [12].....	8
Figure I.4 : Les éoliennes de Kabertène.....	10
Figure I.5 : Cartographique des grandes régions de vent en Algérie.....	12

Chapitre II

Figure II.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	14
Figure II.2 : Vents locaux à travers le Monde.....	16
Figure II.3 : Appareils utilisés pour la mesure du vent : a- Anémomètre à rotation, b- Anémomètre à pression, c- Girouette.....	17
Figure II.4 : Tube de courant autour d'une éolienne.....	19
Figure II.5 : Coefficient de puissance.....	19
Figure II.6 : Les éoliennes à axe horizontal a- Voilure tripale, b- voilure bipale, c- moulin américain.....	21
Figure II.7 : Éolienne à vitesse fixe.....	23
Figure II.8 : Eolienne à vitesse variable.....	24
Figure II.9 : Constitution d'une éolienne tripale.....	25
Figure II.10 : Structure d'une machine asynchrone à double alimentation.....	28
Figure II.11 : Cascade d'une machine asynchrone à double alimentation.....	29
Figure II.12: fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.....	30
Figure II.13: fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.....	31
Figure II.14: fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	31
Figure II.15: fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	32

Chapitre III

Figure III.1: Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA.....	36
--	----

Liste des figures

Figure III.2: Simulation du profile de la vitesse du vent.....	37
Figure III.3 : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β	39
Figure III.4 : Caractéristiques $P = f(\Omega_t)$ de la turbine éolienne pour les différentes V_v	40
Figure III.5: Coefficient du couple C_{cen} fonction de λ pour différents β	41
Figure III.6: Modèle mécanique de la turbine éolienne.....	42
Figure III.7: Schéma bloc du modèle de la turbine.....	44
Figure III.8: Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne [45].....	44
Figure III.9: Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.....	48
Figure III.10: Résultats de simulation du MPPT avec asservissement de vitesse.....	49
Figure III.10: Résultats de simulation du MPPT avec asservissement de vitesse.....	50
Figure III.11 : Représentation simplifié de la MADA.....	51
Figure III.12 : Orientation du flux statorique.....	54
Figure III.13 : Représentation schématique d'un onduleur de tension alimente le rotor de la MADA.....	57
Figure III.14: Schéma simplifié de l'onduleur triphasé.....	58
Figure III.15 : Principe de commande en MLI-ST.....	60
Figure III.16 : Résultats de simulation de l'onduleur de l'alimentation du rotor.....	62

Chapitre IV

Figure IV.1 : Schéma bloc de la GADA.....	66
Figure IV.2 : schéma bloc de la commande directe.....	69
Figure IV.3 : schéma bloc de la commande indirecte.....	70
Figure IV.4 : Puissance active statorique et sa référence à l'aide de la commande directe.....	72
Figure IV.5 : Puissance réactive statorique et sa référence à l'aide de la commande directe.....	72
Figure IV.6 : Résultats de simulation du courant rotorique direct à l'aide de la commande directe.....	73
Figure IV.7 : Résultats de simulation du courant rotorique quadrature à l'aide de la commande directe.....	73
Figure IV.8 : Les courants statoriques à l'aide de la commande directe.....	74
Figure IV.9 : THD de courant de la phase i_{sa} à l'aide de la commande directe.....	74

Liste des figures

Figure IV.10 : Puissance active statorique et sa référence à l'aide de la commande indirecte...	74
Figure IV.11 : Puissance réactive statorique et sa référence à l'aide de la commande indirecte.....	75
Figure IV.12 : Résultats de simulation du courant rotorique direct à l'aide de la commande indirecte.....	75
Figure IV.13 : Résultats de simulation du courant rotorique quadrature à l'aide de la commande indirecte.....	75
Figure IV.14 : Les courants statoriques à l'aide de la commande indirecte.....	76
Figure IV.15 : THD de courant de la phase i_{sa} à l'aide de la commande indirecte.....	76

Liste des abréviations et symboles

Liste des abréviations et symboles :

EnR	Energies renouvelables
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation.
MLI	Modulation de largeur d'impulsions.
CCR	Convertisseur côté réseau.
CCM	Convertisseur côté machine.
GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation.
MPPT	Maximum Power Point Tracking
FTBF :	Fonction de Transfert en Boucle Fermée.
IGBT :	Insulated Gate Bipolar Transistor
MLI :	Modulation de Largeur d'Impulsion.

➤ Symboles spécifiques à la turbine :

V, V_1, V_2	(m/s)	Vitesse du vent.
m	(Kg)	Masse de l'air.
ρ	(kg/m ³)	Masse volumique de l'air en température ambiante (15°C).
S	(m ²)	Surface circulaire balayée par la turbine $S = \pi.R^2$.
P_m	(W)	Puissance aérodynamique de la turbine.
P_{mt}	(W)	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé.
C_p	(-)	Coefficient de puissance.
λ	(-)	Vitesse relative ou Ratio de vitesse.
P_v	(W)	Puissance théorique maximale extractible d'un vent.
R	(m)	Longueur d'une pale (Rayon de l'éolienne).
P_t	(W)	Puissance aérodynamique de la turbine.
Ω_t	(rad/s)	Vitesse mécanique de la turbine avant multiplicateur.
β	(deg)	Angle de calage des pales.
C_t	(N.m)	Couple mécanique disponible sur l'arbre lent de la turbine.
C_c	(-)	Coefficient du couple.
λ_{opt}	(-)	Vitesse relative optimale.
J	(Kg.m ²)	L'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice.
f_v	(N.m.s/rd)	Coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA.

Liste des abréviations et symboles

C_m	(N.m)	Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice.
Ω_m	(rad/s)	Vitesse mécanique de la génératrice.
C_g	(N.m)	Couple après multiplicateur.
Ω_g	(rad/s)	vitesse de rotation de l'éolienne après le multiplicateur.
G	(-)	Gain du multiplicateur.
$C_{méc}$	(N.m)	Mécanique appliqué au rotor de la génératrice.
$\Omega_{méc}$	(rad/s)	Vitesse mécanique de la turbine.
C_f	(N.m)	Couple de frottement visqueux.
Ω_{ref}	(rad/s)	Vitesse de référence de la turbine.
$\Omega_{ref t}$	(rad/s)	Vitesse de référence de la turbine.
PI		Régulateur de vitesse.

Paramètres de modélisation de la MADA :

C_{em}	(N.m)	Couple électromagnétique de la génératrice
f_v	(N.m.s/rd)	Coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice,
R_s	(Ω)	Résistance statorique par phase,
R_r	(Ω)	Résistance rotorique par phase,
L_s	(H)	Inductance cyclique statorique par phase,
L_r	(H)	Inductance cyclique rotorique par phase,
L_m	(H)	Inductance mutuelle cyclique stator-rotor (magnétisante).
l_s	(H)	Inductance propre d'une phase statorique,
l_r	(H)	Inductance propre d'une phase rotorique,
m_s	(H)	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques,
m_r	(H)	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques,
M	(H)	Inductances mutuelles stator-stator et rotot-rotor.
σ	(-)	Coefficient de dispersion de Blondel,
➤ Repères :		
(s_A, s_B, s_C)		Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés statorique,
(d, q)		Axes de référentiel de Park (tournant à la vitesse de synchronisme),

Liste des abréviations et symboles

(α, β) Axes de référentiel de Concordia/Clarke (repère de Park fixe au stator),

θ_{sr} (rad) Position angulaire du rotor par rapport au stator,

θ_s (rad) Position angulaire du stator par rapport à l'axe (d),

θ_r (rad) Position angulaire du rotor par rapport à l'axe (d).

➤ Grandeurs électriques au stator :

P_{nom} (W) puissance électrique nominale

P_s (W) Puissance active statorique,

$V_s A, B, C$ (V) Tensions instantanées statoriques triphasées,

$I_s A, B, C$ (A) Courants instantanés statoriques triphasées,

P_s (W) Puissance active statorique,

Q_s (VAR) Puissance réactive statorique

➤ Grandeurs électriques au rotor :

$v_{ra, b, c}$ (V) Tensions instantanées rotorique triphasées,

$i_{ra, b, c}$ (A) Courants instantanés rotorique triphasées,

V_r (V) Module du vecteur de tension rotorique,

➤ Grandeurs magnétiques au stator :

$\phi_{ra, b, c}$ (Wb) Vecteur de flux magnétiques au rotor,

$\phi_{rd, q}$ (Wb) Flux rotoriques diphasés dans le repère tournant (d,q).

Ψ (Wb) Module du vecteur de flux statorique.

$[\Psi_s]_{3 \times 1} [\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}]^T$ (Wb) Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c

➤ Grandeurs magnétiques au rotor :

$\phi_{ra, b, c}$ (Wb) Vecteur de flux magnétiques au rotor,

$\phi_{r\alpha, \beta}$ (Wb) Flux rotoriques diphasés dans le repère (α, β) ,

$\phi_{rd, q}$ (Wb) Flux rotoriques diphasés dans le repère tournant (d, q).

Ψ (Wb) Module du vecteur de flux rotorique.

$[\Psi_r]_{3 \times 1} [\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}]^T$ (Wb) Vecteur des flux instantanés des phases a,

b. c rotoriques,

➤ Grandeurs mécaniques :

Ω_s (tr/min) la vitesse du synchronisme,

ω_r (rad/s) Pulsation électrique correspondante à la vitesse de Rotation,

ω_s (rad/s) Pulsation électrique des grandeurs statoriques (champtournant),

Liste des abréviations et symboles

G	(-)	Glissement de la vitesse de rotation,
➤ Transformations :		
S		Opérateur de Laplace,
P(θ)		Transformation de Park : $X_{sa,b,c} \rightarrow X_{sd,q}$ et $X_{ra,b,c} \rightarrow X_{rd,q}$,
➤ Grandeurs de commande de la MADA :		
C_{em}	(N.m)	couple électromagnétique,
f_p	(Hz)	Fréquence de porteuse,
f_r	(Hz)	Fréquence de référence,
m	(-)	Indice de modulation,
S_a, S_b, S	(-)	Etats de commutation des interrupteurs de l'onduleur,
P_s^*	(W)	Consigne de la puissance active statorique,
Q_s^*	(VAR)	Consigne de la puissance réactive statorique,
K_p, K_i	(-)	Composantes proportionnelle et intégrale du correcteur,
PI, PI _{d-p}	(-)	Régulateur de puissance sur l'axe d pour la commande vectorielle indirecte,
PI _{d-p}	(-)	Régulateur de puissance sur l'axe q pour la commande vectorielle indirecte,
v_{rd}^*, v_{rq}^*	(V)	Tensions rotoriques de référence dans le repère (d, q),
i_{rd}^*, i_{rq}^*	(A)	Courants rotoriques de référence dans le repère (d, q),
K	(-)	Le gain du correcteur PI.

Introduction générale

Dans le contexte actuel de préoccupations croissantes liées au changement climatique et à l'épuisement des ressources naturelles, le débat sur les sources d'énergie est devenu essentiel. Une grande partie de l'énergie que nous utilisons aujourd'hui provient de sources non renouvelables, telle que les combustibles fossiles. Ces sources ont fourni une énergie abondante et bon marché pendant des décennies, mais elles ont généré des problèmes environnementaux majeurs et posent des défis sur le plan de la durabilité à long terme. Face à ces défis, les énergies renouvelables ont émergé comme une alternative prometteuse et durable. Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie naturelles qui se renouvellent en permanence et ne s'épuisent pas. Elles offrent une approche plus respectueuse de l'environnement pour répondre à nos besoins énergétiques tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre et en limitant notre empreinte écologique.

La croissance de la production d'électricité renouvelable devrait continuer à être soutenue dans les années à venir, car les secteurs de l'énergie éolienne, solaire et biomasse connaissent une dynamique positive. La part de ces sources d'énergie dans la production mondiale ne cesse d'augmenter. Cette tendance est essentielle pour répondre aux besoins énergétiques croissants, tout en réduisant les émissions de gaz nocifs et en atténuant les effets néfastes sur l'environnement.

L'énergie éolienne est devenue une source d'énergie renouvelable de plus en plus importante dans le paysage énergétique mondial. Les éoliennes, également connues sous le nom d'aérogénérateurs, convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cependant, pour garantir une intégration efficace de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques, il est essentiel de pouvoir contrôler les puissances active et réactive générées par les aérogénérateurs.

Dans ce mémoire, nous nous intéressons à la commande des puissances active et réactive dans les systèmes d'aérogénérateurs. L'objectif est d'optimiser la production d'énergie éolienne en ajustant la puissance active générée par l'aérogénérateur pour répondre aux besoins de la charge, tout en maintenant le facteur de puissance à une valeur souhaitée en contrôlant la puissance réactive. Notre travail consiste à équilibrer une éolienne à axe horizontale déjà réalisée, la mettre en œuvre en effectuant des essais

expérimentaux, nous avons ainsi simulé Matlab Simulink toute l'installation. Notre travail est composé de quatre chapitres, résumés comme suit:

Le chapitre I offre une introduction générale sur les énergies renouvelables, en mettant l'accent sur l'énergie éolienne. Nous examinerons les différentes sources d'énergie renouvelable, l'histoire de l'énergie éolienne, ainsi que ses avantages et inconvénients. De plus, nous analyserons le potentiel éolien en Algérie, soulignant les opportunités de développement de parcs éoliens dans ce pays.

Le chapitre II se concentrera sur l'état de l'art des aérogénérateurs. Nous explorerons les principes fondamentaux de l'énergie éolienne, les différents types d'aérogénérateurs et la structure d'une éolienne à axe horizontal. Nous discuterons également des topologies des génératrices éoliennes et nous intéresserons plus particulièrement à la machine asynchrone à double alimentation (MADA), qui présente des avantages significatifs en termes de rendement et de contrôle.

Dans le chapitre III, nous étudierons et modéliserons la chaîne de conversion éolienne, en nous basant sur la MADA. Nous décrirons le système et développerons les modèles de la vitesse du vent, de la turbine éolienne et de la partie mécanique. Ensuite, nous proposerons des stratégies de commande de la turbine, telles que la maximisation de la puissance (MPPT), en examinant l'approche avec asservissement de la vitesse de rotation mécanique. Nous présenterons également les résultats obtenus par simulation pour évaluer l'efficacité des stratégies de commande.

Le chapitre IV se concentrera sur la commande vectorielle de la MADA, visant à réguler de manière indépendante les puissances active et réactive générées par l'aérogénérateur. Nous présenterons les principes et les objectifs de la commande vectorielle, ainsi que le modèle de la MADA avec orientation du flux statorique. Nous aborderons également le contrôle indépendant des puissances active et réactive, en détaillant les expressions des tensions et courants rotoriques. Nous développerons ensuite des techniques de commande vectorielle directe et indirecte des puissances, permettant de réguler de manière précise ces deux composantes de puissance. Nous synthétiserons et concevrons un régulateur (PI) adapté à la commande des puissances active et réactive. Enfin, nous présenterons les résultats de simulation obtenus, illustrant l'efficacité de la commande vectorielle dans la régulation des puissances active et réactive d'un système d'aérogénérateur.

Finalemment, on terminera par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche futures.

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LES ENERGIES
RENOUVELABLES

I.1 .Introduction

Pendant de nombreuses années, l'énergie éolienne a été utilisée dans les fermes pour moulin des grains ou pomper de l'eau à l'aide de moulins à vent. Le principe de base consiste à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. De nos jours, ce principe est appliqué à la production d'énergie éolienne dans les systèmes d'alimentation, mais au lieu de cela, elle est transformée en énergie électrique en utilisant des éoliennes.

L'Algérie a pris l'engagement de se tourner vers les énergies renouvelables pour relever les défis environnementaux et de préservation des ressources énergétiques fossiles, en visant des solutions globales et durables.

Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22.000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national [1], avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent [2]. Bien que son potentiel soit relativement faible, l'éolien n'est pas exclu et constitue le second axe de développement, avec une part prévue de 3% de la production d'électricité en 2030.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les énergies renouvelables et d'examiner la situation actuelle des systèmes de conversion de l'énergie éolienne à l'échelle mondiale ainsi qu'en Algérie. Nous aborderons également les données statistiques concernant les projets déjà installés et les prévisions futures.

I.2 .Les différentes sources des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables (EnR) sont alimentées par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées... Elles permettent de produire de l'électricité, de la chaleur, du froid, du gaz, du carburant, du combustible. Ces sources d'énergie, considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain, n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles se distinguent des énergies fossiles, polluantes et dont les stocks diminuent. Parmi ces énergies, nous citons :

I.2.1 .Énergie solaire

L'atmosphère de notre planète reçoit à chaque instant une quantité de rayonnement solaire équivalente à 174 péta watts (1 PW= 10¹⁵ W), dont environ 30 % sont réfléchis vers l'espace, tandis que le pourcentage restant est absorbé par les nuages, les océans et les masses terrestres. L'énergie solaire est produite par le rayonnement solaire, ce qui en fait la source la plus abondante sur Terre. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire de l'électricité soit en l'utilisant directement à partir de semi-conducteurs photovoltaïques, soit en utilisant la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production d'électricité. Il existe 03 types d'énergies solaires à savoir :

I.2.1.1 .Énergie solaire thermique : L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire. Elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz) [3].

I.2.1.2 .Énergie solaire thermodynamique : La technologie de l'énergie solaire thermodynamique utilise des centrales solaires à concentration pour générer de l'électricité et stocker l'énergie thermique. Les miroirs concentrant la lumière solaire, chauffent un fluide haute température qui produit de la vapeur. Cette vapeur alimente une turbine pour générer de l'électricité [4].

I.2.1.3 .Energie solaire photovoltaïque : Les panneaux photovoltaïques permettent de transformer directement une partie du rayonnement solaire en électricité.

I.2.2 .L'énergie de la biomasse

La biomasse est une matière organique d'origine végétale ou animale qui est produite grâce à la photosynthèse des plantes. Cette réaction chimique permet de stocker l'énergie solaire sous forme d'énergie chimique. En termes d'énergie, la biomasse désigne l'ensemble des matières organiques végétales et animales qui peuvent

être utilisées comme source d'énergie, soit par combustion (par exemple le bois énergie), soit par méthanisation (biogaz), soit après des transformations chimiques (biocarburants ou agrocarburants). La biomasse est produite par la photosynthèse qui transforme l'énergie solaire en énergie chimique. Deux principales sources de biomasse sont utilisées pour produire de l'énergie [5] :

- Les déchets organiques provenant de la consommation domestique, de l'industrie ou de l'agriculture.
- Les cultures énergétiques dédiées (agricoles ou forestières) cultivées spécifiquement pour produire de l'énergie.

On distingue trois types de la biomasse :

- Le bois énergie : représente 14% de la consommation énergétique mondiale. Issu des déchets de la forêt ou des industries du bois, il est brûlé pour produire de chaleur.
- Le biogaz : est issu de la fermentation des déchets organiques. Sa combustion produit de la chaleur, mais également de l'électricité par cogénération.

Les biocarburants : proviennent de plantes cultivées (tournesol, betterave, colza....). Le biodiesel (ou ester méthylique d'huile végétale, EMHV), l'éthanol, et son dérivé, l'éthyle-tertio-butyle-éther, l'ETBE sont les plus courants. Ils sont mélangés à de l'essence ou à du gazole [6].

I.2.3 .Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est la première source de production d'électricité d'origine renouvelable (83 %) car elle se régénère grâce aux cycles Évaporation et précipitations. Le rayonnement solaire joue un rôle plus important dans le cycle de l'eau continuellement, cette dernière produit l'énergie hydraulique.

L'énergie hydraulique est définie comme une énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chute, cours d'eau, courant marin, marée, vagues. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

D'un point de vue de la mécanique, l'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique dans le cas des courants marins ou des cours d'eau, des marées, des vagues, et une énergie potentielle dans le cas des chutes d'eau et barrages [5].

I.2.4 .Géothermie

L'énergie géothermique dépend de la chaleur de la Terre. C'est une haute énergie thermique d'origine naturelle stockée dans le magma à l'intérieur de la terre. Où l'on estime que plus de 99% de la masse terrestre est constituée de roches dont la température dépasse 1000 degrés Celsius. Cette énergie thermique est principalement utilisée pour produire de l'électricité. Et parfois, il est utilisé pour le chauffage lorsque la chaleur est proche de la surface de la terre ou sous la forme de ressorts en marche.

Cette énergie renouvelable, en théorie, pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pour les 100 000 prochaines années, mais la convertir en énergie électrique est un processus coûteux, même si l'énergie de base (matière première) est gratuite et disponible en abondance, mais difficile à obtenir [7].

La géothermie exploite le différentiel thermique de l'écorce terrestre pour en extraire de la chaleur utilisable par l'homme. On distingue trois types [8]:

- la géothermie profonde à haute énergie (150 – 250°C à 2 500.
- la géothermie moyenne à basse énergie (30 à 150°C dans les aquifères) pour.
- la géothermie à très basse énergie (<30°C).

I.2.5 .Energie éolienne

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffuse obtenue à partir de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique. Les éoliennes, également appelées turbines éoliennes, sont des dispositifs qui captent le vent et utilisent ses forces pour faire tourner des hélices. Ces hélices sont connectées à un générateur qui produit de l'électricité.

Le fonctionnement d'une éolienne repose sur le principe de base de l'aérodynamique. Lorsque le vent souffle sur les pales de l'éolienne, il crée une différence de pression qui entraîne leur rotation. Plus la vitesse du vent est élevée, plus la rotation des pales est rapide, ce qui génère davantage d'énergie. En corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). L'énergie éolienne est devenue une source d'énergie importante dans de nombreux pays. Les parcs éoliens terrestres et offshore se développent rapidement, et l'industrie éolienne continue d'innover pour améliorer l'efficacité des turbines, réduire les coûts et minimiser les impacts environnementaux. L'énergie éolienne est une source d'énergie très importante. Par

définition, elle désigne l'énergie qui peut être extraite du vent et transformée en électricité. Elle représente un complément intéressant à l'énergie de base fournie par les centrales thermiques et hydrauliques.

I.3 .Historique de l'énergie éolienne

L'utilisation de l'énergie éolienne pour effectuer un travail remonte à une période aussi ancienne que l'histoire elle-même, remontant à environ 5000 ans avant notre ère [9]. Les navires sont considérés comme l'un des premiers mécanismes à avoir exploité l'énergie éolienne, une découverte attribuée aux anciens Égyptiens.

Les premières éoliennes remontent à environ 4000 ans en arrière, à l'époque du règne d'Hammourabi, roi de Babylone. C'est à cette époque que les premiers systèmes d'irrigation actionnés par le vent firent leur apparition. En Perse, on utilisait déjà les premiers moulins à vent à axe vertical pour moudre du grain [8]. Des moulins à vent similaires, d'une extrême simplicité, ont survécu en Afghanistan jusqu'à nos jours, comme le montre la figure I.1. Progressivement, cette technologie a commencé à se propager vers les pays méditerranéens et l'Europe centrale.



Figure I.1 : Moudre les grains en Afghanistan 1977[10]

Cependant, le premier moulin à vent à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1180, en France en 1190, en Allemagne en 1222 et au Danemark en 1259. En Europe, les performances des moulins à vent n'ont cessé de s'améliorer entre le 12ème et le 19ème siècle. Au cours des années 1800, environ 20 000 moulins à vent étaient en service en France pour l'irrigation. En revanche, la construction d'éoliennes à pales multiples ne s'est pas développée sur le vieux continent, mais aux États-Unis, où elle est

apparue en 1870. La figure I.2 présente quelques exemples de conceptions construites à travers l'Europe et les États-Unis.

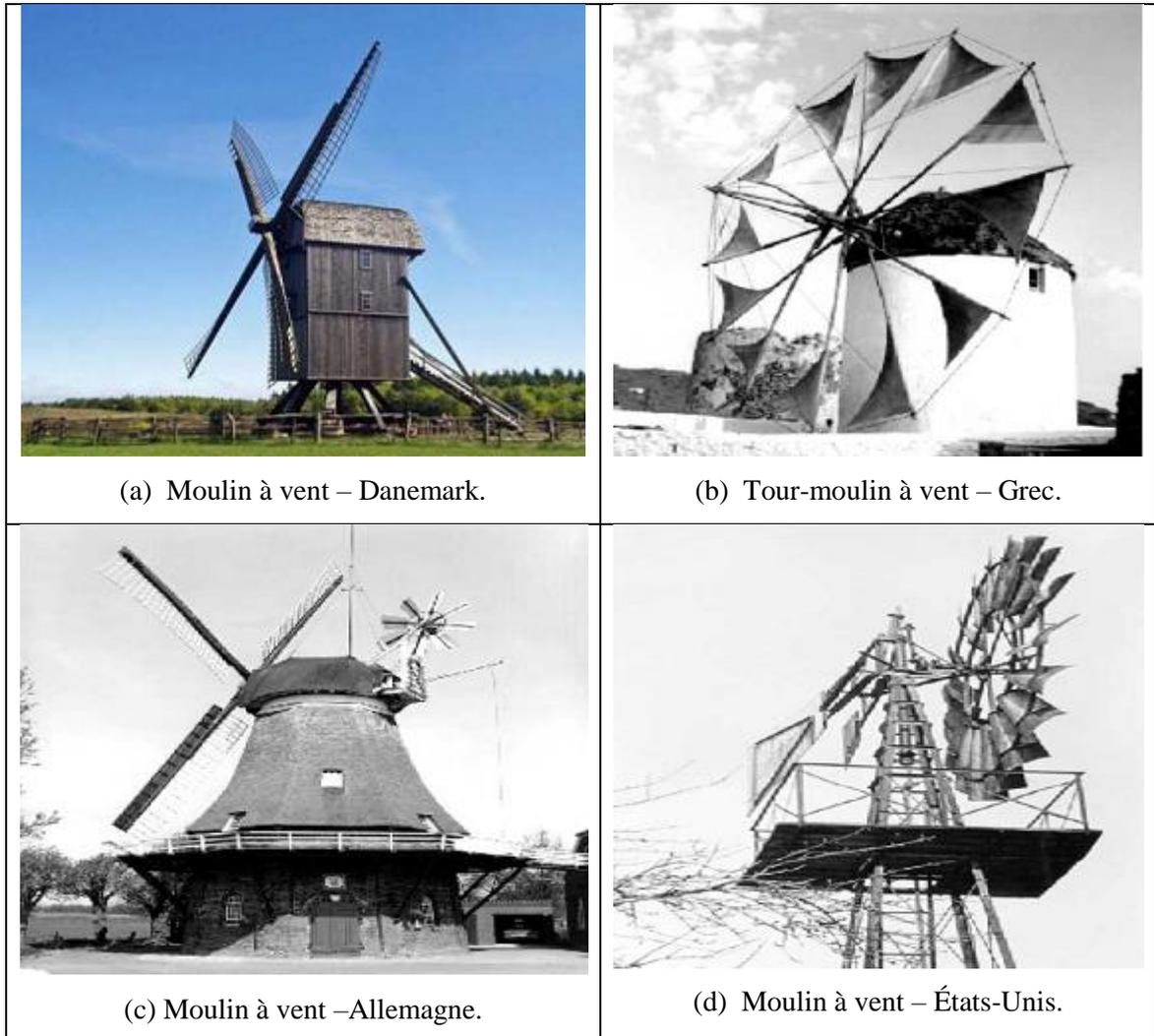


Figure I.2 : Exemples de moulins à vent

Dans les années 1887-1888, l'Américain Charles F. Brush construit à Cleveland la première éolienne à fonctionnement automatique destiné à la production d'électricité. Malgré sa grande taille de 17 mètres de hauteur, elle ne produisait que 12 KWh. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Contrairement à ce que la situation actuelle pourrait laisser penser, les recherches allèrent bon train dans les années 1920, [11].

En effet, la popularité de l'énergie éolienne a toujours été en relation avec les prix des combustibles fossiles. Après la seconde guerre mondiale, avec la baisse des prix des combustibles fossiles, l'énergie éolienne n'était plus utilisée que pour le pompage. Mais la crise du pétrole dans les années 1970 a stimulé l'intérêt pour la production d'énergie à

grande échelle par les éoliennes. Depuis les années 1990, les nouvelles connaissances et le développement de l'électronique de puissance, ainsi que l'amélioration des performances en aérodynamique pour la conception des turbines éoliennes et surtout les subventions accordées par de nombreux gouvernements ont rendu la solution éolienne plus compétitive, [10],[11].

Le rythme de croissance de l'éolien dans le monde reste globalement soutenu, selon le rapport annuel de le Conseil mondial de l'énergie éolienne voir La figure I.3, la puissance éolienne mondiale installée durant l'année 2013est de 318.7 GW, ainsi que cette puissance arrive l'environ de 650 GW en 2019, la puissance installé à connu très gronde développement dans les derniers années [12].

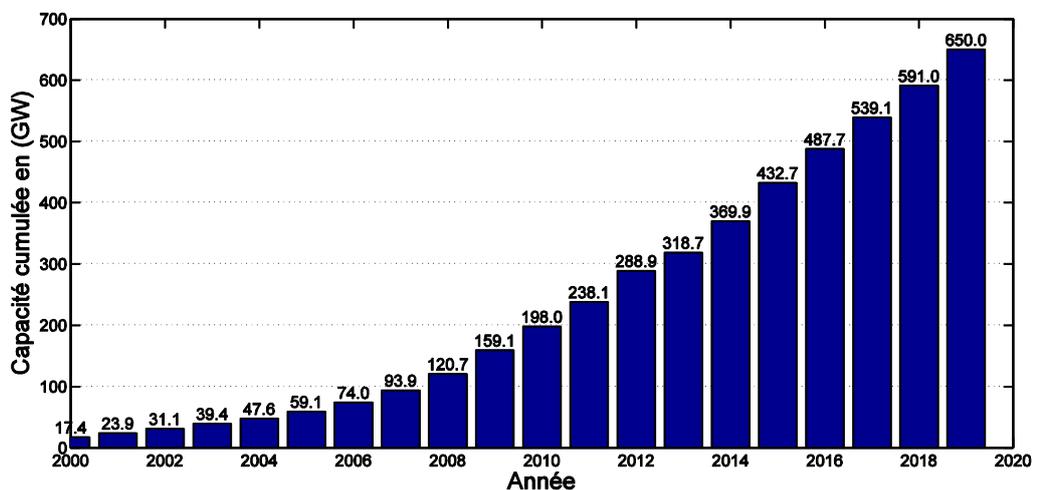


Figure I.3 : Capacité éolienne cumulée dans le monde entier [12]

En Algérie, l'histoire de l'énergie éolienne retour à la première éolienne a été installée près d'Adrar en 1953, pendant la période coloniale. Cela a permis à la wilaya de devenir un leader dans l'expérimentation des énergies renouvelables. En raison de son vaste territoire et de ses conditions climatiques particulières, la région est considérée comme un pôle national majeur pour l'exploitation de l'énergie éolienne, en raison de la fréquence des vents, notamment dans la zone de Kabertène.

Le directeur de l'unité DRER-MS appelle à valoriser la performance énergétique de ces régions en lançant des études techniques et scientifiques sur le terrain. Il propose notamment la mise en place d'une station météorologique chargée de collecter des données précises sur les moyennes annuelles et saisonnières de la vitesse des vents, à l'instar du projet de la ferme de Kabertène. Selon M. Hamouda, l'importance de la ferme

CHAPITRE I GENERALITES SUR LES ENERGIESRENOUVELABLES

de Kabertène réside dans sa capacité de production énergétique de 10 mégawatts, supérieure à celle de nombreux grands laboratoires universitaires du pays qui n'ont atteint que 5 mégawatts [13].

La ferme éolienne de Kabertène (wilaya d'Adrar) de production d'électricité constitue un modèle réussi en matière d'exploitation des énergies propres et renouvelables, estiment les responsables locaux du secteur de l'Energie.

Implanté dans la zone de Kabertène, sur le territoire de la commune de Tissabit (80 km Nord d'Adrar), ce projet, fruit d'un partenariat Algéro-français et premier du genre à échelle nationale, est une station expérimentale représentant un modèle réussi en matière d'exploitation de l'énergie éolienne pour la production de l'électricité.

Le projet en question vient renforcer huit autres stations implantées à travers le territoire de la wilaya d'Adrar en vue d'atteindre une production énergétique de 50 mégawatts, selon les responsables locaux du secteur de l'énergie. L'exploitation de l'énergie éolienne occupe une place importante dans le programme national des énergies renouvelables. Le directeur de l'unité de développement de la recherche en énergies renouvelables en Milieu Saharien d'Adrar a souligné que l'énergie éolienne contribue à hauteur de 5 gigawatts sur les 22 gigawatts prévus par le programme.

Les turbines utilisées dans ce parc sont de type « G52/850/50-60Hz » fournies par le constructeur espagnol GAMESA, équipées par des générateurs asynchrones à double alimentation (GADA) [14].



Figure.I.4 : Les éoliennes de Kabertène

I.4 .Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est principalement une forme d'énergie qui est respectueuse de l'environnement :

- L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable qui ne nécessite pas de carburant et ne produit pas de gaz à effet de serre(CO_2) ou de déchets toxiques.
- Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles sans affecter l'agriculture, et les propriétaires fonciers peuvent recevoir des paiements pour l'utilisation de leur terrain.
- L'énergie éolienne suit la demande d'électricité, ce qui garantit une sécurité d'approvisionnement et peut réduire les coûts d'électricité.
- Les éoliennes contribuent également au développement local et peuvent coexister avec d'autres activités.
- Les parcs éoliens sont rapidement construits et peuvent être démantelés pour remettre le site en état.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable; c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [15].

CHAPITRE I GENERALITES SUR LES ENERGIESRENOUVELABLES

- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles [15].
- L'énergie éolienne n'est pas une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie [15].
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [15].

Par ailleurs, l'énergie éolienne présente des avantages économiques indéniables :

- Le prix de revient des éoliennes a également diminué depuis 2011, ce qui les rend plus abordables.
- L'énergie éolienne répond aux besoins énergétiques locaux, réduisant les pertes liées au transport à longue distance, tout en stimulant l'économie des zones rurales.
- Parmi les énergies renouvelables, l'énergie éolienne est la moins coûteuse.

L'énergie éolienne a également quelques inconvénients [16]:

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale, la solution serait de coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïques.
- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit (que l'on remarque essentiellement avec des éoliennes importées d'Asie, problème d'interférences électromagnétiques pour des éoliennes bas de gamme.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.
- Pas d'aide ou de crédit d'impôt en 2023 (a été supprimé par la nouvelle réglementation de fin 2015).

I.5 .Gisement Eolien en Algérie

Comme de nombreux autres pays, l'Algérie s'efforce de se développer dans le domaine des énergies renouvelables, en mettant particulièrement l'accent sur l'énergie éolienne, tout en reconnaissant l'importance des études spécifiquement dédiées au

contexte algérien, malgré la prévalence de l'énergie solaire. Ainsi, une étude préliminaire a été réalisée pour comprendre l'évolution saisonnière et les caractéristiques des vents en Algérie. Cette présentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec des bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. La seconde est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers les pays [17].

L'Algérie dispose d'un potentiel éolien considérable, qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, notamment dans le sud où les vitesses de vent sont élevées, dépassant souvent 4 m/s (et atteignant 6 m/s dans la région de Tindouf) et atteignant jusqu'à 7 m/s dans la région d'Adrar, comme illustré dans la figure I.5.

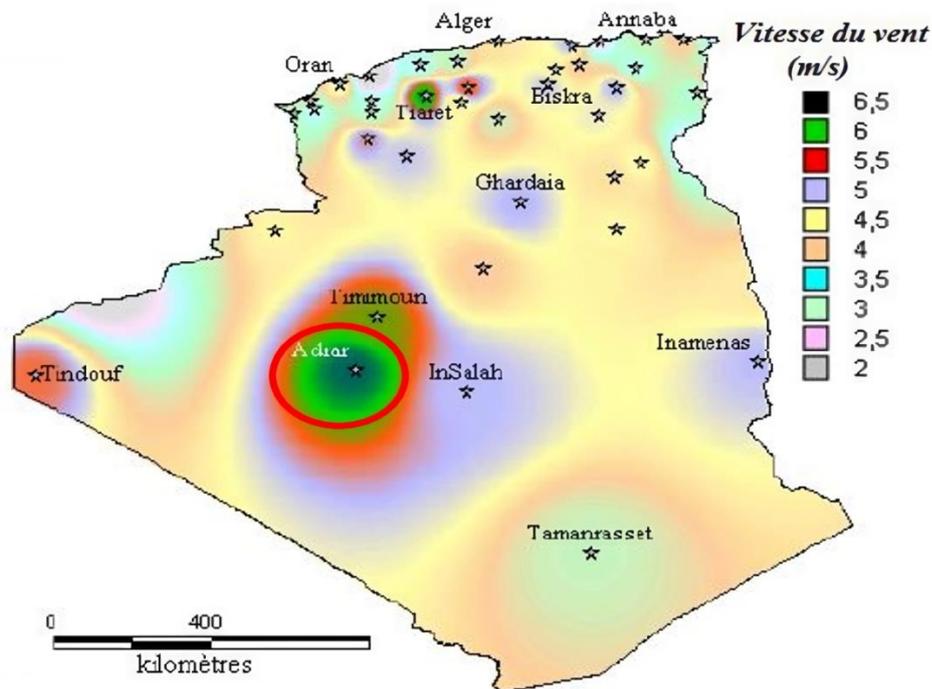


Figure I.5 : Cartographie des grandes régions de vent en Algérie

Cette carte est présente les zones les plus ventées pour installer des parcs éoliens qui permet d'alimenter des régions isolées. La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW à Adrar sud-ouest), a été confiée jeudi 21/01/2010 au groupe français VERGNET. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'engineering de l'électricité et du gaz (CEEG), filiale du groupe SONELGAZ [18].

La carte suivante représentée montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-ouest, avec des vitesses

supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. La première expérience en énergie renouvelable utilisé pour le pompage d'eau avec un éolien en Afrique a été effectué a Adrar l'an 1957 au ksar ouled Aïssa, pour l'irrigation de 50 HEC, ce système éolien a été saboté en 1962 à la sortie des français de l'Algérie, L'Algérie à un régime de vent modéré (2 à 9 m/s, selon carte des vents. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux et la Sahara. Le potentiel énergétique est énorme sachant que les régions du sud d'Algérie se trouvent dans un couloir de vent de 6 m/s. En juillet 2014, dans le cadre de la première phase du programme de développement des ENR, l'Algérie a inauguré sa première ferme éolienne de 10 MW. Cependant, l'éolien reste peu développé en Algérie, où le potentiel est relativement faible. C'est pour cette raison que la part de l'éolien dans le nouveau mix énergétique prévu pour 2020 demeure faible [19].

I.6 .Conclusion

En conclusion, les énergies renouvelables occupent une place croissante et essentielle dans le domaine de la production d'énergie. Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie éolienne qui constitue le principal de notre travail, se distingue par son potentiel significatif, notamment dans les régions propices à l'exploitation des vents. L'Algérie est résolument engagée dans la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problèmes de préservation des ressources énergétiques fossiles. Il est crucial de mener des études techniques et scientifiques approfondies pour exploiter pleinement le potentiel des régions propices à l'énergie éolienne. La collecte de données précises sur les caractéristiques des vents est essentielle pour garantir des installations éoliennes efficaces et optimiser la production d'énergie.

CHAPITRE II
ETAT DE L'ART SUR LES
AEROGENERATEUR

II.1 .Introduction

Un aérogénérateur, également connue sous le nom d'une éolienne, est un dispositif qui a pour fonction de transformer l'énergie cinétique du vent, qui est un fluide en mouvement, en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission. Cette énergie mécanique est ensuite convertie en énergie électrique par le biais d'une génératrice. L'ensemble de ces éléments est appelé Wind Energy Conversion System (WECS) en anglais, comme représenté dans la (Figure II.1). Chacun des éléments qui composent l'éolienne est conçu de manière à optimiser la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique [20] [9].

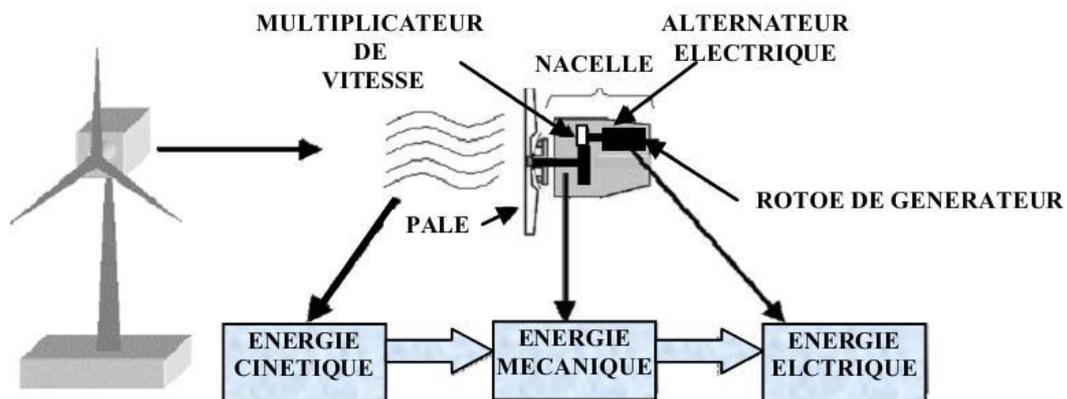


Figure.II.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

Pour mieux expliquer la conversion d'énergie éolienne se déroule en deux parties distinctes. La première partie concerne les turbines, qui ont pour rôle d'extraire une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la transformer en énergie mécanique. Cette énergie mécanique est ensuite transmise à l'arbre de transmission, qui la transmet à la génératrice. La deuxième partie de la conversion d'énergie se produit au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique de l'arbre de transmission et la convertit en énergie électrique. Cette énergie électrique est ensuite transmise aux réseaux électriques pour alimenter les consommateurs en électricité.

II.2 .L'énergie de vent

Le vent est généré par les différences de température résultant de la variation de l'énergie solaire absorbée à travers la Terre. En raison de sa forme ronde, l'équateur et les pôles nord et sud reçoivent des quantités différentes de rayonnement solaire. En conséquence, une quantité d'énergie plus importante est absorbée à l'équateur par rapport aux pôles. Cette disparité de chaleur crée des variations de température entre ces

deux points, ce qui entraîne des différences de densité de l'air. Ces différences de densité poussent l'air à se déplacer verticalement et horizontalement, formant ainsi des courants thermiques à travers l'atmosphère. Par conséquent, l'atmosphère peut être considérée comme une "machine thermique" qui produit des mouvements d'air, c'est-à-dire le vent [21].

Les courants d'air circulent entre les zones de basse pression et de haute pression. Jusqu'à présent, les éoliennes ont été utilisées pour exploiter les vents jusqu'à une altitude de 211 mètres au-dessus du sol. Les éoliennes sont capables de produire de l'électricité dans une plage de vitesses de vent allant de 3 m/s à 30 m/s. Il existe également des turbines éoliennes spécialement conçues pour fonctionner à des vitesses de vent inférieures ou supérieures à cette plage. Cependant, il est important de noter que les éoliennes ne peuvent pas être utilisées dans les zones d'ouragan, où les tornades et les tempêtes génèrent des vents extrêmement puissants et imprévisibles, susceptibles de causer de graves dommages aux turbines éoliennes [22].

II.2.1 Direction et vitesse du vent

Le vent, en principe, se déplace des zones de haute pression vers les zones de basse pression. Toutefois, aux latitudes moyennes et élevées, la rotation de la Terre modifie la direction du vent. En conséquence, le vent devient parallèle aux lignes isobares (les lignes reliant les points de pression égale) au lieu d'être perpendiculaire à celles-ci. Cette déviation est connue sous le nom de force de Coriolis et est causée par l'effet combiné de la rotation de la Terre et du déplacement horizontal de l'air. Cette force de Coriolis influence la trajectoire du vent, donnant lieu à des modèles de vents caractéristiques dans les régions soumises à cette rotation, tels que les vents d'ouest dominants aux latitudes moyennes (Figure II.2) [23],[14].



Figure.II.2 : Vents locaux à travers le Monde

Dans l'hémisphère nord, les vents circulent dans le sens antihoraire autour des régions cycloniques et dans le sens horaire autour des régions de haute pression. Dans l'hémisphère sud, les tendances sont inversées par rapport à leurs prédécesseurs (Figure II.2).

En réalité, la mesure du vent est réalisée à l'aide d'un anémomètre, qui est souvent accompagné d'une girouette. Ces instruments permettent de mesurer les deux grandeurs fondamentales du vent : sa vitesse et sa direction (voir figure II.3). Il existe plusieurs types d'anémomètres, regroupés en deux catégories principales : les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression. Les anémomètres à rotation utilisent le mouvement de rotation d'une partie de l'instrument pour mesurer la vitesse du vent, tandis que les anémomètres à pression se basent sur la différence de pression entre différentes surfaces exposées au vent pour estimer sa vitesse. Ces différents types d'anémomètres permettent d'obtenir des mesures précises du vent dans diverses applications.



(a)



(b)



(c)

Figure II.3 : Appareils utilisés pour la mesure du vent : a- Anémomètre à rotation,
b- Anémomètre à pression, c- Girouette

Les signaux électroniques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de contrôle-commande de l'éolienne. Lorsque la vitesse du vent atteint environ 5 m/s, ces signaux sont utilisés pour démarrer l'éolienne. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent dépasse 25 m/s. Cette fonction de sécurité est mise en place pour protéger l'éolienne des vents violents qui pourraient causer des dommages. Grâce à ces seuils de démarrage et d'arrêt, le système de contrôle-commande garantit le bon fonctionnement de l'éolienne en adaptant sa production d'électricité aux conditions du vent [14].

II.2.2 .L'énergie disponible dans le vent

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. Lorsqu'une masse d'air, représentée par m , se déplace à une vitesse v , elle possède une énergie cinétique qui peut être calculée de la manière suivante :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{II.1})$$

Si, pendant l'unité de temps, toute l'énergie cinétique de cette masse d'air peut être entièrement captée à l'aide d'une hélice qui balaye une surface S , perpendiculaire à la direction du vent, alors la puissance instantanée fournie serait donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2}\rho Sv^3 \quad (\text{II.2})$$

D'où :

S : la surface d'aire balayée par les pales (m^2);

ρ : la masse volumique de l'air, en général elle est égale $1.225kg/m^3$ à la pression atmosphérique à $15^\circ C$;

v : vitesse du vent (m/s).

Cependant, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité par le dispositif de conversion (aérogénérateur), à cause de la vitesse non nulle des masses d'air derrière lui [24].

II.2.3 .Notions aérodynamiques « théorie de Betz »

Loi de Betz :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure II.4 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{v_1+v_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho S(V_1+V_2)}{2} \quad (II.3)$$

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

$$P_m = \frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (II.4)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (II.3):

$$P_m = \frac{\rho S(v_1+v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (II.5)$$

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

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (II.6)$$

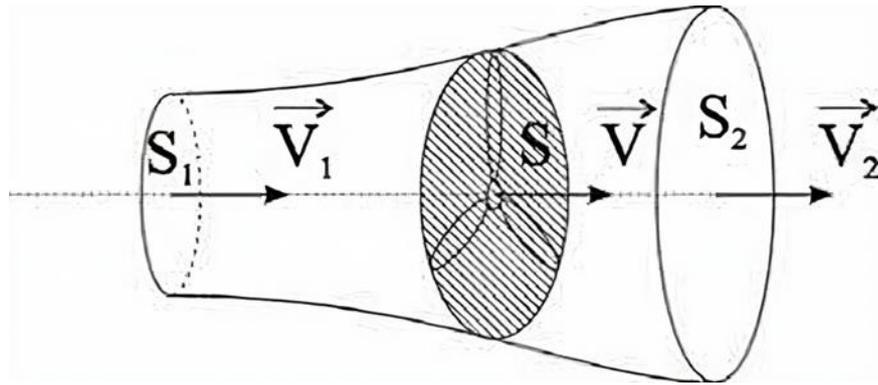


Figure II.4 : Tube de courant autour d'une éolienne

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{v_1}{v_2}\right)\left(1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{II.7})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure II.5), on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [25] [26].

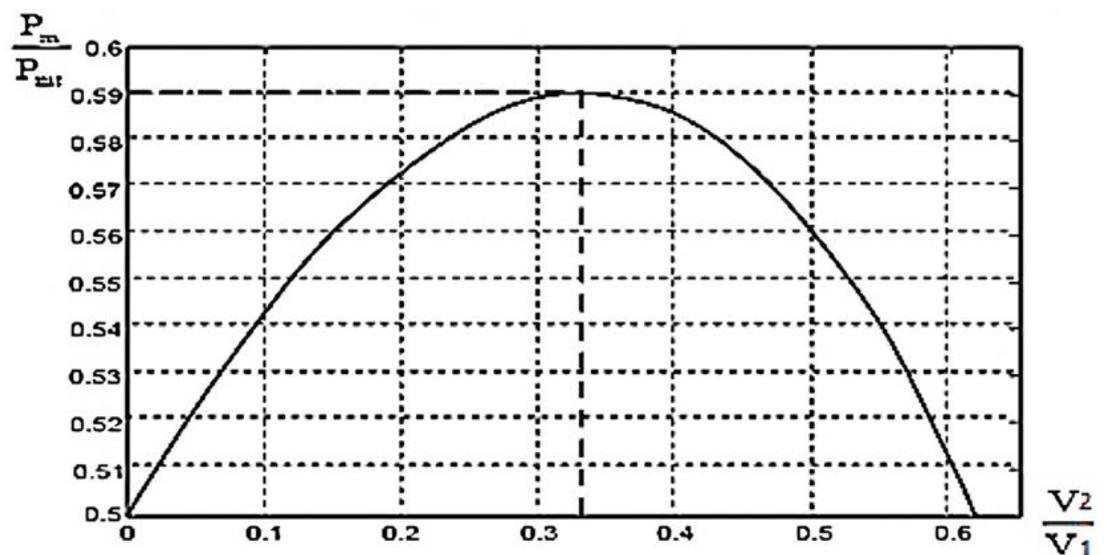


Figure II.5 : Coefficient de puissance

II.3 .Différents types d'aérogénérateurs

Les génératrices éoliennes peuvent être regroupées selon différentes catégories, et un classement est proposé comme suit :

- La nature du convertisseur électromécanique (machine synchrone, machine asynchrone, machine à courant continu).
- Le type de capteur.
- Le mode de régulation (pitch ou stall régulation).
- La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe).
- Le mode de fonctionnement (vitesse constante ou variable) [27].

II.3.1 .Selon axe

II.3.1.1 Les éoliennes à axe horizontal:

Les éoliennes à axe horizontal, communément appelées HAWT (Horizontal Axis Wind Turbines), sont les plus couramment utilisées et prédominantes dans le domaine de l'énergie éolienne aujourd'hui. Elles sont dotées d'une seule pale, parfois bipale, tripale ou multipale, et sont placées sur le sol ou éloignées de 10 à 50 km des côtes (dans le cas de l'éolien offshore). Elles sont capables de délivrer une grande puissance, allant de 600 kW à plusieurs MW. Leur fonctionnement est basé sur l'exploitation de l'effet de portance exercé sur les pales pour générer un couple mécanique. Une éolienne à axe horizontal peut être de type à vitesse variable, ce qui permet d'optimiser le rendement aérodynamique en fonction de la vitesse du vent, ou de type à vitesse constante. De même, elle peut être de type à pitch variable ou constant, le pitch correspondant à l'angle de calage des pales par rapport au flux d'air.

On distingue généralement deux catégories d'aérogénérateurs : ceux qui sont installés sur terre, appelés « on shore », et ceux qui sont situés à la surface de la mer, appelés « offshore ». Ces termes américains sont utilisés pour différencier la localisation des éoliennes, soit sur terre soit en mer [28].



(a)

(b)

(c)

Figure II.6 : Les éoliennes à axe horizontal a- Voilure tripale, b- voilure bipale, c- moulin américain

Avantage des éoliennes à axe horizontal

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour.

Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

Inconvénients des éoliennes à axe horizontal

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

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 [29].

II.3.1.2 .Les éoliennes à axe vertical : (VAWT)

Vertical Axis Wind Turbine, Est une éolienne dont l'axe de rotation est perpendiculaire au sol. Appeler aussi « panémons », leur développement est plus récent et accéléré pour des petites ou moyennes puissances ne nécessitent pas de dispositif d'orientation et sont adaptés avec tous les vents et pour l'utilisation domestique et dans le milieu urbain. Il existe trois grands types d'éoliennes verticales :

- L'éolienne Darrieus
- L'éolienne verticale Savonius
- L'éolienne à voilures tournantes

II.3.1.2.1 .L'éolienne Darrieus [30]:

- Dans le cas d'un modèle Darrieus, l'éolienne verticale peut subir une force venteuse qui dépasse les 220 km/h. Elle est donc idéale pour les habitations de bord de mer ou les zones sujettes aux vents violents.
- Moins encombrante qu'une éolienne horizontale, cette éolienne verticale est beaucoup moins bruyante. Elle trouve sa place sur le toit ou près d'une habitation.
- L'autre avantage est que le générateur électrique peut être disposé au pied de l'éolienne. Ceci offre plus de praticité pour l'entretien, les réparations ou autre.

II.3.1.2.2 L'éolienne verticale Savonius [30]:

- L'éolienne verticale Savonius peut être activée par des vents faibles, ce qui n'est pas forcément le cas du modèle Darrieus. De plus, son fonctionnement ne dépend pas de la direction des vents, elle peut donc générer du courant, quel que soit le sens dans lequel souffle le vent. Cette éolienne verticale est donc un excellent choix pour les zones qui ne sont pas trop venteuses.
- Offrant un esthétisme qui séduit, elle peut être placée sur un toit. Elle est discrète et peu encombrante, ce qui n'est pas vraiment le cas avec un modèle horizontal.

II.3.1.2.3 .L'éolienne à voilures tournantes [30] :

- Le rendement qu'offre l'éolienne à voilures tournantes est un avantage considérable. Suivant constamment l'orientation du vent, l'éolienne verticale s'adapte aux conditions venteuses. Elle peut donc fonctionner en permanence, à condition qu'il y ait du vent.

- Ici aussi, les bruits générés par l'éolienne verticale sont considérablement plus faibles que ceux émis par un modèle horizontal. Elle peut donc être installée sur une toiture.

II.3.2 .Selon vitesse

II.3.2.1 .Les éoliennes à vitesse fixe

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (Figure II.7). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control). La machine fonctionne alors en hyper synchronisme c'est-à-dire à une vitesse $(\Omega_s / 1-g)$ avec Ω_s vitesse de synchronisme et g le glissement, avec $g \leq 0$ pour un fonctionnement en génératrice avec une convention moteur ($|g| \leq 1$). La rotation des pales par des actionneurs, hydrauliques ou électriques, permet l'augmentation de l'angle de calage. La puissance peut alors être limitée à la puissance nominale de la génératrice. Lors de fort vent, cette technique permet la mise en drapeau des pales ($\beta = 90^\circ$) [31].

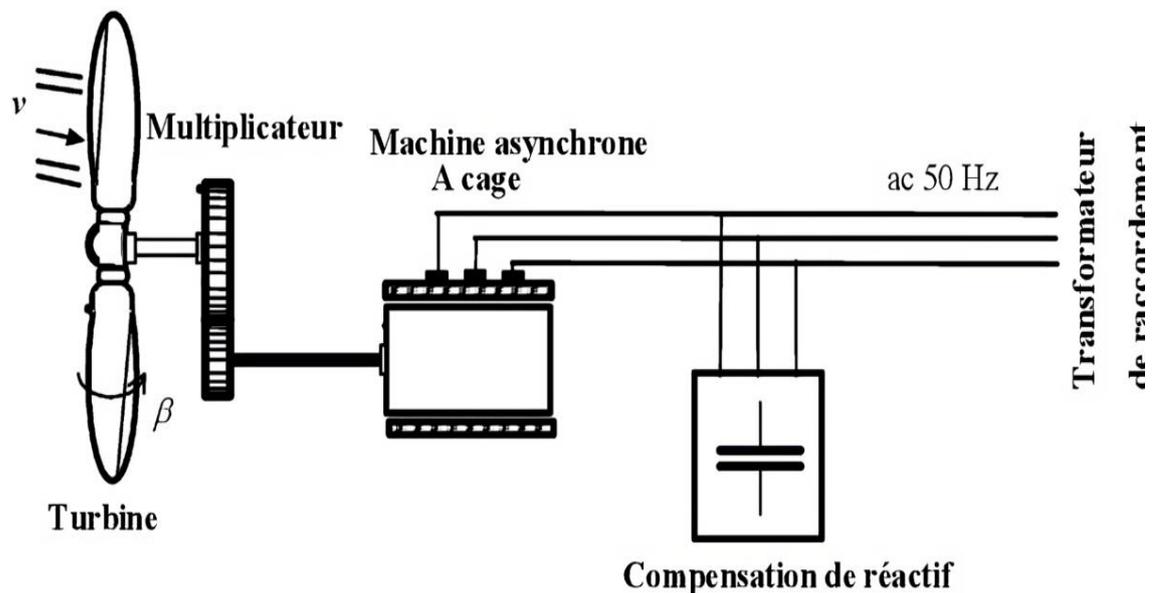


Figure II.7 : Éolienne à vitesse fixe

II.3.2.2 .Les éoliennes à vitesse variables :

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal d'opérer la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent. Selon la référence, une éolienne à vitesse variable peut aller chercher de 8 à 15 % plus d'énergie dans le vent annuellement qu'une éolienne à vitesse fixe.

Dans ces systèmes, la vitesse mécanique de la turbine et la fréquence de la charge sont découplées. Pour obtenir ce découplage, on utilise une interface d'électronique de puissance. De cette manière la turbine tourne à vitesse variable, ajustée de manière optimale à tout instant à la vitesse du vent. Ils ont une majeure efficacité car ils parviennent à maximiser la capture d'énergie du vent disponible [31].

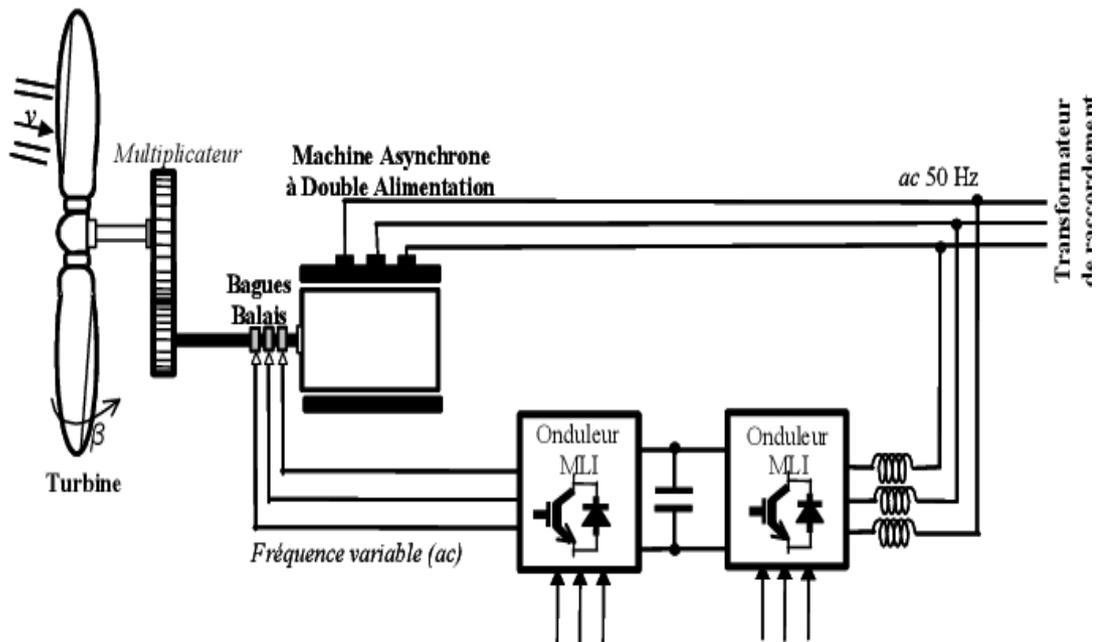


Figure II.8 : Eolienne à vitesse variable

II.4 . La constitution d'une éolienne à axe horizontal [32] [33] :

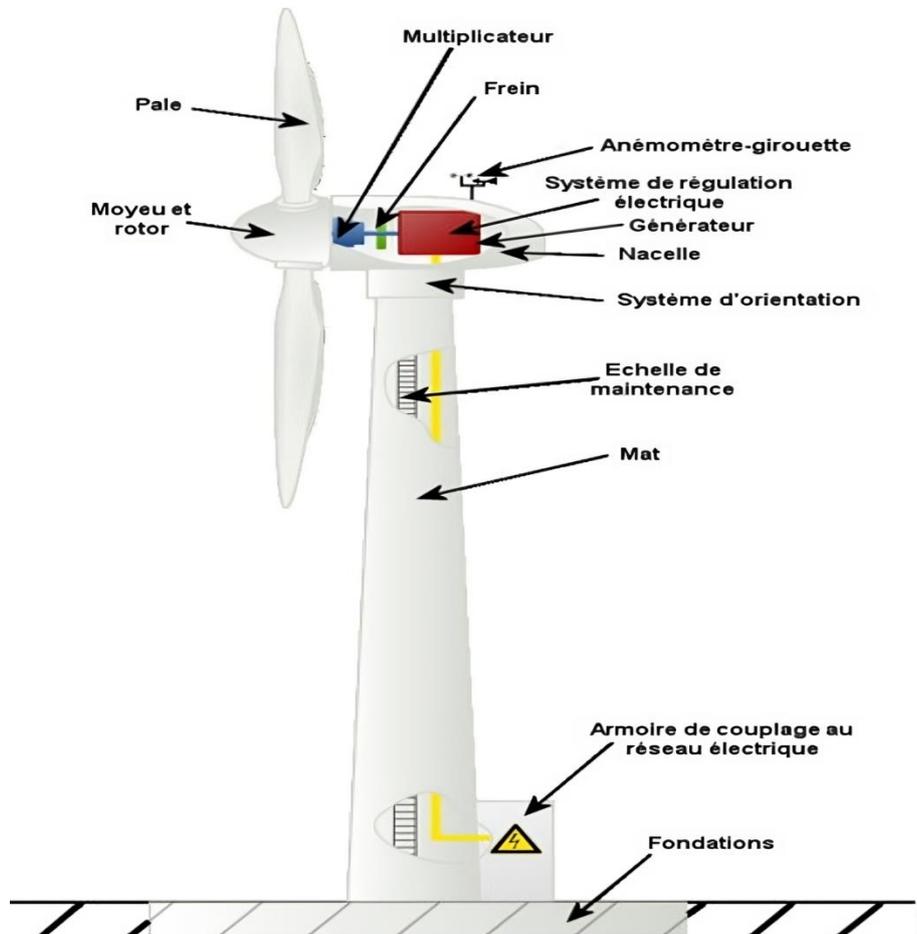


Figure. II.9 : Constitution d'une éolienne tripale

1-La fondation : c'est généralement conçue en béton armé. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne.

2-La tour (le mat) : la pièce la plus imposante de l'éolienne est une gigantesque structure d'acier ou de béton qui supporte l'éolienne, y amène les raccords nécessaires et permet d'accéder à la nacelle. Sa hauteur peut atteindre plus de 100 mètres, soit la hauteur d'un édifice de 20 étages. Elle maintient donc la nacelle en altitude, là où le vent est le plus constant et le plus fort.

3- Pignon d'entraînement de la nacelle : il s'agit de courroie de transmissions.

4-Roue dentée liée à la tour : c'est un disque d'acier comportant des dents à sa périphérie.

5-Le système de direction : est un moteur qui veille à ce que l'éolienne soit toujours placée face au vent. Il est commandé par le système de contrôle, un ordinateur qui surveille en permanence l'état de la machine et celui de son environnement et à l'aide de la girouette qui indique la direction du vent et l'anémomètre qui en montre la vitesse.

6- La nacelle : contient les principales composantes d'une éolienne, comme le multiplicateur et la génératrice. À l'avant de la nacelle, nous trouvons le rotor de l'éolienne, c'est-à-dire les pales et le moyeu.

7-L'armoire de couplage au réseau électrique : transforme la tension afin de rendre l'énergie produite par l'éolienne compatible à celle du réseau. Le convertisseur synchronise l'électricité produite par l'éolienne à celle présente sur le réseau.

8- La girouette : indique la direction du vent et permet à la nacelle de rester orientée face au vent.

9-L'anémomètre : mesure la vitesse du vent et permet d'indiquer le moment de mettre en route l'éolienne ou de l'arrêter.

10-L'alternateur : machine électromécanique fournissant des tensions alternatives de fréquence proportionnelle à leur vitesse de rotation.

11-L'arbre rapide : tourne à environ 1 800 tours par minute et entraîne la génératrice électrique. Il est muni d'un frein mécanique à disque que l'on peut actionner en cas d'urgence, soit lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

12-Le frein : permet d'immobiliser le rotor de l'éolienne lorsque la vitesse du vent est trop élevée, en cas d'urgence ou lors des travaux d'entretien.

13-Le multiplicateur : relie l'arbre lent à l'arbre rapide en augmentant au passage de plus de 100 fois la vitesse de rotation. La génératrice : est l'endroit où l'énergie cinétique (du mouvement) se transforme en énergie électrique. L'arbre lent : son rôle est de relié le moyeu du rotor au multiplicateur.

14-Le rotor : (les pales et le moyeu). Il tourne assez lentement, environ 16 tours par minute. L'arbre contient des tuyaux pour le système hydraulique permettant l'opération des freins en cas de vents violents.

15- L'arbre lent ou arbre primaire relie au multiplicateur qui tourne lentement.

16-Le moyeu : est le point de raccordement entre les pales et l'arbre lent de la machine.

18-Un réseau électrique c'est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique.

17-Les pales : les pales du rotor captent le vent et transfèrent sa puissance au moyeu du rotor. Chaque pale d'une éolienne de 1.5 MW mesure environ 30 à 35 m de long et sa conception ressemble beaucoup à celle des ailes d'un avion.

19-Système de régulation du pas des pales : Le principe est de modifier l'angle des pales par rapport au vent de manière à diminuer la vitesse de rotation des pales par une moindre prise au vent.

20- Groupe hydraulique : Le groupe hydraulique central fournit la pression requise pour les composants hydrauliques comme des freins, le système pitch, les grues de service et le rotor lock.

II.5 .Topologies des génératrices éoliennes

Les choix de topologie et de type de génératrice pour la production d'énergie éolienne dépendent de plusieurs critères tels que la vitesse, la puissance et la connexion au réseau. Les éoliennes peuvent être équipées de deux types de générateurs, soit asynchrones soit synchrones.

II.5.1 .Éoliennes utilisant les machines asynchrones

- Générateur asynchrone à double alimentation (GADA)
- Générateur asynchrone à cage d'écureuil (SCIG)

II.5.2 .Éoliennes utilisant les machines synchrones

- La génératrice synchrone à rotor bobiné
- La génératrice synchrone à aimant permanent

II.6 .La machine doublement alimentée :

Un intérêt sans cesse croissant est de plus en plus accordé à la machine asynchrone au détriment des autres machines. En effet, cette machine est devenue le choix par excellence de la majorité des industriels, grâce à son prix et sa robustesse. Cependant, sa dynamique est extrêmement complexe en raison des interactions entre le

stator et le rotor, ce qui rend insuffisante la modélisation basée sur la théorie du champ tournant et l'utilisation de schémas équivalents pour décrire son comportement dynamique.

II.6.1 . Structure de la MADA

Une machine asynchrone à double alimentation (MADA) est composée d'un stator immobile qui possède trois enroulements identiques répartis de manière symétrique dans les encoches du stator. Elle est également équipée d'un rotor qui tourne autour de l'axe de la machine et qui est équipé de trois enroulements identiques et symétriques, couplés en étoile et reliés à un collecteur constitué de trois ou quatre bagues, comme illustré dans la figure II.10.

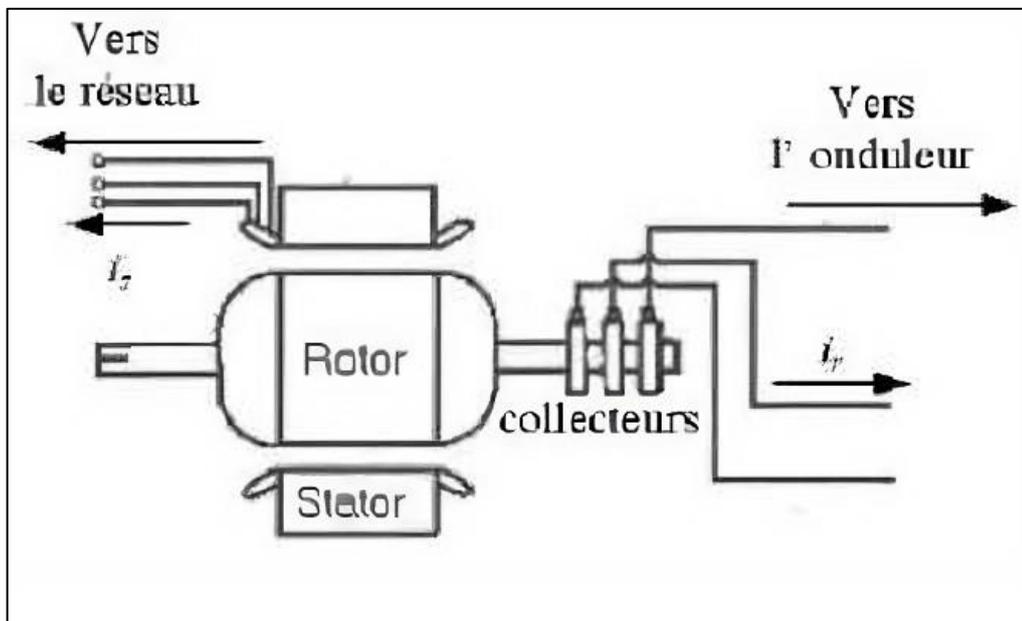


Figure II.10 : Structure d'une machine asynchrone à double alimentation

Dans un système de machine asynchrone, les trois enroulements rotoriques sont connectés aux bagues du rotor via des balais glissants, qui permettent la transmission d'une deuxième alimentation par le rotor grâce à un convertisseur d'électronique de puissance. Selon le mode de fonctionnement, l'ensemble comprenant la machine asynchrone, le convertisseur et éventuellement un transformateur est désigné sous le nom de cascade hypo ou hyper synchrone.

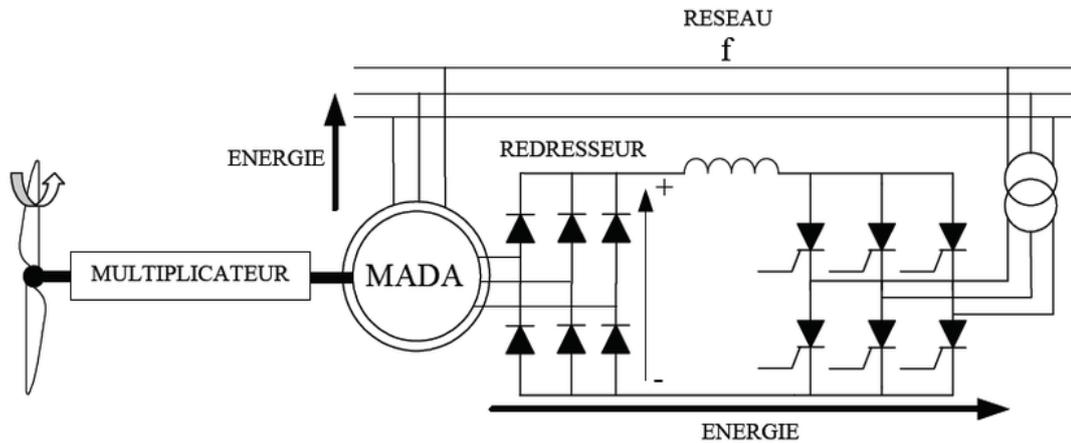


Figure II.11 : Cascade d'une machine asynchrone à double alimentation

II.6.2 .Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une machine à double alimentation repose sur l'utilisation de deux sources d'alimentation électrique distinctes pour fournir de l'énergie à la machine. Cela permet d'assurer une alimentation continue même en cas de défaillance ou d'interruption d'une des sources. Lorsque les deux sources d'alimentation sont actives, la machine utilise une méthode de couplage pour combiner les deux flux d'énergie. Cela peut se faire par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique qui synchronise les tensions et les fréquences des deux sources pour les rendre compatibles. En cas de défaillance d'une des sources d'alimentation, la machine bascule automatiquement sur l'autre source en utilisant un système de commutation. Cette transition se fait généralement de manière transparente, sans interruption notable de la fourniture d'énergie. Le principal avantage d'une machine à double alimentation est sa capacité à assurer une alimentation continue et fiable, même en cas de problèmes sur l'une des sources d'alimentation. Cela peut être particulièrement important dans des applications critiques où toute interruption de l'alimentation pourrait entraîner des conséquences graves, telles que les centrales électriques, les systèmes de secours et les industries sensibles. En résumé, le principe de fonctionnement d'une machine à double alimentation repose sur l'utilisation de deux sources d'alimentation électrique distinctes et un système de couplage et de commutation pour assurer une alimentation continue et fiable.

II.6.3 .Modes de fonctionnement de la MADA

II.6.3.1 .Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

La figure II.12 montre que la puissance est fournie au réseau par le stator (P_s alimente le réseau). La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. 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 [37], [35], [36].

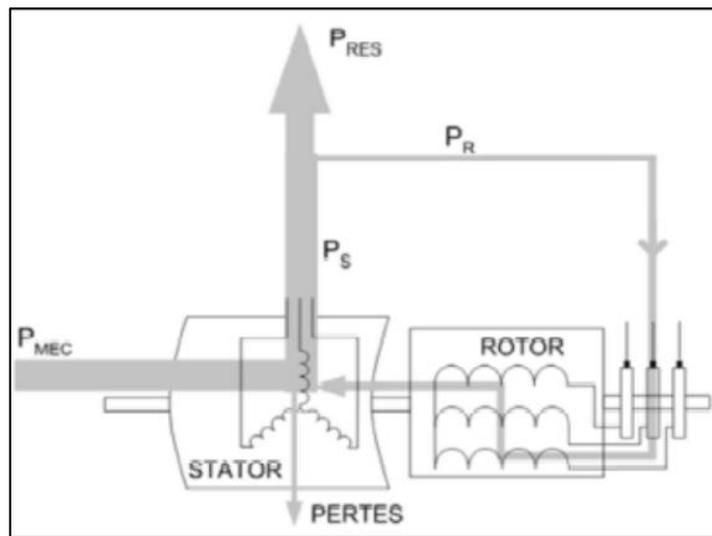


Figure II.12: fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

II.6.3.2 .Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

La figure II.13 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 [37], [35], [36].

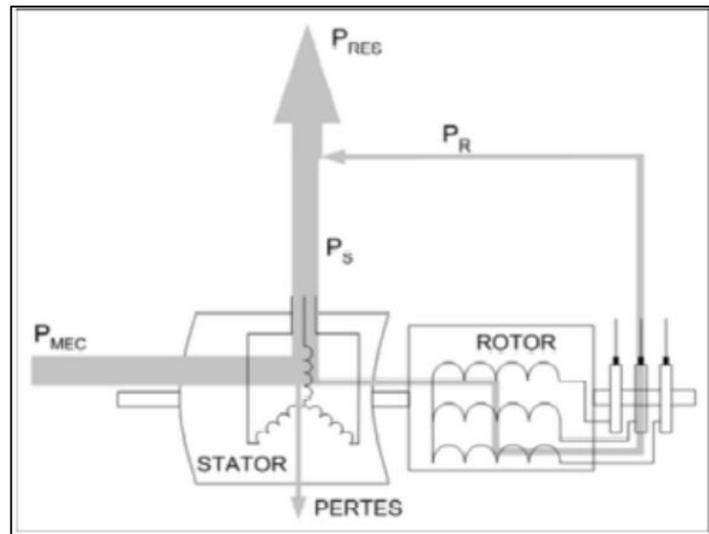


Figure II.13: fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

II.6.3.3 .Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

La figure II.14 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 joules dans le rotor [37], [36].

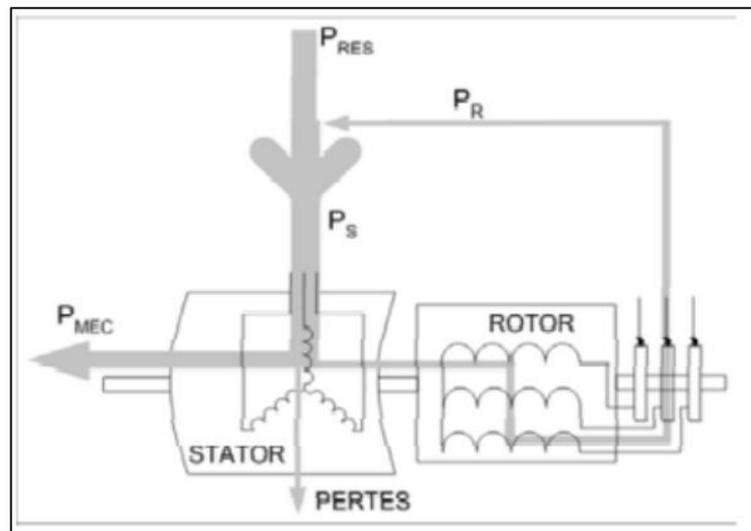


Figure II.14: fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

II.6.3.4 .Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

La figure II.15 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 [37].

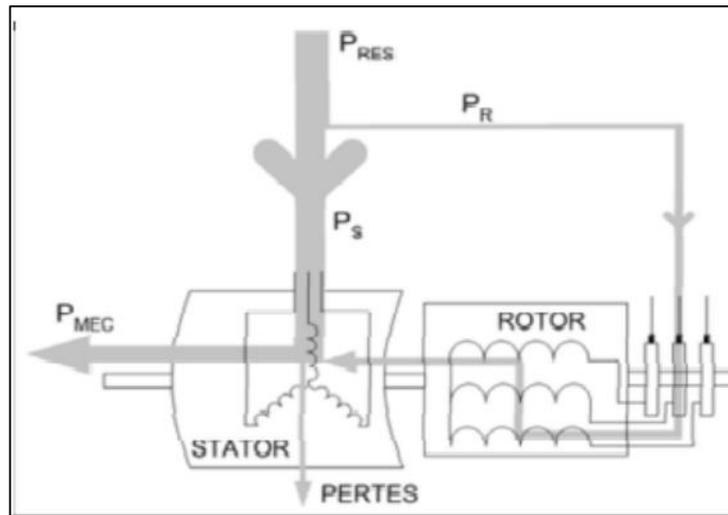


Figure II.15: fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

II.6.4 .Domaines d'application de la MADA

La première application importante de la MADA est le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage d'écureuil, La machine asynchrone à double alimentation peut être utilisée dans plusieurs applications industrielles telles que [38]:

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- Les applications de levage, ascenseurs, monte-charge etc... sont visées.

La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée :

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions,
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable,
- Éoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable,
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

Une troisième application de la MADA consiste à faire fonctionner celle-ci en moteur présente de nombreux avantages :

- La commande vectorielle permet une bonne maîtrise du flux et du couple sur toute la plage de variation et confère une dynamique particulièrement élevée.
- Le système se prête très bien aux applications nécessitant d'excellentes propriétés de freinage puisqu'il suffit d'inverser le sens du champ tournant au rotor.
- Les fréquences d'alimentation sont partagées entre le stator et le rotor, limitant ainsi la fréquence maximale de sortie requise par chaque convertisseur et les pertes fer de la machine.
- Les puissances traversant les convertisseurs sont également partagées entre stator et rotor évitant ainsi le surdimensionnement de ces convertisseurs.

Tel qu'il a été illustré dans la partie portant sur la conversion de l'énergie éolienne, il a été montré que la puissance produite par la turbine dépend de sa vitesse de rotation et de la vitesse du vent. Sachant que la cette dernière n'est guère constante dans la nature, une utilisation à vitesse variable est imposée pour positionner le fonctionnement sur le point optimale de production de la puissance La GADA devient la solution adaptée à ce genre d'application vu sa capacité à fonctionner dans une large gamme de vitesse .Elle est d'autant plus intéressante dans le cas où la puissance produite n'est pas écrêtée en atteignant la puissance nominale de la machine. Pour les éoliennes utilisant la GADA, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statique (convertisseur côté GADA et convertisseurs coté réseau) [39].

II.6.5 .Avantages et inconvénients de la MADA

II.6.5.1 .Avantage : Parmi ses nombreux avantages, nous citons [40] :

- Rendement élevé grâce à l'utilisation de convertisseurs électroniques de puissance.
- Contrôle précis de la vitesse grâce à la double alimentation et aux convertisseurs électroniques intégrés.
- Amélioration de la stabilité du système électrique global grâce à la fourniture de puissance active et réactive.
- Réduction de la taille et du poids grâce à l'utilisation de convertisseurs électroniques plutôt que de composants électromagnétiques volumineux.

- Coût de maintenance réduit en raison de la fiabilité et de la durabilité des composants électroniques utilisés.
- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants.
- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation.
- 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.

II.6.5.2 .Inconvénients

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage. Nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium, donnent maintenant un petit avantage à la MADA.

II.7 .Conclusion

En conclusion, le chapitre II offre une vision globale et approfondie de l'état de l'art sur les aérogénérateurs. Il met en évidence les avancées technologiques, l'importance de la conception et de l'ingénierie, ainsi que l'impact positif des éoliennes sur la transition énergétique. Ces connaissances sont essentielles pour comprendre les défis et les opportunités liés à l'utilisation de l'énergie éolienne et pour stimuler l'innovation dans ce domaine en constante évolution. A la base de plusieurs critères citées ci-dessus dans le présent chapitre, nous adoptons la structure du MADA machine asynchrone à double alimentation comme la génératrice de notre éolienne à étudier. La modélisation et la commande de le système éolienne est traitée dans le troisième chapitre.

CHAPITRE III

ETUDE ET MODELISATION DE LA CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE

III.1. Introduction

De nos jours, les éoliennes à vitesse variable sont plus couramment utilisées que les éoliennes à vitesse fixe, en particulier la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dans les unités de production à grande échelle. La MADA se distingue par sa capacité à fournir de la puissance active au réseau à la fois par le stator et le rotor.

Cette stratégie est mise en œuvre en ajoutant deux convertisseurs de puissance : un redresseur et un onduleur à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI). Nous modélisons ce système en reliant la turbine éolienne, afin de calculer le coefficient de puissance (C_p). Nous le connectons ensuite au système de contrôle pour former un système complet. De plus, nous expliquons l'intérêt du multiplicateur (ou boîte de vitesse) et de l'arbre de l'éolienne. Nous introduisons également la stratégie de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui permettent à l'éolienne de fonctionner toujours à une vitesse proche de sa vitesse nominale en fonction de la vitesse du vent. Enfin, nous modélisons la machine asynchrone en expliquant pourquoi il est nécessaire de changer de repère afin de simplifier les équations et de faciliter la réalisation des commandes [41].

III.2. Description de système

Le système éolien à vitesse variable étudié dans ce mémoire, basé sur une MADA, est illustré à la Figure III.1. La turbine, via un multiplicateur, entraîne la MADA, laquelle est raccordée au réseau électrique directement par le stator mais également au travers de convertisseurs statiques triphasés à IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) par le rotor.

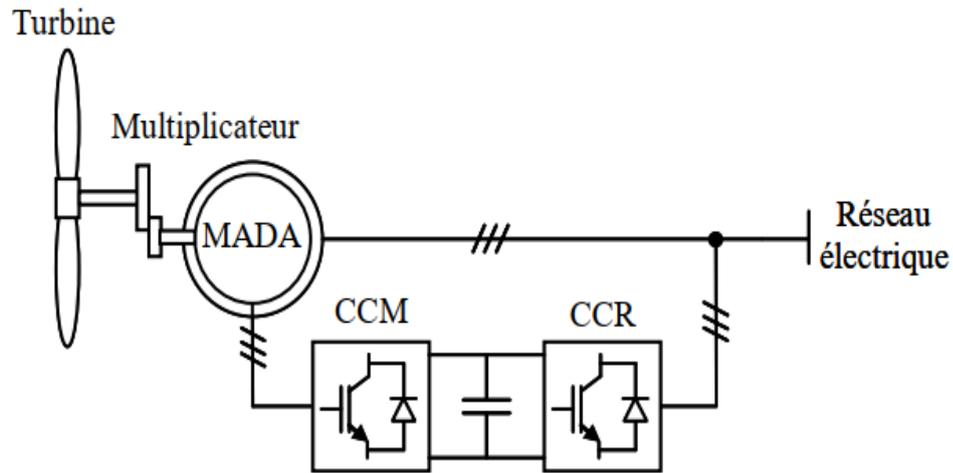


Figure III.1: Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

Un fonctionnement en mode hypo ou hyper synchrone est possible grâce à la bidirectionnalité des convertisseurs [Muller, 2002]. Le fonctionnement en mode hyper synchrone permet de transférer de l'énergie électrique du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau, ce qui confère au système éolien un rendement élevé [Data, 2002].

De plus, le facteur de puissance au point de raccordement de l'éolienne avec le réseau électrique peut également être imposé via le contrôle des puissances réactives dans les différentes commandes des convertisseurs. L'intérêt majeur de ce système éolien réside dans le fait que le CCM et le CCR, transférant la puissance de glissement et l'acheminant vers le réseau électrique, ne sont dimensionnés que pour une partie de la puissance nominale de la MADA. En effet, si nous considérons que la MADA fonctionne à puissance nominale pour un fonctionnement en mode hyper synchrone avec un glissement maximal égal à -30% , nous avons donc au maximum 25% de la puissance nominale de la machine transitant par les convertisseurs. Ceci permet de dimensionner les convertisseurs pour une puissance comprise entre 25 et 30% de la puissance nominale de la machine [Multon, 2004]. Le surcoût engendré par la

maintenance due à l'emploi d'un multiplicateur de vitesse et du système bagues/balais de la MADA est alors compensé par l'économie réalisée sur les convertisseurs comparé à un système éolien pour lequel les convertisseurs seraient dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice [42].

III.3. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne basée sur la GADA

Nous allons maintenant étudier la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique en modélisant les différents composants de la chaîne de conversion électromécanique d'une éolienne.

III.3.1. Modèle de vitesse du vent

La vitesse du vent est un facteur crucial dans la production d'électricité éolienne, car elle détermine la rentabilité de la chaîne éolienne. Les caractéristiques dynamiques du vent sont essentielles pour l'étude du système de conversion d'énergie. La puissance éolienne, dans des conditions optimales, est proportionnelle au cube de la vitesse du vent [14]. Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent La Figure.III.2 représente le profil du vent simulé, comme suite :

$$V(t)=8.2 + 2 \sin(\omega t) - 1.75 \sin(3\omega t) + 1.5 \sin(5\omega t) - 1.25 \sin(10\omega t) + s \sin(30\omega t) + 0.5 \sin(50\omega t) + 0.25 \sin(100\omega t) \quad (\text{III.1}) [14]$$

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

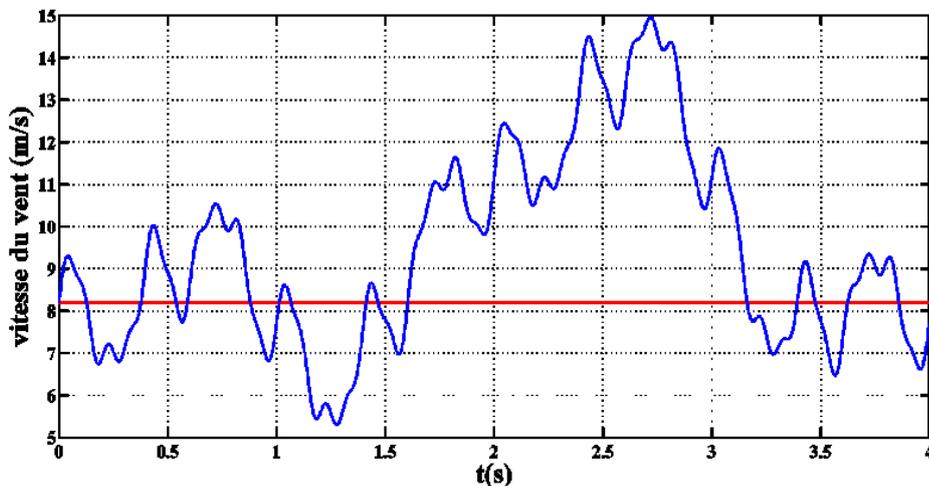


Figure III.2 : La simulation du profil de la vitesse du vent

III.3.2. Modélisation de la turbine éolienne

Pour modéliser la turbine, nous allons faire plusieurs hypothèses simplificatrices qui sont généralement prises en compte. Par conséquent, nous supposons que :

- ✓ Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc la même inertie, la même élasticité et le même coefficient de frottement par rapport à l'air ;
- ✓ Les trois pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support ;
- ✓ La répartition de la vitesse du vent est uniforme sur toutes les pales, et donc une égalité de toutes les forces de poussée ;
- ✓ Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est négligeable ;
- ✓ La vitesse de la turbine étant très faible, donc les pertes par frottement de la turbine sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

Nous avons vu la relation qui exprime la puissance cinétique du vent :

$$P_{v=\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{III.2})$$

Où :

V : est la vitesse du vent (m/s) ;

ρ : est la masse volumique de l'air ;

R : est la longueur d'une pale ou le rayon de l'aérogénérateur (m).

Étant donné que l'éolienne ne peut récupérer qu'une fraction de la puissance du vent, nous pouvons exprimer la puissance aérodynamique qui apparaît au niveau du rotor de la turbine de la manière suivante :

$$P_t = C_p P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{III.3})$$

Où :

$C_p(\lambda)$ est le coefficient de puissance ou de performance qui représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne.

La vitesse relative λ est définie comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales ($\Omega_t R$) et la vitesse du vent comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V} \quad (\text{III.4})$$

Où :

Ω_t (rad/s) est la vitesse mécanique de l'arbre de la turbine.

Le couple exercé par le vent sur l'arbre de la turbine (couple mécanique à la sortie de la turbine) est défini par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V^2 C_c(\lambda, \beta) \quad (\text{III.5})$$

D'où C_c représente le coefficient du couple :

$$C_c = \frac{C_p}{\lambda} \quad (\text{III.6})$$

a) Modèle analytique du coefficient de puissance :

Nous utiliserons une expression approchée de manière empirique pour une éolienne utilisant la génératrice de type MADA, est défini comme suit :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \exp\left(\frac{-21}{\lambda_i}\right) + 0.0068\lambda$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{III.7})$$

La figure III.3 montre les résultats de simulation sous MATLAB/SIMULINK de l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse relative λ pour quelques angles de calage β .

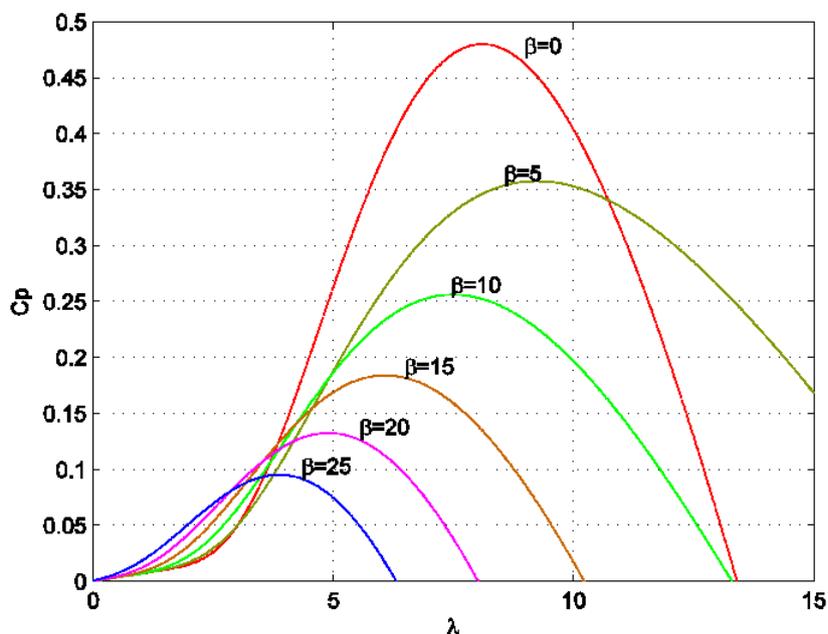


Figure III.3 : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β

Les caractéristiques de la puissance aérodynamique optimale de notre aérogénérateur s'exprime par :

$$P_t^{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p^{max}(\lambda_{opt}, \beta_{opt}) \quad (III.8)$$

La relation (III.8) montre qu'une petite variation de la vitesse du vent V induit une grande variation de la puissance générée P_t . La figure III.4 présente les résultats de simulation de cette caractéristique pour une éolienne de 1.5MW à travers la courbe d'extraction de la puissance aérodynamique de la turbine en fonction de leur vitesse de rotation pour les différentes vitesses du vent.

On remarque que pour chaque vitesse du vent, on a une seule vitesse optimale de fonctionnement de la turbine éolienne et l'augmentation de la vitesse optimale avec l'augmentation de la vitesse du vent.

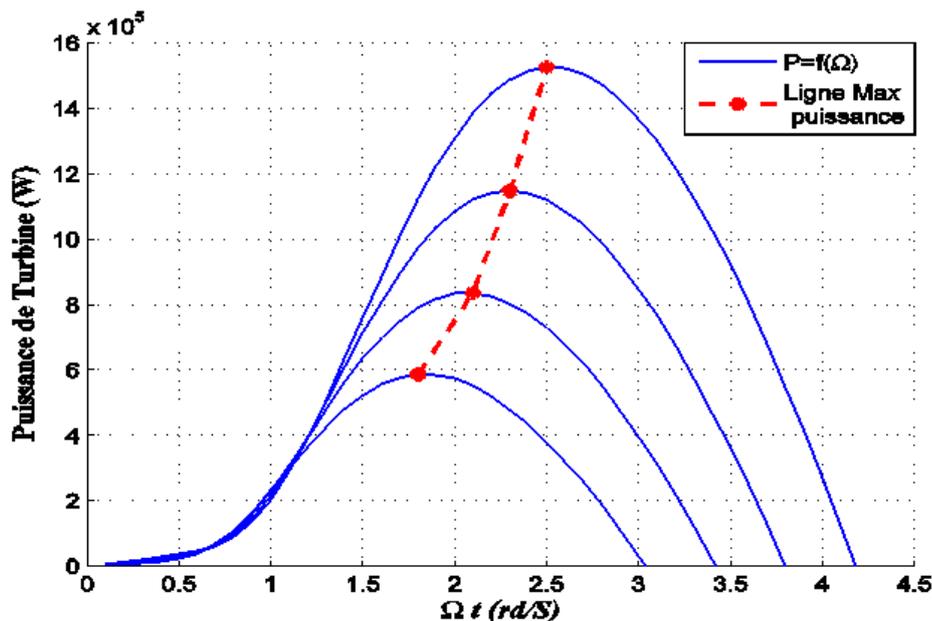


Figure III.4 : Caractéristiques $P = f(\Omega_t)$ de la turbine éolienne pour les différentes V_v

Le fonctionnement à vitesse variable d'un aérogénérateur offre plusieurs avantages en maximisant la puissance de la turbine pour chaque vitesse du vent sur le site, ce qui permet d'optimiser la production annuelle d'énergie. Pour cela, deux paramètres peuvent être contrôlés : la vitesse de rotation de la turbine et l'angle de calage des pales par rapport à la direction du vent. La troisième consiste à changer la position de la nacelle pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du

vent, mais dans cette étude nous supposons que le plan de rotation décrit par la turbine éolienne est toujours maintenu perpendiculaire à la direction du vent.

b) Coefficient de couple :

Le coefficient du couple C_c est assez proche du coefficient de puissance C_p . La valeur du coefficient de couple C_c D'après les relations (III.5) et (III.6) peut être déterminée par la formule qui suit :

$$C_c = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{C_t}{\frac{1}{2}\rho\pi R^3 V^2} \quad (\text{III.9})$$

Avec: C_t : est le couple de la turbine éolienne.

Le couple mécanique optimal produit par la turbine éolienne peut être reformulé de la façon suivante :

$$C_t^{opt} = \frac{1}{2}\rho\pi R^3 V^2 C_c^{max}(\lambda_{opt}, \beta_{opt}) \quad (\text{III.10})$$

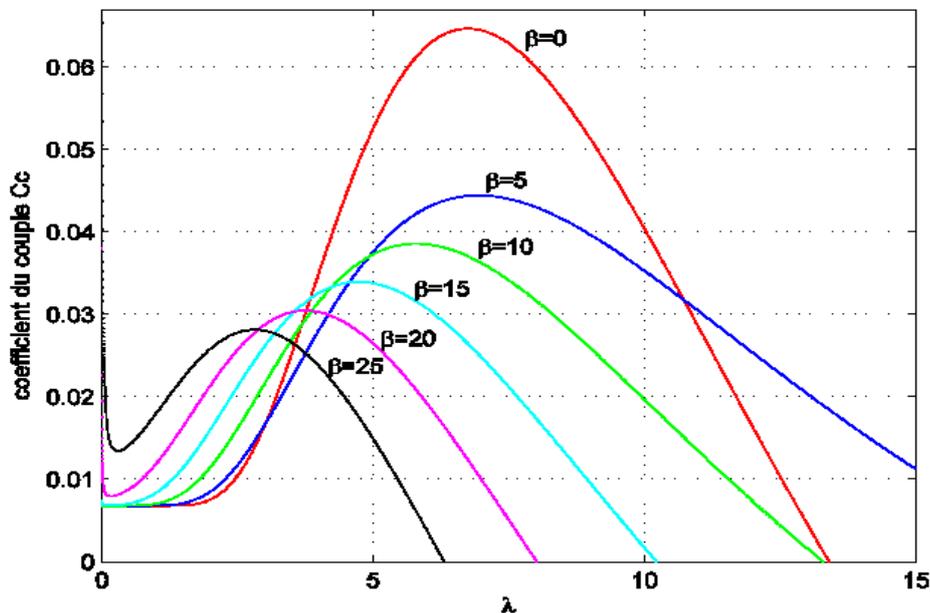


Figure III.5: Coefficient du couple C_c en fonction de λ pour différents β

III.3.3. Modèle de la partie mécanique

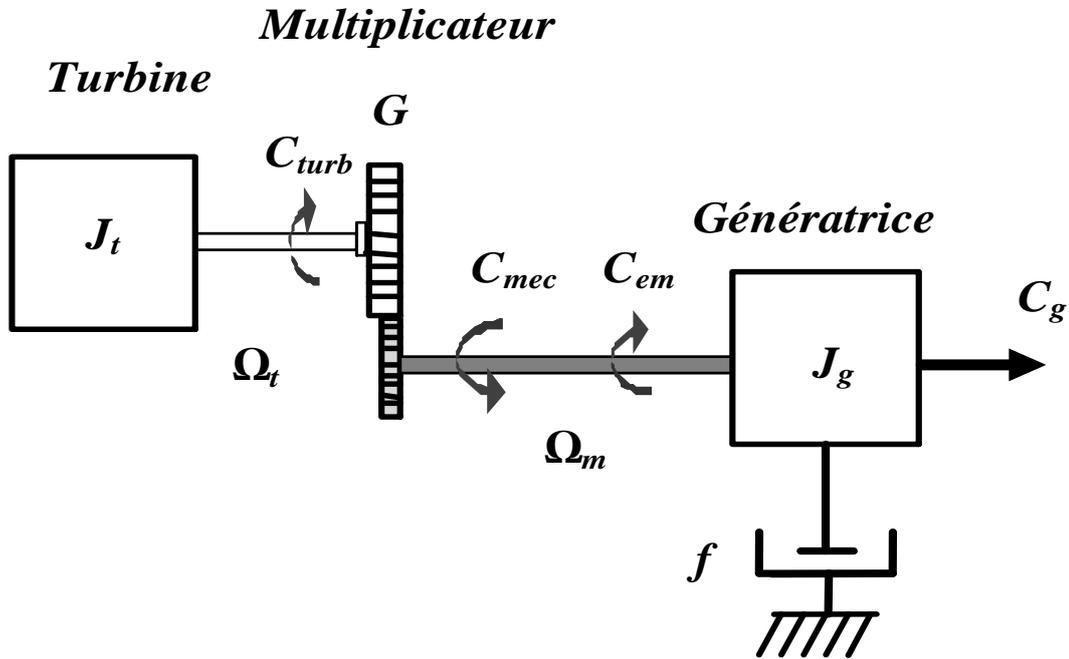


Figure III.6: Modèle mécanique de la turbine éolienne

Avec :

- J_t : le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne ;
- J_m : le moment d'inertie de la MADA;
- f_v : le coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA ;
- C_m : le couple mécanique sur l'arbre de la MADA ;
- Ω_m : la vitesse de rotation de la MADA [14].

III.3.3.1. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est utilisé pour ajuster la vitesse relativement lente de la turbine à la vitesse beaucoup plus rapide de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les expressions suivantes [43]:

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (\text{III.11})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \quad (\text{III.12})$$

Ω_t et Ω_g : vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur ;

C_t : Couple aérodynamique ;

C_g : Couple après multiplicateur ;

G : Le gain du multiplicateur.

III.3.3.2. Modèle de l'arbre mécanique

La modélisation de la transmission mécanique se résume de la manière suivante:

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_{méc} = C_g - C_{em} - C_f \quad (\text{III.13})$$

Avec :

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g$$

J : L'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice ;

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

C_f : Le couple de frottement visqueux.

L'évolution de la vitesse mécanique Ω_g dépend du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice $C_{méc}$ qui est la résultante du couple de la turbine après multiplicateur, le couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em} , et le couple de frottement visqueux C_f donné par la relation :

$$C_f = f_v \Omega_g \quad (\text{III.14})$$

Le schéma bloc de la figure II.7 présente les représentations aérodynamique et mécanique d'une turbine éolienne. Selon ce schéma, la vitesse de rotation de la génératrice Ω_g , et donc de la turbine, peut être contrôlée en agissant soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique de la MADA C_{em} . La vitesse du vent V est considérée comme une entrée perturbatrice au système [44].

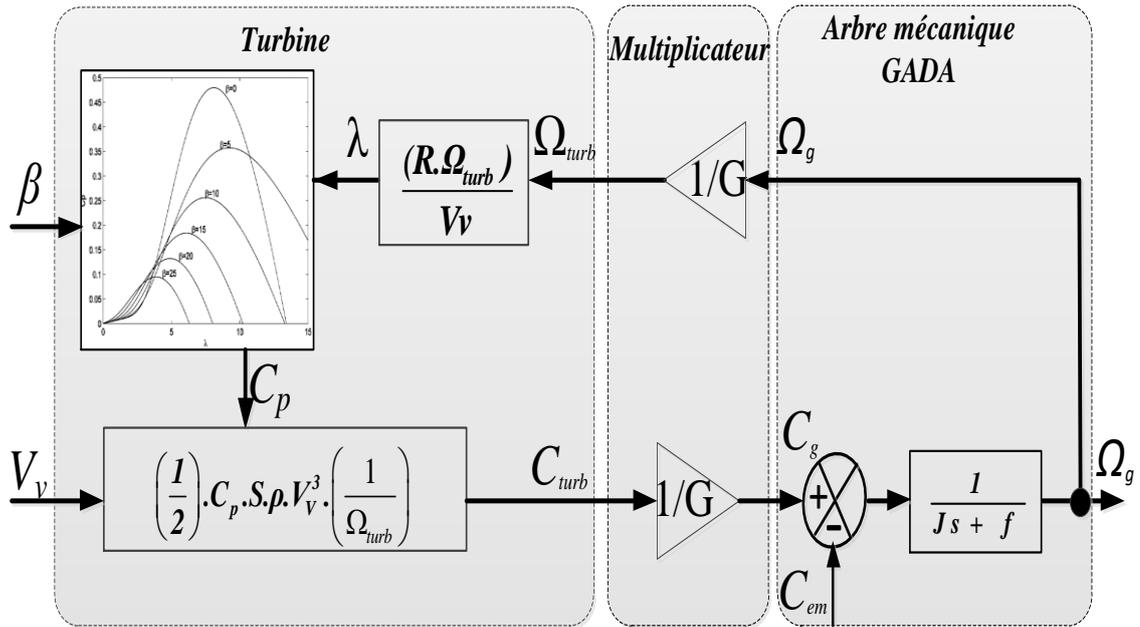


Figure III.7: Schéma bloc du modèle de la turbine

III.4 .Stratégie de commande de la turbine

La figure II.8 met en évidence quatre (04) zones principales de fonctionnement, telles qu'illustrées :

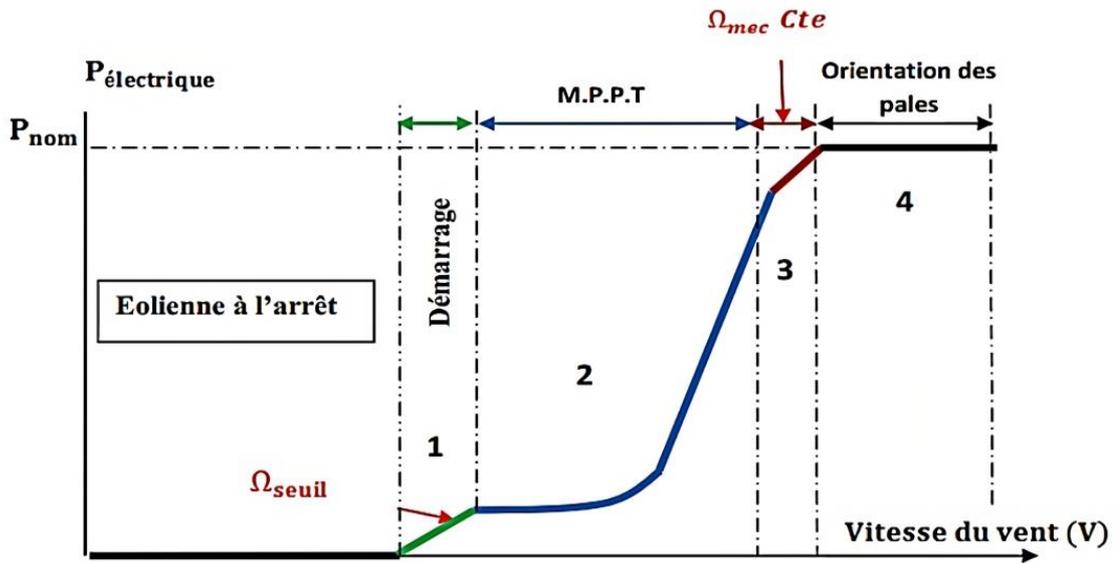


Figure III.8: Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne [45]

Zone1 : La zone de démarrage de la machine est caractérisée par un démarrage lorsque la vitesse mécanique atteint minimal. (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour laquelle l'éolienne a démarré).

Zone2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un C_p maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.

Zone3 : Dans cette zone l'éolienne fonctionne à vitesse constante, et la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .

Zone4 : 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. (Angle de calage), c'est le «Pitch Control».

Dans ce qui suit nous allons nous concentrer sur la zone 2 où la maximisation de la puissance de la turbine extraite du vent peut être réalisée par le contrôle du couple électromagnétique généré [45].

III.4.1. Stratégie de maximisation de puissance "MPPT"

L'algorithme de contrôle selon la méthode MPPT permet de rechercher le maximum de puissance électrique générée pour chaque vitesse de vent. La vitesse d'opération de la génératrice asynchrone à double alimentation est ainsi ajustée afin de produire un maximum de puissance en tout temps. Pour atteindre ce but, il faut estimer la position et la direction du point d'opération sur la courbe de puissance en fonction de la vitesse. La figure III.8 présente l'évolution de la puissance en fonction de la vitesse de rotation de la machine pour différentes valeurs de la vitesse du vent, et pour un angle de calage = 0. Sur la même figure, on a présenté l'évolution de la puissance maximale générée en fonction de la vitesse de rotation. Il est observé que la puissance maximale que la turbine peut produire pour chaque vitesse de vent, correspond à une vitesse optimale. Cette vitesse optimale est atteinte lorsque le coefficient de puissance C_p est

maximal. Pour chaque valeur de la vitesse de rotation, On peut déduire la puissance maximale qu'on peut obtenir :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{w_m^3}{\lambda^3} C_p \quad (\text{III.15})$$

L'application de l'algorithme MPPT pour extraire la puissance maximale dans une éolienne à vitesse variable a pour effet de régler la vitesse de changement d'un générateur et ainsi on cherche à améliorer l'énergie extraite de la machine en adaptant la vitesse de la turbine à la vitesse du vent tout en maintenir un angle de calage nul [45].

Grâce à la technologie MPPT, le problème de l'optimisation de la puissance d'énergie électrique maximale extraite de l'énergie cinétique éolienne disponible a été résolu par plusieurs travaux qui il varie en fonction du type d'informations dont ils ont besoin pour fournir une référence de vitesse [45].

L'objectif de la commande à vitesse variable de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée dans les éoliennes pour la production d'électricité est de maximiser la puissance en exploitant efficacement l'énergie disponible dans le vent. Il existe deux types de structures de commande utilisées pour maximiser la puissance extraite :

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

III.4.2. Contrôle *MPPT* avec asservissement de la vitesse de rotation mécanique

La nature fluctuante du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien et crée des variations continues de puissance. De cet effet, on suppose que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence, quel que soit la puissance générée [46] :

$$C_m = C_{m-ref} \quad (\text{III.16})$$

Selon L'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut

régler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence.

$$C_{m-ref} = PI (\Omega_{ref} - \Omega_r) \quad (III.17)$$

PI : Régulateur de vitesse ;

Ω_{ref} : Vitesse de référence.

Le correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches [47]:

-Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.

-Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

Un régulateur PI suffit pour répondre à ce cahier des charges.

Selon l'équation (III.12), la vitesse de rotation de la turbine est égal à:

$$\Omega_t = \frac{v\lambda}{R} \quad (III.18)$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique λ_{OPT} et le coefficient de puissance maximale C_{P-MAX} peut se déduire de (III.18) :

$$\Omega_{ref t} = \frac{v\lambda_{opt}}{R} \quad (III.19)$$

Le schéma de principe du contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique de rotation est montré à la figure III.9 :

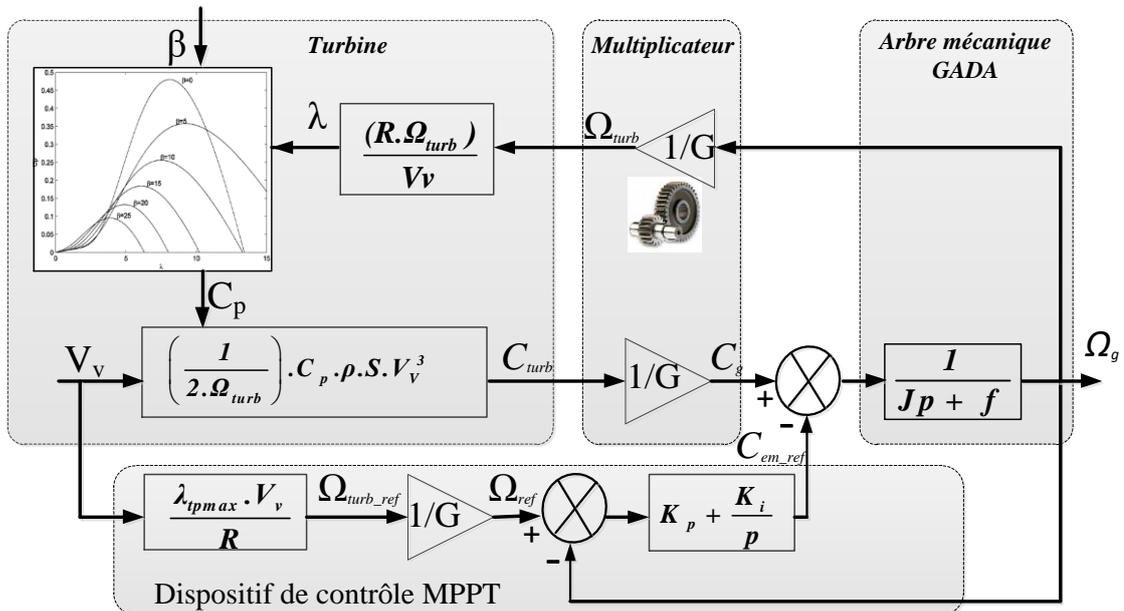


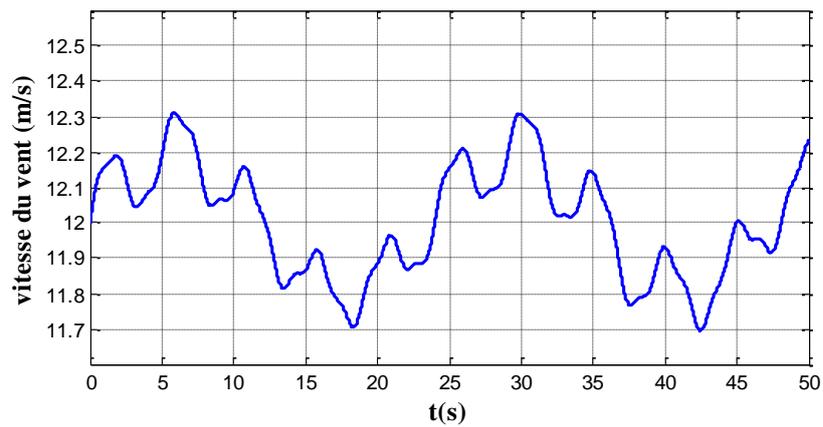
Figure III.9: Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique

III.4.3. Résultats obtenus par simulation

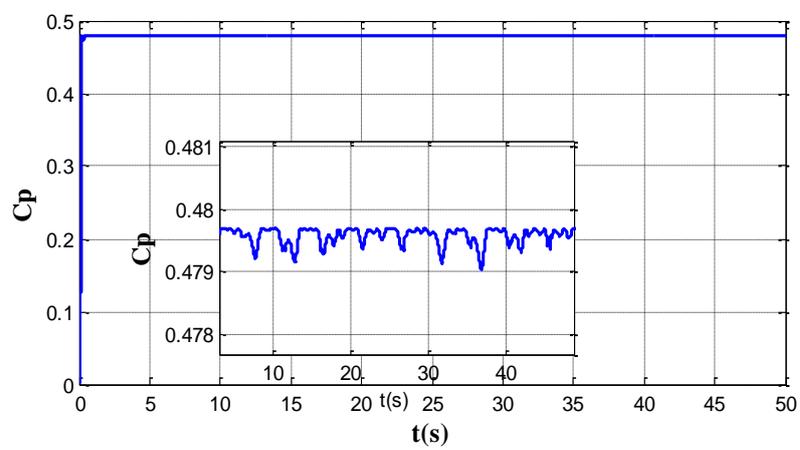
Nous présenterons dans cette section les résultats de simulation de la commande MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation mécanique, en considérant une éolienne de 1.5MW dont les paramètres sont donnés en annexe A.

Les figures III.10 (a-b-c-d-e), montrent respectivement : Profil de la vitesse de vent, Apparence du coefficient de puissance, Evolution du rapport de vitesse de pointe en fonction du temps, Variation de la vitesse mécanique, Evolution de la puissance extraite. Les résultats obtenus démontrent que le régulateur PI offre les meilleures performances statiques et dynamiques, une excellente capacité à suivre la consigne contrôlée (la vitesse) et un temps de réponse satisfaisant.

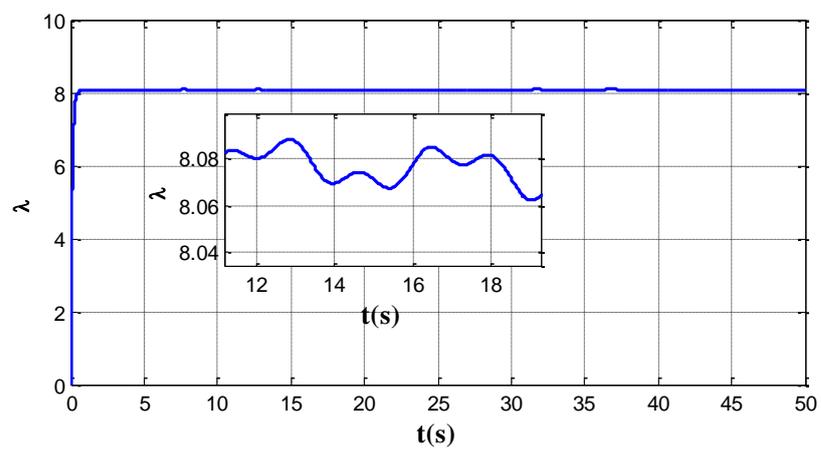
Peu importe la vitesse du vent appliquée aux pales de l'éolienne, le coefficient de puissance (rendement de la turbine) reste constant à sa valeur maximale de 0,48, ceci est vérifié pour un ratio de vitesse optimal de 8.1.



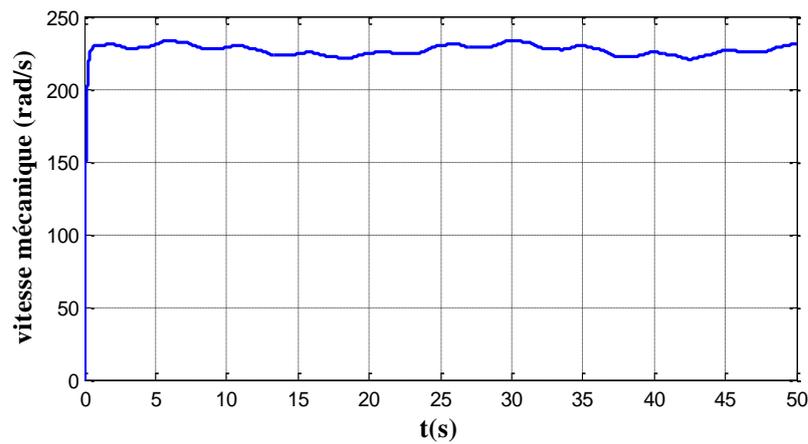
(a)



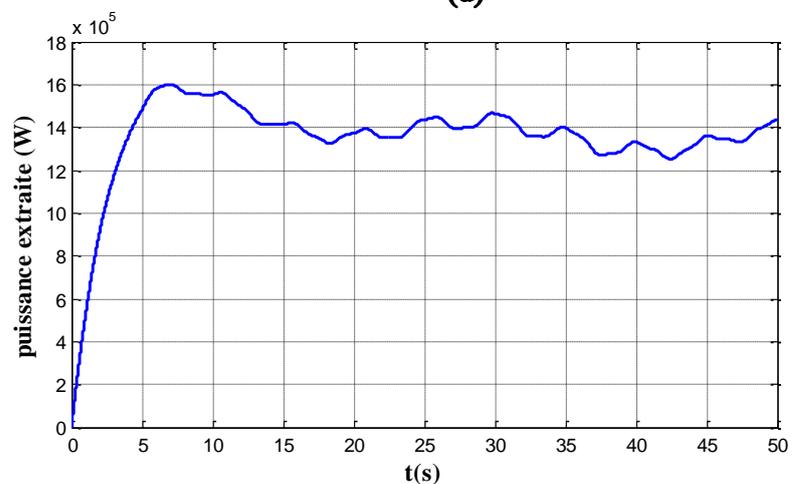
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure. III.10: Résultats de simulation du MPPT avec asservissement de vitesse

III.5. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Avant d'aborder la commande de la MADA, il faut réaliser sa modélisation. Cette étape finale nous permettra de comprendre les principes physiques de fonctionnement du système et de développer un modèle d'action qui nous permettra de calculer les correcteurs nécessaires pour le contrôler. Nous serons ainsi en mesure de simuler son comportement dans des régimes dynamiques et permanents.

III.5.1 Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la MADA, est établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- On admet que la f.m.m créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- On considère que la machine fonctionne en régime équilibré (régime triphasé).

III.5.2. Modèle de la MADA dans le repère triphasé

La figure III.11 représente schématiquement une machine triphasée asynchrone à double alimentation dans le repère triphasé [48].

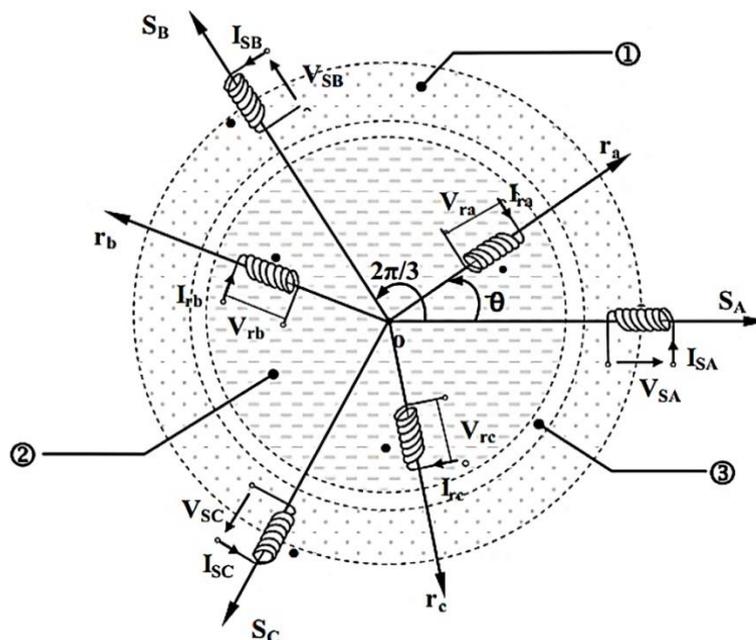


Figure III.11 : Représentation simplifié de la MADA

1 : Partie fixe: Stator 2 : Partie mobile : Rotor 3 : Entrefer

III.5.3. Mise en équations électriques

➤ Equations des tensions

En tenant compte des hypothèses mentionnées précédemment, les équations électriques des tensions statoriques et rotoriques de la machine asynchrone à rotor bobiné s'écrivent, dans un repère triphasé. De la manière suivante [49] :

Au stator :

$$[V_s]_{3 \times 1} = [R_s]_{3 \times 3} \cdot [I_s]_{3 \times 1} + \frac{d}{dt} [\Phi_s]_{3 \times 1} \quad (\text{III.20})$$

Au rotor :

$$[V_r]_{3 \times 1} = [R_r]_{3 \times 3} \cdot [I_r]_{3 \times 1} + \frac{d}{dt} [\Phi_r]_{3 \times 1} \quad (\text{III.21})$$

Où :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \quad [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

Avec :

R_s et R_r : Les résistances des enroulements statoriques et rotoriques de la MADA, respectivement.

➤ Equations magnétiques

Il est possible d'exprimer les flux en fonctions des courants et différentes inductances propres et mutuelles de la machine par :

Au stator :

$$[\Phi_s]_{3 \times 1} = [L_s]_{3 \times 3} \cdot [I_s]_{3 \times 1} + [L_m]_{3 \times 3} \cdot [I_r]_{3 \times 1} \quad (\text{III.22})$$

Au rotor :

$$[\Phi_r]_{3 \times 1} = [L_r]_{3 \times 3} \cdot [I_r]_{3 \times 1} + [L_m]_{3 \times 3} \cdot [I_s]_{3 \times 1} \quad (\text{III.23})$$

Où :

$$[L_s]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_r]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$[L_m]_{3 \times 3} = [m_{rs}]_{3 \times 3}^T = [m_{sr}]_{3 \times 3} = M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$[\Psi_s]_{3 \times 1} = [\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}]^T$: Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c statoriques ;

$[\Psi_r]_{3 \times 1} = [\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}]^T$: Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c rotoriques ;

$[I_s]_{3 \times 1} = [i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}]^T$: Vecteur des courants instantanés des phases a, b et c statoriques ;

$[I_r]_{3 \times 1} = [i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}]^T$: Vecteur des courants instantanés des phases a, b et c rotoriques ;

Et :

L_s et L_r : Les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la MADA, respectivement ;

L_m : L'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor (inductance magnétisante) ;

l_s et l_r : Les inductances propres statoriques et rotoriques ;

m_s et m_r : Les inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques de la MADA, respectivement ;

m_{sr} et m_{rs} : Les inductances mutuelles entre deux phases statorique-rotorique, et entre deux phases rotorique-statorique de la MADA, respectivement ;

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

θ_{sr}, θ_{sl} : L'angle électrique entre une phase statorique et une autre phase rotorique.

On a :

$$\begin{cases} L_s = l_s - m_s \\ L_r = l_r - m_r \\ L_m = \frac{3}{2}M \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

III.5.4 .Utilisation de la transformée de PARK à la MADA

Pour la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), il est préférable de choisir le système de coordonnées d-q associé au champ tournant statorique, qui est aligné sur la fréquence du réseau électrique de 50 Hz. Par conséquent, le repère de Park sera synchronisé avec le flux statorique (figure III.12).

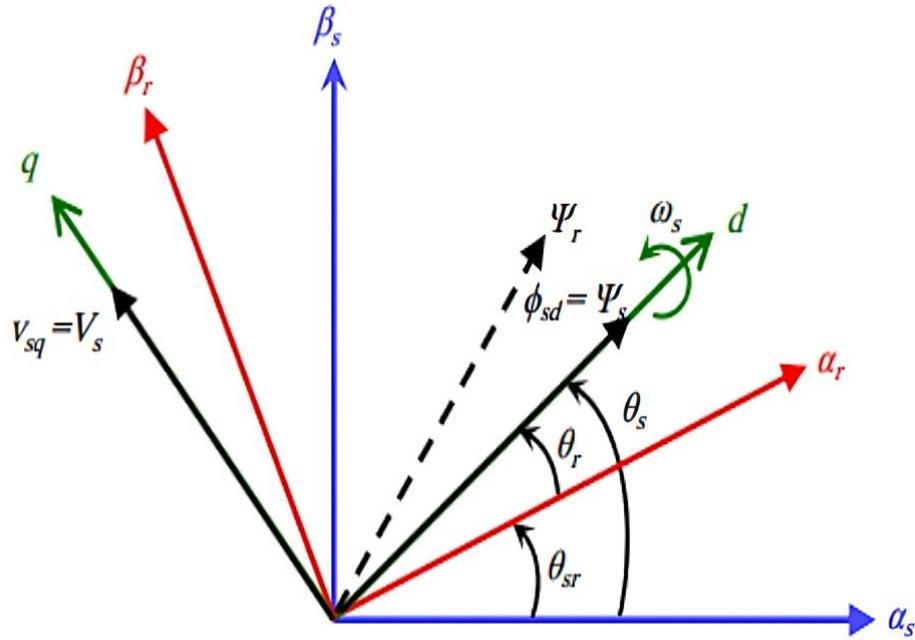


Figure III.12 : Orientation du flux statorique

Souvent dans le cas d'une MADA de moyenne et de grande puissance, la résistance statorique R_s est négligée lors de la synthèse de son modèle sous l'hypothèse d'orientation du flux statorique [12]. En adoptant donc l'hypothèse d'une résistance statorique R_s négligeable et que le flux statorique est constant (cette condition est assurée dans le cas d'un réseau stable connecté au stator de la MADA), et orienté selon l'axe d , on déduit :

$$\begin{cases} \phi_{sq} = 0 \\ \phi_{sd} = \Psi_s \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \Psi_s \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

$$\begin{cases} \Psi_s = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ 0 = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

À partir de l'équation (III.23), il est possible d'établir les équations qui relient les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\Psi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

En remplaçant dans l'équation des flux (III.22), les courants statoriques par l'expression (III.28), on obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = \sigma L_r i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \Psi_s \\ \Phi_{rq} = \sigma L_r i_{rq} \end{cases} \quad (III.29)$$

Avec : $\sigma = 1 - (L_m^2 / L_s L_r)$ (coefficient de dispersion de Blondel).

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente (III.29) par leurs expressions on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} - \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rd} - g \omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} - \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rq} - g \omega_s \sigma L_r i_{rd} + g \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.30)$$

En régime permanent, les termes qui impliquent les dérivées des courants rotoriques diphasés s'annulent, ce qui nous permet d'écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} - g \omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + g \omega_s \sigma L_r i_{rd} + g \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.31)$$

Le facteur g représente le glissement de la machine asynchrone, et le terme $(g L_m V_s / L_s)$ correspond à une force électromotrice qui dépend de la vitesse de rotation. Il est important de noter que son influence ne peut être négligée, car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur.

En adaptant les équations de puissance au système d'axes choisi et en tenant compte des hypothèses simplificatrices que nous avons faites dans notre cas ($V_{sd} = 0$), nous obtenons :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} V_s i_{sq} \\ Q_s = \frac{3}{2} V_s i_{sd} \end{cases} \quad (III.32)$$

En substituant les valeurs des courants statoriques par celles de l'équation (III.28) dans l'équation (III.30), nous obtenons les expressions suivantes pour la puissance active et réactive:

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} V_s \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = \frac{3}{2} \left(V_s \frac{\Psi_s}{L_s} - V_s \frac{L_m}{L_s} i_{rd} \right) \end{cases} \quad (\text{III.33})$$

En tirant $\Psi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ de l'équation (III.26), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = -\frac{3}{2} V_s \frac{L_m}{L_s} i_{rd} + \left(\frac{3V_s^2}{2L_s\omega_s} \right) \quad (\text{III.34})$$

En tenant compte du repère choisi, des approximations effectuées et en considérant l'inductance magnétisante L_m comme constante (avec un entrefer constant), le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante $(3V_s^2 / 2L_s\omega_s)$ près imposée par le réseau.

En remplaçant (III.26) dans (III.24), le couple de la MADA aura pour expression :

$$C_{em} = -\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} \Psi_s i_{rq} = -\frac{3}{2} p \frac{L_m V_s}{L_s \omega_s} i_{rq} \quad (\text{III.35})$$

III.6. Association de la MADA avec le convertisseur d'alimentation

III.6.1. Association onduleur – MADA (rotor)

L'onduleur de tension joue un rôle essentiel dans les systèmes d'interaction réseau d'aujourd'hui, l'onduleur de tension est largement utilisé pour sa capacité à contrôler les échanges de puissance avec le réseau, offrant ainsi une grande adaptabilité aux besoins des systèmes d'interaction réseau. Que ce soit en mode onduleur ou en mode redresseur, l'onduleur conserve une modélisation similaire reste la même dans les deux cas.

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation du convertisseur coté machine « CCM ». Pour un fonctionnement hyposynchrone de la MADA, le « CCM » fonctionnera comme un onduleur. Ce convertisseur est le cœur du système d'alimentation, il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs, possédant comme objectif principal la bidirectionnalité du passage de la puissance permettant à la MADA le fonctionnement en deux régimes hypo et hyper-synchrone.

Le schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux de tension monté en pont présente une conception optimisée avec des six commutateurs parfaits et des commandes complémentaires pour garantir une performance élevée et une régulation précise de la tension alimentant le rotor de la MADA. Comme indiqué dans la figure (III.13).

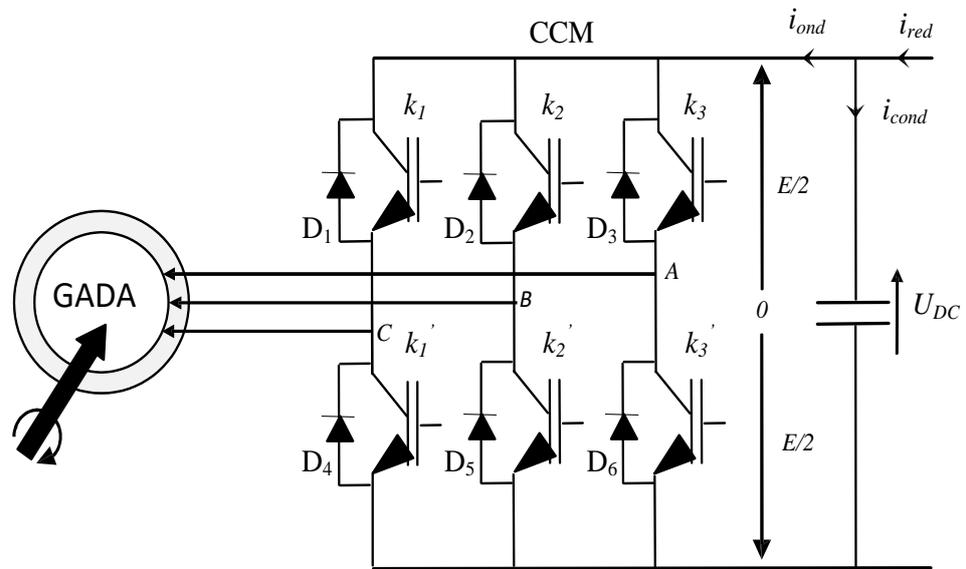


Figure III .13 Représentation schématique d'un onduleur de tension alimente le rotor de la MADA

Les paires d'interrupteurs (k_1 et k_1'), (k_2 et k_2'), (k_3 et k_3') doivent être commandées de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et pour éviter un court-circuit de la source d'autre part. Les diodes (D_i ($i=1,2,\dots,6$)) sont des diodes à roue libre assurant la protection des interrupteurs.

On suppose que les interrupteurs sont idéaux, ce qui signifie que les effets liés à leur fonctionnement sont négligés. Pour simplifier la modélisation, chaque bras de l'onduleur peut être représenté par un interrupteur à deux positions modélisées par d'une fonction logique décrivant l'état de chaque interrupteur, et sa valeur est 1 si l'interrupteur est fermé, et 0 s'il est ouvert (Figure III.14).

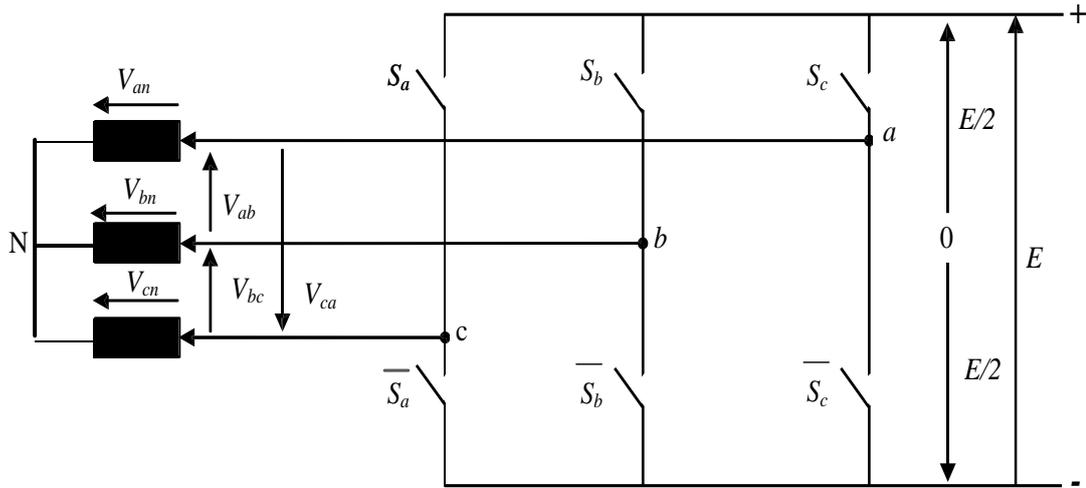


Figure III.14: Schéma simplifié de l'onduleur triphasé

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande S_j ($j= a, b, c$) :

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

Dans ces conditions on peut écrire les tensions de phases $V_{in,a,b,c}$ en fonction des signaux de commande S_j :

$$V_{jna,b,c} = S_j U_{DC} - \frac{U_{DC}}{2} \tag{III.36}$$

Avec :

$$U_{DC} = E$$

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

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \tag{III.37}$$

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

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{III.38})$$

La charge est considérée équilibrer, il l'en résulte :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{III.39})$$

La substitution de (3.38) dans (3.37) nous donne :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{III.40})$$

En remplaçant (3.40) dans (3.38) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (\text{III.41})$$

L'utilisation de l'expression (III.36) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.42})$$

Avec :

V_{ao} , V_{bo} , V_{co} sont les tensions d'entrée de l'onduleur (valeurs continues), et si V_{an} , V_{bn} , V_{cn} sont les tensions de sortie de cet onduleur, par conséquent l'onduleur est modélisé par la matrice du transfert T donnée par :

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.43})$$

III.6.2. Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) est utilisée pour convertir une tension de référence, généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux à la sortie de l'onduleur. Son principe repose sur la comparaison entre la tension de référence (modulante) et une tension à haute fréquence de commutation (porteuse). Le choix du rapport de fréquences entre la porteuse et la modulante permet de trouver un compromis entre la neutralisation des harmoniques indésirables et l'efficacité de l'onduleur.

Les techniques de modulation sont nombreuses, les plus utilisées sont: La naturelle, la Régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la Modulation à bande d'hystérésis.

Le but de la MLI, c'est la minimisation ou la réduction des oscillations sur la vitesse, le couple et les courants. Cela permettra de réduire la perturbation du réseau électrique en harmonique, avec minimisation des pertes dans le système par conséquent augmenté le rendement.

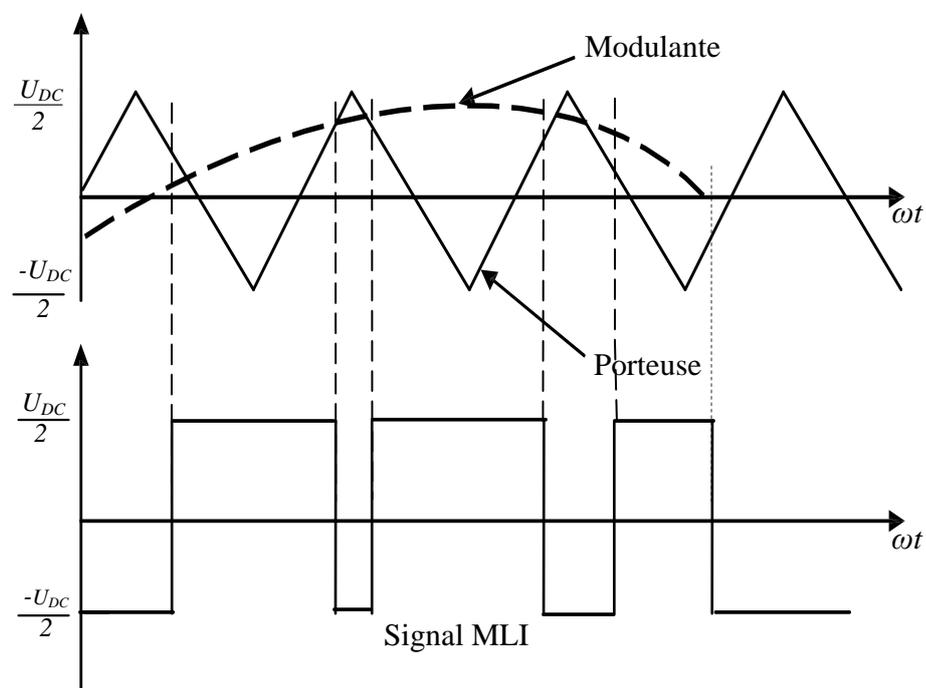


Figure III.15 : Principe de commande en MLI-ST

Dans notre travail, parmi les techniques de modulation susmentionnée, la technique PWM naturelle sera utilisée sur la base de la comparaison de deux signaux (figure III.15)

- Le premier est le signal de référence qui représente l'image sinusoïdale souhaitée en sortie de l'onduleur, et ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second qui est appelé signal de la porteuse définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence comparé au signal de référence.

La tension de sortie de l'onduleur peut être réglée en opérant sur l'indicateur de capacité V_{mod} :

$$V_{mod} = \frac{V_m}{V_p} \quad (III.44)$$

V_p : Valeur de crête de la porteuse.

V_m : Valeur maximale de la tension de référence.

Ainsi on peut agir sur l'indice de modulation m :

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (III.45)$$

f_p : fréquence de la porteuse.

f_m : fréquence de la modulante.

U_{DC} : la tension continue à l'entrée de l'onduleur.

III.6.3. Résultats de simulation

Les résultats de la simulation de l'onduleur commandé par la technique MLI triangulo-sinusoïdale sont présentés sur la figure III.16 (dans la partie supérieure la comparaison entre la porteuse et la modulante, Dans la partie inférieure, on peut observer la sortie de phase de l'onduleur, c'est-à-dire la tension de sortie générée par l'onduleur pour alimenter le rotor de la MADA).

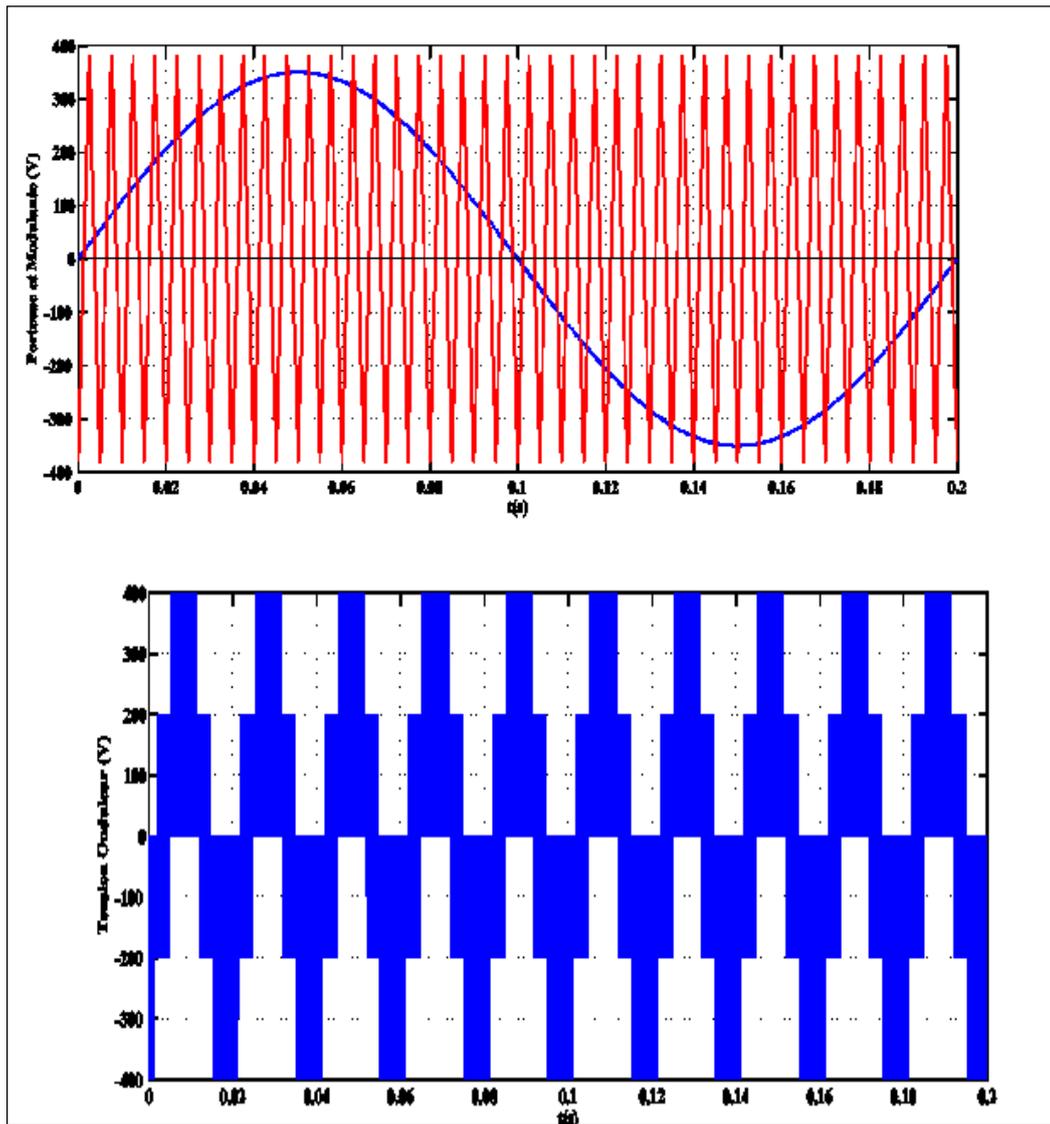


Figure III.16 : Résultats de simulation de l'onduleur de l'alimentation du rotor

III.7. Conclusion

Ce chapitre a abordé la modélisation d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la GADA, a mis en évidence l'efficacité de la stratégie de contrôle MPPT avec asservissement de vitesse. Il a également introduit la GADA comme un élément crucial du système de conversion d'énergie éolienne. Le prochain chapitre se concentrera sur le développement d'une commande vectorielle à flux orienté pour atteindre les objectifs de contrôle de la puissance active et réactive.

CHAPITRE IV
COMMANDE VECTORIELLE DE LA
GADA

IV.1.Introduction :

La commande efficace des machines électriques nécessite généralement la linéarisation du modèle afin de déduire des fonctions de transfert et de synthétiser les correcteurs à l'aide des outils de l'automatique linéaire.

Dans le domaine des entraînements réglés, la machine à courant continu à excitation séparée est considérée comme la référence en raison de son modèle linéaire. Cependant, les machines à courant alternatif ont des modèles non linéaires. Pour résoudre ce problème, la solution la plus couramment utilisée consiste à appliquer une orientation appropriée du repère de Park (d-q) pour réduire, voire éliminer, les non-linéarités [50].

Dans ce chapitre, nous abordons la commande indépendante des puissances active et réactive du stator à partir des grandeurs rotoriques (tension et courant). La méthode d'orientation du flux statorique est utilisée pour créer deux méthodes de contrôle : la méthode directe, qui comprend une seule boucle, et la méthode indirecte, qui comprend deux boucles pour chaque axe du repère d-q. Afin de contrôler correctement les puissances et optimiser le bon fonctionnement de la génératrice. Ensuite, les résultats de la simulation sont présentés et interprétés.

IV.2.Commande vectorielle de la génératrice GADA :

Dans la méthode directe de commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), les tensions rotoriques sont utilisées pour commander directement les puissances statoriques. Cela signifie que les grandeurs de commande sont appliquées directement au rotor, ce qui simplifie le système de commande. Cependant, cette méthode peut être moins précise en termes de contrôle des courants et des puissances statoriques.

En revanche, la méthode indirecte de commande de la MADA utilise deux boucles de rétroaction pour contrôler les courants et les puissances statoriques. Une boucle est utilisée pour contrôler le courant statorique, tandis que l'autre boucle est utilisée pour contrôler la puissance statorique. Cette méthode permet un contrôle plus précis des grandeurs électriques de la machine, ce qui offre une meilleure protection de la machine contre les surintensités et les surcharges.

En résumé, la méthode directe de commande de la MADA est plus simple mais peut-être moins précise, tandis que la méthode indirecte offre un contrôle plus précis des

courants et des puissances statoriques, ce qui améliore la protection de la machine. Le choix de la méthode dépend des exigences spécifiques de contrôle et de protection de la MADA dans une application donnée.

IV.2.1.Principes et objectifs de la commande vectorielle :

La commande vectorielle à un but de chercher un modèle le plus simple possible de la machine asynchrone afin que la commande indépendante des flux et couple pour le mode moteur et les puissances active et réactive pour le mode générateur. Pour réaliser ce but on oriente l'axe « d » du repère de Park suivant le flux rotorique (ou statorique) de la MADA [50].

IV.2.2.Modèle de la génératrice MADA avec orientation du flux statorique :

Les grandeurs de contrôles dans les machines asynchrones à double alimentation sont les tensions statorique et rotorique. On rappelle d'abord le système d'équation de la machine sans orientation du flux statorique :

$$\begin{cases} V_{ds}(t) = R_s I_{ds}(t) + \frac{d\phi_{ds}(t)}{dt} - \omega_s \phi_{qs}(t) \\ V_{qs}(t) = R_s I_{qs}(t) + \frac{d\phi_{qs}(t)}{dt} + \omega_s \phi_{ds}(t) \\ V_{dr} = R_r I_{dr}(t) + \frac{d\phi_{dr}(t)}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr}(t) \\ V_{qr} = R_r I_{qr}(t) + \frac{d\phi_{qr}(t)}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr}(t) \end{cases} \quad (IV.1)$$

En appliquant la méthode d'orientation du flux statorique, c'est-à-dire orienter le repère de Park avec un angle qui assure que le flux soit aligné avec l'axe direct 'd' du repère (d, q), ce qui conduit à : $\phi_{ds} = \phi_s$ et $\phi_{qs}=0$.

$$\begin{cases} V_{ds}(t) = R_s I_{ds}(t) + \frac{d\phi_{ds}(t)}{dt} \\ V_{qs}(t) = R_s I_{qs}(t) + \omega_s \phi_{ds}(t) \\ V_{dr} = R_r I_{dr}(t) + \frac{d\phi_{dr}(t)}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr}(t) \\ V_{qr} = R_r I_{qr}(t) + \frac{d\phi_{qr}(t)}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr}(t) \end{cases} \quad (IV.2)$$

Pour les grandes et moyennes puissances, la résistance des enroulements statorique est négligeable ($R_s \approx 0$). En plus, le réseau électrique connecté au stator est stable, ce qui implique que le flux est constant : $\phi_{ds} = \phi_s = cst \Rightarrow d\phi_{ds}/dt = 0$, donc les deux équations électriques du stator deviennent :

$$V_{ds} = 0$$

$$V_{qs} = V_s = \omega_s \cdot \phi_s \quad (IV.3)$$

Ces équations montre que le flux est en retard de $(\pi/2)$ par rapport à la tension parce qu'il tourne avec la même vitesse angulaire de celle-ci.

L'utilisation de l'hypothèse d'orientation ($\phi_{ds} = \phi_s$ et $\phi_{qs} = 0$), permet de simplifier les relations entre les flux et les courants :

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rd} + \frac{\phi_s}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (IV.4)$$

Rappelent que le but principale du chapitre est de commander les puissances statorique en fonction des tensions et courants rotorique, les puissances sont données dans le repère (d, q) par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) \\ Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs}) \end{cases} \quad (IV.5)$$

L'utilisation des équations (IV.4) et (IV.5) donne les expressions suivantes :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3 L_m}{2 L_s} V_s I_{qr} \\ Q_s = \frac{3 V_s^2}{2 \omega_s L_s} - \frac{3 L_m}{2 L_s} V_s I_{dr} \end{cases} \quad (IV.6)$$

De l'équation (IV.6) on constate que la puissance active statorique est contrôlée par la composante quadrature du courant rotorique, et la puissance réactive par la composante directe.

Pour trouver les relations entre les courants et les tensions du rotor, on doit exprimer les flux rotoriques en fonction des courants rotoriques. Remplacent les équations (IV.4) dans l'expression du flux rotorique, alors en obtient :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left(L_r - \frac{L^2 m}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \phi_s \\ \phi_{qr} = \left(L_r - \frac{L^2 m}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (IV.7)$$

La dernière expression sera remplacée dans l'équation des tensions rotorique :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + L_r \sigma \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s L_r \sigma I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + L_r \sigma \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s L_r \sigma I_{dr} + g \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad (IV.8)$$

Avec : $\sigma = 1 - \frac{L^2 m}{L_s L_r}$ est le coefficient de dispersion.

La remarque pour la dernière expression c'est qu'il y'a un couplage entre les deux axes d, q.

Si on remplace les courants dans l'expression des puissances on obtient :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} V_s \left(\frac{(V_{qr} - \omega_r L_r \sigma I_{dr} - \omega_r \frac{L_m V_s}{L_s \omega_s})}{R_r + L_r \sigma s} \right) \\ Q_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} V_s \left(\frac{(V_{dr} + \omega_r L_r \sigma I_{qr})}{R_r + L_r \sigma s} \right) + \frac{3}{2} \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (IV.9)$$

Grâce aux équations ci-dessus (IV.6), (IV.8) et (IV.9), nous pouvons créer un schéma bloc simplifié de la GADA dans un repère de Park orienté suivant le flux statorique.

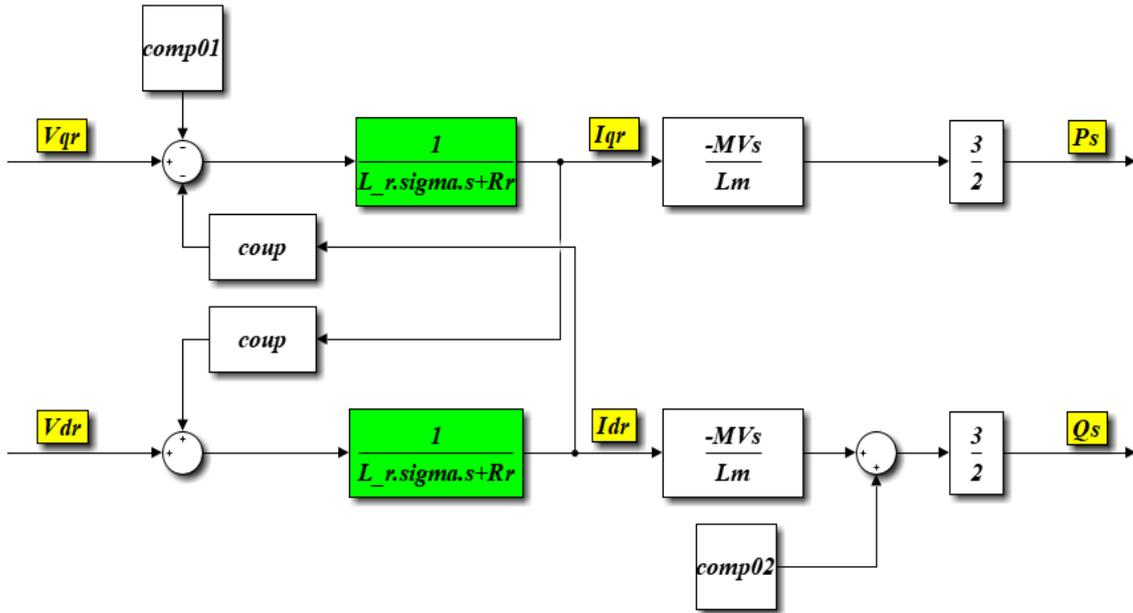


Figure IV.1 : Schéma bloc de la GADA

IV.2.3 .Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques :

IV.2.3.1. Relation entre les courants statoriques et rotoriques :

On a l'équation du modèle dynamique de la MADA définit :

$$\varphi_{sd} = L_s. I_{sd} + L_m. I_{rd}$$

Et on a aussi relation de l'orientation du flux statorique suivant l'axe d :

$$\varphi_{sq} = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi_s = \varphi_s$$

Le système suivant obtenu :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s. I_{sd} + L_m. I_{rd} \\ 0 = L_s. I_{sq} + L_m. I_{rq} \end{cases} \quad (IV.10)$$

A partir des équations qui déterminent les composantes directes et en quadrature du flux statorique, nous pouvons établir les connexions entre les courants statorique et ceux du rotor :

$$I_{sd} = \frac{\varphi}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \quad (IV.11)$$

$$I_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rq} \quad (IV.12)$$

IV.2.3.2. Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques :

En remplaçant I_{sd} et I_{sq} par leurs expressions (IV.11) et (IV.12) et sachant que $v_{sd} = 0$, les puissances actives et réactives statoriques sont exprimées par les relations :

$$\begin{cases} P_s = -v_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = -v_s \frac{L_m}{L_s} I_{rd} + v_s \frac{\varphi_s}{L_s} = -v_s \frac{L_m}{L_s} I_{rd} + \frac{v_s^2 s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (IV.13)$$

IV.2.4. Expressions des tensions et courants rotoriques :

Les équations magnétiques des flux rotoriques est défini :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq} \end{cases} \quad (IV.14)$$

Reprenons les équations (IV.14), et les courants statoriques par leurs valeurs dans les équations (IV.11) et (IV.12), nous obtenons le système suivant :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rd} + \frac{L_m v_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rq} \end{cases} \quad (IV.15)$$

En remplaçant ces équations dans l'expression des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} v_{rd} = R_r I_{rd} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_r \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ v_{rq} = R_r I_{rq} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_r \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rd} + \omega_r \frac{L_m^2 v_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (IV.16)$$

Où g est le glissement de la machine asynchrone et la pulsation rotorique : $\omega_r = g \omega_s$

Une fois en régime établi, les dérivées des courants rotoriques triphasés ne sont plus pertinentes, ce qui fait que les tensions rotorique sont régies par les équations suivantes :

$$\begin{cases} v_{rd} = R_r I_{rd} - \omega_r \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ v_{rq} = R_r I_{rq} - \omega_r \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rd} + \omega_r \frac{L_m^2 v_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (IV.17)$$

IV.3.Principe de Contrôle indépendant des puissances active et réactive :

Pour qu'une turbine tourne de manière optimale à une vitesse de vent donnée, elle doit posséder un couple résistant mécanique spécifique qui est généré par la puissance active délivrée par la GADA.

Grace à l'utilisation d'une référence de puissance active et réactive, la machine devient contrôlable. En connectant le modèle GADA, il est devenu possible de déterminer la puissance de sortie nécessaire pour que l'éolienne fonctionne à une vitesse optimale en fonction de la vitesse du vent dominant [51].

IV.3.1.Commande vectorielle directe des puissances :

En principe, la commande directe est une méthode simple qui consiste à établir un lien entre les puissances statoriques et les tensions rotoriques. En négligeant l'influence de l'axe « q » sur l'axe « d » par le terme ($\text{couple}=\omega_r L_r \sigma I_{qr}$) et celle de l'axe « d » sur l'axe « q » par le terme ($\text{couple}=\omega_r L_r \sigma I_{dr}$), comme indiqué sur la figure IV.2, [50] En plus, nous compensons les constantes par une modification des tensions d'alimentations en supposons que :

$V_{qr} = (U_{qr} + X_q)$ et $V_{dr} = (U_{dr} + X_d)$ donne :

$$P_s \approx -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} v_s \frac{\left((U_{qr} + X_q) - \omega_r \frac{L_m v_s}{L_s \omega_s} \right)}{R_r + L_r \sigma s} = -\frac{3}{2} \frac{M}{L_s} v_s \frac{U_{qr}}{R_r + L_r \sigma s} \quad (\text{IV.18})$$

$$\text{On a: } X_q = \omega_r \frac{L_m v_s}{L_s \omega_s} = \frac{g \omega v_s}{L_s}$$

$$Q_s \approx -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} v_s \frac{(U_{dr} + X_d)}{R_r + L_r \sigma s} + \frac{3}{2} \frac{v_s^2}{\omega_s L_s} = -\frac{3}{2} \frac{M}{L_s} v_s \frac{U_{dr}}{R_r + L_r \sigma s} \quad (\text{IV.19})$$

On a:

$$X_d = \left(\frac{L_s (R_r + L_r \sigma s)}{L_m v_s} \right) \frac{v_s^2}{\omega_s L_s} = \frac{(R_r + L_r \sigma s) v_s}{L_m \omega_s}$$

On régime permanent ($s=0$) :

$$X_d = \frac{R_r v_s}{L_m \omega_s} = \frac{R_r}{L_m} \varphi_s$$

Alors après compensation les puissances sont données par :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} v_s \left(\frac{U_{qr}}{R_r + L_r \sigma s} \right) \\ Q_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} v_s \left(\frac{U_{dr}}{R_r + L_r \sigma s} \right) \end{cases} \quad (\text{IV.20})$$

La commande en boucle fermée des puissances active et réactive par l'utilisation des contrôleurs PI, permet de tracer le schéma bloc suivant :

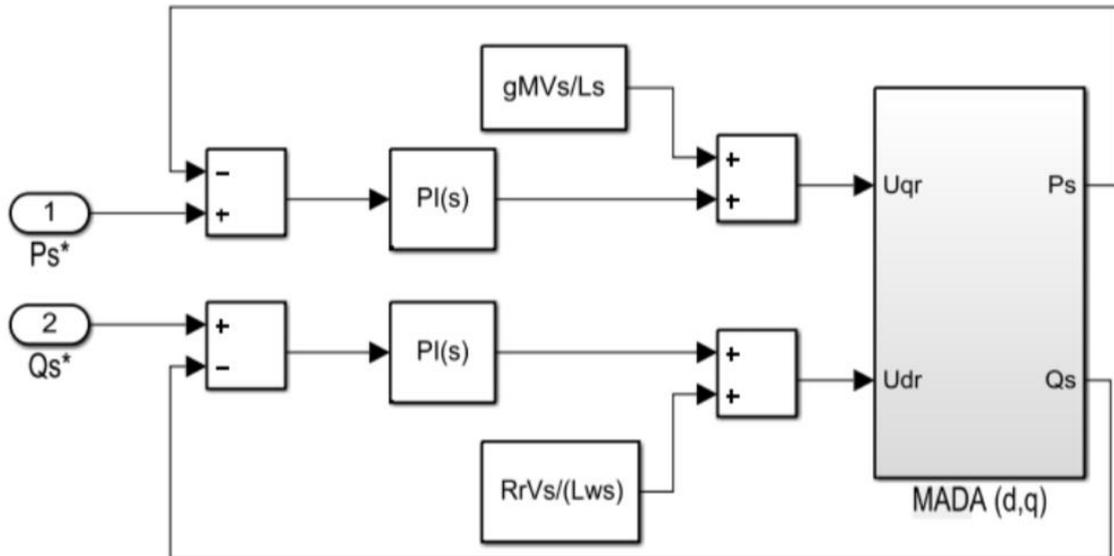


Figure IV.2 : schéma bloc de la commande directe

IV.3.2 Commande vectorielle indirecte des puissances :

Le mécanisme de contrôle de la gestion des puissances statoriques par les courants rotorique est un processus assez complexe, car il nécessite que la puissance active soit régulée par le courant en quadrature et la puissance réactive par le courant continu. De plus, les courants sont contrôlés par les tensions du rotor, ce qui nécessite l'utilisation de deux boucles de contrôle, une pour les courants et l'autre pour les puissances [50].

La commande indirecte est basée sur les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3 L_m}{2 L_s} v_s I_{qr} \\ Q_s = -\frac{3 L_m}{2 L_s} v_s I_{dr} + \frac{3 v_s^2}{2 L_s \omega_s} \end{cases} \quad (IV.21)$$

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{v_{dr} + \omega_r L_r \sigma I_{qr}}{R_r + L_r \sigma s} \\ I_{qr} = \frac{v_{qr} - \omega_r L_r \sigma I_{dr} - \omega_r \frac{L_m v_s}{L_s \omega_s}}{R_r + L_r \sigma s} \end{cases} \quad (IV.22)$$

La figure IV.3, présente le schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée des puissances active et réactive utilisant des contrôleurs PI aussi bien pour les courants que pour les puissances.

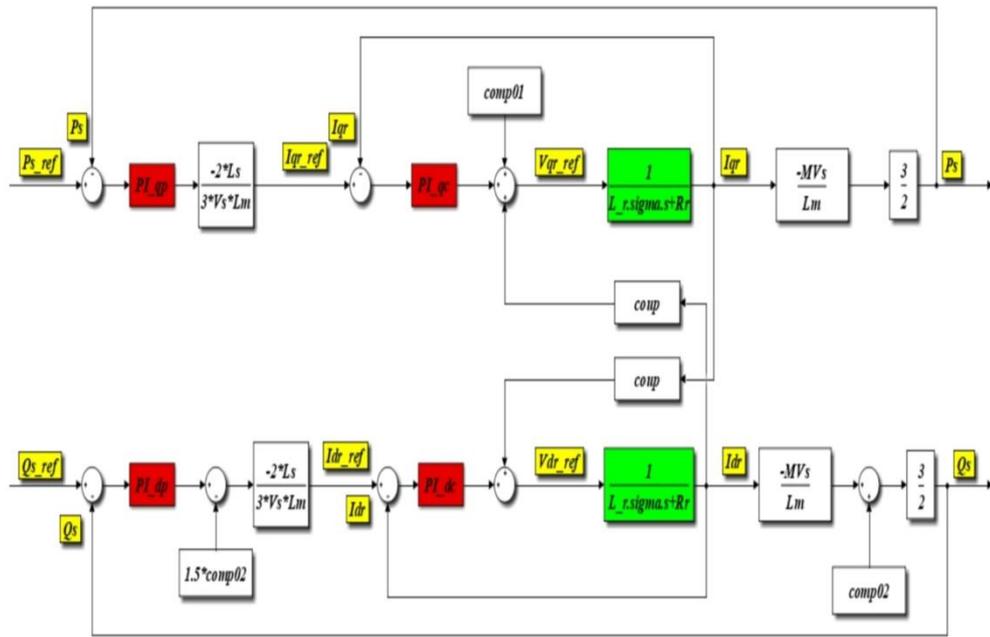


Figure IV.3 : schéma bloc de la commande indirecte

IV.3.3.Synthèse et conception du régulateur (PI) :

IV.3.3.1.Objectif du correcteur PI :

Les correcteurs de la famille PID sont les plus couramment utilisés dans les variateurs régulés en raison de leur efficacité et simplicité, Pour notre cas, nous avons choisi la version PI, qui n'a pas d'action dérivée, car il est généralement suffisant pour améliorer les performances de réglage des puissances. L'incorporation d'une action dérivée peut entraîner des complications si le signal à régler est trop bruité [52].

IV.3.3.2.Synthèse du correcteur PI :

a. Commande direct :

La fonction de transfert en boucle fermée identique est applicable aux deux axes, ce qui entraîne l'utilisation du contrôle final dans deux boucles de régulation de puissance. En conséquence, l'approche de synthèse PI utilise Y(s) au lieu de Ps et Qs

$$FTBF = \frac{Y^*}{Y} = \frac{PI(s).H(s)}{1+PI(s).H(s)} \tag{IV.23}$$

Avec :

$$PI(s) = \frac{K(Tis+1)}{s}$$

$$H(s) = \frac{H_0}{Trs+1} \quad (IV.24)$$

On a :

$$\begin{cases} Tr = Lr\sigma/Rr \\ H_0 = 3/2 M/RrLs \text{ vs} \end{cases} \quad (IV.25)$$

On remplace (IV.25) , (IV.24) et PI dans (IV.23) :

$$FTBF = \frac{Y^*}{Y} = \frac{K(Tis+1)H_0}{s(Trs+1)+K(Tis+1)H_0} \quad (IV.26)$$

Le choix de $Ti=Tr$, permet de simplifier la fonction de transfert en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{Y^*}{Y} = \frac{KH_0}{S+KH_0} = \frac{1}{\frac{1}{KH_0}s+1} = \frac{1}{Ts+1} \quad (IV.27)$$

La détermination du coefficient K du correcteur PI est réalisable en imposant la valeur de la constante T .

b.Commande indirect :

Dans cette méthode on commence par la synthèse du correcteur PI de la boucle interne, en l'occurrence le correcteur PI du courant, puis on calcule le Pis de la puissance.

- **Boucle de courants :**

La fonction de transfert en boucle fermée est la même pour les deux axes de courant. Pour éviter la répétition des calculs, nous utilisons Y(s) au lieu de Ids ou Iqs.

$$FTBF = \frac{Y^*}{Y} = \frac{PI(s).H(s)}{1+PI(s).H(s)} \quad (IV.28)$$

Avec :

$$PI(s) = \frac{K(Tis+1)}{s} \quad (IV.29)$$

$$H(s) = \left(\frac{1}{Rr+Lr\sigma s} \right) = \frac{\frac{1}{Rr}}{\frac{Lr\sigma}{Rr}s+1} = \frac{H_0}{Trs+1} \quad (IV.30)$$

Tel que : $Ti = \frac{Lr\sigma}{Rr}$ on compense la constante du temps du système, on trouve :

$$\frac{Y^*}{Y} = \frac{K}{Rrs+K} = \frac{1}{\frac{Rr}{K}s+1} = \frac{1}{Ts+1} \quad (IV.31)$$

Par comparaison : $T = \frac{Rr}{K} \Rightarrow K = \frac{Rr}{T}$;

IV.4 Résultats de simulation :

La simulation de la commande directe et indirecte de la GADA à 1.5 MW (paramètres donnés en Annexe B), a été implantée sous MATLAB/Simulink, en

imposant la référence des puissances active et réactive (P_{ref} , Q_{ref}). P_{ref} varie entre -400000 et -1400000 (W) et Q_{ref} Varie entre -100000,-200000 et -400000,100000(Var)

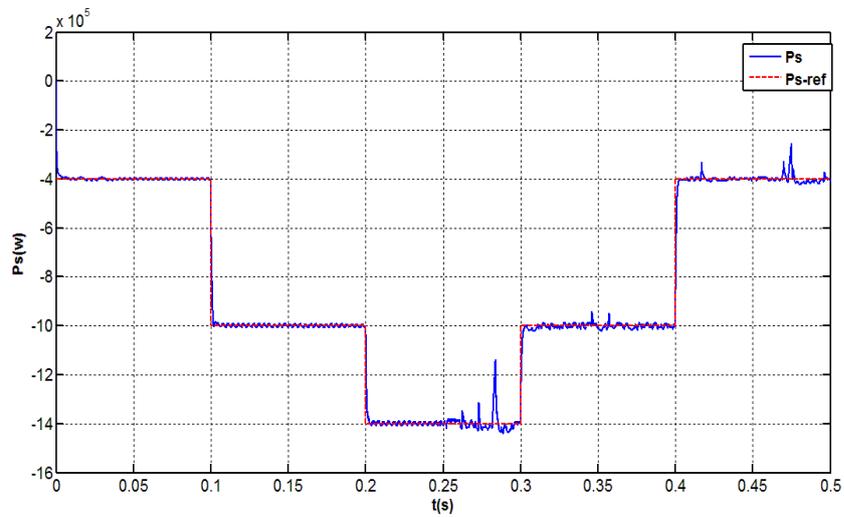


Figure IV.4 : Puissance active statorique et sa référence à l'aide de la commande directe

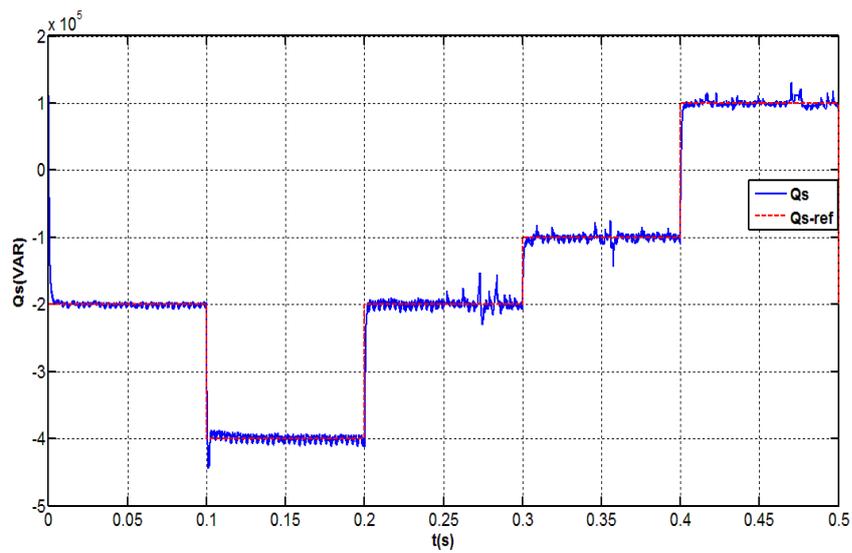


Figure IV.5 : Puissance réactive statorique et sa référence à l'aide de la commande directe

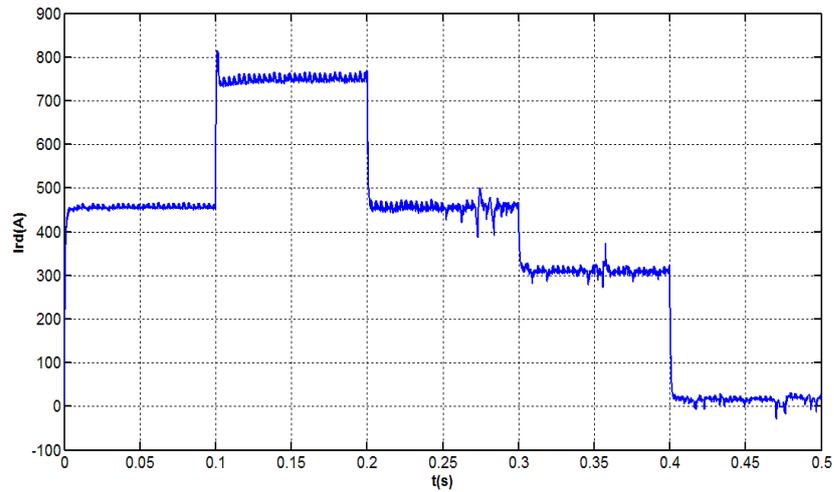


Figure IV.6 : Résultats de simulation du courant rotorique direct à l'aide de la commande direct

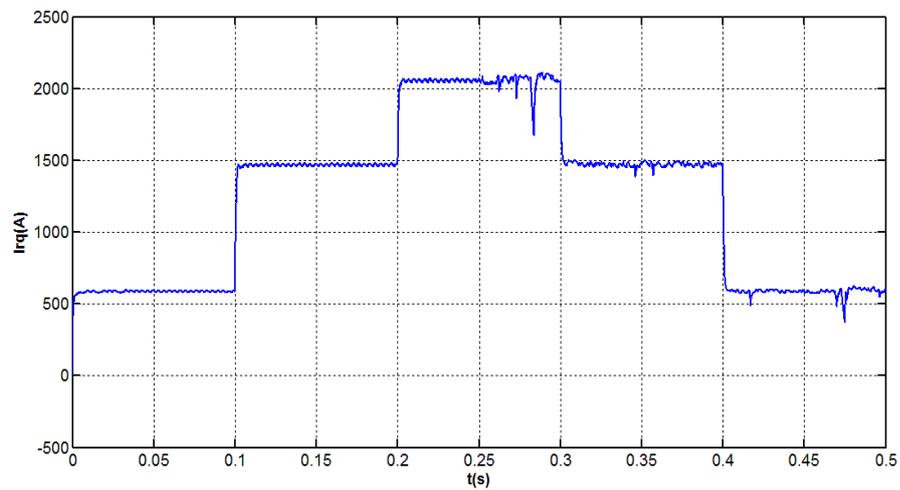


Figure IV.7 : Résultats de simulation du courant rotorique quadrature à l'aide de la commande directe

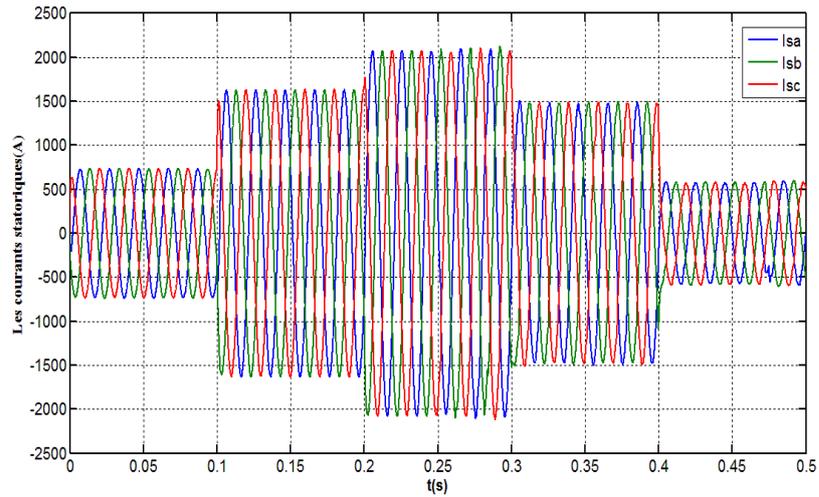


Figure IV.8 : Les courants statoriques à l'aide de la commande directe

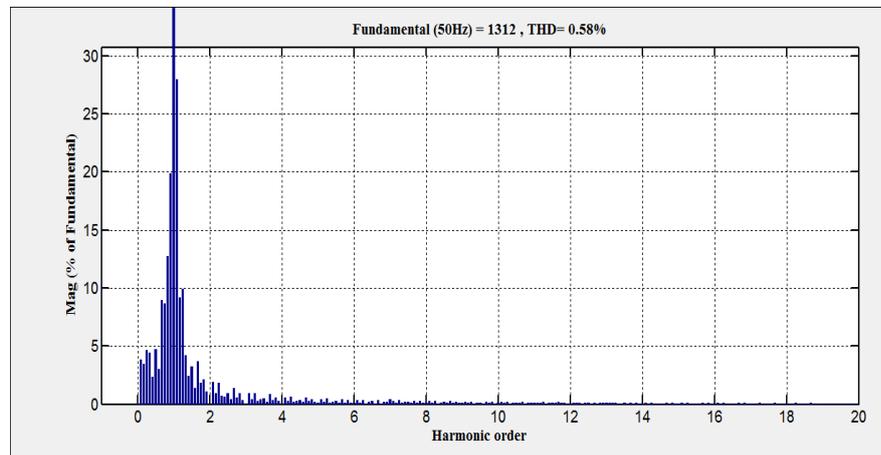


Figure IV.9 : THD de courant de la phase i_{sa} à l'aide de la commande directe

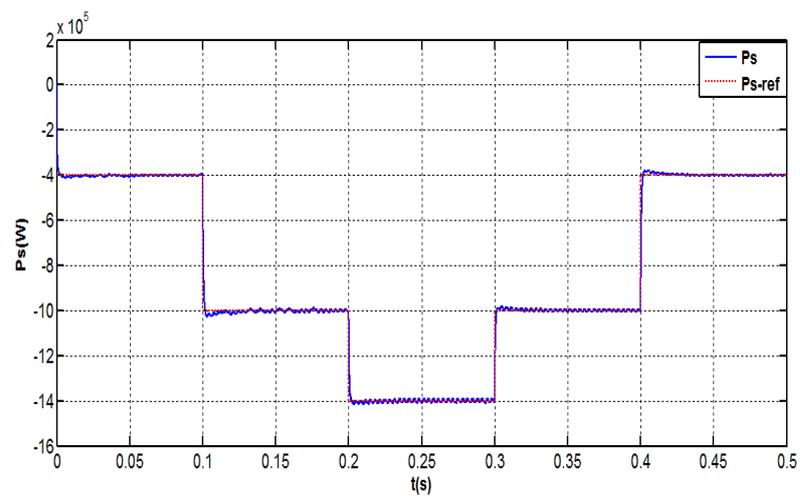
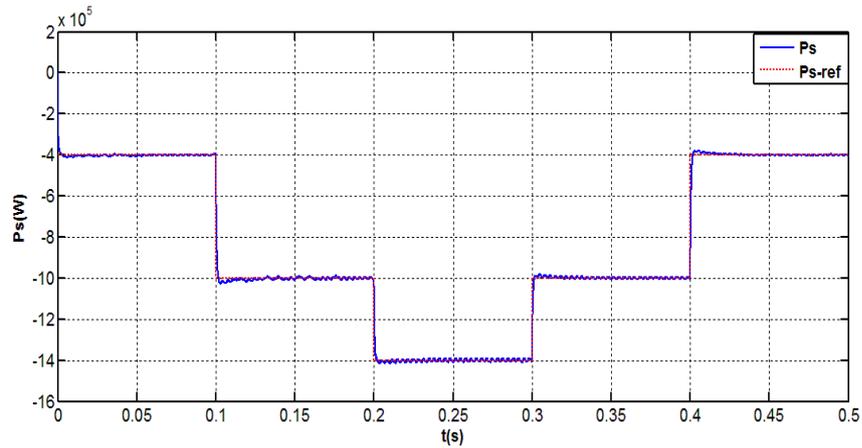


Figure IV.10 : Puissance active statorique et sa référence à l'aide de la commande indirecte



FigureIV.11 : Puissance réactive statorique et sa référence à l'aide de la commande indirecte

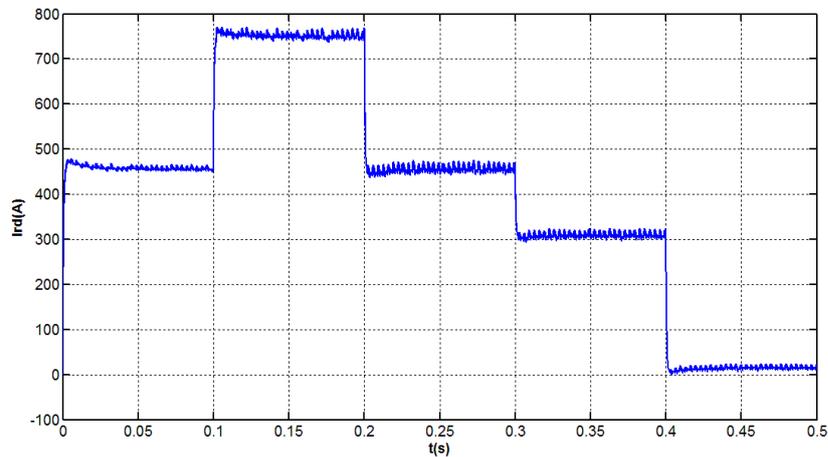


Figure IV.12 : Résultats de simulation du courant rotorique direct à l'aide de la commande indirecte

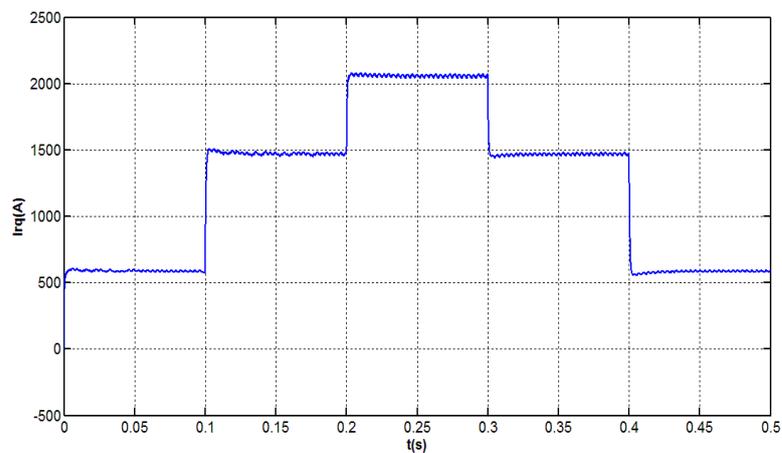


Figure IV.13 : Résultats de simulation du courant rotorique quadrature à l'aide de la commande indirecte

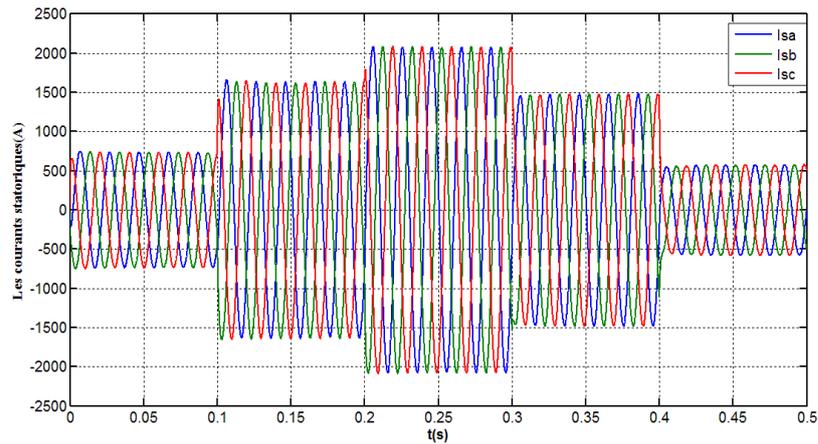


Figure IV.14 : Les courants statoriques à l'aide de la commande indirecte

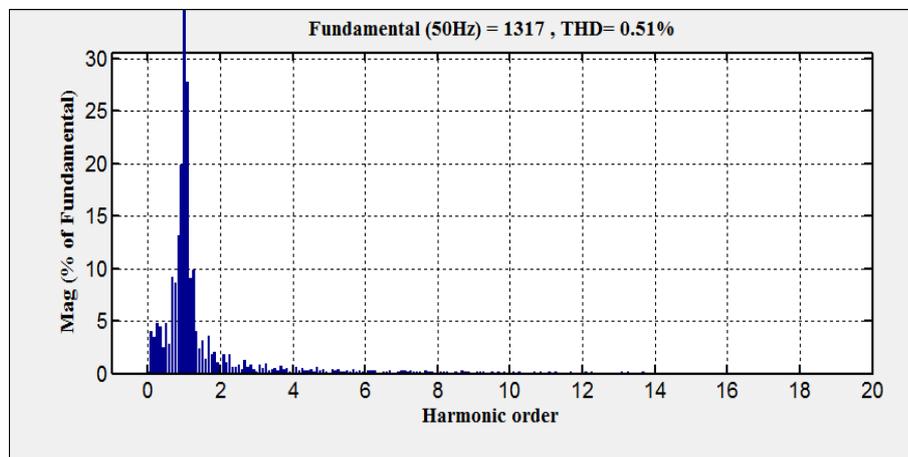


Figure IV.15 : THD de courant de la phase i_{sa} à l'aide de la commande indirecte

Analyse des résultats :

D'après les résultats de la simulation présentés sur les figures (IV4, IV5, IV10, IV11), on remarque que :

Les échelons de référence pour les puissances actives et réactives du système sont suivis avec précision, grâce à l'action l'intégrale du correcteur PI qui élimine toute erreur de puissance. Cependant, lors de l'utilisation de la commande indirecte, le couplage entre les axes de commande d et q entraîne des effets notables. En effet, lorsque des échelons de référence sont imposés à une puissance (active ou réactive), des oscillations se produisent dans l'autre puissance. Néanmoins, la méthode directe n'est pas affectée par ce phénomène du fait du modèle GADA simplifié qui néglige les termes de couplage. De plus, une puissance réactive négative indique un fonctionnement en mode capacitif

du générateur, tandis qu'une puissance réactive positive indique un fonctionnement en mode inductif. A l'inverse, la puissance active reste négative.

Dans ce cas, la puissance active coté stator est qualifiée de négative. Ce qui signifie que le réseau dans ce cas, est un récepteur de l'énergie fournie par la GADA. En examinant les figures (IV.6, IV.7, IV.12, IV.13), il est évident que les composantes directe et quadratique du courant du rotor correspondent au rythme de la puissance. Cela reflète le modèle mathématique du GADA. En conséquence, la composante quadratique du courant régule la puissance active, tandis que la composante directe du courant régule la puissance réactive. Les figures (IV.8, IV.14) montrent que les courants statoriques sont également de forme sinusoïdale, indiquant qu'une énergie de haute qualité est fournie au réseau.

Les figures (IV.9, IV.15) montrent respectivement les spectres d'harmoniques d'une phase du courant statorique dans les deux méthodes (direct et indirect). Dans le cas de la méthode directe THD=0.58% et THD=0.51% pour le cas la méthode indirecte.

On constate que la méthode indirecte donnée un résultat satisfaisant et un bon THD comparant de la méthode directe. La diminution des harmoniques ce qui explique l'amélioration de la qualité des courants injectés au réseau.

IV.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la commande vectorielle par orientation du flux statorique d'une GADA qui nous a permis de simplifier notre modèle mathématique. La commande des puissances actives et réactives injectées au réseau a été présentée par deux méthodes : directe et indirecte à l'aide des correcteurs PI.

En contrepartie, la méthode indirecte avec deux boucles permet d'obtenir un système de réglage performant pour un fonctionnement à vitesse variable de la GADA, et présente l'avantage de contrôler les courants rotoriques , ce qui permet d'assurer la protection de la GADA en limitant les courants, et d'avoir un fonctionnement optimal du système de la conversion électrique en minimisant les préoccupations concernant les changements de paramètres.

Enfin, les résultats de simulation réalisés sous MATLAB/SIMULINK pour une éolienne de 1,5 MW ont été obtenus. Ces résultats démontrent que la méthode de commande

indirecte permet de réguler plus efficacement les puissances et donne les meilleurs résultats, en montrant une réduction du taux d'harmoniques (THD). Les résultats de simulation confirment l'efficacité de l'approche de commande indirecte pour améliorer la qualité de puissance et réduire la distorsion harmonique.

Conclusion Générale et perspectives

Le thème de ce travail concerne la modélisation et la simulation d'un système éolien utilisant un générateur asynchrone à double alimentation (GADA). L'étude des machines électriques en général nécessite une modélisation mathématique détaillant la machine ainsi que le système associé, tels que la turbine, la charge et le convertisseur. Cette modélisation permet de prédire les performances dynamiques et statiques des entraînements, et de faire un état de l'art des systèmes éoliens en détaillant leurs composants, leur principe de fonctionnement, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Le choix de la génératrice et de sa structure d'alimentation est également abordé.

La modélisation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) constitue un prérequis essentiel pour les travaux ultérieurs de ce mémoire. Ses travaux comprennent la modélisation de la turbine et de ses commandes afin de maximiser et de limiter la capture de puissance dans des conditions de vent faibles et fortes. Ensuite, la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation est réalisée dans le repère de Park, qui est lié au champ tournant. Le stator de la machine est directement relié au réseau électrique, tandis que le rotor est connecté au réseau à travers un bus continu via deux convertisseurs statiques bidirectionnels, qui sont reliés en cascade.

La commande vectorielle en puissance de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) a été judicieusement choisie, avec une orientation du flux statorique. Cette commande utilise des régulateurs classiques tels que le PI. Grâce à cette approche, il est possible de définir des consignes indépendantes pour la puissance active et la puissance réactive, permettant ainsi de régler en continu la valeur de la puissance réactive fournie par la machine au réseau.

Deux méthodes de commande de la GADA sont présentées : la commande directe et la commande indirecte. Ces méthodes visent à améliorer le facteur de puissance du réseau et à assurer le réglage du bus continu. Les résultats des simulations effectuées avec ces commandes sur le système sont présentés et commentés.

L'objectif principal était de réguler les puissances actives et réactives fournies au réseau électrique tout en respectant ses exigences. Pour évaluer les performances de chaque

méthode, une analyse spectrale a été réalisée afin de mesurer la distorsion harmonique totale (THD). Les résultats des simulations ont démontré une réduction significative du taux d'harmoniques (THD). Cette réduction de la distorsion harmonique contribue à assurer un fonctionnement plus stable et une meilleure qualité de l'énergie fournie au réseau électrique.

Dans le cadre de nos travaux de recherche à venir, nous avons identifié les objectifs suivants :

- Développer un modèle complet d'un aérogénérateur éolien en utilisant à la fois une machine asynchrone à double alimentation et une machine synchrone, tout en prenant en compte l'effet de la saturation magnétique.
- Réaliser des expériences sur un banc d'essai afin de valider les grandeurs proposées pour l'état en charge du système.
- Explorer les possibilités d'intégration d'un système de stockage d'énergie dans le système éolien.
- Appliquer des techniques de commande avancées basées sur l'intelligence artificielle, telles que les approches hybrides neuro-floues, pour améliorer les performances du système et optimiser sa gestion.

Bibliographie

Bibliographie

Références bibliographiques

- [1] <https://www.usthb.dz/fr/page/66> 28/02/23.
- [2] <https://era.d> 03/03/2023.
- [3] Duffie, John A. ET Beckman, William A.” Solar engineering of thermal process” New York/ Chichester/ Brisbane, John Wiley and Sons, 1991.
- [4] Menzer Meryem "Analyse des performances d'un réseau électrique en présence des sources à énergie renouvelable" Mémoire de Fin d'Etudes Master (LMD), Université de BISKRA 2018.
- [5] Mémoire du master2 « Les énergies renouvelables en Algérie » université d'Oran2 institut de maintenance et sécurité industrielle.
- [6] Observatoire des énergies renouvelables (observ'ER).
- [7] La recherche a été préparée par Lin Muhammad Abbas, Kirkuk Oil Training Institute.
- [8] <https://www.connaissancedesenergies.org/fichepedagogique/geothermie>
(20/03/2023).
- [9] DJERIRI YOUCEF «Commande vectorielle d'une MADA intégrée à un système éolien» Mémoire de magister en Électrotechnique, université Djilali liabes, sidi bel-abbès, Décembre 2009.
- [10] F. Boumaraf, «Commande d'un aérogénérateur -apport des techniques de l'intelligence artificielle», Thèse de doctorat, Université Batna, 2014.
- [11] Z. Tir, «Contribution à l'étude d'une machine asynchrone à double alimentation sans balais en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne», Thèse de doctorat, Université Batna, 2014.
- [12] Rapport de conseil mondial de l'énergie éolienne « GWEC » Avril 2019.
- [13] Articles similaires <https://maghrebemergent.net/algerie-la-ferme-eolienne-de-kabertene-un-modele-reussi-d-exploitation-des-energies-renouvelables/> 22/05/2023.
- [14] DJERIRI YOUCEF «Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle» Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djilali liabes, sidi bel-abbès, november 2015.

Bibliographie

- [15] « Contrôle Des Puissances Active et Réactive Dans Les Aérogénérateurs Doubles Alimentés » Préparée au sein du (Laboratoire d'Electrotechnique de Batna 2 « LEB ».
- [16] <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienne/avantages-inconvenients-eolienne/> (25/03/2023).
- [17] N.Cherfia,« Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens » mémoire Magister. Univ.Constantine. juin2007.
- [18] A.BenAmar,« Etude de la commande d'un système éolienne base sur une GADA ».mémoire magister. Univ Batna. Avril 2016.
- [19] H. Bachir, B. Mohammed « étude d'une centrale photovoltaïque alimente un réseau intelligent » .Mémoire de master uni-ADRAR 06-2018.
- [20] Frédéric poitiers, « étude et commande de génératrices asynchrones pour L'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome - machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau) », thèses de doctorat, université de Nantes, 2003.
- [21] Site internet sur les énergies renouvelables, disponible à partir de <http://www.ddmagazine.com/2846-Energies-renouvelables-dans-le-monde-les-chiffres-2013.html> consulté 07/04/2023.
- [22] Cherfia Naim, «Etude d'une Chaîne de Conversion de l'Energie Eolienne », thèses de doctorat, Université des Frères Mentouri de Constantine, 07/11/2018.
- [23] M. Adjoudj, « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation »; Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djillali Liabès, Sidi Bel-Abbès, Algérie, 2011.
- [24] B. Multon; X. Roboam; B Dakyo ; C. Nichita ; O Gergaud ; H. Ben Ahmed, « Aérogénérateurs électriques »; Techniques de l'Ingénieur, Traités de génie électrique, D3960, Novembre 2004.
- [25] F. POITIERS« Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne »; Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 19 Décembre 2003.
- [26] Mémoire « Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien » DJERIRI YUCEF2009.
- [27] J. Martain, « Energie éolienne », Technique de l'ingénieur, Vol. B1360, 1990, rapport ECRIN, 2002.

Bibliographie

- [28] « MODÉLISATION 3D & ANALYSE DU COMPORTEMENT MODAL D'UNE PALE D'ÉOLIENNE À AXE VERTICAL DE TYPE DARRIEUS »Mémoire du master lamine yacine Adrar.
- [29] « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien » mémoire latrech mohamed taher univ Sétif.
- [30] [https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/tout-savoir-sur-l-eolienne-verticale\(25/03/2023\)](https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/tout-savoir-sur-l-eolienne-verticale(25/03/2023)).
- [31] S.Mokran « Modélisation et Commande d'un aérogénérateur à machine Asynchrone à Double Alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération »,Mémoire de exigence partielle de la maîtrise en Ingénierie, univ-Québec en Abitibi-Temiscamingue, Aout 2013.
- [32] KADRI .M.A «Étude numérique de l'écoulement d'aire à travers une éolienne Darriues de type H à pale NACA 4412»Mémoire de Master académique, université de Ouargla ,2015.
- [33] Mémoire Étude et mise en œuvre d'une éolienne à axe horizontale (essais expérimentaux et équilibrage) université de Bejaïa , Meddour abderrazak Moussaoui yougourta 2019/2020.
- [34] [https://www.clicours.com/topologies-et-generateurs-des-systeme-eoliens/\(20/04/2023\)](https://www.clicours.com/topologies-et-generateurs-des-systeme-eoliens/(20/04/2023)).
- [35] M.Siddo, Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne. Thèse d'ingénieur en électrotechnique .Université El-Harrach, Algérie, 2007.
- [36] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ».
- [37] F. Poitier, « étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de Doctorat de l'université de NANTE, 2003.
- [38] « Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien »mémoire magister 2009 UNIVERSITÉ DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBÈS.
- [39] N.Cherfia ,« Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens »,mémoire Magister. Univ.Constantine juin2007.
- [40] « CONTRIBUTION A LA COMMANDE ROBUSTE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION » DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE 2007.

Bibliographie

- [41] Mémoire «Réglage et commande de puissance d'un aérogénérateur asynchrone »2020-2021université Adrar.
- [42] Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-Ien Génie Electriquepar Arnaud GAILLARD Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service 2010.
- [43] AZZOUZ TAMAARAT «Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA» Thèse de doctorat en génie électrique, Université Mohamed Khider – Biskra, 08/12/2015.
- [44] MOUSSAOUI TAHA YACINE «Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne» Mémoire de fin étude en génie électrique, Université d'EL-Oued, 09 sept 2015.
- [45] Mémoire « Commande de la machine asynchrone à double alimentation – apport des techniques de l'intelligence artificielle » NIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES2017.
- [46] Salma. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éolienne Intégréesdans un réseau de moyenne tension ». Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, Décembre 2004.
- [47] DENDOUGA ABDELHAKIM «Contrôle des puissances active et Réactive de la machine a double alimentation (DFIM)» Thèse de doctorat en Electrotechnique, Université de Batna,10/02/2010.
- [48] Mémoire « Commande de la machine asynchrone à double alimentation – apport des techniques de l'intelligence artificielle »2017 UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES.
- [49] BOULAA MAHAMMED «commande d'une éolienne à base d'une GADA pour la production de l'énergie dans le réseau électrique» Mémoire de Fin d'Etudes en Génie Electrique, Université Djilali liabes, sidi bel-abbès ,2016.
- [50] Merour Aymen «Commande d'une GADA utilisée dans un aérogénérateur relié au réseau électrique » Mémoire master académique en Électrotechnique, Université 8 Mai 1945 – Guelma, Juillet 2021.
- [51] butec.univ-saida.dz (25/05/2023).
- [52] Sidi Mohammed Boudia, A. Benmansour, M.A.Tabet Hellal. Wind resource assessment in Algeria, Sustainable Cities and Society, vol.22, février 2016, Science Direct, Elsevier, Londres.

Annexes :

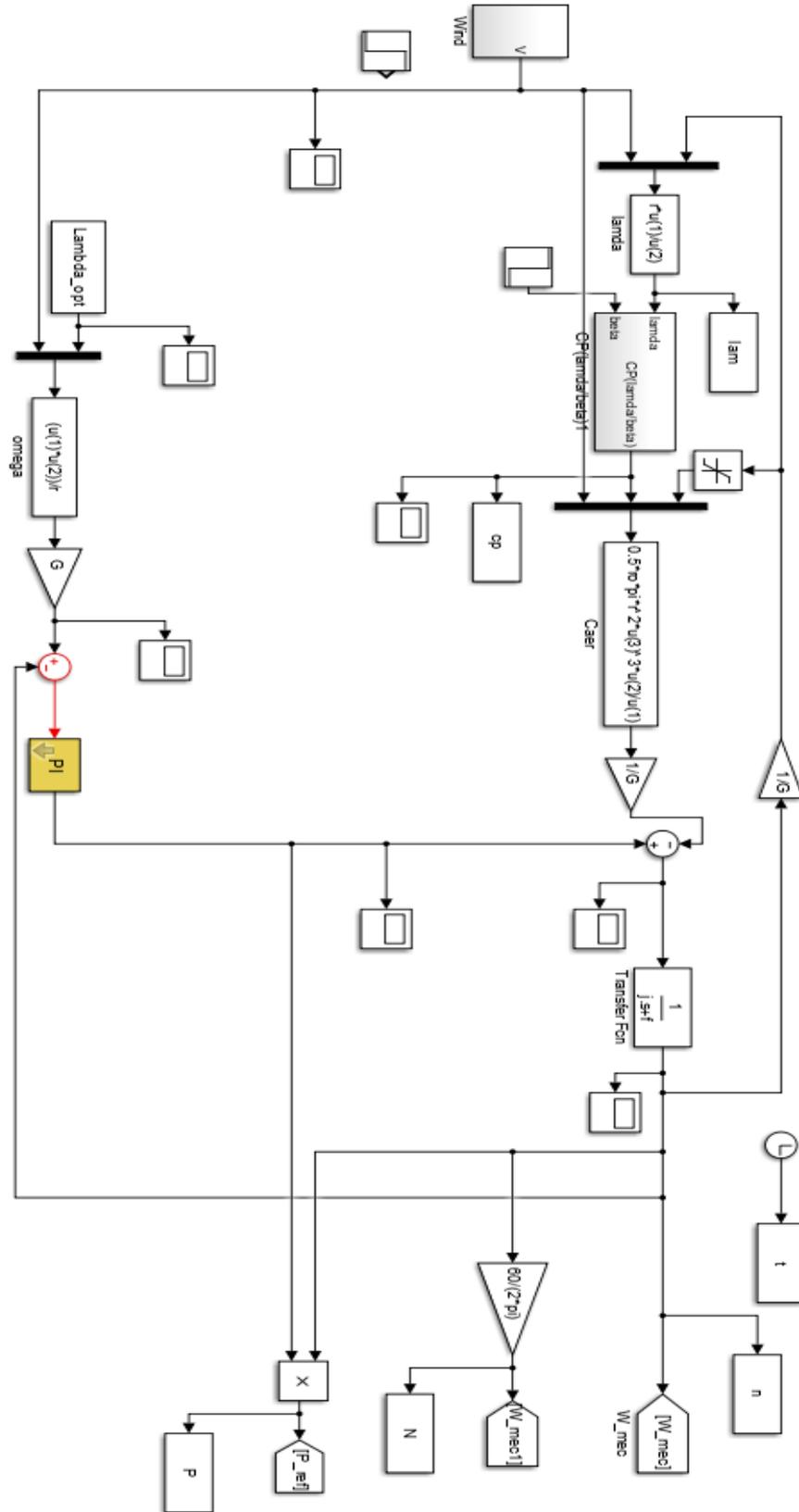
Annexe A : Tableau : Paramètres de la turbine éolienne de 1.5MW

Nom et symbole des paramètres	Valeur numérique
Nombre des pales	3
Rayon du rotor R	35.25 m
Gain du multiplicateur de vitesse G	90
Moment d'inertie total J	1000 kg.m ²
Coefficient de frottement visqueux f_v	0.0024 N.m.S ⁻¹

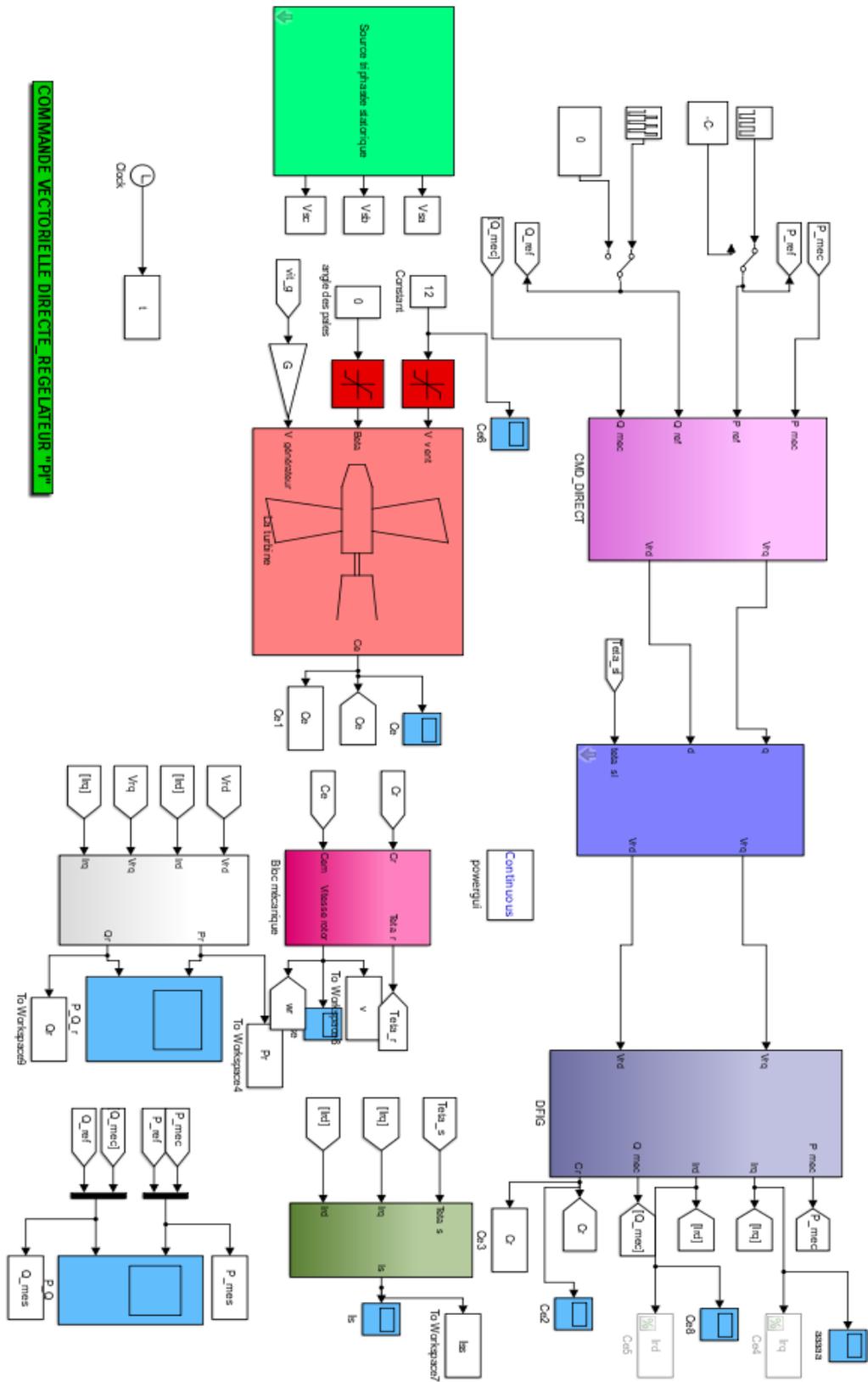
Annexe B : Paramètres de la MADA de 1.5MW

Puissance nominale	Ps = 1.5 MW.
Vitesse nominale de la GADA	n = 1450 tour/min.
Tension nominale du réseau	Vs = 690 V.
Courant nominale du stator	Is = 1760 A.
Fréquence des tensions/courants	f = 50 Hz.
Couple électromagnétique nominal	Tem = 12732 N.m.
Nombre de paires de pôles	p = 2 pair.
Tension nominale du rotor	Vr = 225 V.
Glissement nominal	g_max = 3%.
Résistance du stator	Rs = 0.012Ω.
Inductance de fuite du stator	Lsi = 0.0137 mH.
Inductance mutuelle rotor-stator	Lm = 0.0135 mH.
Résistance du rotor	Rr = 0.021Ω.
Moment d'inertie de l'éolienne	J = 100 kg m ² .
Coefficient de frottement	D = 0.0024.
Fréquence d'échantillonnage	fsw = 4 KHz.

Annexes C : Schémas de simulation MPPT_PI



Annexe D : Schéma de simulation de la commande vectorielle



Annexe E : Programme de coefficient de puissance

```
clear all
clc
L=0.01:0.01:15;
c1=0.5176;
c2=116;
c3=0.4;
c4=5;
c5=21;
c6=0.0068;
pitch=0:5:25;
tab=['r' 'b' 'g' 'c' 'm' 'k']
fprintf(tab(1))
for i=1:6
    for p=1:length(L);
        A(p)=1/(L(p)+0.08*pitch(i))-0.035/(pitch(i)^3+1);
        C(p)=c1*(c2*A(p)-c3*pitch(i)-c4)*exp(-c5*A(p))+c6*L(p);
        plot(L(p),C(p),tab(i));
        hold on;
    end
    axis ([0 15 0 0.5]);
xlabel('\lambda'),ylabel('Cp');
end
grid on
```