

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Electrotechnique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Electrotechnique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commande Electrique
Thème

Commande des puissances Active et réactive d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) intégrée à un système de conversion d'énergie éolienne

Présenté Par :

- 1) Mr. BENTALHA Mohamed
- 2) Mr. BELHAMRI Abderrahmane

Devant le jury composé de :

Dr. ADJOU DJ Redouane	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. KEDIR Khadîdja	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. ALLAM Mohamed	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année Universitaire 2023/2024



Remerciement

Remerciement

Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercier profondément Dieu, le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience, la volonté ainsi que la santé pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et nos sincères reconnaissances à Mr. ALAM Mohamed, pour sa disponibilité, ses conseils judicieux, ses directives et ses orientations concernant le travail proposé tout en nous accordant sa confiance et en nous faisant profiter de sa large expérience tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'étude.

Nos remercions les membres du jury qui ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont directement contribué au bon déroulement de ce projet de fin d'étude :

- Aux personnels du département et particulièrement ceux de la bibliothèque.
- A tous les professeurs de la faculté génie électrique d'université BELHADJ Bouchaib pour leurs conseils et leurs orientations
- A nos parents et à toute la famille BENTALHA et BELHAMRI
- A nos frères et sœurs
- A tous nos amis particulièrement ceux qui nous ont aidé dans ce projet.

Et enfin nos remerciements à toutes les personnes qui ont eu la gentillesse et la gratitude de nous aider de près ou de loin dans la réalisation de ce projet.

Et merci à tous.....

*Liste des figures
et Tableaux*

Liste des figures

Chapitre I

- Figure I.1 :** Les différents types d'énergies renouvelables.
- Figure I.2 :** Conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité.
- Figure I.3 :** la capacité totale d'éolienne dans le monde.
- Figure I.4 :** Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol
- Figure I.5 :** Atlas saisonnier de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m du sol
- Figure I.6 :** Aérogénérateur à axe vertical.
- Figure I.7:** Aérogénérateur à axe horizontal.
- Figure I.8:** Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine
- Figure I.9 :** Principales composantes d'une turbine éolienne.
- Figure I.10 :** Taille des hélices
- Figure I.11:** Tube de courant autour d'une éolienne.
- Figure I.12:** Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes
- Figure I.13:** Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.
- Figure I.14 :** Flux d'air sur un profil de pale " stall ".
- Figure I.15:** Flux d'air sur un profil de pale "pitch".

Chapitre II

- Figure II.1 :** Système de conversion éolienne.
- Figure II.2 :** Schéma simplifié d'une éolienne.
-

Liste des figures et Tableaux

- Figure II.3 :** Coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β
- Figure II.4 :** Modèle mécanique de la turbine éolienne.
- Figure II.5 :** Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.
- Figure II.6 :** Puissance de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.
- Figure II.7 :** Couple de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.
- Figure II.8 :** les zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.
- Figure II.9 :** Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation
- Figure II.10 :** Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.
- Figure II.11 :** Simulation du Profil du vent appliqué.
- Figure II.12 :** les caractéristiques optimales de l'éolienne.
- Figure II.13 :** les Résultats de la puissance pour les deux techniques.
- Figure II.14 :** Résultats de simulation du MPPT sans asservissement de vitesse.
- Figure II.15 :** Résultats de simulation du MPPT avec asservissement de vitesse.
- Figure II.16 :** Composition de la MADA (stator et rotor).
- Figure II.17 :** Schéma des enroulements de la MADA.
- Figure II.18 :** Référentiel tournant d'axes (d-q).
- Figure II.19 :** Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC.
- Figure II.20 :** Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC.
- Figure II.21 :** Principe de commande en MLI sinus-triangulaire.
- Figure II.22 :** Résultats de simulation de la chaîne éolienne (MADA Turbine)

Chapitre III

- Figure III.1:** Equivalence entre la commande d'une MCC et la commande vectorielle d'une MADA.
- Figure III.2 :** Orientation du flux statorique.
- Figure III.3:** Schéma bloc du système à réguler.
-

Liste des figures et Tableaux

- Figure III.4:** Schéma bloc de la commande directe
- Figure III.5:** Schéma bloc de la commande indirecte.
- Figure III.6:** Système régulé par un régulateur PI.
- Figure III.7:** Schéma bloque de la CVD.
- Figure III.8:** Schéma bloque de la CVI.
- Figure III.9:** Résultats d'simulation de la CVD.
- Figure III.10:** Résultats d'simulation de la CVI.
- Figure III.11:** CVD à facteur de puissance unitaire.
- Figure III.12 :** CVI à facteur de puissance unitaire.
- Figure III.13 :** CVD et CVI avec la variation paramétrique.
- Figure III.14 :** CVD avec l'analyse de THD.
- Figure III.15 :** CVI avec l'analyse de THD.

Liste des tableaux

Chapitre II

- Tableau II.1 :** Table de commutation du convertisseur NPC 3 niveaux

Chapitre III

- Tableau III.1 :** la comparaison entre la commande directe Et indirecte
-

Notations & symboles

Notations & symboles

Notation

Symboles	Significations	Unités
m	Masse d'air	Kg
S	Surface d'aire balayée par les pales	m^2
v	Vitesse du vent	m/s
ρ	masse volumique de l'air	Kg/m^3
P_v	Puissance de la masse d'air qui traverse la surface S	W
P_t	Puissance aérodynamique de la turbine	W
λ	Ratio de vitesse	-
R	Rayon de la turbine éolienne	m
β	Angle de calage des pâles	deg
C_p	Coefficient de puissance	-
Ω_t	Vitesse de la turbine	Rad/s
C_t	Couple de la turbine	N.m
$C_{méc}$	Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice	N.m
$\Omega_{méc}$	Vitesse de rotation (mécanique) de la génératrice	Rad/s
G	Gain du multiplicateur	-
$C_{méc}$	Couple mécanique après le multiplicateur	N.m
C_{em}	Couple électromagnétique de la machine	N.m
C_f	Couple de frottement visqueux	N.m
J_g	Moment d'inertie de la génératrice	$Kg.m^2$
J_t	Moment d'inertie de la turbine	$Kg.m^2$
J_T	Moment d'inertie Total (génératrice + turbine)	$Kg.m^2$
f_r	Coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice	N.m.s/rd
C_t^*	Couple turbine référentiel	N.m
Ω_t^{\wedge}	Vitesse de la turbine estimé	Rad/s
λ_{opt}	Ratio de vitesse optimale	-
v^{\wedge}	Vitesse du vent estimé	m/s
P_t^{\wedge}	Puissance de la turbine estimé	W
C_t^{\wedge}	Couple turbine	N.m
$C_{méc}^*$	Couple de référence	N.m
$\Omega_{méc}^*$	Vitesse mécanique de la génératrice de référence	rad/s
g	Glissement de la MADA	-
w_s	Pulsation statorique	Rad/s
w_r	Pulsation rotorique	Rad/s
N_r	Nombre de spire du rotor	-
N_s	Nombre de spire du stator	-
m	Rapporte de transformation	-
f	Fréquence du réseau	Hz
f_s	Fréquence du stator	Hz
f_r	Fréquence du rotor	Hz
f_{sr}	Fréquence du glissement	Hz
E_r	Valeur efficace des fem rotorique	V
E_s	Valeur efficace des fem statorique	V
I_r	Courant rotorique	A
I_s	Courant statorique	A
S_s	Puissance apparente statorique	VA

Notations & symboles

S_r	<i>Puissance apparente rotorique</i>	VA
θ	<i>Angle définit la position du rotor par rapport au stator</i>	deg
$V_{sa,b,c}$	<i>Tensions triphasés statorique</i>	V
$V_{ra,b,c}$	<i>Tensions triphasés rotorique</i>	V
$I_{sa,b,c}$	<i>Courants triphasés statorique</i>	A
$I_{ra,b,c}$	<i>Courants triphasés rotorique</i>	A
$\Phi_{sa,b,c}$	<i>Flux triphasés statorique</i>	Web
$\Phi_{ra,b,c}$	<i>Flux triphasés rotorique</i>	Web
R_s	<i>Résistance des enroulements statorique</i>	Ω
R_r	<i>Résistance des enroulements rotorique</i>	Ω
L_s	<i>Inductance cyclique statorique</i>	H
L_r	<i>Inductance cyclique rotorique</i>	H
M_s	<i>Inductance mutuelle statorique</i>	H
M_r	<i>Inductance mutuelle rotorique</i>	H
M	<i>Inductance magnétisante de la MADA</i>	H
M_{sr}	<i>Inductances mutuelles entre stator-rotor</i>	H
M_{rs}	<i>Inductances mutuelles entre rotor-stator</i>	H
m	<i>Valeur maximale de l'inductance mutuelles</i>	H
l_s	<i>Inductances propres statorique</i>	H
l_r	<i>Inductances propres rotorique</i>	H
m	<i>Valeur maximale de l'inductance mutuelle</i>	H
V_s	<i>Tension simple statorique</i>	V
V_{dc}	<i>Tension de bus continu</i>	V
$P(\theta)$	<i>Matrice de transformation directe de Park</i>	-
$P(\theta)^{-1}$	<i>Matrice de transformation inverse de Park</i>	-
V_{dqs}	<i>Tension statorique dans le repère dq</i>	-
V_{dsr}	<i>Tension rotorique dans le repère dq</i>	-
P_s	<i>Puissance active statorique</i>	W
Q_s	<i>Puissance réactive statorique</i>	VAR
P_{em}	<i>Puissance électromagnétique</i>	W
P	<i>Nombre de paires de pôles</i>	-
P_{sref}	<i>Puissance active statorique de référence</i>	W
Q_{sref}	<i>Puissance réactive statorique de référence</i>	VAR
K_p	<i>Gain proportionnel</i>	-
K_i	<i>Gain intégral</i>	-

Abréviation

<i>PV</i>	<i>:</i>	<i>Photovoltaïque.</i>
<i>VAWT</i>	<i>:</i>	<i>Vertical Axis Wind Turbine.</i>
<i>HAWT</i>	<i>:</i>	<i>Horizontal Axis Wind Turbine.</i>
<i>AC</i>	<i>:</i>	<i>Alternating Current.</i>
<i>DC</i>	<i>:</i>	<i>Direct Current.</i>
<i>MAS</i>	<i>:</i>	<i>Machine Asynchrone.</i>
<i>GADA</i>	<i>:</i>	<i>Génératrice Asynchrone à Double Alimentation.</i>
<i>MADA</i>	<i>:</i>	<i>Machine Asynchrone à Double Alimentation.</i>
<i>MPPT</i>	<i>:</i>	<i>Maximum Power Point Tracking.</i>
<i>CCM</i>	<i>:</i>	<i>Convertisseur Côté Machine.</i>
<i>CCR</i>	<i>:</i>	<i>Convertisseur Côté Réseau.</i>
<i>MLI</i>	<i>:</i>	<i>Modulation de Largeur Impulsion.</i>
<i>MCC</i>	<i>:</i>	<i>Machine à Courant Continu.</i>
<i>CVD</i>	<i>:</i>	<i>Commande Vectorielle Directe.</i>
<i>CVI</i>	<i>:</i>	<i>Commande Vectorielle Indirecte.</i>
<i>PI</i>	<i>:</i>	<i>Proportionnelle Intégral.</i>

Sommaire

Sommaire

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	1
<i>Chapitre I : L'état de l'art des systèmes énergies renouvelables</i>	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Différents types d'énergies renouvelables.....	5
I.2.1. Energie biomasse	5
I.2.2. Energie solaire	5
I.2.3. Energie géothermique	6
I.2.2. Energie hydroélectrique	6
I.2.3. Energie Eolien	6
I.3. Généralité sur l'éolienne.....	7
I.3.1. Définition de l'énergie éolienne.....	7
I.3.2. Historique de l'énergie éolienne.....	8
I.3.3. Gisement éolien en Algérie	9
I.3.4. les différents types d'éoliennes	11
I.3.4.1. Eoliennes à axe vertical	11
I.3.4.1.2. Avantages	11
I.3.4.1.3. Inconvénient	12
I.3.4.2. Eoliennes à axe horizontal	12
I.3.4.2.1 Avantages	12
I.3.4.2.2 Inconvénient	13
I.3.5. Principales composantes des éoliennes à axe horizontal	13
I.3.6. Taille des aérogénérateurs.....	15

Sommaire

I.3.7. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique	15
I.3.7.1. Loi de Betz.....	15
I.3.7.2. Utilité de la vitesse variable.....	17
I.3.7.3. Modes de régulation.....	18
I.3.7.3.1. Système à décrochage aérodynamique « stall ».....	18
I.3.7.3.2. Système d’orientation des pales « Pitch ».....	19
I.8. Avantages Et Inconvénients De L’énergie Eolienne.....	20
I.8.1. Avantages.....	20
I.8.2. Inconvénients.....	20
I.9. conclusion.....	21
 <i>Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne (Turbine & MADA)</i> 	
II.1. Introduction.....	22
II.2. Le comportement général du système.....	23
II.3. Modélisation mathématique de la turbine éolienne.....	24
II.3.1. Modèle mathématique du vent.....	24
II.3.2. Modèle énergétique de la turbine.....	25
II.3.2.1. Hypothèses simplificatrices.....	25
II.3.2.2. Modèle d’équations.....	25
II.3.2.2.1. Puissance de vent.....	25
II.3.2.2.2. Le coefficient de puissance C_p	26
II.3.2.2.3. La puissance aérodynamique	28
II.3.2.3. Modèle du multiplicateur	28
II.3.2.4. Modèle de l’arbre mécanique.....	29
II.3.2.5. Schéma bloc du modèle de la turbine	29
II.3.2.6. Résultats de la simulation obtenus.....	30

Sommaire

II.4. Stratégie de commande de la turbine éolienne.....	31
II.4.1. Contrôle sans asservissement de vitesse mécanique.....	32
II.4.2. Contrôle avec asservissement de vitesse mécanique.....	34
II.4.3. Résultats obtenus du contrôle MPPT.....	35
II.4.3.1. MPPT sans asservissement de vitesse mécanique.....	37
II.4.3.2. MPPT avec asservissement de vitesse mécanique.....	38
II.4.3.3. Interprétation des résultats.....	39
II.5. Généralités sur les machines asynchrones à double alimentation.....	40
II.5.1. Principe de fonctionnement.....	41
II.5.2. Les modes de fonctionnement	42
II.5.3. Domaine d'application de la MADA	43
II.5.4. Intérêt de la MADA dans l'application éolienne.....	44
II.5.5. Avantages et inconvénients de la MADA.....	44
II.5.5.1. Avantages.....	44
II.5.5.2. Inconvénients.....	45
II.5.6. Modélisation de la MADA.....	45
II.5.6.1. Hypothèses simplificatrices.....	45
II.5.6.2. Modèle mathématique de la MADA.....	47
II.5.6.2.1. Equations dans le repère triphasé (a, b, c).....	47
a)- Equations électriques.....	47
b)- Equations magnétiques.....	47
c)- Equation mécanique.....	48
II.5.6.2.2. Equations dans le repère de Park (d, q, o).....	49
a)-Matrice de Park	49
b)-L'application de la transformation de Park	50

Sommaire

c)-Expression de puissance	52
d)-Expression de couple	52
II.6. Alimentation de la machine.....	53
II.6.1. Modélisation de l'onduleur trois niveaux de type NPC.....	54
II.6.2. Principe de la commande MLI.....	56
II.7. Résultats de Simulation obtenus.....	57
II.7.1. Interprétation des résultats.....	58
II.8. Conclusion.....	59

Chapitre III : Commande vectorielle de la MADA

III.1. Introduction.....	60
III.2. Technique d'orientation du flux de la GADA.....	61
III.3. Synthèse du régulateur PI.....	65
III.4. Résultats de simulations obtenues	66
III.4.1. Test de suivi de consigne.....	78
III.4.1.2. Interprétation des résultats.....	71
III.4.2. Amélioration de facteur de puissance.....	72
III.4.2.1. Interprétation des résultats.....	74
III.4.3. Tests de robustesse.....	74
III.4.3.1. Interprétation des résultats.....	76
III.4.4. Test de THD.....	77
III.4.4.1. Interprétation des résultats.....	77
III.5. Conclusion.....	78
Conclusion générale	79
Références Bibliographiques.....	80
Annexes.....	82

Introduction
générale

Introduction générale

L'énergie est un élément essentiel dans les processus de développement et de prospérité économique des nations en raison de son rôle majeur dans l'augmentation de la productivité, l'octroi d'indépendance à ses propriétaires et la libération de la dépendance dans divers domaines. L'énergie peut être définie comme le travail effectué par une force donnée. Elle ne peut pas être vue, mais nous voyons son effet à travers ce qu'elle fait et ce qu'elle produit. Ainsi, la présence et la possession de l'énergie permettent d'accomplir des tâches complexes, de réaliser des projets de développement et économiques dans divers domaines.

Depuis longtemps, l'exploitation de l'énergie et sa conversion ont été des formes de progrès. L'homme a découvert plusieurs formes d'énergie au fil des époques, les maîtrisant et les utilisant selon ses besoins. Au XVIIIe siècle, le monde a commencé à adopter la vapeur comme source d'énergie pour faire fonctionner des machines et déplacer des trains. Cependant, cela n'a pas atteint les attentes en raison de certaines difficultés, ce qui a conduit à une avancée majeure avec la découverte des combustibles fossiles au XIXe siècle.

La découverte du charbon, du pétrole et du gaz naturel a conduit à l'émergence de nouvelles sources d'énergie, plus efficaces que l'énergie à vapeur et facilement disponibles. Ce passage de l'énergie à vapeur à l'énergie fossile a eu un impact significatif sur la société et l'économie, permettant le développement de nouvelles industries telles que l'industrie lourde et l'industrie chimique, contribuant ainsi à la croissance économique et à l'amélioration des niveaux de vie. Le monde a connu une révolution industrielle avec une exploitation intensive du pétrole et du gaz comme sources d'énergie, abandonnant tout le reste. Au début, le pétrole était considéré comme un trésor que les nations se disputaient en raison de la valeur ajoutée qu'il offrait. Des guerres ont éclaté entre les pays cherchant à obtenir une part suffisante, mais malgré ces sacrifices et l'énormité des efforts déployés, les résultats n'étaient pas aussi idéaux qu'on l'imaginait. Les questions ont commencé à se poser sur l'efficacité de cette énergie, son rendement comparé à son impact négatif sur le climat et l'environnement, ainsi que sur sa nécessité d'être épuisée un jour. L'exploitation excessive a conduit aux changements climatiques, à la pollution de l'eau et de l'air, pouvant avoir des répercussions négatives sur la vie humaine sur cette planète. Ainsi, pour résoudre ce problème complexe, des efforts ont été déployés, des investissements ont été faits pour trouver une alternative respectueuse de l'environnement, aussi efficace que l'énergie fossile. La solution optimale dans de telles

circonstances était de trouver une source propre, exempte d'émissions, efficace et durable, ce qui a orienté l'attention vers les énergies renouvelables, qui pourraient être une solution idéale à la crise énergétique.

L'énergie renouvelable est une énergie issue de sources naturelles inépuisables, considérée comme respectueuse de l'environnement en raison de l'absence d'émissions pendant sa production. Une utilisation correcte et réfléchie de ces sources pourrait répondre aux besoins en électricité des pays, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives dans les domaines de l'industrie et de l'agriculture, tout en créant des opportunités d'emploi et contribuant à la réduction du chômage.

Rappelons que l'une des principales sources d'énergie renouvelable est l'énergie éolienne, qui est actuellement l'un des sujets les plus répandus dans le monde. Tout le monde cherche à l'adopter en tant que source d'énergie alternative en raison de ses avantages et de ses grandes perspectives d'avenir. Les parcs éoliens se sont répandus dans les grands pays, et des technologies ont été découvertes pour exploiter pleinement cette richesse naturelle.

Le processus de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique se fait à travers des générateurs à induction connectés au réseau électrique. Ces générateurs garantissent une grande efficacité et ont la capacité de fonctionner à des vitesses variables synchronisées avec la vitesse du vent. Dans ce domaine, l'utilisation courante est la machine asynchrone à double alimentation (MADA), qui est de plus en plus utilisée dans les applications éoliennes.

L'objectif principal de ce mémoire est de réaliser la commande vectorielle de la Machine Asynchrone Double Alimentation (MADA) entraînée par une turbine éolienne à vitesse variable afin de produire de l'énergie électrique. Pour ce faire, notre mémoire est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre servira d'introduction au monde des énergies renouvelables à travers l'énergie éolienne. Nous y aborderons son historique, son importance, ainsi que ses avantages et inconvénients.
- Dans le deuxième chapitre, nous présenterons le système de l'énergie éolienne en modélisant une éolienne sous le logiciel MALAB/SIMILINK, en détaillant ses composants et en expliquant le mécanisme de conversion d'énergie à travers celle-ci. Ensuite nous le consacrerons à l'étude de la machine asynchrone à double alimentation en

Introduction générale

examinant ses équations mathématiques, ainsi que son fonctionnement à travers sa modélisation via le logiciel MATLAB.

- Dans le dernier chapitre, nous mettrons en œuvre la commande vectorielle direct et indirect de la MADA pour contrôler les puissance active et réactive suivi d'une analyse détaillée des résultats obtenus.

Enfin notre mémoire sera clôturé par une conclusion générale.

*L'état de l'art des systèmes énergies
renouvelables*

*Chapitre I :**L'état de l'art des systèmes énergies renouvelables***I.1. Introduction :**

Avec l'augmentation notable des taux de consommation d'énergie dans le monde, cela pourrait conduire à une crise énergétique à court terme en raison de la dépendance quasi totale des sources d'énergie non renouvelables comme moyen de production d'électricité. Ainsi, l'orientation vers l'exploitation de la nature et de ses richesses pourrait permettre de trouver des solutions satisfaisantes en termes d'efficacité et de qualité de l'énergie produite.

Le monde d'aujourd'hui a connu une transformation fondamentale du domaine des systèmes de production de l'électricité, qui est la dérégulation du marché de l'électricité. Les raisons de cette dérégulation sont variées et multiples selon les pays. Cependant une de ces conséquences est l'apparition de nouveaux moyens de production nommés les énergies renouvelables au sein des réseaux électriques existants. Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie inépuisable, disponibles à volonté, diverses et variées. Grâce à ces énergies peu polluantes, on peut envisager un système de production énergétique prolifique qui possède de nombreux avantages. Elles sont plus propres, plus respectueuses de la nature que les énergies fossiles et fissiles, écologiques, disponibles en masse autour du globe et sont gratuites une fois les installations de production rentabilisées [3].



Figure I.1 : Les différents types d'énergies renouvelables

I.2. Différents types d'énergies renouvelables

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (l'éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire) en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du Soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre. Etant donné que l'énergie mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable directement que ponctuellement (pompage direct de l'eau, moulins,...). Cette énergie est donc majoritairement transformée en énergie électrique. A l'exception de la biomasse et de l'hydraulique, l'autre inconvénient majeur des énergies renouvelables vient du non régularité des ressources. A l'opposé, les fluctuations de demande en puissance selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément en phase avec les ressources. Par exemple, en hiver il y a un besoin énergétique plus important pour le chauffage et l'éclairage mais les journées d'ensoleillement sont plus courtes. La solution à retenir est certainement la diversification voire le couplage entre plusieurs sources, par exemple du solaire avec l'énergie éolienne. Un aperçu sur les différents types d'énergie renouvelable d'une façon générale est nécessaire [8].

I.2.1. Energie biomasse

Le terme, Biomasse, désigne l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale (bois, déchets végétaux, algues) pouvant devenir source d'énergie par combustion. La biomasse constitue parmi les premières sources d'énergies renouvelables produites en Europe devant l'énergie hydraulique, éolienne et géothermique. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasses. Elle rejette des gaz à effet de serre mais qui sont toutefois absorbés naturellement par les arbres. Cependant, elle pourra procurer l'énergie la moins chère et surtout la plus locale du marché [3].

I.2.2. Energie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée. Le solaire peut être exploité à grande échelle dans des parcs prévus à cet effet ou à petite échelle chez les particuliers. Cette énergie est propre, n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, gratuite, inépuisable et disponible partout dans le monde [3].

I.2.3. Énergie géothermique

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité [3].

I.2.4. Énergie hydroélectrique

L'énergie hydroélectrique est une énergie qui utilise l'énergie hydraulique pour produire de l'électricité grâce à une turbine hydroélectrique. Celle-ci convertit l'énergie mécanique de l'eau en mouvement (chute d'eau, cours d'eau, courant). Elle produit donc de l'électricité de manière renouvelable et en émettant très peu de gaz à effet de serre. Ce n'est pas tout à fait une énergie durable, puisqu'elle implique le plus souvent la création d'un barrage, donc d'un obstacle à la circulation des espèces, des sédiments et des embarcations [3].

I.2.5. Éolien

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes, mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante.

Notre étude s'intéresse à la filière éolienne où plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie [1].

I.3. Généralité sur l'éolienne

I.3.1. Définition de l'énergie éolienne

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

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie fossile (Centrale thermique ou à cycle combiné) sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

Hormis l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles [4].

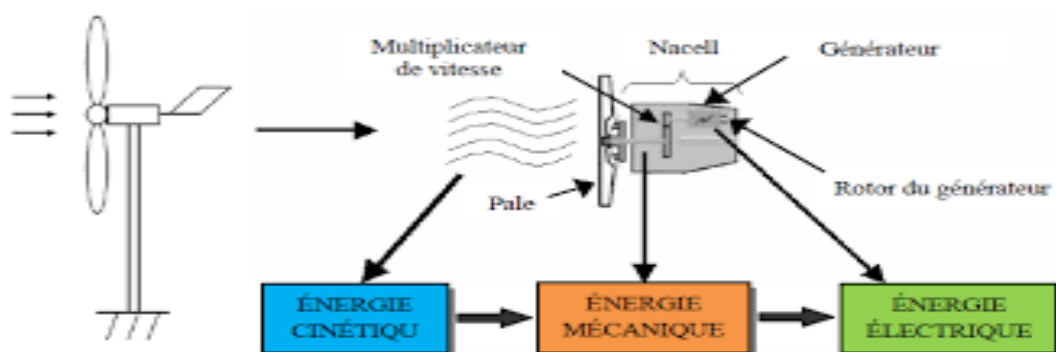


Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité.

I.3.2. Historique de l'énergie éolienne :

L'histoire de l'énergie éolienne remonte à l'antiquité, avec l'utilisation de moulins à vent pour produire de l'énergie mécanique. Les premiers moulins à vent ont été utilisés pour pomper l'eau et moulinier le grain, et ont évolué au fil des siècles pour inclure des améliorations telles que des pales plus efficaces et des matériaux plus légers.

Au XIXe siècle, l'énergie éolienne a commencé à être utilisée pour produire de l'électricité, avec la construction de la première éolienne électrique par Charles F. Brush en 1887. Cependant, l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité n'a pas connu un grand succès immédiat, car elle était souvent considérée comme une source d'énergie intermittente et non fiable [9]. Cependant, avec l'apparition des crises pétrolières dans les années 1970, l'intérêt pour l'énergie éolienne a été réactivé, et des programmes de recherche gouvernementaux et universitaires ont été lancés pour développer de nouvelles technologies éoliennes plus efficaces et rentables. Les premières éoliennes modernes à grande échelle ont été construites dans les décennies 1980 et 1990, principalement au Danemark, en Allemagne et aux Pays-Bas [5].

Depuis lors, l'énergie éolienne a connu une croissance rapide, avec une augmentation significative de la puissance installée mondiale. En 2021, le parc éolien mondial atteignait 837 GW, avec une augmentation de 12 % par rapport à l'année précédente. L'énergie éolienne est maintenant considérée comme l'une des sources d'énergie renouvelables les plus prometteuses pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et contribuer à la transition écologique [6].

Capacités éoliennes terrestres installées d'ENGIE dans le monde

Au 31 décembre 2022

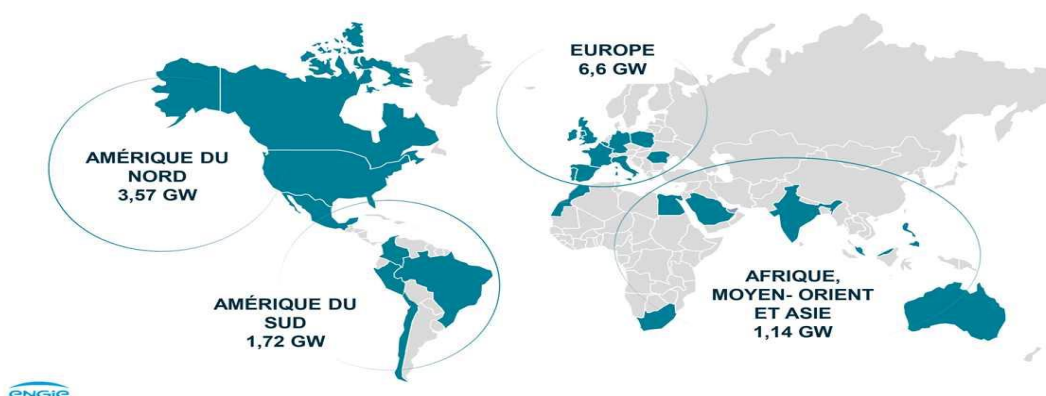


Figure I.3 : la capacité totale d'éolienne dans le monde [7]

I.3.3. Gisement éolien en Algérie :

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à l'autre. Ce qui est dû principalement, à la diversité de la topographie et du climat. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen qu'est caractérisé par un littoral de 1200km et un relief, représenté par deux grandes chaînes de montagnes : l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

Le Sud Algérien est caractérisé par des vitesses de vent plus élevées que le Nord, surtout du côté Sud-ouest où les vitesses sont supérieures à 4m/s, et dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque que la vitesse moyenne est globalement peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au Nord et Biskra au Sud [8].

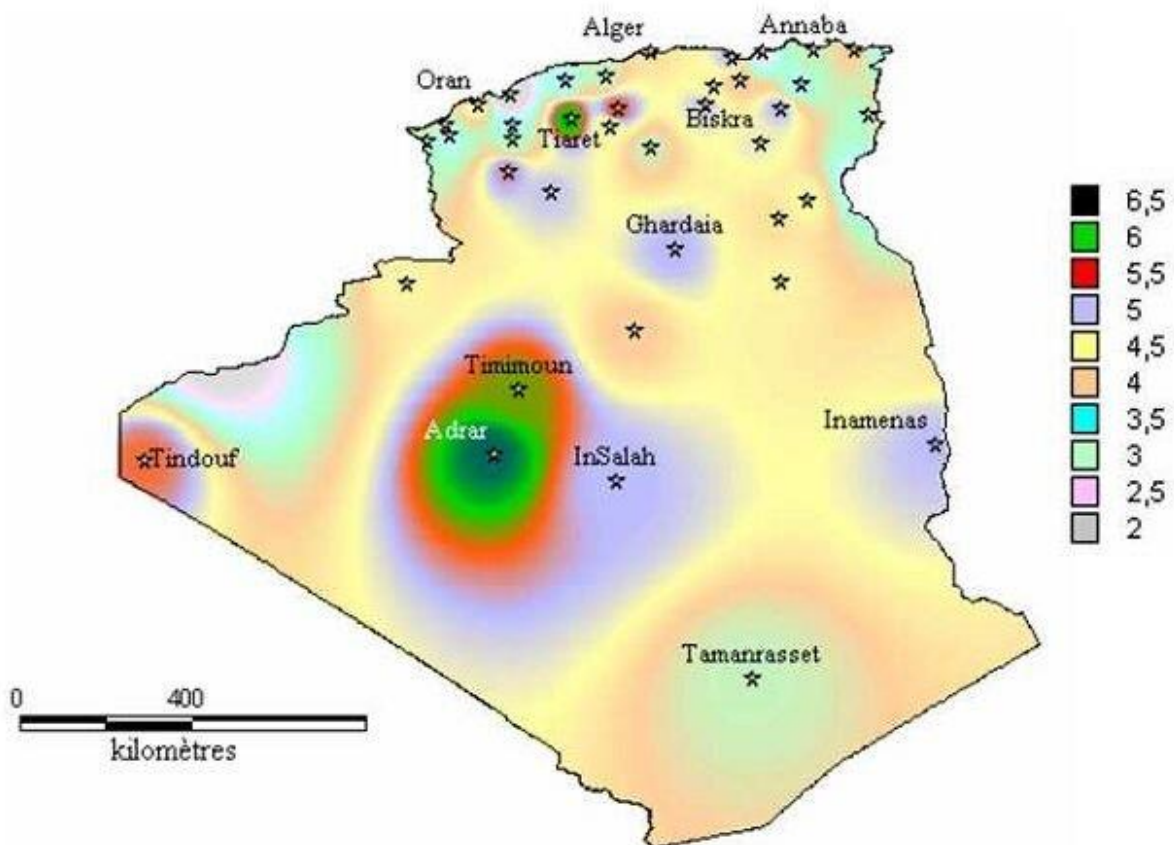


Figure I.4 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'il ne faut pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion d'énergie éolienne.

En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en (figures I.5) (Eté, Printemps, Hiver et Automne). On remarque en général, que les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année

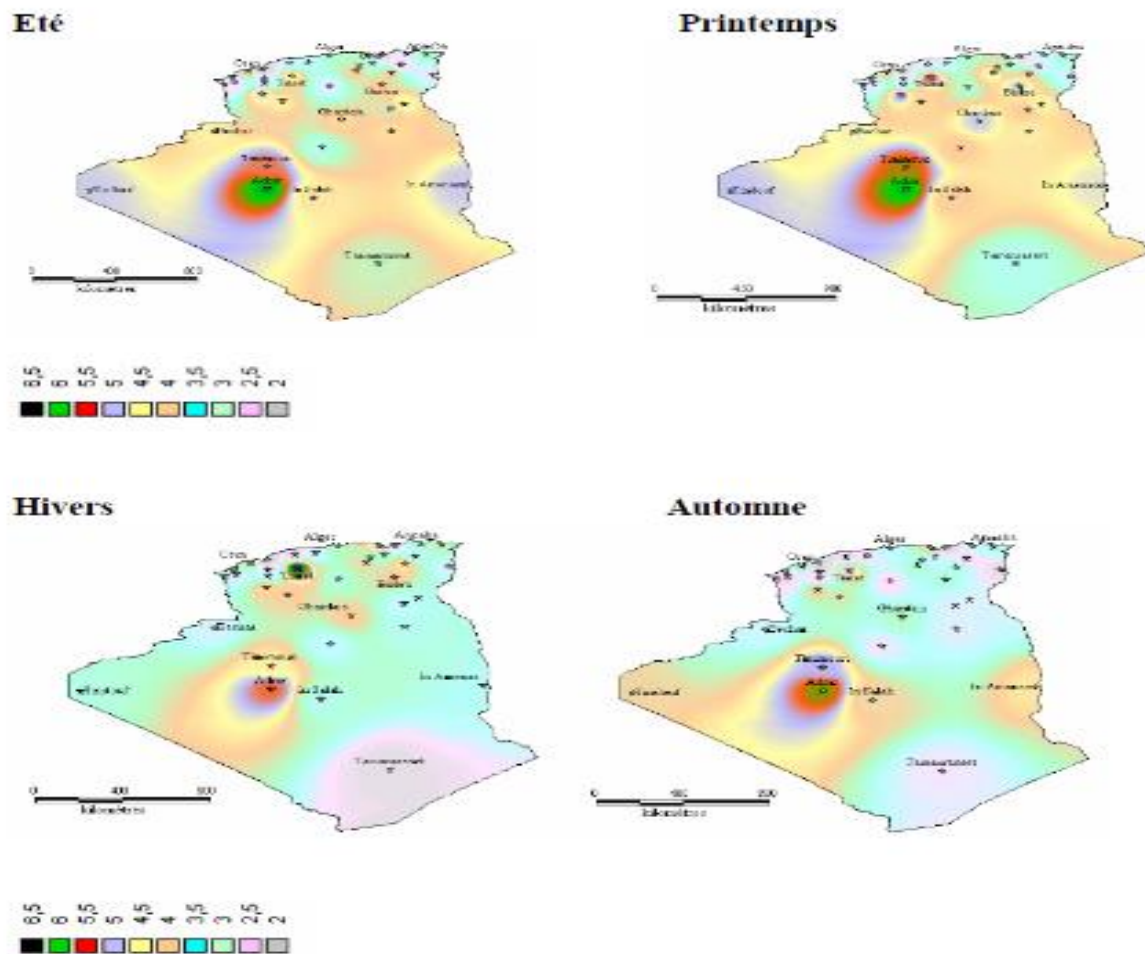


Figure I.5 : Atlas saisonnier de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m du sol.
(Automne, Hiver, Printemps et Eté)

La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW à Adrar (Sud-Ouest), a été confiée le 21/01/2010 au groupe Français VERGNET. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz (CEEG), filiale du groupe SONELGAZ.[9]

I.3.4. les différents types d'éoliennes :

Du point de vue structure, on distingue deux grands types d'éoliennes qui sont celles à axe vertical et celles à axe horizontal

I.3.4.1. Eoliennes à axe vertical : Elles sont appelées éoliennes à axe vertical car l'axe de rotation du rotor est vertical et perpendiculaire à la direction du vent. Elles sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles [2].

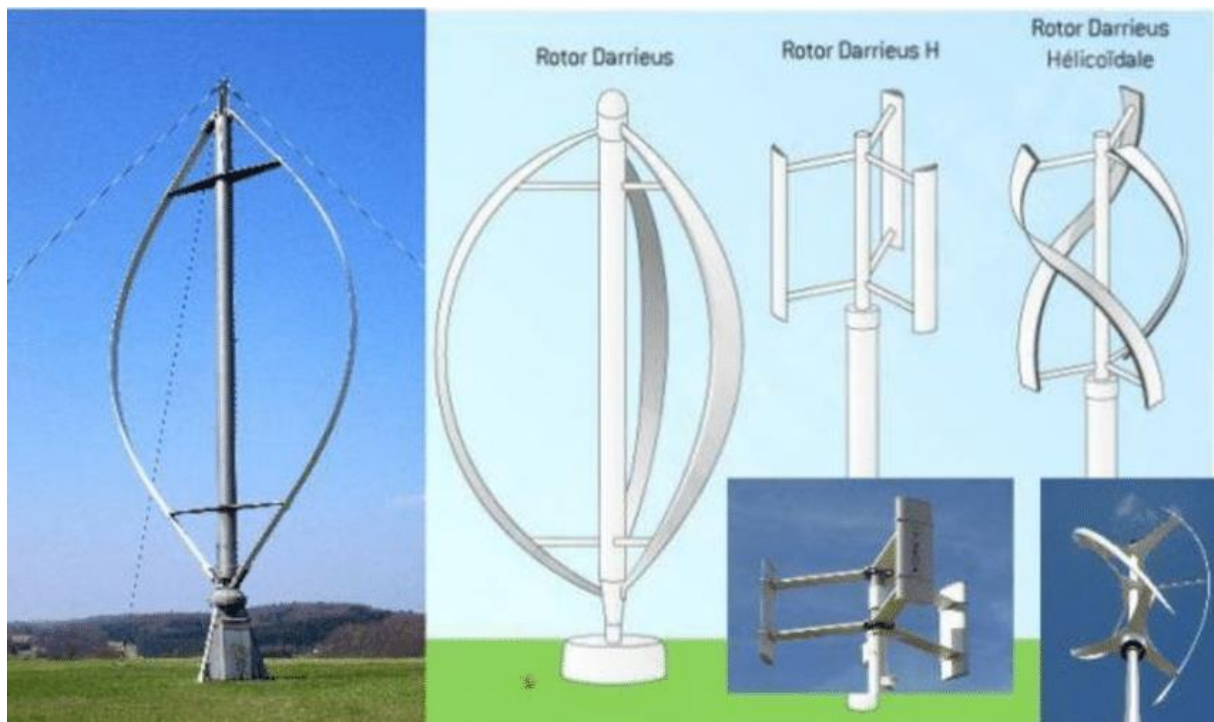


Figure I.6 : Aérogénérateur à axe vertical.

I.3.4.1.2. Avantages :

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien [2].

I.3.4.1.3. Inconvénient :

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour

I.3.4.2. Eoliennes à axe horizontal : Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles sont de conception simple, comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multiples pour le pompage de l'eau. Il existe des éoliennes à axe horizontal à marche lente et à marche rapide [2].



Figure I.7: Aérogénérateur à axe horizontal.

I.3.4.2.1. Avantages :

- 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

I.3.4.2.2. Inconvénient :

- 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 son encore utilisé pour la production d'électricité dans les zones isolées.
- Elles sont de faible puissance destinée à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple

I.3.5. Principales composantes des éoliennes à axe horizontal :

L'éolienne à axe horizontale (Figure I.7), étant le sujet de notre étude, sera décrite en citant ses différents composants.

En générale, l'éolienne à axe horizontale est constituée de trois éléments principaux ; La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu.[13]

- ❖ **La tour** : C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.
- ❖ **La nacelle** : Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. Elle comprend les éléments suivants :
 - Arbre.
 - Multiplicateur.
 - Roulements.
 - Le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

- Le générateur qui est dans le cas de cet exposé une MADA.
- Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent)

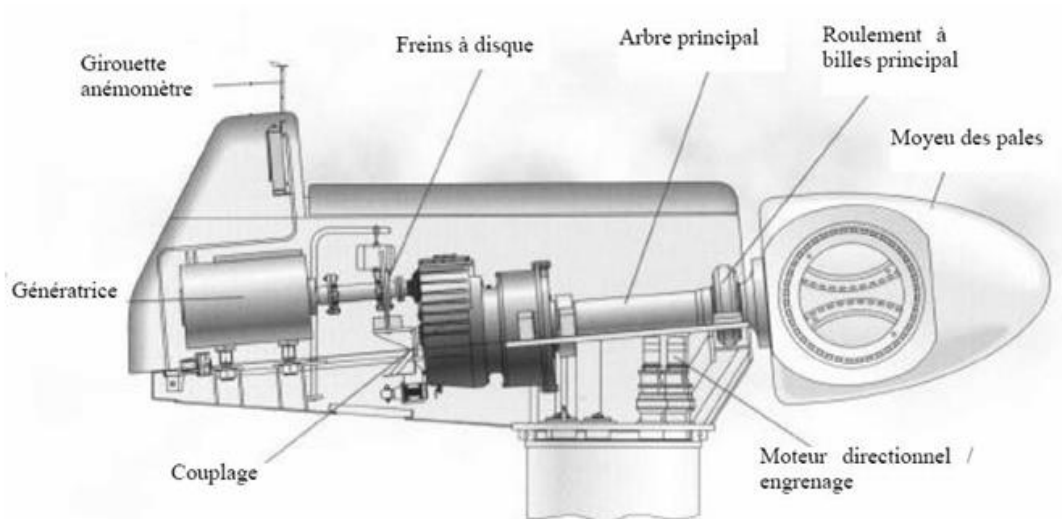


Figure I.8: Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.

- ❖ **Les pales** : Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.
- ❖ **Le moyeu** : C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent [4].

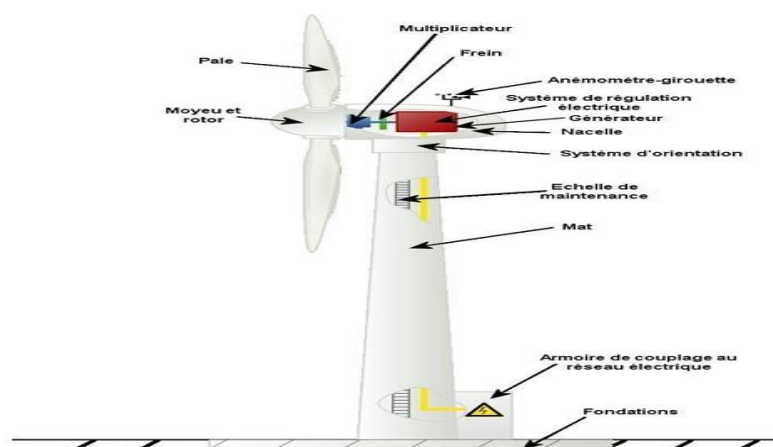


Figure I.9 : Principales composantes d'une turbine éolienne.

I.3.6. Taille des aérogénérateurs :

Les chercheurs ont eu l'idée que pour exploiter le mieux possible la force du vent, il faut que l'hélice balaie la surface où le vent est maximum, c'est-à-dire le plus haut possible du sol, ce qui demande aux constructeurs des hélices hautes perchées, donc de grands diamètres.

Plus le diamètre du rotor sera grand, plus la puissance récupérable sera importante pour un vent donné. Actuellement la gamme des éoliennes disponibles sur le marché des éoliennes est très large, de 50 Watt (diamètre de 90Cm) à 5 MW et plus (+ de 124 m de diamètre). Les perspectives de l'avenir sont représentées dans (figure I.10).

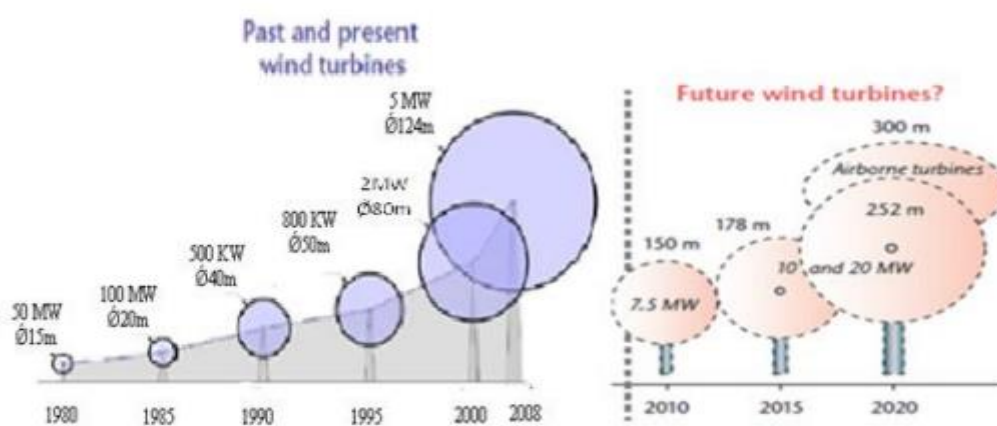


Figure I.10 : Taille des hélices.

I.3.7. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique :

I.3.7.1. Loi de Betz :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur (Figure I.11) 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 :

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

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

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

Soit en remplaçant m par son expression dans (1.1) :

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

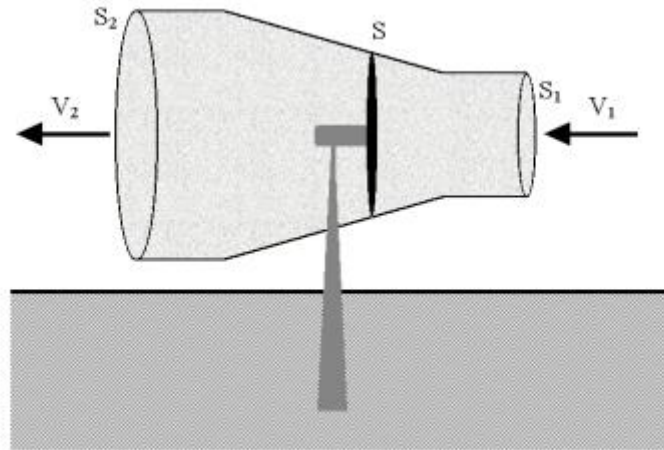


Figure I.11: Tube de courant autour d'une éolienne.

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

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

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

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

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure I.12), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_t}{P_v}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $\frac{16}{27}$ 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

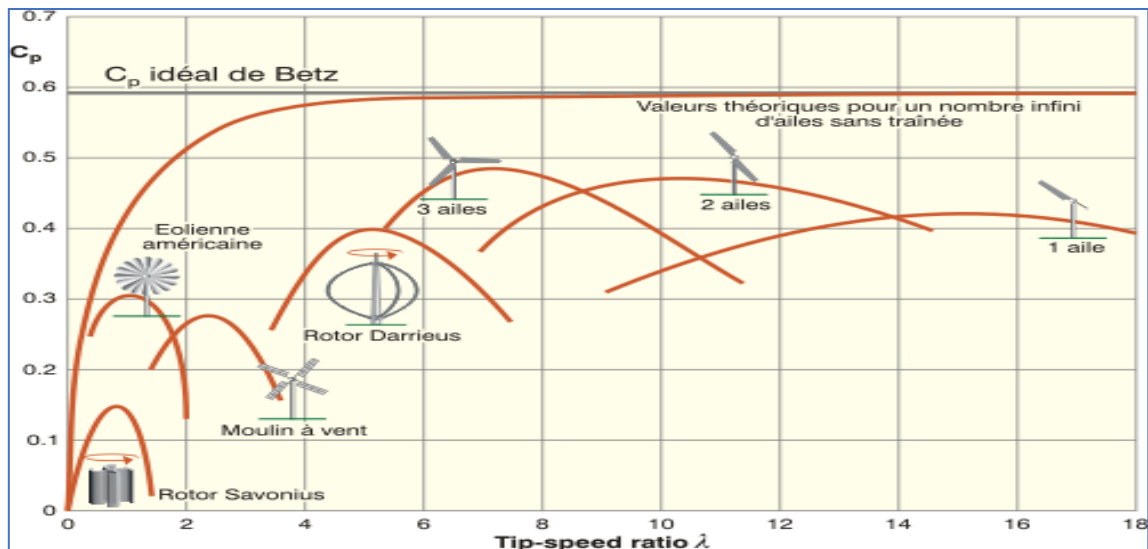


Figure I.12: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.[11]

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

I.3.7.2. Utilité de la vitesse variable :

Notre sujet s'intéresse à l'utilisation d'éoliennes à vitesse variable car c'est plus réaliste et plus proche du fait que le vent est de nature instable et variable.

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur (figure I.13)

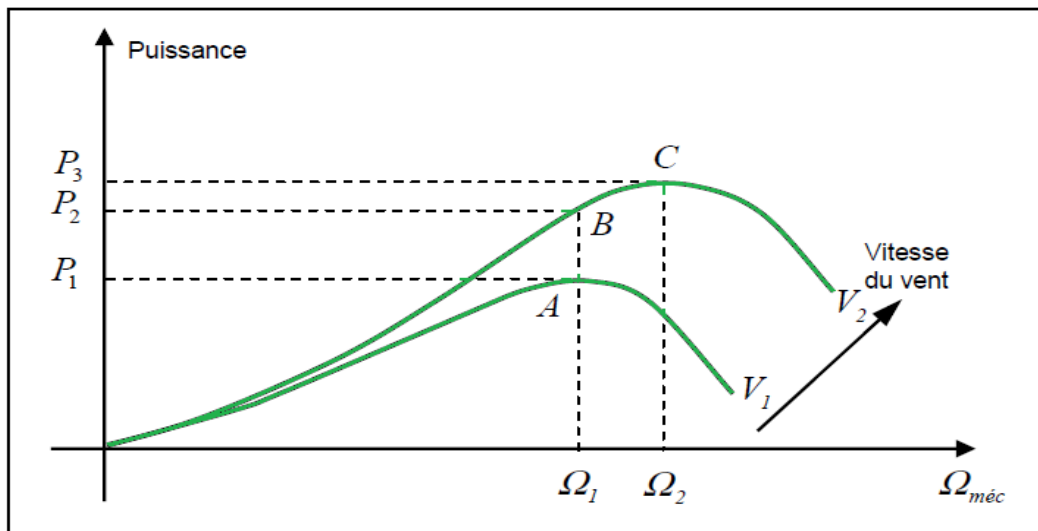


Figure I.13: Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

Pour la vitesse du vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance maximale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (Vitesse fixe), une puissance P_2 est transmise (point B) alors que la puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire d'augmenter la vitesse de la génératrice à une vitesse Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de puissance.

I.3.7.3. Modes de régulation

La vitesse de rotation des pales de l'aérogénérateur ne doit pas dépasser une vitesse maximale car cela pourrait endommager le dispositif de conversion. Différentes méthodes de régulation de la vitesse existent, parmi lesquelles certaines sont basées sur le principe de l'orientation des pales, d'autres sont plus simples et utilisent le principe de décrochage aérodynamique afin de réguler la vitesse. Les méthodes précédemment citées sont expliquées dans ce qui suit [4] :

I.3.7.3.1. Système à décrochage aérodynamique « stall » :

C'est le système le plus simple et le moins coûteux car il se base sur le principe de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de

décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure I.14) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation [12].

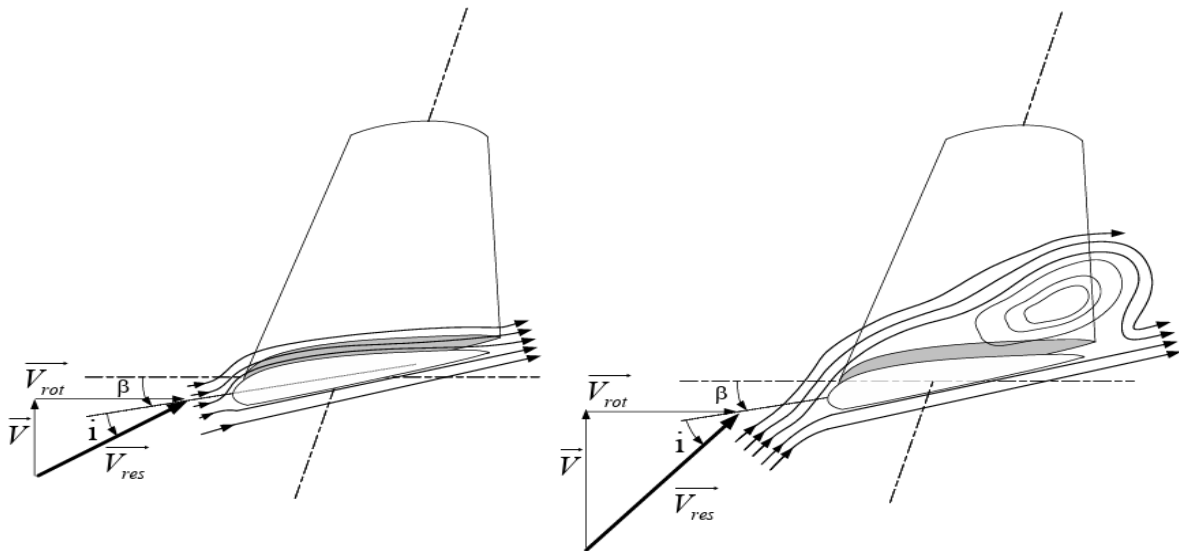


Figure I.14 : Flux d'air sur un profil de pale " stall ".

I.3.7.3.2. Système d'orientation des pales « Pitch »

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle de calage (Figure 1.14) ce qui diminue la valeur du facteur de puissance (Figure I.15) d'où une diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur [4].

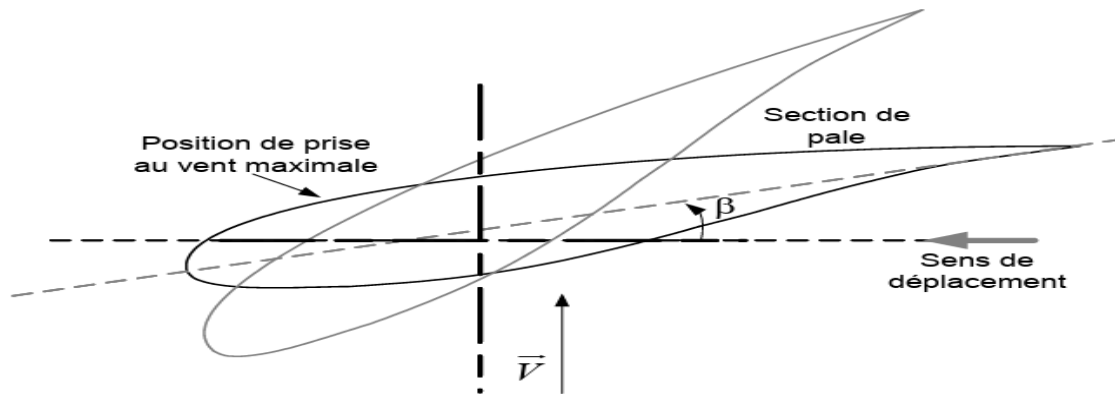


Figure I.15: Flux d'air sur un profil de pale "pitch".

I.8. Avantages Et Inconvénients De L'énergie Eolienne :

Il n'y a rien de complet, et cela s'applique également à l'énergie éolienne. Quelle que soit sa positivité, elle présente des inconvénients qui nécessitent une étude approfondie pour évaluer son efficacité par rapport à ses effets négatifs.

I.8.1. Avantages :

- ❖ L'énergie éolienne est une énergie fiable, économique et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [13]
- ❖ L'énergie éolienne est une énergie 100% naturelle, renouvelable et durable.
- ❖ La surface au sol nécessaire pour produire de l'énergie est relativement faible contrairement à l'énergie solaire.
- ❖ L'énergie éolienne est une énergie pure car elle ne produit aucun déchets nocifs pour l'environnement.
- ❖ L'exploitation de cette énergie éolienne ne produit pas de CO₂, ni d'autres gazes à effet de serre

I.8.2. Inconvénients :

- ❖ Le vent n'est pas une source d'énergie constante. Pas de vent, pas de production d'électricité.
- ❖ L'énergie éolienne doit toujours ou presque être associée à une autre source d'énergie.
- ❖ Certaines éoliennes sont bruyantes
- ❖ Tout le monde n'apprécie pas la vue d'une éolienne dans le paysage.
- ❖ Les éoliennes peuvent être dangereuses pour la faune sauvage (notamment les oiseaux)

- ❖ La puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne.

I.9.conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu des énergies renouvelables et de leurs différents types, en mettant l'accent sur l'énergie éolienne, qui est le sujet de notre étude. Nous avons mentionné l'histoire de cette forme d'énergie et son évolution au fil du temps, ainsi que sa diffusion en Algérie. Ensuite, nous avons abordé les éoliennes, qu'elles soient horizontales ou verticales, et les différences entre elles, en plus de mentionner les divers composants d'une éolienne.

Le processus de conversion de l'énergie éolienne est soumis à des limites qui varient selon les éoliennes. Afin de comprendre ce sujet, nous avons discuté les limites de Betz, qui déterminent l'efficacité de la conversion énergétique, afin d'obtenir une plus grande efficacité, nous avons choisi des éoliennes qui fonctionnent à des vitesses variables en fonction de la nature instable du vent, ce qui les rend plus adaptées, en plus de techniques permettant de contrôler la vitesse de l'éolienne en contrôlant ses pales (régulation par "pitch" et "stall").

Le deuxième chapitre de nos travaux, est consacré à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne (Turbine Éolienne et la **M**achine **A**synchrone à **D**ouble **A**limentation).

*Modélisation de la chaîne
de conversion éolienne
(Turbine & MADA)*

Chapitre II :
Modélisation de la chaîne de conversion éolienne
(Turbine & MADA)

II.1. Introduction :

Pour garantir le succès des projets de développement, notamment ceux liés à la production d'énergie, il est indispensable de recourir à la modélisation et à la simulation avant leur mise en œuvre directe.

La modélisation permet de concevoir et d'améliorer les systèmes éoliens avant leur construction. En simulant le comportement du système dans différentes situations, elle permet d'ajuster les paramètres pour atteindre une efficacité et des performances maximales des éoliennes. De plus, elle facilite l'application de différentes stratégies de contrôle, ce qui augmente le taux de réussite des projets et facilite leur mise en œuvre sur le terrain.

Dans ce chapitre, nous modéliserons une éolienne en détaillant chacun de ses composants à travers des équations mathématiques spécifiques. Ensuite, nous chercherons à optimiser l'exploitation de l'énergie éolienne en appliquant le contrôle MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) avec et sans asservissement de vitesse.

Après avoir extrait l'énergie stockée dans le vent, nous devons la convertir en énergie électrique. Cela ne peut se faire qu'avec l'aide d'un générateur électrique, et nous avons choisi le générateur asynchrone à double alimentation en raison de ses avantages et de ses performances élevées dans les applications éoliennes. Ce générateur fonctionne efficacement dans diverses conditions et est capable de s'adapter aux variations de la vitesse du vent, en plus de permettre un contrôle facile de la puissance électrique produite.

Les différents éléments de la chaîne de conversion électromécanique de l'éolienne ont été simulés sous MATLAB/SIMULINK

II.2. Le comportement général du système :

Nous sommes en train d'étudier une éolienne capable de produire une puissance de 10Kw. Cette dernière est composée de trois pales de longueur R fixées sur un axe rotatif et reliées à un multiplicateur G entraîne une génératrice électrique, figure II.1. Nous allons utiliser, dans cette étude, un générateur asynchrone à double alimentation capable de convertir l'énergie avec une grande efficacité.

Le stator de la GADA est directement raccordé au réseau électrique, tandis que son rotor est connecté au réseau mais via deux convertisseurs statiques bidirectionnels triphasés commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), l'un en mode onduleur (CCM), l'autre en mode redresseur (CCR), mis en cascade à travers un bus continu (DC-Bus).[1]

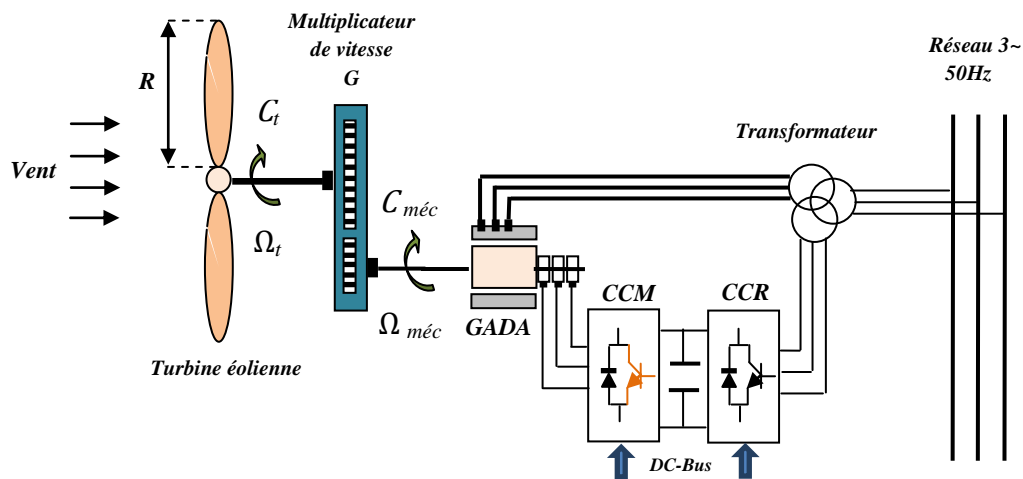


Figure II.1 : Système de conversion éolienne.

II.3. Modélisation mathématique de la turbine éolienne :

II.3.1. Modèle mathématique du vent :

Le vent se forme à la suite d'un processus naturel influencé par de nombreux facteurs donc il n'est pas une forme fixe en permanence. Le vent est la source principale d'énergie pour les éoliennes, pour cela il est essentiel de connaître et comprendre son modèle mathématique pour avoir une simulation plus proche que la réalité.

Pour obtenir un modèle réaliste du vent, il est nécessaire de connaître les conditions climatiques et géographiques spécifiques de la région où le projet doit être implanté. Cela permet d'avoir une idée plus claire de l'efficacité du projet et de comprendre les conditions auxquelles la turbine pourrait être exposée afin de prendre les précautions nécessaires. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui le présente comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques, il est donné par l'équation suivante [14].

$$v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

A : La valeur moyenne de la vitesse du vent ;

a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre k ;

ω_k : Pulsation de l'harmonique de l'ordre k ;

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

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent, par une fonction scalaire qui évolue dans le temps, modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques, conformément à [14] :

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

Avec :

ω : est la pulsation donner par :

$$\omega = 2\pi / 10 \quad (\text{II.3})$$

II.3.2. Modèle énergétique de la turbine :

II.3.2.1. Hypothèses simplificatrices :

Les systèmes, comme les éoliennes, doivent être simplifiés en raison de leur complexité et de leur difficulté à les comprendre. Nous proposerons donc des hypothèses qui nous aideront à réduire le degré de complexité et ainsi faciliter le processus de modélisation, donc on pose 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 distribution de la vitesse du vent est uniforme sur l'ensemble des pales ;
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est très faible ;

Les pertes par frottement de la turbine sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

II.3.2.2. Modèle d'équations :

II.3.2.2.1. Puissance du vent :

La puissance du vent se réfère à l'énergie cinétique contenue dans le mouvement du vent. En peut calculer cette puissance qui travers un disque éolien de rayon R par la relation Suivant :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_v^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 V_v^3 \quad (\text{II.4})$$

Avec:

- ρ : masse volumique de l'air (celle-ci est de 1.225 Kg/m³ en atmosphère normale) ;
- S : c'est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale ;

- R : correspond pratiquement à la longueur de la pale ;
- v : est la vitesse du vent en (m/s).

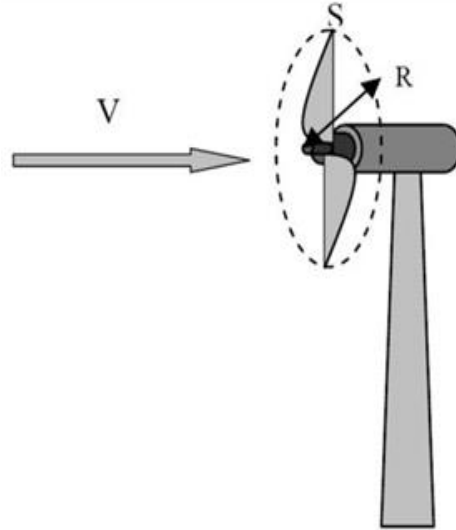


Figure II.2 : Schéma simplifié d'une éolienne

II.3.2.2.2. Le coefficient de puissance C_p :

Le coefficient de puissance d'une éolienne est une mesure de son efficacité à convertir l'énergie du vent en énergie mécanique ou électrique. Il est exprimé sous forme d'un pourcentage, représentant le ratio entre la puissance électrique produite par l'éolienne et la puissance totale du vent incident sur ses pales. En d'autres termes, c'est la quantité d'énergie que l'éolienne est capable de convertir par rapport à l'énergie disponible dans le vent.

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} \quad (\text{II.5})$$

Le coefficient de puissance varie en fonction de nombreux facteurs, tels que la vitesse du vent, la conception de l'éolienne, l'orientation des pales (en pitch ou par décrochage), les conditions atmosphériques, et du type de fonctionnement (à vitesse fixe ou variable) [14].

En moyenne, le coefficient de puissance des éoliennes modernes se situe habituellement entre 30 et 50 %, ce qui signifie que ces éoliennes peuvent convertir environ un tiers à la moitié de l'énergie du vent en électricité utilisable. Le coefficient de puissance, dont le calcul est une valeur approchée de manière empirique pour une éolienne utilisant la génératrice de type GADA, est défini comme suit :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left(116 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - 0.4\beta - 5 \right) \exp \left(-21 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \right) + 0.0068\lambda \quad (\text{II.6})$$

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine t et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

β : angle d'orientation des pales ;

Ω_t : est la vitesse de la turbine en (rad/s).

La figure II.5 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 . Quand la turbine éolienne est à l'arrêt ($\Omega_t = 0$), le ratio de vitesse est nul et par conséquent, la puissance de la turbine doit être nulle aussi puisque $P_t = C_t \cdot \Omega_t$ (où C_t représente le couple mécanique de la turbine), lorsque la vitesse de rotation augmente par rapport à la vitesse du vent (λ augmente), le coefficient de puissance C_p augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale.

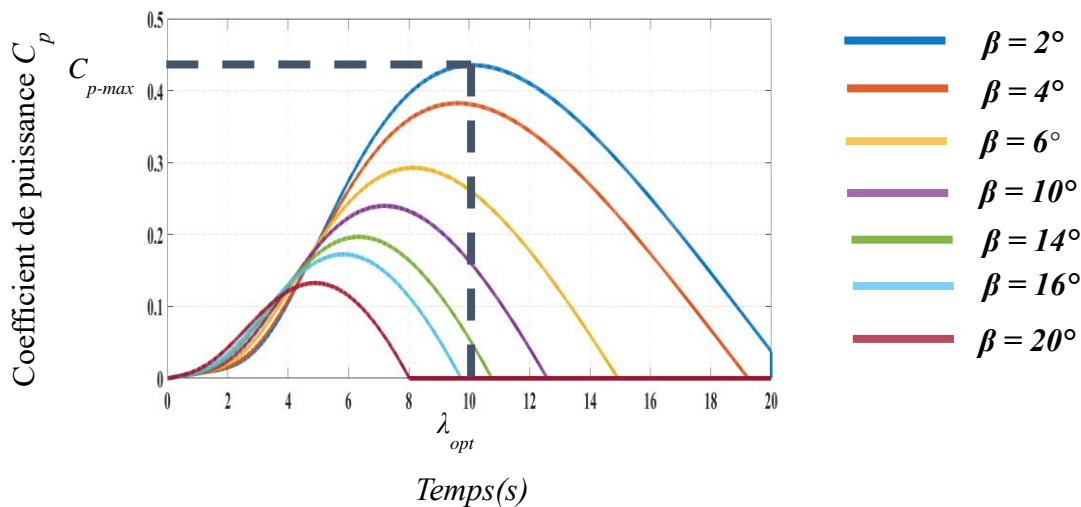


Figure II.3 : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β

D'après la figure II.5, nous pouvons conclure que pour chaque angle de calage β il existe un ratio de vitesses λ optimal qui maximise le coefficient C_p , de sorte que plus β augmente, la valeur de λ diminue et, par conséquent, nous observons une diminution de la valeur de C_p .

Dans notre cas, le point optimal ($\lambda_{opt} = 10.1$, $C_{p-max} = 0.435$, $\beta = 2^\circ$) est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_{p-max} et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée.

II.3.2.2.3. La puissance aérodynamique :

L'aérodynamique d'une éolienne fait référence à sa capacité à capturer et convertir l'énergie du vent en électricité de manière efficace. Plus une éolienne est aérodynamique, plus elle est capable de maximiser sa production d'énergie à partir du vent. Pour optimiser la puissance aérodynamique d'une éolienne, plusieurs éléments doivent être pris en compte, tels que la forme des pales, leur longueur, leur inclinaison, leur nombre, ainsi que la vitesse et la direction du vent. En général, les éoliennes modernes sont conçues pour être les plus aérodynamiques possible, afin d'exploiter au mieux l'énergie éolienne disponible.

La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique P_t apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_t = C_p P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II.8})$$

Connaissant la puissance et la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique (turbine) est déterminé directement par la relation suivante :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{\Omega_t} \quad (\text{II.9})$$

II.3.2.3. Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur est utilisé pour augmenter la vitesse de rotation de l'arbre de sortie -le générateur- par rapport à la vitesse de l'arbre d'entrée-la turbine-. Cela permet d'adapter la vitesse de rotation entre les deux arbres.

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les deux équations suivantes [8] :

$$C_{méc} = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.10})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$C_{méc}$: le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice ;

$\Omega_{méc}$: la vitesse de rotation (mécanique) de la génératrice ;

C_t : Couple de la turbine (aérodynamique) ;

Ω_t : la vitesse de la turbine ;

G : le gain du multiplicateur.

II.3.2.4. Modèle de l'arbre mécanique :

En fonction des hypothèses que nous avons mentionné précédemment, nous pouvons aboutir à une version simplifiée du système étudié qui constitué de deux masses comme l'illustre la figure II.2, [15].

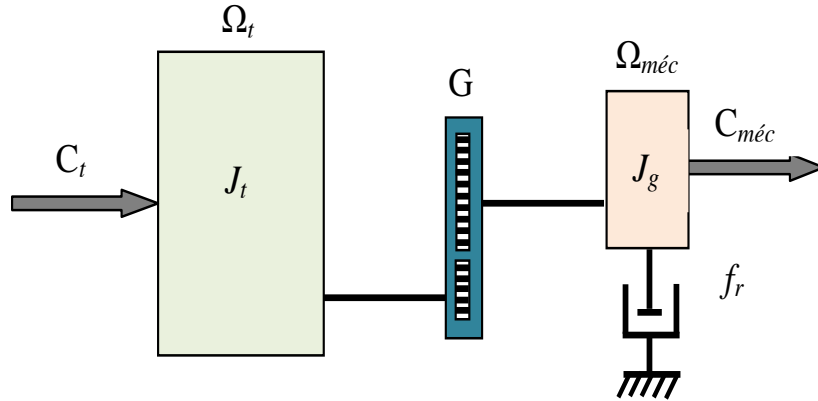


Figure II.4 : Modèle mécanique de la turbine éolienne.

La masse de la turbine éolienne est transférée à l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_t , comprenant les masses des pales et du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé prend en compte l'inertie totale J_T , qui comprend l'inertie de la turbine transférée au rotor de la génératrice et l'inertie de la génératrice J_g :

$$J_T = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (\text{II.12})$$

D'après la figure II.2, nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la génératrice par :

$$J_T \frac{d\Omega_{méc}}{dt} + C_f = C_{méc} - C_{em} \quad (\text{II.13})$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux C_f :

$$C_f = f_r \Omega_{méc} \quad (\text{II.14})$$

f_r : le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice.

II.3.2.5. Schéma bloc du modèle de la turbine :

En utilisant les équations précédentes, nous avons réussi à modéliser le système étudié, Le schéma bloc de la figure II.5 correspond aux modélisations aérodynamique et

mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation $\Omega_{méc}$ de la génératrice, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique C_{em} de la MADA. La vitesse du vent v est considérée comme une entrée perturbatrice au système.

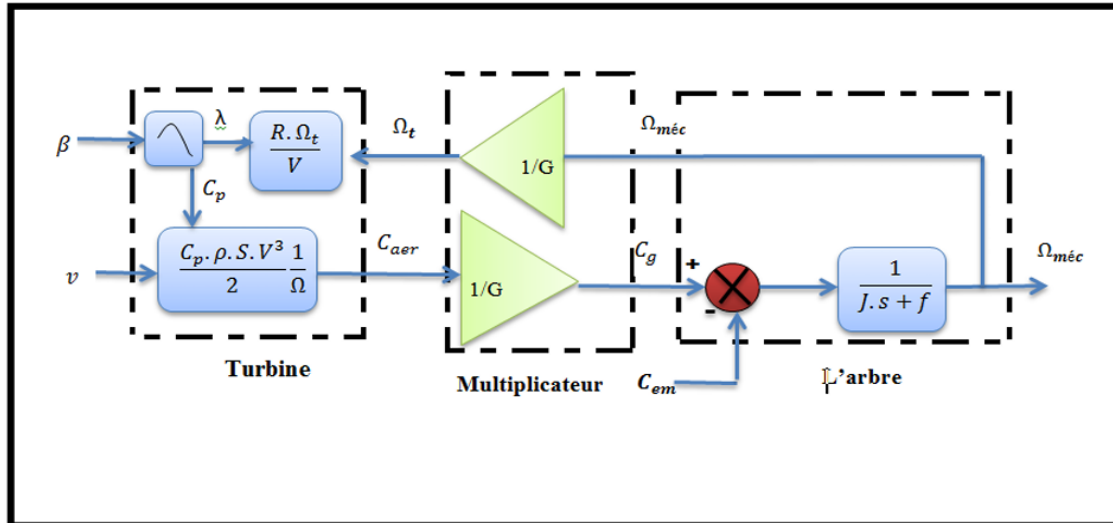


Figure II.5 : Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne

II.3.2.6. Résultats de la simulation obtenus :

Les figures II.6 et II.7 présentent respectivement les résultats de simulation de la puissance et le couple de la turbine de 10kw en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice pour les différentes vitesses du vent.

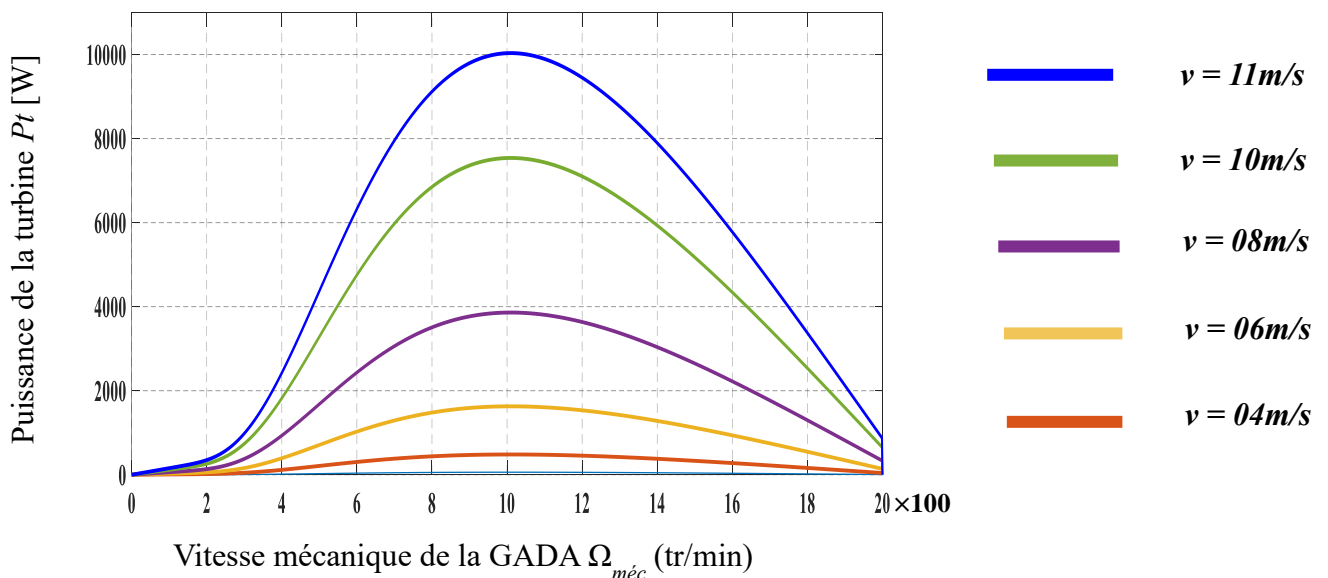


Figure II.6 : Puissance de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.

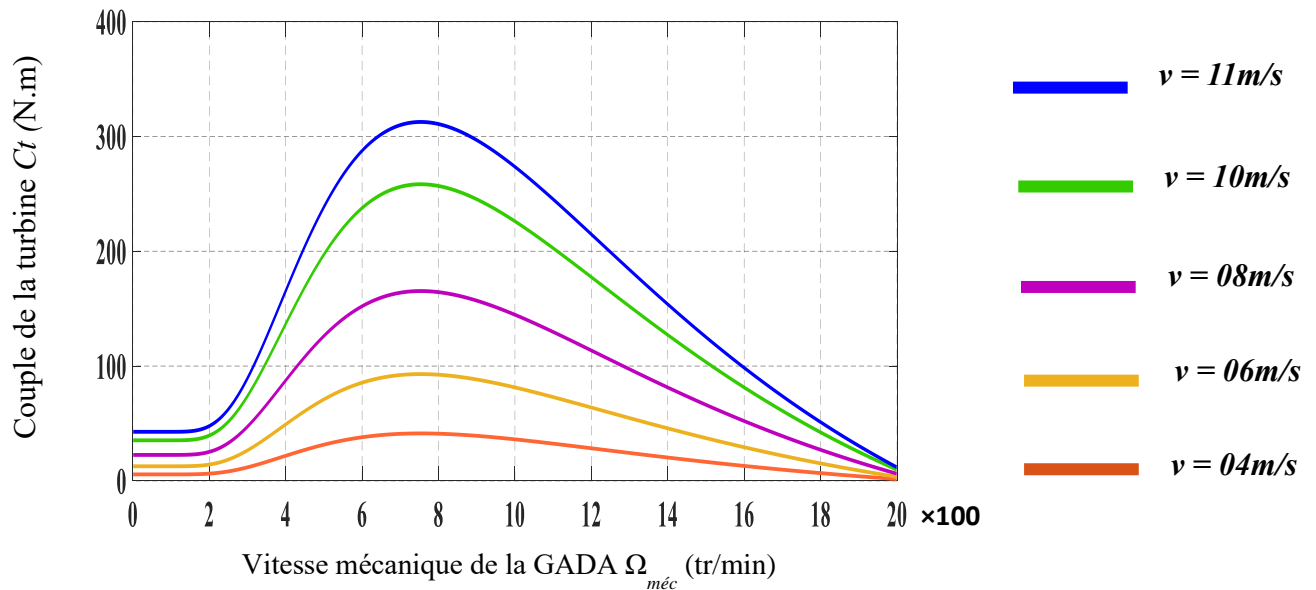


Figure II.7 : Couple de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.

D'après la simulation, le changement de vitesse de vent entraîne des variations de puissance et de couple, de sorte que plus la vitesse de vent augmente, plus la puissance et le couple augmentent, cela signifie que même si la vitesse de vent est faible on peut extraire une puissance grâce à la type de fonctionnement de notre aérogénérateur qui travaille à vitesse variable, donc pour tirer le meilleur parti possible de cette fonctionnalité (maximiser la puissance et le couple) nous avons besoin d'appliquer la technique de maximisation qui est le **MPPT**.

II.4. Stratégie de commande de la turbine éolienne :

Le contrôle des éoliennes est un processus nécessaire pour assurer une performance efficace. Il existe plusieurs stratégies de commande qui sont mises en place pour maximiser la production en fonction des conditions météorologiques, en effet, les éoliennes doivent être capable de s'adapter rapidement aux variations du vent pour maintenir une production constante et stable.

Les éoliennes sont conçues pour fonctionner dans des plages spécifiques de vitesse du vent, et par conséquent, tout changement de cette dernière peut affecter la productivité de l'éolienne. La figure II.7 représente les zones de fonctionnement des éoliennes en fonction de la vitesse du vent

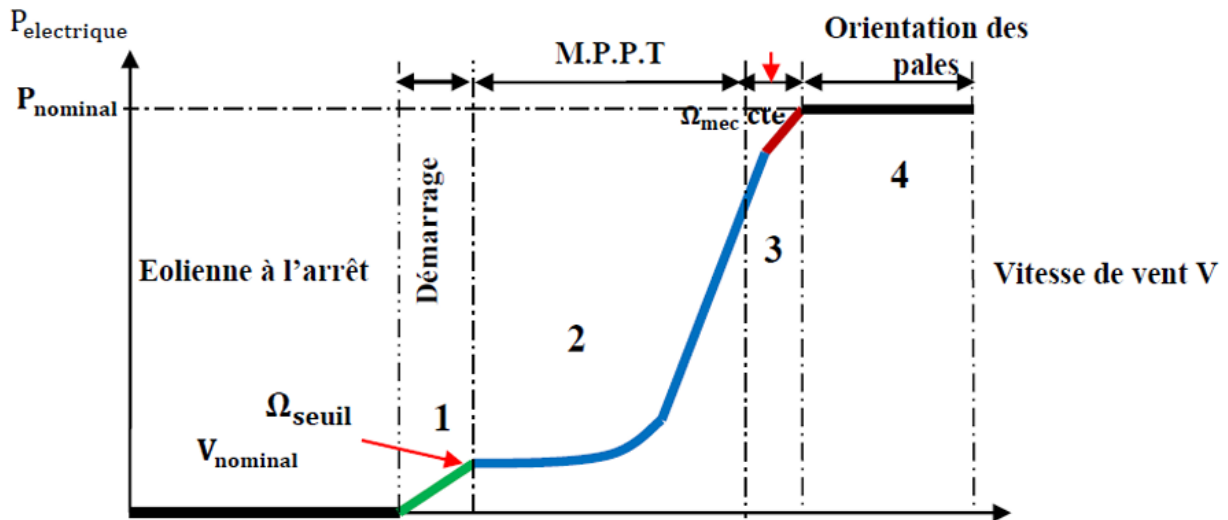


Figure II.8 : les zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.

Ce qui compte pour nous dans cette partie est la **Zone 2** où nous mettrons des algorithmes pour extraire le maximum de puissance du vent quelle que soit la vitesse, pour cela on applique la stratégie de l'MPPT qui permet de contrôler le couple électromagnétique de la MADA afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite, On peut distinguer deux modes de contrôle [15]:

- le contrôle sans asservissement de vitesse mécanique;
- le contrôle avec asservissement de vitesse mécanique.

Pour cette étude, nous considérons que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égale à sa valeur de référence imposée par la commande ($C_{\text{mec}} = C_t^*$).

II.4.1. Contrôle sans asservissement de vitesse mécanique :

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine. [16]

$$J_T \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} = C_{\text{mec}} - C_{\text{em}} - C_f = 0 \quad (\text{II.15})$$

De plus, si l'on néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux ($C_f = f_r \Omega_{méc} = 0$) par rapport au couple mécanique C_{em} , on peut alors écrire :

$$C_{méc} = C_{em} \quad (II.16)$$

Une estimation de la vitesse de rotation de la turbine, notée $\hat{\Omega}_t$, est obtenue à partir de la mesure de la vitesse de rotation de la GADA :

$$\hat{\Omega}_t = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (II.17)$$

Une mesure précise de la vitesse du vent étant difficile, une estimation de celle-ci, notée \hat{v} , est obtenue à partir de l'estimation de la vitesse de rotation de la turbine :

$$\hat{v} = \frac{\hat{\Omega}_t R}{\lambda_{opt}} \quad (II.18)$$

On peut avoir le couple de la turbine à partir l'estimation de la puissance qui donner par la relation suivante :

$$P_t^{\wedge} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_{p max} \quad (II.19)$$

Donc le couple de la turbine estimé est exprimé par :

$$C_t^{\wedge} = \frac{P_t^{\wedge}}{\hat{\Omega}_t} \quad (II.20)$$

Le couple électromagnétique de référence est alors obtenu à partir de l'estimation du couple de la turbine éolienne :

$$\hat{C}_{em}^* = \hat{C}_{méc}^* = \frac{\hat{C}_t^*}{G} \quad (II.21)$$

Le schéma bloc de la figure II.9 résume le principe de la stratégie du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation.

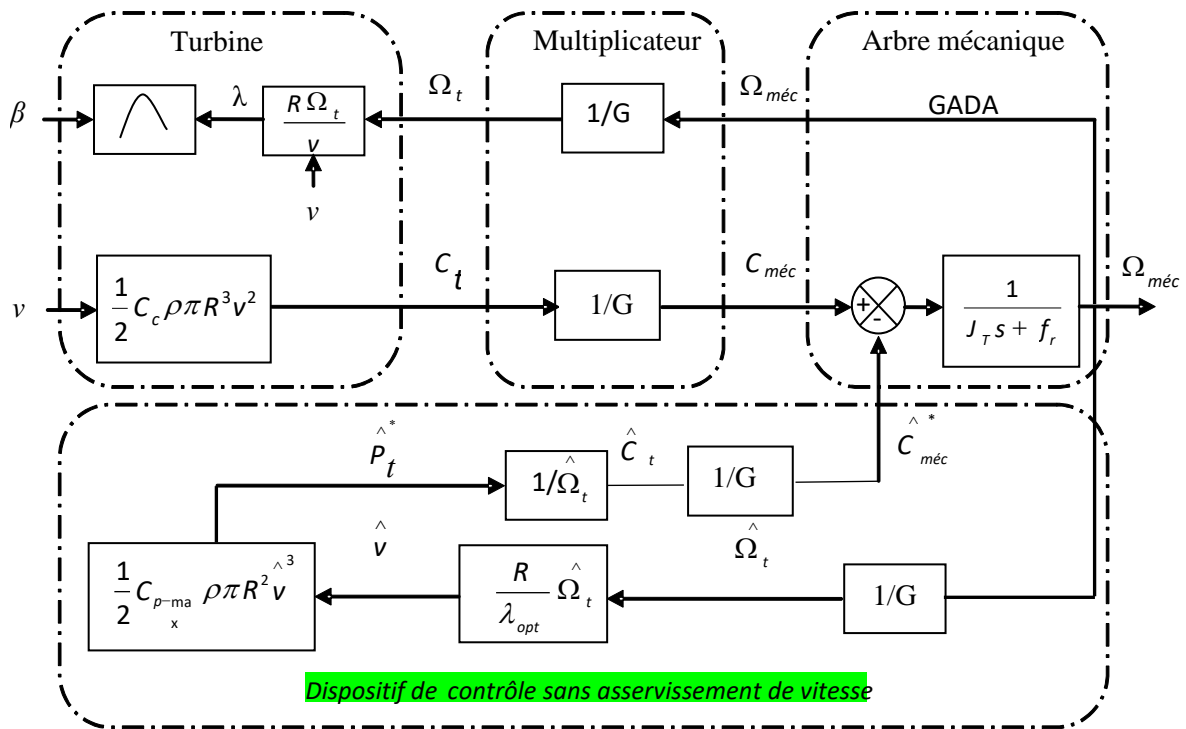


Figure II.9 : Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation

II.4.2. Contrôle avec asservissement de vitesse mécanique :

L'objectif de Cette stratégie est de maintenir la turbine éolienne à son point de fonctionnement optimal, l'asservissement de vitesse permet de maintenir la vitesse de la génératrice a la valeur de référence pour maximiser la puissance produite en contrôlant le couple électromagnétique de la génératrice, donc nous devons prendre en compte le gain du multiplicateur.

La vitesse mécanique de référence de la GADA est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$\Omega_{méc}^* = G \Omega_t^* \tag{II.22}$$

Avec :

$$\Omega_t^* = \frac{\lambda_{opt} v}{R} \tag{II.23}$$

Le couple électromagnétique de référence $C_{méc}^*$ permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence $\Omega_{méc}^*$ est obtenu par une relation inverse indirecte :

$$C_{méc}^* = R(\Omega_{méc}^*)(\Omega_{méc}^* - \Omega_{méc}) \tag{II.24}$$

Avec : $R(\Omega_{méc}^*)$: C'est le régulateur de vitesse (PI)

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

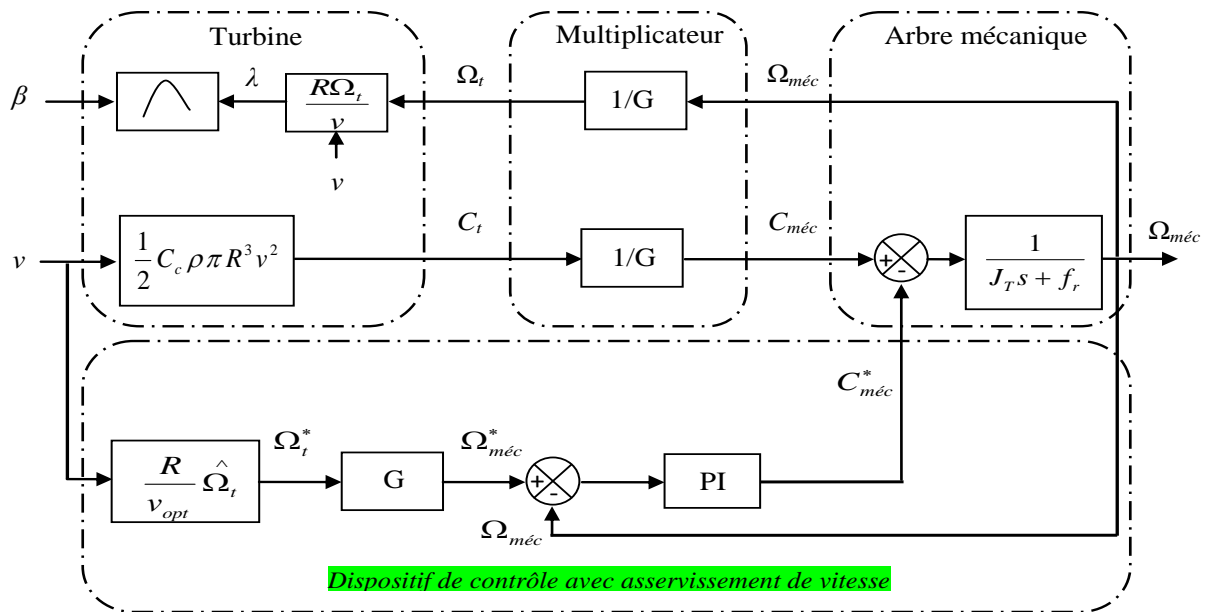


Figure II.10 : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.

II.4.3. Résultats obtenus du contrôle MPPT :

Pour étudier les deux structures de commande on applique une vitesse variable du vent à la turbine. Les résultats de simulation sont obtenus par le logiciel MATLAB/SIMULINK

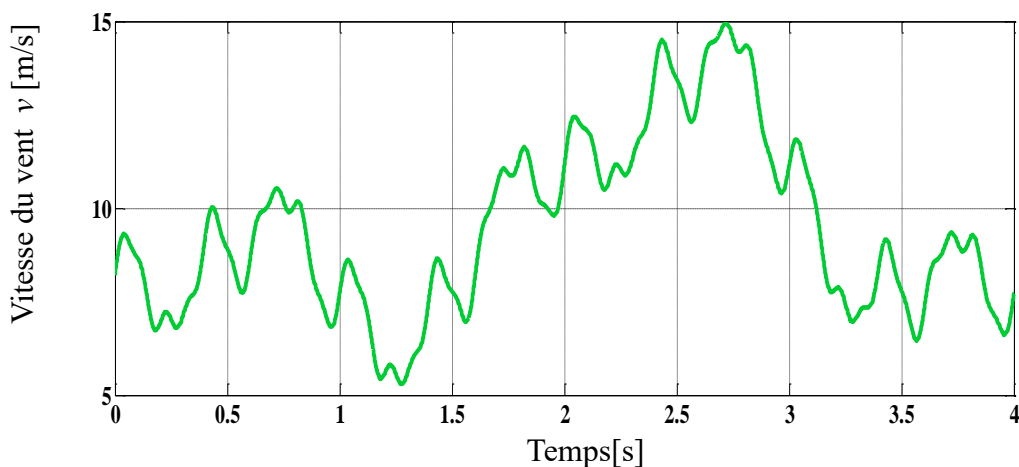


Figure II.11 : Simulation du Profil du vent appliqué.

Les deux techniques permettent de maximiser la puissance donc on parle d'un fonctionnement dans les caractéristiques optimale pour le C_p , β et λ qui sont présenté respectivement dans la figure II.12(a,b,c)

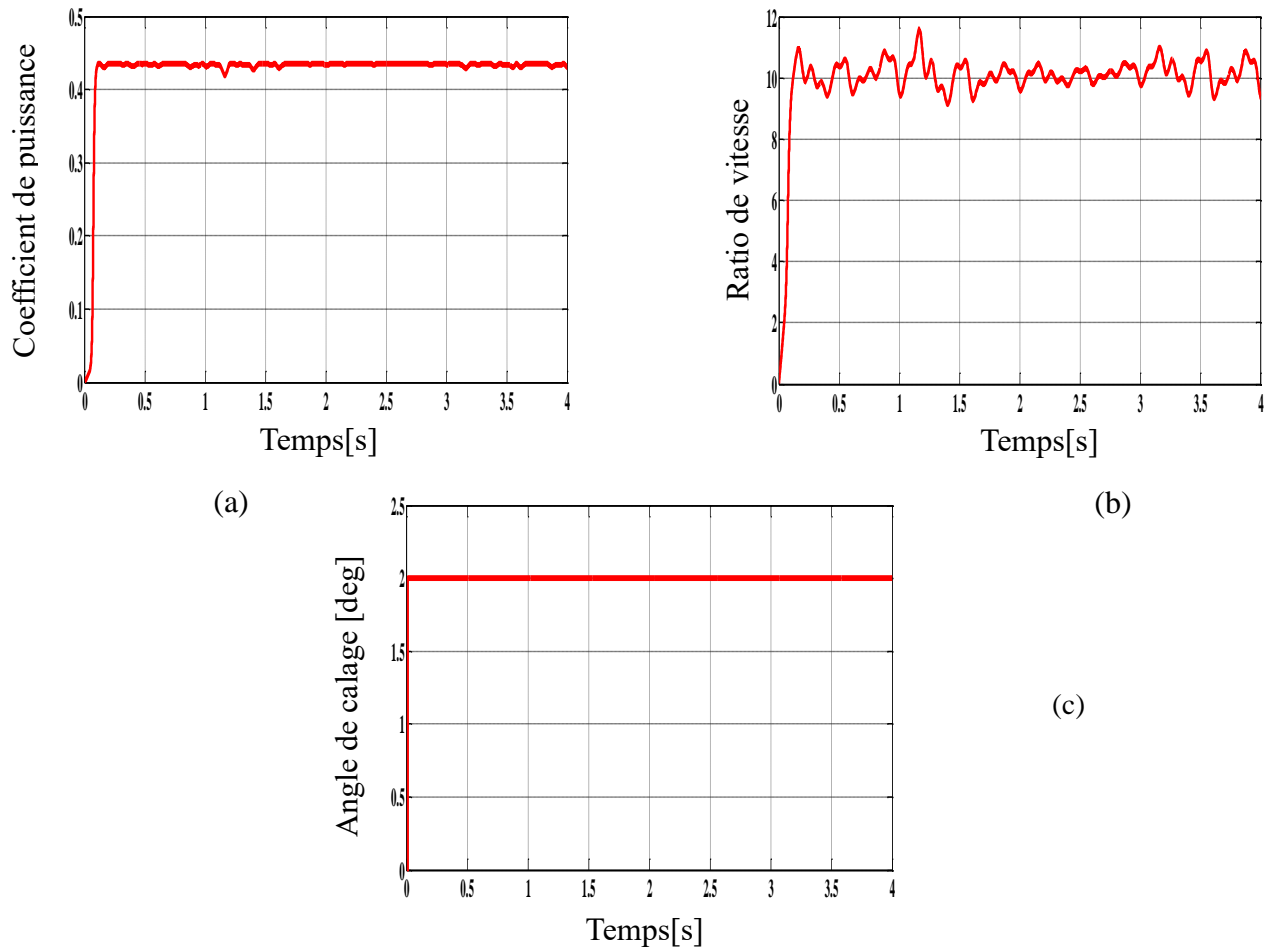


Figure II.12 : les caractéristiques optimales de l'éolienne

D'après la simulation, on trouve que les résultats de la puissance sont similaires dans les deux techniques, dans la figure II.12 on présente la puissance du vent et de la turbine

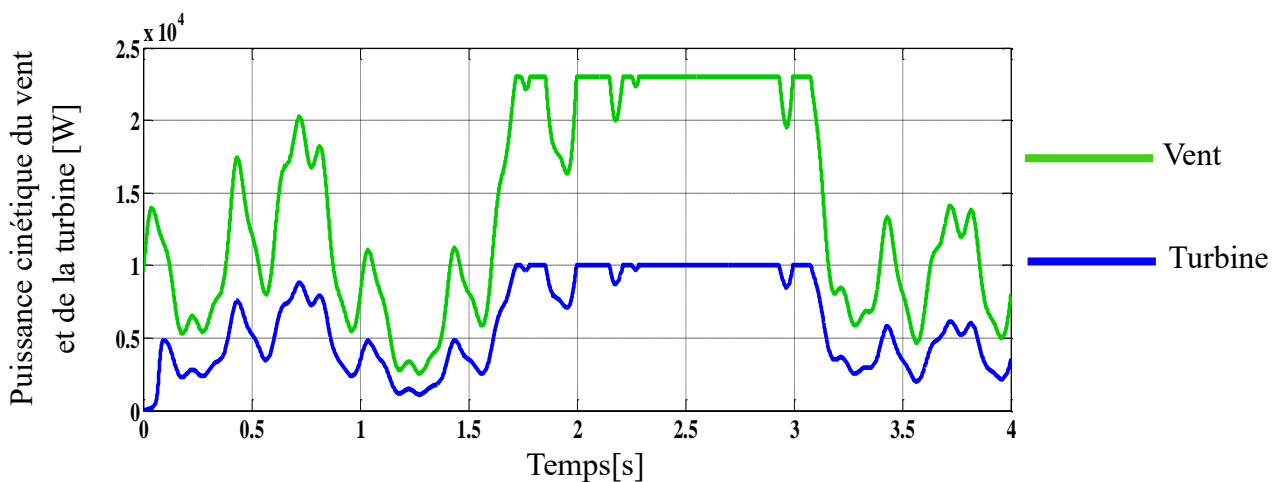


Figure II.13 : les Résultats de la puissance pour les deux techniques

II.4.3.1. MPPT sans asservissement de vitesse mécanique :

Pour cette technique on présente les résultats de la vitesse de la turbine et de la GADA (a), le couple réel de la GADA et le couple estimé (b) et l'erreur entre eux (c)

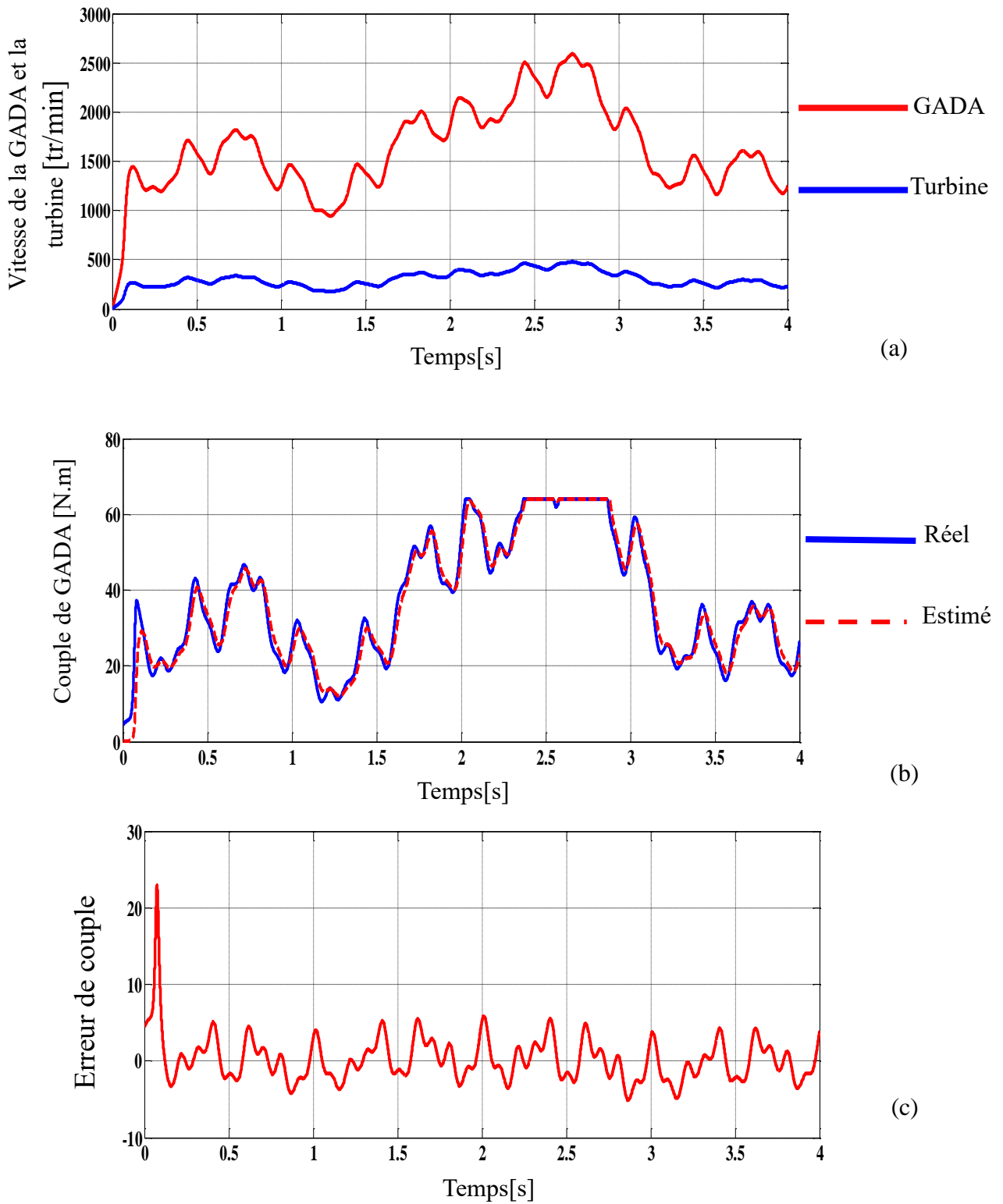


Figure II.14 : Résultats de simulation du MPPT sans asservissement de vitesse

II.4.3.2. MPPT avec asservissement de vitesse mécanique :

Cette technique est basée sur la régulation de la vitesse à travers un régulateur classique de type Proportionnel-Intégrateur PI. Les résultats du couple, la vitesse et l'erreur entre la vitesse réel et estime sont présenté dans la figure II.14 (a,b,c)

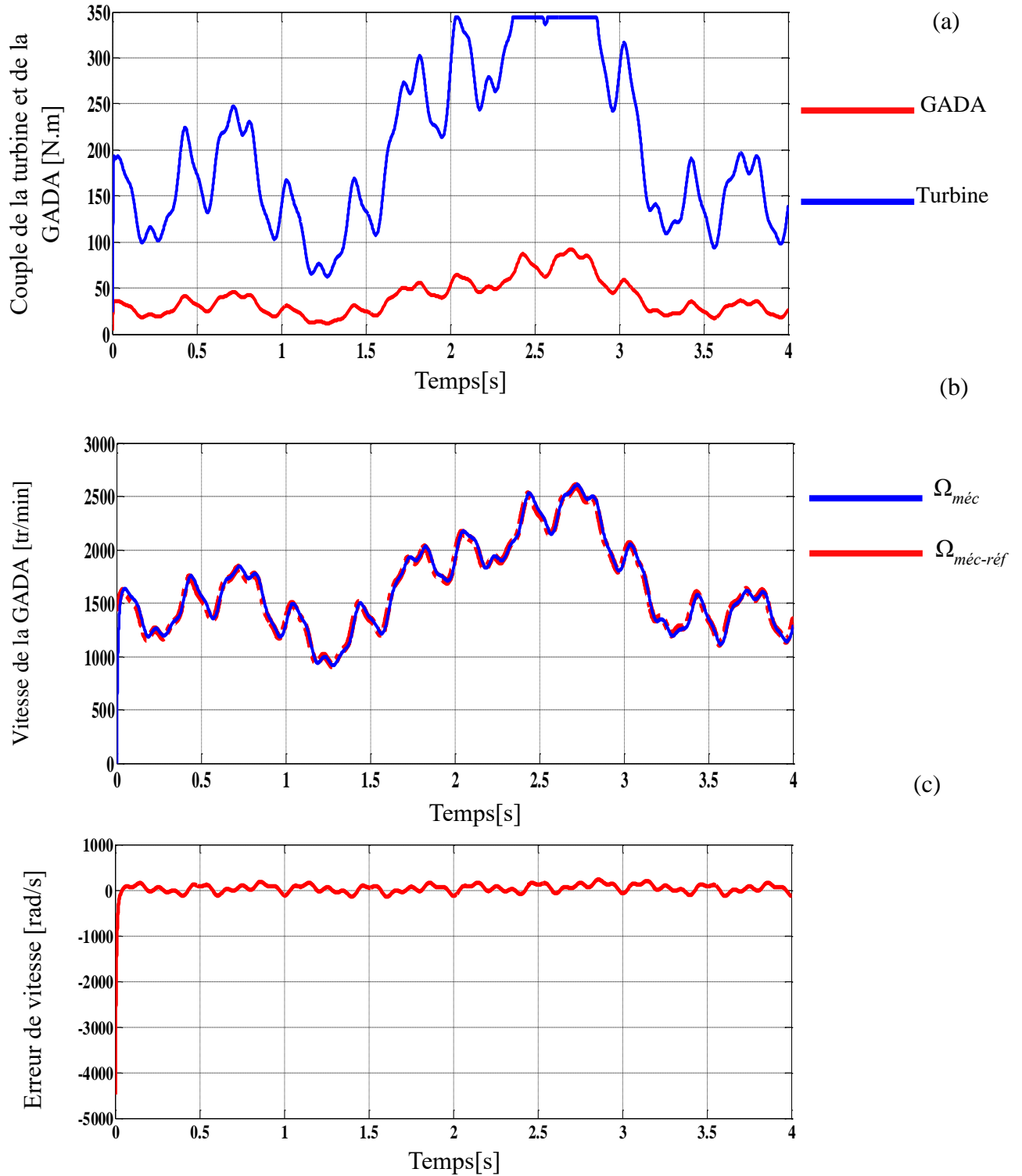


Figure II.15 : Résultats de simulation du MPPT avec asservissement de vitesse.

II.4.3.3. Interprétation des résultats :

D'après les résultats, nous pouvons dire que les deux techniques peuvent extraire le maximum d'énergie éolienne compatible avec les variations de la vitesse du vent.

Pour la première technique et malgré l'absence de l'asservissement de vitesse, nous avons réussi à obtenir un couple estimé assez similaire au couple moteur, avec un taux d'erreur proche de zéro.

Concernant la deuxième technique, qui présente l'avantage de l'asservissement de vitesse mécanique, ce qui permet de maintenir cette vitesse à une valeur de référence variable en fonction de la vitesse du vent, ce qui donne un meilleur contrôle du couple, grâce au régulateur Pi, C'est ce qui est évident sur la figure *II.12-b-*, où l'on voit une correspondance entre la vitesse estimée et la vitesse réelle.

II.5. Généralités sur les machines asynchrones à double alimentation :

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine triphasée à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge. Elle se compose d'un primaire dit stator qui est fixe, équipé de trois enroulements identiques couplés en étoile ou en triangle alimentée par une source triphasée et répartis d'une manière symétrique dans les encoches au stator, et d'un rotor tournant autour de l'axe de la machine équipé lui aussi de trois enroulements identiques et symétrique couplés en étoile et reliés à un collecteur constitué de trois ou quatre bagues, Les trois enroulements du stator sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoïdalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre. Les trois enroulements rotoriques sont reliés à travers des balais glissants sur les bagues du rotor à un convertisseur d'électronique de puissance pour assurer une deuxième alimentation pour le rotor.[17]

Pour alimenter le stator et le rotor ne besoin pas deux source d'alimentation pour fonctionner ce type des machines qui est un avantage surtout dans les domaines d'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du coté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois.

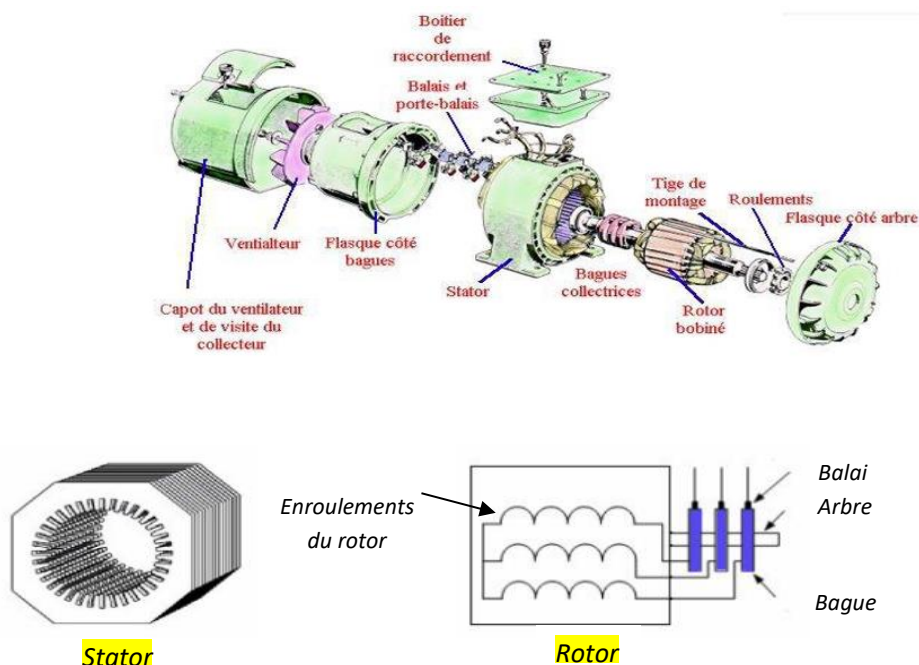


Figure II.16 : Composition de la MADA (stator et rotor)

II.5.1 Principe de fonctionnement :

La MADA comme son nom l'indique est une machine doublement alimentée. Elle a le surnom de « machine généralisée » vu sa flexibilité de fonctionnement et en raison de sa structure similaire à celle d'une machine synchrone, à la différence que son rotor est composé d'un bobinage triphasé alimenté en courant alternatif au lieu d'une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent. Ce mode de fonctionnement peut être décrit comme une "machine synchrone à excitation alternative". Grâce à l'accès au rotor et via une interface électronique il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance. [18]

L'alimentation de la partie fixe du moteur crée un champ magnétique \mathbf{B}_s ayant la même fréquence que la source d'alimentation et tournant à la vitesse de synchronisme ω_s . Pour que le moteur tourne, il est nécessaire qu'un champ magnétique rotatif soit présent dans le rotor. Ce champ, noté \mathbf{B}_r , doit interagir avec le champ du stator pour générer un couple et entraîner la rotation du rotor. L'alimentation alternative de rotor crée ce champ à une fréquence différente de celle du réseau en raison de l'utilisation de convertisseurs statiques. Cela permet d'obtenir un champ tournant avec une vitesse ω_r dont la vitesse peut être contrôlée, ce qui permet de contrôler la valeur du glissement.

En définissant le glissement par :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (\text{II.25})$$

Le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromotrices (f.e.m) dans les enroulements rotoriques.

Le rapport entre les f.e.ms créées au rotor et au stator est défini par [17] :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot \frac{\omega_s - p \cdot \Omega_{méc}}{\omega_s} = m \cdot \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = m \frac{\omega_{sr}}{\omega_s} \quad (\text{II.26})$$

Avec :

N_r et N_s : représentent respectivement le nombre de spires des bobinages rotorique et statorique ;

ω_s , ω_r et ω_{sr} représentent respectivement les pulsations statorique et rotorique et de glissement.

p : est le nombre de paires de pôles ;

m : est le rapport de transformation rotor/stator ;

La relation qui relie la fréquence du stator et celle du rotor, est donnée par :

$$f_s = f_r + f_{sr} \quad (\text{II.27})$$

Avec :

f_s, f_r et f_{sr} sont la fréquence du stator (réseau), du rotor et de glissement respectivement.

L'équation (II.26) devient alors :

$$\frac{E_r}{E_s} = m \cdot g \quad (\text{II.28})$$

Les courants au stator et au rotor sont alors liés comme dans un transformateur parfait :

$$\frac{I_r}{I_s} = \frac{1}{m} \quad (\text{II.29})$$

Donc, le rapport entre les puissances apparentes rotorique S_r et statorique S_s s'exprime par :

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{I_r}{I_s} \cdot \frac{E_r}{E_s} = g \quad (\text{II.30})$$

La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la GADA en agissant sur la puissance apparente rotorique via le glissement g .

II.5.2 les modes de fonctionnement :

La machine asynchrone à double alimentation offre une grande flexibilité de fonctionnement grâce à sa capacité à contrôler la vitesse et la puissance, l'accessibilité au rotor permet de choisir le mode de fonctionnement de la machine en contrôlant la fréquence d'alimentation par l'association des convertisseurs électroniques.

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Le contrôle du champ magnétique à l'intérieur de la machine est la base de tous les modes de fonctionnement qui nous allons présenter dans la suite [19] :

- Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone
- Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone
- Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone
- Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

La puissance fournie à la machine déterminer le mode moteur ou générateur, la vitesse de rotation déterminer le mode hypo ou hyper.

II.5.3 Domaine d'application de la MADA :

Dans de nombreux domaines, la machine asynchrone à double alimentation (MADA) se distingue comme une solution idéale pour optimiser la production et la qualité de l'énergie. Sa capacité à fonctionner à des vitesses variables lui confère un avantage considérable par rapport à d'autres types de moteurs dont le champ d'action est limité à une vitesse fixe comme la machine synchrone ou maximale infranchissable comme la machine asynchrone.

Dans le domaine de l'énergie, en particulier dans le secteur des énergies renouvelables, la quête de solutions à la fois flexibles et robustes est un défi majeur. Alors que ces deux qualités semblent souvent incompatibles, la machine asynchrone à double alimentation (MADA) se distingue comme une exception remarquable, offrant un mariage harmonieux de ces deux caractéristiques essentielles. La MADA offre une plage de vitesse étendue, permettant d'adapter le fonctionnement du moteur aux conditions spécifiques de chaque application. Cette flexibilité est particulièrement précieuse dans les domaines tels que les éoliennes, où la vitesse du vent est variable et nécessite un ajustement constant de la vitesse de rotation, et elle peut résister les conditions difficiles et les perturbations due à leur robustes, cette caractéristique est essentielle pour les applications exigeantes, telles que les éoliennes offshores, où l'accès à la maintenance est souvent limité.

La MADA peut être utilisé dans les centrales hydroélectriques pour réguler la vitesse des turbines et pomper l'eau vers les réservoirs, optimisant ainsi la production d'énergie.

La MADA offre un contrôle précis de la vitesse et du couple, ce qui le rend intéressant pour les véhicules électriques, notamment les bus et les camions.

La MADA peut être utilisée dans les groupe électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

Enfin La machine asynchrone à double alimentation se positionne comme un choix optimal pour une production d'énergie performante et flexible. Sa capacité à fonctionner à des vitesses variables, à fonctionner en mode moteur et générateur la rend particulièrement adapté à de nombreuses applications exigeantes dans le domaine de l'énergie.

II.5.4. Intérêt de la MADA dans les applications éoliennes :

Le processus de production d'énergie électrique au moyen d'éoliennes nécessite une étude approfondie de la faisabilité et du coût du projet, et l'un des points les plus importants sur lesquels il faut se concentrer est celui lié à la conversion de l'énergie de sa forme cinétique à sa forme électrique et cela ne peut être fait que via un générateur électrique.

Actuellement et avec la demande croissant d'énergie éolienne, l'un des générateurs les plus utilisés est la MADA en raison de son efficacité et de sa capacité à produire l'énergie électrique à travers le vent, Ce dernier assure une plus grande adaptabilité aux conditions difficiles et aux changements brusques de la vitesse du vent, contrairement à d'autres moteurs, comme le moteur asynchrone et le moteur synchrone, qui ont besoin de certaines conditions pour fonctionner au maximum de leurs capacités, et tout changement dans les conditions environnantes, cela peut affecter grandement leur productivité ce qui est considéré comme un avantage majeur de la MADA par rapport aux autres, car on trouve la plupart des turbines offshore dépendent fortement de ce type de générateur. La MADA est également bien adaptée aux grandes éoliennes en raison de sa capacité à générer des puissances élevées et de fonctionner en survitesse (jusqu'à deux fois la vitesse nominale) de plus la MADA grâce à sa double alimentation offre plusieurs possibilités de reconfiguration du mode de fonctionnement de la machine. [20]

Dans ce contexte il est clair que la MADA offre de nombreux avantages pour les applications éoliennes grâce à son contrôle précis de la vitesse et de la puissance, à son facteur de puissance ajustable, à sa structure robuste et à sa flexibilité opérationnelle. Ces caractéristiques font du MADA un choix optimal pour les applications éoliennes, mais comme toutes les machines électriques, la MADA a également des inconvénients.

II.5.5. Avantages et inconvénients de la MADA**II.5.5.1. Les avantages :**

- ❖ La MADA offre un contrôle précis de la vitesse et de la puissance grâce à l'accessibilité au rotor
- ❖ En régime hyper synchrone, la MADA permet de fonctionner à couple constant.
- ❖ La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne).

- ❖ La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et la machine asynchrone, à savoir : [19]
 - Fonctionnement à vitesse de rotation variable ;
 - Régulation découplée des puissances actives et réactives ;
- ❖ En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse, ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.

II.5.5.2. Les Inconvénients :

- ❖ Le MADA est généralement plus coûteux que d'autres types de moteurs électriques utilisés dans les éoliennes. Ce coût plus élevé est dû à la complexité accrue de la conception du MADA et à la nécessité de convertisseurs électroniques pour contrôler le stator et le rotor.
- ❖ L'utilisation du MADA dans une éolienne implique un système de commande et de contrôle plus complexe en raison de la nécessité de gérer le stator et le rotor indépendamment
- ❖ Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais

II.5.6. Modélisation de la MADA :

II.5.6.1. Hypothèses simplificatrices :

En raison de la complexité du moteur, nous ne pouvons pas le modéliser directement et, pour obtenir de meilleurs résultats, plus proches de la réalité, nous devons émettre des hypothèses permettant de simplifier au maximum le modèle de la machine, pour cela en va présenter les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La machine à une construction symétrique ;
- Les forces magnétomotrices créent par chaque phase du stator ou du rotor ont une répartition sinusoïdale ;

- L'effet de la variation de la température sur les résistances statorique et rotorique est négligeable [21]
- Pas de régime homopolaire puisque le neutre n'est pas connecté ;
- Les pertes ferromagnétiques et l'effet de peau sont négligeables ;
- La machine à une construction symétrique ;

D'après les hypothèses en peut présenter un schéma simplifier de la MADA dans le repère triphasé par la figure II.18 :

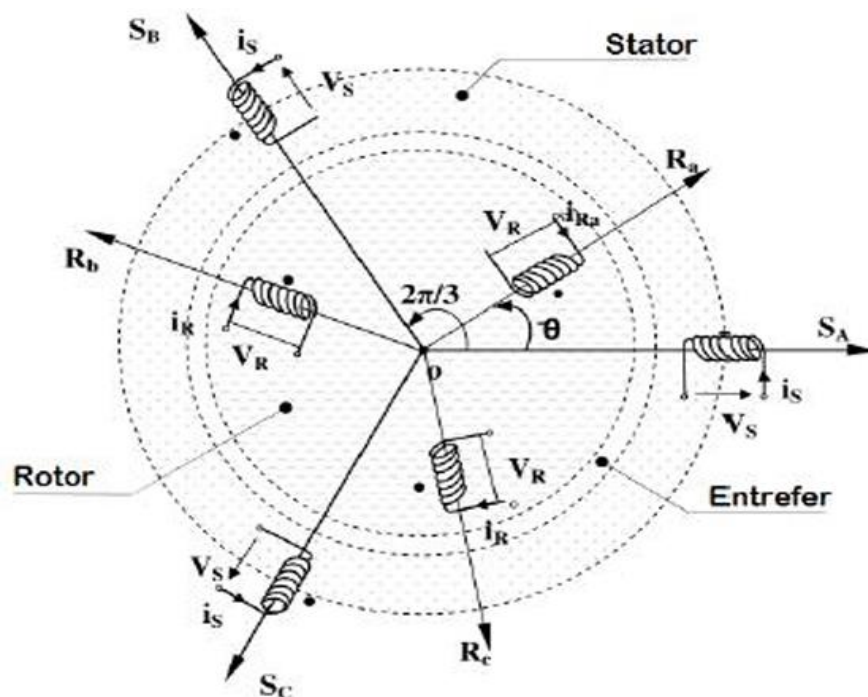


Figure II.17 : Schéma des enroulements de la MADA.

Telle que :

as, bs, cs : représente les trois phases du statorique.

ar, br, cr : représente les trois phases du rotorique.

θ est l'angle électrique entre l'axe de la phase «as» statorique et la phase« ar» rotorique.

D'après la figure en peut dit que le Schéma des enroulements de la MADA est plus proche au schéma du moteur asynchrone à cage, avec une légère différence qui réside dans l'existence des tensions non nulles dans la partie rotorique de la MADA.

II.5.6.2. Modèle mathématique de la MADA :

II.5.6.2.1. Equations dans le repère triphasé (a,b,c) :

a) - Equations électriques :

Ces équations représentent le comportement électrique du stator et du rotor du MADA en utilisant des circuits électriques équivalents. Elles incluent les inductances, les résistances et les forces contre-électromotrices des enroulements.

Les équations électriques des tensions statorique et rotorique de la MADA s'écrivent, dans un repère triphasé, de la manière suivante (Loi de Faraday) :

- Pour le stator :

$$[V_s] = [R_s] * [I_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \quad (\text{II.31})$$

- Pour le rotor :

$$[V_r] = [R_r] * [I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \quad (\text{II.32})$$

$$\text{Où : } [V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}, [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}, [\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}, [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Avec :

$V_{sa,b,c}$ et $V_{ra,b,c}$: les tensions statorique et rotorique de la machine ;

$I_{sa,b,c}$ et $I_{ra,b,c}$: les courants statorique et rotorique de la machine ;

$\phi_{sa,b,c}$ et $\phi_{ra,b,c}$: les flux statorique et rotorique de la machine ;

R_s et R_r : les résistances des enroulements statorique et rotorique de la machine.

b) - Equations magnétiques :

Ces équations décrivent l'évolution du champ magnétique dans le MADA. Elles permettent de calculer la distribution des flux magnétiques.

Les équations magnétiques sous forme matricielle sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M] \\ [M] & [L_r] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

$$\text{Tel que: } [L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$[M] = [M_{rs}]^t = [M_{sr}] = m \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

Avec:

L_s et L_r : les inductances cycliques statorique et rotorique de la machine ;

M_s et M_r : les inductances mutuelles entre deux phases statorique et entre deux phases rotoriques de la machine ;

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

m : la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor ;

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

l_s et l_r : Les inductances propres statorique et rotorique.

$$\text{On a : } \begin{cases} L_s = l_s - M_s & ; L_r = l_r - m_r & ; M = \frac{3}{2}m \end{cases}$$

c)- Equation mécanique

Cette équation relie les grandeurs mécaniques du système tel que la vitesse de rotation du générateur généré par la turbine et le couple, Elles prennent en compte les moments d'inertie et les frottements mécaniques du système.

$$J_g \cdot \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{em} - C_r + f_r \cdot \Omega_{méc} \quad (\text{II.35})$$

Avec :

J_g : Moment d'inertie des masses tournantes ;

C_r : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine ;

$\Omega_{méc}$: Vitesse mécanique ;

C_{em} : Couple électromagnétique de la machine ;

f_r : Coefficient de frottement visqueux ;

$(f_r \cdot \Omega_{méc})$: Terme de couple de frottement visqueux.

D'après les équations précédentes, nous ne pouvons pas simuler directement le moteur sans recourir à certaines techniques qui facilitent ce processus, et cela est dû à la difficulté d'analyser ces équations, et à l'existence des termes qui varient en fonction de la position, pour cela on va utiliser des techniques simplificatrices qui permettent de réduire le degré de complexité des équations.

II.5.6.2.2. Equations dans le repère de Park (d,q,o)

La transformation de Park est l'une de ces techniques qui permet de rendre le comportement de la machine plus simple et moins compliqué par transformation des équations du circuit équivalent du moteur, initialement exprimées dans un repère triphasé fixe (abc), en un repère biphasé mobile (dq). Cette conversion est appelée souvent transformation des axes à condition de conserver la force magnétomotrice et la puissance instantanée.

a) - Matrice de Park

La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

θ : représente l'angle de transformation qui dépend du repère choisi et des grandeurs statorique ou rotorique. Pour le repère (dq), on prend la valeur θ_s pour les grandeurs statorique et la valeur θ_r pour les grandeurs rotorique.

Pour appliquer cette transformation on note la relation suivante qui permet de transformer le repère biphasé vers le triphasé on appelle cette transformation par **la transformation de Park direct** :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

Avec

x: tension, courant ou flux, et les indices suivants représentent :

d : indice de l'axe direct.

q : indice de l'axe en quadrature.

o : indice de l'axe homopolaire

Pour avoir l'inverse c'est à dire le triphasé vers le biphasé on note **la transformation de Park inverse** qui s'exprime par :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = P(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Avec : $P(\theta)^{-1}$ la matrice de transformation inverse de Park donnée par :

$$P(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

La composante homopolaire (o) dans un système équilibré est nulle

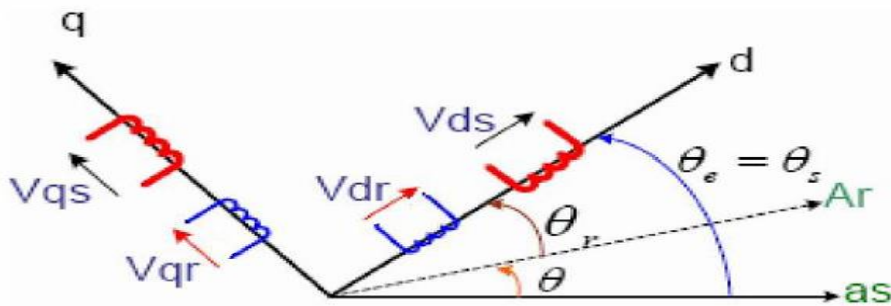


Figure II.18 : Référentiel tournant d'axes (d-q).

b) - L'application de la transformation de Park :

Pour les tensions :

- le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{abcs} \\ I_{abcs} \\ \phi_{abcs} \end{bmatrix} = P(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} V_{dqs} \\ I_{dqs} \\ \phi_{dqs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

Dans l'équation électrique de stator en va remplacer chaque grandeur par leur transformer inverse on trouve :

$$[P(\theta)]^{-1} \cdot [Vdqs] = [Rs] \cdot [P(\theta)]^{-1} \cdot [Idqs] + \frac{d}{dt} [[P(\theta)]^{-1} [\phi dqs]] \quad (\text{II.41})$$

On multiplie (II.41) par $P(\theta)$ donc :

$$[Vdq_s] = [R_s] \cdot [Idq_s] + \frac{d}{dt} [\phi dq_s] + [P(\theta)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta)]^{-1} [\phi dq_s]] \quad (\text{II.42})$$

On note que :

$$[P(\theta)] \cdot \left[\frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \right] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \left[\frac{d\theta}{dt} \right] \quad (\text{II.43})$$

On applique les mêmes étapes pour le rotor donc la transformation de Park des tensions statorique et rotorique est donné par :

$$\begin{cases} Vds = R_s \cdot Ids - \frac{d\theta}{dt} \cdot \phi_{qs} \\ Vqs = R_s \cdot Ids + \frac{d\theta}{dt} \cdot \phi_{ds} \\ Vdr = R_r \cdot Idr - \frac{d\theta}{dt} \cdot \phi_{qr} \\ Vqr = R_r \cdot Idr + \frac{d\theta}{dt} \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

Jusqu'à présent, on ne peut pas se fier à ces équations due à l'existence de l'angle θ , donc pour éliminer ce problème on va choisir une référence pour définir cet angle qui existe entre le stator et le rotor, Le choix d'un repère de référence dépend essentiellement du but de la modélisation et de la compatibilité des composantes du système étudié. Il existe trois repères biphasés de références [22] :

- Référentiel lié au stator où : $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$, $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega$

Ce repère de référence est le mieux adapté pour les grandeurs instantanées. Il est utilisé pour l'étude des variations importantes de la vitesse de rotation de la machine.

- Référentiel lié au rotor où : $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$, $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega$,

Ce repère de référence est adapté pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.

- Référentiel lié au **champ tournant** appelé référentiel tournant à la vitesse de pulsation synchrone où : $\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}$, $\omega = \omega_s - \omega_r$,

Contrairement aux repères précédent, l'existence de la position statorique et rotorique (ω_s, ω_r) fait de cette référence le plus compatible avec les applications de commande donc il s'adapte parfaitement à la commande vectorielle par orientation du flux statorique (permet d'avoir un découplage parfait entre les puissances active et réactive statorique).

Après avoir choisi la référence de synchronisme comme un repère, le modèle biphasé de la MADA lié au champ tournant est représenté par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

Pour le flux, la transformation de Park est donnée par :

$$\begin{cases} \phi_{dqs} = L_r \cdot Idqs + M \cdot Idqr \\ \phi_{dqr} = L_r \cdot Idqr + M \cdot Idqs \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

On peut exprimer cette relation a la forme matricielle suivant :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.47})$$

c)- Expression de puissances :

Les expressions des puissances active et réactive statorique sont données par :

$$\begin{aligned} P_s &= (V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs}) \\ Q_s &= (V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs}) \end{aligned} \quad (\text{II.48})$$

d)- Expression du couple :

Pour avoir le couple électromagnétique on utilise l'expression du puissance active statorique :

$$P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \quad (\text{II.49})$$

Après la démonstration on trouve que cette puissance se divise en trois formes

$$P_s = P_j + P_r + P_{em} \quad (\text{II.50})$$

P_j : les pertes joule statorique ;

P_r : les pertes rotorique ;

P_{em} : puissance électromagnétique.

On note que la relation de la puissance électromagnétique en fonction du couple est donnée par

$$P_{em} = \omega_s C_{em} \quad (\text{II.51})$$

Où

$$P_{em} = \omega_s (\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) \quad (\text{II.52})$$

D'après (II.51) et (II.52) on détermine le C_{em} par :

$$C_{em} = p (\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) \quad (\text{II.53})$$

A partir (II.47), on peut déterminer les courants statorique en fonction de flux statorique et des courants rotorique

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{1}{L_r} \phi_{ds} - \frac{M}{L_r} I_{dr} \\ I_{qs} = \frac{1}{L_r} \phi_{qs} - \frac{M}{L_r} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.54})$$

Pour trouver l'expression de couple électromagnétique final on remplace (II.54) dans (II.53) et on trouve :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} \cdot (I_{dr} \phi_{qs} - I_{qr} \phi_{ds}) \quad (\text{II.55})$$

II.6. Alimentation de la machine :

Avant de simuler le système éolienne (machine +turbine), nous devons nous assurer de disposer d'un système d'alimentation capable de fournir au moteur l'alimentation nécessaire pour garantir le succès du processus de conversion d'énergie et son intégration dans le réseau. Dans notre cas, l'utilisation d'un moteur à double alimentation nécessite la présence d'une alimentation simultanée pour la partie fixe et la partie rotorique.

L'alimentation du stator est directement effectuée à partir du réseau électrique, contrairement au rotor qui nécessite un contrôle de son alimentation, réalisé uniquement à

travers des convertisseurs statiques, cela permet de varier la vitesse et de contrôler la puissance produit.

Notre étude s'intéresse à l'utilisation d'un onduleur trois niveaux de type NPC qui permet d'obtenir d'une tension de sortie à trois niveaux de fréquence et valeur efficace fixe ou réglable par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimentés chacun par une source de tension continue distincte. [22]

Le schéma structurel d'un onduleur triphasé de tension à trois niveaux à structure NPC est illustré par la figure II.21.

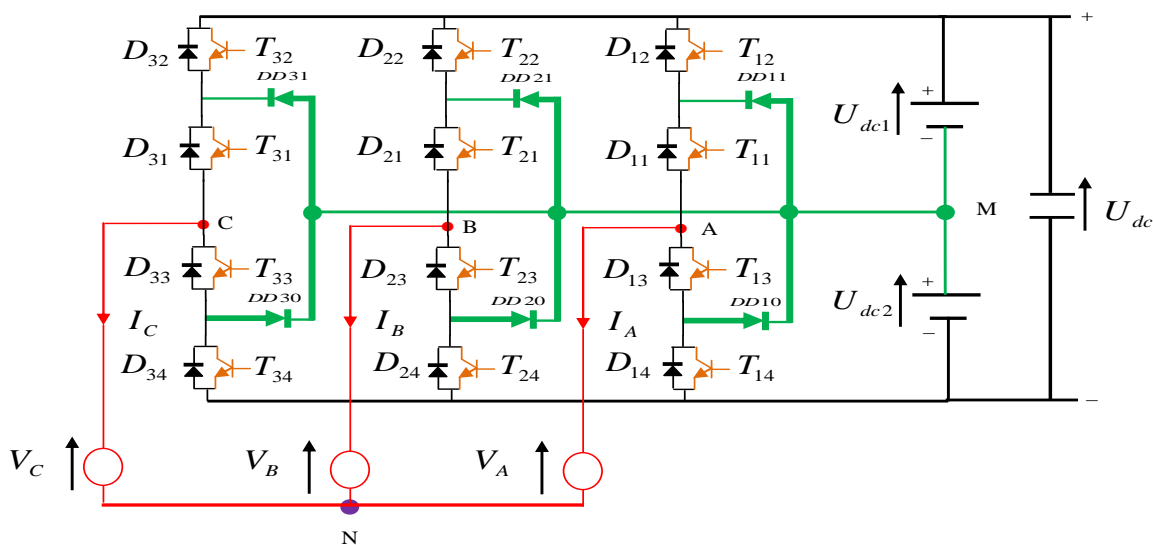


Figure II.19 : Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC

Cet onduleur est constitué de trois bras et de deux sources de tension continue. Chaque bras comporte quatre interrupteurs en série et deux diodes médianes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montée en tête bêche.

II.6.1. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux de type NPC :

Pour simplifier la Modélisation, on note que les trois bras sont identiques et symétriques donc on peut travailler avec une configuration d'un seul bras, on présent l'ensemble (Transistor -diode) par un seul interrupteur bidirectionnel Ka, la figure II.22 présente cette configuration :

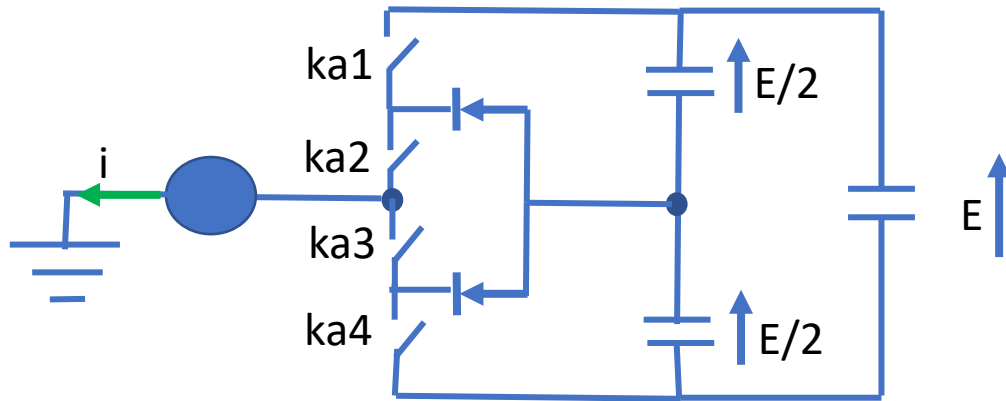


Figure II.20 : Un bras de l’onduleur à trois niveaux de type NPC.

L’ouverture et la fermeture des interrupteurs se déroule d’une manière spécifique afin d’éviter les courts-circuits et d’obtenir les trois niveaux de tension 0, +E/2, -E/2

On donne ci-dessous le tableau récapitulatif (tableau II.1) représente la tension de sortie d’un onduleur NPC à trois niveaux en fonction de l’état des interrupteurs,

Etat des interrupteurs				Tension de sortie Vao
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	
1	1	0	0	E/2
0	1	1	0	0
0	0	1	1	-E/2

Tableau II.1 : Table de commutation du convertisseur NPC 3 niveaux [23]

La fonction de connexion traduit l’état ouvert ou fermé de l’interrupteur. Chaque interrupteur supposé idéal introduit une fonction de connexion d’un demi- bras notée F_{km}^b

Où k : Numéro du bras ($k = 1; 2; 3$).

$$m = \begin{cases} 0 & \text{pour le demi bras du bas} \\ 1 & \text{pour le demi bras du haut} \end{cases}$$

Les fonctions de connexion des demi-bras s’expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{aligned} F_{k1}^b &= F_{k1} \cdot F_{k2} \\ F_{k0}^b &= F_{k3} \cdot F_{k4} \end{aligned} \tag{II.56}$$

Avec :

F_{ki} : commande des transistors ($k = 1, 2,3$ et $i = 1, 2,3, 4$).

Les tensions simples de charges sont données par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{dc1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{dc2} \right\} \quad (\text{II.57})$$

La forme des ondes de tension obtenu V_a , V_b , V_c n'est pas sinusoïdale, elle est très riche en harmonique, pour les applications de forte puissance, les ondes de faibles perturbations sont nécessaires, avec la disponibilité du semi-conducteur de puissance. Les harmoniques peuvent être réduire à l'aide de la techniques MLI [24].

II.6.2. Principe de la commande MLI

Cette technologie vise à améliorer la qualité des tensions produites et à les rendre plus proches de la forme sinusoïdale en accélérant le processus d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, Cela permettra de réduire Les harmoniques, minimiser les pertes dans le système par conséquent augmenter le rendement.

Le principe de la MLI consiste à comparer un signal triangulaire de haut fréquence appelée porteuse, aux trois tensions de référence sinusoïdales de basse fréquence, les instants où se produise les intersections de la porteuse et de la référence détermine la durée d'ouverture et de fermeture des interrupteurs. La figure II.23 présente ce principe.

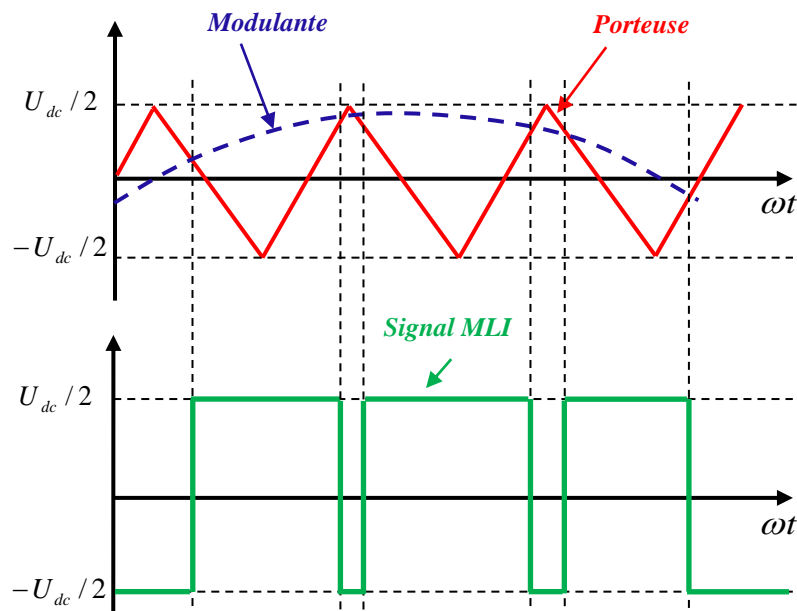
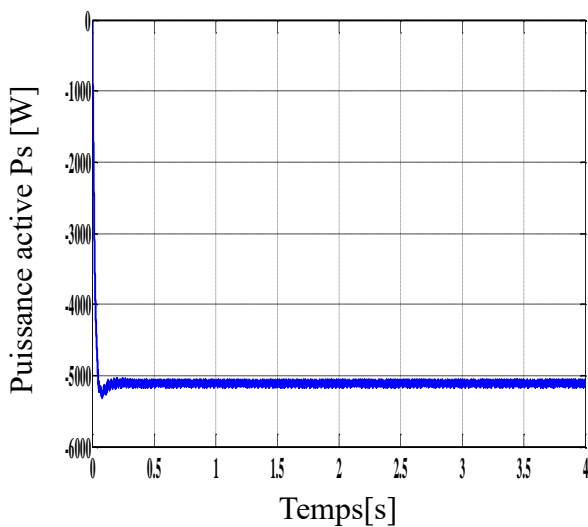


Figure II.21 : Principe de commande en MLI sinus-triangulaire.

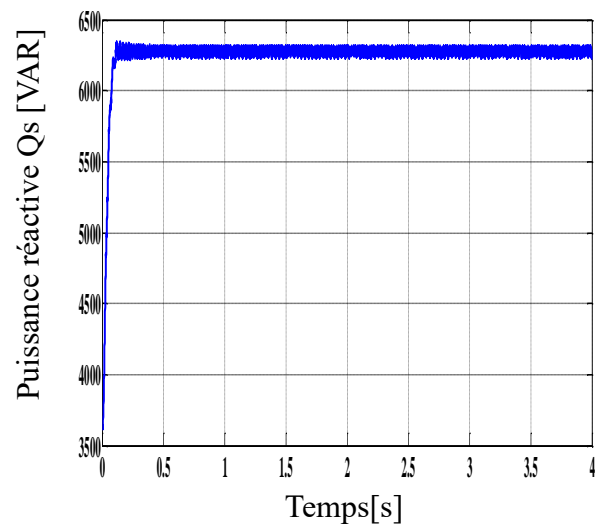
II.7.3. Résultats de Simulation obtenus :

Dans cette partie, on va présenter les résultats de simulation de notre chaîne éolienne qui se compose d'une turbine de 10 KW et d'un MADA alimenter par onduleur à trois niveaux à structure NPC, les paramètres de l'ensemble sont présentés dans l'annexe [A].

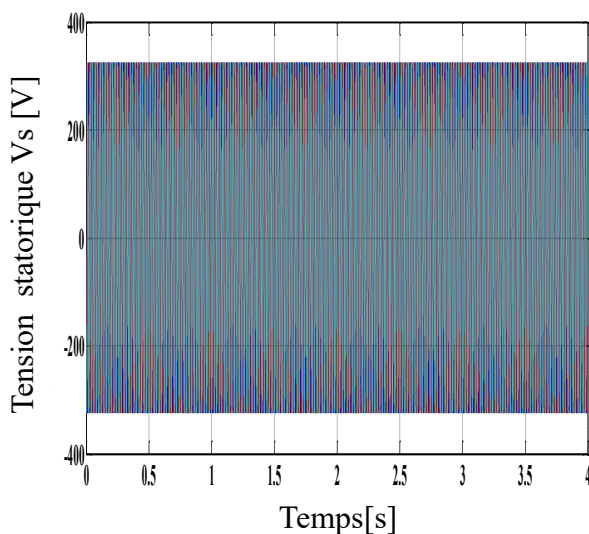
Les figures II.23-(a-b-c-d-e-f-g-h-i-j) montrent respectivement : La puissance active P_s , la puissance réactive Q_s , la tension satatorique V_s , la tension satatorique (Zoom),le courant statorique I_s , le courant satatorique (Zoom), le courant rotorique I_r , le courant rotorique (Zoom), le couple électromagnétique C_{em} de la GADA ainsi que le facteur de puissance $\cos \phi$



(a)

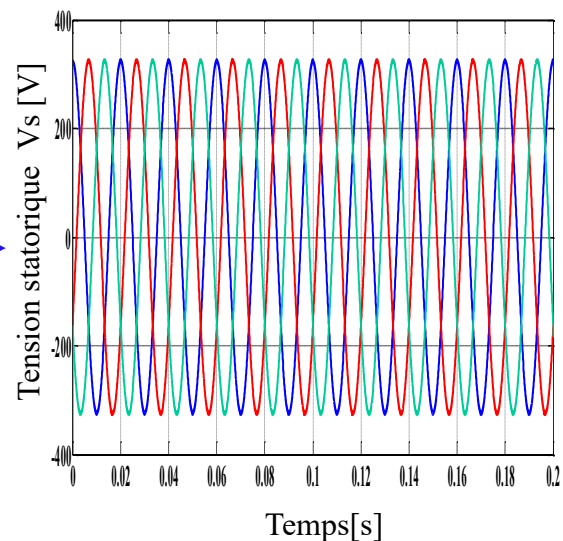


(b)



(c)

Zoom



(d)

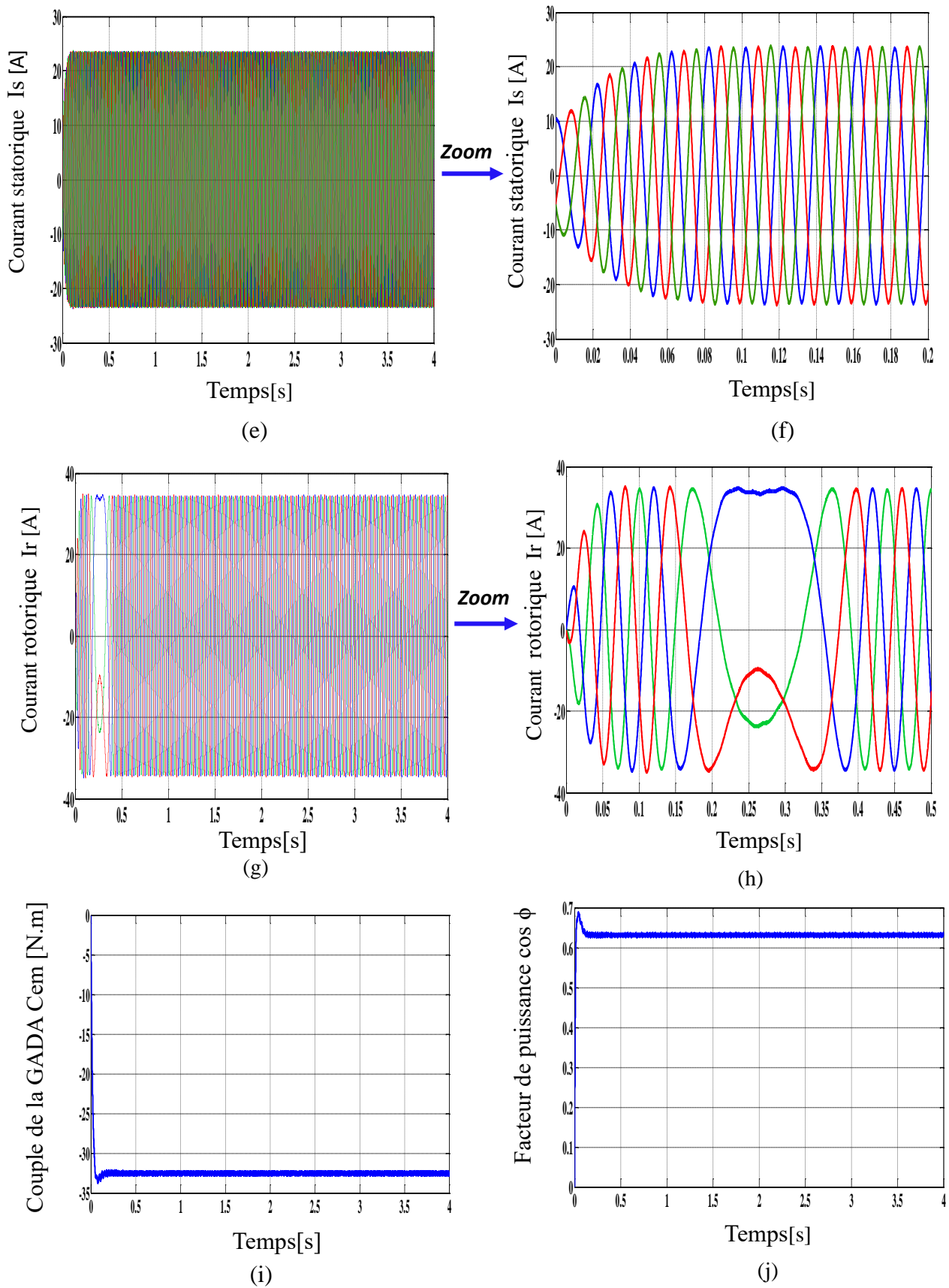


Figure II.22 : Résultats de simulation de la chaîne éolienne (MADA Turbine)

II.7.1. Interprétation des résultats :

A partir des résultats de simulation on note que la machine produit une puissance active à la moitié de leur puissance nominale malgré la variation brusques de vent, cependant elle a produit une puissance réactive en plus grande quantité que la puissance active (figure **II.23-a,b-**), cette différence a traduit par un mauvais facteur de puissance ($\cos \phi=0.63$) observe dans la figure **II.23(-j-)**.

Les deux figure **II.23(-d,f-)** montre respectivement la forme sinusoïdal des tension et des courant statorique V_s , I_s . Concernant les courant rotorique montrée dans la figure **II.23(-h-)**, on remarque une déformation a l'instant 0.2s cela est dû au passage du mode hyposynchrone au hypersynchrone. Enfin et concernant le couple de la machine, la figure **II.23(-i-)** montre que le couple est de signe négative cela est dû au fait que la machine fonctionne comme un générateur.

II.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons traité le processus de modélisation et la simulation basé sur les équations mathématiques pour chaque partie de la chaîne éolienne, à partir de la turbine jusqu'au la machine à double alimentation qui est alimenté par onduleur trois niveaux de type NPC.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons dire que nous n'avons pas tiré la meilleure performance de cette chaîne, car seule la moitié de la puissance nominale estimée à 10 kilowatts a été produite. Cela est dû au couplage entre les grandeurs de la machine, donc Il est nécessaire de recourir à des techniques de contrôle permettant d'éliminer ce problème.

Le contrôle indépendant des puissances active et réactive sera la solution optimale à ce dilemme, pour cela, on aura recours à ce que l'on appelle la commande vectorielle par orientation de flux statorique qui est l'objectif du dernier chapitre.

*Commande vectorielle de
la MADA*

Chapitre III :

Commande vectorielle de la MADA

III.1. Introduction :

La complexité des moteurs à courant alternatif par rapport aux moteurs à courant continu rend le processus de contrôle plus difficile en raison de couplage qui existe entre le couple et le flux, ce qui rend impossible de contrôler l'un sans affecter l'autre, contrairement au moteur à courant continu à excitation séparée, ces deux grandeurs sont naturellement découplées ce qui facilite la commande de cette machine.

Le problème de couplage peut être résolu en recourant à une technique connue sous le nom de la commande vectorielle ou la commande par flux orienté qui baser sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux, donc on obtient une dynamique similaire à celle d'un moteur à courant continu à excitation séparée, où le couple est en fonction de I_{qr} et le flux est en fonction de I_{dr} .

La figure III.1 illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande découplée classique d'une machine à courant continu et la commande vectorielle d'une MADA

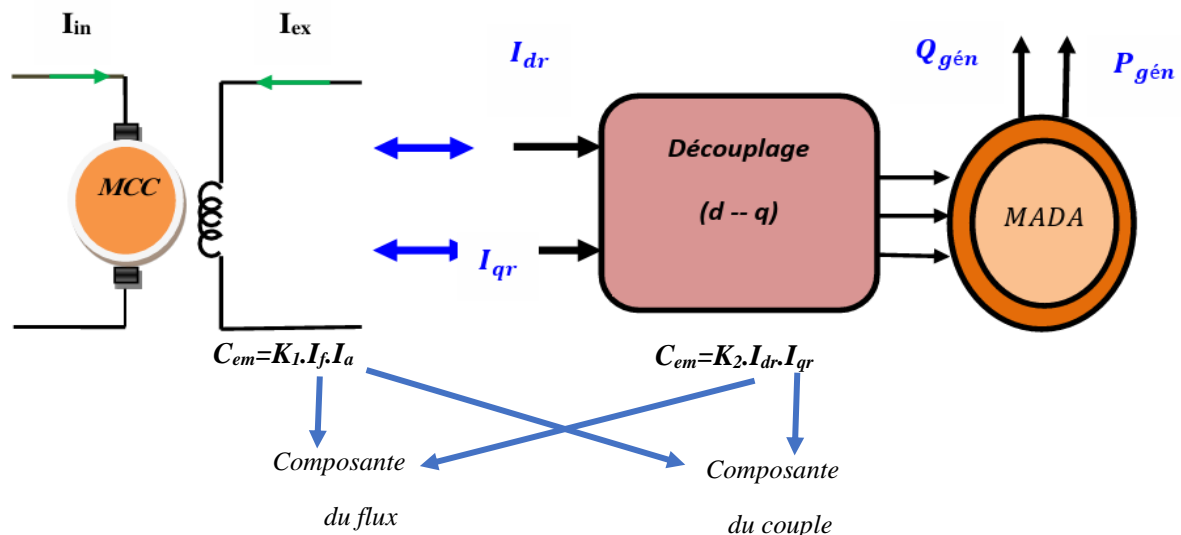


Figure III.1: Equivalence entre la commande d'une MCC et la commande vectorielle d'une MADA

III.2. Technique d'orientation du flux de la GADA

Dans ce travail, on expose le développement de la commande vectorielle à flux statorique orienté de la MADA. Ainsi, comme la *Figure III.1* montre le flux sera callé sur l'axe (d) et la tension du stator sur l'axe (q). On a donc : $\varphi_{ds} = \varphi_s$ et par suite $\varphi_{qs} = 0$.

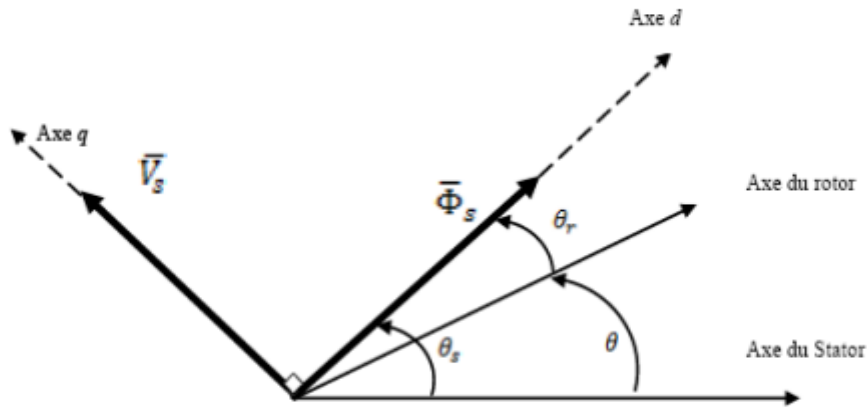


Figure III.2 : Orientation du flux statorique.

En appliquant ce principe sur les équations de la machine présenter dans le chapitre précède pour trouver un model simplifier qui permet un contrôle Independent des deux puissances

L'équation de couple électromagnétique est écrit :

$$C_{em} = -p \frac{M}{L_s} I_{qr} \varphi_{ds} \quad (\text{III.1})$$

Et l'équation des flux devient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

En détermine l'équation de I_{ds} et I_{qs} à partir de II.2 : A l'aide de l'équation (III.2), on peut établir le lien entre les courants statorique et rotorique :

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Les puissances active et réactive statorique s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

En remplace (III.4) dans (III.6) :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotorique, on remplace dans l'équation précédente les courants par l'équation (III.5):

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + V_s \frac{\varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

D'après les équations (III.3) et (III.4), nous obtenons, pour le flux statorique, l'expression suivante :

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (\text{III.9})$$

L'expression des puissances peut donc se simplifier de la manière suivante :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (III.10)$$

En remplaçant dans l'équation des flux, les courants statorique par l'expression (III.5) on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_s - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (III.11)$$

Pour le contrôle de la génératrice, en montrant la relation entre les courants et les tensions rotorique qui lui seront appliquées.

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_s - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_s - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.12)$$

g : glissement de la machine.

A partir des équations en établir un schéma bloc du système électrique à réguler donne par (Figure III.2) :

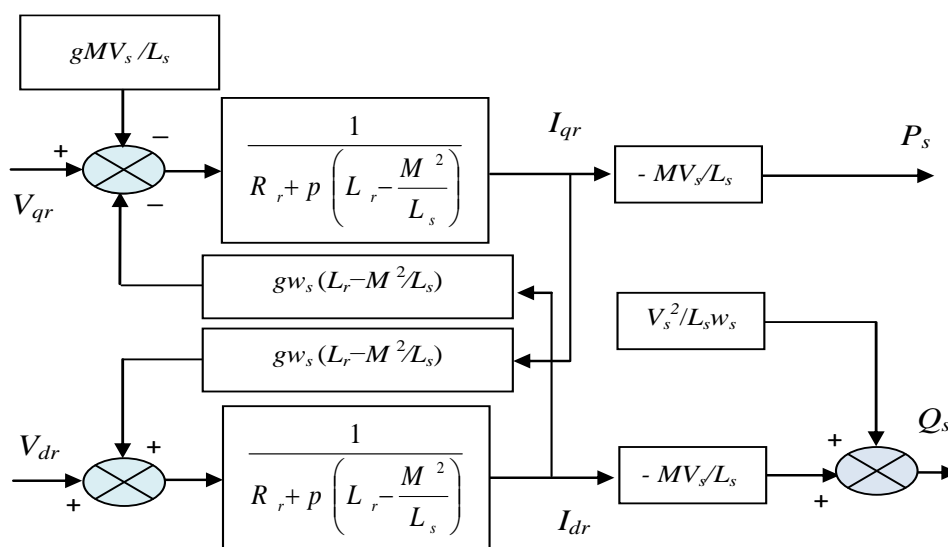


Figure III.3: Schéma bloc du système à réguler.

La commande vectorielle vient régler le problème de découplage. Ainsi, il y a deux méthodes pour effectuer la commande en puissance de cette machine, la Méthode qui consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine (Figure III.3).

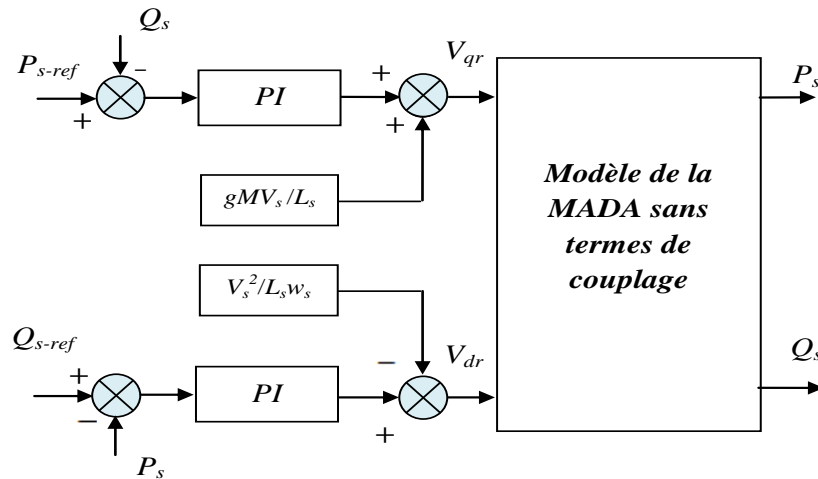


Figure III.4: Schéma bloc de la commande directe

La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotorique. Cette méthode appelée méthode indirecte qui présenter par la Figure III. 4

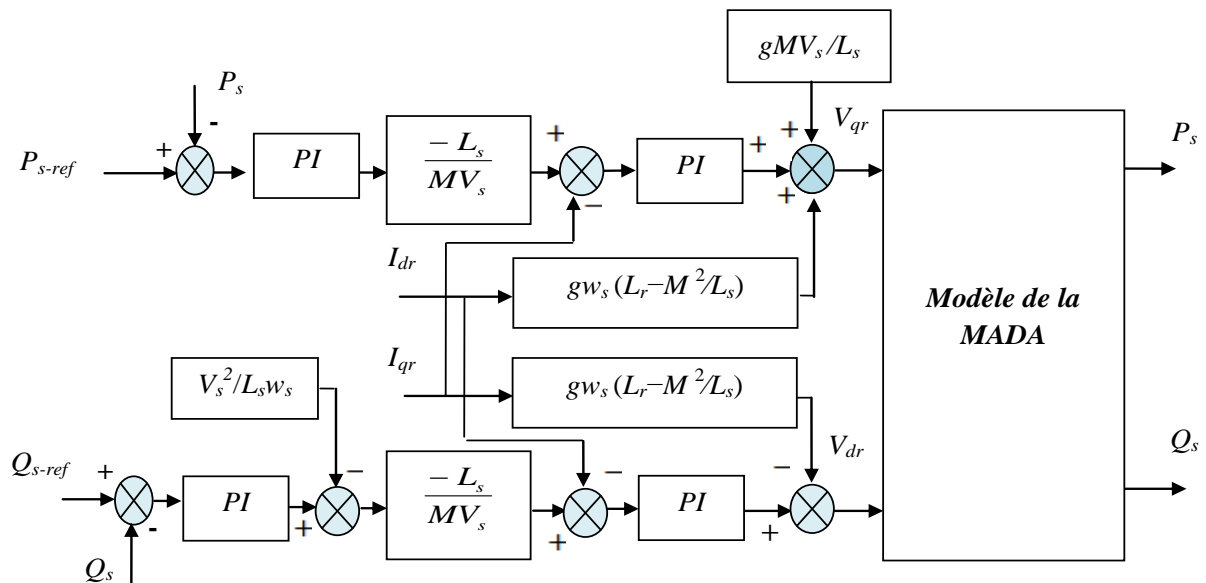


Figure III.5: Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance.

L'intérêt que présente la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple, par contre la méthode indirecte a l'avantage de contrôler les courants rotorique ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants ou de rajouter une référence de courant harmonique pour faire fonctionner la MADA en filtre actif, mais elle est complexe à mettre en œuvre.

III.3. Synthèse du régulateur PI :

La synthèse des régulateurs nécessaires à la réalisation de la commande en puissance active et réactive de la MADA. Le régulateur PI (Proportionnel Intégral) utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. Et chaque axe comprend un régulateur de type PI dont la fonction de transfert est de la forme $k_p + \frac{k_i}{p}$ Nous avons donc un système bouclé et corrigé par le régulateur précédemment (Figure III.5).

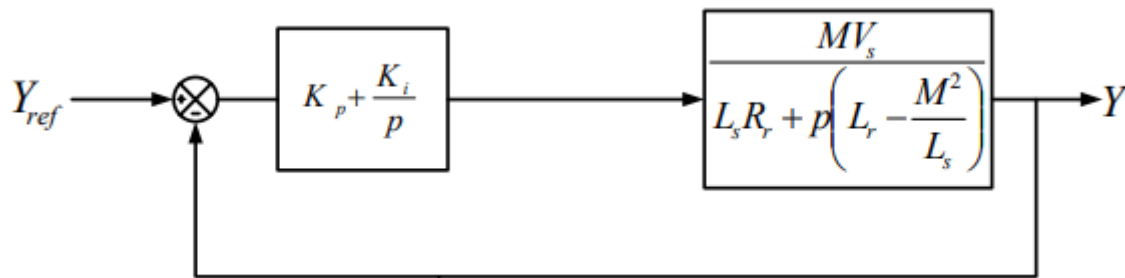


Figure III.6: Système régulé par un régulateur PI

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

$$FTBO = \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p + \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \tag{III.13}$$

En choisie la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (\text{III.14})$$

Après la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{k_p \frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (\text{III.15})$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + p \tau_r} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad (\text{III.16})$$

« τ_r » c'est le temps de réponse du système sera choisi lors de la simulation afin d'offrir le meilleur compromis entre performances et rapidité. D'autant plus qu'une valeur non adaptée causerait des perturbations lors des régimes transitoires et provoquerait des dépassements et des instabilités indésirables.

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s}; K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{MV_s} \quad (\text{III.17})$$

III.4. Résultats de simulations obtenus :

Le schéma bloqué des deux techniques direct et indirect sont présentées respectivement dans La figures III.6 et III.7.

Afin de comparer le comportement des deux méthodes de commande étudiées en appliquant une vitesse du vent variable qui illustrer dans le chapitre précédent, quatre catégories de tests ont été effectués, à savoir : suivi de consigne, contrôle de facteur de puissance, robustesse vis-à-vis les variations paramétriques de la machine et le test de THD.

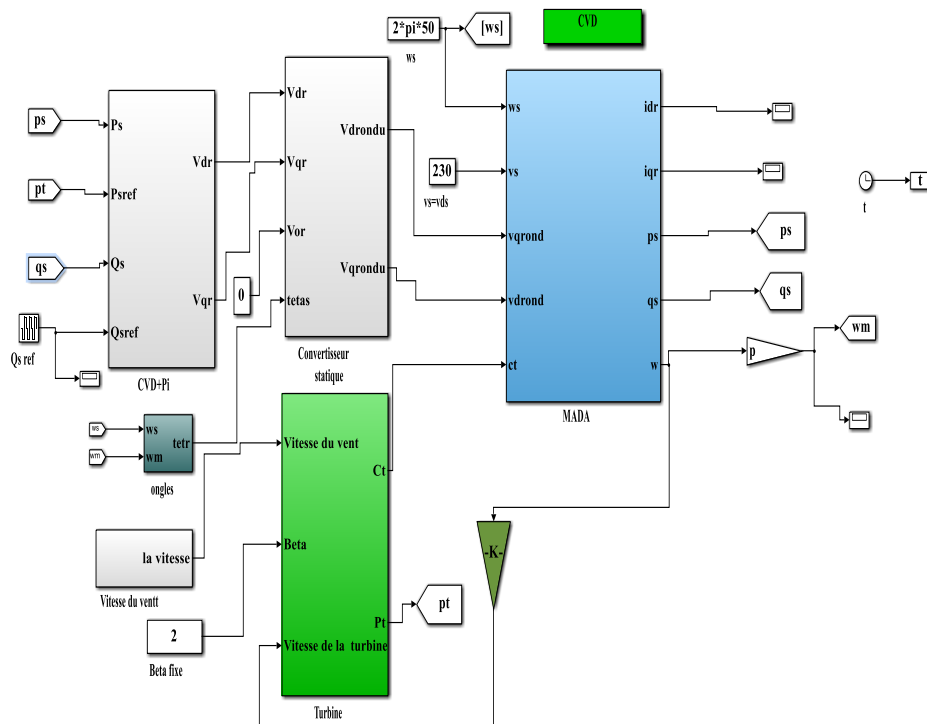


Figure III.7: schéma bloqué de la CVD

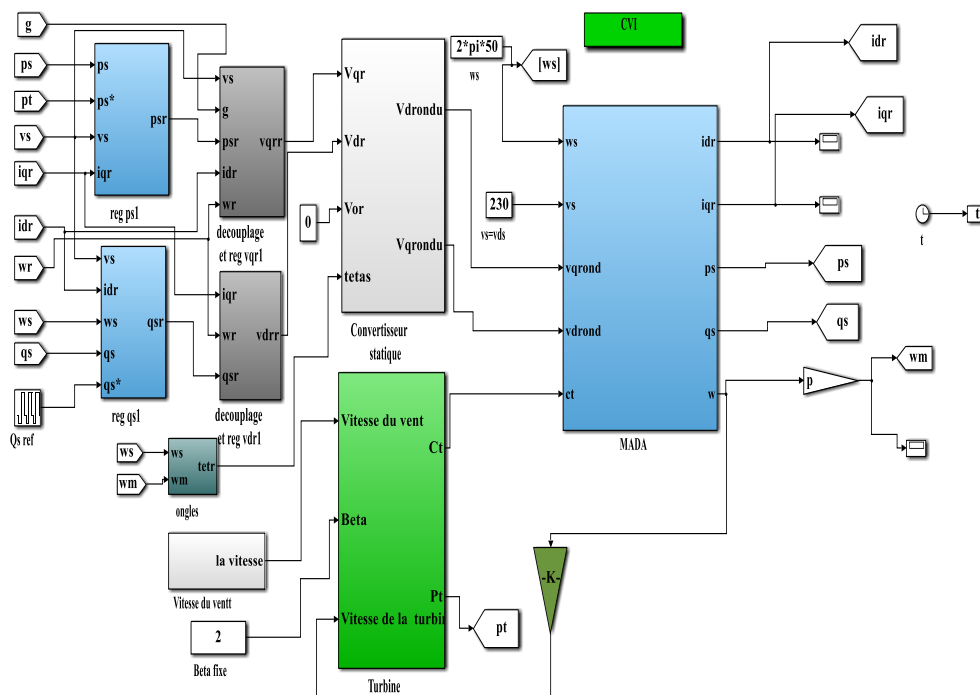
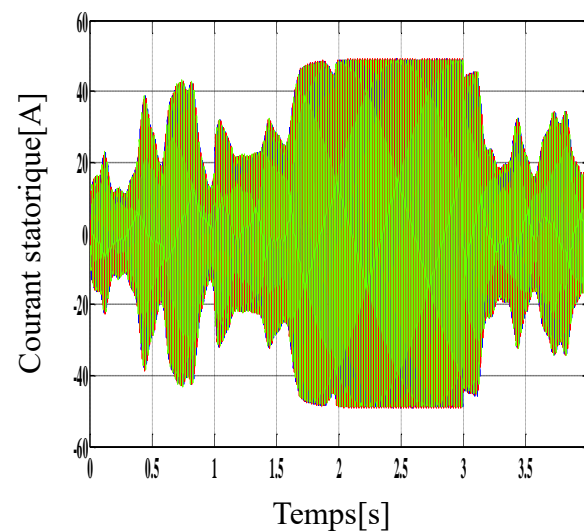
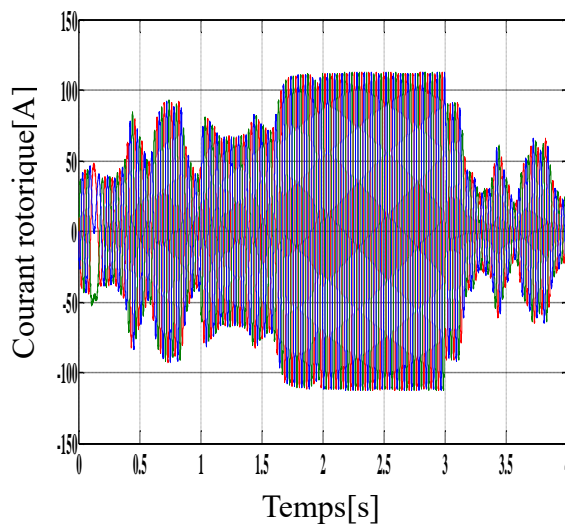
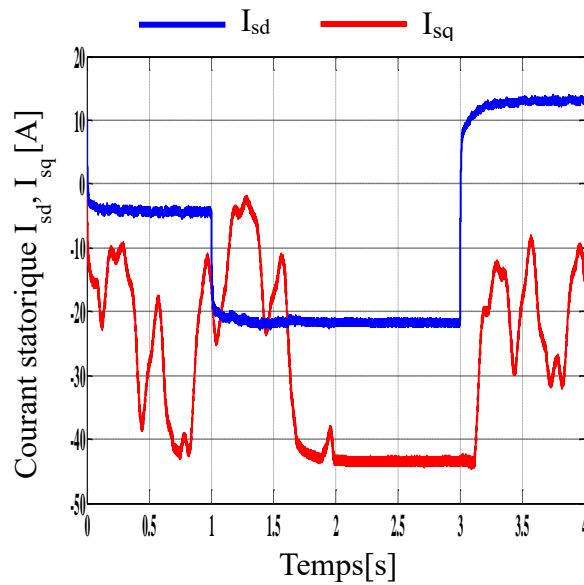
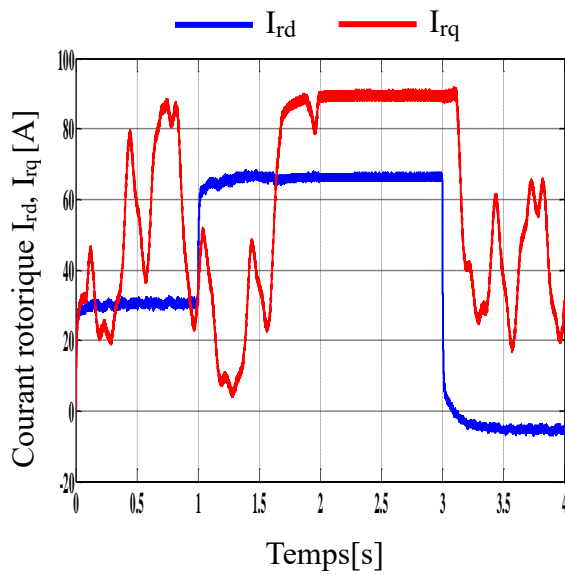
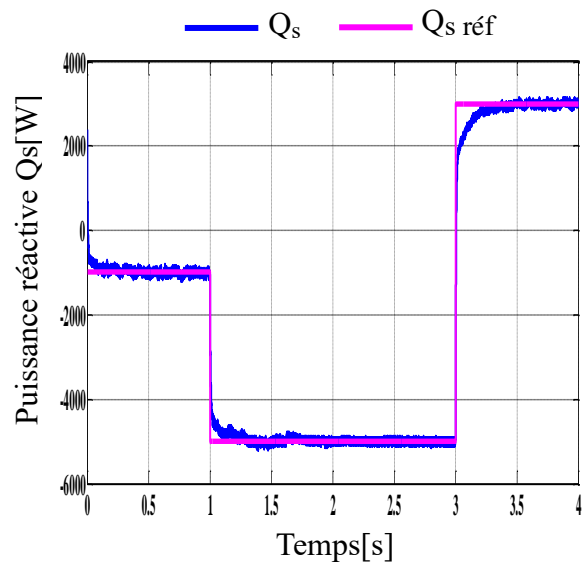
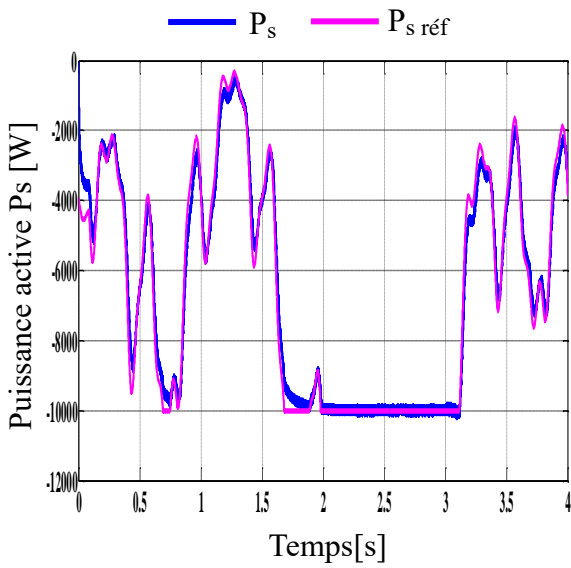


Figure III.8: schéma bloqué de la CVI

III.4.1. Test de suivi de consigne :



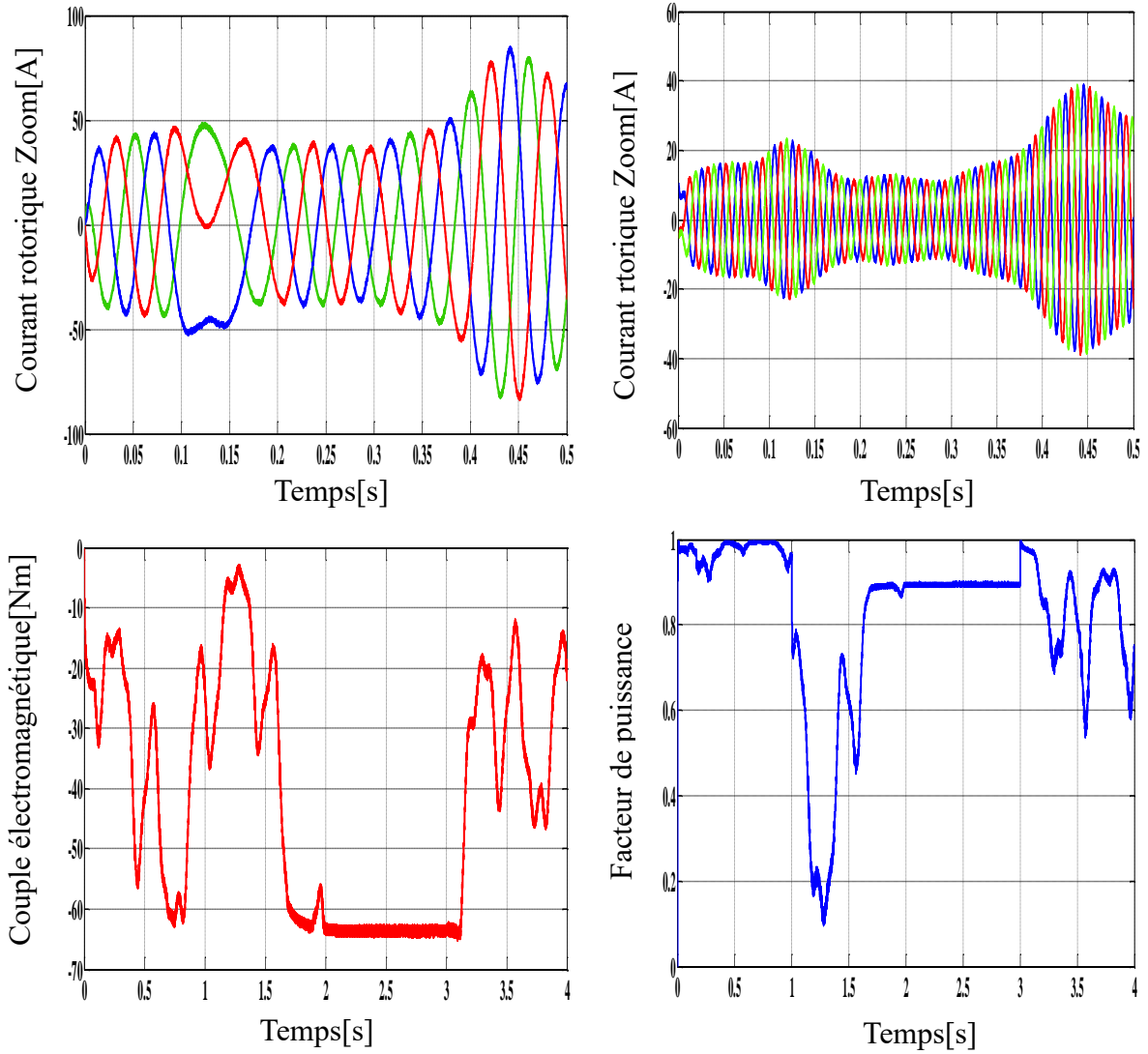
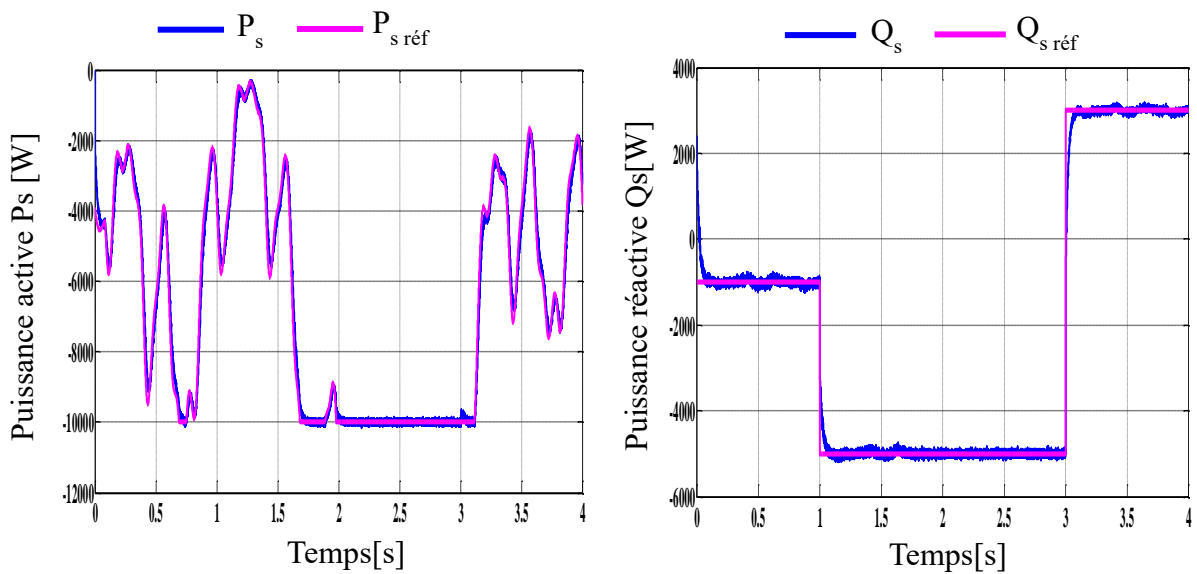
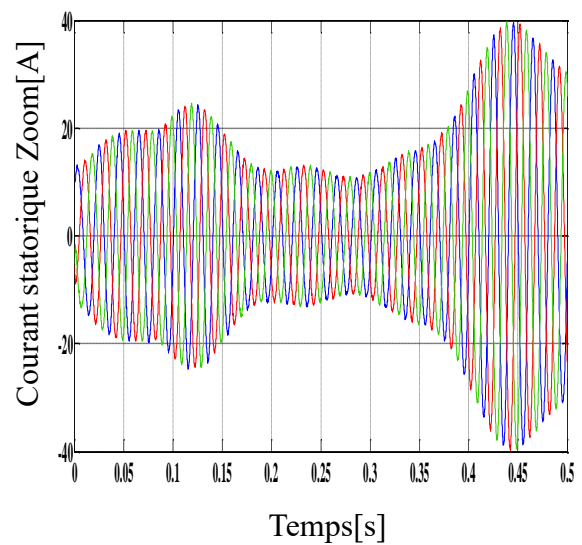
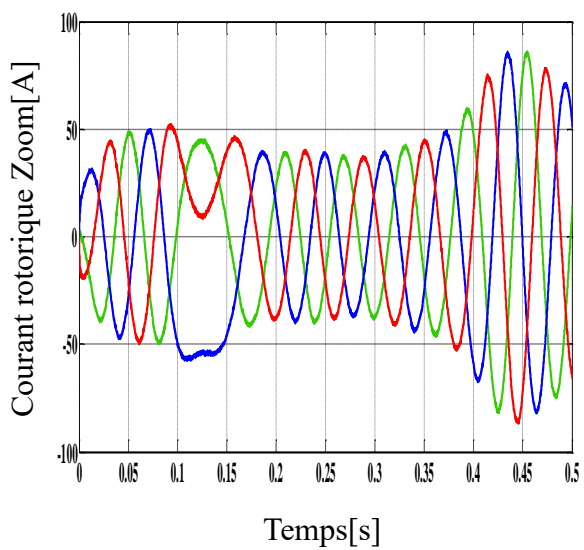
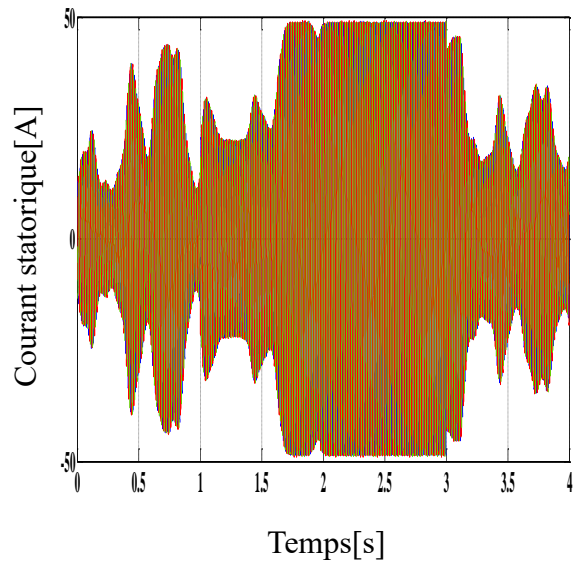
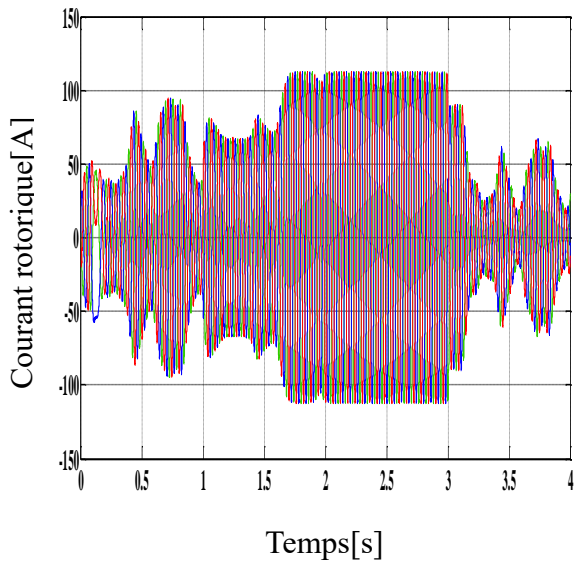
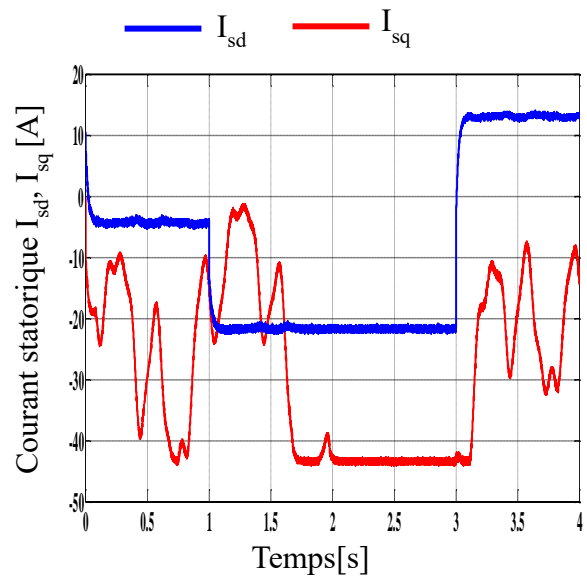
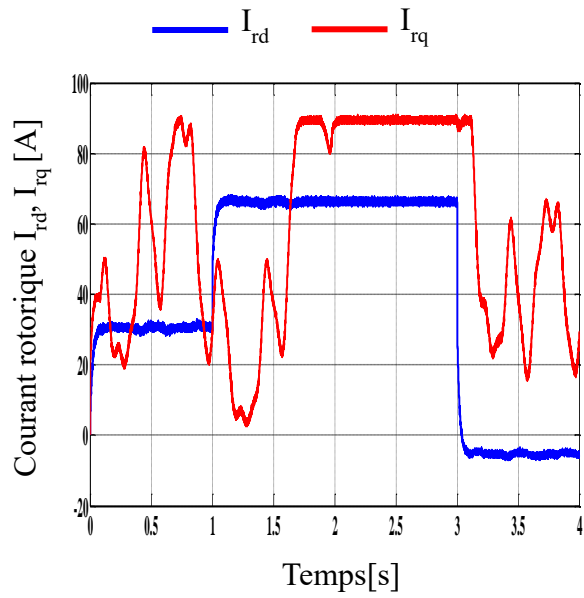


Figure III.9: Résultats d’simulation de la CVD à vitesse variable





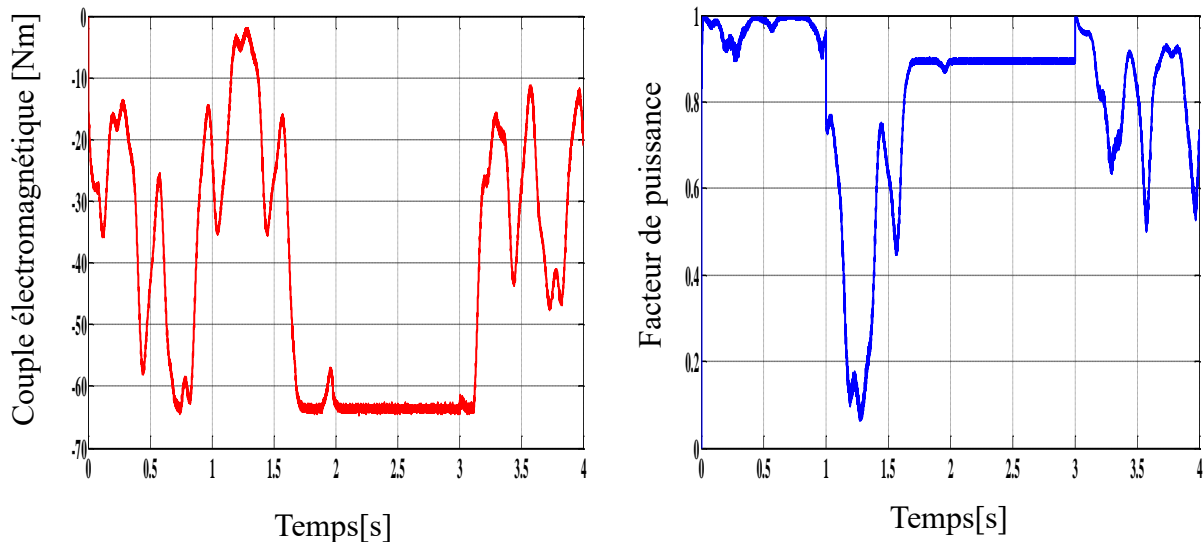


Figure III.10: Résultats d'simulation de la CVI

III.4.1.2. Interprétation des résultats :

D'après les résultats de simulation, on peut dire que les deux méthodes donnent une bonne performance concernant la suivie de la consigne avec l'avantage de la commande indirect qui a donné de meilleurs résultats que la commande directe due à l'existence des quatre régulateurs qui permet de contrôler les courants rotorique et les puissances générées par le générateur afin de les maintenir à la valeur de référence désirée.

D'après la relation III.10, on remarque que l'un des courants rotoriques contrôle la puissance active et l'autre contrôle la puissance réactive, ce qui est clair dans la figure III.6 et III.7 de sorte que les variations de la puissance active dépendent de I_{qr} et la puissance réactive dépende de I_{dr} , ce qui présente un bon découplage entre les grandeurs du moteur.

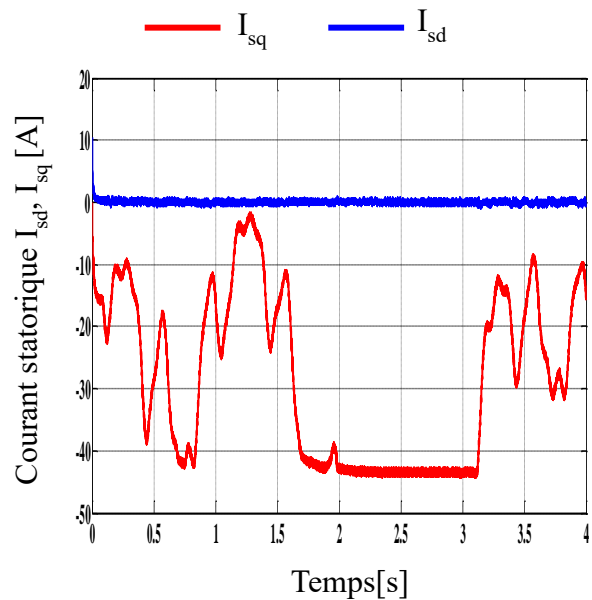
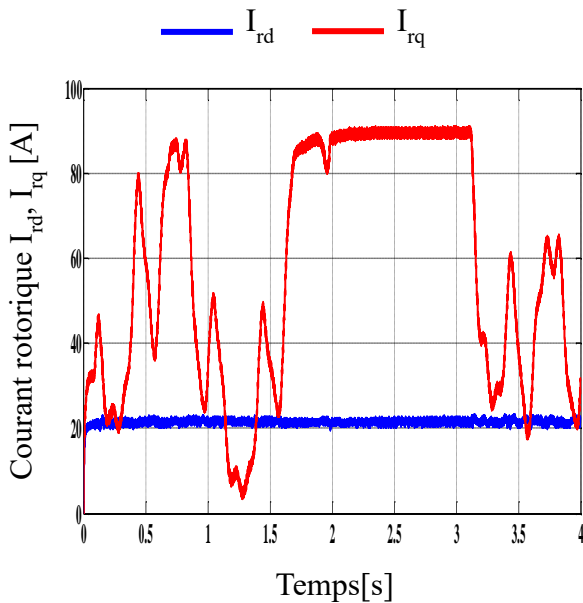
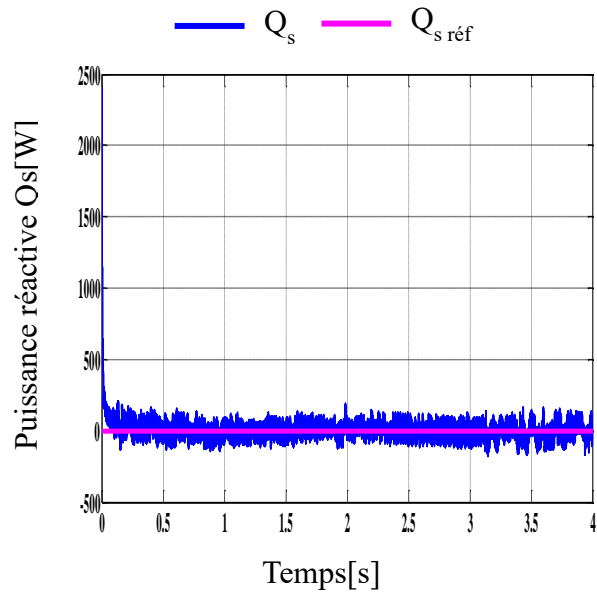
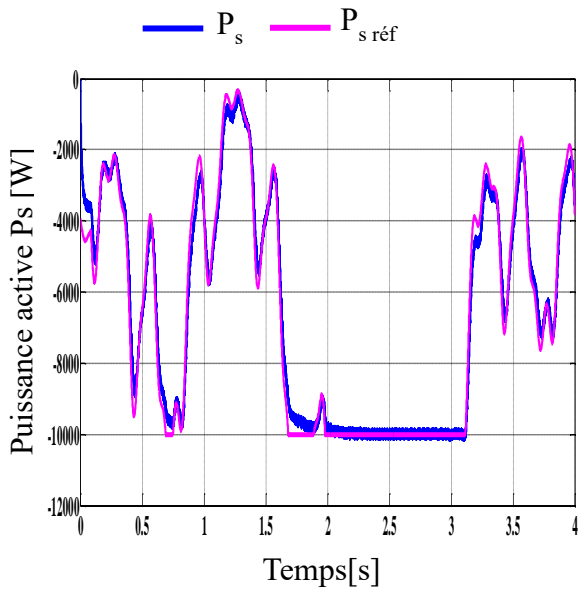
Le couple électromagnétique est aussi dépendu du courant I_{qr} .

La puissance active est négative ce qui indique que la MADA fonctionne en mode générateur et injecte l'énergie dans le réseau.

Concernant le facteur de puissance qui varie selon les variations des deux puissances active et réactive, on ne peut pas obtenir un bon facteur de puissance due à l'existence de l'énergie réactive qui est considéré comme un inconvénient pour le système, donc pour garder un facteur de puissance plus proche de la valeur unitaire, on va maintenir la consigne de puissance réactive nulle pour améliorer la performance de système étudié, c'est l'objectif du prochain essai.

III.4.2. Amélioration de facteur de puissance :

Le but de cet essai est d'améliorer le facteur de puissance et ainsi d'améliorer la qualité de l'énergie produite. C'est pourquoi nous avons éliminé l'énergie réactive en rendant sa valeur de référence nulle, la figure III.8 et III.9 présente les résultats de simulation de la commande direct et indirect pour cette étude.



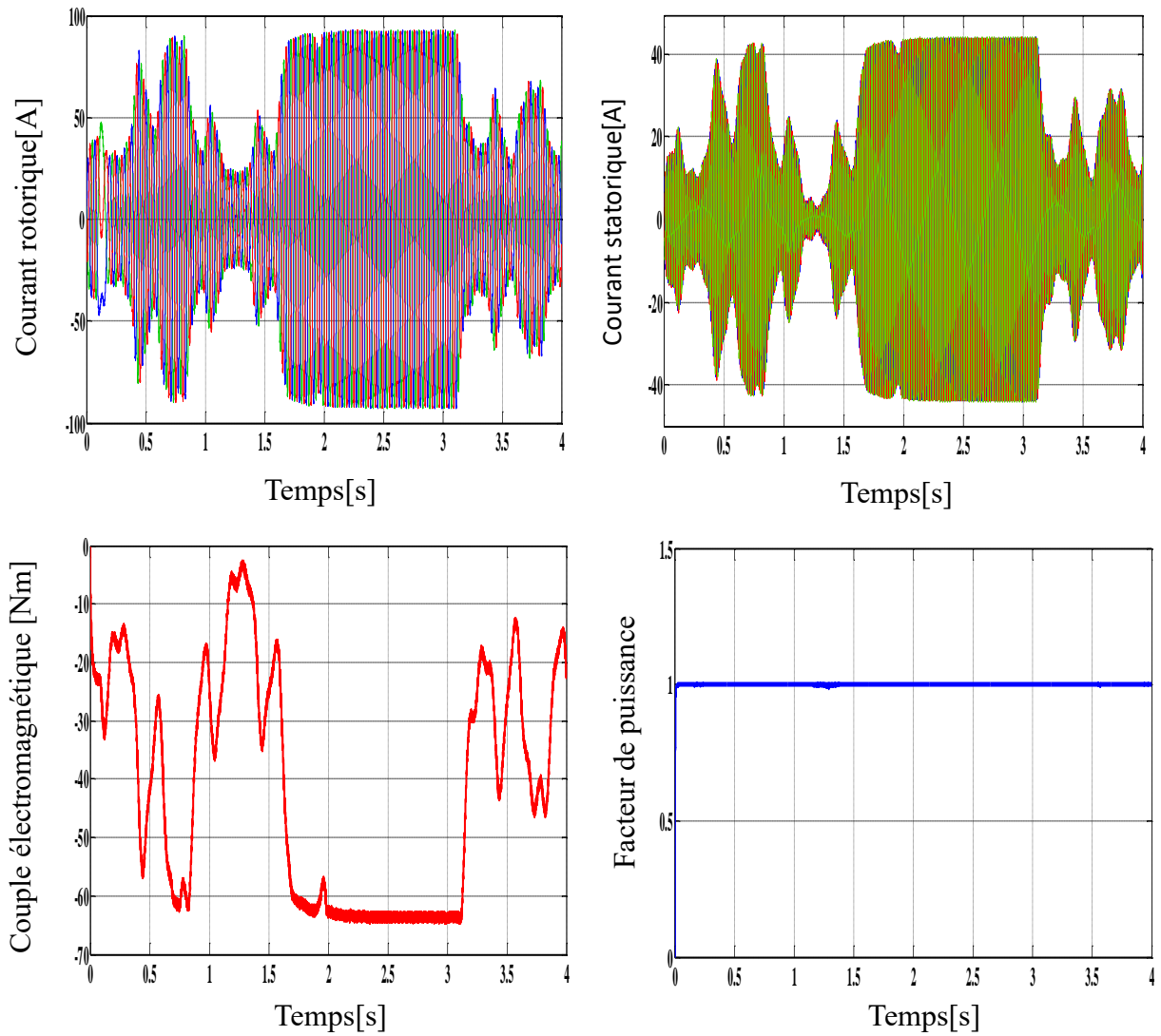
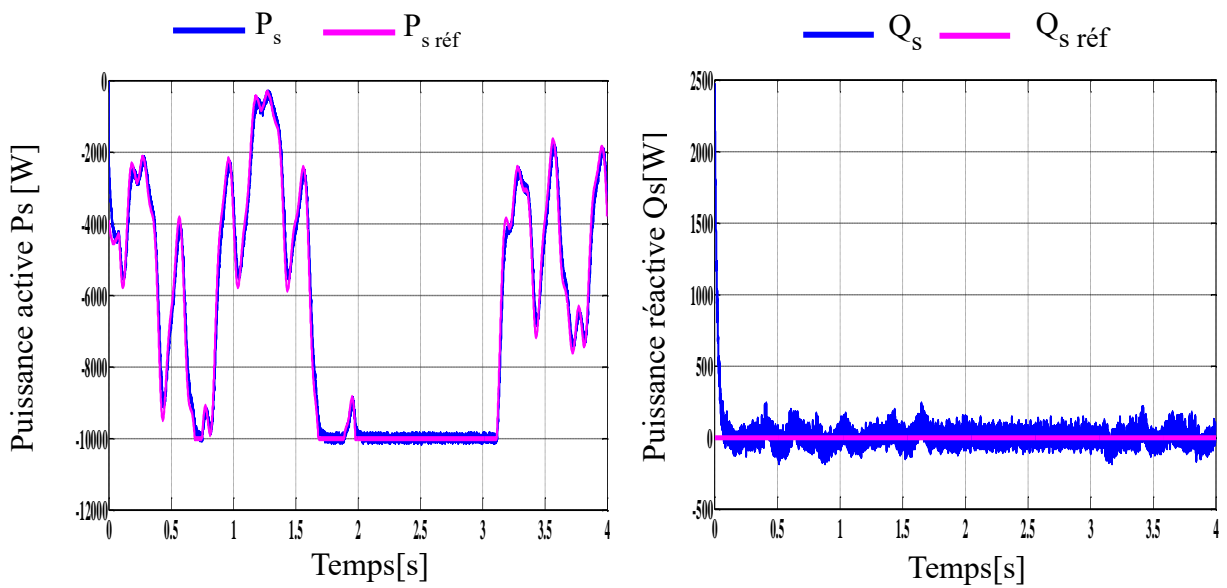


Figure III.11 : CVD à facteur de puissance unitaire



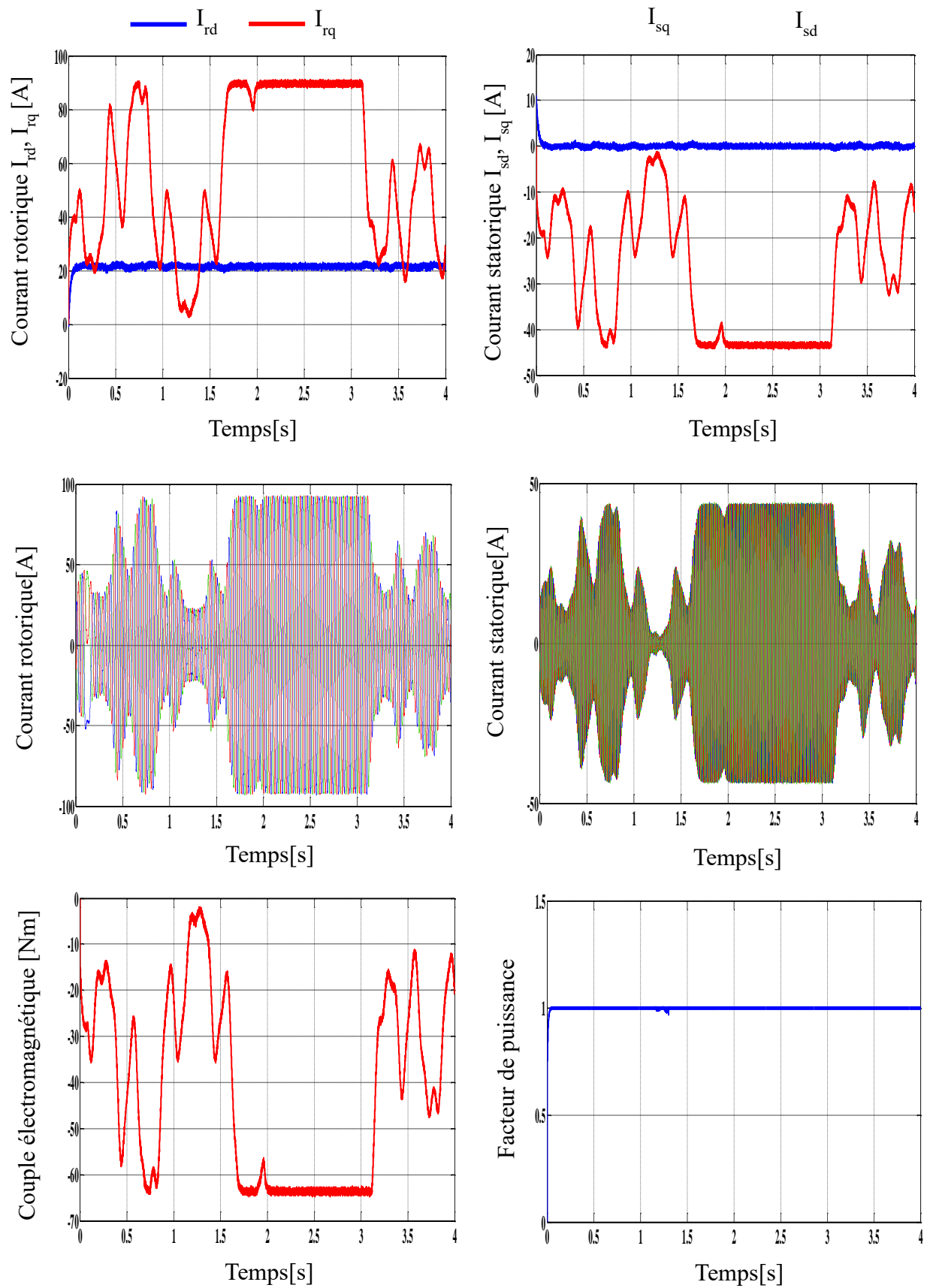


Figure III.12 : CVI à facteur de puissance unitaire

III.4.2.1. Interprétation des résultats :

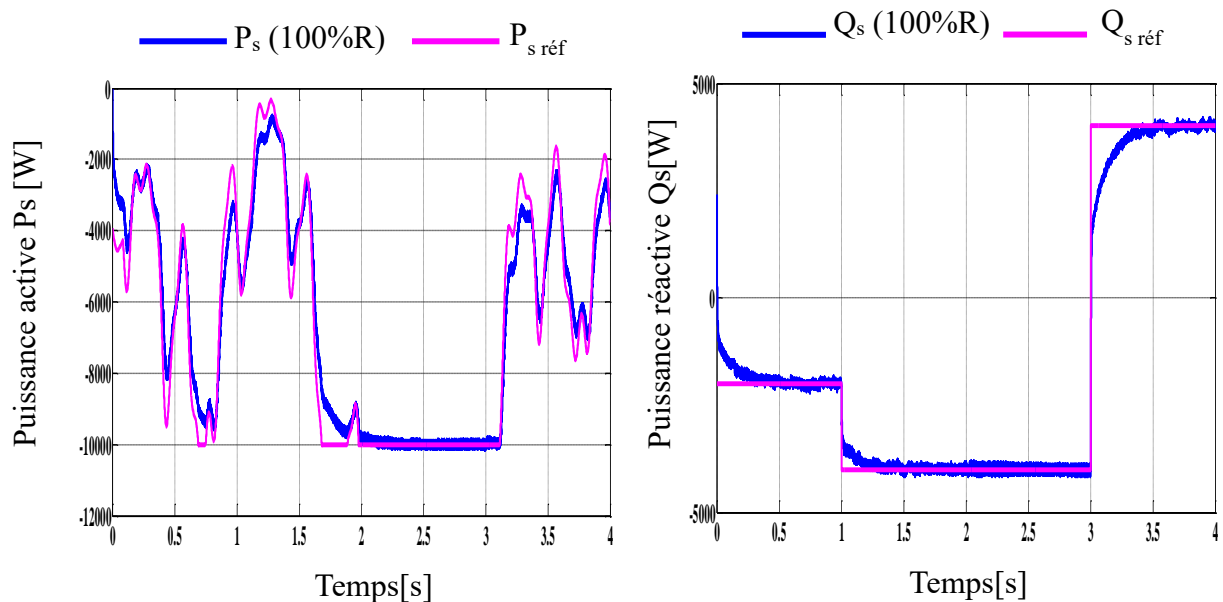
A travers les résultats obtenus, il est possible de remarquer l'impact de l'énergie réactive sur l'efficacité du système. Ceci est évident dans les deux technologies, où son élimination a conduit à un facteur de puissance unitaire.

III.4.3. Test de robustesse :

En réalité, les moteurs sont soumis à des changements inattendus ainsi qu'à des influences internes et externes qui peuvent perturber leur fonctionnement. Afin de rendre l'expérience plus réaliste, nous avons modifié la valeur de la résistance rotorique de 100 % pour évaluer la robustesse de la commande directe et indirecte à maintenir l'efficacité du système et leur capacité à résister aux facteurs qui les influencent.

La figure III.9 représente les résultats de simulation des puissances générées par les deux techniques avec la variation paramétrique

CVD



CVI

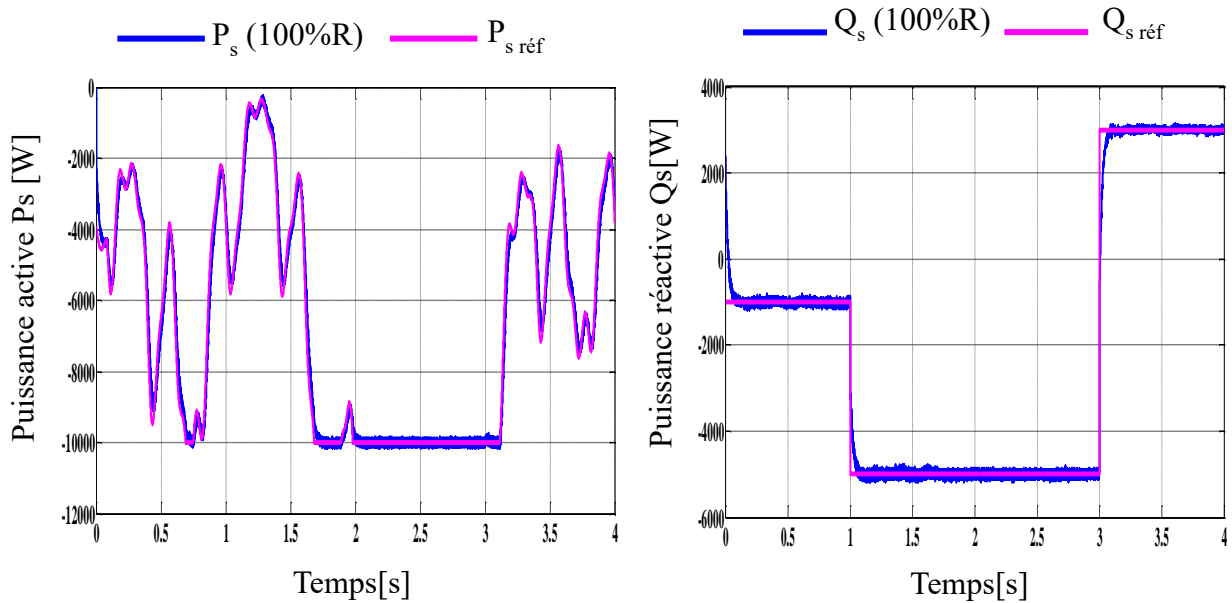


Figure III.13 : CVD et CVI avec la variation paramétrique

III.4.3.1. Interprétation des résultats :

D’après la figure III.9, on remarque que la commande indirecte a montré une meilleure adaptation au variation paramétrique que la commande directe, où le temp de réponse et le taux d’erreur est plus faible par rapporte à la CVD, ce qu’est présenté dans le tableau III.1

	<i>CVD</i>	<i>CVI</i>
$t_r(P_s)$	160 ms	70 ms
$t_r(Q_s)$	250 ms	80 ms
ΔP_s (%)	0.4 (400W)	0.25(250W)
ΔQ_s (%)	0.31(310VAR)	0.21(210VAR)

Tableau III.1 : la comparaison entre la commande directe

III.4.4. Test de THD :

Le Taux de Distorsion Harmonique (THD, Total Harmonic Distortion en anglais) est un paramètre important utilisé pour caractériser la qualité d'un signal électrique. Il permet de quantifier la présence de composantes harmoniques indésirables dans un signal qui devrait idéalement être purement sinusoïdal.

L'objectif de cet essai est d'évaluer la qualité de l'énergie produite par le système en connaissant la valeur du **THD** présent dans le courant **Is** dans les deux techniques de commande, la figure **III.10** et **III.11** représente les résultats de **THD** pour la commande directe et indirecte

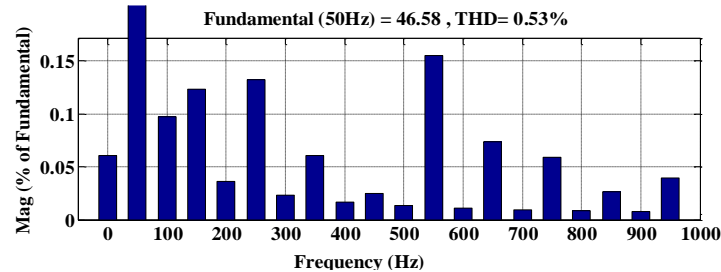


Figure III.14 : CVD avec l'analyse de THD

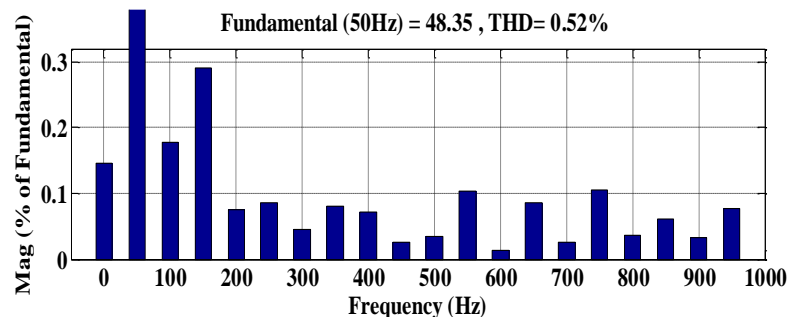


Figure III.15 : CVI avec l'analyse de THD

III.4.4.1. Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenus, on remarque que les deux technique présent un faible taux d'harmonique, où la fréquence de courant statorique est très proche de 50 Hz, cela confirme la qualité d'énergie produite par le système

III.5. Conclusion :

La machine à double alimentation a montré dans le deuxième chapitre la complexité de sa nature et la difficulté d'en tirer le maximum de ses capacités, ce qui peut constituer un obstacle majeur dans les applications éoliennes. C'est pourquoi ce chapitre vise à résoudre ce mystère et à rendre les choses plus claires et plus faciles, où nous y avons abordé la commande vectorielle à flux orienté, qui permet un contrôle indépendant des puissance active et réactive.

Ce type de contrôle est divisé en deux méthodes, la première méthode est la commande directe qui permet de contrôler juste les deux puissances, donc elle est plus simple et moins performante et moins robuste contre les variations paramétriques. Au contraire, la deuxième méthode qu'est la commande indirecte offre les meilleures performances malgré sa difficulté et sa complexité due à la présence de deux boucles de régulation qui permet de contrôler les puissances et les courants générer.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail est une synthèse globale d'un projet d'énergie renouvelable basé sur la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique utilisable, en étudiant le contrôle indépendant de dispositif de conversion qui est la machine asynchrone à double alimentation, intégré au système éolien, d'une puissance estimée à 10 kW.

En introduction à ce travail, nous avons donné un aperçu des énergies renouvelables et de leurs types, y compris l'énergie éolienne qui constitue la base de cette étude. Cette étude repose entièrement sur la modélisation et la simulation du système éolien à travers des équations mathématiques spécifiques à chaque partie de cette chaîne, en partant du vent comme source principale, passant par l'éolienne en mentionnant les méthodes utilisées pour maximiser la puissance, notamment le MPPT et en arrivant au machine à double alimentation, qui est complexe car il nécessite une alimentation directe du stator directement à partir du réseau et une alimentation du rotor basée sur un convertisseur statique contrôlé par la technique MLI. Enfin, les résultats de la simulation de ce système ont montré une inefficacité notable par rapport à sa puissance nominale, ce qui nécessite un contrôle direct de ses deux puissances via l'approche du contrôle vectoriel, abordée dans le troisième chapitre.

Dans le dernier chapitre, nous avons abordé le contrôle indépendant des puissances en parvenant à un modèle simplifié permettant de résoudre les interférences entre elles en utilisant à la fois les techniques de contrôle direct et indirect vectoriel. Après l'application des deux techniques et l'obtention des résultats, il est clair qu'il existe une grande différence entre elles en termes de difficulté d'application, la technique directe étant plus facile par rapport à la technique indirecte, tout en étant moins efficace. La technologie indirecte étant plus efficace, le point commun étant la possibilité d'obtenir un courant alternatif avec une faible THD.

En conclusion, ce travail est une introduction à d'autres techniques de contrôle qui pourraient améliorer l'efficacité et la productivité de ce système, ainsi que renforcer sa résistance aux variations paramétriques comme le contrôle par mode glissant et les techniques d'intelligence artificielle.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [1] ALLAM Mohamed, « Contribution à la commande robuste du système d'énergie renouvelable » Doctorat en Sciences Spécialité : Electrotechnique ; UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES Faculté de Génie Electrique, 2016
- [2] Ben k. Somia, Ben mebarek Dalila « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne », MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER ACADEMIQUE, Université Ahmed Draïa Adrar, 2017/2018.
- [3] BENGOURAIN ISSAM « Représentations des systèmes hybrides à énergie renouvelables » Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –2022.
- [4] Yacine Abderrahmane BENCHERIF « Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne » Projet de Fin d'Etudes , Ecole Nationale Polytechnique Département du Génie Electrique ,2008.
- [5] <https://www.discoverthegreentech.com/enr/energie-eolienne/histoire/>
- [6] <https://www.sirenergies.com/article/histoire-energie-eolienne/>
- [7] <https://www.engie.com/activites/renouvelables/eolien/>
- [8] KOUADRIA Selman « Etude et réalisation d'un émulateur d'une turbine éolienne » MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER, Ingénieur en Electrotechnique de l'Université Ibn Khaldoun – Tiaret – 2011/2012.
- [9] HAMOUCHE ABDELKRIM : « Commande par mode glissant de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée dans une éolienne » mémoire de magister, Université Aboubekre Belkaïd– Tlemcen –Faculté de TECHNOLOGIE Algérie, 2017.
- [10] Frédéric Poitiers. ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE - Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau. Energie électrique. Université de Nantes, 2003. Français. ffnNT: ff.fftel-00011383f
- [11] Adam MIRECKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » », thèse de doctorat, université de Toulouse, 2005.
- [12] L. BAGHLI, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005.
- [13] I. HAMZAOU, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur", mémoire de magistère, ENP, Janvier 2008

- [14] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2005
- [15] S. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies, Lille, France, 2004.
- [16] Mohammed Malki, Saïd Ali Belarbi, « Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine +MADA+ Réseau) en mode continu et discret », Mémoire de Master, Université Aboubaker Belkaid Tlemcen, 2014
- [17] B. Laid, F. Hadj El Bachir « Commande de la puissances active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation » MEMOIRE DE FIN D'ETUDES, CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED INSTITUT DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIES DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE, 2012
- [18] H. Godfroid, A. Mirzaian, D. Ramuz, "Machine Synchrone pour Procédés exigeants", Revue Internationale de Génie Electrique, Volume 1, n° 1, 1998, pp. 9-35.
- [19] A. BOYETTE « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, décembre 2006
- [20] S. Khojtit el khil, « Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) », Thèse de doctorat de I.N.P de Toulouse, France, 2006.
- [21] A. Abdallah, N. Mostafa, « Modélisation et simulation de la Machine Asynchrone a Double Alimentation MADA », projet de fin d'études Licence Génie Electrique
- [22] M. Z. BOUDJEMAA, M. BOUNADJA, « Commande Non Linéaire par retour d'État d'un Moteur Asynchrone à Double Alimentation par Régulateur PI-Flou », Revue des Sciences et de la Technologie –RST- Volume 1 N°2, janvier 2010
- [23] B. Boukhezzar, « Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable »; Thèse de Doctorat, Université Paris XI, Février 2006.
- [24] D. KHEIREDDINE, « Stratégies De Commande Des Onduleurs Multiniveaux (MLI ST et MLI Vectorielle) » UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2019

Annexe

Annexe [A]

Tableau B. I : Paramètres de la Machine Asynchrone à Double Alimentation.

Désignation des paramètres et symbole	Valeur	Unité
<i>Puissance nominale, P_n</i>	10	kW
<i>Tension nominale, V_s</i>	230/400	V
<i>Courant nominale, I_s</i>	20/30	A
<i>Vitesse nominale, Ω_n</i>	1420	tr/min
<i>Fréquence nominale, f</i>	50	Hz
<i>Résistance statorique, R_s</i>	0.455	Ω
<i>Résistance rotorique, R_r</i>	0.19	Ω
<i>Inductance statorique, L_s</i>	0.07	H
<i>Inductance rotorique, L_r</i>	0.0213	H
<i>Inductance mutuelle, M</i>	0.034	H
<i>Nombre de paires de pôles, p</i>	2	-

Tableau B.II : Paramètres de la turbine éolienne

Désignation des paramètres et symbole	Valeur	Unité
<i>Puissance nominale, P_n</i>	10	kW
<i>Nombre des pales</i>	3	-
<i>Rayon du rotor, R</i>	3	m
<i>Gain du multiplicateur de vitesse, G</i>	5.4	-
<i>Moment d'inertie total, J_T</i>	0.2	kg.m ²
<i>Coefficient de frottement, f_r</i>	0.0016	N.m/s
<i>Vitesse du vent de démarrage, v_d</i>	4	m/s
<i>Vitesse du vent nominale, v_n</i>	11	m/s
<i>Vitesse du vent maximale, v_m</i>	25	m/s
<i>Masse volumique de l'air, ρ</i>	1.225	kg/m ³

ملخص

Abstract

Résumé

ملخص :

يدرس هذا العمل إمكانية التحكم المستقل لكلتا إستطاعتي محرك لاتزامني مزدوج التغذية مدمج مع تربينة هوائية في سبيل إستعمال طاقة الرياح لإنتاج طاقة كهربائية قابلة للإستغلال ، هذا الأخير متصل مع الشبكة الكهربائية من خلال جزءه الثابت أما الجزء الدوار فهو مغدى من خلال محول للتوتر الكهربائي ذو ثلاثة مستويات ، بإختصار تم تطبيق تقنية التحكم الشعاعي بنوعيه المباشر وغير مباشر للتحكم في الإستطاعة التفاعلية وغير تفاعلية بالإعتماد على متحكم كلاسيكي، تم عرض النتائج تحليلها إعتقادا على برنامج ماتلاب

الكلمات المفتاحية :

طاقة الرياح ، آلة لاتزامنية مزدوجة التغذية ، تحكم شعاعي ، محول لتوتر الكهربائي ذو ثلاثة مستويات

Abstract

This work studies the possibility of independently controlling both power outputs of a doubly fed induction machine integrated with a wind turbine to harness wind energy for electricity generation. The machine is connected to the electrical grid through its stationary part, while the rotor part is supplied through a three-level voltage converter. In short, radial control techniques, both direct and indirect, were applied to control the interactive and non-interactive power using a classic PI controller. The results were presented and analyzed using MATLAB software.

Keywords:

Wind energy, doubly-fed induction generator, vector control, three level inverter

Résumé :

Ce travail étudie la possibilité de contrôler de manière indépendante les deux puissances d'une machine asynchrone à double alimentation intégré à une éolienne afin d'utiliser l'énergie éolienne pour produire de l'électricité exploitable. Ce dernier est connecté au réseau électrique via sa partie fixe, tandis que sa partie rotative est alimentée par un convertisseur de tension à trois niveaux. En résumé, la technique de contrôle vectoriel direct et indirect a été appliquée pour contrôler la puissance réactive et active en utilisant un régulateur classique PI. Les résultats ont été présentés et analysés en se basant sur le logiciel MATLAB

Mots clés :

Energie éolienne, machine induction à double alimentation, commande vectorielle, onduleur trois niveaux
