

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

FILIÈRE : Électrotechnique

Spécialité : Commande Électrique

THÈME

**Étude et Simulation d'une Ferme Éolienne
Connectée au Réseau**

Préparé par :

Cherif Aymen Abdelsamiaa

Boutemra Mehdi

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
Messlem Youcef	Pr	Président
Belfedhal Sifeddine	MCB	Examineur
Berkani Abderrahmane	MAA	Encadreur

PROMOTION 2018 / 2019

Remerciements

À l'issue de cette fin d'étude, nous adressons nos sincères remerciements
premièrement à « Allah » tout puissant qui nous a donné la santé, la patience.
Et je tien a remercié également mon prophète « MOHAMED » pour nous guider a la
bonne voie.

Nous remercions sincèrement Monsieur Messlem Youcef, pour le grand honneur
d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Ensuite, on tient à adresser nos plus vifs remerciements à notre promoteur
M^r : Berkani Abderrahmane pour nous avoir encadré, suivi et encouragé.

Nos vifs remerciements vont également à Monsieur Belfedhal Sifeddine, d'avoir
accepté d'examiner notre travail et d'être membre du jury de soutenance.

On remercie également, tous les membres du jury de bien vouloir juger ce
travail. Ainsi que tous nos enseignants du département de GE.

On n'exclue pas de ces remerciements toutes les personnes qui ont aidé de près
ou de loin dans la réalisation de cette PFE.

Enfin, on remercie tout particulièrement nos parents, pour leur soutien
inconditionnel tout au long de nos longues années d'études.

On veut également remercier nos familles et nos amis pour leur soutien moral.

Les discussions, les remarques et les commentaires de nos collègues ont été
sources d'idées et ont contribué au développement et à l'amélioration de cette étude.



Table des matières

Chapitre I : État de l'art sur l'énergie éolienne

I.1. Introduction	1
I.2. Énergie renouvelable	1
I.3. Ressource éolienne	1
I.4. Classification des éoliennes	2
I.4.1. Classification des éoliennes selon le type de génératrice	2
I.4.2. Classification des éoliennes selon leur vitesse	3
I.4.3. Classification des éoliennes selon l'axe de rotation des pales	4
I.4.3.1. Éolienne à axe vertical	4
I.4.3.2. Éolienne à axe horizontale	4
I.5. Principaux constituants d'une éolienne	5
I.6. Principe de fonctionnement d'une éolienne	6
I.7. Transferts de puissance dans la MADA	7
I.7.1. Cas moteur	8
a) Fonctionnement hypo synchrone $g > 0$	8
b) Fonctionnement hyper synchrone $g < 0$	8
I.7.2. Cas générateur	9
a) Fonctionnement hypo synchrone $g > 0$	9
b) Fonctionnement hyper synchrone $g < 0$	9
I.8. Données générales sur l'énergie éolienne	10
I.8.1. Variations saisonnières de la productivité des éoliennes	11
I.8.2. Énergie éolienne en Algérie	11
I.8.3. Répartition régionale de vent	14
I.8.4. Carte de vent en Algérie	15
I.9. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	15
I.9.1. Les avantages	15
I.9.2. Les inconvénients	16
I.10. Conclusion	17

Chapitre II : Modélisation d'une chaîne éolienne

II.1. Introduction	19
II.1.1. Description du fonctionnement	19
II.1.2. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	23
II.1.2.1. Les différents types de la MADA	24
II.1.2.2. Domaine d'applications de la MADA	24

II.2. Hypothèses simplificatrices.....	25
II.3. Modèle diphasé de la MADA.....	26
II.3.1. Équations électriques	26
II.3.2. Équation mécanique.....	26
II.3.3. Représentation vectorielle.....	26
II.3.4. Transformation de Park.....	27
II.4. Choix du référentiel.....	28
II.4.1. Référentiel lié au stator	28
II.4.2. Référentiel lié au rotor	28
II.4.3. Référentiel lié au champ tournant.....	29
II.5. Mise en équation de la MADA	29
II.5.1. Représentation dans le repère de Park	29
II.5.1.1. Les équations des flux	30
II.5.1.2. Les équations des tensions.....	30
II.5.2. Représentation dans le repère de Clarke	31
II.5.2.1. Les équations des flux	31
II.5.2.2. Les équations des tensions.....	32
II.6. Forme d'état du modèle de la MADA.....	32
II.7. Modélisation de la chaîne éolienne	32
II.7.1. Modélisation du vent.....	33
II.7.2. Modélisation de la MADA.....	34
II.7.3. Modélisation de la turbine éolienne.....	35
II.8.4. Modélisation du multiplicateur	39
II.8.5. Modélisation de l'arbre	40
II.8.6. Modélisation de l'actionneur des pales.....	40
II.9. Conclusion.....	41

Chapitre III : Commande d'une chaîne éolienne

III.1. Introduction.....	43
III.2. Fonctionnement de la chaîne éolienne	43
III.3. Commande de la MADA	43
III.4. Conception du Contrôle	44
III.5. Principe générale de la commande à flux orientée	44
III.6. Modèle pour le contrôle indépendant des puissances	45
III.7. Mise en place de la régulation	45
III.7.1. Commande directe en puissance active et réactive de la MADA.....	46

III.7.2. Commande indirecte en puissance active et réactive de la MADA	46
III.8. Commande sans boucle de puissance	46
III.9. Stratégie de commande de la turbine	47
III.9.1. Objectifs de la commande	47
III.9.2. Architecture du dispositif de commande	47
III.10. Commande vectorielle	48
III.11. Commande du Convertisseur	48
III.11.1. Suivi de la puissance maximale du générateur éolienne	49
III.12. Résultats de simulation	50
III.13. Interprétations des résultats de simulation	57
III.14. Conclusion	57

Chapitre IV : Intégration d'une ferme éolienne dans un réseau

IV.1. Introduction.....	59
IV.2. Intégration des énergies renouvelables	59
IV.1.1. Modélisation de la ferme éolienne	59
IV.1.2. Les paramètres de l'éolienne	60
IV.3. Schéma synoptique	61
IV.4. Réglage indirect des puissances active et réactive	61
IV.5. Résultats de simulation	61
IV.6. Interprétations des résultats de simulation.....	66
IV.7. Conclusion	67

Liste des Figures

Chapitre I

Fig. I-1 : Principe de la conversion d'énergie éolienne.....	1
Fig. I-2 : Éoliennes en amont et en aval.	4
Fig. I-3 : Différentes parties de l'éolienne NORDEX N60-1.3MW.	5
Fig. I-4 : Principaux organes du système de conversion éolien.	6
Fig. I-5 : Fonctionnement dans les quatre quadrants d'une MADA.	7
Fig. I-6 : Fonctionnement hypo synchrone de la MADA.	8
Fig. I-7 : Fonctionnement hyper synchrone de la MADA.	8
Fig. I-8 : Fonctionnement hypo synchrone de la GADA.	9
Fig. I-9 : Fonctionnement hyper synchrone de la GADA.	9
Fig. I-10 : Évolution de la puissance installée (MW) dans le monde et prévision 2006-2020.	10
Fig. I-11 : Éolienne de 100 KW de Grand Vent.....	11
Fig. I-12 : Éolienne d'Adrar.....	13
Fig. I-13 : Atlas saisonnier de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m du sol.....	14
Fig. I-14 : Les régions ventées en Algérie.	14
Fig. I-15 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en Algérie.....	15

Chapitre II

Fig. II-1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.	23
Fig. II-2 : Principe de la théorie de Betz.	23
Fig. II-3 : Les caractéristiques de coefficient de puissance C_p	23
Fig. II-4 : Représentation simplifiée de la MADA.	25
Fig. II-5 : Position des systèmes d'axes.....	26
Fig. II-6 : Représentation du modèle de Park.	27
Fig. II-7 : Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.	28
Fig. II-8 : Représentation des axes de la machine dans le repère de Park.	29
Fig. II-9 : Schéma synoptique de l'éolienne.	33
Fig. II-10 : $C_{aéro}$ en fonction du ratio de vitesse et l'angle d'orientation des pales.....	34
Fig. II-11 : Représentation schématique du modèle d'une MADA dans le repère.....	34
Fig. II-12 : Graphe Informationnel Causal (GIC).	35
Fig. II-13 : Schéma de la turbine éolienne.	36
Fig. II-14 : Schéma mécanique équivalent de la turbine éolienne.	36
Fig. II-15 : Schéma mécanique équivalent simplifié de la turbine éolienne.....	37
Fig. II-16 : Configuration d'une éolienne.	38
Fig. II-17 : Modèle de la turbine éolienne.	38
Fig. II-18 : Schéma bloc du modèle de la turbine.....	39

Fig. II-19 : Exemple mécanique du multiplicateur.	39
Fig. II-20 : Modèle de l'arbre et de la turbine éolienne.	40
Fig. II-21 : Orientation des pales.	41
Fig. II-22 : Modèle et commande du système de calage de pale.	41

Chapitre III

Fig. III-1 : La structure de commande globale du MADA.	44
Fig. III-2 : Architecture de commande du système éolien.....	47
Fig. III-3 : Vecteurs courant et flux dans le système d'axe choisi.	48
Fig. III-4 : Structure de commande des convertisseur.	49
Fig. III-5 : Schéma électrique d'un convertisseur.....	49
Fig. III-2 : Vitesse de rotation de la MADA et son référence.	50
Fig. III-3 : Vitesse de vent lae.....	51
Fig. III-5 : Couple electromagnetique et leur reference.....	51
Fig. III-6 : Courant rotorique direct référentielle et mesuré.	52
Fig. III-7 : Courant rotorique quadrature référentielle et mesuré.	52
Fig. III-8 : Courant rotorique triphasé coté rotor.	52
Fig. III-9 : Courants triphasé de réseau au point PCC.	53
Fig. III-10 : Tensions triphasé de réseau au point PCC.	53
Fig. III-11 : Tension de bus continu Vbus.	53
Fig. III-12 : Tension rotorique quadrature et direct.	54
Fig. III-13 : Couple electromagnetique et leur reference	54
Fig. III-14 : Tensions statorique triphasé de réseau au point PCC.....	55
Fig. III-15 : Courants statorique triphasé de réseau au point PCC.....	55
Fig. III-16 : Courant rotorique direct référentielle et mesuré.	55
Fig. III-17 : Courant rotorique quadrature référentielle et mesuré.	56
Fig. III-18 : Courant quadrature coté réseau mesuré et référentielle.	56
Fig. III-19 : Tension de bus continu Vbus.	56

Chapitre IV

Fig. IV-1 : Modèle de la ferme éolienne connecté au réseau modélisé par Simulink.....	60
Fig. IV-2 : Les trois consignes de référence pour la vitesse du vent de la ferme éolienne.	60
Fig. IV-3 : Modèle de la ferme éolienne avec Simulink.	61
Fig. IV-4 : Couple électromagnétique au niveau de point de couplage.	62
Fig. IV-5 : Courants triphasé coté réseau pour l'éolienne 1.....	62
Fig. IV-6 : Courants triphasé coté réseau pour l'éolienne 2.....	63

Fig. IV-7 : Courants triphasé coté réseau pour l'éolienne 3.....	63
Fig. IV-8 : Courants au niveau de point de couplage commun PCC.	64
Fig. IV-9 : Tension DC de bus continu et leur référence pour tout la ferme.	64
Fig. IV-10 : Les puissances active et réactive injecté dans le réseau pour l'éolienne 1.	65
Fig. IV-11 : Les puissances active et réactive injecté dans le réseau pour l'éolienne 2.	65
Fig. IV-12 : Les puissances active et réactive injecté dans le réseau pour l'éolienne 3.	66
Fig. IV-13 : Puissances active et réactive total de la ferme éolienne.....	66

« ----- »

Liste des Tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes.	2
Tableau I.2 : Différente type des machines	2
Tableau I.3 : Comparaison entre l'éolien a vitesse fixe et Variable	3
Tableau I.4 : Comparaison entre l'éolienne horizontale et l'éolienne vertical	5

<----->

Abréviations

- ENR : Énergies Renouvelables.
- PCC : Point de couplage commun
- MADA : Machine Asynchrone Double Alimentation.
- GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation.
- MSAP: Machine synchrone à aimants permanents
- CEEG: Compagnie de l'Engineering de l'Électricité et du Gaz
- CDER : Centre de recherche en énergies renouvelables
- CO2 : dioxyde de carbone
- dB : décibel
- β : L'angle d'orientation de pale
- J : Inertie de la génératrice
- g : Glissement.
- $[V_{s_ABC}]$: Tensions simples triphasées au stator de la machine
- $[V_{r_ABC}]$: Tensions simples triphasées au rotor de la machine.
- $[I_{s_ABC}]$: Courants statoriques
- $[I_{r_ABC}]$: Courants rotoriques
- $[\Phi_{s_ABC}]$: Flux statoriques.
- $[\Phi_{r_ABC}]$: Flux rotoriques
- R_s : Résistance des enroulements statoriques
- R_r : Résistance des enroulements rotoriques.
- L_s : Inductance cyclique du stator.
- L_r : Inductance cyclique du rotor.
- L_r : Inductance cyclique du rotor.
- p : Nombre de pair de pôles.
- l_s : Inductance propre des enroulements statoriques.
- l_r : Inductance propre des enroulements rotoriques.
- m_{sr} : Inductance mutuelle des enroulements rotoriques.

- f : Le coefficient de frottement visqueux de la machine en $(N.m.s/rad)$.
- C_r : Le couple résistant en $(N.m)$.
- C_e : Le couple électromagnétique en $(N.m)$.
- $[P]$: Matrice de Park.
- Θ : l'angle entre l'axe statorique as et l'axe rotorique.
- θ_s : L'angle entre l'axe statorique as, et l'axe de Park directe
- θ_r : L'angle entre l'axe rotorique ar, et l'axe de Park directe
- ω : la vitesse angulaire du système d'axes (d, q).
- ω_s : La vitesse angulaire électrique du stator.
- ω_r : La vitesse angulaire électrique du rotor.
- d : Indice de l'axe direct de Park.
- q : Indice de l'axe en quadrature de Park.
- o : Indice de l'axe homopolaire de Park.
- M_{sr} : Inductances mutuelles.
- P_s : Puissance active.
- Q_s : Puissance réactive.
- PI : Régulateur classique (Proportionnel- Intégrateur.)
- DPC : Direct Power Control
- β : Le contrôle par angle de calage
- MCC : Machine à courant continu
- CCM: Convertisseur Cote Machine.
- CCR: Convertisseur Cote Réseaux
- MLI: Modulation à Large Impulsion

Introduction générale

Introduction Générale

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, la flambée des cours du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgente la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie, un fait qui interpelle plus fort que jamais le développement des énergies renouvelables. Parmi les sources d'énergies renouvelables, l'énergie éolienne est considérée comme le moyen le plus efficace et économique pour la production d'électricité. Bien que le vent soit un élément à notre portée, l'énergie éolienne nécessitant un haut niveau de technologie, elle est surtout développée dans les pays industrialisés.

Un générateur éolien est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir du vent. Donc il existe différents types de génératrices (MADA, MSAP, ...). On les classe généralement en deux catégories, les génératrices synchrones et asynchrones.

La MADA a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années. Sa particularité principale est qu'elle est constituée d'une machine asynchrone à rotor bobiné et elle peut ainsi fournir de la puissance active au réseau par le stator et par le rotor. Elle permet grâce à cette structure d'obtenir un bon rendement sur une large plage de vitesse de vent. Au cours des dernières années, Matlab-Simulink est devenu le logiciel le plus utilisé pour la modélisation et Simulation des systèmes dynamiques. Il fournit une interface graphique puissante pour la construction et la vérification de nouveaux modèles mathématiques ainsi que de nouvelles stratégies de contrôle, en particulier pour les Systèmes non linéaires.

L'objectif de notre étude est de réaliser une chaîne éolienne à base d'une MADA sous Matlab connecté au réseau. La présentation de ce manuscrit est établie en quatre chapitres :

- D'abord, et après cette introduction, le premier chapitre sera consacré à : État de l'art sur l'énergie éolienne.
- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone double alimentation qui permet d'assurer le contrôle de la puissance active du système.
- Le troisième chapitre s'articule sur la commande d'une chaîne éolienne par la commande vectorielle en utilisant des régulateurs classiques PI et la méthode MPPT.
- Le quatrième chapitre est consacré à l'intégration et la simulation d'une ferme éolienne connectée au réseau qui sera élaboré sous l'environnement Matlab/Simulink pour bien démontrer les performances du système étudié.

Et enfin une conclusion générale permettant de mettre le point sur ce que nous avons accompli dans ce mémoire.

Chapitre I :
État de l'art sur l'énergie éolienne

I.1. Introduction

L'objectif principal des systèmes éoliens est la transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique. D'abord, il est nécessaire de choisir un site de vent à une vitesse importante. Pour récupérer cette énergie il y a deux capteurs intéressants : un vertical et l'autre horizontal. Le plus répandu dans la pratique, c'est le capteur horizontal. Pour que l'énergie extraite soit optimale il existe différentes techniques. Grâce à une génératrice l'énergie mécanique captée sera transformée en énergie électrique. On doit aussi tenir compte du choix de cette génératrice selon les modes de fonctionnement. Par la suite, l'énergie électrique sera injectée au réseau.

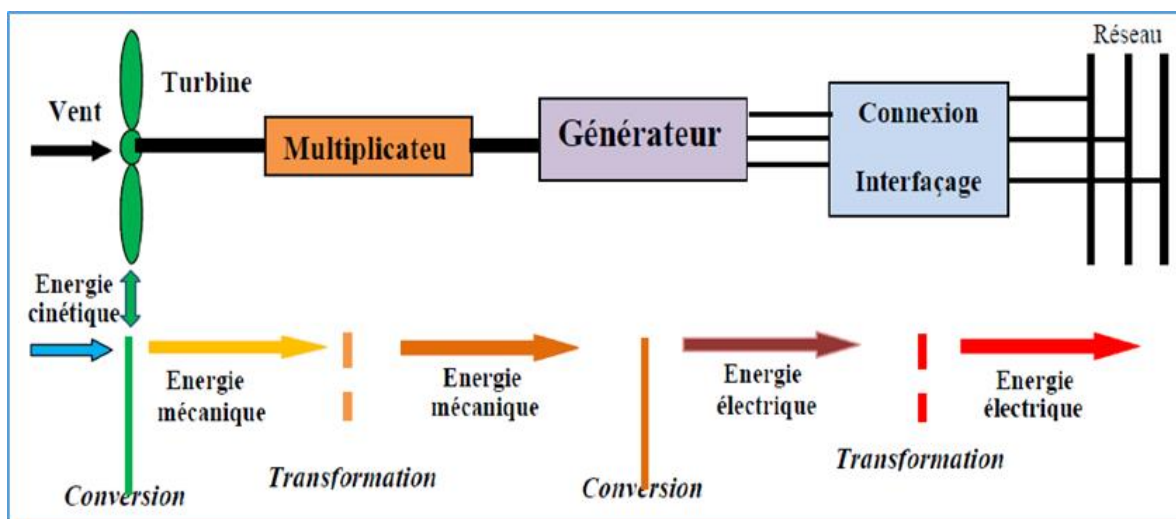


Fig. I-1 : Principe de la conversion d'énergie éolienne.

I.2. L'énergie renouvelable

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme [01]. Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés vis à vis du respect de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables. Un aérogénérateur, plus communément appelé éolien, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

I.3. Ressource éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. L'énergie récupérée est fonction de la vitesse du vent et de la surface mise face au vent.

L'utilisation de cette énergie est soit directe (mouture, pompage) soit indirecte (production d'électricité via un générateur). Deux applications sont possibles : la production d'électricité et le pompage éolien.

La production d'électricité (aérogénérateur) : Ces systèmes demandent une bonne technicité et ces applications sont variables selon la vitesse du vent et la taille des pales.

Le pompage éolien : Les pompes éoliennes sont d'une puissance généralement inférieure à 10 KW. C'est une technologie ancienne avec de nombreuses variantes à travers le monde. Elle demande des vents de 3 à 4 mètres par seconde au minimum. Parmi les avantages de la production éolienne, le Coût de fonctionnement est relativement faible [02].

I.4. Classification des éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées.

Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes.

Échelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	moins de 12 m	moins de 40KW
Moyenne	12 m à 45 m	de 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

I.4.1. Classification des éoliennes selon le type de génératrice

Un générateur électrique est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie. Donc il existe différents types de génératrices. On les classe généralement en deux catégories, les génératrices synchrones et asynchrones. Le tableau suivant montre les avantages et inconvénients des différentes machines.

Tableau I.2 : Différent type des machines.

	Avantages	Inconvénients
M. asynchrone (à cage)	Faible cout	Puissance extraite non optimisé
	Machine robuste	Maintenance de boite de vitesse
	Fiabilité de l'électronique de puissance	Pas de contrôle de l'énergie réactive et la magnétisation de la machine imposée par le réseau
M. asynchrone (MADA)	Machine robuste	Maintenance de boite de vitesse
	Fonctionnement a vitesse variable	Prix de l'électronique de puissance
	Puissance extraite optimisée	Puissance extraite optimisée
	Machine standard	Contact glissant bagues balais
M. synchrone (MSAP)	Très bon rendement.	Coût élevé (à cause du prix des aimants)
	Fonctionnement a vitesse variable sur toute la plage de vitesse	Prix de l'électronique de puissance
	Puissance extraite optimisée pour les vents faibles.	Beaucoup plus chair et moins robuste

I.4.2. Classification des éoliennes selon leur vitesse

Il y a deux types d'éoliennes raccordées aux réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [03].

Tableau I.3 : Comparaison entre l'éolien a vitesse fixe et variable.

Fonctionnement à vitesse fixe	Fonctionnement à vitesse variable
<ul style="list-style-type: none">- Simplicité du système électrique- Plus grande fiabilité.- Faible probabilité d'entrée en résonance.- Fonctionnement a vitesse variable $\pm 30\%$ de vitesse.- Moins cher.	<ul style="list-style-type: none">- Augmentation du rendement énergétique.- Réduction des oscillations du couple.- Réduction des efforts subis par le train de puissance.- Génération d'une puissance d'une meilleure qualité.

a) **Concernant les éoliennes à vitesse fixe** : Elles sont les premières à avoir été développé. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone à cage est directement couplée au réseau sans convertisseur de puissance. Sa vitesse mécanique est fonction de la fréquence du réseau et du nombre de pair de pole. Les avantages et les inconvénients des éoliennes à vitesse fixe peuvent se résumer dans les points suivants :

- Un système électrique plus simple.
- Une plus grande fiabilité.
- L'absence de système électronique de commande.
- Un cout moins cher.

b) **Concernant les éoliennes à vitesse variable** : Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales. De plus, il limite la plage de vitesses de vent exploitable. Ces deux principaux inconvénients peuvent, en grande partie, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent [04].

Mais dans ce cas, l'utilisation de convertisseur à base d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est nécessaire [05]. Cette dernière est généralement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue [06]. Parmi les avantages de cette configuration nous avons :

- Simplicité du système d'orientation des pales.
- Réduction des efforts mécaniques.
- Augmentation de la plage de fonctionnement.

I.4.3. Classification des éoliennes selon l'axe

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aérotrain. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal [07].

I.4.3.1. Éolienne à axe vertical

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de savonniés et le rotor de Darrieux.

I.4.3.2. Éolienne à axe horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent. Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal :

- *Amont* : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle.
- *Aval* : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle.

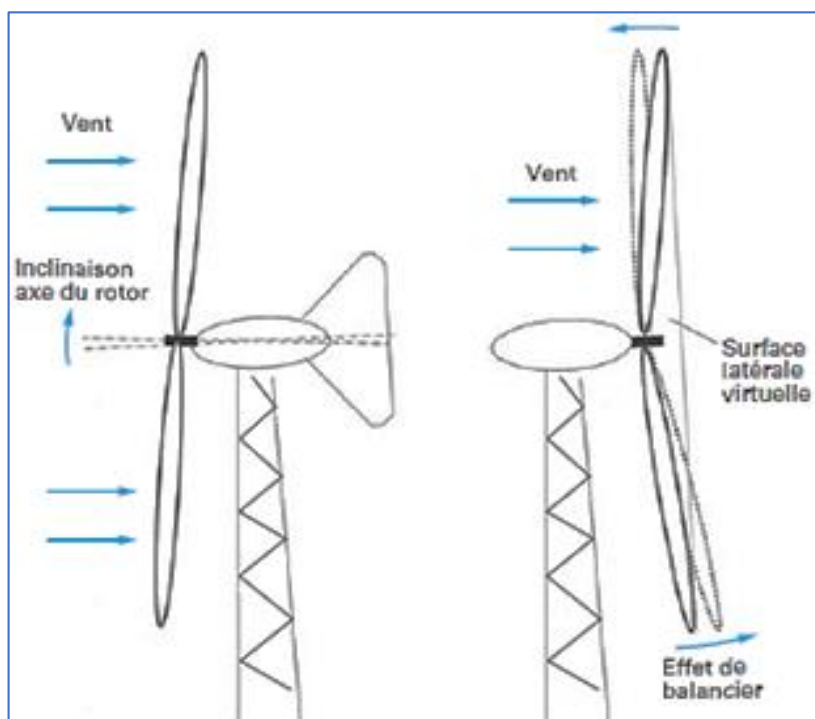




Fig. I-2 : Éoliennes en amont et en aval.

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical qui tendent à disparaître et les éoliennes à axe horizontal qui, elles-mêmes, se divisent en deux types sont :

- Les éoliennes lentes à axe horizontal utilisées surtout pour le pompage.
- Les éoliennes rapides à axe horizontal utilisées dans la production de l'énergie électrique.

Tableau I.4 : Comparaison entre l'éolienne horizontale et l'éolienne vertical.

L'éolienne horizontale	L'éolienne verticale
	
<p>L'éolienne horizontale est le modèle le plus répandu. Elle capte le vent (de face ou de dos selon le modèle) grâce à des pales assemblées en hélice. Celles-ci tournent autour d'un mât placé horizontalement par rapport au sol. Le générateur, actionné par la rotation de l'hélice, et situé en haut de l'éolienne. C'est la plus utilisée par les particuliers car son rendement est plus important.</p>	<p>Les pales de l'éolienne verticale tournent autour d'une tige positionnée verticalement. Elle peut capter des vents plus faibles ce qui lui permet d'être exploitée. Elle demande moins d'espace qu'une éolienne horizontale. Elle s'adapte donc mieux aux bâtiments. Elle peut fonctionner quel que soit le sens du vent. Par contre, elle produit moins d'électricité que l'éolienne horizontale.</p>

I.5. Principaux constituants d'une éolienne

On a choisi une éolienne à axe horizontal parce que ce sont les éoliennes les plus répandues.

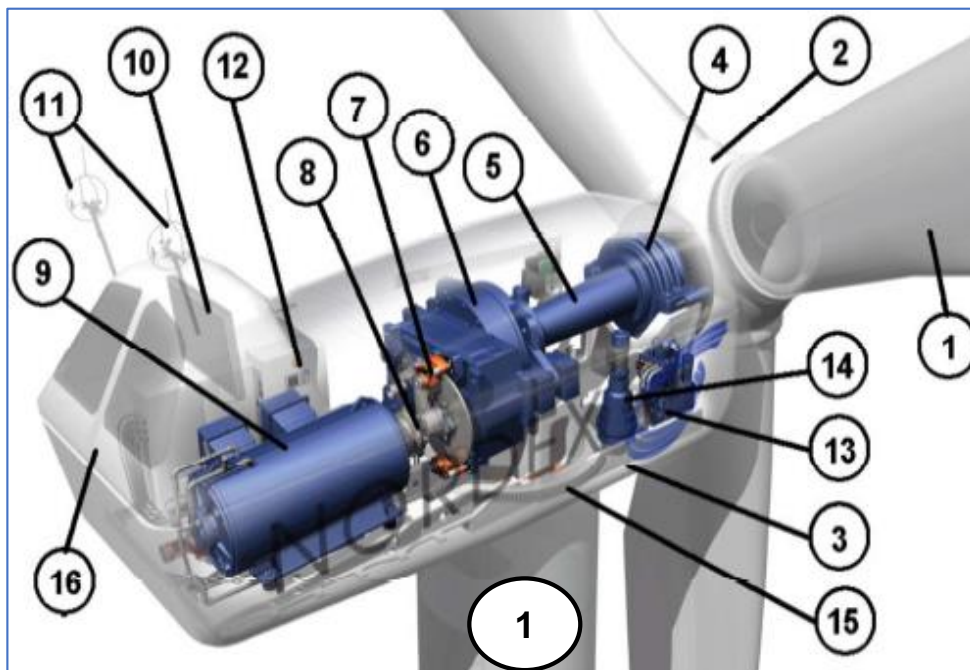


Fig. I-3 : Différentes parties de l'éolienne NORDEX N60-1.3MW.

- ❖ Les pales (1)
- ❖ Le moyeu de la turbine (2)
- ❖ La nacelle (3)
- ❖ Un palier à billes (4)
- ❖ Un arbre lent (5)
- ❖ Le multiplicateur de vitesse (6)
- ❖ Un frein mécanique à disque (7)
- ❖ Un accouplement flexible (8)
- ❖ La génératrice (9)
- ❖ Système de refroidissement (10)
- ❖ Un anémomètre et une girouette (11)
- ❖ Équipements électroniques de contrôle (12)
- ❖ Mécanismes d'orientation des pales (13),(14)
- ❖ Mécanismes d'orientation de nacelle (15)
- ❖ Un capot en acier (16).
- ❖ Une tour (17)

I.6. Principe de fonctionnement d'une éolienne

- Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tr/min) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/min, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur.
- Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent.

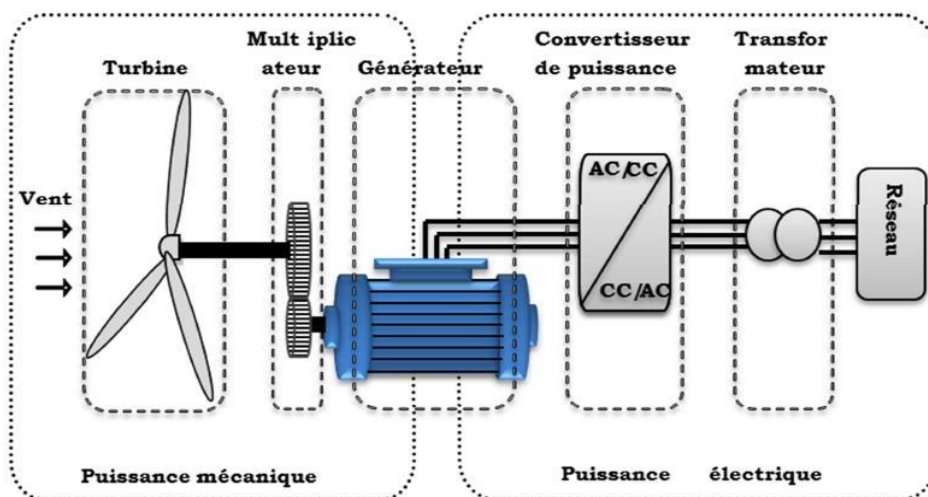


Fig. I-4 : Principaux organes du système de conversion éolien.

- La tension produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public. La tension produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public.
- Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible ($< 1\%$), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements.
- Compte tenu du fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants.
- La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs [08].

I.7. Transferts de puissance dans la MADA

En général, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine 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.

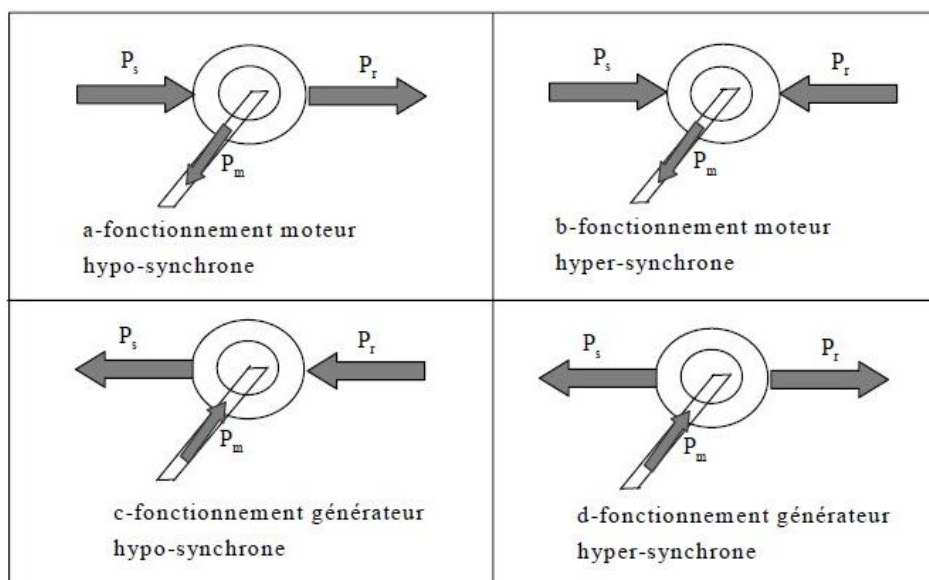


Fig. I-5 : Fonctionnement dans les quatre quadrants d'une MADA.

En effet, nous savons qu'une machine à cage doit tourner au-dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.

I.7.1. Cas moteur

a) Fonctionnement hypo synchrone $g > 0$

Pour ce cas la machine tourne à une vitesse faible inférieure à la vitesse de synchronisme. La puissance P_s est fournie par réseau au stator, La puissance P_r est fournie par rotor au réseau.

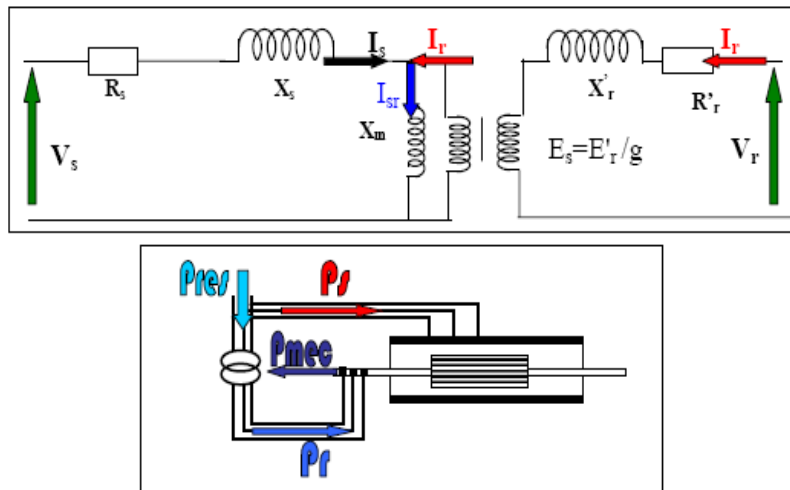


Fig. I-6 : Fonctionnement hypo synchrone de la MADA.

b) Fonctionnement hyper synchrone $g < 0$

La puissance est fournie par le réseau au stator et rotor, on a donc un fonctionnement a vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme.

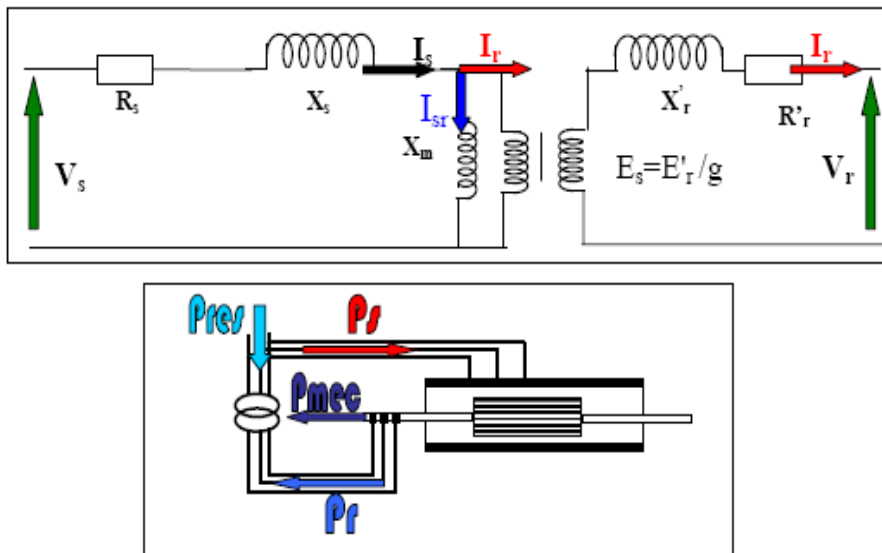


Fig. I-7 : Fonctionnement hyper synchrone de la MADA.

I.7.2. Cas générateur

Le comportement est similaire à celui du fonctionnement en mode moteur avec deux cas :

a) Fonctionnement hypo synchrone $g > 0$

En mode de fonctionnement hypo synchrone, la vitesse mécanique est faible alors le réseau reçoit une puissance statorique P_s et envoie une puissance rotorique vers la machine.

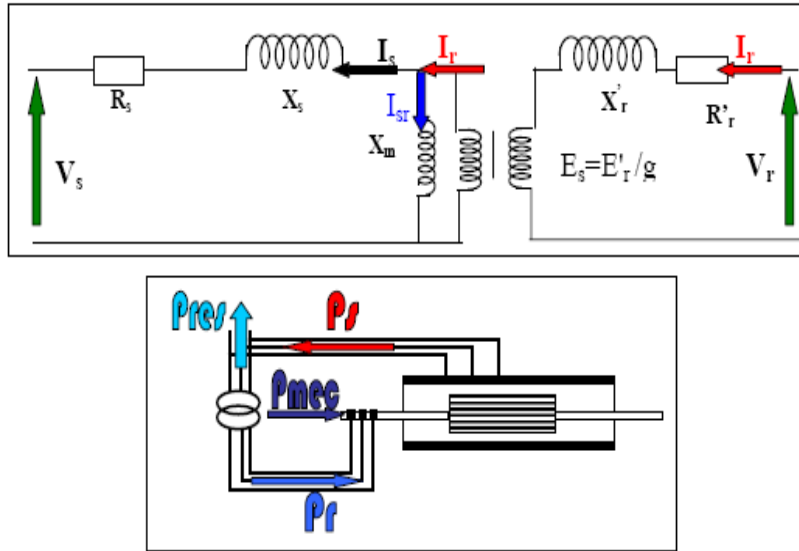


Fig. I-8 : Fonctionnement hypo synchrone de la GADA.

b) Fonctionnement hyper synchrone $g < 0$

En mode de fonctionnement hyper synchrone la vitesse mécanique augmente jusqu'à une vitesse supérieure à celle du synchronisme, dans ce cas les deux puissances sont envoyées de la machine vers le réseau.

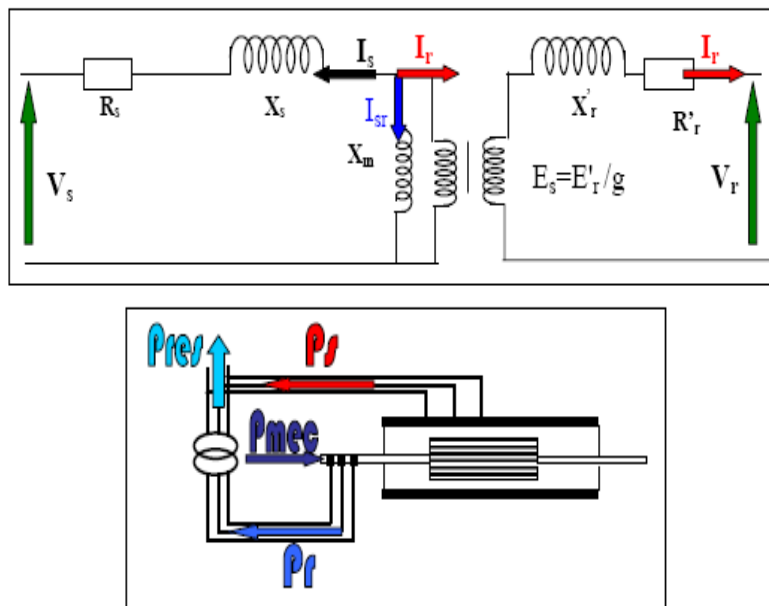


Fig. I-9 : Fonctionnement hyper synchrone de la GADA.

I.8. Données générales sur l'énergie éolienne

L'exploitation de l'éolienne pour produire de l'électricité a eu des hauts et des bas. Les causes de ces fluctuations sont diverses : guerres, crises d'autres types d'énergie, volonté de préserver l'environnement, évolution, technologie, changement de politique énergétique. À la suite de la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois améliorèrent cette technologie durant la 1ère et 2ème guerre mondiale pour faire face à la pénurie d'énergie électrique. Malgré certains succès technologiques, l'intérêt pour l'exploitation de l'éolienne à grande échelle déclina à la fin de la 2ème guerre mondiale. C'est avec la crise pétrolière que cet intérêt ressurgit. Les gouvernements occidentaux commencèrent à investir de l'argent pour notamment améliorer la technologie des aérogénérateurs, ce qui donna naissance aux aérogénérateurs modernes. Le premier marché significatif fut celui de la Californie, entre 1980 et 1986, où l'industrie de l'énergie éolienne put se développer. Ensuite les aides financières diminuèrent aux USA mais augmentèrent en Europe, ce qui permit un développement important de cette industrie dans des pays tels que l'Allemagne et le Danemark. Le marché mondial passa de 200 MW/an en 1990 à 5500 MW/an en 2001. Nous avons ainsi pu observer une évolution significative de la production électrique d'origine éolienne entre 1999 et 2003. Au cours de cette période, la production a doublé s'élevant à 40000 MW. Il est espéré qu'en 2020 la production électrique provenant de l'éolien atteigne 12% de la production mondiale d'électricité. La Figure I.10 donne la croissance moyenne annuelle exprimée dans le monde. L'énergie éolienne est la source d'énergie qui croît le plus vite dans le monde.

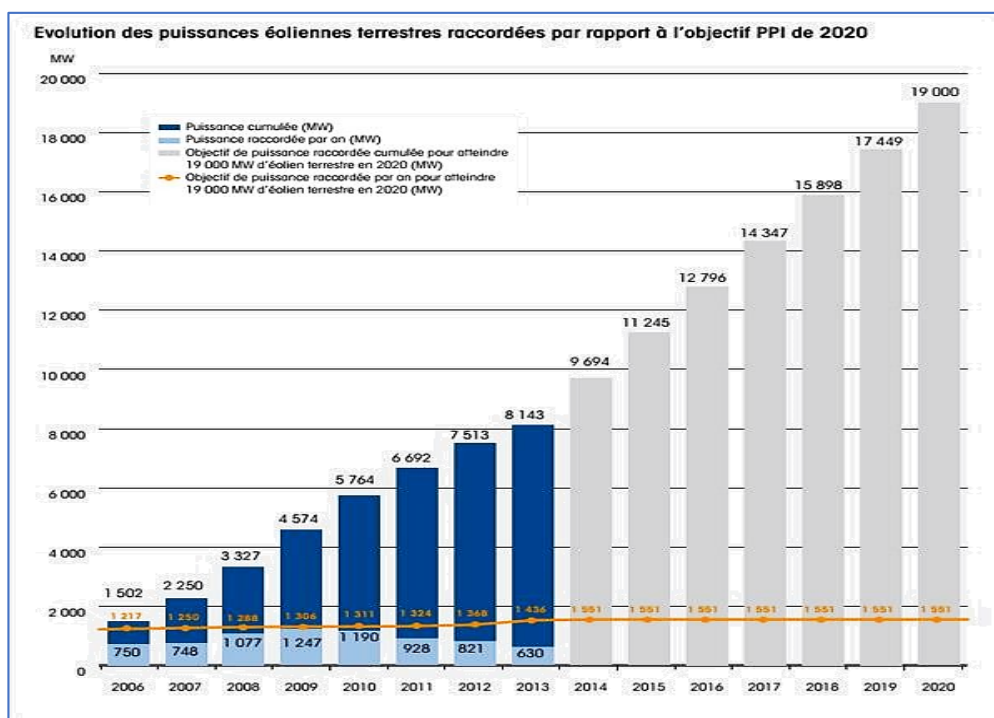


Fig. I-10 : Évolution de la puissance installée (MW) dans le monde et prévision 2006-2020.

I.8.1. Variations saisonnières de la productivité des éoliennes

Les vents d'hivers sont en général plus forts que ceux d'été. Contrairement au cycle de production de l'énergie solaire, le cycle de production d'énergie du vent correspond à la consommation électrique. En effet, la consommation électrique est plus élevée l'hiver que l'été à cause du chauffage. Ainsi la combinaison du chauffage électrique avec l'énergie éolienne est d'autant plus efficace car le refroidissement d'une maison augmente avec le vent. Les installations éoliennes sur un vaste territoire sont favorables à une corrélation entre la consommation et la production éolienne comme le montrent des études sur le foisonnement éolien. Cependant le chauffage par électricité n'est pas forcément à préconiser car une centrale électrique (au combustible) perd en moyenne 1.5 unités de chaleur pour chaque unité de chaleur utilisable par les clients.

I.8.2. Énergie éolienne en Algérie

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut rachetée par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie [09].



Fig. I-11 : Éolienne de 100 KW de Grand Vent.

Par la suite, de nombreux autres aérogénérateurs, de plus petites puissances, ont été installés en différentes locations, notamment pour l'alimentation de localités isolées ou d'accès difficiles telles que les installations de relais de télécommunications. Cependant, la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature, ces expériences n'étaient pas toujours concluantes. Il est à noter que ce constat était également valable même à l'échelle internationale.

Mais après le premier choc pétrolier, d'importants investissements ont été consacrés à la recherche/développement des éoliennes. L'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité a alors pris un essor considérable, notamment depuis la fin des années 80. Les éoliennes actuelles sont de plus en plus fiables, plus performantes et de plus en plus grandes. Ainsi, la taille du plus grand aérogénérateur qui était de 50 kW avec un diamètre de 15 m en 1989 a atteint, en 2014, une puissance de 8 MW, avec un diamètre de 164 m.

La hauteur du mât a augmenté en conséquence pour atteindre dans certaines installations, plus de 150 mètres. Par ailleurs, les grandes éoliennes sont généralement développées et installées dans des zones assez ventées. Cependant, du fait de la saturation des sites terrestres potentiellement exploitables, on assiste, ces dernières années, au développement de machines à vitesse de vent faible [10].

Pour cette catégorie d'éoliennes dont la hauteur du mât est plus élevée, les pales sont plus grandes et les générateurs électriques plus petits. La puissance éolienne totale installée dans le monde qui était de l'ordre de 6 GW en 1996 est passée à 336 GW en juin 2014 [11].

En Algérie, une première ferme éolienne de 10 MW de puissance a été implantée à Adrar et mise en service en juin 2014.

L'énergie électrique fournie par cette ferme est injectée au réseau local et le taux de pénétration de l'énergie éolienne représenterait 5% environ puissance éolienne totale installée en Algérie est donc actuellement insignifiante. Cependant, le ministère de l'énergie et des mines a projeté, dans son nouveau programme des Énergies Renouvelables, d'installer d'autres parcs éoliens d'une puissance totale de 1000 MW à moyen terme (2015-2020) pour atteindre 5010 MW à l'horizon 2030.

À noter que ce nouveau programme vise aussi bien les installations connectées au réseau électrique que le petit éolien, i.e. les petites éoliennes destinées au pompage de l'eau ou à l'alimentation en électricité des localités isolées, à l'instar des développements dans le monde où les installations de petites éoliennes ont augmenté ces dernières années. En effet, fin 2012, celles-ci ont atteint le nombre de 806 000, ce qui représente environ 35% de l'ensemble des éoliennes installées.

Les petites éoliennes actuelles sont pour la plupart des machines à axe horizontal à 3 pales, équipées d'alternateurs à aimants permanents et d'un dispositif d'orientation passif. Mais on trouve également des aérogénérateurs à axe vertical (2 à 5% des petites éoliennes installées). Ces derniers sont plus adaptés aux installations urbaines où les vitesses de vent sont faibles et la turbulence importante.



Fig. I-12 : Éolienne d'Adrar.

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 qui 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 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. 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-13 (Été, Printemps, Hiver et Automne). On remarque en général, que les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année [12].

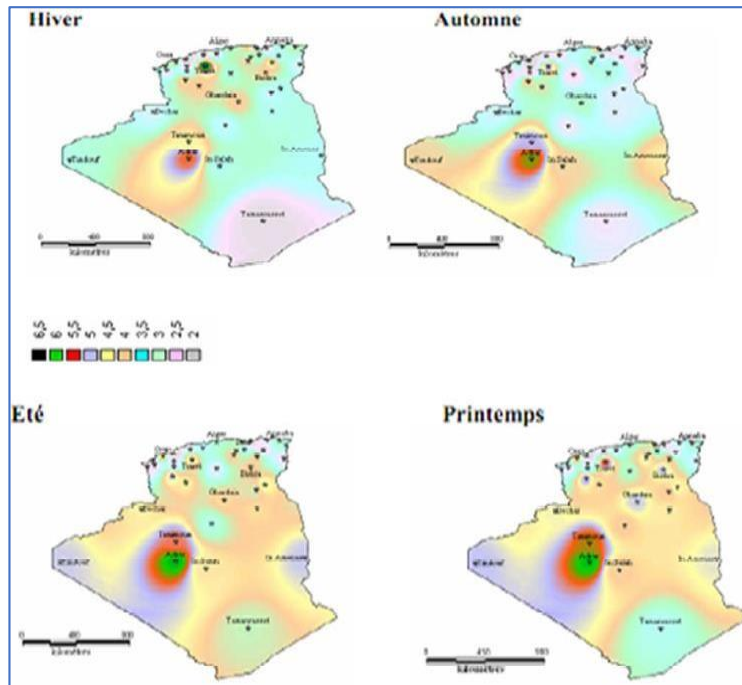


Fig. I-13 : Atlas saisonnier de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m du sol.

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'Électricité et du Gaz (CEEG), filiale du groupe SONELGAZ.

I.8.3. Répartition régionale de vent

Pour installer une éolienne il faut choisir un site où la vitesse du vent fournirait l'énergie nécessaire ; nous devons faire des mesures de la vitesse du vent dans plusieurs sites. La Figure 1.14 montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du laboratoire d'énergie éolienne du centre de recherche en énergies renouvelables CDER.

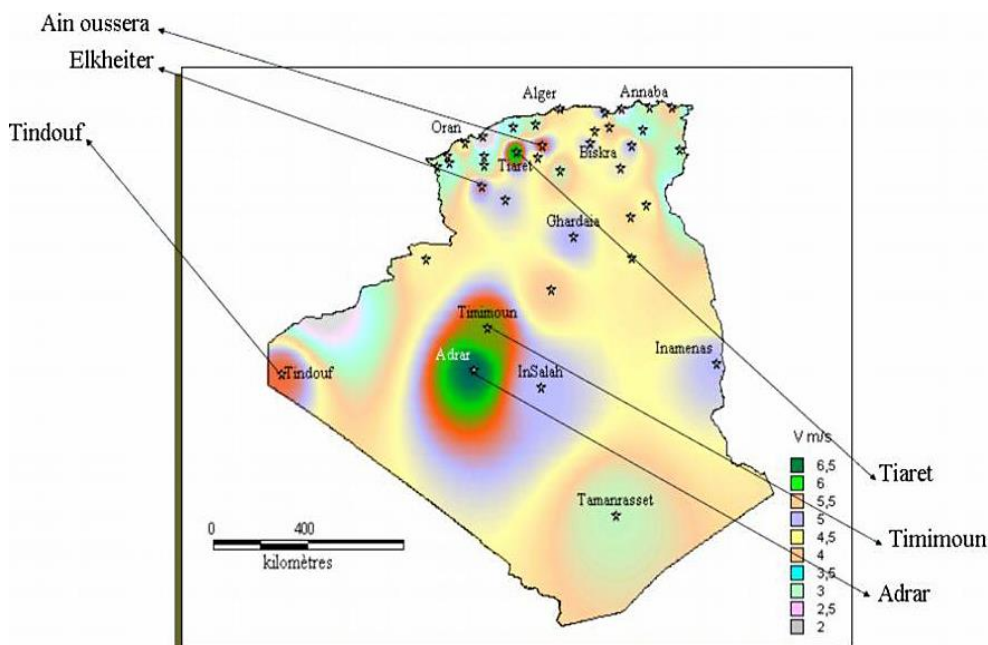


Fig. I-14 : Les régions ventées en Algérie.

I.8.4. Carte de vent en Algérie

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m /s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar. Les travaux effectués par les chercheurs du C.D.E.R D'Alger montrent à l'évidence que le pompage éolien peut être pratiqué à travers la steppe et le désert Algérien. La faisabilité économique de l'utilisation de l'énergie éolienne dans notre pays est à présent réelle et effective et est confirmée par l'expérience. La figure I.15 présente la carte des vents établie par le centre de développement des énergies renouvelable CDER laboratoire de l'énergie éolienne [13].

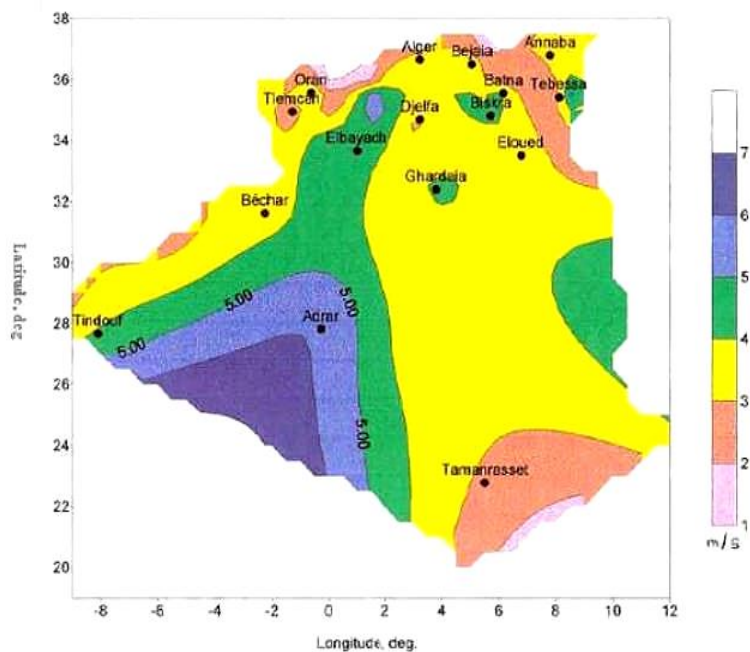


Fig. I-15 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en Algérie.

I.9. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.9.1. Les avantages

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique [14], et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [15].
- Elle s'inscrit dans l'effort global de réductions des émissions de CO2 [16].
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable [17].
- Chaque 1MW d'électricité produit par l'éolienne réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO2 rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique [16].
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance [18].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs [19].
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- La durée de vie des éoliennes modernes est de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [20].
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [21], selon l'article [22] le coût de l'éolienne a diminué presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines [19].
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie de ces pays pour se développer.
- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà [19].
- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint à d'autres énergies notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple.

I.9.2. Les inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : Ça reste un thème subjectif [19]. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien [17].
- Distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne [17].
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré le danger pour les oiseaux.

- La source d'énergie éolienne étant stochastique [22], la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien.

I.10. Conclusion

L'énergie électrique est l'énergie la plus importante et la plus noble parmi toutes les autres formes d'énergies. Ainsi la proportion électrique par rapport à l'énergie totale consommée, ne cesse pas de croître, il faudrait pour cela pouvoir développer suffisamment les énergies renouvelables pour pouvoir diminuer la consommation absolue (et non relative) d'énergie fossiles ; les énergies renouvelables sont aussi parfois présentées comme une solution au problème de l'environnement.

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur la production de l'énergie électrique à partir de l'exploitation de l'énergie éolienne et son importance en tant qu'énergie verte. Nous avons également présenté quelques avantages et quelques inconvénients sur l'énergie éolienne. Nous avons également consacré ce chapitre à la description d'une éolienne, le principe de fonctionnement, sa classification, et les différents types de cette dernière. Enfin, Nous avons donné un aperçu sur l'énergie éolienne dans le monde et spécialement en Algérie.

Chapitre II :
Modélisation de la chaîne éolienne

II.1. Introduction

Pour avoir un modèle global de la chaîne de conversion, il est nécessaire de modéliser individuellement, chaque élément constituant ce système.

Actuellement, la machine asynchrone double alimentation (MADA) est largement utilisée dans les systèmes éoliens comme génératrice. Elle permet la conversion de l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de la turbine éolienne en énergie électrique. Pour cela nous avons intérêt à faire une étude sur la MADA concernant son principe de fonctionnement, ses avantages et ses inconvénients.

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation de la chaîne de conversion éolienne à savoir la turbine éolienne, la MADA, et la commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'obtenir le fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs flux résultants. En plus, elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui de la machine à courant continu, où le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit. Enfin nous terminons ce chapitre par l'interprétation des résultats de simulation.

II.1.1. Description du fonctionnement

À nos jours, les turbines éoliennes sont devenues de tailles et de puissances plus grandes, les spécifications de contrôle plus exigeantes et les mécanismes de régulation plus sophistiqués. De plus, on s'est entendu à ce que les systèmes de commande pas simplement gardent la turbine dans sa zone de fonctionnement sûre, mais également améliorer l'efficacité et la qualité de conversion d'énergie ce qui demande une modélisation plus précise et plus exigeante et des techniques de commande différentes pour chaque gamme de vitesse de vent, faible, moyenne ou forte.

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

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé classique et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants (Figure II.1).

La machine asynchrone à double alimentations se compose principalement de deux parties, stator et rotor. Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine, il est séparé du stator par un entrefer. En principe les circuits électriques du stator et du rotor sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) avec pour seule différence le circuit électrique du rotor qui lui, est relié à trois ou quatre bagues sur lesquelles glissent des balais. Les trois enroulements d'un stator (A, B et C) sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoidalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre [24].

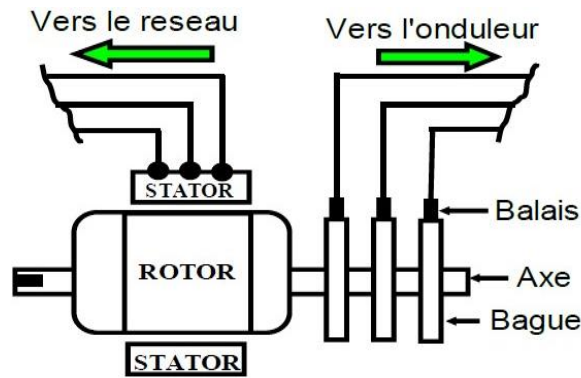


Fig. II-1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

II.1.2. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de $16/27$ (59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula la loi de Betz pour la première fois [24-27]. Considérons le système de la (figure II-2) qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontale. V_1 représenté la vitesse du vent amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

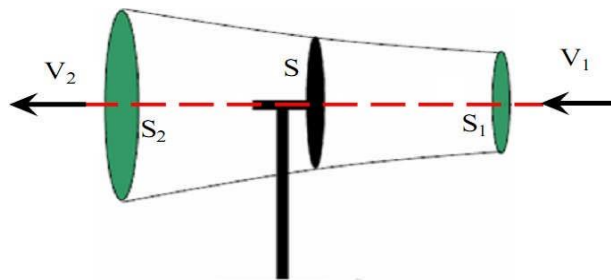


Fig. II-2 : Principe de la théorie de Betz.

La théorie de Betz modélise le passage de l'air avant et après les pales de l'éolienne par un tube de courant, Le ratio est appelé coefficient de puissance (C_p) :

V_1 : La vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur.

V_2 : La vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur.

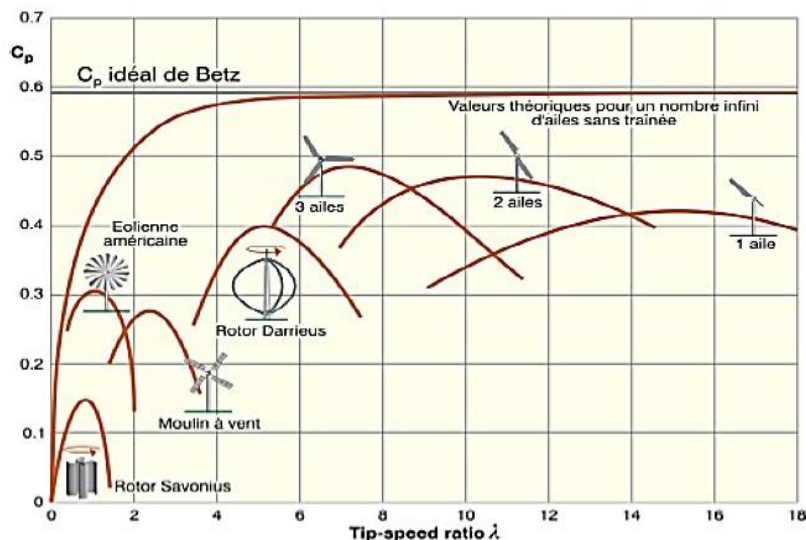


Fig. II-3 : Les caractéristiques de coefficient de puissance C_p .

Si on représente la caractéristique correspondante à la figure (II-3) on s'aperçoit que le coefficient de puissance (C_p) ne dépasse pas la valeur maximale de $16/27$ soit $0,59$, cette valeur théorique est appelée la **limite de Betz**.

En réalité, cette limite n'est 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.

II.1.2.1. Les différents types de la MADA

1. MADA à énergie rotorique dissipée.
2. MADA à structure de Kramer.
3. MADA à structure de Scherbius cyclo-convertisseur.
4. MADA à structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

La structure à énergie rotorique dissipée présente un mauvais rendement. En effet, si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance (pertes par effet joule) ; ce qui nuit au rendement du système. De plus, cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance.

La structure de Kramer a remplacé la précédente dans le but de réduire les pertes d'énergie par effet joule. Mais l'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau),

Donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette structure est alors abandonnée au profit de la structure de Scherbius avec cyclo convertisseur. Mais son utilisation génère des perturbations harmoniques importantes qui nuisent aussi au facteur de puissance du dispositif, malgré son avantage par rapport à la précédente. On fait alors appel à la structure de Scherbius avec convertisseur MLI.

Cette structure, de par ses qualités est la meilleure et la plus utilisée dans la plupart des éoliennes à vitesse variable basées sur la MADA.

II.1.2.2. Domaine d'applications de la MADA

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens. De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée telles que :

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que :

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- L'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges ... etc.

On note que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage.

II.2. Hypothèses simplificatrices

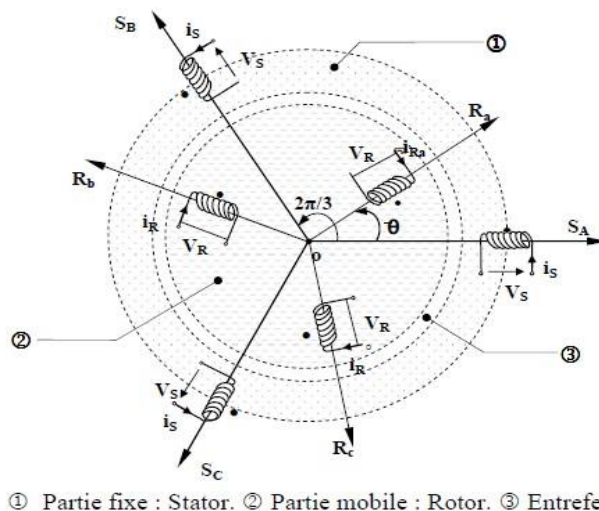
La MADA, avec les répartitions de ses enroulements et sa géométrie propre, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, pour cela en tenant compte des hypothèses simplificatrices pour qu'on puisse étudier la machine asynchrone à double alimentation idéalisée.

- ❖ Entrefer constant et effet des encoches négligeable,
- ❖ Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer,
- ❖ Circuit magnétique non saturé et parfaitement feuilleté,
- ❖ Pertes ferromagnétiques négligeables,
- ❖ Influence de l'échauffement sur les caractéristiques non pris en compte,
- ❖ Répartition sinusoïdale de l'induction le long de l'entrefer.

La machine asynchrone à double alimentation comporte

- Trois bobines statoriques (S_a , S_b , S_c) décalées entre elles par un angle de $(2\pi/3)$.
- Trois bobines rotoriques identiques de répartition similaire (R_a , R_b , R_c).

La figure (II-4) représente la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique.



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

Fig. II-4 : Représentation simplifiée de la MADA.

S_a , S_b , S_c : phases du stator

R_a , R_b , R_c : phases du rotor

II.3. Modèle diphasé de la MADA

De façon à représenter au mieux le comportement d'une MADA en simulation, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis mais suffisamment simple pour que les temps de calcul du simulateur ne soient pas prohibitifs. Le modèle diphasé de la MADA présente un bon compromis entre ces contraintes. Les équations générales de la MADA dans un repère triphasé s'écrivent :

II.3.1. Équations électriques

Les équations des tensions statoriques et rotoriques de la machine à induction s'écrivent sous forme matricielle comme suit :

$$[V_{sabc}] = R_s [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} ([L_s] [I_s]) + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] [I_r]) \quad (2.1)$$

$$[v_{rabc}] = R_r [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} ([L_r] [I_r]) + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] [I_s]) \quad (2.2)$$

Ce modèle est très difficile à résoudre vu la variation de ces paramètres avec le temps. Pour surmonter cette difficulté, on change de référentiel de projection des grandeurs électriques et électromagnétiques (tension, courant, flux) en utilisant la transformation de Park, ce qui conduit à des relations indépendantes de la position.

II.3.2. Équation mécanique

Elle est donnée par

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - f \cdot \Omega_{mes} \quad (2.3)$$

Avec :

$$\Omega_{mec} = \frac{\omega}{p}$$

II.3.3. Représentation vectorielle

La représentation vectorielle d'une grandeur triphasée peut être obtenue dans différents repères. Le repère (S) lié au stator, le repère (R) lié au rotor et le repère (T) lié au champ tournant. De plus, des formules de changement de référentiel permettent aisément de passer d'un repère à un autre.

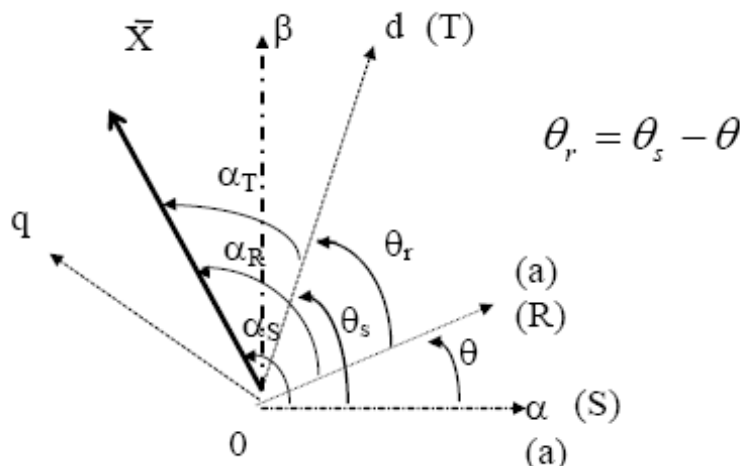


Fig. II-5 : Position des systèmes d'axes.

Avec :

θ : Position « électrique » du rotor (R) par rapport au stator (S)

θ_R : Position « électrique » du référentiel tournant (T) / référentiel (R)

θ_s : Position « électrique » du référentiel tournant (T) / référentiel (S)

Le vecteur X s'écrit :

$\bar{X}_s = X.e^{j\alpha_s}$ Dans le référentiel (S) lié au stator, d'axe (α, β) tel que l'axe α réel soit confondu avec l'axe de symétrie de la phase (a) du stator,

$\bar{X}_R = X.e^{j\alpha_R}$ Dans le référentiel (R) lié au rotor, tel que l'axe réel soit confondu avec l'axe de symétrie de la phase (a) du rotor,

$\bar{X}_T = X.e^{j\alpha_T}$ Dans le référentiel (T), d'axe (d, q), tournant à la vitesse synchrone.

À partir des positions angulaires relatives θ , θ_s , θ_R on déduit les expressions de changement de référentiel :

Changement de (S) vers (T) : $\bar{X}_T = \bar{X}_s.e^{-j\theta_s}$

Changement de (R) vers (T) : $\bar{X}_T = \bar{X}_R.e^{-j\theta_R}$

Changement de (R) vers (S) : $\bar{X}_s = \bar{X}_R.e^{-j\theta}$

II.3.4. Transformation de Park

L'application de la transformation de Park, s'avère nécessaire, cette transformation appliquée aux (courants, tensions, et flux) permet d'obtenir des équations différentielles à coefficients constants. La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées définie par la matrice de rotation donnée sous la forme suivante :

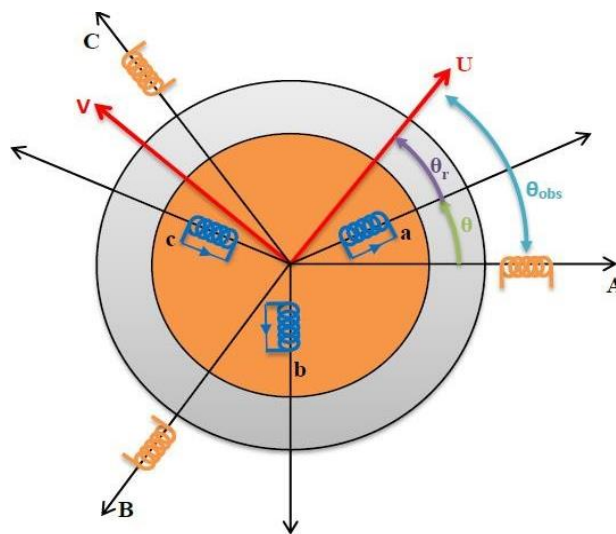


Fig. II-6 : Représentation du modèle de Park.

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variables faisant intervenir l'angle θ_{obs} entre l'axe d'une phase statorique et le système d'axes (u, v, o),

Il existe deux matrices permettant cette transformation, celle qui conserve les puissances et celle qui conserve les amplitudes, dans ce travail nous n'utiliserons que la transformation qui conserve les puissances et son inverse données respectivement par :

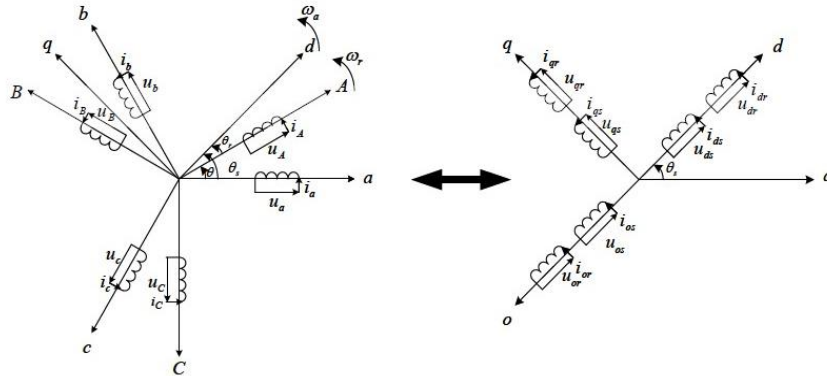


Fig. II-7 : Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.

II.4. Choix du référentiel

Il existe différentes possibilités concernant le choix de l'orientation du repère d'axes d, q qui sont :

II.4.1. Référentiel lié au stator

Il se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0, \quad \frac{d\theta}{dt} = -\omega_r$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} \\ v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\begin{cases} v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \Phi_{rq} \\ v_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \Phi_{rd} \end{cases} \quad (2.5)$$

Ce référentiel est préférable lors de l'étude des grandeurs rotoriques.

II.4.2. Référentiel lié au rotor

Il est avantageux pour l'étude des grandeurs statorique.

Il est traduit par la relation :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0, \quad \frac{d\theta_s}{dt} = p \cdot \Omega_{mec}$$

Et les équations de tension deviennent :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} \\ v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\begin{cases} v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} \\ v_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} \end{cases} \quad (2.7)$$

II.4.3. Référentiel lié au champ tournant

Il se traduit par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s, \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - p \cdot \Omega_{mec}$$

Ce choix est préférable en vue d'étudier la commande où on a une orientation du flux, et ne résume aucune simplification.

II.5. Mise en équation de la MADA

II.5.1. Représentation dans le repère de Park

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\Psi)]$ permet de ramener les variables du repère triphasé (a, b, c) sur les axes d'un repère diphasé tournant (dq0). La projection dans le référentiel (T), le référentiel (d, q) fixé au champ tournant fait correspondre en régime permanent des grandeurs continues aux grandeurs réelles sinusoïdales. Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère. Le produit matriciel définissant la transformation de Park est donné par : [28]

$$\begin{aligned} [\chi_{dq0}] &= [P(\Psi)] \cdot [\chi_{abc}] \\ [P(\Psi)] &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\Psi) & \cos(\Psi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\Psi + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\Psi) & -\sin(\Psi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Psi + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Avec :

- $\Psi = \theta_s$ pour les grandeurs statoriques.
- $\Psi = \theta_r$ pour les grandeurs rotoriques.

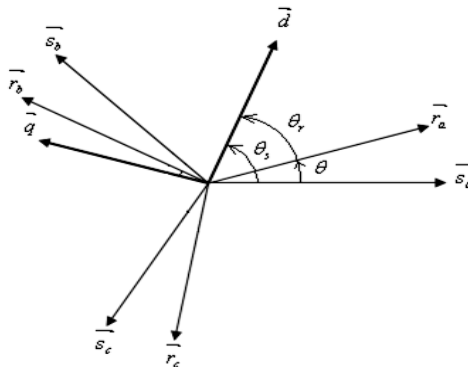


Fig. II-8 : Représentation des axes de la machine dans le repère de Park.

Le rotor et le stator de la machine, alors désignée machine de Park figure (II.8), tournent à la même vitesse de sorte que les flux et les courants sont liés par une expression indépendante du temps. En appliquant la transformation de Park aux équations de la MADA dans le repère naturel, un modèle de la machine est obtenu en tenant compte des composantes homopolaires.

II.5.1.1. Les équations des flux

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M_{sr} \cdot i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M_{sr} \cdot i_{rq} \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M_{sr} \cdot i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M_{sr} \cdot i_{sq} \end{cases} \implies \begin{cases} i_{rd} = \frac{\phi_{dr} - M i_{ds}}{L_r} \\ i_{rq} = \frac{\phi_{qr} - M i_{qs}}{L_r} \end{cases}$$

Remplaçant i_{rq}, i_{rd} en Φ_{sq}, Φ_{sd}

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s \sigma i_{ds} + \frac{M}{L_r} \phi_{dr} \\ \Phi_{sq} = L_s \sigma i_{qs} + \frac{M}{L_r} \phi_{qr} \end{cases} \quad (2.9)$$

$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r}$: Coefficient de dispersion magnétique

On a :

$$\begin{cases} \dot{\Phi}_{dr} = V_{dr} - R_r i_{dr} + \phi_{qr} \omega_r \\ \dot{\Phi}_{qr} = V_{qr} - R_r i_{qr} - \phi_{dr} \omega_r \end{cases} \quad (2.10)$$

De même on remplace, i_{rq}, i_{rd} en $\dot{\Phi}_{dr}, \dot{\Phi}_{qr}$

$$\begin{cases} \dot{\Phi}_{dr} = -\frac{1}{T_r} \phi_{dr} + \frac{M}{T_r} i_{ds} + \omega_r \phi_{qr} + V_{dr} \\ \dot{\Phi}_{qr} = -\frac{1}{T_r} \phi_{qr} + \frac{M}{T_r} i_{qs} + \omega_r \phi_{dr} + V_{qr} \end{cases} \quad \text{Avec : } T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

II.5.1.2. Les équations des tensions

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} \quad (2.11)$$

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \sigma L_s \dot{i}_{ds} + \frac{M}{L_r} \dot{\phi}_{dr} - \omega_s \sigma L_s I_{qs} \quad (2.12)$$

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \sigma L_s \dot{i}_{ds} + \frac{M}{L_r} \left(-\frac{1}{T_r} \phi_{dr} + \frac{M}{T_r} i_{ds} + \omega_r \phi_{qr} + V_{dr} \right) \quad (2.13)$$

$$v_{sd} = R_m i_{ds} + \sigma L_s \dot{i}_{ds} - \frac{M}{L_r T_r} \phi_{dr} - \frac{M}{L_r} \omega \phi_{qr} - \omega_s L_s \sigma i_{qs} + \frac{M}{L_R} V_{dr} \quad (2.14)$$

De même :

$$v_{sq} = R_m i_{qs} + \sigma L_s \dot{i}_{qs} - \frac{M}{L_r T_r} \phi_{qr} - \frac{M}{L_r} \omega \phi_{dr} - \omega_s L_s \sigma i_{ds} + \frac{M}{L_R} V_{qr} \quad (2.15)$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$$

$$R_m = R_s + \frac{M^2}{L_r T_r}$$

Le système d'équation précédent peut être exprimé également d'une façon matricielle

$$[V_s] = [C_s][\Phi_r] + [D_{sw}][I_s] + [D_{sw}][\dot{I}_s] + [D_{su}][V_r] \quad (2.16)$$

D'où : (2.17)

$$[V_s] = \begin{bmatrix} -\frac{MR_r}{L_r^2} & \frac{M}{L_r} \omega_r \\ -\frac{MR_r}{L_r^2} & \frac{M}{L_r} \omega_r \end{bmatrix} [\Phi_r] + \begin{bmatrix} (R_s + \frac{M^2}{L_r^2} R_r) \\ (R_s + \frac{M^2}{L_r^2} R_r) \end{bmatrix} [I_s] + \begin{bmatrix} -\sigma L_s \omega_s \\ \sigma L_s \omega_s \end{bmatrix} [I_s] + \begin{bmatrix} \sigma L_s \\ \sigma L_s \end{bmatrix} [\dot{I}_s] + \begin{bmatrix} \frac{M}{L_r} \\ \frac{M}{L_r} \end{bmatrix} [V_r]$$

II.5.2. Représentation dans le repère de Clarke

L'idée de Clarke repose sur le fait qu'un champ tournant créé par un système triphasé peut l'être aussi par un système biphasé de deux bobines à $\pi/2$ équivalent. La condition est que les forces magnétomotrices ou la puissance instantanée soit conservée. Le référentiel (α, β) est immobile par rapport au stator. Les composantes de toutes les grandeurs (tension, courant et flux) statoriques et rotoriques sont donc alternatives. C'est pour cela que le modèle de la machine dans ce référentiel est un modèle réel du côté stator. Le repère $(\alpha-\beta)$ est un repère fixe par rapport au repère $(a-b-c)$ alors que le repère $(d-q)$ est un repère tournant. L'angle que forme le repère $(d-q)$ avec le repère $(\alpha-\beta)$ est appelé angle de transformation ou angle de Park. La matrice de passage est donnée par :

$$p(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ \sin\theta & -\cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Cette matrice de rotation $P(\theta)$ conserve les équivalences énergétique et magnétique instantanées et donne des grandeurs continues. De la même manière, La projection dans le référentiel (S) en obtient les équations de Clarke de la MADA qui sont donnée par :

II.5.2.1. Les équations des flux

$$\Phi_{s\alpha} = L_s \dot{i}_{s\alpha} + M_{sr} \dot{i}_{r\alpha} \quad (2.18)$$

$$\Phi_{s\beta} = L_s \dot{i}_{s\beta} + M_{sr} \dot{i}_{r\beta} \quad (2.19)$$

$$\Phi_{r\alpha} = L_r \cdot i_{r\alpha} + M_{sr} \cdot i_{s\alpha} \quad (2.20)$$

$$\Phi_{r\beta} = L_r \cdot i_{r\beta} + M_{sr} \cdot i_{s\beta} \quad (2.21)$$

De même que le modèle dq en obtient le modèle d'état de la MADA en $\alpha\beta$

II.5.2.2. Les équations des tensions

$$V_{s\alpha} = R_s \cdot i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \phi_{s\alpha} \quad (2.22)$$

$$V_{s\beta} = R_s \cdot i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \phi_{s\beta} \quad (2.23)$$

$$V_{r\alpha} = R_r \cdot i_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \phi_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \theta \phi_{r\beta} \quad (2.24)$$

$$V_{r\beta} = R_r \cdot i_{r\beta} + \frac{d}{dt} \phi_{r\beta} - \frac{d}{dt} \theta \phi_{r\alpha} \quad (2.25)$$

II.6. Forme d'état du modèle de la MADA

La représentation d'état de la MADA en tension dans le référentiel (α, β) est donnée sous la forme matricielle suivante en tenant compte du fait qu'on prend en considération comme variable d'état les courants au stator et le flux au rotor et comme variable d'état les composantes de la tension au stator :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{s\alpha} \\ \dot{i}_{s\beta} \\ \dot{\phi}_{r\alpha} \\ \dot{\phi}_{r\beta} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma L_s} \left(R_s + \frac{M^2}{L_r T_r} \right) & 0 & \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} & \frac{\omega M}{\sigma L_s L_r} \\ 0 & -\frac{1}{\sigma} \left(R_s + \frac{M^2}{L_r T_r} \right) & \frac{\omega M}{\sigma L_s L_r} & \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -\omega \\ 0 & \frac{M}{T_r} & \omega & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \phi_{r\alpha} \\ \phi_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ V_{r\alpha} \\ V_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Avec

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s} : \text{Coefficient de dispersion de Blondel}$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} : \text{Constante de temps rotorique}$$

Équations du couple

$$C_{em} = p(\phi_{rq} i_{rd} - \phi_{rd} i_{rq})$$

$$C_{em} = p(\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_{sd})$$

$$C_{em} = p M s r (i_{rd} i_{sq} - i_{sd} i_{rq})$$

II.7. Modélisation de la chaîne éolienne

Dans cette partie, on modélise la chaîne éolienne connectée au réseau de distribution à travers le stator, constituée d'une turbine éolienne, d'un multiplicateur, d'une machine asynchrone alimentation MADA à vitesse variable, tandis que le rotor est connecté au réseau via deux convertisseurs statiques bidirectionnels mis en cascade à travers un bus continu et un fil le montre la figure II-9.

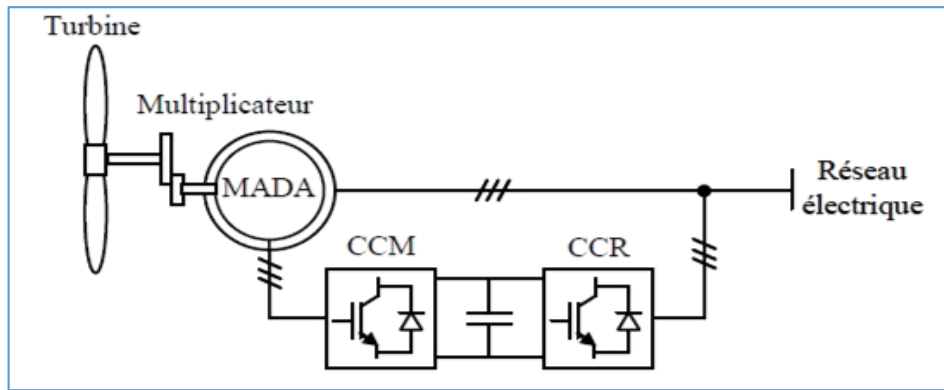


Fig. II-9 : Schéma synoptique de l'éolienne.

La vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées :

- L'angle de la pale et le couple électromagnétique de la génératrice.
- La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

II.7.1. Modélisation du vent

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être une simple loi exponentielle où bien utilisant des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente.

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- Définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne ;
- Définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales ;
- Développer et affiner la modélisation du rotor ;
- Évaluer le potentiel d'énergie utilisable ;
- Fournir une aide pour l'implantation des machines

La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concernée par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique, est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité.

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent [23].

La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps. Le vent est en fait un champ de vitesses de déplacement de masses d'air caractérisé par sa vitesse et sa direction qui sont affectées par plusieurs facteurs, en particulier le phénomène de cisaillement et l'effet d'obstacle de la tour. Ces phénomènes modélisables correspondent à la partie déterministe de la variation spatiale du champ de vitesses. Les turbulences provoquées par les obstacles en amont correspondent à la partie stochastique de la variation spatiale du champ de vitesses [29].

Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent.

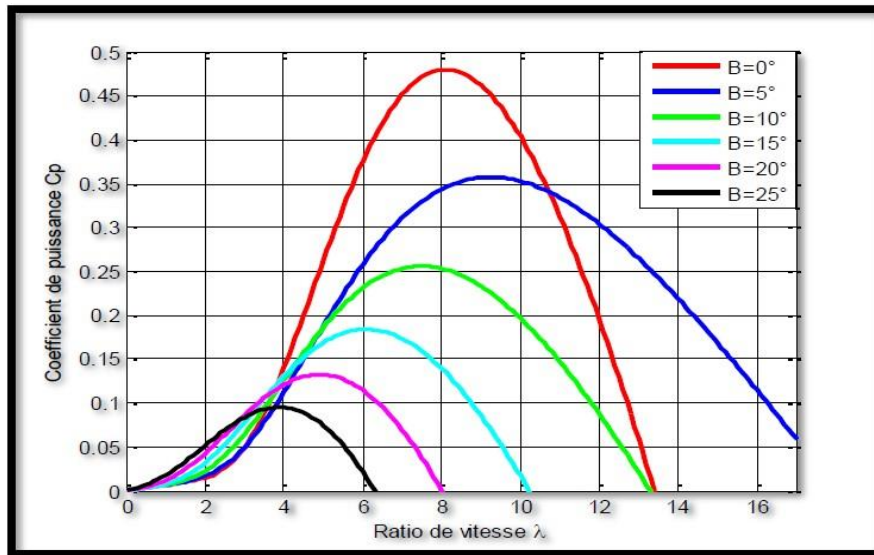


Fig. II-10 : $C_{aéro}$ en fonction du ratio de vitesse et l'angle d'orientation des pales.

II.7.2. Modélisation de la MADA

Dans cette partie, on modélise la MADA directement connectée au réseau de distribution par le stator, et alimentée par le rotor au moyen de deux convertisseurs de puissance,

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou des aimants permanents mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de "machine synchrone à excitation alternative" [30] [31]. La figure (II.11) représente l'enroulement de la MADA.

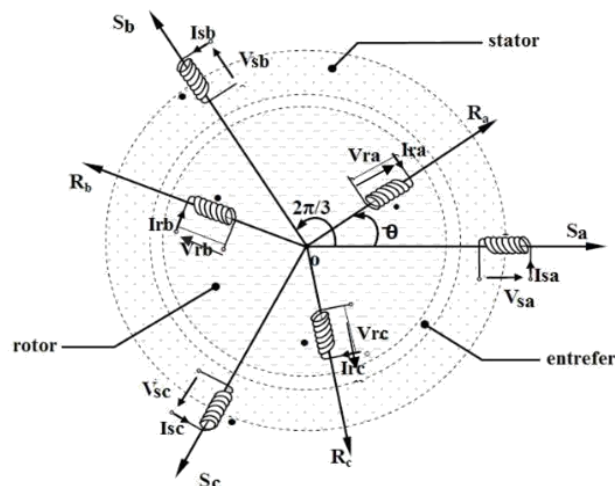


Fig. II-11 : Représentation schématique du modèle d'une MADA dans le repère (d-q).

La théorie de la machine asynchrone à double alimentation en basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations statoriques et rotoriques triphasé, La transformation de Park permet le passage d'un repère triphasé à un modèle biphasé. Ce qui réduit considérablement la complexité du modèle en vue de sa commande. La machine asynchrone est représentée par ces six enroulements dans l'espace électrique. L'angle θ repère le décalage de l'axe de la phase rotorique par rapport à l'axe fixe de la phase statorique. Elle peut être modélisée par six équations électriques et une seule équation mécanique qui concerne la dynamique du rotor.

II.7.3. Modélisation de la turbine éolienne

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [32]. Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant un générateur à travers un multiplicateur de vitesse de gain G. Une représentation globale du modèle de cette turbine utilisant le graphe informationnel causal GIC est montré la fig. II-12.

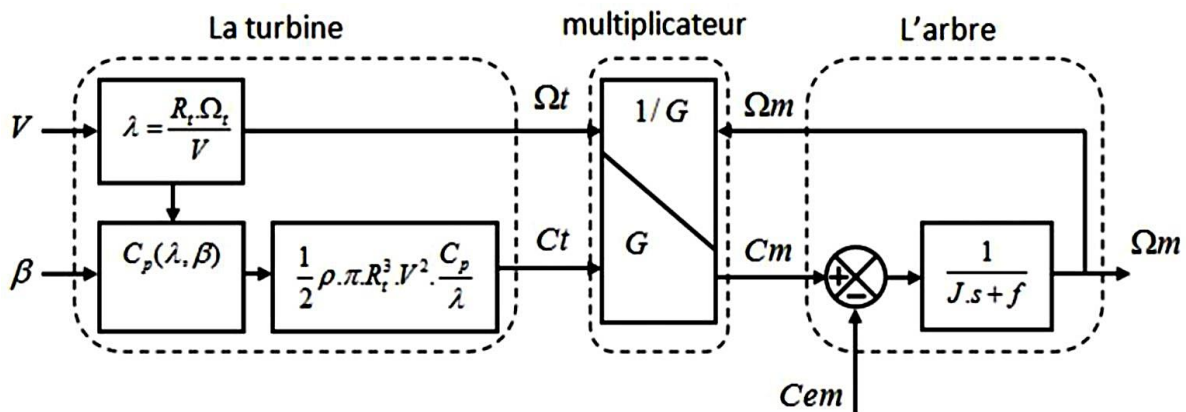


Fig. II-12 : Graphe Informationnel Causal (GIC).

Ce graphe illustre les principes de causes à effets des grandeurs qui interviennent au niveau de la turbine. Cette dernière génère le couple aérodynamique qui est appliquée au multiplicateur.

Les entrées de la turbine sont : la vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales, et la vitesse de rotation de la turbine. Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de rotation de la turbine et en couple de multiplicateur. Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur, le couple électromagnétique fournie par la génératrice. Le GIC montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées : L'angle d'orientation des pales et le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice a ce système. Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G.

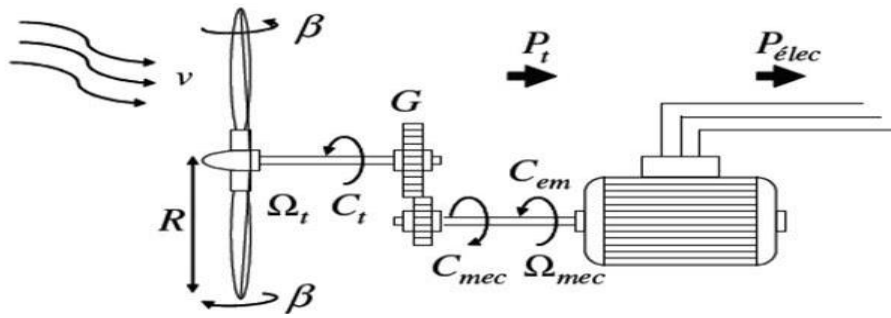


Fig. II-13 : Schéma de la chaîne éolienne.

Considérons une turbine éolienne à trois pales orientables, fixées sur un l'arbre de la turbine formant ainsi un bloc mécanique capable de tourner grâce à l'énergie du vent. Ceci permet de déduire que chaque partie de cet ensemble subit trois contraintes à savoir sa propre inertie, le frottement et la contrainte élastique. D'une manière générale l'arbre de la turbine est solidaire d'un multiplicateur de vitesse, qui, à son tour est lié à l'arbre de la génératrice. La figure II.14 illustre d'une manière détaillée le schéma équivalent de la turbine éolienne :

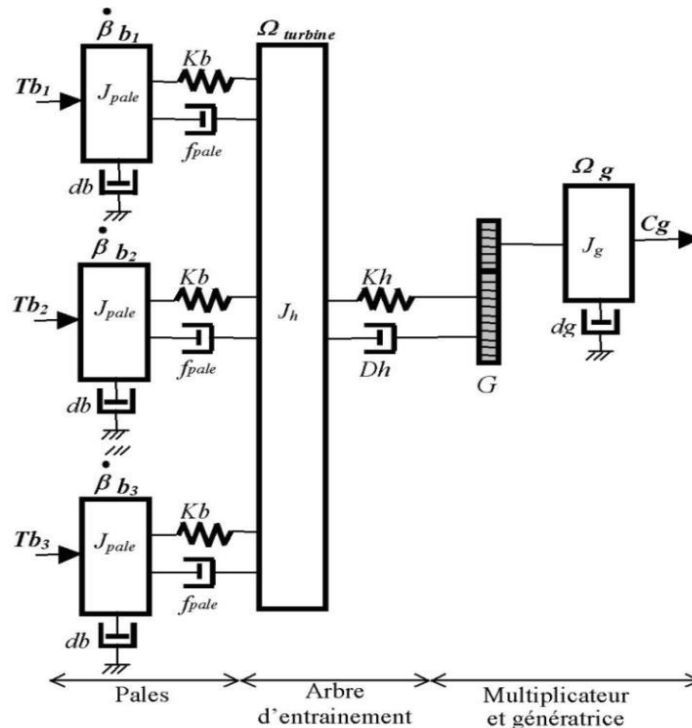


Fig. II-14 : Schéma mécanique équivalent de la turbine éolienne.

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- La même inertie J_{pale}
- La même élasticité k_b
- Le même coefficient de frottement par rapport à l'air d_b

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées $\beta b_1, \beta b_2, \beta b_3$. Chaque pale reçoit une force T_{b1}, T_{b2}, T_{b3} qui dépend de la vitesse du vent qui lui est appliquée. L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- Son inertie J_h
- Son élasticité K_h
- Son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_h

Le rotor de la génératrice possède :

- Une inertie J_g
- Un coefficient de frottement d_g

Ce rotor transmet un couple entraînant (C_g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} . La turbine comporte un multiplicateur de vitesse noté G . Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($T_{b1} = T_{b2} = T_{b3}$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques.

De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air d_b est très faible et peut être ignoré. De même, les pertes par frottement côté turbine sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice. En tenant compte de ces considérations, le modèle mécanique de la figure II.16 devient celui donné dans la figure II.15 comportant deux masses tournantes grâce au couple aérodynamique C_{aer} .

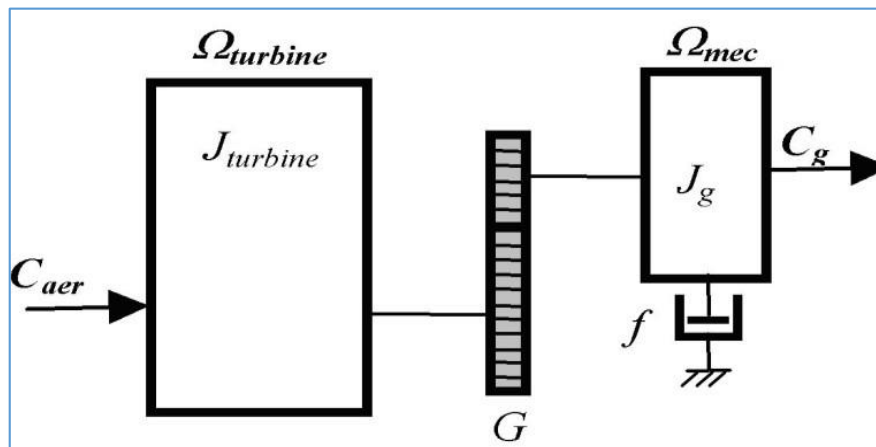


Fig. II-15 : Schéma mécanique équivalent simplifié de la turbine éolienne.

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation Ω_t , relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne la génératrice. Les trois pales sont identiques. De plus, on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces. Ainsi, on peut modéliser les trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. La conception aérodynamique des pales, nous considérons que leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être négligé. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement seront négligeables devant les pertes par frottement du côté de la génératrice. Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un

modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la figure II.16 dont la validité, par rapport au modèle complet de la turbine, a déjà été vérifiée [33,34].

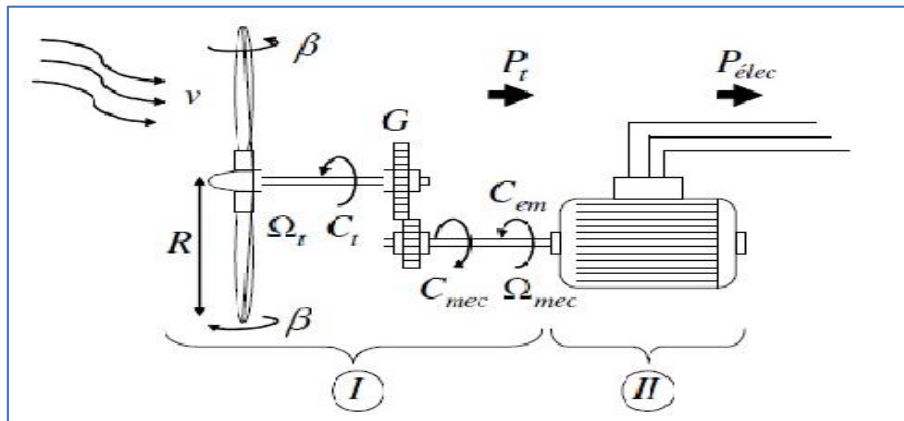


Fig. II-16 : Configuration d'une éolienne.

Sur l'arbre de l'éolienne il y a la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et le rotor du générateur. La turbine éolienne se compose de plusieurs pales fixes ou orientables. 80% des fabricants fabriquent des turbines tripales pour des raisons de stabilité, de poids et de fluctuations mécaniques. La turbine éolienne, en général, tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 (tr/mn). Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique qui tourne à environ 1500 (tr/mn). Avec les mêmes simplifications citées dans [24], le modèle de la partie mécanique peut être obtenu. L'élasticité et le frottement des pales avec l'air sont ignorés.

➤ Modèle de la turbine éolienne

Le schéma bloc qui représente la turbine éolienne est illustré sur la figure II.17. La turbine éolienne est caractérisée par les courbes du coefficient de puissance C_p qui est une fonction du rapport de vitesse

$\lambda = \frac{R\Omega_t}{v}$ et de l'angle de calage des pales β (deg). Où :

Ω_t = Vitesse angulaire mécanique (rad/s mécanique) de la turbine.

v = Vitesse du vent (m/s).

ρ = Densité de l'air 1.22 (Kg /m³) à la pression atmosphérique à 15°C.

R = Rayon de la turbine = longueur de pale en (m).

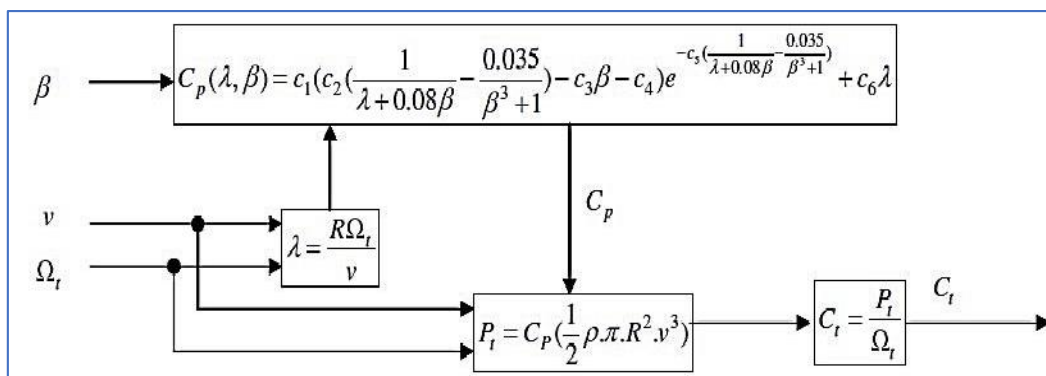


Fig. II-17 : Modèle de la turbine éolienne.

Pour notre exemple d'éolienne, le coefficient de puissance C_p est donné par la relation suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(c_2 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - c_3\beta - c_4 \right) e^{-c_5 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)} + c_6\lambda \quad (2.27)$$

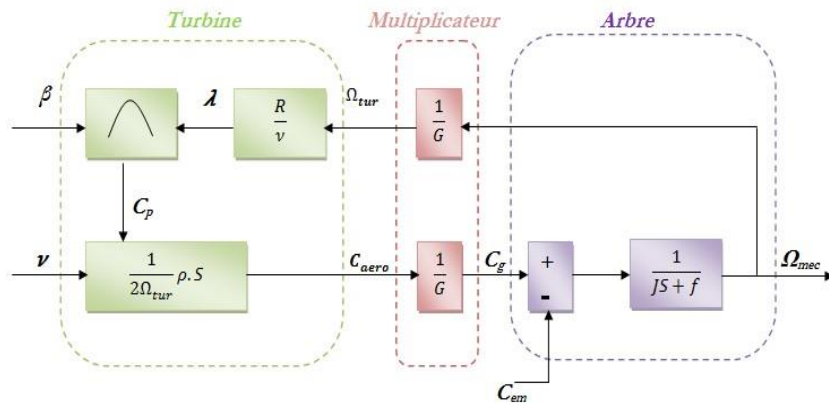


Fig. II-18 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

Nous remarquons que l'augmentation de β permet de dégrader le coefficient C_p et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

Le couple mécanique sur l'axe de la turbine est donné par la relation suivante :

$$C_l = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{0.5 C_p \rho \pi R^2 v^3}{\Omega_t} \text{ en (N.m)} \quad (2.28)$$

II.8.4. Modélisation du multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse est la liaison entre la turbine et le générateur. La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre. Il a pour but d'adapter la vitesse de la turbine Ω_t , relié à un multiplicateur de gain G , assez lente à celle que nécessite la génératrice Ω_g .



Fig. II-19 : Exemple mécanique du multiplicateur.

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la MADA (arbre rapide). En considérant que le multiplicateur est idéal, c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables. Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain.

L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles.

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur, [24].

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_t \quad (2.29)$$

Où :

G = Rapport de multiplication (-).

C_{mec} = Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N.m).

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle du générateur comme suivant :

$$\Omega_{mec} = G\Omega_t \quad (2.30)$$

Où : Ω_{mec} = Vitesse du générateur (rad / s mécanique).

II.8.5. Modélisation de l'arbre

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation suivant :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_T - f\Omega_{mec} \quad (2.31)$$

Où :

J = Inertie totale des parties tournantes (2 Kg.m).

f = Coefficient de frottements visqueux.

$C_T = C_{mec} + C_{em}$ = Couple total de l'éolienne.

C_{em} = Couple électromagnétique du générateur en (N.m).

En fonctionnement générateur le couple électromagnétique C_{em} a un signe négatif.

L'inertie totale est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté générateur c'est-à-dire :

$$J = \frac{J_{Turbine}}{G^2} + J_{Générateur} \quad (2.32)$$

Le schéma suivant représente le modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la turbine

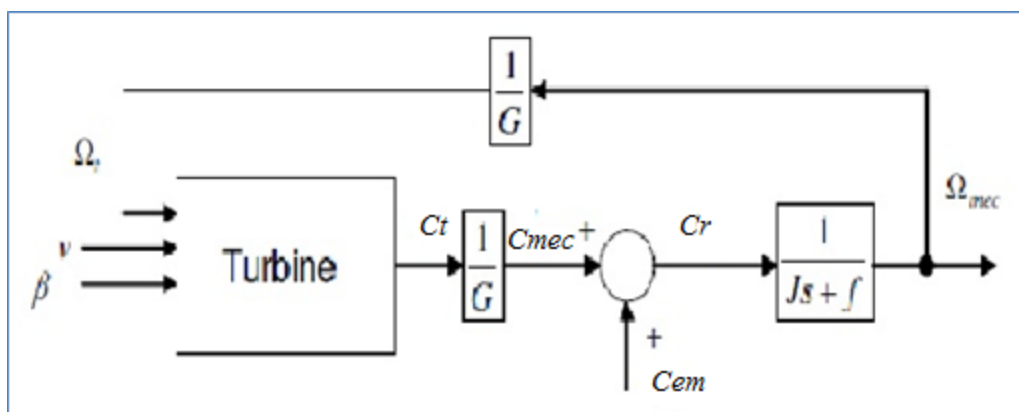


Fig. II-20 : Modèle de l'arbre et de la turbine éolienne.

II.8.6. Modélisation de l'actionneur des pales

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système les pales sont tournées par un dispositif de commande appelé (Pitch control).

En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine et plus précisément le coefficient de puissance, voir la figure II-21. Les pales sont face au vent en basse vitesse et pour les fortes vitesses elles s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance.

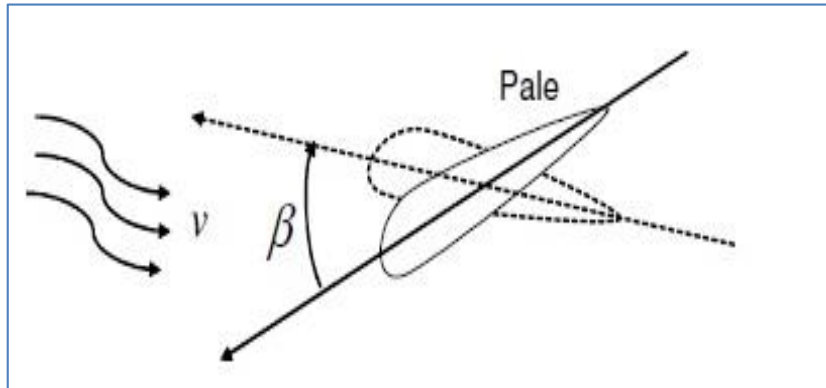


Fig. II-21 : Orientation des pales.

Le système d'orientation de l'angle des pales est approché par une fonction de transfert de 1^{er} ordre et par un intégrateur dans. Cet actionneur est commandé en boucle fermée pour asservir l'angle de calage des pales β avec des contraintes sur β , Voir la figure II.22.

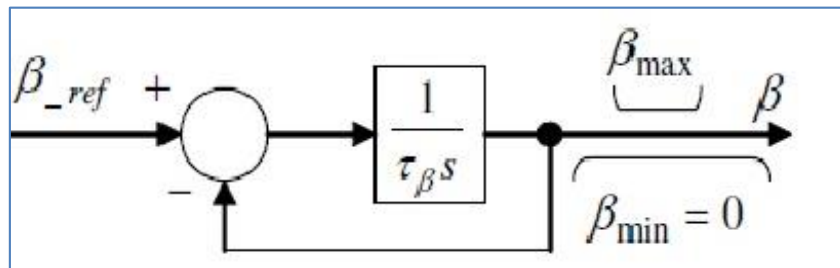


Fig. II-22 : Modèle et commande du système de calage de pale.

Où :

τ_β = Constante de temps de l'actionneur (s).

β_{\min} ; β_{\max} = Limites de l'angle de calage des pales dépendant de la conception physique.

S = Opérateur de Laplace.

β_{ref} = Référence d'angle reçue du processus de la commande de la puissance électrique.

II.9. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et l'analyse d'un système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation fonctionnant à vitesse variable. En premier lieu, les modèles analytiques des différents constituants du système éolien ont été établis. Ensuite, nous avons présenté le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation en vue d'une alimentation triphasée sinusoïdale pour un fonctionnement en génératrice qui est obtenu par des transformations de passage d'un système triphasé à un système biphasé puis on applique la transformation de Park, sur la base d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Du point de vue de la modélisation, le modèle d'état de la machine obtenu est un modèle non linéaire fortement couplé.

Chapitre III :
Commande d'une chaîne éolienne

III.1. Introduction

Il est possible aujourd'hui d'obtenir les machines asynchrones aussi performantes que les machines à courant continu, il est nécessaire d'appliquer la commande vectorielle afin d'assurer le contrôle du flux et celui du courant générant le couple électromagnétique [35].

Après avoir présenté l'état d'art, le principe de la conversion de l'énergie éolienne et modélisé les parties essentielles qui sont la turbine, génératrice, et le convertisseur statique, nous nous attachons dans ce chapitre à présenter en premier lieu à la commande vectorielle de la MADA, qui présente une solution attractive pour réaliser des meilleures performances. Puis on va à commander l'éolienne avec une boucle d'asservissement de vitesse munie d'un régulateur PI permettant d'optimiser l'extraction de l'énergie du vent.

Le but visé dans ce chapitre consiste à introduire un algorithme de commande des puissances active et réactive pour un système de production de l'énergie électrique à la base de la machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur contrôlé par la technique de modulation MLI.

III.2. Fonctionnement de la chaîne éolienne

La vitesse mécanique de la turbine et la fréquence du réseau sont découplées. Pour obtenir ce découplage, on utilise une interface d'électronique de puissance. De cette manière, la turbine tourne à vitesse variable, ajustée de manière optimale à tout instant à la vitesse du vent. Le convertisseur back-to-back alimente les enroulements du rotor. Ainsi, la vitesse mécanique et la vitesse électrique du rotor sont découplées et la fréquence électrique du stator et du rotor peuvent être liées indépendamment de la vitesse mécanique du rotor. Le contrôle par angle de calage β variable consiste à faire tourner les pales de façon à diminuer le rendement aérodynamique de la turbine avec des mécanismes hydrauliques ou des moteurs électriques.

Les turbines éoliennes à vitesse variable utilisent majoritairement ce contrôle. À partir d'une certaine vitesse du vent, autour de 15 m/s, l'énergie contenue dans le vent est trop importante, comme le stress mécanique dans la turbine. Au-dessus de cette valeur, on arrête le fonctionnement de la turbine et on déconnecte les machines.

III.3. Commande de la MADA

La régulation classique de type PI est la technique la plus répandue à l'échelle industrielle, cela est dû évidemment à la simplicité de sa mise en œuvre, de ses performances acceptables, de son coût réduit par rapport à celles utilisées dans les techniques avancées.

L'introduction du correcteur PI dans une boucle de régulation permet d'ajouter un zéro arbitraire et un pôle à l'origine. L'idée de base de cette technique consiste à placer le zéro du correcteur de façon à compenser le pôle du système en boucle ouverte.

III.4. Conception du Contrôle

La stratégie de contrôle vectoriel permet un contrôle indépendant rapide des composants de l'axe d et q, ce qui conduit au contrôle direct de la puissance active et réactive. La stratégie de contrôle vectoriel décrite dans [36] a été adoptée pour obtenir un contrôle instantané de la puissance dans ce travail. La structure de commande globale du MADA dans le référentiel d-q rotatif est illustrée à la Fig.1.

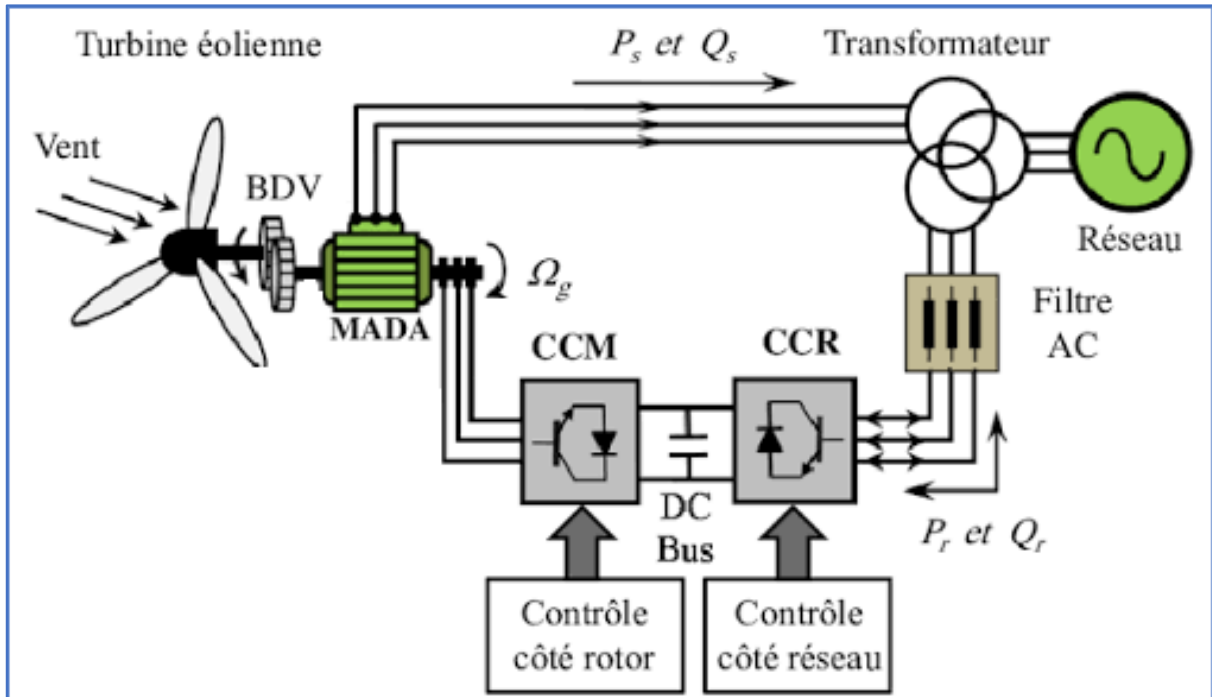


Fig. III-1 : La structure de commande globale du MADA.

III.5. Principe générale de la commande à flux orientée

Dans la machine asynchrone, le principe d'orientation du flux a été développé par BLASCHKE au début des années 70. [37]

Il consiste à orienter le vecteur courant et le vecteur flux afin de rendre le comportement de cette machine similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée (MCC) où le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple. Il s'agit de placer le référentiel $d-q$ de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct d. Ainsi, le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par l'autre composante.

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur. De nombreuses variétés ont été présentées dans les littératures, et classées [37]

Suivant la source d'énergie :

- Commande en tension,
- Commande en courant ;

Suivant l'orientation du repère :

- Le flux rotorique,
- Le flux statorique,
- Le flux d'entrefer ;

Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation du vecteur flux,
- Indirecte par contrôle de la fréquence de glissement.

III.6. Modèle pour le contrôle indépendant des puissances

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques [37].

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs. Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine [38] :

1. **La première méthode** consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée **méthode directe** car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.
2. **La deuxième méthode** consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée **méthode indirecte**.

Ces deux méthodes vont être étudiées et simulées dans la suite. 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 rotoriques ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants pour faire fonctionner la MADA.

III.7. Mise en place de la régulation

Considérons le schéma bloc du système à réguler afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme.

Dans notre étude, nous avons considéré que la MADA était raccordée à un réseau de forte puissance et stable, donc ce terme est constant. Nous ne placerons donc pas de régulateur entre les courants rotoriques et les puissances.

Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont dans le schéma bloc de la MADA [39].

III.7.1. Commande directe en puissance active et réactive de la MADA

Cette méthode nous permet d'utiliser une seule boucle de régulation sur chaque puissance active et réactive avec un régulateur indépendant. Toutefois nous allons négliger les termes de couplage entre les deux axes, qui apparaît dans le schéma bloc de la MADA à cause du faible glissement, tout en compensant aussi les perturbations.

Les résultats de simulation présentent des différentes courbes qui sont obtenus par la commande, Permet de découpler les expressions des puissances du générateur. D'après les résultats obtenus, on peut dire que le contrôle direct utilisant les régulateurs PI présente un bon découplage au réglage des puissances actives et réactive au niveau du rotor de la machine. Après le régime transitoire, on note une bonne poursuite des allures aux valeurs de références imposées.

On peut remarquer que les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant on observe l'effet du couplage entre les deux axes de commande d et q car un échelon imposé à l'une des deux puissances, active ou réactive, induit de faibles oscillations sur la seconde.

Enfin le fonctionnement de contrôle de puissance réactive nous permet d'avoir une puissance réactive négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductif), représentent le flux statorique qui suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès. On voit clairement que la composante quadrature du courant rotorique ir_q contrôle le couple électromagnétique donc la puissance active. La composante directe du courant rotorique ir_d contrôle le flux et donc la puissance réactive transitée entre le stator et le réseau.

III.7.2. Commande indirecte en puissance active et réactive de la MADA

Cette méthode consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler [40]. On construit ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens. La commande indirecte va donc contenir tous les éléments présents dans le schéma bloc de la MADA. Cette méthode est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et plus utilisée que la méthode directe.

III.8. Commande sans boucle de puissance

En gardant les mêmes hypothèses sur la stabilité du réseau, on établit le système de régulation où l'on trouve désormais une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine.

III.9. Stratégie de commande de la turbine

Une turbine éolienne est un dispositif qui capture une partie de l'énergie du vent et la convertit en un travail utile. En particulier, un système de conversion d'énergie éolienne relié à un réseau d'énergie électrique doit être conçu pour réduire au maximum le coût de production et d'assurer une exploitation sûre en respectant les normes de la qualité d'énergie.

III.9.1. Objectifs de la commande

La minimisation du coût d'énergie implique une série d'objectifs liés et parfois en conflit. Par conséquent, ils ne devraient pas être poursuivis séparément. La question est de trouver un compromis bien équilibré entre eux. Ces objectifs peuvent être arrangés de la manière suivante [41] [42] :

- **Capture de l'énergie** : Maximisation de la capture d'énergie en tenant compte des restrictions d'exploitation sûre telles que la puissance nominale et la vitesse nominale.
- **Charges mécaniques** : Protection du système éolien des charges mécaniques excessives.
- **Qualité de l'énergie** : Production de l'énergie conformément aux normes d'interconnexion.

III.9.2. Architecture du dispositif de commande

L'architecture du dispositif de commande est présentée à la Figure III-2. Elle est basée sur le modèle triphasé de la chaîne de conversion électromécanique du système éolien.

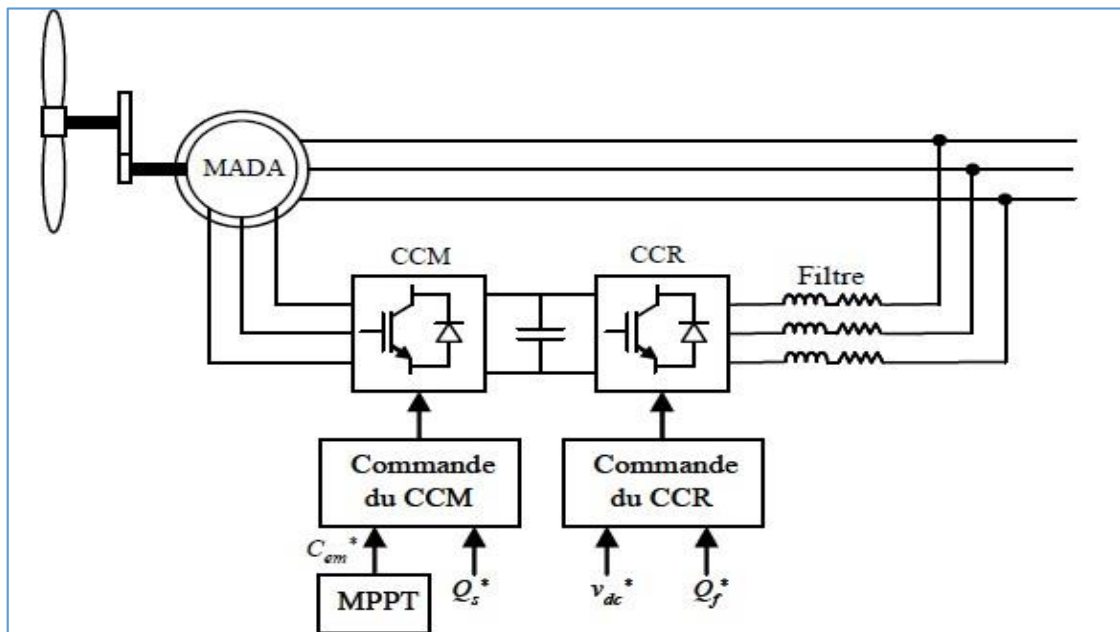


Fig. III-2 : Architecture de commande du système éolien.

D'après la Figure II-2, trois commandes détaillées par la suite sont donc nécessaires pour assurer le fonctionnement de l'éolienne :

- La commande d'extraction du maximum de puissance du vent par un contrôle dit "MPPT"
- La commande du CCM en contrôlant le couple et la puissance réactive
- La commande du CCR en contrôlant la tension du bus continu et les puissances active et réactive échangées avec le réseau.

III.10. Commande vectorielle

La commande vectorielle est une méthode qui traite la technique de contrôle des machines à courant alternatif. Son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes (I_{ds} , I_{qs}) en quadrature dans un référentiel lié au champ tournant de façon que l'une des composantes (I_{qs}) commande le couple et l'autre (I_{ds}) commande le flux, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu, à excitation séparée.

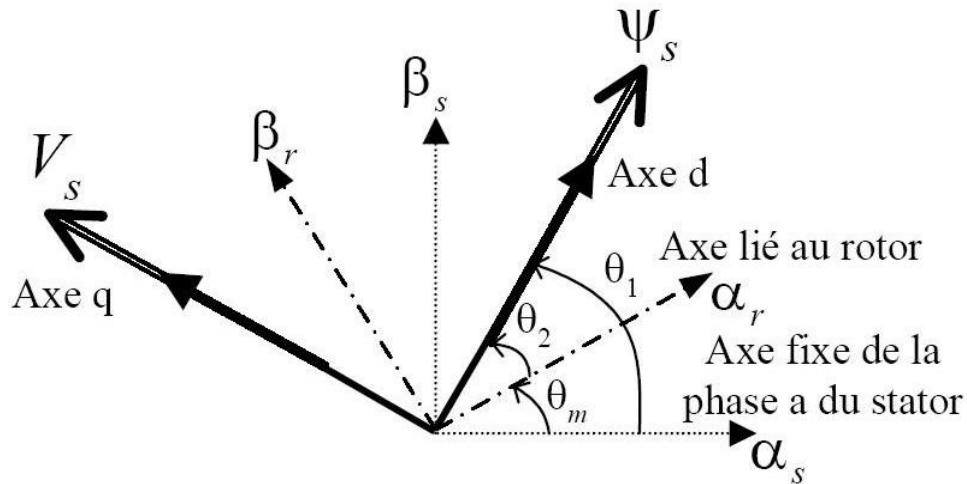


Fig. III-3 : Vecteurs courant et flux dans le système d'axe choisi.

Il y a deux méthodes de commande peuvent être utilisées :

- Commande par hystérésis.
- Commande par MLI. [43]

Nous avons choisi la commande par MLI car la MADA commande de fortes puissances et a besoin d'une fréquence fixe pour les commutations.

III.11. Commande de Convertisseur

La chaîne de conversion éolienne est constituée de deux convertisseurs statiques à deux niveaux couplés sur un bus continu commun. Le convertisseur étudié est constitué de trois cellules de commutation. Chacune d'elles est composée de deux transistors IGBT qui sont connectés à deux diodes en antiparallèle permettant la bidirectionnalité de courant.

Les semi-conducteurs seront considérés comme idéaux (pas de pertes par commutations), ceci conduit à considérer le convertisseur équivalent à interrupteurs idéaux pour la suite de l'étude. L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence.

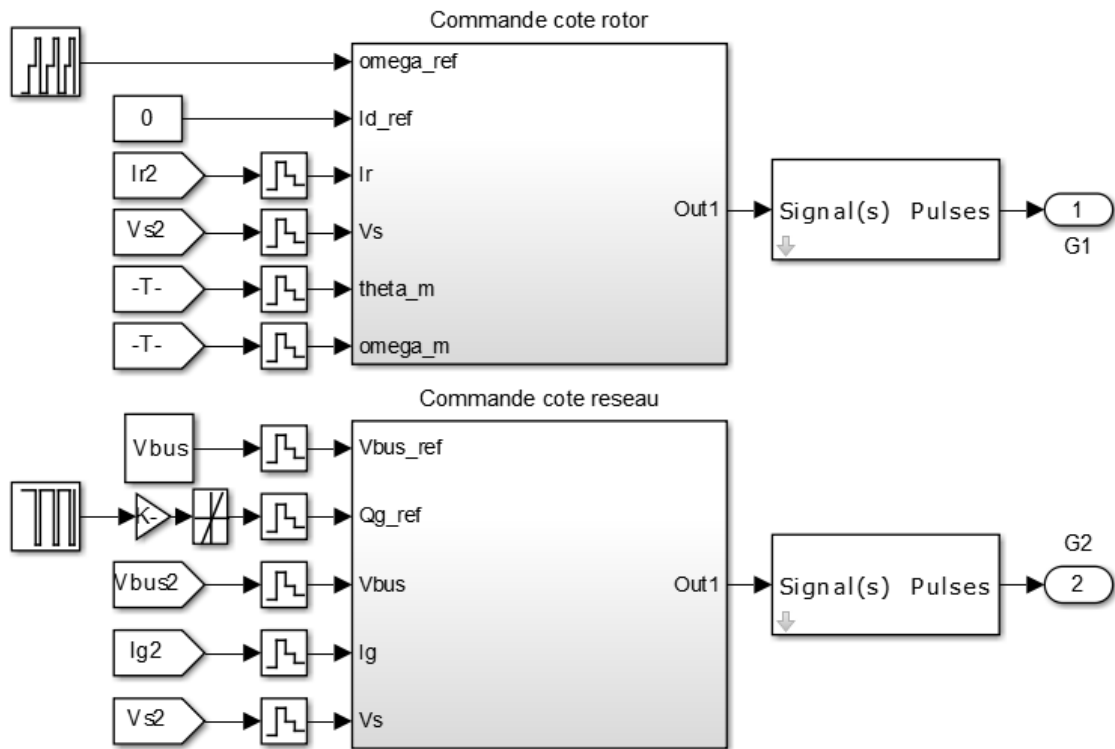


Fig. III-4 : Structure de commande des convertisseur.

III.11.1. Suivi de la puissance maximale du générateur éolienne

La poursuite du point de puissance maximale (MPPT) est une partie très essentielle dans les systèmes ENR, et très nécessaire pour extraire le maximum de puissance du générateur éolienne. Il existe de nombreuses techniques afin d'atteindre le point de puissance maximale et cela dans différentes conditions météorologiques. Le générateur éolien est un générateur de puissance finie pouvant fonctionner selon toute combinaison de courant et de tension, la meilleure combinaison s'appelle le point de puissance maximale qui donne une puissance maximale pour un vitesse de vent donnée. La technique de contrôle utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment. Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés afin de déterminer le point de puissance maximum.

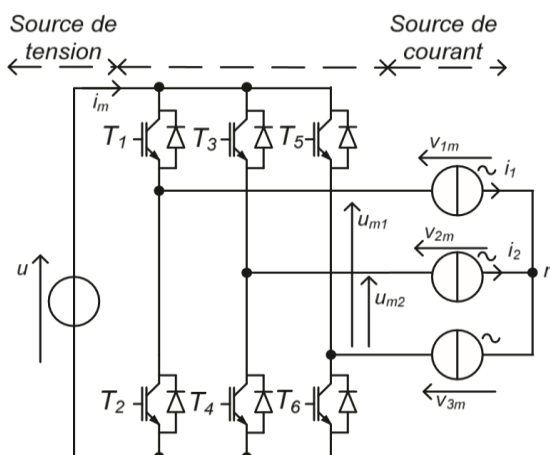


Fig. III-5 : Schéma électrique d'un convertisseur.

Afin de réduire les harmoniques de courant générés par le système, l'onduleur peut avoir une loi de commande **MLI** (Modulation de la Largeur d'Impulsion). Cette technique de commande permet un temps de réponse élevé. Toutefois cette technique de commutation à fréquence élevée n'est pas envisageable vu les niveaux de puissances échangés et compte tenu des limitations technologiques des interrupteurs de puissance. De ce fait, pour réduire la pollution harmonique d'autres solutions sont proposées avec des interrupteurs travaillant en pleine onde, mais en procédant à des associations en parallèle et/ou en série d'onduleurs de base ou encore en utilisant des structures multi-niveaux.

III.12. Résultats de simulation

Nous constatons que la vitesse de rotation suit parfaitement sa référence avec une dynamique souhaitable et elle est égale à la vitesse réelle avec la disparition des chatterings, le temps de repense est rapide avec un petit dépassement comme l'indique les figures III.2 :

a) Résultats pour la commande avec régulateur PI :

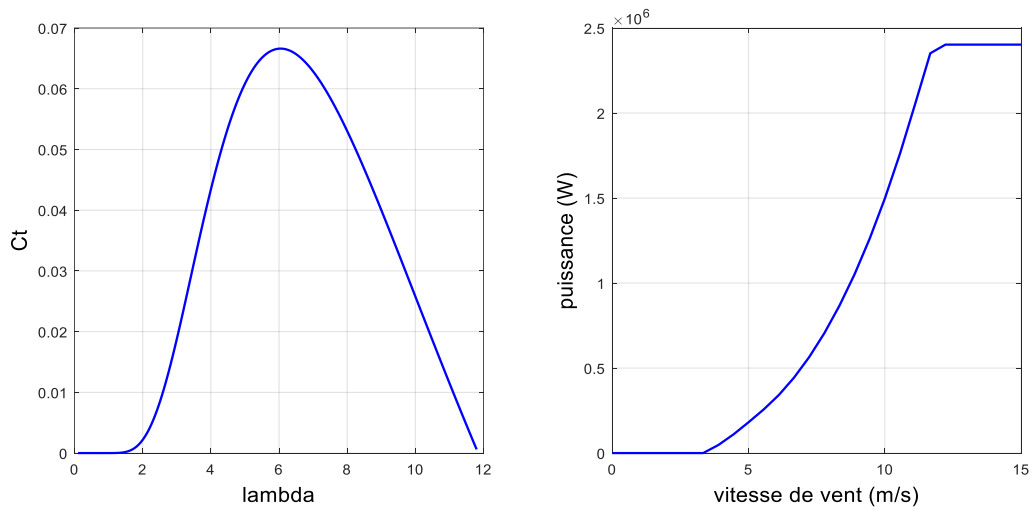


Fig. III-1 : Caractéristiques de l'éolienne par rapport à ces coefficients.

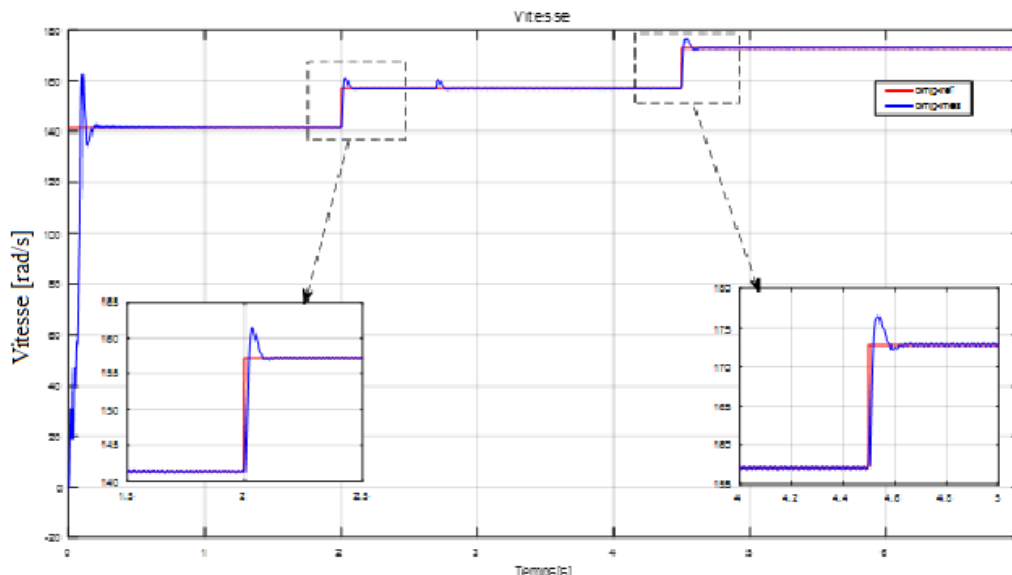


Fig. III-2 : Vitesse de rotation de la MADA et son référence.

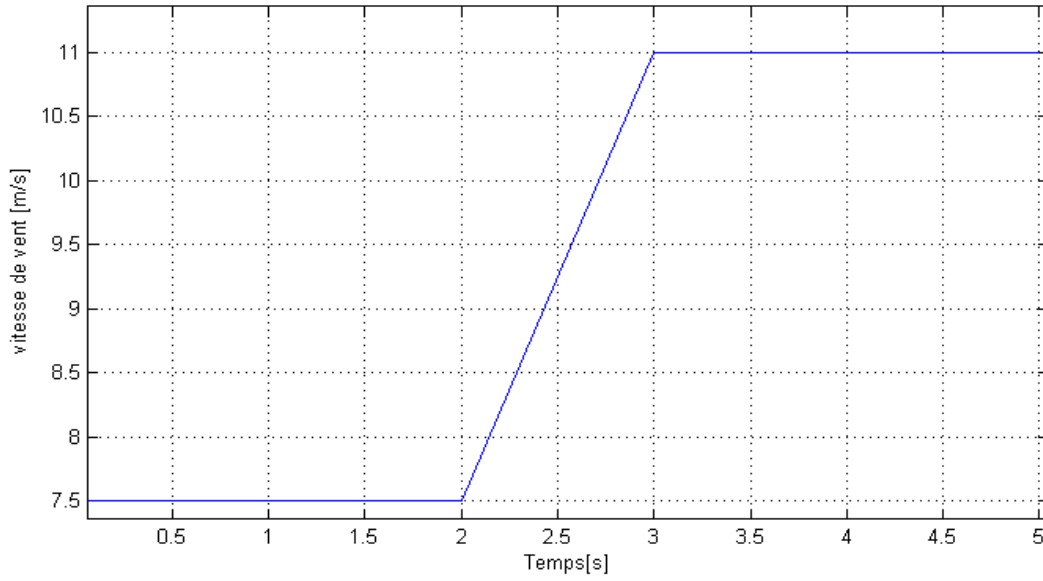


Fig. III-3 : Vitesse de vent lae.

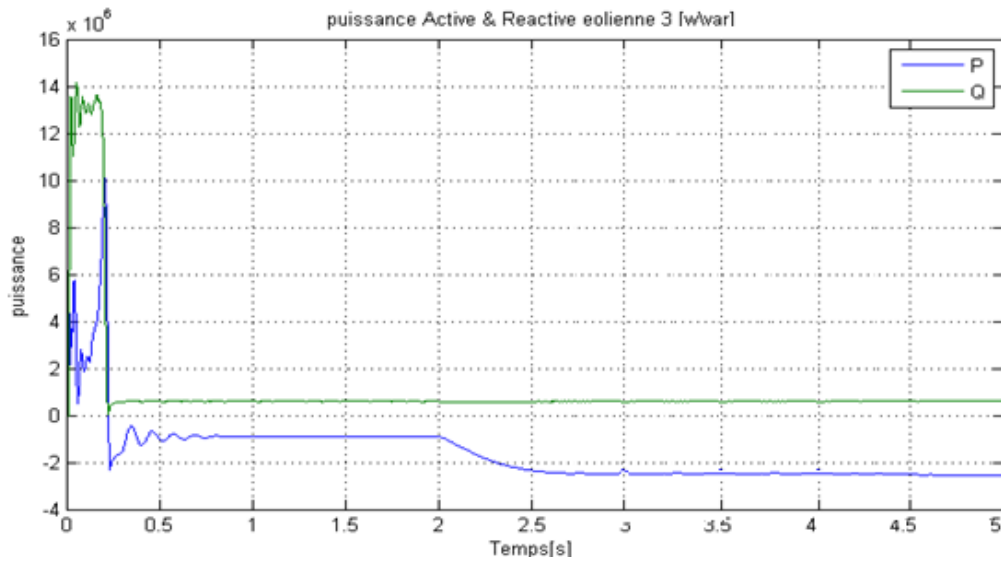


Fig. III-4 : Puissances active et réactive de la MADA.

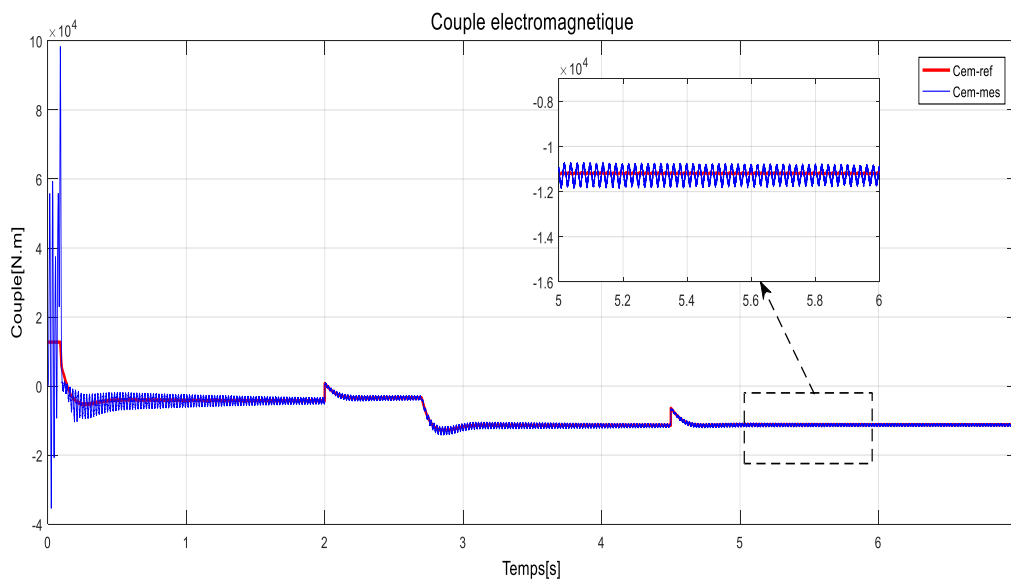


Fig. III-5 : Couple électromagnétique et la référence.

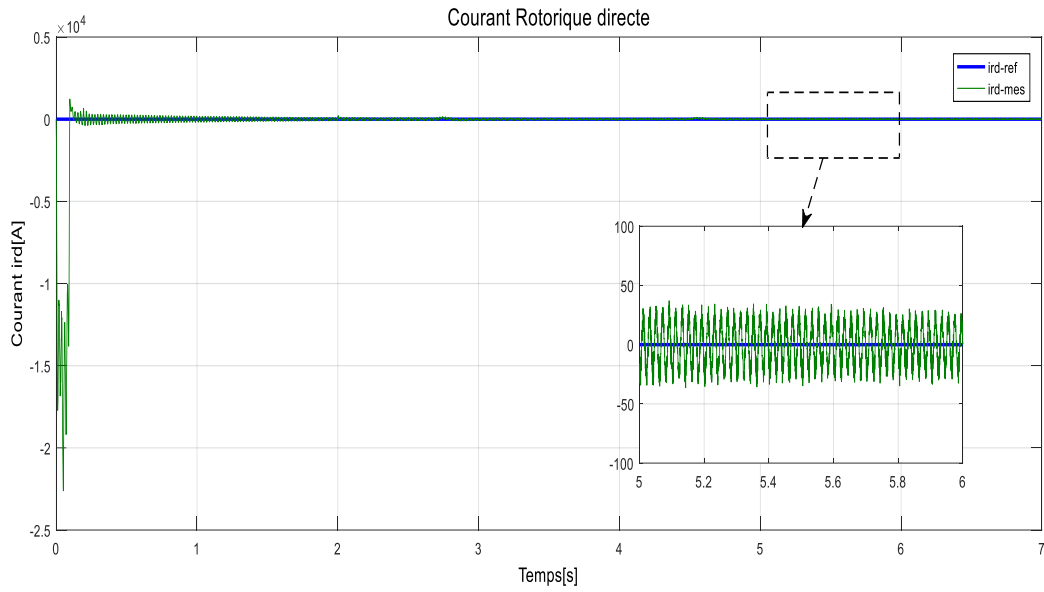


Fig. III-6 : Courant rotorique direct référentielle et mesuré.

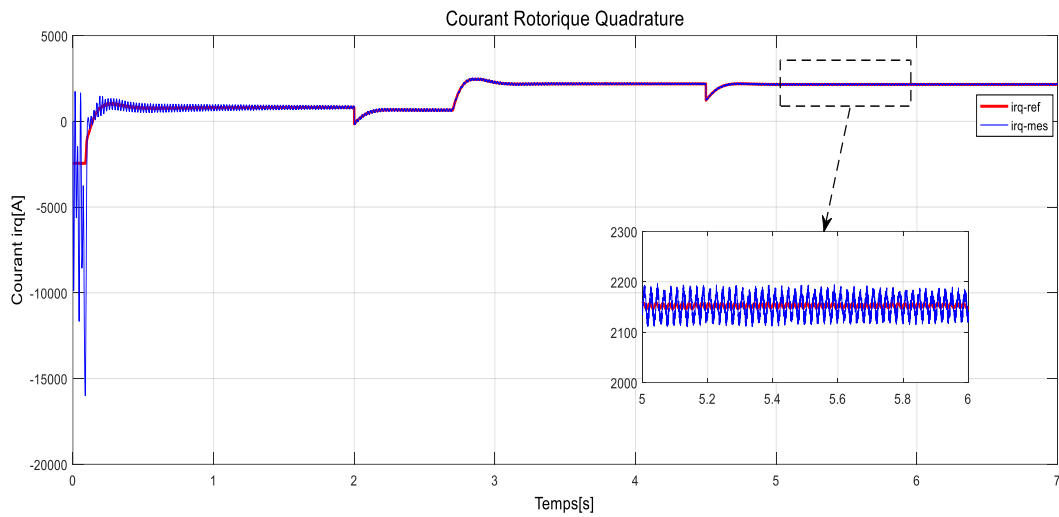


Fig. III-7 : Courant rotorique quadrature référentielle et mesuré.

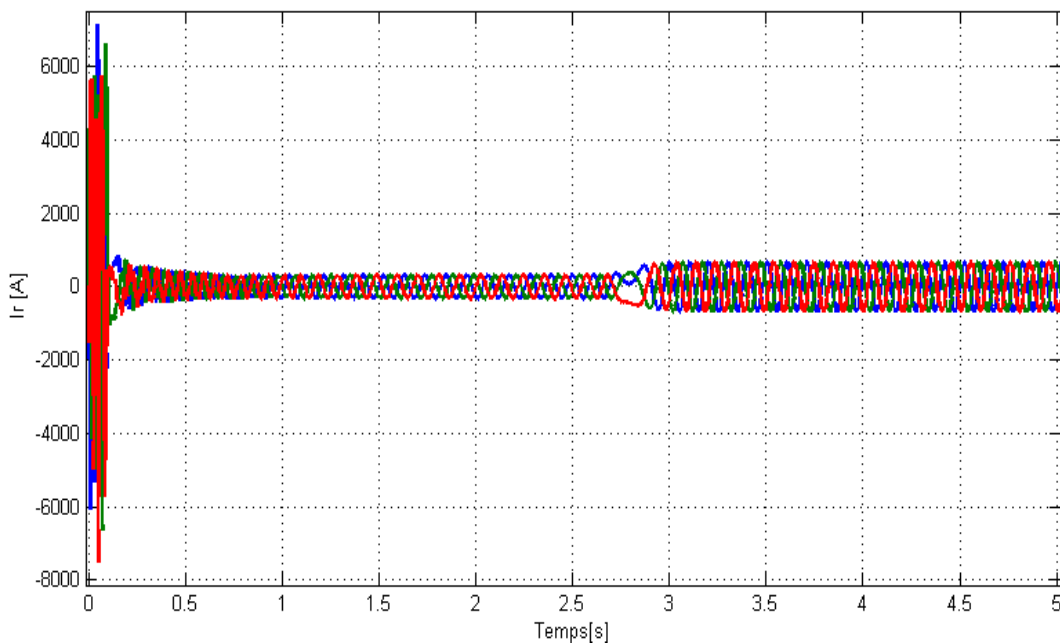


Fig. III-8 : Courant rotorique triphasé coté rotor.

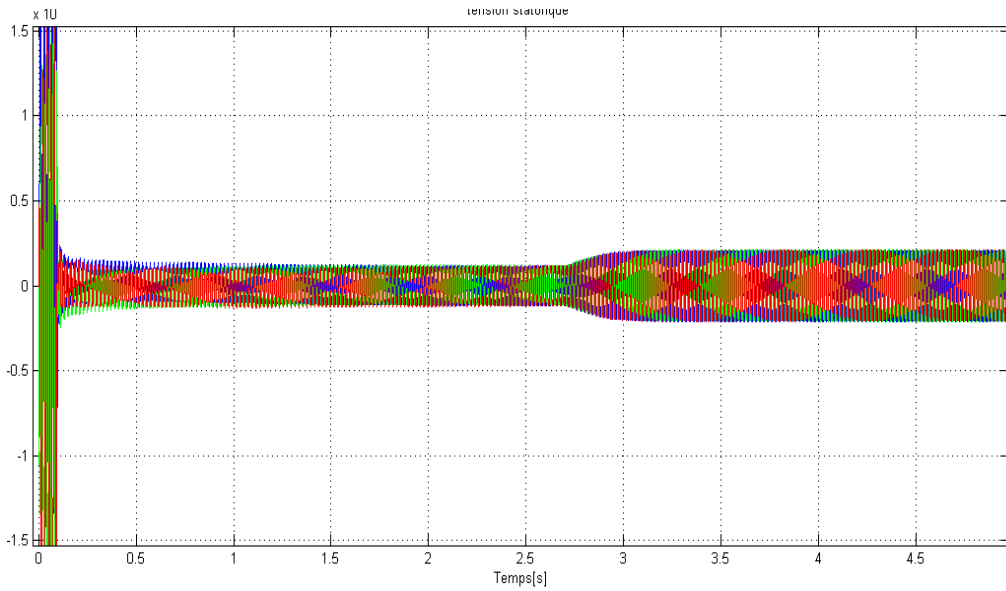


Fig. III-9 : Courants triphasé de réseau au point PCC.

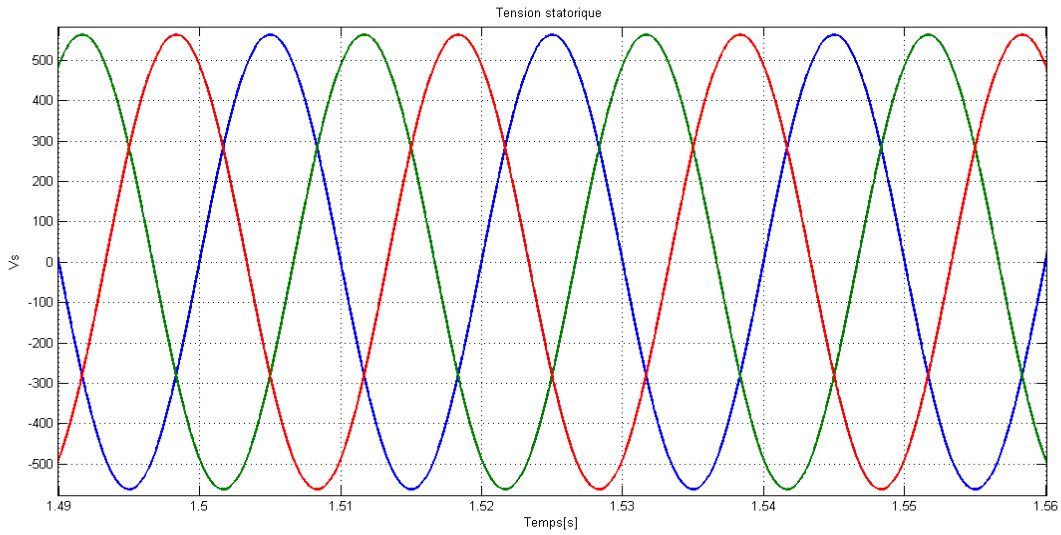


Fig. III-10 : Tensions triphasé de réseau au point PCC.

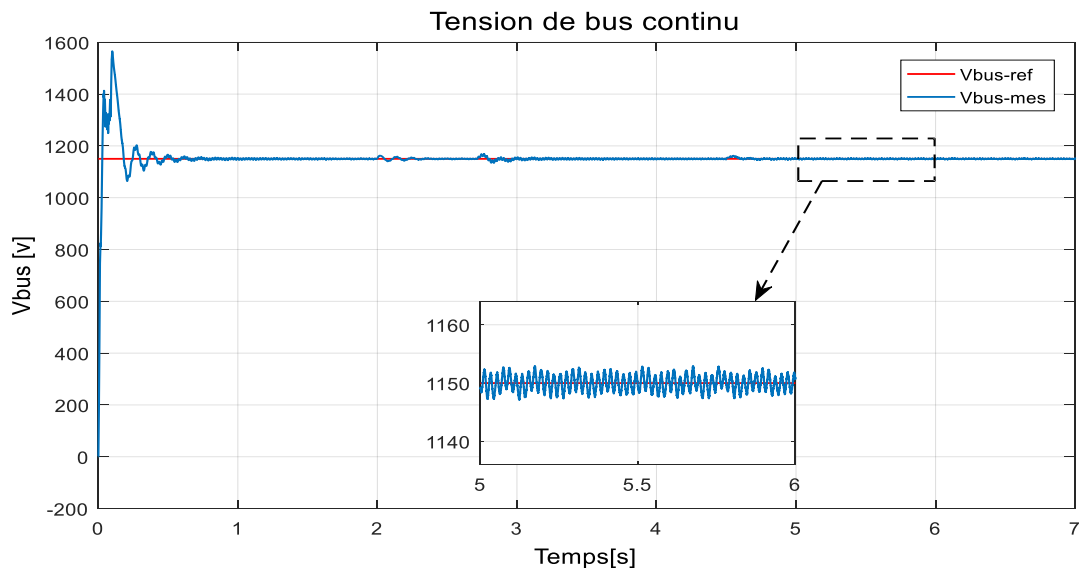


Fig. III-11 : Tension de bus continu V_{bus} .

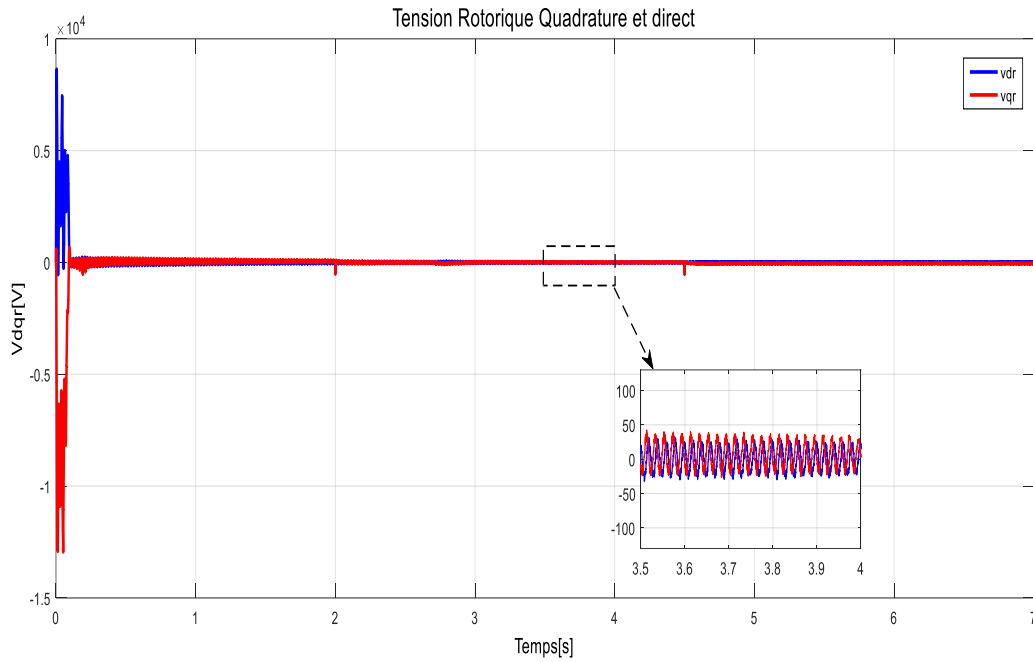


Fig. III-12 : Tension rotorique quadrature et direct.

a) Résultats de simulation par la commande MPPT :

Les résultats de simulation montrent que la vitesse et le courant observé convergent rapidement vers les mesures réelles correspondantes. La validité de cette commande avec l'association de la méthode MPPT a été montrée par les résultats de simulation. Les tests de précision vis-à-vis des variations de la vitesse de vent dans ce travail pour confirmer la robustesse.

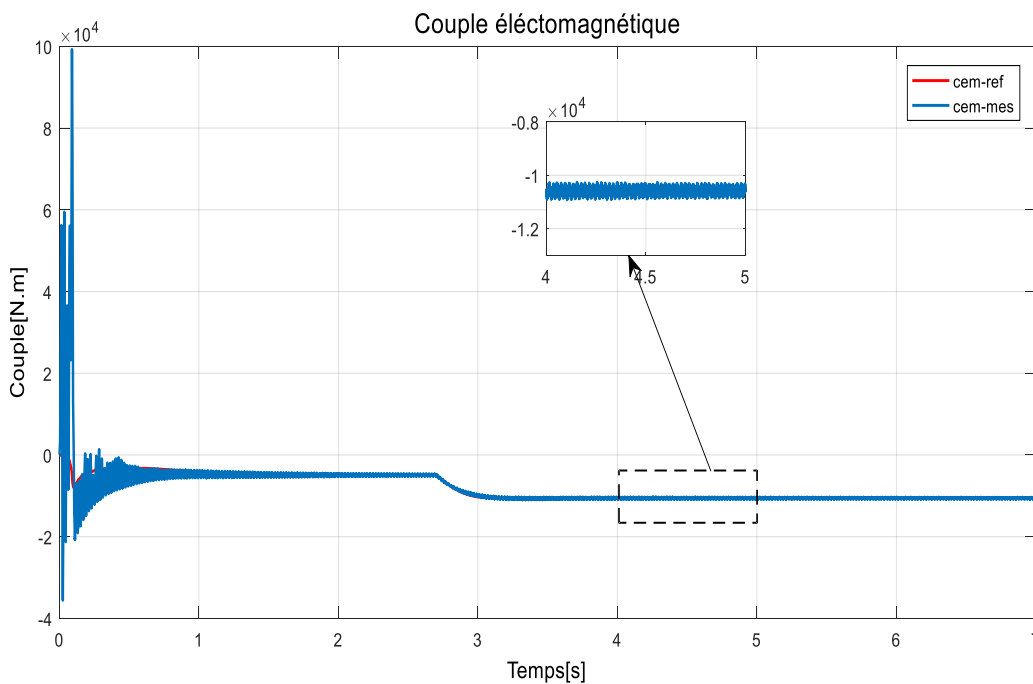


Fig. III-13 : Couple electromagnetique et leur reference.

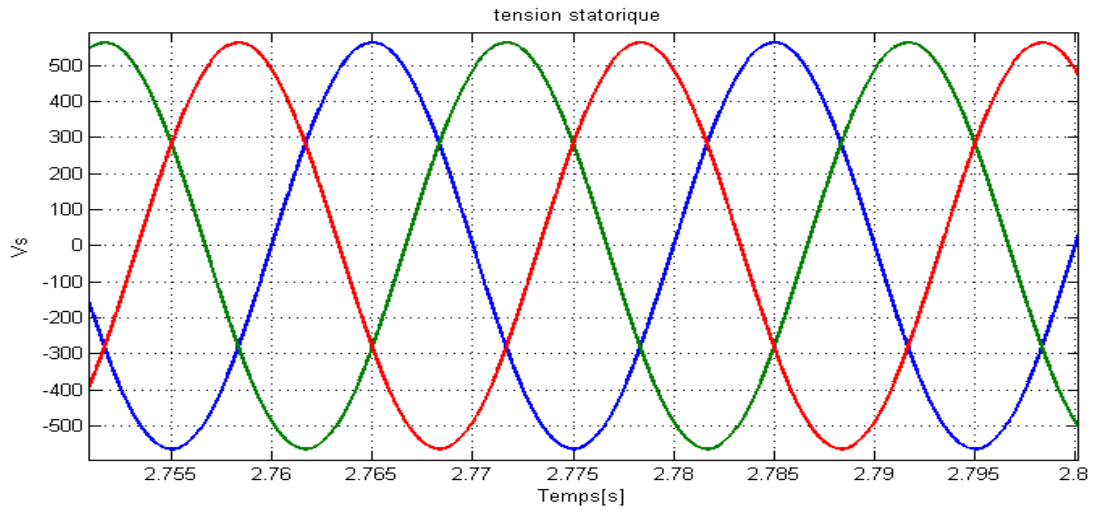


Fig. III-14 : Tensions statorique triphasé de réseau au point PCC.

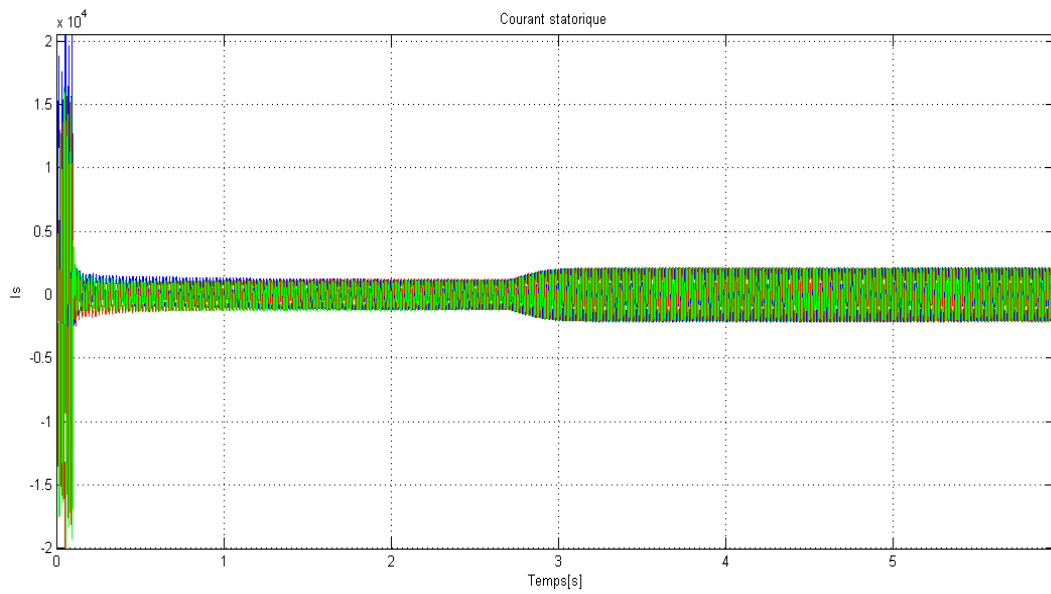


Fig. III-15 : Courants statorique triphasé de réseau au point PCC.

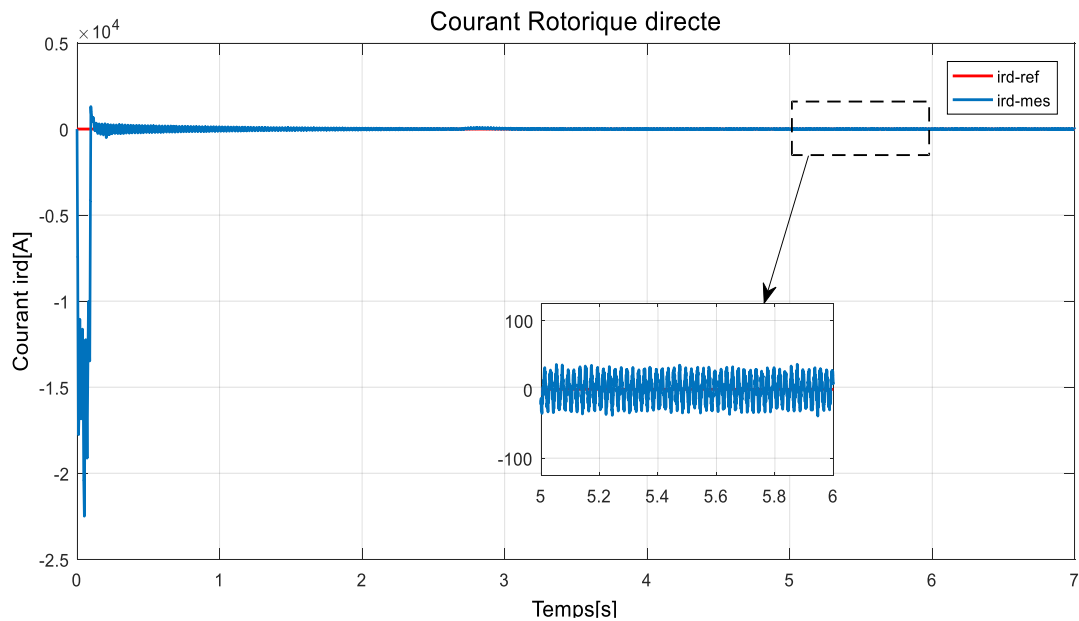


Fig. III-16 : Courant rotorique directe référentielle et mesuré.

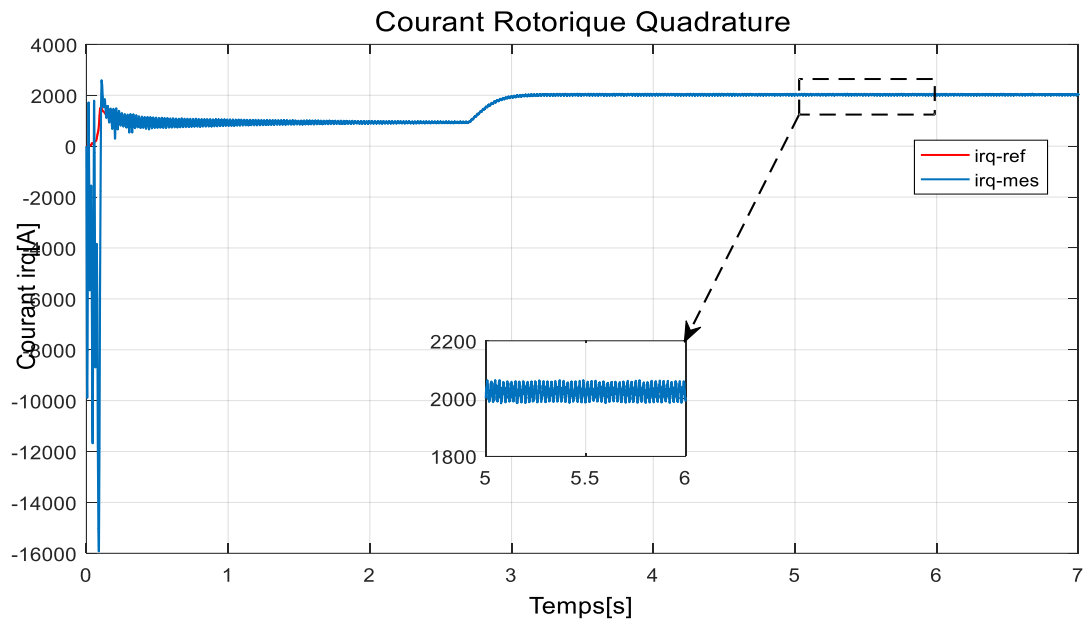


Fig. III-17 : Courant rotorique quadrature référentielle et mesuré.

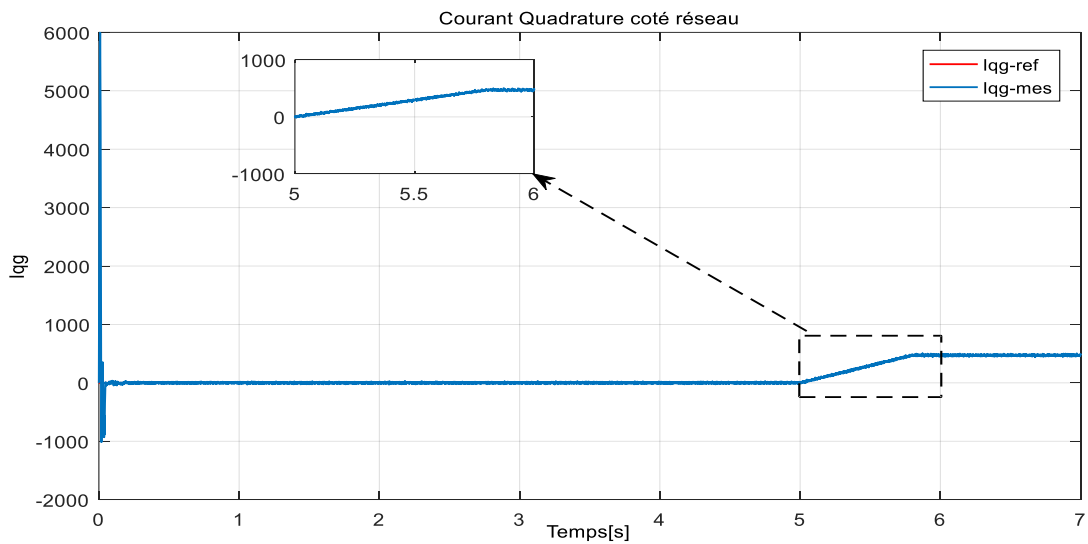


Fig. III-18 : Courant quadrature coté réseau mesuré et référentielle.

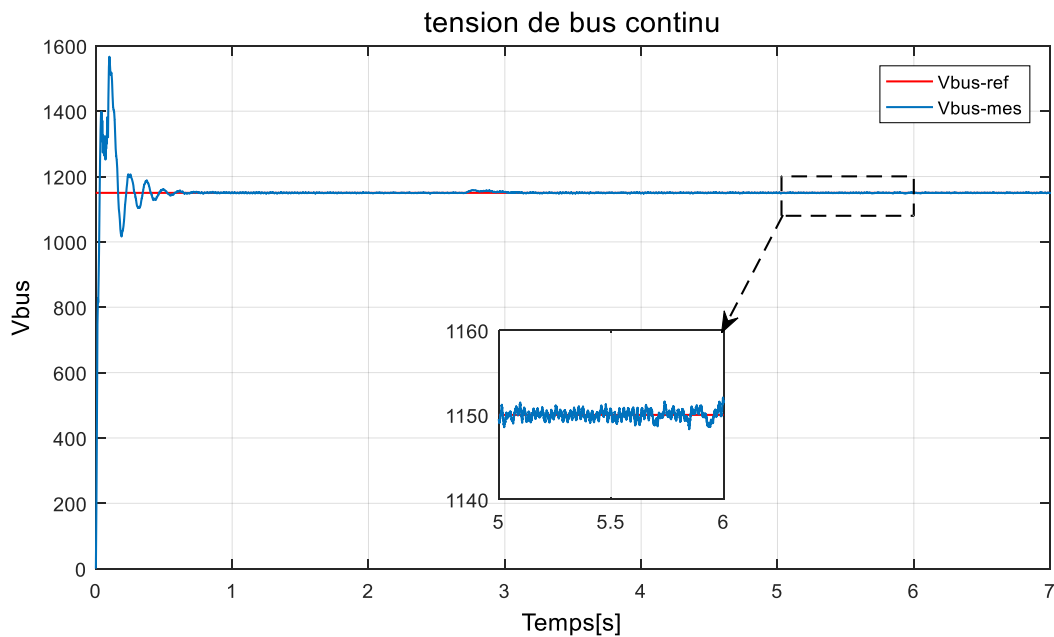


Fig. III-19 : Tension de bus continu Vbus.

III.13. Interprétations des résultats de simulation

Les résultats de simulation pour montrent qu'un contrôle en boucle fermée de la vitesse est obtenu en régime transitoire et en régime permanent. Les résultats obtenus montrent en un temps record (temps de réponse souhaitable) les meilleures performances et dynamiques, meilleures poursuites de la consigne contrôlée. La puissance obtenue en régime transitoire est donc plus importante. Le coefficient de puissance et le rapport de vitesse sont ajustés à leurs valeurs optimales. On remarque pour la commande par MPPT que la régulation est mieux par rapport à la commande par PI sauf la vitesse les régulateurs PI nous une bonne précision et bon suivi de référence.

III.14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la turbine et le développement d'un modèle mathématique décrivant le fonctionnement de la génératrice asynchrone à double alimentation par des équations à l'aide de la transformation de Park. Nous avons présenté aussi la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation utilisée en génératrice.

Pour réaliser cette commande, nous avons suggérés des boucles de régulation, une boucle régule les puissances active et réactive et une autre boucle pour la régulation des courants par des régulateurs de type PI. Le choix sur l'orientation du flux a été le plus judicieux en orientant le flux statorique selon l'axe d , par conséquent la puissance active sera dépendant uniquement du courant I_{qr} . Les résultats obtenus par simulation s'avèrent satisfaisants, vu que les paramètres internes et externes ne varient pas.

Chapitre IV :
Intégration d'une ferme éolienne
Dans un réseau

IV.1. Introduction

Depuis ces dernières années, la connexion des fermes éoliennes de moyenne et grande puissance au réseau électrique a entraîné de nombreux problèmes pour la gestion du réseau électrique en raison de la nature variable de la ressource éolienne. Depuis quelques années, les éoliennes sont contrôlées par la stratégie MPPT pour extraire le maximum de puissance générée au réseau électrique. Cependant, ces éoliennes se déconnectent de celui-ci lorsqu'un défaut y survient puisqu'elles n'ont aucune capacité à régler leur production et de fournir des services pour le système électrique.

Afin de surmonter ces problèmes et d'assurer la sécurité du réseau électrique, de nombreux pays européens ont récemment revu leurs réglementations « réseau ». De ce fait, les fermes éoliennes sont appelées de plus en plus à se conformer aux exigences imposées par le gestionnaire du réseau. Plusieurs techniques de supervision et de commande des fermes éoliennes sont actuellement investiguées à savoir : le contrôle des puissances active et réactive, le contrôle de la tension, le contrôle de la fréquence. Dans l'objectif de permettre à une ferme éolienne de se connecter au réseau électrique sans affecter sa sécurité et sa stabilité, les chercheurs tentent d'orienter leurs travaux vers la conception d'une supervision centralisée pour cette ferme.

IV.2. Intégration des énergies renouvelables

Les gestionnaires de centrales s'efforcent déjà de maximiser le rendement en énergie issu de la conversion de leurs combustibles primaires en électricité. À cette fin, ils renouvellent et optimisent leurs installations. Pour répondre à ces besoins, les centrales doivent donc intégrer des fonctionnalités plus abouties de mise en réseau et d'optimisation de la production, donc transformer leur réseau classique vers un réseau renouvelable.

Ceci nécessite, d'une part, la mise en œuvre de systèmes d'électronique de puissance associés au réseau pour compenser les défauts induits au niveau de la qualité de l'onde électrique en cas de défaut, d'autre part, d'optimiser les capacités des infrastructures de production tel que l'énergie renouvelable. On va continuer ce chapitre avec l'intégration des ENR tel que l'éolienne dans notre réseau afin d'augmenter et d'améliorer le transit de puissance.

IV.1.1. Modélisation de la ferme éolienne

Le modèle choisi pour cette étude est illustré par la figure IV-1 a été réalisé dans la bibliothèque Sim Power de Matlab, Nous avons fait une combinaison entre ce modèle et le modèle « power_wind_dfig_det » pour construire une ferme éolienne de 6 MW (3*2 MW) de type MADA modélisé en temps discret pour qu'on puisse l'intégrer avec notre réseau triphasé de 400V 50 HZ.

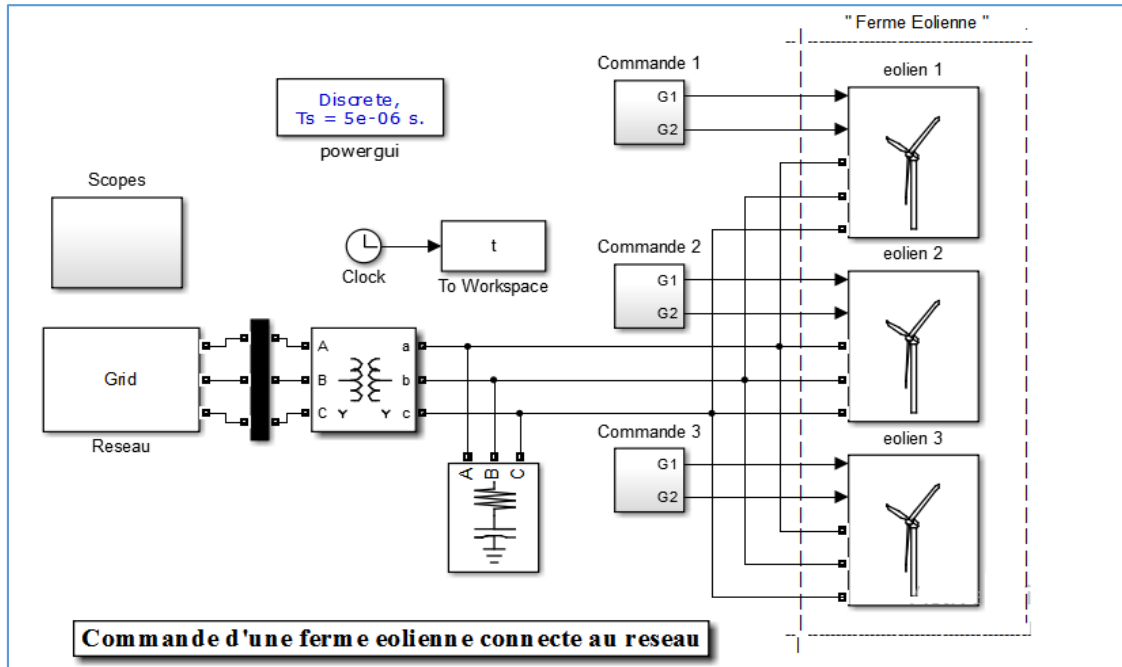


Fig. IV-1 : Modèle de la ferme éolienne connecté au réseau modélisé par Simulink.

IV.1.2. Les paramètres de l'éolienne

Pour évaluer et tester la technique de contrôle indirecte des puissances active et réactive par des régulateurs PI, une étude de simulation a été effectuée sous l'environnement MATLAB. Dans cette section, on est amené à représenter toutes les figures de simulation qui nous permettent d'évaluer les performances apportées par le système de réglage considéré pour un fonctionnement à vitesse variable, vu que les figures représentées dans la section précédente est insuffisante pour évaluer ce type de contrôle.

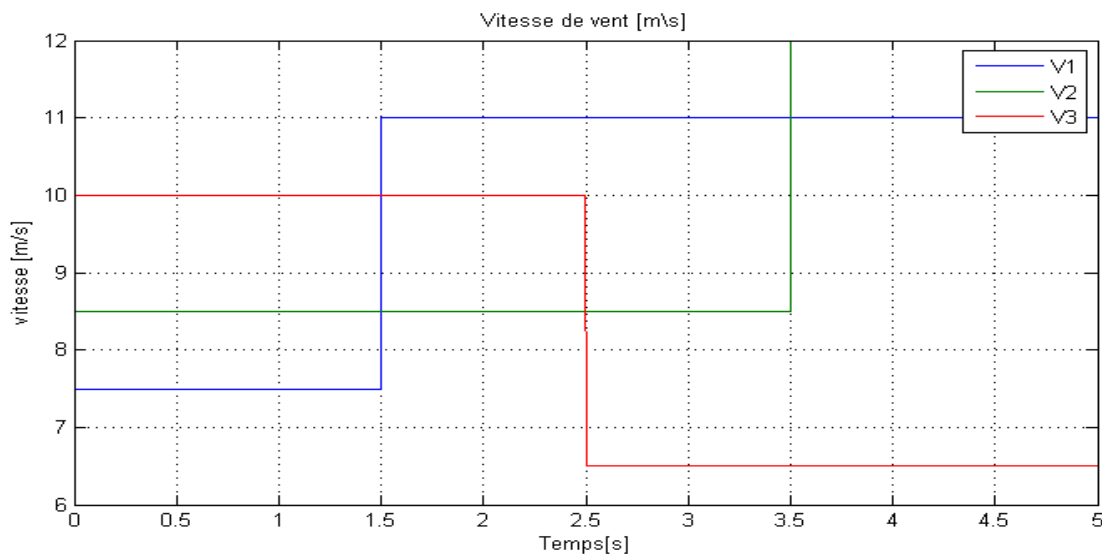


Fig. IV-2 : Les trois consignes de référence pour la vitesse du vent de la ferme éolienne.

IV.3. Schéma synoptique

Le schéma synoptique du contrôle indirect des puissances active et réactive avec boucle de puissance a été déduit grâce à une légère modification de la boucle de contrôle. Dans ce cas, les erreurs entre les courants rotoriques de références et ceux mesurés sont traitées par l'algorithme de commande considéré, afin de concevoir les tensions de références du rotor. Le contrôle de la MADA à travers le convertisseur connecté à son rotor doit assurer le couple nécessaire permettant de faire varier la vitesse mécanique du générateur afin d'extraire le maximum de puissance, en imposant des tensions rotoriques adéquates à la MADA. La référence de la puissance réactive étant généralement nulle pour la stratégie de commande MPPT.

IV.4. Réglage indirect des puissances active et réactive

Cette technique consiste à synthétiser l'algorithme de contrôle à partir de l'inversement de la fonction de transfert du système à réguler [28] afin d'élaborer les tensions rotoriques de référence en fonction des puissances active et réactive au niveau du stator. On cherche donc à établir les expressions des puissances active et réactive d'une part et des tensions rotoriques d'autre part en fonction des courants rotoriques tout en tenant compte le modèle mathématique de la MADA.

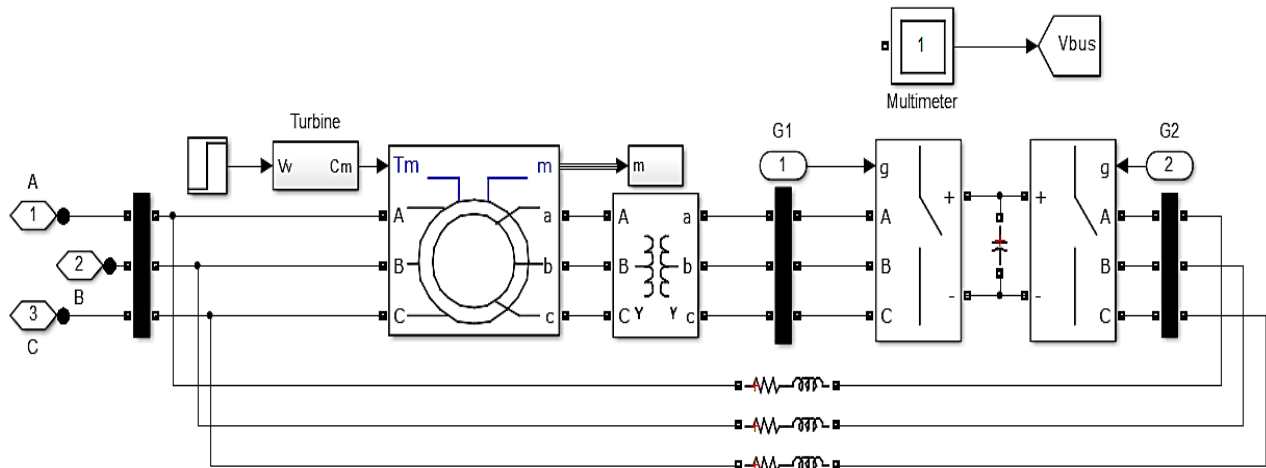


Fig. IV-3 : Modèle d'une éolienne avec Simulink.

IV.5. Résultats de simulation

Les résultats des simulations, d'une ferme éolienne connectée au réseau, pour la vitesse du vent illustré au figure IV-5.

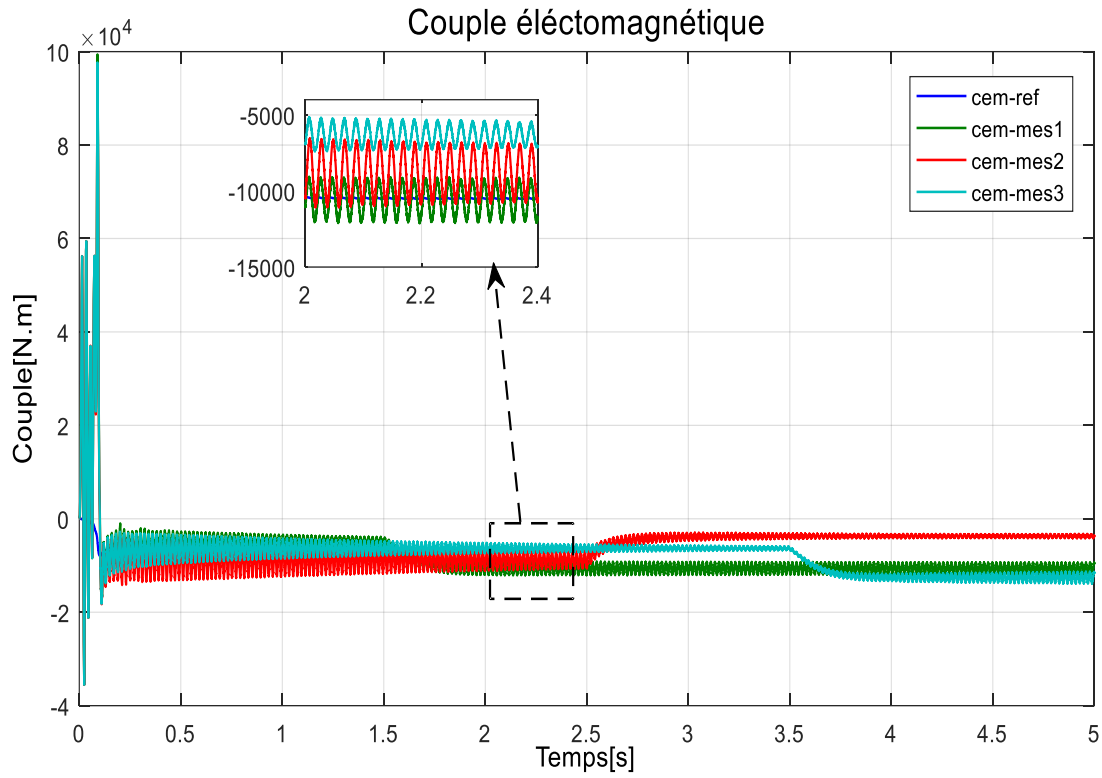


Fig. IV-4 : Couple électromagnétique au niveau de point de couplage.

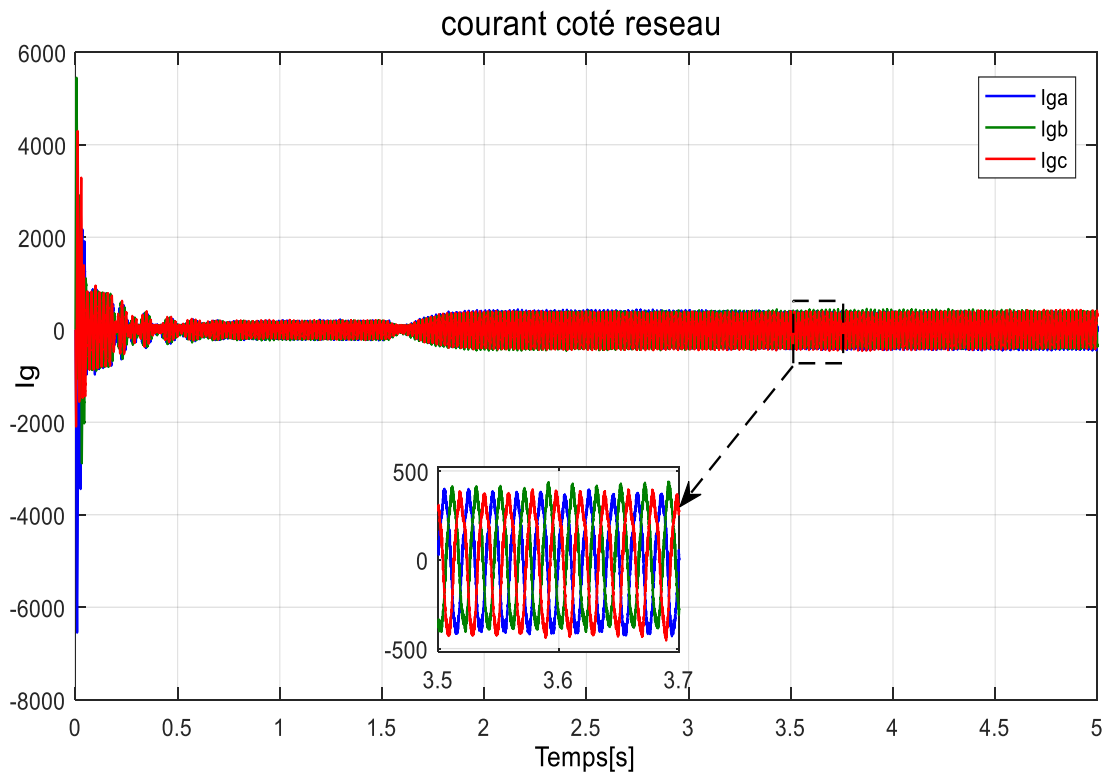


Fig. IV-5 : Courants triphasé coté réseau pour l'éolienne 1.

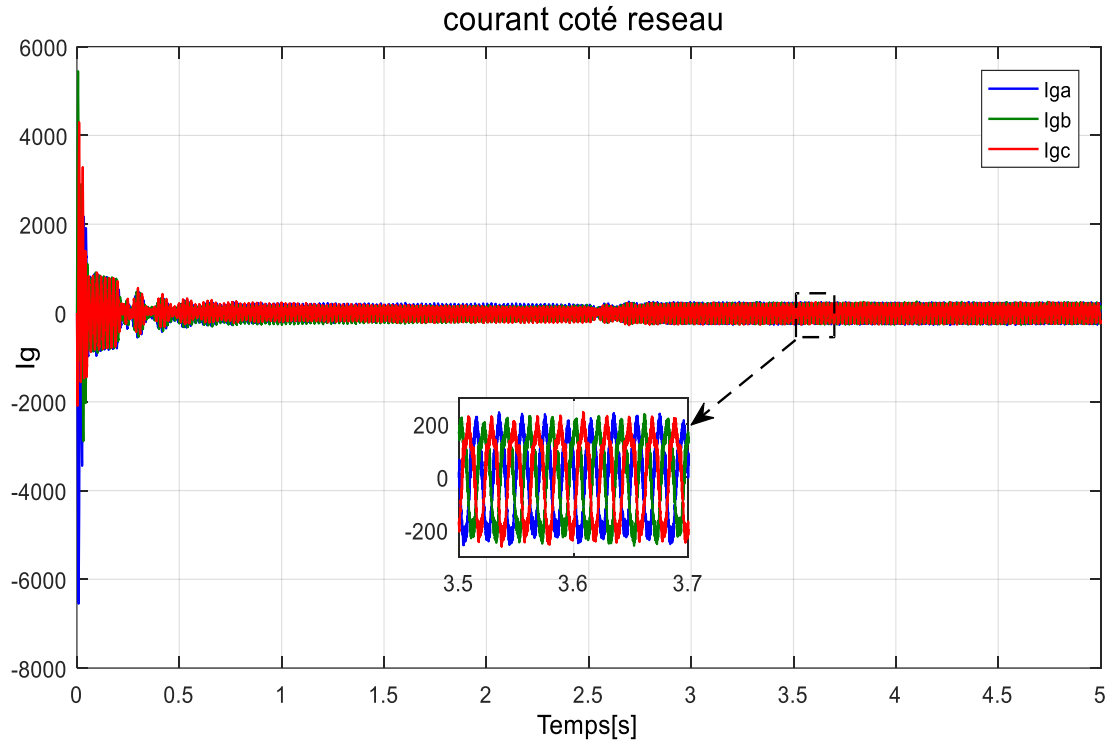


Fig. IV-6 : Courants triphasé coté réseau pour l'éolienne 2.

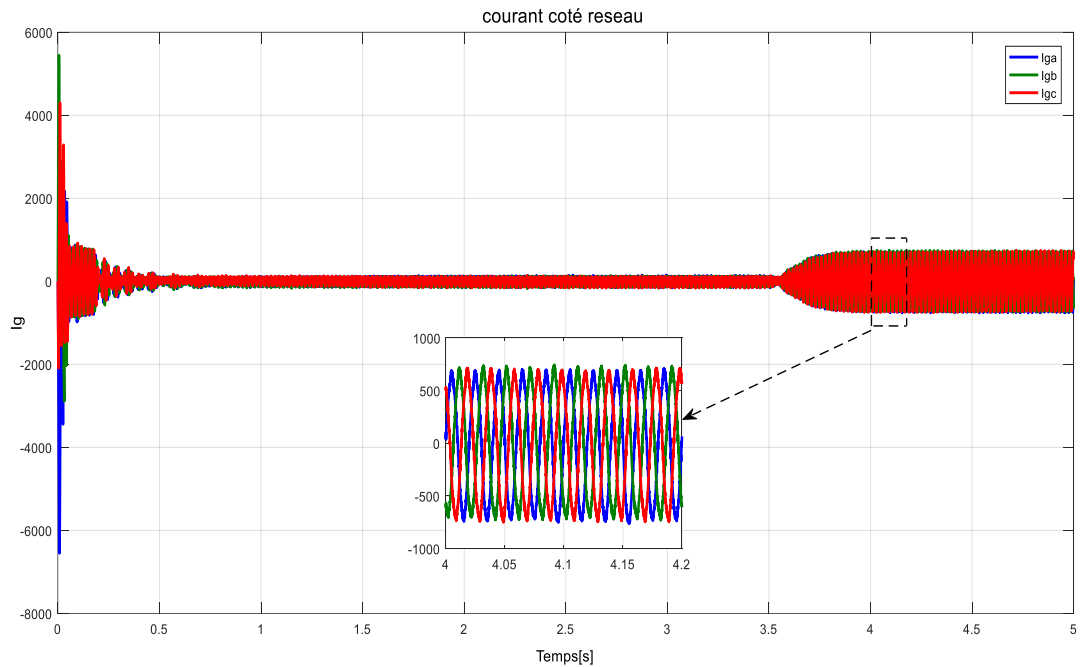


Fig. IV-7 : Courants triphasé coté réseau pour l'éolienne 3.

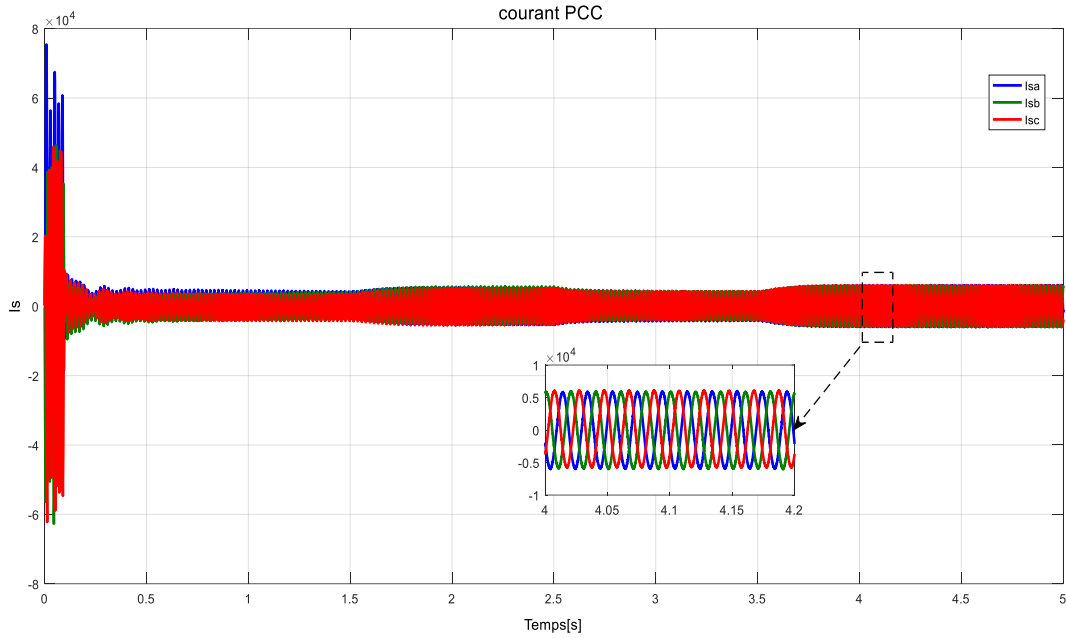


Fig. IV-8 : Courants au niveau de point de couplage commun PCC.

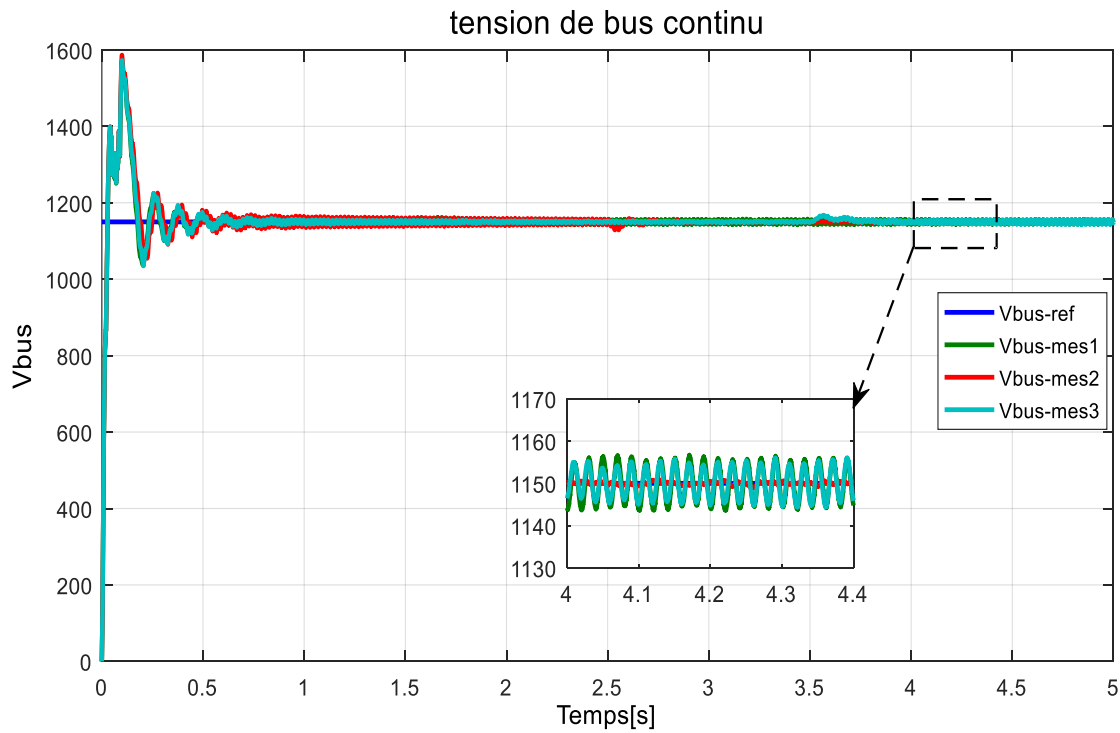


Fig. IV-9 : Tension DC de bus continu et leur référence pour tout la ferme.

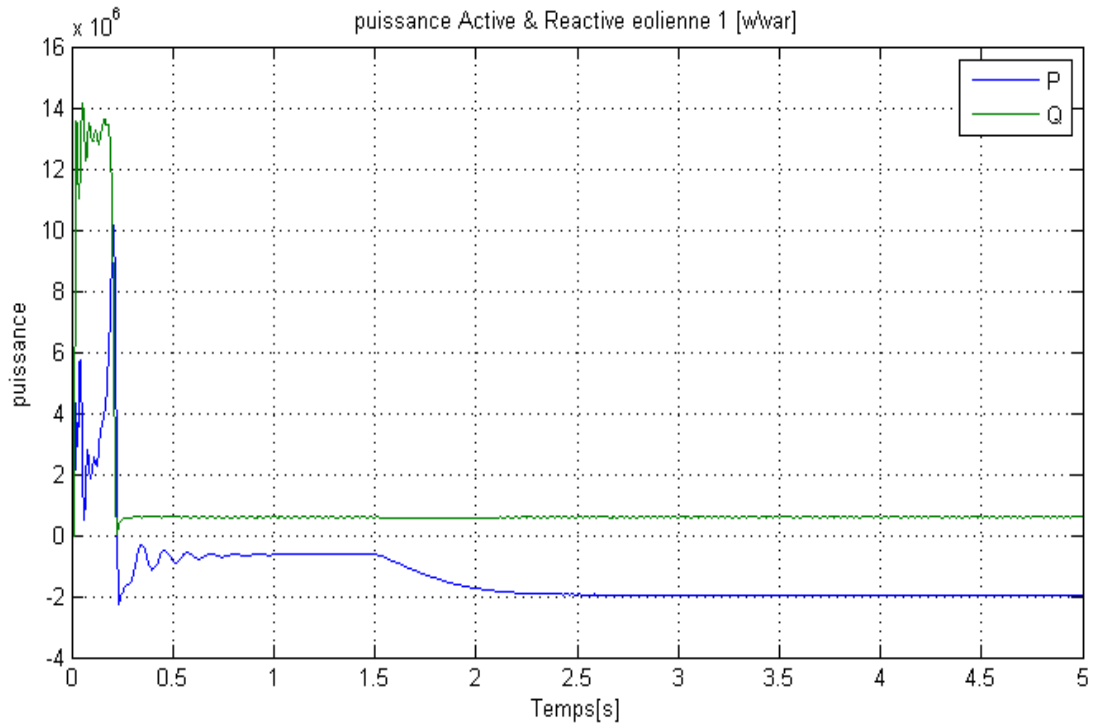


Fig. IV-10 : Les puissances active et réactive injecté dans le réseau pour l'éolienne 1.

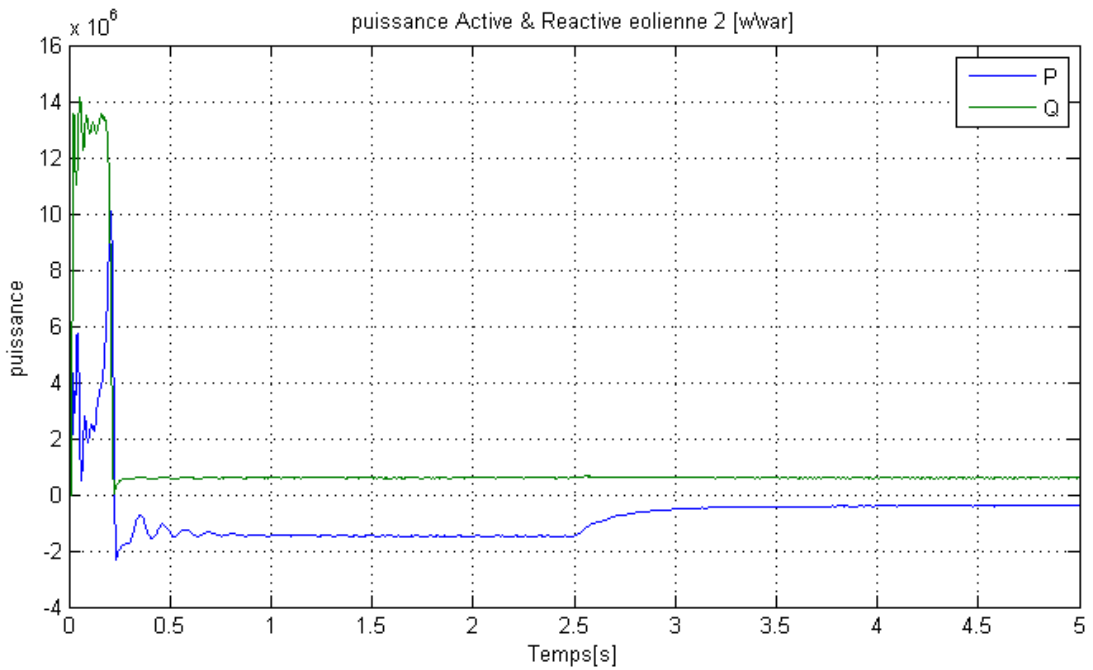


Fig. IV-11 : Les puissances active et réactive injecté dans le réseau pour l'éolienne 2.

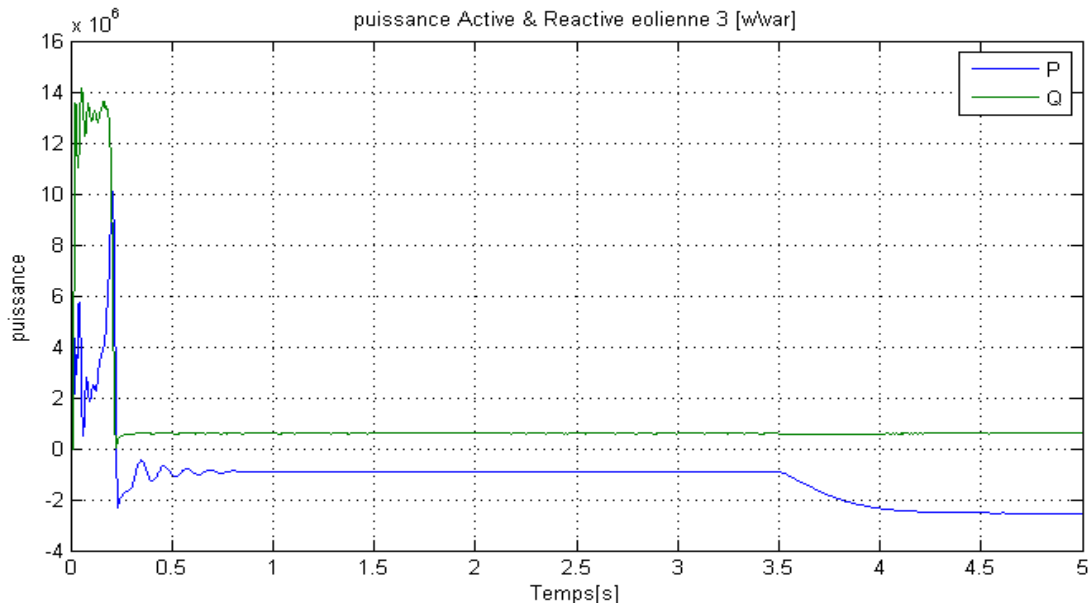


Fig. IV-12 : Les puissances active et réactive injecté dans le réseau pour l'éolienne 3.

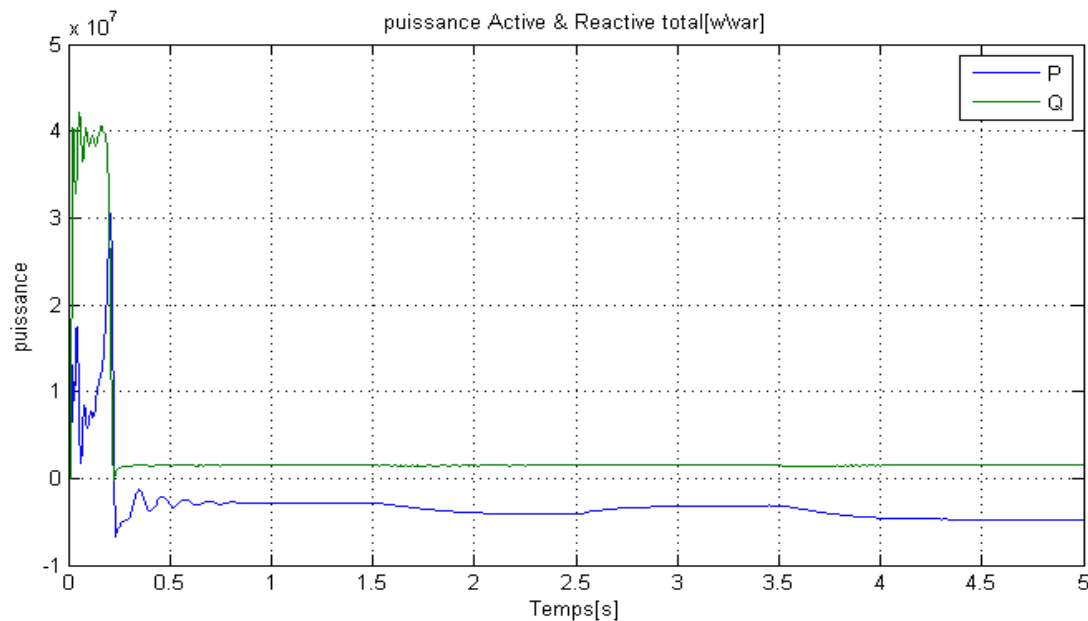


Fig. IV-13 : Puissances active et réactive total de la ferme éolienne.

IV.6. Interprétations des résultats de simulation

Les résultats de simulation montrent que la variation de vitesse de vent affecter sur les puissances actives et indirectement sur les puissances réactives et présente une charge sur la MADA qui influer sur le couple électromagnétique et la vitesse de rotation. Les résultats obtenus montrent en un temps de réponse rapide et un amortissement des oscillations, les meilleures performances et dynamiques, meilleures poursuites de la consigne contrôlée. La puissance obtenue en régime transitoire est donc plus importante.

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'intégration de la ferme éolienne dans le réseau et les résultats de simulation selon la commande. Pour réaliser cette commande, nous avons suggérés des boucles de régulation, une boucle régule la vitesse et une autre boucle pour la régulation des courants par des régulateurs de type PI. Les résultats obtenus par simulation s'avèrent satisfaisants, vu que la stabilité lors l'application d'une référence pour la vitesse et la tension. Lors de la variation de ces entrées.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les problématiques abordées dans ce mémoire nous ont permis d'étudier la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée dans les systèmes éoliens, Nous avons développé la modélisation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) en tenant compte des hypothèses simplificatrices. Nous avons pu établir un modèle mathématique simplifié de la MADA en vue d'une alimentation par convertisseurs statiques en utilisant la transformation de Park.

Dans un premier lieu, nous avons testé la régulation utilisant un régulateur P.I. analogique pour la boucle de courant et de tension calculée au moyen de l'optimum symétrique combiné avec un régulateur P.I.

L'étude des machines électriques en général et la MADA en particulier exige une bonne modélisation mathématique décrivant l'ensemble de la machine. Cela permet de prévoir les performances dynamiques et statiques satisfaisantes. La technique de la commande vectorielle appliquée à la MADA peut maîtriser la difficulté de son réglage. Elle permet d'assurer le découplage entre le flux et le couple électromagnétique et d'améliorer la dynamique de la puissance active et réactive de la MADA. L'association de la commande vectorielle à un régulateur de vitesse de type PI classique permet d'obtenir une bonne performance, et nous avons essayé la commande par la méthode MPPT qui nous donné des bons résultats. L'idée consiste à implémenter un système de contrôle découplé de la MADA pour assurer une meilleure qualité d'énergie et rendre le système insensible aux perturbations. Après la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne avec exploitation de la commande MPPT, deux types de contrôle vectoriel ont fait l'objet de l'analyse pour le contrôle de la puissance active : la commande basée sur des régulateurs classiques de type PI. D'après les résultats de simulation obtenus, La commande vectorielle avec deux boucles en cascades présente de meilleures performances pour un la ferme éolienne. L'association de plusieurs éolienne va nous aider a augmenté la puissance totale générée et assurée une continuité d'appui à la charge.

Pour enrichir ce travail, Nous pouvons citer quelque perspective :

- La réalisation pratique de cette étude afin de valider les résultats des simulations.
- Appliquer des techniques de commande intelligents.
- Étude des systèmes de production hybride.
- Utilisation des convertisseurs multiniveaux afin d'améliorer la performance de la cascade.
- Étude d'un système inertiel de stockage d'énergie basée sur une MSAP.

Annexes

Annexe A

Paramètre de la MADA

<i>Fréquence</i>	$F=50 \text{ HZ}$
<i>Puissance nominale</i>	$P_{n_gen}=2e6 \text{ KW}$
<i>Vitesse de rotation</i>	$N =1500 \text{ tr/min}$
<i>Tension statorique</i>	$V_s=690\text{V}$
<i>Courant statorique</i>	$I_s=1740 \text{ A}$
<i>Couple électromagnétique</i>	$C_n=12732 \text{ Nm}$
<i>Nombre de pair de pôles</i>	$P=2$
<i>Rapport stator/rotor</i>	$U=1/3$
<i>Tension rotorique</i>	$V_r =2070 \text{ V}$
<i>Glissement max</i>	$G_{max}= 1/3$
<i>Tension rotorique ramener au stator</i>	$V_{r_stator} =(V_r*g_{max})*U$
<i>Résistance statorique</i>	$R_s=2.6 e-3\Omega$
<i>Résistance rotorique</i>	$R_r =2.9 e-3\Omega$
<i>Inductance statorique</i>	$L_{si} = 0.087e-3 \text{ H}$
<i>Inductance mutuelle</i>	$L_m=2.5e-3\text{H}$
<i>Inductance statorique</i>	$L_s=L_m+L_{si}$
<i>Inductance rotorique</i>	$L_r =L_m+L_{si}$
<i>Tension de bus continu</i>	$V_{bus}=V_{r_stator}*\text{sqrt}(2)$
<i>Sigma</i>	$\text{Sigma}=1-L_m^2/(L_s+L_r)$
<i>Flux statorique</i>	$F_s=V_s*\text{sqrt}(2/3)/(2*\pi*F)$
<i>Moment d'inertie</i>	$J=127 \text{ kg/m}^2$
<i>Frottement</i>	$D=1e-3\text{N.m.s}^{-1}$

Régulateur PI

$\text{Tau}_i=(\text{sigma}*L_r)/R_r$
$\text{Tau}_n=0.05$
$W_{ni}=100*(1/\text{Tau}_i)$
$W_{nn}=1/\text{Tau}_n$
$K_{p_id}=(2*w_{ni}*\text{sigma}*L_r)-R_r$
$K_{p_iq}= K_{p_id}$
$K_{i_id}=(w_{ni}^2)*L_r*\text{sigma}$

$Ki_{iq}=Ki_{id}$
$Kp_n=(2*wnn*J)/p$
$Ki_n=((wnn^2)*J)/p$

Modèle de la turbine

$N=100$
$R=42$
$ro=1.225$

Convertisseur coté réseau

$Cbus=80e-3$
$Rg=20e-3$
$Lg=400e-3$
$Kpg=1/(1.5*Vs*sqrt(2/3))$
$Kqg=-Kpg$

Régulateur PI CCR

$Tau_{ig}=Lg/Rg$
$Wnig=60*2*pi$
$Kp_{idg}=(2*wnig*Lg)-Rg$
$Kp_{iqg}=Kp_{idg}$
$Ki_{idg}=(wnig^2)*Lg$

Régulateur de Bus continu

$Kp=-1000$
$Ki=-300000$

Bibliographie

- [1] O. OUARED, « Commande d'une génératrice synchrone à aimants permanents vue de son utilisation dans le système éolien », projet de fin d'étude, option commande des Sys électronique, université Tiaret, 2013.
- [2] Bernard Multon, Gael Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed, « 3ème situation énergétique mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables », N°36 mars 2004, pp. 1-14.
- [3] A. Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007.
- [4] E. Muljadi, K. Pierce et P. Migliore, « Control strategy for variable speed, stall-regulated wind turbines », American Controls Conference, Philadelphia, PA, Juin 24-26, 1998.
- [5] L. Chang, « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian Review -summer / Eté 2002, pp. 1-5.
- [6] F. Poitiers, « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2003.
- [7] Metatla Samir, « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » mémoire de magister d'école nationale supérieure polytechnique d'Alger, 2009.
- [8] R. Ramakumar, P. Chiradeja, « Distributed generation and renewable energy systems 3 », 37th intersociety energy conversion engineering conference, IECEC 2002 paper N°7, pp. 716-724.
- [9] R. H. Lasseter and P. Paigi, "Microgrid: à conceptual solution," in Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, 2004, pp. 4285-4290 Vol.6.
- [10] La grenelle de la mer, « Le Livre Bleu des engagements du Grenelle de la Mer », 2009.
- [11] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, and G. Strbac, "Embedded generation" IEE, London, UK, 2000.
- [12] L. Abdelhamid, "Contribution à l'Étude des Performances des Générateurs Électromagnétiques Utilisés dans les Systèmes Eoliens" Mémoire de Magister Université de Batna, 2008.
- [13] M. Dali, J. Belhadj, X. Roboam, J.M. Blaquiere, 'Control and Energy Management of a Wind-Photovoltaïque Hybride System, EPE conférence, Aalborg, Suede, September 2007.
- [14] J. Chen, C. Nayar, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directly coupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394.
- [15] R. Michaux, P. Letellier, « Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes de production électrique », revue de l'électricité et de l'électronique, N° 3, mars 1997, pp. 37-42.
- [16] S El Aiman, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).

- [17] Bernard Multon, Gaël Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed, « 3ème situation énergétique mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables », No36mars 2004, pp. 1-14.
- [18] H. Ben Ahmed, « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004.
- [19] P. Bauer, S.W.H. De Haan, C.R. Meyl, JTG. Pierik, "Evaluation of Electrical Systems for offshore Wind farms ", CDRom of the IEEE IAS Conf., oct. 2000.
- [20] J.W. Smith, J.A. Taylor, D. L. Books, R.C. Dugan, « Interconnection studies for wind generation », conference papers IEEE2004, paper N° 04 C3, pp. C3-1.C3-8.
- [21] R. Ramakumar, Albrecht Neater, « Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas », IEEE – PES general meeting Denver, Colorado, USA, June 6 à12, 2004.
- [22] R. Ramakumar, P. Chiradeja, « Distributed generation and renewable energy systems 3 », 37th intersociety energy conversion engineering conference, IECEC 2002 paper N°7, pp. 716-724.
- [23] Mmezimes Takieddine , « Commande d'une chaine éolienne en utilisant un convertisseur » mémoire de Master , université de Tiaret,algerie,2017
- [24] R. Kezerli, « Alimentation et commande d'une MADA connectée au réseau local, en utilisant les convertisseurs multiniveaux », magister en electronique Spécialité Instrumentation électronique, 14 /07 /2009, universite des sciences et de la technologie houari boumediene faculte d'eletronique et d'informatique .
- [25] G. Cuntly, Éoliennes et aérogénérateurs: guide de l'énergie éolienne. Edisud, 2001.
- [26] M. Mayouf, "Etude comparative Des Architectures Et Strategies De Controle D'un Aerogenerateur Synchrone A Aimants Permanents," doctoral, Université de Batna 2, 2014.
- [27] G. L. Johnson, Wind energy systems. Gary L. Johnson, 2006.
- [28] T. Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Ecole Centrale de Lille; Ecole Militaire polytechnique Alger, 2011.
- [29] F. D. Bianchi, R. J. Mantz, et H. De Battista, «Wind Turbin control systems principles Modelling and Gain Scheduling Design » , 2007.
- [30] Arnaud GAILLARD « système éolienne basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », thèse Doctorat, université Henri Poincaré-Nancy-I 2010
- [31] A. Gaillard, « Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », Nancy 1, 2010.

- [32] J. Usaola et al., « Transient stability studies in grids with great wind power penetration. Modelling issues and operation requirements », in Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, 2003, vol. 3, p. 1534–1541.
- [33] C. Belfedal, Commande d'une machine asynchrone à double alimentation en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne - Etude et Expérimentation -, thèse de doctorat en électrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2007.
- [34] Y. Sahali, M. K. Fellah, « Technique de modulation à sélection d'harmonique à Eliminer (SHEPWM) pour la commande des onduleurs de tension trois niveaux monophasé et triphasés », Intelligent Control and Electrical Power Systems Laboratory ICEPS, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2003.
- [35] Doctorat de science, université de Nottingham, U. K, 2008.”
- [36] Sahoo Arevalo S. L., “Matrix converter for frequency changing power supply applications”, these A. K., Meenakshi J., Dash S. S., and Thyagarajan, “Analysis and simulation of matrix converter using PSIM” 7 th Conf. On power electronics, pp.414-419, Oct. 2007, EXCO, Daegu, Korea.
- [37] M. Soria, “ Commande d'une éolienne double alimentation sur réseau électrique ”, mémoire de Master, université de Tiaret, Algérie, juin 2017.
- [38] R. R. Wandile, S. V. Karemore, et G. S. Rakesh, « Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation », Int. J. Innov. Res. Electr. Electron. Instrum. Control Eng., vol. 3, no 5, 2015.
- [39] Abou Chacra Fouad, « Valorisation et optimisation du stockage d'énergie dans un réseau d'énergie électrique », thèse de doctorat, l'Université Paris-Sud 11, juillet 2005
- [40] Lie Xu and Philip Cartwright, « Direct active and réactive power control of DFIG for Wind Energy Génération », IEEE Transactions on Energy conversion, Vol.21, N°3, Septembre 2006.
- [41] F.D. BIANCHI, H. De BATTISTA, R.J. MANTZ. « Wind turbine control systems, principes, Modelling and Gain Scheduling Design ». Springer, 2007.
- [42] I. MUNTEANU, A. I. BRATCU, N.A CUTULULIS, E. CEANGĂ. « Optimal control of wind energy systems ». Springer, 2008.
- [43] Madjid Si Brahim, « étude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone », thèse doctorat 3 eme cycle en électrotechnique département d'électrotechnique soutenue 16 juin 2015.

« ----- »

ملخص

في هذه الأطروحة ، كنا مهتمين بعدة جوانب ، التحكم في نظام تحويل طاقة الرياح استنادًا إلى آلة الحث المزدوج الطاقة المتصلة مباشرة بالتيار الكهربائي عن طريق الجزء الثابت ويتم تشغيلها بواسطة لها الدوار من قبل اثنين من محولات ثلاثية الطور. أولاً ، قدمنا دراسة حديثة لأنظمة تحويل طاقة الرياح. بعد ذلك ، قمنا بدراسة استراتيجيات التحكم ، وهي التحكم في المحول من جانب الدوار والتحكم في المحول جانب الشبكة . لتعظيم القدرة التي تم التقاطها ، يتم تطبيق تقنية استخراج الطاقة القصوى وتمت معالجة نمذجة سلسلة الرياح لفهم كيفية عملها بشكل أفضل.

الكلمات الرئيسية : توربينات الرياح ، محول ، الطاقة القصوى ، التحكم ، منظم Pi.

RÉSUMÉ

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à plusieurs aspects, la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) connectée directement au réseau électrique via le stator et elle est pilotée par son rotor par deux convertisseurs triphasés à MLI. Au premier lieu, nous avons présenté une étude sur l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne. Ensuite, nous avons étudié les stratégies de commande, à savoir la commande pour le convertisseur coté rotor (CCM) et la commande pour le convertisseur coté réseau (CCR), nous avons intégré une ferme éolienne dans un réseau électrique afin de contrôler le comportement de la ferme pour différentes vitesses de vent. Pour maximiser la puissance captée, la technique d'extraction de maximum de puissance (MPPT) est appliquée et on a traité la modélisation de la chaîne éolienne pour mieux comprendre son fonctionnement.

Mots clés : Éolienne, MADA, Convertisseur, Puissance Maximale, Commande, Régulateur PI.

Abstract

In this thesis, we were interested in several aspects, the control of a wind energy conversion system based on a dual power induction machine (MADA) connected directly to the mains via the stator and is driven by its rotor by two three-phase PWM converters. First, we presented a state-of-the-art study of wind energy conversion systems. Then, we studied the control strategies, namely the control for the rotor-side converter (CCR) and the control for the grid-side converter (CCG). To maximize the power captured, the Maximum Power Extraction (MPPT) technique is applied and the modeling of the wind chain was processed to better understand how it works.

Key words : Wind turbine, MADA, Converter, Maximum power, Control, PI regulator.