

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

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine: Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité: Commande électrique

THÈME

**Apport sur L'application des Commandes Avancées pour Contrôler
la Génératrice Asynchrone Double Alimentation (GADA)**

Préparé par : Benia El Atik
Koulali Mohamed Redhouane

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
T. ALLAOUI	Pr	Président
D. TOUMI	MCA	Examinateur
S. BELFEDHAL	MCB	Examinateur
B. BELABBAS	MCA	Encadreur
S. HEROUAL	Doctorante	Invitée

Année universitaire : 2022-2023

Remerciements

Ce travail n'est pas seulement le résultat de notre propre dévouement et de notre persévérance, mais une grande partie du mérite revient aux personnes avec lesquelles nous avons travaillé avec et aux personnes de soutien et de compréhension avec lesquelles nous avons vécu au cours de ces cinq années de formation.

Avant tout je remercie **ALLAH** tout puissant qui nous a donné le courage, la patience, l'aide et la volonté de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements les plus sincères à Monsieur **BELABBAS Belkacem**, Maître de Conférences Classe « A » à l'université Ibn Khaldoun-Tiaret, pour son exceptionnel encadrement, sa patience et sa disponibilité tout au long de la préparation de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à mademoiselle **HEROUAL Samira**, doctorante à l'université Ibn Khaldoun-Tiaret, pour son aide, son professionnalisme, ses qualités scientifiques.

Nous tenons à exprimer notre sincère appréciation et gratitude envers les membres du jury, **Tayeb ALLAOUI** en tant que Président, et les Examineurs **Djilali TOUMI** et **Seifeddine BELFEDHAL**, pour leur volonté de faire partie de notre comité d'évaluation et leur rôle essentiel en tant que nos enseignants au cours de notre formation.

Nos remerciements également à tous les enseignants de la faculté des sciences appliquées qui ont participé à notre formation.

Enfin, nous sommes très reconnaissants à tous les membres de nos familles.

TABLES DES MATIERES

TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : Généralités sur les éoliennes	4
I.1 Énergies renouvelables	5
I.2 Historique de l'éolien	5
I.3 L'énergie éolienne dans l'Algérie	7
I.4 Principe de fonctionnement des éoliennes	8
I.5 Les différents types des turbines éoliennes	9
I.6 Principales composantes des éoliennes à axe horizontal	9
I.7 Les éoliennes connectées au réseau	10
I.7.1 Les éoliennes à vitesse fixe	10
I.7.1.1 Avantages du fonctionnement à vitesse fixe	10
I.7.1.2 Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe	11
I.7.2 Les éoliennes à vitesse variable (MADA)	11
I.7.2.1 Avantages du fonctionnement à vitesse variable	11
I.7.2.2 Inconvénients du fonctionnement à vitesse variable	12
I.8 Convertisseurs de puissance pour éoliennes	12
I.9 Conclusion	13
CHAPITRE II : Modélisation de la chaîne éolienne	14
II.1 Introduction	15
II.2 Conversion de l'énergie éolienne	15
II.3 Modélisation de la turbine éolienne	16
II.3.1 Modèle des pales	16
II.3.2 Modèle du multiplicateur de vitesse	17
II.3.3 Modèle de l'arbre mécanique	18
II.4 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation MADA	19
II.4.1 Equation électrique et magnétique	19
II.4.1.1 Equation électrique	19
II.4.1.2 Equation magnétique	20
II.4.2 Application de la transformation de Park	21

II.4.2.1	Modélisation de la MADA dans le repère de Park	23
II.4.3	Equation mécanique	24
II.5	Onduleur de tension triphasé à trois niveaux	24
II.5.1	Présentation générale de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure N.P.C	25
II.5.2	Commande par la modulation à triangles multiples	27
II.6	Conclusion	28
CHAPITRE III : Commande de la chaine éolienne		29
III.1	Introduction	30
III.2	Régulateur de la vitesse (MPPT)	30
III.2.1	Résultats de simulation et interprétations du MPPT	31
III.3	Commande de la MADA	33
III.3.1	Commande vectorielle	33
III.3.2	Modèle de la MADA à flux statorique orienté	34
III.3.3	Expressions des tensions rotoriques	35
III.3.4	Commande du MADA avec boucle de puissance	36
III.3.5	Dimensionnement du régulateur	37
III.3.5.1	Commande des courants	37
III.3.5.2	Commande des puissances	38
III.3.6	Résultats de simulation et interprétations	39
III.3.7	Etude de robustesse	42
III.4	Conclusion	43
CHAPITRE IV : Commande par PSO		44
IV.1	Introduction	45
IV.2	Optimisation d'essaim de particules (PSO)	45
IV.2.1	Principe de base d'un PSO	46
IV.2.2	Modélisation Mathématique du PSO	46
IV.2.3	L'algorithme PI-PSO	47
IV.2.4	Avantages et inconvénients du PSO	48
IV.2.4.1	Avantages	48
IV.2.4.2	Inconvénients	49
IV.3	Résultats de simulation et interprétations par PSO	49
IV.3.1	Partie mécanique	49
IV.3.2	Partie électrique	50
IV.3.3	Etude de robustesse	52
IV.4	Etude comparative	52

IV.4.1	Partie électrique	52
IV.4.2	Partie mécanique	54
IV.5	Conclusion	54
CONCLUSION GENERALE		56
BIBLIOGRAPHIE		59

LISTES DES FIGURES

Figure I.1 : Moulin à vent

Figure I.2 : Apparition de la première éolienne dans le monde

Figure I.3 : Eolienne d'Adrar

Figure I.4 : Carte des vitesses de vent à 10 m de hauteur

Figure I.5 : Les composantes d'une éolienne horizontal

Figure I.6 : Eolienne directement connectée au réseau

Figure I.7 : Eoliennes à vitesse variable basé sur une machine asynchrone à double alimentation

Figure II.1 : Modèle de la chaîne de conversion éolienne à base de la MADA.

Figure II.2 : Modèle de la turbine éolienne.

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

Figure II.4 : Schéma bloc du modèle simplifié de la turbine éolienne.

Figure II.5 : Schéma équivalent d'un générateur asynchrone à double alimentation (GADA).

Figure II.6 : Représentation des axes de la machine.

Figure II.7 : Topologie matérielle de l'onduleur triphasé à 3 niveaux NPC.

Figure II.8 : les séquences de conductions des interrupteurs dans l'onduleur triphasé à 3 niveaux NPC.

Figure II.9 : Les formes d'ondes d'un bras d'onduleur monophasé de type NPC.

Figure II.10 : Génération des signaux de commande des interrupteurs par la modulation a doubles triangles pour un Onduleur NPC a trois niveaux.

Figure III.1 : Schéma fonctionnel de régulation de la vitesse.

Figure III.2 : Signal du Vitesse de vent.

Figure III.3 : Régulation de la vitesse par PI.

Figure III.4 : Couple électromagnétique.

Figure III.5 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

Figure III.6 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance.

Figure III.7 : Réglages des Courants par un PI.

Figure III.8 : Réglages des puissances par un PI.

Figure III.9 : La puissance active de la chaîne pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

Figure III.10 : La puissance active et réactive statorique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

Figure III.11 : Le flux statorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle directe de la puissance

Figure III.12 : Le courant rotorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

Figure III.13 : Couple électromagnétique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance

Figure III.14 : Etude de robustesse pour la puissance active et réactive statorique par PI Classique

Figure IV.1 : Schéma bloc du contrôleur PI-PSO

Figure IV.2 : L'organigramme de l'algorithme PSO

Figure IV.3 : Régulation de la vitesse par PI-PSO

Figure IV.4 : La puissance active et réactive statorique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance par PI-PSO

Figure IV.5 : Le flux statorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle directe de la puissance par PI-PSO

Figure IV.6 : Le courant rotorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance par PI-PSO

Figure IV.7 : Couple électromagnétique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance par PI-PSO

Figure IV.8 : Etude de robustesse pour la puissance active et réactive statorique par PI-PSO

Figure IV.9 : Comparaison entre les résultats de régulation avec PI Classique et par PSO de la puissance active et réactive

Figure IV.10 : Comparaison entre les résultats de régulation avec PI Classique et par PSO du MPPT

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Etats possibles de l'onduleur à trois niveaux NPC

Tableau IV.1 : Les paramètres du contrôleur PI et PI-PSO

Tableau IV.2 : Comparaison entre les résultats de régulation avec PI Classique et PI réglé par PSO

Tableau IV.3 : Les paramètres du contrôleur PI et PI-PSO pour MPPT

LISTES DES ACRONYMES

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation.

GADA : Génératrice Asynchrone à Double Alimentation.

MSAP : Moteur synchrone à aimants permanents.

MAS : Moteur asynchrone.

Ω_s : Vitesse du synchronisme.

THD : Le taux de distorsion harmonique.

NPC : Onduleur clampé par le neutre.

MPPT : L'extraction de la puissance maximale.

V_a, V_b, V_c : Les tensions alternatives simples à la sortie l'onduleur.

V_{a0} : Tension simple du premier bras.

E : La tension totale du bus continu.

K : Nombre de bras.

$K_{A1}, K_{A2}, K_{A3}, K_{A4}$: Interrupteurs commandés.

Dcl_{A1}, Dcl_{A2} : Diodes de clamp.

f_c : Fréquence de porteuse.

V_r : Tension sinusoïdale de référence.

f : Fréquence de référence.

A_m : Amplitude de référence.

f_m : Fréquence de référence.

ρ : Densité de l'air.

S : Surface balayée par les pales de l'éolienne.

m : Masse d'air traversant l'hélice par seconde.

R : Longueur de la pale.

P_m : La puissance extraite du vent par l'éolienne.

P_v : La puissance du vent non perturbé.

C_p : Coefficient de puissance de la turbine.

C_{pmax} : Coefficient de puissance correspondant à l'extraction maximale de puissance.

λ : Vitesse spécifique.

λ_{obt} : Ratio de vitesse optimal.

β : Angle de calage des pales de l'éolienne.

$C_{aéro}$: Couple aérodynamique de la turbine.

C_{mec} : Couple mécanique total.

C_{em} : Couple électromagnétique de la génératrice.

C_g : Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice.

C_{vis} : Couple des frottements visqueux.

f : Coefficient des frottements visqueux.

f_g : Coefficient des frottements visqueux de la génératrice.

$f_{Turbine}$: Coefficient des frottements visqueux de la turbine.

V_N : Vitesse nominale du vent.

G : Rapport du multiplicateur.

J : Inertie totale sur l'arbre.

J_g : Inertie de la génératrice.

J_{Turbine} : Inertie de la turbine.

Ω_{Turbine} : Vitesse de rotation de la turbine (avant le multiplicateur).

Ω_{mec} : Vitesse de rotation du générateur (après le multiplicateur).

P_{aero} : Puissance aérodynamique de la turbine.

g : Glissement.

ω_s, ω_r : Sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine.

P_s : Représente la puissance statorique.

P_r : La puissance rotorique.

P_m : La puissance mécanique.

IGBT : Transistors commandables à l'ouverture et à la fermeture.

MLI : Modulation par largeur d'impulsion.

U_s : Tension statorique

U_r : Tension rotorique

a_r, b_r, c_r : Phases du stator.

a_s, b_s, c_s : Phases du rotor.

v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} : Les tensions simples triphasées au stator

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Les courants statoriques.

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$: Les flux propres au stator.

v_{ra}, v_{rb}, v_{rc} : Les tensions simples triphasées au rotor.

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Les courants rotoriques.

$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$: Les flux propres au rotor.

R_s : La résistance des enroulements statoriques

R_r : La résistance des enroulements rotoriques.

L_s : L'inductance propre d'une phase statorique.

M_s : L'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

L_r : L'inductance propre d'une phase rotorique ;

M_r : L'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

M_{sr} : L'inductance mutuelle entre une phase statorique s_r et une phase rotorique.

$P(\theta)$: La transformation de Park

θ_s : L'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques.

θ_r : L'angle de la transformation de Park des grandeurs rotoriques.

$q - d$: Axes correspondant au référentiel lié au repère de Park (direct, quadrature).

i_{dq0} : Courants dans le repère Park.

V_{dq0} : Tensions dans le repère Park.

Φ_{dq0} : Flux dans le repère Park.

P_E : La puissance électrique instantanée.

P_{mec} : Puissance mécanique.

C_r : Couple résistant.

ω : Vitesse de rotation.

P : Puissance active.

Q : Puissance réactive.

K_p : Gain proportionnel du régulateur PI (proportionnel - intégral).

K_i : Gain intégral du régulateur PI (proportionnel - intégral).

p : Nombre de pair de pole.

$R(t)$: Signal de référence.

$u(t)$: Signal de commande.

$y(t)$: Sortie du système à commander.

e : Erreur.

PSO : L'optimisation par essaims particulaires.

PI-PSO : Proportional-Integral Particle Swarm Optimization

$V_{ij}(t)$: Représente la particule $i^{\text{ème}}$ vitesse avec une j dimension à l'itération t .

$x_{ij}(t)$: Représente la particule $i^{\text{ème}}$ position avec une j dimension à l'itération t .

P_{best} : La meilleure position antérieure de la $i^{\text{ème}}$ particule.

G_{best} : La meilleure particule parmi toute la population.

W : Facteur de poids d'inertie.

C_1, C_2 : Constantes d'accélération.

r_1, r_2 : Nombres entiers aléatoires.

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

L'industrialisation et l'utilisation croissante des appareils électriques ont engendré une demande considérable en énergie électrique. Les pays industrialisés ont principalement recours aux centrales nucléaires et les énergies fossiles pour répondre à cette demande. Bien que l'énergie nucléaire soit propre, elle présente des risques et des problèmes de traitement et d'enfouissement des déchets, ce qui la rend peu attrayante pour les générations futures [1][2][3].

Pour limiter l'utilisation de centrales nucléaires, certains pays se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie renouvelables, telles que l'énergie éolienne, qui est l'une des sources les plus écologiques et économiques pour produire de l'électricité [3][4].

L'utilisation de l'énergie éolienne réduit les combustions de combustibles fossiles et les émissions conséquentes, ainsi que la dépendance à la consommation de pétrole, créant des emplois pour sa construction, son exploitation et son entretien [5].

Les dernières générations d'éoliennes fonctionnent avec une vitesse variable, ce qui permet d'augmenter le rendement énergétique et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite. [3][5]

Aujourd'hui, la plupart des projets éoliens utilisent la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) à vitesse variable et des convertisseurs statiques employant des convertisseurs multiniveaux pour améliorer la qualité d'énergie produite par cette source d'énergie renouvelable [6].

L'objectif de ce mémoire est d'apporter des contributions significatives à l'application des commandes avancées pour contrôler la MADA dans le contexte de l'énergie éolienne.

Ce mémoire comprend une introduction générale suivie de quatre chapitres, et se conclut par une synthèse générale.

Le premier chapitre de ce mémoire aborde l'état de l'art des énergies renouvelables, en particulier l'énergie éolienne. Après une brève présentation de l'histoire de l'énergie éolienne, nous nous intéresserons à la place de cette énergie en Algérie. Nous étudierons également les différents types de turbines éoliennes, notamment les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical, ainsi que leurs composants principaux. Enfin, on a

expliqué le principe de fonctionnement des éoliennes et on a examiné les avantages et inconvénients des éoliennes connectées au réseau

Le deuxième chapitre portera sur la conversion de l'énergie éolienne. On s'intéressera en particulier aux convertisseurs de puissance pour éoliennes et à l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC. Nous expliquerons comment la modulation à triangles multiples sera utilisée pour commander cet onduleur, et nous ferons la modélisation de la chaîne de conversion éolienne.

Le troisième chapitre traitera de la modélisation de la MADA. Nous présenterons les équations électriques et magnétiques qui régissent le fonctionnement de la MADA, ainsi que la transformation de Park. Ensuite, nous effectuerons la modélisation de la MADA dans le repère de Park avec l'explication de la commande vectorielle de la MADA.

Dans le quatrième chapitre de ce mémoire, nous aborderons les diverses stratégies de commande de la MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation) appliquées à l'énergie éolienne. Nous examinerons la commande du régulateur de vitesse (MPPT), la commande de la MADA avec boucle de puissance, ainsi que la commande de la GADA (Générateur Asynchrone à Double Alimentation) avec PSO (Optimisation par Essaim Particulaire). Une étude comparative de ces différentes stratégies de commande sera également présentée.

CHAPITRE I

Généralités sur les éoliennes

I.1 Énergies renouvelables

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. De nos jours, plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. L'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par ses problèmes [1].

Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante cela la pose comme un bon candidat représentant une alternative aux différentes sources d'énergie non renouvelable.

I.2 Historique de l'éolien

L'humanité a utilisé le vent comme source d'énergie depuis plusieurs milliers d'années. Avec l'énergie du bois c'était la source d'énergie la plus utilisée pendant des siècles. Dès l'antiquité, les moulins à vent se développent **Figure I.1**. Apparus à l'an 600 au Moyen Orient, ils se sont ensuite implantés en Egypte. Les moulins à vent sont apparus en Europe (Grande Bretagne d'abord) un peu avant l'an 1000 puis ils se sont généralisés au XIIème siècle dans toute l'Europe. Ils étaient construits sur le modèle des éoliennes à axe vertical [7].



Figure I.1 : Moulin à vent

L'apparition des premières éoliennes électriques se fait à la fin du XIX^{ème} siècle, sous forme expérimentale. C'est Charles F. Bush à Cleveland (Etats-Unis) qui met en place ce dispositif pour alimenter sa maison en électricité. C'est le coup d'envoi de 20 ans d'autonomie assurée grâce à ce dispositif de 18 mètres de haut et de 17 mètres de diamètre [7].

A peu près au même moment, Paul La Cour établit un prototype bâti sur le terrain de l'école de Askov en présentant un nombre moindre de pales afin de produire davantage d'électricité en tournant plus vite. C'est la première éolienne dite industrielle **Figure I.2**. En 1918, dix ans après la mort de celui qu'on surnomme « L'Edison danois », 3 % de l'énergie produite au Danemark provient déjà de l'éolien [7].

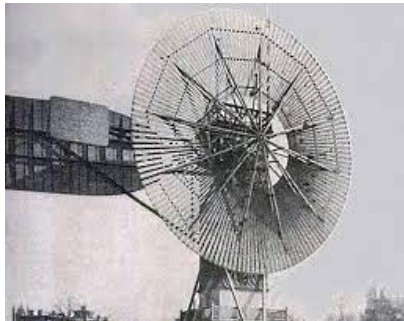


Figure I.2 : Apparition de la première éolienne dans le monde

Vu le développement croissant de l'électrotechnique et de la demande d'électricité, à la fin du XIX^{ème} siècle, les premières expériences ont été menées sur l'utilisation d'éoliennes pour produire de l'électricité. Depuis, l'énergie éolienne s'est considérablement développée, en particulier au cours des 30 dernières années. En 1999, plus de 10 000 MW de capacité éolienne ont été installés dans le monde. Cette année a également été la première au cours de laquelle le monde a installé et cultivé plus de nouvelles éoliennes que de d'Énergie nucléaires [7][8].

Les principaux pays producteurs sont la Chine (29,2% du total mondial en 2020), les États-Unis (21,4%) et l'Allemagne (8,3%). La puissance installée mondiale atteint 906,2 GW fin 2022, en progression de 9,3 %. La part de marché de la Chine s'est élevée à 48,5% en 2022 [9].

I.3 L'énergie éolienne dans l'Algérie

L'Algérie possède le potentiel éolien terrestre le plus élevé du continent qui s'élève à 7700 gigawatts (GW), soit plus de 11 fois la capacité éolienne mondiale actuellement installée. Il s'agit d'une donnée publiée par la société Financière internationale (IFC), dans son rapport perspectives énergétiques en Afrique 2019. En effet, l'Algérie fait partie d'une quinzaine de pays dont les potentiels éoliens techniques dépassent les 1000GW à l'image de la Mauritanie, le Mali, l'Égypte, l'Afrique du Sud, l'Éthiopie et le Kenya. La nouvelle analyse met en relief la puissance du potentiel éolien terrestre du continent, évalué à 180000 TéraWatt/heure (TWh) par an. A titre de comparaison, la capacité recensée pourrait satisfaire 250 fois la demande d'électricité de tout le continent [10].

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 de Grand Vent (Alger) Conçue par l'ingénieur français ANDREAU. Une ferme éolienne de 10 MW de puissance a été implantée à Adrar et mise en service en juin 2014 **Figure I.3**. L'énergie électrique fournie par cette ferme est injectée au réseau local et le taux de pénétration de l'énergie éolienne représenterait environ 5% [10].



Figure I.3: Eolienne d'Adrar

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne pour les installations de grandes puissances, les vitesses du vent moyennes doivent être supérieures à 6m/s, la hauteur de référence étant de 10 mètres **Figure I.4**. Cependant, avoir de grandes vitesses ne suffit pas. En effet, la disponibilité de cette ressource éolienne doit être importante. En d'autres termes, le nombre d'heures pendant lesquelles la vitesse du vent est élevée doit être important sur l'année on trouve La ferme éolienne de Kabertene (Adrar) [10].

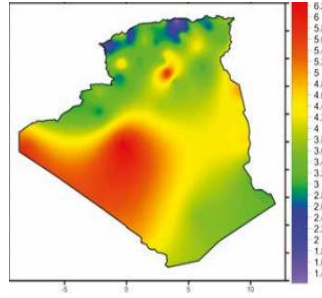


Figure I.4: Carte des vitesses de vent à 10 m de hauteur

Installé en 2014, d'une puissance totale de 10.2 MW produit 19 GWh d'énergie avec une durée de fonctionnement de 1900 heures. A noter que certains jours la puissance fournie atteint sa puissance nominale à savoir 10.2 MW et la puissance moyenne consommée par chaque éolienne est de 10 kW environ [10].

I.4 Principe de fonctionnement des éoliennes

Le fonctionnement des éoliennes comporte plusieurs étapes :

La première étape est la capture de l'énergie éolienne par les pales du rotor. Les pales sont conçues pour tourner autour d'un axe horizontal ou vertical, selon la conception de la turbine. Lorsque les pales tournent, elles transfèrent de l'énergie au rotor, qui tourne à une vitesse différente de celle de la grille.

La deuxième étape est la conversion de l'énergie cinétique du rotor en énergie électrique. Le rotor est équipé d'un ensemble d'électroaimants qui produisent un champ magnétique alternatif. Ce champ induit un courant électrique dans les enroulements du stator, qui est ensuite introduit dans le réseau via un ensemble de transformateurs.

La troisième étape est le contrôle de la puissance électrique de sortie. La puissance de sortie de l'éolienne est contrôlée en faisant varier la vitesse du rotor et les paramètres du convertisseur. La vitesse du rotor est contrôlée en ajustant les bagues collectrices et les balais, tandis que les paramètres du convertisseur sont ajustés pour réguler le flux d'énergie électrique vers le réseau [11].

I.5 Les différents types des turbines éoliennes

En développement, l'énergie renouvelable du vent peut provenir d'éoliennes nommées de différentes manières : éolienne verticale et éolienne horizontale [1]. Chaque éolienne a son propre principe de fonctionnement et permet de produire plus ou moins d'électricité.

I.6 Principales composantes des éoliennes à axe horizontal

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux comme présenté dans la Figure I.5 [4] :

- Le mât
- Le rotor (moyeu et pales)
- La nacelle

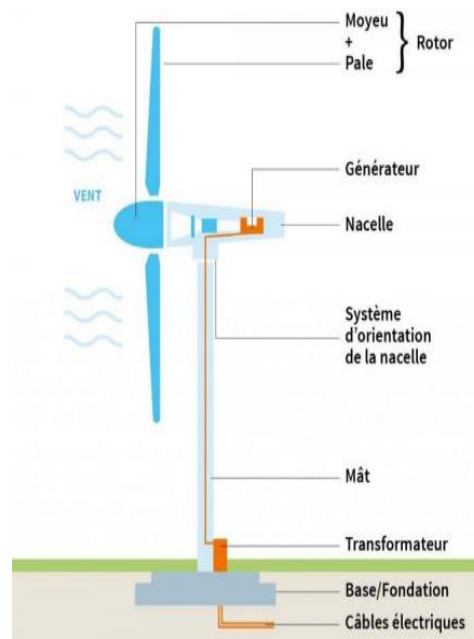


Figure I.5 : Les composantes d'une éolienne horizontale

I.7 Les éoliennes connectées au réseau

Aujourd'hui, on peut recenser deux types de famille d'éoliennes raccordées sur les réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écurueil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une MADA ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

Ces deux types des machines MADA et MSAP sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [1][12].

I.7.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écurueil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques. Pour assurer un fonctionnement en générateur **Figure I.6**. Il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif) [1][12].

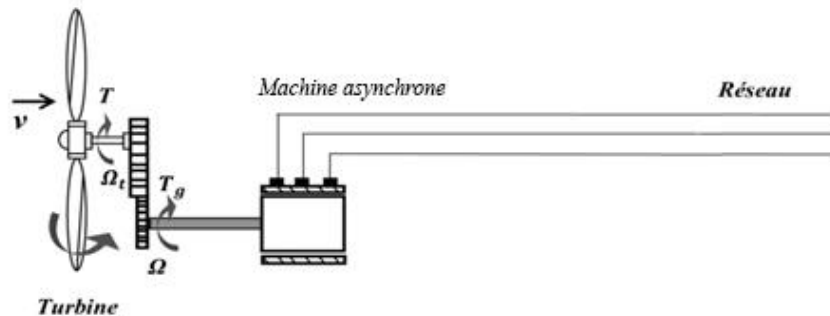


Figure I.6 : Eolienne directement connectée au réseau

Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique (Ω_{mec}) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme $\Omega_s = 1500tr/min$, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne [1].

I.7.1.1 Avantages du fonctionnement à vitesse fixe

- Système électrique simple.
- Grande fiabilité.

- Prix modéré.

I.7.1.2 Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe

- Une puissance extraite non optimale, Ce type d'éoliennes n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau [1].

I.7.2 Les éoliennes à vitesse variable (MADA)

Ses éoliennes sont classiquement constituées de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue elles sont basées sur une machine asynchrone à cage **Figure I.7**, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable ou bien, basée sur une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobine. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique [1][13][14][15].

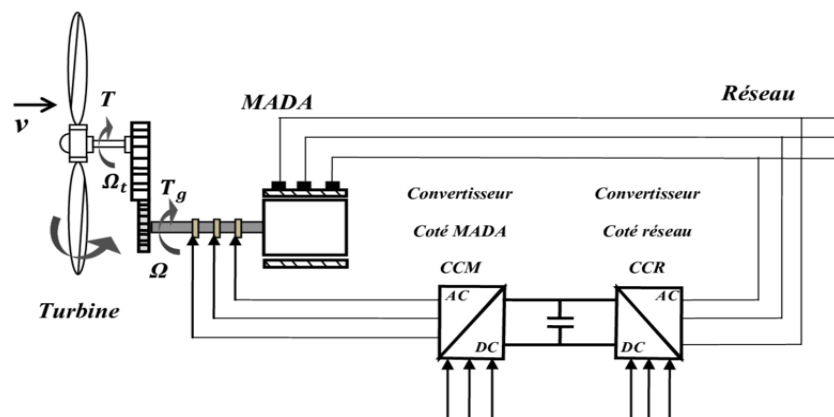


Figure I.7: Eoliennes à vitesse variable basé sur une machine asynchrone à double alimentation

I.7.2.1 Avantages du fonctionnement à vitesse variable

- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple (réductions efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques).

- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité [1].

I.7.2.2 Inconvénients du fonctionnement à vitesse variable

- L'utilisation de convertisseurs de puissance « complexes » demeure son principal inconvénient. Contrairement aux dispositifs à vitesse fixe qui utilisent presque exclusivement des génératrices asynchrones à cage, les aérogénérateurs à vitesse variable peuvent mettre en œuvre d'autres convertisseurs électromécaniques [1].

I.8 Convertisseurs de puissance pour éoliennes

En raison du développement rapide de la capacité et de la technologie dans la production d'énergie éolienne, le convertisseur électronique de puissance devient une partie de plus en plus importante de l'ensemble du système [13].

Côté génératrice : le courant circulant dans le rotor ou le stator du générateur doit être contrôlé pour ajuster le couple et par conséquent, la vitesse de rotation de l'éolienne. Cela contribuera à l'équilibre de puissance active non seulement en fonctionnement normal lors de l'extraction de la puissance maximale de l'éolienne, mais également en cas de panne du réseau lorsque la puissance générée doit être réduite rapidement. De plus, le convertisseur doit avoir la capacité de gérer une fréquence fondamentale et une amplitude de tension variables à partir des sorties de la génératrice.

Côté réseau : le convertisseur doit respecter les exigences du réseau quelle que soit la vitesse du vent. Cela signifie qu'il doit avoir la capacité de contrôler la puissance réactive Q fournie au réseau électrique et d'effectuer une réponse rapide sur la réponse de puissance active P . La fréquence fondamentale, ainsi que l'amplitude de la tension côté réseau, doivent être maintenues presque fixes en fonctionnement normal, et la distorsion harmonique totale (en anglais : Total Harmonic Distortion [THD]) du courant doit être limitée à un niveau bas [11].

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté une description de l'énergie éolienne. On a abordé les différentes notions clés relatives à la technologie éolienne, notamment l'historique des éoliennes, le potentiel éolien en Algérie ainsi que son état actuel. De plus, une brève description des différents types d'éoliennes existantes et des composantes de l'éolienne à axe horizontal utilisée dans notre étude a été donnée. En comprenant le principe de fonctionnement général d'une éolienne, nous avons pu distinguer les deux types d'éoliennes les plus répandus, à savoir les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable. Parmi ceux-ci, les éoliennes à vitesse variable sont les plus couramment utilisées, en particulier avec l'exploitation de la MADA de plus on a présente l'importance des convertisseurs de puissance pour notre étude.

Dans le prochain chapitre, nous aborderons la modélisation de la chaîne éolienne en détaillons la modélisation de la turbine, MADA et de l'onduleur.

CHAPITRE II

Modélisation de la chaîne éolienne

II.1 Introduction

La conversion de l'énergie éolienne est essentielle pour exploiter pleinement le potentiel énergétique des éoliennes. Dans ce chapitre, nous détaillerons les modèles des pales, du multiplicateur de vitesse et de l'arbre mécanique, ce qui nous permettra de comprendre leur comportement et leurs interactions. De plus, nous présenterons les équations électriques et magnétiques qui décriront le fonctionnement de la MADA, ainsi que l'application de la transformation de Park pour simplifier sa modélisation dans le repère approprié. De plus, nous examinerons l'équation mécanique afin de comprendre les interactions entre la MADA et la turbine éolienne. Les convertisseurs de puissance joueront un rôle clé dans les éoliennes, en permettant de convertir l'électricité produite par la MADA en une forme utilisable pour le réseau électrique. Nous nous concentrerons particulièrement sur l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux, en présentant sa structure et les techniques de commande associées

II.2 Conversion de l'énergie éolienne

Le système d'éolienne capte l'énergie au moyen de pales aérodynamiques et la convertit en énergie mécanique rotative dans l'arbre du générateur. Afin d'avoir une conversion de puissance appropriée, la vitesse de pointe de la lame doit être inférieure à la moitié de la vitesse du son, et ainsi, la vitesse de rotation diminuera à mesure que le diamètre de pales augmente. Pour les éoliennes typiques de plusieurs MW, la vitesse de rotation varie entre 5 et 16 tr/min, ce qui peut entraîner des solutions de générateur encombrantes et augmenter les coûts d'installation. L'une des solutions les plus efficaces en termes de poids pour convertir la puissance mécanique à faible vitesse et à couple élevé consiste à utiliser un multiplicateur [16].

La **Figure II.1** implique une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA. Dans ce schéma, le stator est directement connecté au réseau et le rotor est connecté au réseau par un convertisseur. Le convertisseur de côté de réseau est utilisé pour maintenir une tension constante et le convertisseur de côté du rotor est utilisée pour contrôler le flux de puissance à travers le rotor à des vitesses différentes [4][16][17].

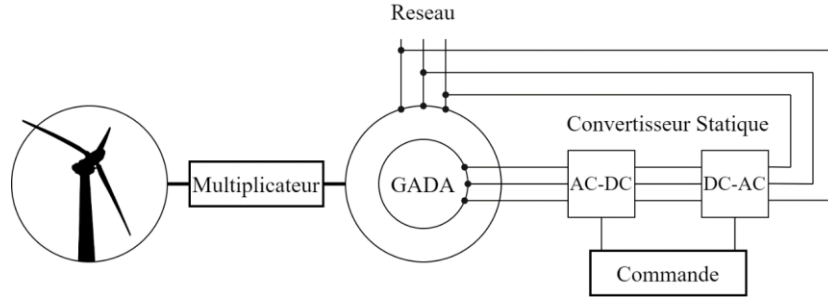


Figure II.1 : Modèle de la chaîne de conversion éolienne à base de la MADA

II.3 Modélisation de la turbine éolienne

Le dispositif de la turbine éolienne illustré dans la **Figure II.2** comprend trois pales orientables de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_t qui est relié à un multiplicateur de gain. Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique de type MADA [18][19].

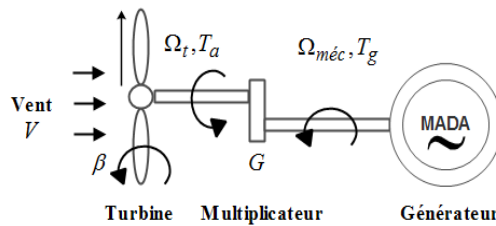


Figure II.2 : Modèle de la turbine éolienne

II.3.1 Modèle des pales

La puissance cinétique du vent est donnée par [4]:

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

La puissance apparaissant (puissance aérodynamique) par l'éolienne est donnée par :

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

C_p : Rendement aérodynamique de la turbine éolienne.

ρ : Density de l'air.

β : Angle de calage des pales.

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

$$\lambda = \frac{R.\Omega_t}{v} \quad (\text{II.3})$$

L'expression de coefficient de puissance que nous allons utiliser dans notre étude est donnée par [2][19][20] :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \cdot \left(116 \cdot \frac{1}{\lambda_i} - 0.4 \cdot \beta - 5 \right) \cdot e^{\left(\frac{-21}{\lambda_i} \right)} + 0.0068 \cdot \lambda_i \quad (\text{II.4})$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (\text{II.5})$$

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ dépend du paramètres λ pour différents angles des pales β_i le C_p calculé à partir de l'équation est représenté par la **Figure II.3**.

Quand $\beta = 0$. La courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{\text{opt}} = 8.1, C_{p_{\text{max}}} = 0.48$) qui est le point correspondant au maximum de la puissance mécanique récupérée [21][22].

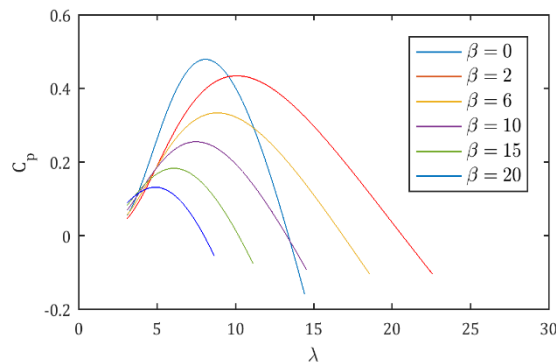


Figure II.3 : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β

II.3.2 Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur transforme la puissance à vitesse lente et un couple élevé de l'éolienne en une puissance à grande vitesse et un couple faible. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [18][19][23] :

$$\Omega_t = \frac{1}{G} \Omega_{\text{méc}} \quad (\text{II.6})$$

$$C_g = \frac{1}{G} C_a \quad (\text{II.7})$$

II.3.3 Modèle de l'arbre mécanique

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_t et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [18][23].

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (\text{II.8})$$

L'évolution de la vitesse mécanique $\Omega_{\text{méc}}$ dépend du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice $C_{\text{méc}}$ qui est la résultante d'un couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, d'un couple de frottement visqueux C_{vis} et d'un couple du multiplicateur de vitesse C_g [18][23].

$$\begin{cases} J \cdot \frac{d\Omega_{\text{méc}}}{dt} = C_{\text{méc}} \\ C_{\text{méc}} = C_g - C_{\text{em}} - C_{\text{vis}} \\ C_{\text{vis}} = f \cdot \Omega_{\text{méc}} \\ f = \frac{f_t}{G^2} + f_g \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté par la **Figure II.4**. Il 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 à ce système [19][24].

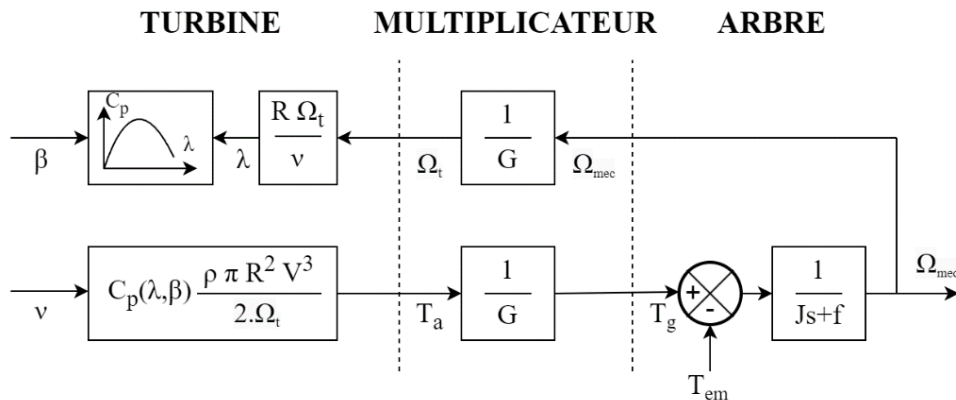


Figure II.4 : Schéma bloc du modèle simplifié de la turbine éolienne

II.4 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation MADA

Un générateur à induction à double alimentation (GADA) appelé aussi générateur à induction à double alimentation est une machine électrique largement utilisée dans le domaine des énergies renouvelables, en particulier dans la production d'énergie éolienne, se compose d'un circuit de stator triphasé connecté au réseau électrique et d'un circuit de rotor qui permet un contrôle précis de la puissance de sortie du générateur et un fonctionnement efficace sur une large plage de vitesses de vent. La **Figure II.5** représente le schéma équivalent du GADA [18][25].

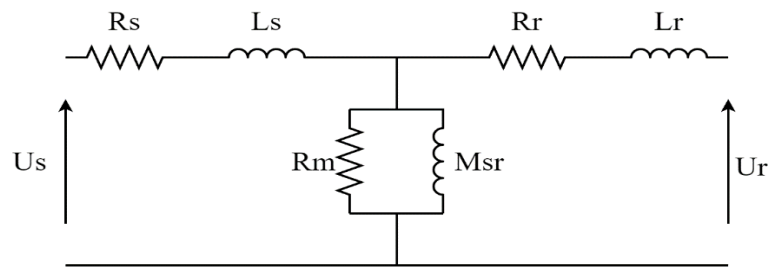


Figure II.5 : Schéma équivalent d'un générateur asynchrone à double alimentation (GADA).

II.4.1 Equation électrique et magnétique

II.4.1.1 Equation électrique

La loi faraday et la loi d'ohm permettent de relier les tensions des enroulements aux flux totalisés et aux courants dans les bobinages obéissent à l'équation suivante.

$$V = R \cdot i + \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.10})$$

- Au niveau du stator

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$[V_{sabc}] = R_s [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \quad (\text{II.12})$$

- Au niveau du rotor

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$[V_{rabc}] = R_r [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rabc}] \quad (\text{II.14})$$

Avec :

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Les tensions simples triphasées au stator.

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Les courants statoriques.

$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$: Les flux propres au stator.

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Les tensions simples triphasées au rotor.

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Les courants rotoriques.

$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$: Les flux propres au rotor.

R_s : La résistance des enroulements statoriques.

R_r : La résistance des enroulements rotoriques.

II.4.1.2 Equation magnétique

On définit le vecteur flux par :

$$[\phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \text{ Et } [\phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Les vecteurs courants Par :

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \text{ Et } [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne. La forme matricielle est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sabc} \\ \phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{sabc} \\ \phi_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}, [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.16, II.17})$$

$$[M_{sr}] = [M_{sr}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

L_s : L'inductance propre d'une phase statorique.

M_s : L'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

L_r : L'inductance propre d'une phase rotorique.

M_r : L'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

M_{sr} : L'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

II.4.2 Application de la transformation de Park

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. On utilise la transformation de Park qui est constituée d'une transformation triphasée - diphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère abc vers le repère mobile dq [16] **Figure II.6**.

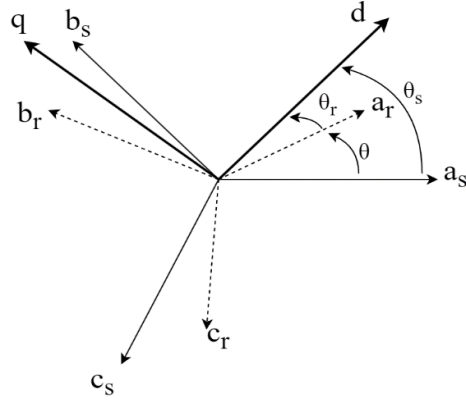


Figure II.6 : Représentation des axes de la machine

Les angles θ_s et θ_r sont naturellement liés à θ par la relation rigide.

$$\theta_s - \theta_r = \theta \quad (\text{II.19})$$

La matrice de changement de base $[P(\theta_s)]$ définie par :

$$[P(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_s & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta_s & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Et son inverse est défini par:

$$[P(\theta_s)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_s & -\sin\theta_s & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

On a ainsi :

$$[i_{dqo}] = [P(\theta_s)][i_{abc}] \quad (\text{II.22})$$

$$[V_{dqo}] = [P(\theta_s)][V_{abc}] \quad (\text{II.23})$$

$$[\phi_{dqo}] = [P(\theta_s)][\phi_{abc}] \quad (\text{II.24})$$

La matrice $[P(\theta_s)]$ et la représente la matrice de transformation

II.4.2.1 Modélisation de la MADA dans le repère de Park

$$[V_{sabc}] = [R_s][I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \quad (\text{II.25})$$

La transformation linéaire $[P(\theta_s)]$ appliquée à l'équation précédent :

$$[P(\theta_s)]^{-1}[V_{sdqo}] = [R_s][P(\theta_s)]^{-1} [I_{sdqo}] + \frac{d}{dt} ([P(\theta_s)]^{-1}[\Phi_{sabc}]) \quad (\text{II.26})$$

Soit en multipliant à gauche par $[P(\theta_s)]$:

$$[V_{sdqo}] = [R_s][I_{sdqo}] + \frac{d}{dt} ([\Phi_{sdqo}]) + [P(\theta_s)] \frac{d}{dt} ([P(\theta_s)]^{-1})[\Phi_{sdqo}] \quad (\text{II.27})$$

On démontre que :

$$[P(\theta_s)] \frac{d}{dt} ([P(\theta_s)]^{-1}) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} (\theta_s) \quad (\text{II.28})$$

Où :

$$\omega_s = \frac{d}{dt} (\theta_s) \quad (\text{II.29})$$

De la même manière, les transformations des grandeurs rotoriques sont effectuées.

On obtient les équations électriques du MADA dans le repère de Park :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + \omega_s \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Où V_{sd} , V_{sq} , V_{rd} , V_{rq} sont respectivement les tensions direct et quadrature du stator et rotor.

i_{sd} , i_{sq} , i_{rd} , i_{rq} sont respectivement les courants direct et quadrature du stator et rotor.

R_s et R_r sont respectivement les résistances des enroulements du stator et du rotor.

$$\Omega_s = p \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II.31})$$

Ω_{mec} est la vitesse électrique et p est le nombre de pair de pôles.

Le flux de statorique et de rotorique peut être exprimé comme :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

La puissance active et réactive du stator :

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

L'expression scalaire du couple :

$$C_{em} = p(\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \quad (\text{II.34})$$

On peut exprimer l'équation du couple par d'autres expressions telles que :

$$C_{em} = p \frac{M_{sr}}{L_s} (\Phi_{sq} i_{rd} - \Phi_{sd} i_{rq}) \quad (\text{II.35})$$

$$C_{em} = p \frac{M_{sr}}{L_r} (\Phi_{rd} i_{sq} - \Phi_{rq} i_{sd}) \quad (\text{II.36})$$

$$C_{em} = p \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} (\Phi_{rd} \Phi_{sq} - \Phi_{sd} \Phi_{rq}) \quad (\text{II.37})$$

$$C_{em} = p(\Phi_{rq} i_{rd} - \Phi_{rd} i_{rq}) \quad (\text{II.38})$$

II.4.3 Equation mécanique

Le principe fondamental de la dynamique nous permet d'écrire :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{em} - C_r - f \Omega_{mec} \quad (\text{II.39})$$

Avec :

$$\Omega_{mec} = \frac{\omega}{p} \quad (\text{II.40})$$

II.5 Onduleur de tension triphasé à trois niveaux

Un onduleur à trois niveaux est un circuit électronique de puissance qui convertit une tension continue en une tension alternative. Il se compose de trois commutateurs à semi-conducteurs de puissance,

généralement des transistors bipolaires (IGBT), qui sont connectés pour former deux convertisseurs en demi pont. Il est caractérisé par l'utilisation des diodes de blocage pour garantir le partage de tension approprié à travers les interrupteurs de puissance. L'un des principaux avantages du convertisseur à trois niveaux est sa capacité à produire des tensions de sortie de haute qualité avec un THD réduit. Cela le rend idéal pour une utilisation dans les applications qui nécessitent une alimentation électrique propre et stable, telles que les systèmes d'énergie renouvelable [26].

II.5.1 Présentation générale de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure N.P.C

La **Figure II.7** montre la topologie d'un onduleur triphasé à 3 niveaux à point neutre (NPC) [13].

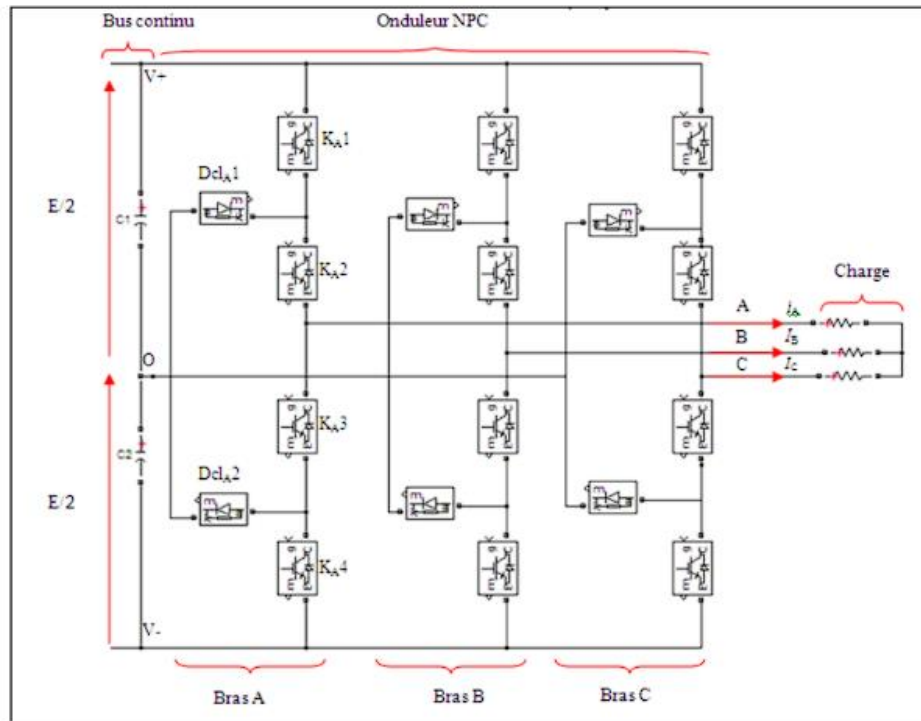


Figure II.7 : Topologie matérielle de l'onduleur triphasé à 3 niveaux NPC

Cette structure se compose de trois bras, chacun des trois bras (A, B et C) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés (K_{A1} , K_{A2} , K_{A3} et K_{A4} pour le bras A) et deux diodes de clamping ($DclA1$ et $DclA2$) connectées au point milieu du bus continu. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant.

Pour simplifier l'étude, on prend un bras d'onduleur NPC à trois niveaux, Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la V_{ao} entre la borne "a" de la charge pour les différents états possibles des interrupteurs et il faut montrer les séquences de conductions des interrupteurs **Figure II.8**.

Séquence a : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs K_1, K_2 sont passants et K_3, K_4 sont bloqués. La tension de sortie V_{ao} est $V_{ao} = +1/2E$. La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_3, K_4 vaut $+1/2E$

Séquence b : Génération du niveau intermédiaire V_{ao}

Les interrupteurs K_2, K_3 sont passants et K_1, K_4 sont bloqués, dans ce cas la tension de sortie V_{ao} est nulle, $V_{ao} = 0$. La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_1, K_4 vaut $+1/2E$

Séquence c : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs K_1, K_2 sont bloqués et K_3, K_4 sont passants. La tension de sortie V_{ao} est $V_{ao} = -1/2E$. Et la tension inverse appliquée aux interrupteurs K_1, K_2 vaut $+1/2E$

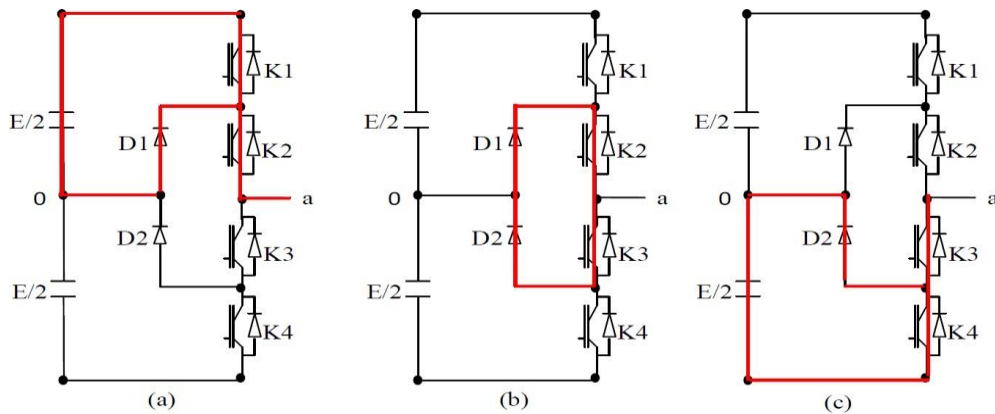


Figure II.8 : Les séquences de conductions des interrupteurs dans l'onduleur triphasé à 3 niveaux NPC

Les trois états sont montrés dans le **Tableau II.1**.

K1	K2	K3	K4	V_{ao}
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

Tableau II.1 : Etats possibles de l'onduleur à trois niveaux NPC

Les formes d'ondes d'un bras d'onduleur monophasé de type NPC sont données par la **Figure II.9**

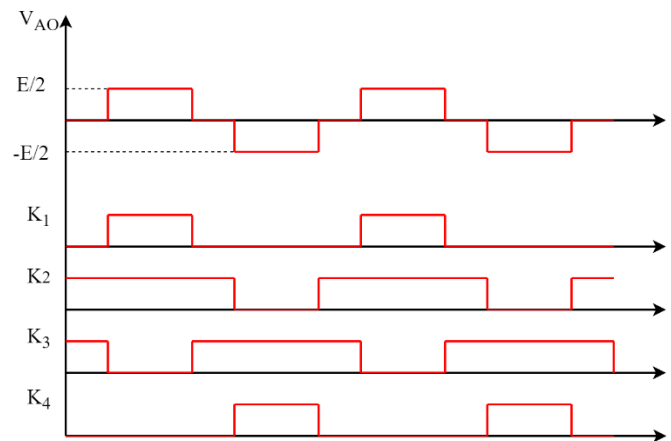


Figure II.9 : Les formes d'ondes d'un bras d'onduleur monophasé de type NPC

II.5.2 Commande par la modulation a triangles multiples

Cette technique est basée, dans son principe, sur la modulation sinusoïdale classique. Pour onduleur a trois niveaux, elle recommande l'utilisation de deux signaux triangulaires de même fréquence f_c Et de même amplitude AC (crête a crête) [13].

Ces signaux triangulaires sont comparés, pour chaque phase, avec un signal de référence d'amplitude A_m et de fréquence f_m . C'est la modulation sinusoïdale à double triangle **Figure II.10**.

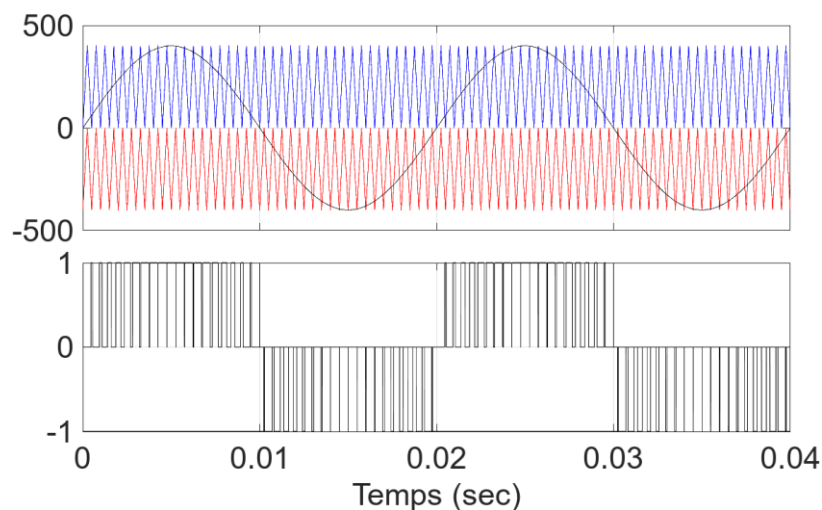


Figure II.10 : Génération des signaux de commande des interrupteurs par la modulation a doubles triangles pour un Onduleur NPC a trois niveaux

II.6 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons souligné l'importance de la conversion de l'énergie éolienne et de la modélisation des différents composants du système. Ces éléments sont essentiels pour comprendre le fonctionnement global des éoliennes et pour optimiser leur efficacité énergétique. La modélisation précise des pales, du multiplicateur de vitesse, de l'arbre mécanique, de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et des convertisseurs de puissance nous permet de mieux appréhender les interactions et les processus de conversion d'énergie.

Dans le prochain chapitre, nous approfondirons la commande et la régulation des éoliennes pour assurer leur intégration dans le réseau électrique, en visant à maximiser la production d'énergie éolienne, à améliorer la stabilité et la dynamique du système.

CHAPITRE III

Commande de la chaîne éolienne

III.1 Introduction

La commande de la chaîne de l'éolienne vise principalement à optimiser les paramètres de contrôle afin de maximiser la production d'énergie éolienne, réduire les pertes d'énergie, améliorer la stabilité du système et respecter les contraintes opérationnelles. Pour réguler la puissance active et réactive échangée entre la machine et le réseau, la puissance active est ajustée en fonction de la vitesse du vent dans un système de conversion d'énergie éolienne, tandis que le contrôle de la puissance réactive permet d'obtenir un facteur de puissance unitaire entre le stator et le réseau [27][28].

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'Algorithme de contrôle MPPT avec asservissement de vitesse et à la commande indirecte avec boucle de puissance Mada [29]. Le MPPT vise à optimiser l'efficacité de la conversion d'énergie en ajustant en temps réel la vitesse de rotation de l'éolienne pour maintenir celle-ci au point de puissance maximale. Cela permet d'exploiter au mieux les conditions variables du vent et d'augmenter la production d'énergie. D'autre part, la commande indirecte avec boucle de puissance MADA se concentre sur la régulation de la puissance active et réactive échangée entre l'éolienne et le réseau électrique [30] [31].

En étudiant ces deux méthodes de commande, nous visons à améliorer les performances globales de l'éolienne, en maximisant la production d'énergie, en réduisant les pertes et en garantissant la stabilité du système.

III.2 Régulateur de la vitesse (MPPT)

Le MPPT est une technique utilisée dans les systèmes éoliens pour maximiser la production d'énergie en ajustant les paramètres de charge des éoliennes en temps réel [32]. Le MPPT permet de trouver le point de fonctionnement optimal où la puissance générée par l'éolienne est maximale, en prenant en compte les variations de la vitesse du vent et les caractéristiques électriques de l'éolienne. Cela permet d'optimiser l'efficacité de conversion de l'énergie éolienne en électricité utilisable [29] [33].

Le calcul des régulateurs est basé sur la dynamique en boucle fermée à l'aide du principe de compensation des pôles. La boucle de régulation de la vitesse est présentée par le schéma bloc de la **Figures III.1**.

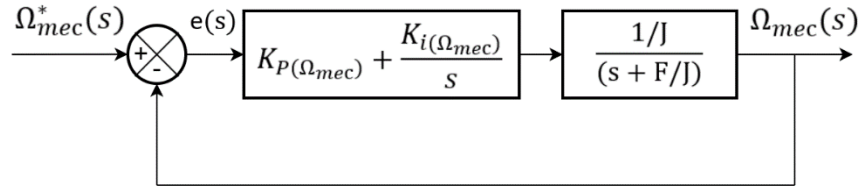


Figure III.1 : Schéma fonctionnel de régulation de la vitesse

La détermination des paramètres K_p et K_i du régulateur fait intervenir des méthodes classiques de calcul des régulateurs continus est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_p \Omega_{mec}}{S} \left(S + \frac{K_i \Omega_{mec}}{K_p \Omega_{mec}} \right) \quad (\text{III.1})$$

Par compensation :

$$\frac{F}{J} = \frac{K_i \Omega_{mec}}{K_p \Omega_{mec}} \quad (\text{III.2})$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{\Omega_{mec}(S)}{\Omega_{mec}^*(S)} = \frac{1}{\frac{J}{K_p \Omega_{mec}} S + 1} \quad (\text{III.3})$$

Le système du premier ordre sa fonction de transfert s'écrit :

$$\frac{\Omega_{mec}(S)}{\Omega_{mec}^*(S)} = \frac{K}{1 + \tau \cdot S} \quad (\text{III.4})$$

$$\tau_{bf} = \frac{J}{K_p \Omega_{mec}} \quad (\text{III.5})$$

Le régulateur de la vitesse Ω_{mec} , est :

$$K_{p\Omega_{mec}} = \frac{J}{\tau} \quad (\text{III.6})$$

$$K_{i\Omega_{mec}} = \frac{F}{\tau} \quad (\text{III.7})$$

III.2.1 Résultats de simulation et interprétations du MPPT

Afin de valider la technique de contrôle régulateur de la vitesse MPPT par des régulateurs PI, une étude de simulation a été effectuée sous l'environnement Simulink/Matlab.

Pour effectuer des tests de cette régulation on a pris un signal aléatoire représentant le vent entre 4 et 9 m/s afin d'observer le comportement de cette régulation **Figures III.2**.

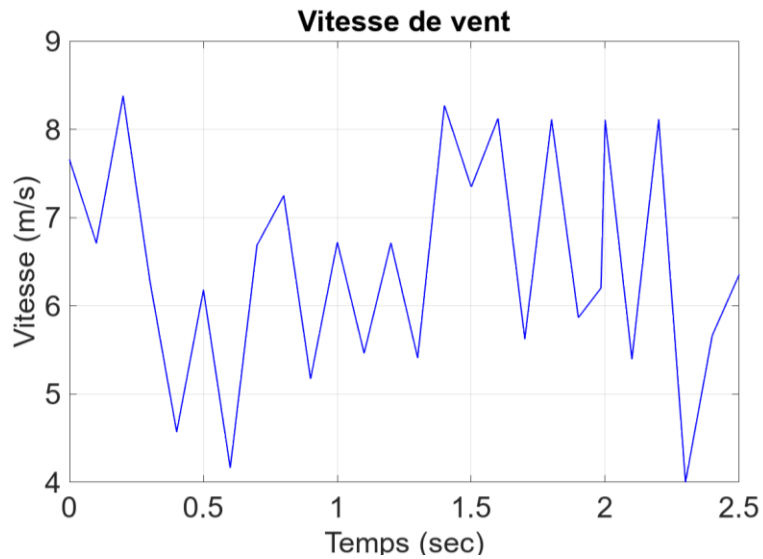


Figure III.2 : Signal du Vitesse de vent

Les résultats de simulation **Figures III.3** montre l'évolution de la vitesse mécanique avec la vitesse de référence. Le PI est implémenté dans le modèle MPPT pour ajuster la vitesse de rotation des pales de l'éolienne pour maximiser la puissance produite.

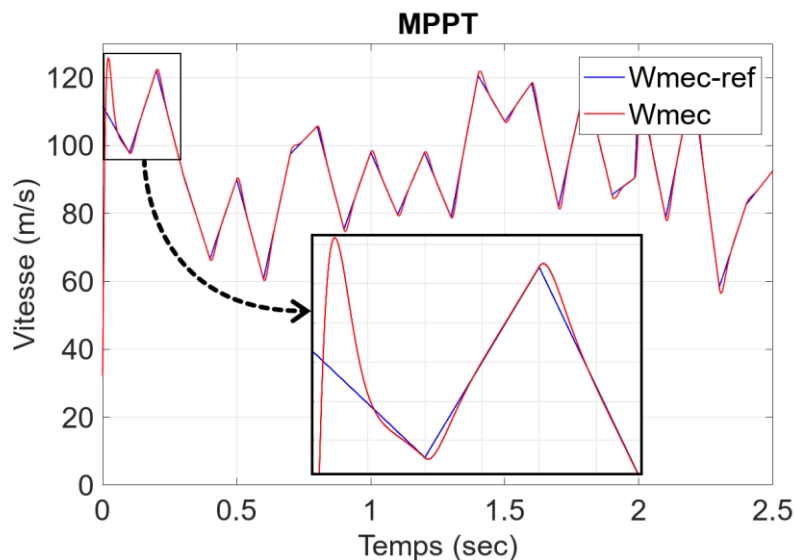


Figure III.3 : Régulation de la vitesse par PI

Le couple électromagnétique, résultant de la régulation de la vitesse avec l'algorithme MPPT, est représenté dans la **Figure III.4**.

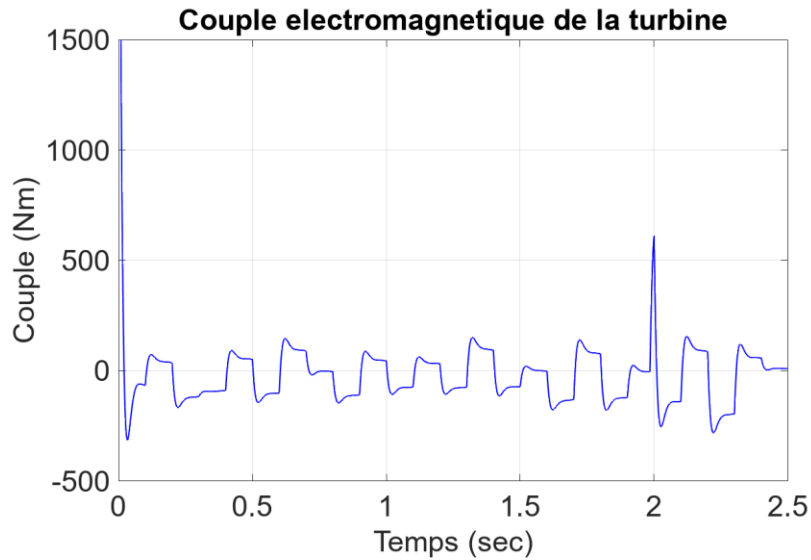


Figure III.4 : Couple électromagnétique

III.3 Commande de la MADA

III.3.1 Commande vectorielle

La machine asynchrone constitue un système de modèle hautement non-linéaire où le contrôle du flux ne peut être découplé de celui du couple. Deux allemands (Hasse 1969 et Blaschke 1972) ont proposé une technique permettant de maîtriser ces difficultés [34].

Les techniques de la commande vectorielle appelées aussi commandes par orientation du flux ont pour but de réaliser le découplage entre le contrôle du flux et du couple électromagnétique, ce qui permet d'assimiler la commande de la MAS à la commande de la MCC à excitation séparée. Par construction, produit un champ magnétique statorique toujours perpendiculaire au rotor, c'est ce comportement que l'on va chercher à obtenir pour les machines alternatives [32].

Elle tire son idée de base du modèle diphasé " dq " de la MAS dans le repère lié au champ tournant, où le vecteur courant statorique I_s (I_{sd} , I_{sq}) sera décomposé en deux composantes : une produit le flux et l'autre le couple [35].

III.3.2 Modèle de la MADA à flux statorique orienté

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine asynchrone à double alimentation. On oriente le repère dq afin que l'axe d soit aligné sur le flux statorique ϕ_s .

Ainsi :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s \\ \phi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Les systèmes d'équation peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \phi_s \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \phi_s \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \phi_s = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ 0 = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

L'expression du couple électromagnétique devienne alors :

$$C_{em} = -P \frac{M_{sr}}{L_s} \phi_s i_{rq} \quad (\text{III.12})$$

Si l'on suppose le réseau électrique est stable, cela conduit à un flux statorique ϕ_s constant. Cela montre que le couple électromagnétique C_{em} est directement proportionnel au courant rotorique i_{rq} en quadrature.

Les puissances active et réactive statorique, dans le repère orthogonal, s'écrivent :

$$\begin{cases} P = V_s i_{sq} \\ Q = V_s i_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Les puissances active P et réactive Q sont donc en fonction des courants statoriques i_{sd} et i_{sq} respectivement, sur lesquels nous avons au qu'une action directe.

A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{V_s}{\omega_s L_s} - \frac{M_{sr}}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = -\frac{M_{sr}}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$\begin{cases} P = -\frac{V_s M_{sr}}{L_s} i_{rq} \\ Q = -\frac{V_s M_{sr}}{L_s} i_{rd} + \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. La puissance active est directement proportionnelle au courant rotorique quadratique, et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique direct.

III.3.3 Expressions des tensions rotoriques

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine. En remplaçant dans l'équation des flux les courants statoriques par l'expression (III.14), on obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} - \frac{M_{sr} V_s}{\omega_s L_s} \\ \phi_{rq} = \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques, on trouve :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}\right) \frac{di_{rd}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}\right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}\right) \frac{di_{rq}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}\right) i_{rd} + g \frac{M_{sr} V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}\right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}\right) i_{rd} + g \frac{M_{sr} V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances actives et réactives engendrées sont représentées dans la **Figures III.5**.

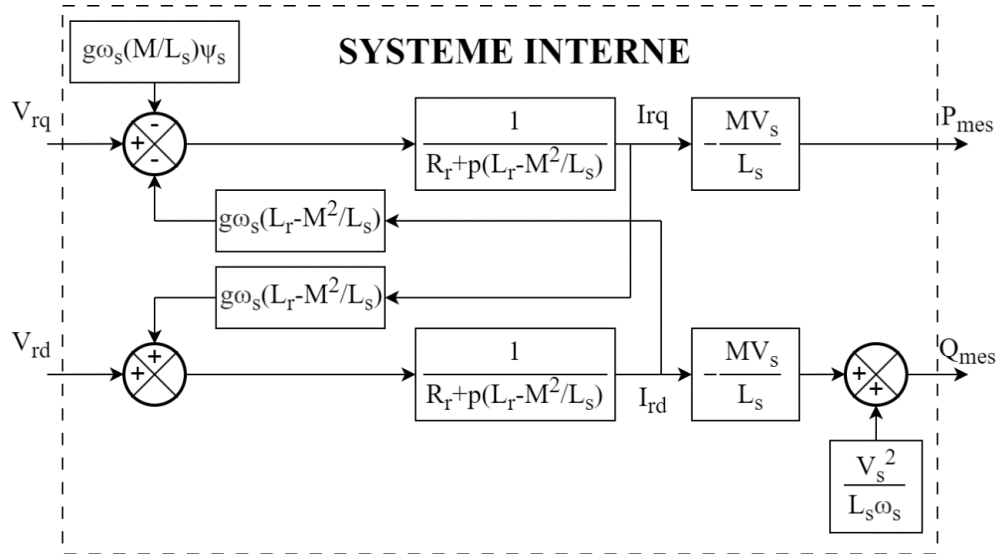


Figure III.5 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances

III.3.4 Commande du MADA avec boucle de puissance

Afin avoir les milliers performance nous avons choisir le contrôle indirect des puissances actives et réactives avec boucle de puissance [36][37]. La structure est composée de deux boucles, la première est celle du courant, et la deuxième boucle est celle des puissances **Figures III.6**. Ainsi on aboutit à une régulation de la puissance à partir de consignes que l'on impose P_{ref} , Q_{ref} .

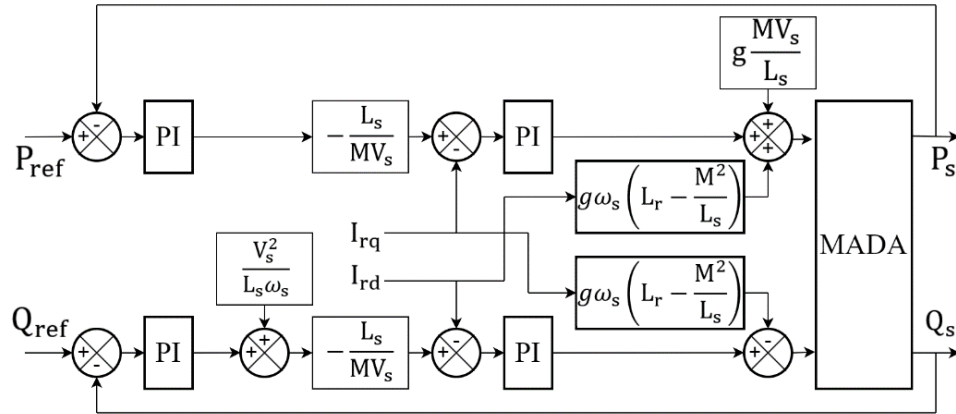


Figure III.6 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance

III.3.5 Dimensionnement du régulateur

Le régulateur de type proportionnel-intégral (PI) est utilisé pour commander la GADA (Génération d'énergie éolienne à double alimentation). Sa simplicité d'implémentation et sa rapidité en font un choix intéressant, offrant des performances acceptables. C'est pourquoi nous avons choisi de l'étudier dans le cadre global du système de génération éolien.

La Figure III.7 montre la boucle interne corrigée par un régulateur (PI) dont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{K_i}{s}$ correspondant aux deux régulateurs utilisés.

III.3.5.1 Commande des courants

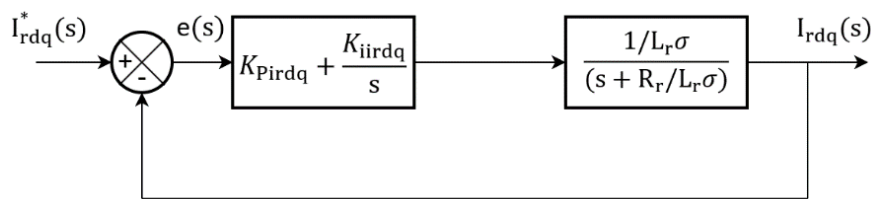


Figure III.7 : Réglages des Courants par un PI

La détermination des paramètres K_p et K_i du régulateur fait intervenir des méthodes classiques de calcul des régulateurs continus est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{pirdq}}{S} \left(S + \frac{K_{iirdq}}{K_{pirdq}} \right) \tag{III.19}$$

Par compensation :

$$\frac{R_r}{L_r \cdot \sigma} = \frac{K_{iirdq}}{K_{Pirdq}} \quad (\text{III.20})$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{I_{rdq}(S)}{I_{rdq}^*(S)} = \frac{1}{\frac{L_r \cdot \sigma}{K_{Pirdq}} S + 1} \quad (\text{III.21})$$

Le système du premier ordre sa fonction de transfert s'écrit :

$$\frac{I_{rdq}(S)}{I_{rdq}^*(S)} = \frac{K}{1 + \tau_1 \cdot S} \quad (\text{III.22})$$

Le régulateur du courant rotorique dans les deux axes est :

$$K_{Pirdq} = \frac{L_r \cdot \sigma}{\tau_1} \quad (\text{III.23})$$

$$K_{iirdq} = \frac{R_r}{\tau_1} \quad (\text{III.24})$$

III.3.5.2 Commande des puissances

La Figure III.8 montre la boucle des puissances est corrigé par un régulateur (PI)

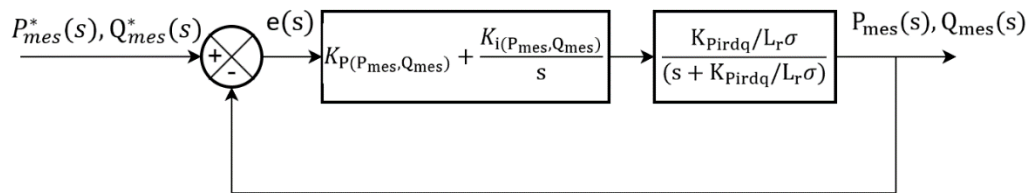


Figure III.8 : Réglages des puissances par un PI

Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{P(P_{mes}, Q_{mes})}}{S} \left(S + \frac{K_{i(P_{mes}, Q_{mes})}}{K_{P(P_{mes}, Q_{mes})}} \right) \quad (\text{III.25})$$

Par compensation :

$$\frac{K_{Pirdq}}{L_r \cdot \sigma} = \frac{K_{i(P_{mes}, Q_{mes})}}{K_{P(P_{mes}, Q_{mes})}} \quad (\text{III.26})$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{P_{mes}(S), Q_{mes}(S)}{P_{mes}^*(S), Q_{mes}^*(S)} = \frac{1}{\frac{L_r \cdot \sigma}{K_{P(P_{mes}, Q_{mes})} \cdot K_{Pirdq}} S + 1} \quad (III.27)$$

Le système du premier ordre sa fonction de transfert s'écrit :

$$\frac{P_{mes}(S), Q_{mes}(S)}{P_{mes}^*(S), Q_{mes}^*(S)} = \frac{K}{1 + \tau_2 \cdot S} \quad (III.28)$$

$$\tau_2 = \frac{L_r \cdot \sigma}{K_{P(P_{mes}, Q_{mes})} \cdot K_{Pirdq}} \quad (III.29)$$

Le régulateur de la puissance active et réactive est :

$$K_{P(P_{mes}, Q_{mes})} = \frac{L_r \cdot \sigma}{\tau_2 \cdot K_{Pirdq}} \quad (III.30)$$

$$K_{i(P_{mes}, Q_{mes})} = \frac{1}{\tau_2} \quad (III.31)$$

Avec :

$$\tau_2 > \tau_1 \quad (III.32)$$

III.3.6 Résultats de simulation et interprétations

Afin de valider la technique de contrôle indirecte des puissances actives et réactives par des régulateurs PI, une étude de simulation a été effectuée sous l'environnement Simulink/Matlab.

Toutes les figures de simulation qui nous permettent d'évaluer les performances apportées par le système de réglage considéré pour un fonctionnement à vitesse constante.

Pour la boucle de puissance : $K_{p(P_{mes}, Q_{mes})} = 10^{-3}$, $K_{i(P_{mes}, Q_{mes})} = 100$

Pour la boucle de courant : $K_{p(i_{rd}, i_{rq})} = 857.1425$, $K_{i(i_{rd}, i_{rq})} = 6.2 \cdot 10^4$

Pour évaluer notre chaîne de commande, la régulation de ce système utilise une référence de puissance active dérivée du couple électromagnétique généré par la turbine.

D'après la **Figure III.9**, il est clair que la puissance active de la chaîne éolienne suit sa référence.

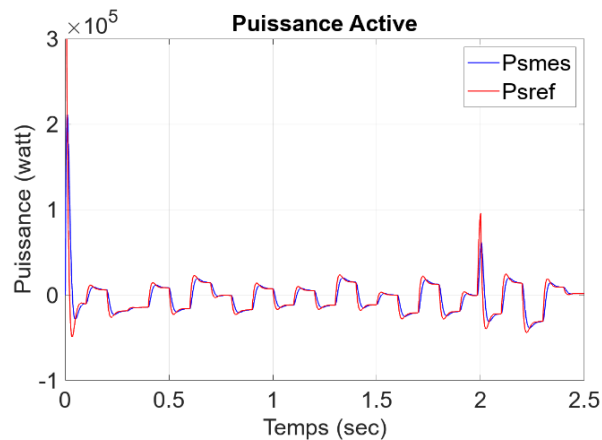


Figure III.9 : La puissance active de la chaîne pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance

Afin d'obtenir des résultats optimaux et de mener des tests approfondis sur l'étude de cette régulation, nous avons soumis ce système à des échelons de puissance active et réactive. Grâce à cette approche, nous avons pu observer de manière précise le comportement de cette régulation.

Toutes les figures de simulation qui nous permettent d'évaluer les performances apportées par le système de réglage considéré pour un fonctionnement à vitesse constante.

Les résultats de la simulation sont présentés dans les **Figure III.10**. Les puissances active et réactive suivent parfaitement et clairement leurs références sans dépassement ni erreurs dynamiques.

D'après **Figure III.11**. Nous pouvons constater que le flux statorique direct suit sa référence avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès.

On obtient aussi des bons résultats en termes de dynamique et de réponse aux consignes des courants rotorique direct et quadrature qui ont respectivement l'image des puissance réactive et active **Figure III.12**.

Dans la **Figure III.13** On remarquer que le couple électromagnétique dépend directement de la puissance active et ceci traduit par sa forme identique que la puissance active est une conséquence du couple électromagnétique.

Les résultats de simulation obtenus de cette régulation montrent bien les grandes performances du contrôle indirecte des puissances actives et réactives avec boucle de puissance.

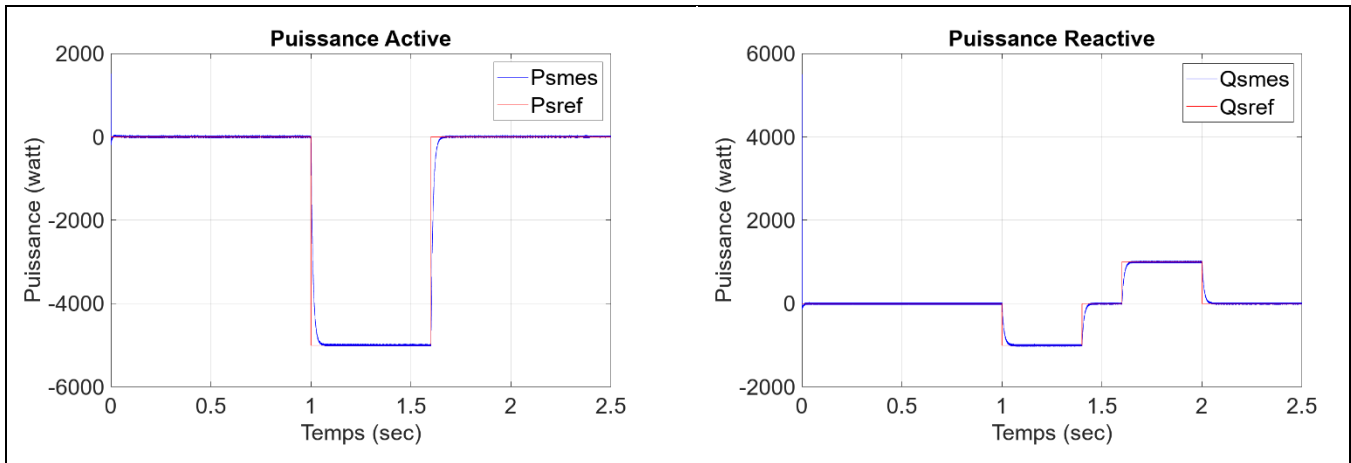


Figure III.10 : La puissance active et réactive statorique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance

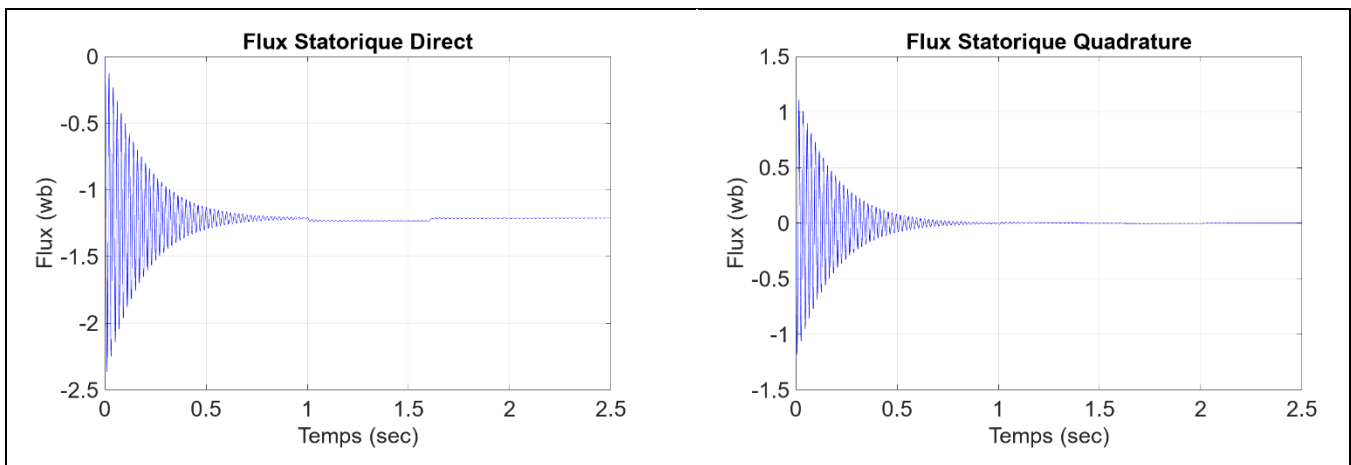


Figure III.11 : Le flux statorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle directe de la puissance

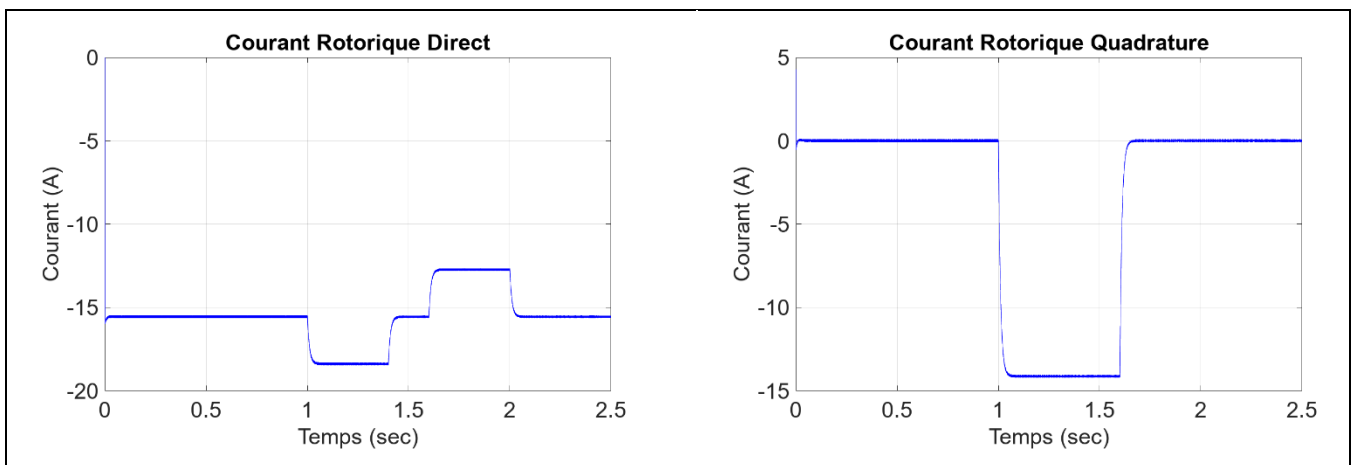


Figure III.12 : Le courant rotorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance

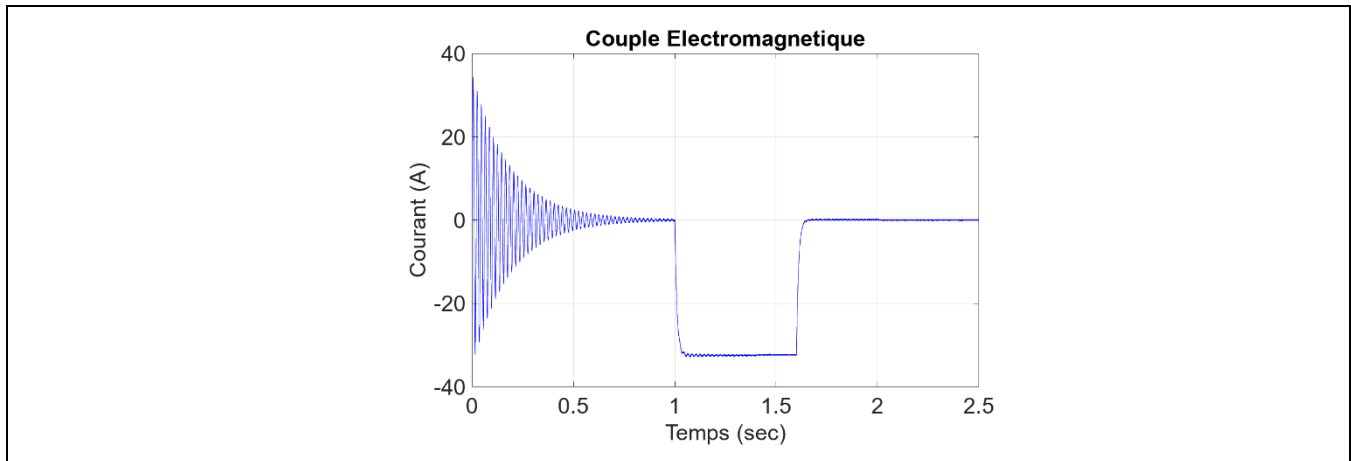


Figure III.13 : Couple électromagnétique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance

III.3.7 Etude de robustesse

Pour une évaluation plus précise de la méthode de contrôle, des tests de robustesse sont nécessaires, ce qui sera l'objectif de cette section, notamment pour les systèmes impliquant plusieurs entités en interaction ou présentant de fortes variations de paramètres, ainsi que dans les cas où la mesure des paramètres est entachée d'incertitudes importantes.

L'objectif de l'essai de robustesse est d'évaluer la sensibilité de la commande aux variations potentielles des paramètres du système. En effet, les calculs des régulateurs sont basés sur des fonctions de transfert dont les paramètres sont supposés constants. Cependant, ces paramètres sont sujets à des variations induites par différents phénomènes physiques tels que la saturation des inductances ou le chauffage des résistances. De plus. Les conditions de l'essai sont les suivantes :

- Les résistances R_s et R_r sont multipliées par 1.8
- Les inductances L_s , L_r et M_{sr} sont divisées par 2

Les variations des paramètres de la machine asynchrone à double alimentation n'ont pas d'impact sur la commande indirecte avec boucle de puissance. Cependant, l'introduction d'une boucle supplémentaire basée sur la puissance permet d'obtenir de meilleurs résultats.

La commande indirecte avec boucle de puissance offre un système suffisamment robuste. Nous utilisons des régulateurs PI qui, en eux-mêmes, ne garantissent pas une grande robustesse. Cependant, la boucle de puissance assure un niveau de robustesse acceptable, montré dans la Figure III.14.

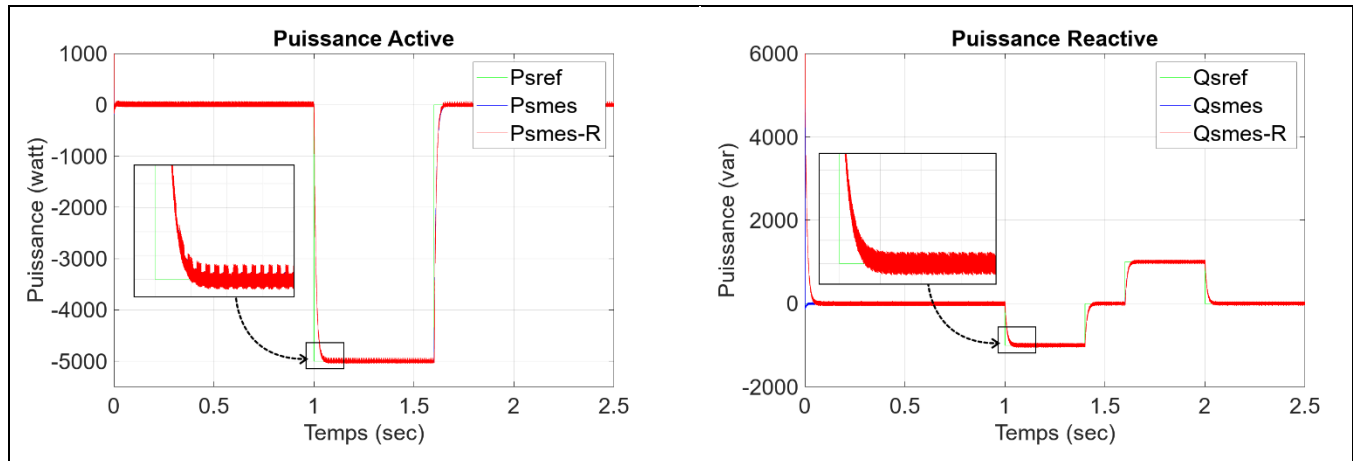


Figure III.14 : Etude de robustesse pour la puissance active et réactive statorique par PI Classique

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la commande du régulateur de vitesse (MPPT) Ainsi que les différentes étapes de la commande de la MADA, notamment la commande vectorielle, et nous avons approfondi la commande indirecte avec boucle de puissances. Nous avons présenté les résultats de simulation et les interprétations concernant le MPPT et de la MADA avec un contrôleur PI.

Dans le chapitre suivant, notre approche proposée consiste à améliorer les paramètres du contrôleur PI en utilisant l'optimisation par essaim de particules (PSO). Le PSO est utilisé en mode hors ligne pour déterminer les valeurs optimales des paramètres du contrôleur (K_p et K_i).

CHAPITRE IV

Commande par PSO

IV.1 Introduction

Le contrôleur PI est largement reconnu pour son efficacité dans le domaine du contrôle des machines. Cependant, il présente certaines limitations lorsqu'il s'agit de trouver un équilibre entre la performance dynamique et la robustesse, ainsi qu'entre les performances dynamiques et le coût énergétique du générateur. Ces compromis sont souvent difficiles à atteindre avec les contrôleurs PI classiques traditionnellement utilisés dans les systèmes de contrôle [38] [39].

Pour surmonter ces limitations, nous avons fait le choix d'appliquer une approche avancée de contrôle appelée PI-PSO (Proportional-Integral Particle Swarm Optimization). Cette méthode préférable en raison de sa facilité de mise en œuvre dans les environnements de systèmes embarqués. Elle combine les avantages du contrôleur PI traditionnel avec les capacités d'optimisation du PSO, afin de rechercher de manière plus efficace le meilleur compromis entre les objectifs contradictoires [39] [40].

En utilisant la commande PI-PSO, nous espérons obtenir une amélioration significative de la performance du contrôle, en optimisant la vitesse de rotation des pales de l'éolienne pour maximiser la puissance produite. En comparant les résultats obtenus avec la commande PI traditionnelle et la commande PI-PSO, nous pourrions évaluer de manière approfondie les avantages et les limitations de chaque approche dans le contexte spécifique de notre étude.

IV.2 Optimisation d'essaim de particules (PSO)

L'optimisation des essaims de particules est une technique de recherche ou d'optimisation heuristique inspirée du comportement coopératif des volées d'oiseaux ou des bancs de poissons. Avec un système de communication extrêmement complexe, les oiseaux ou poissons ci-après appelés particules interagissent les uns avec les autres. Outre les compétences de communication, les particules se caractérisent par une sorte de mise à jour du meilleur des performances passées dans le vol actuel [41][42].

Le PSO (Optimisation par Essaim de Particules) permet d'obtenir des résultats de meilleure qualité de manière plus rapide que d'autres méthodes d'optimisation avec peu de paramètres à ajuster, ce qui le rend particulièrement attrayant [41].

On constate également que PSO a été appliqué avec succès dans de nombreux domaines tels que l'optimisation de fonctions, la formation de réseaux de neurones artificiels, les contrôleurs flous, ainsi que d'autres domaines où les algorithmes génétiques peuvent être utilisés [43].

IV.2.1 Principe de base d'un PSO

Le PSO (Optimisation par Essaim de Particules) est un algorithme d'optimisation qui utilise des particules pour explorer un espace de recherche. Chaque particule ajuste sa position et sa vitesse en se basant sur les mouvements des autres particules dans le groupe. Les particules utilisent des règles simples pour maintenir la cohésion du groupe. L'algorithme fonctionne en évaluant la qualité de la position de chaque particule et en conservant en mémoire la meilleure performance obtenue jusqu'à présent. Les particules communiquent entre elles pour obtenir les meilleures performances de leurs voisines. Le choix du prochain mouvement est basé sur la vitesse actuelle, la meilleure position actuelle et la meilleure performance des voisines. Des modifications aléatoires limitées favorisent l'exploration de l'espace de recherche. Des équations de mouvement sont utilisées pour programmer l'algorithme, et il existe une analyse mathématique pour déterminer les conditions de convergence et les paramètres à choisir [39][44].

IV.2.2 Modélisation Mathématique du PSO

Chaque particule (x_{ij}), définie aléatoirement par sa vitesse initiale et sa position, tente d'explorer l'espace de recherche à travers des positions de test itératives pour atteindre son objectif en suivant les expressions données par [40] :

$$V_{ij}(t + 1) = W \cdot V_{ij}(t) + C_1 \cdot r_1 \left(P_{best_{ij}} - x_{ij}(t) \right) + C_2 \cdot r_2 \left(G_{best_j} - x_{ij}(t) \right) \quad (IV.1)$$

$$x_{ij}(t + 1) = V_{ij}(t + 1) + x_{ij}(t) \quad (IV.2)$$

Où $V_{ij}(t)$ représente la particule $i^{ème}$ vitesse avec une j dimension à l'itération t , $x_{ij}(t)$ représente la particule $i^{ème}$ position avec une j dimension à l'itération t , P_{best} est la meilleure position antérieure de la $i^{ème}$ particule, G_{best} est la meilleure particule parmi toutes la population, W est le facteur de poids d'inertie, (C_1 et C_2) sont les constantes d'accélération, (r_1 et r_2) sont les nombres entiers aléatoires entre [0-1], et n est la taille de l'essaim.

IV.2.3 L'algorithme PI-PSO

La méthode proposée utilise le PSO pour optimiser les paramètres du contrôleur PI des courants de rotor et puissance active et réactive, le PSO est utilisé hors ligne pour déterminer les paramètres optimaux du contrôleur (K_p et K_i) du GADA [44].

La **Figure IV.1**. Montre le schéma bloc du contrôleur PI-PSO. La méthode utilisée pour le réglage des paramètres du contrôleur PI est soutenue par une base algorithmique.

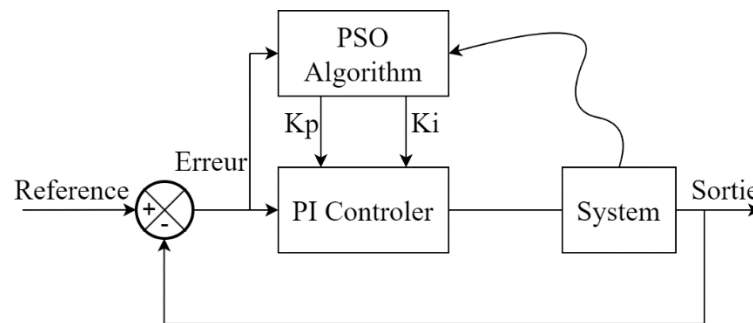


Figure IV.1 : Schéma bloc du contrôleur PI-PSO

Les étapes de L'approche basée sur PSO pour trouver la valeur maximale globale de la fonction objective, comme suite [38] :

1. Introduire la fonction de transfère dans le script.
2. Initialisation : Initialiser les positions et les vitesses des particules de manière aléatoire dans l'espace de recherche.
3. Calculer les valeurs de fitness pour chaque particule en utilisant la fonction objective.
4. Calculer de la meilleure personnelle P_{best} globale G_{best} .
5. Mise à jour de la meilleure position, vitesse personnelle P_{best} et globale G_{best} .
6. Calcule des paramètres K_p , K_i du Contrôleur PI.
7. Répéter les étapes 3 à 6 jusqu'à atteindre le nombre maximum d'itérations
8. Récupérer les meilleurs paramètres K_p , K_i du Contrôleur PI.

L'organigramme de l'algorithme PSO pour calculer les paramètres K_p , K_i du Contrôleur PI est illustré à la Figure IV.2.

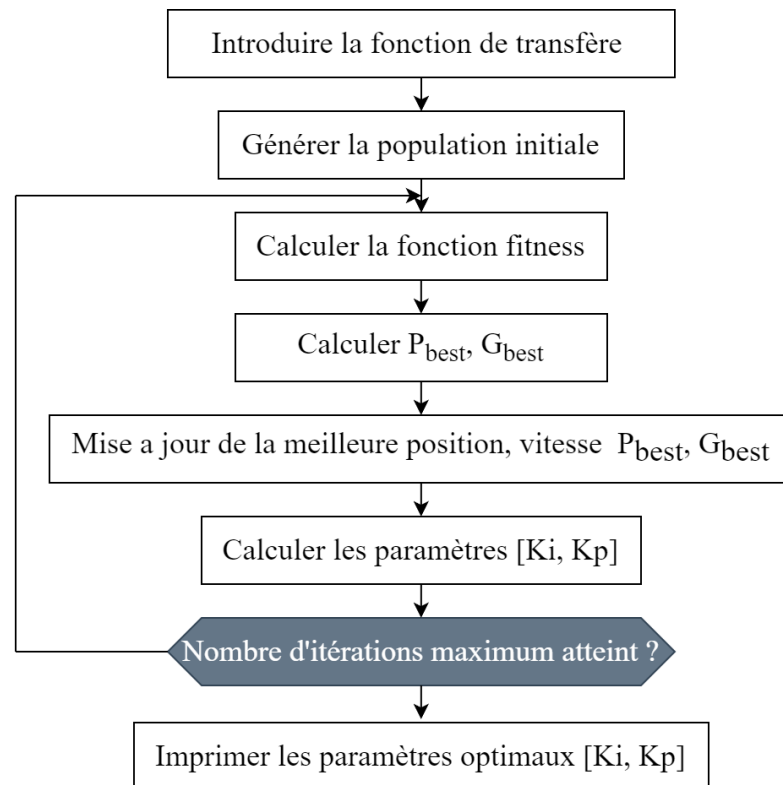


Figure IV.2 : L'organigramme de l'algorithme PSO

IV.2.4 Avantages et inconvénients du PSO

IV.2.4.1 Avantages

Le PI-PSO (Particle Swarm Optimization) présente les avantages suivants [45] :

- Le PSO est facile à comprendre et à implémenter.
- Le PSO dispose d'un nombre limité de paramètres.
- Exploration efficace de l'espace de recherche grâce à une approche en essaim coordonnée.
- Adaptabilité aux changements de l'environnement de recherche en ajustant le comportement des particules.
- Convergence rapide vers des solutions optimales en exploitant les connaissances collectives du groupe.

IV.2.4.2 Inconvénients

Le PI-PSO présente les avantages suivants :

- Les paramètres du PSO sont sensibles et peuvent avoir une influence significative sur les performances de l'algorithme. Un mauvais réglage de ces paramètres peut entraîner une convergence lente ou une recherche inefficace.
- Le PSO manque une base mathématique solide pour l'analyse [45].

IV.3 Résultats de simulation et interprétations par PSO

IV.3.1 Partie mécanique

Afin de valider la technique de contrôle indirecte des puissances actives et réactives par des régulateurs PI-PSO, une étude de simulation a été effectuée sous l'environnement Simulink/Matlab.

Les résultats de la simulation présentés dans la **Figure IV.3** mettent en évidence l'évolution de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse de référence. Le contrôleur PI-PSO est intégré au modèle MPPT afin d'améliorer la vitesse de rotation des pales de l'éolienne, dans le but de maximiser la puissance générée.

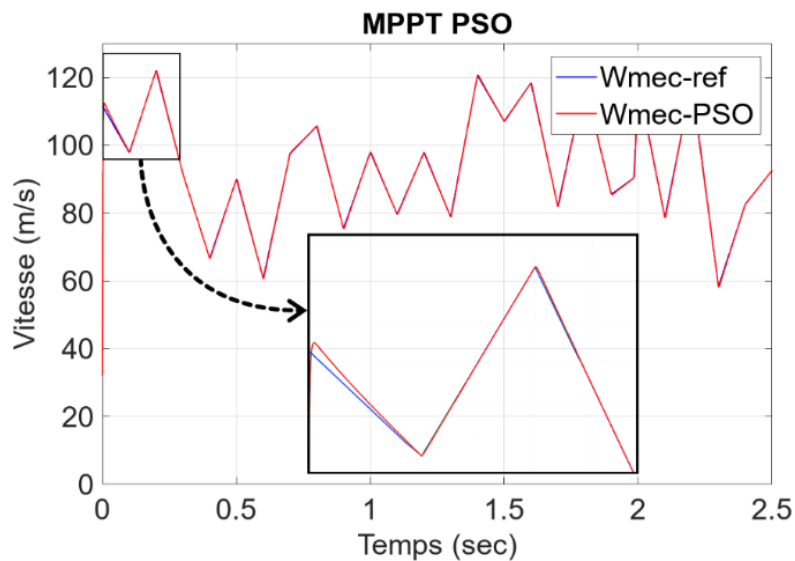


Figure IV.3 : Régulation de la vitesse par PI-PSO

IV.3.2 Partie électrique

Afin de valider la technique de contrôle indirect des puissances actives et réactives par des régulateurs PI-PSO, une étude de simulation a été effectuée sous l'environnement Simulink/Matlab.

Les figures données dans cette section témoignent de l'excellente dynamique de notre système de régulation et de l'absence d'erreur statique.

Les simulations réalisées par algorithme basée sur un PI-PSO démontrent les performances remarquables de notre approche de contrôle indirect des puissances actives et réactives avec boucle de puissance. Cela est confirmé par la capacité à suivre précisément les références de puissance (active et réactive), comme le montre la **Figure IV.4**.

La **Figure IV.5** illustre les résultats du flux statorique le long des axes d et q obtenus par à l'algorithme PI-PSO. Le flux statorique direct suit sa référence avec une composante quadrature presque nulle.

Selon la **Figure IV.6**, les courants rotoriques direct et quadrature, qui ont respectivement l'image des puissance réactive et active, suivent la référence avec une erreur presque nulle.

Le couple électromagnétique, qui dépend directement de la puissance active, est représenté de manière identique à celle de la puissance active dans la **Figure IV.7**.

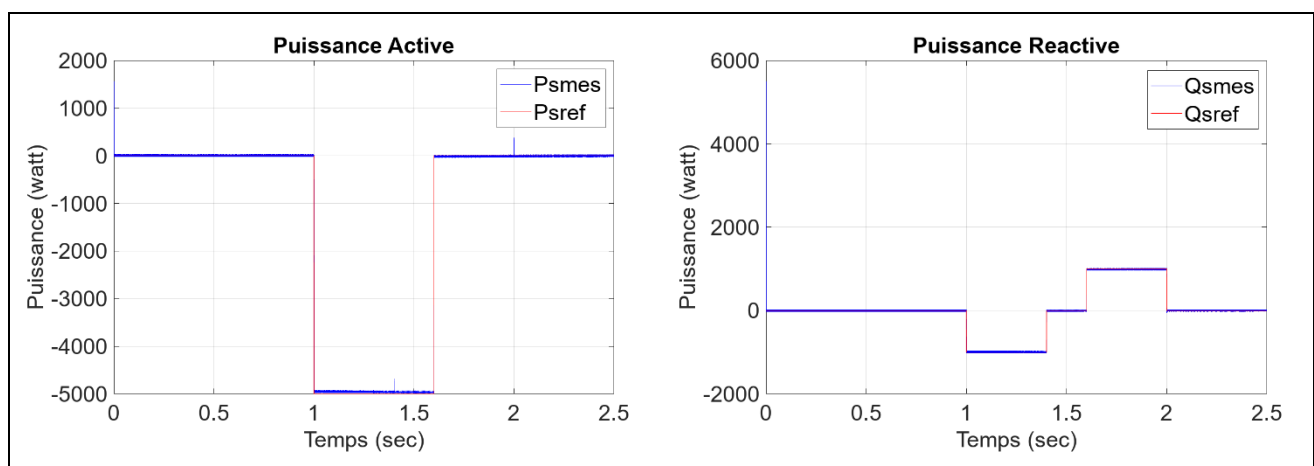


Figure IV.4 : La puissance active et réactive statorique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance par PI-PSO

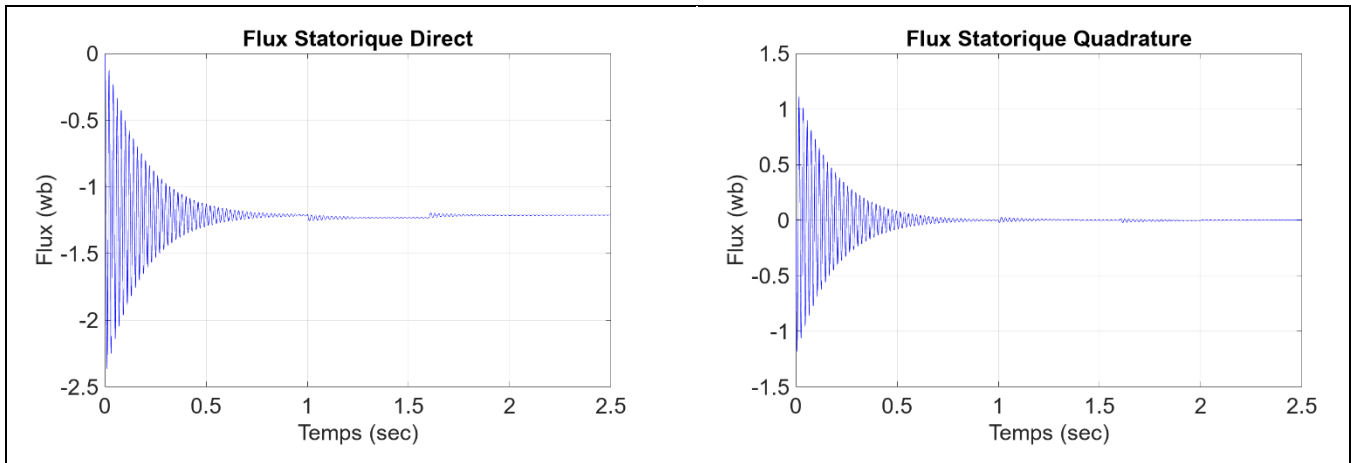


Figure IV.5 : Le flux statorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle directe de la puissance par PI-PSO

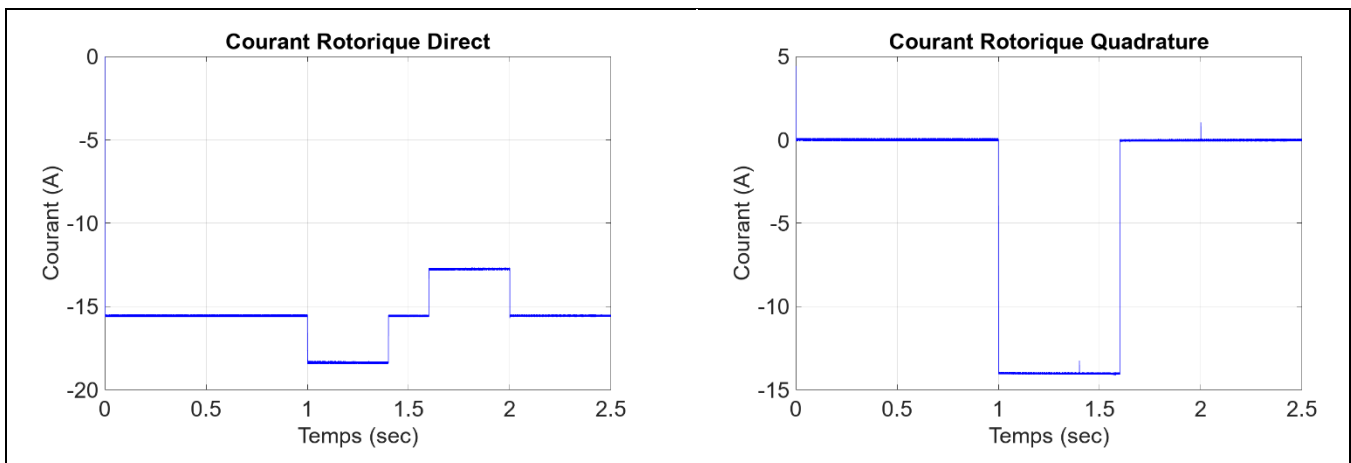


Figure IV.6 : Le courant rotorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance par PI-PSO

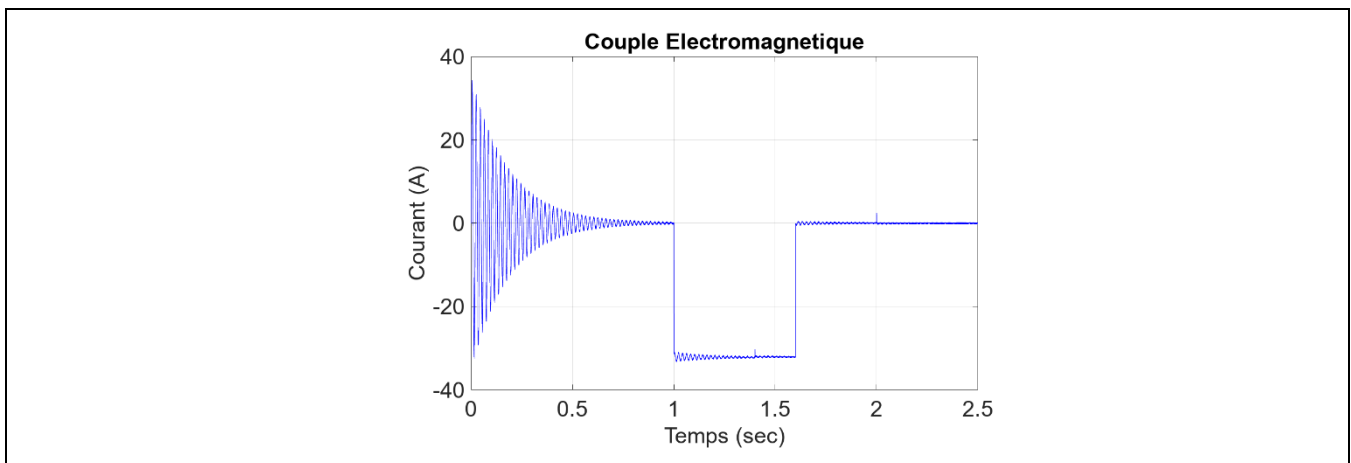


Figure IV.7 : Couple électromagnétique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance par PI-PSO

IV.3.3 Etude de robustesse

Afin de vérifier la résistance du contrôleur flou face aux variations des paramètres, nous avons entrepris de refaire la même simulation qui avait été réalisée précédemment pour le réglage de la puissance avec le régulateur PI classique.

Les résultats dans la **Figure IV.8** mettent en évidence l'absence d'effets indésirables sur les réponses dynamiques lors de la variation des paramètres de la machine asynchrone. Cela démontre la robustesse du contrôleur PI-PSO face aux variations paramétriques.

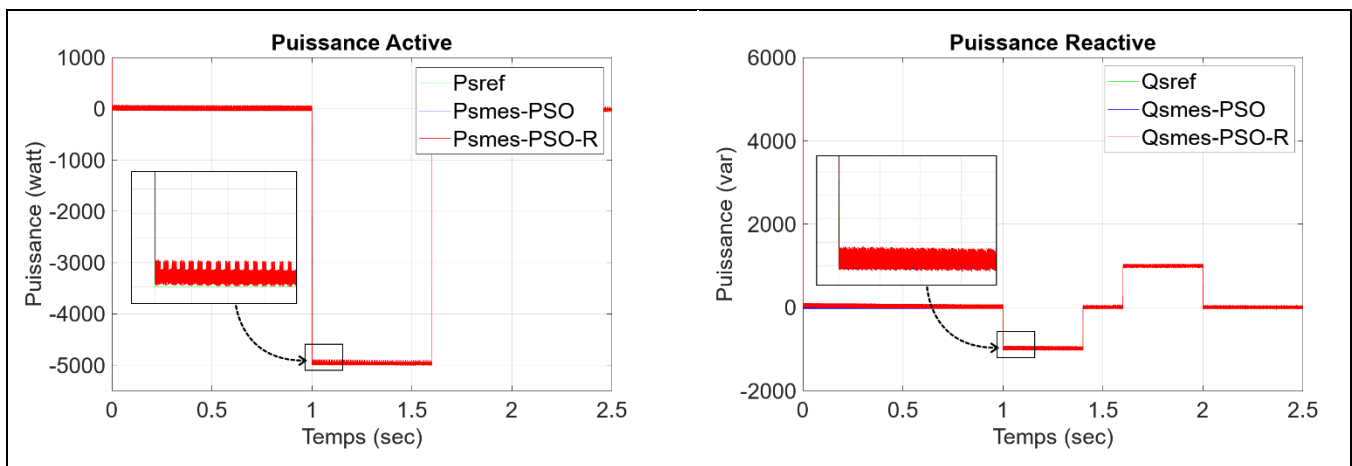


Figure IV.8 : Etude de robustesse pour la puissance active et réactive statorique par PI-PSO

IV.4 Etude comparative

IV.4.1 Partie électrique

Dans Pi-PSO, l'algorithme de PSO est utilisé pour ajuster les paramètres du contrôleur PI afin d'optimiser la performance du système de contrôle. Cela peut permettre d'améliorer la performance du système, telle que la précision de la régulation et le temps de réponse.

L'algorithme PSO est ensuite utilisé pour trouver les gains optimaux des contrôleurs PI pour les courants rotorique et la puissance active et réactive.

Le **Tableau IV.1** représente une comparaison entre les deux techniques.

Contrôleur		K_p	K_i
PI Classique	Courant (i_{rd}, i_{rq})	10^{-3}	100
	Puissance (P, Q)	857.1425	$6.2 \cdot 10^4$
PI-PSO	Courant (i_{rd}, i_{rq})	100	100
	Puissance (P, Q)	100	100

Tableau IV.1 : Les paramètres du contrôleur PI et PI-PSO

En résumé, Pi-PSO combine les avantages de PI et de PSO pour optimiser les paramètres du contrôleur PI. Il ressort clairement des résultats dans le Tableau IV.2 qu'il y a une réduction de temps de réponse des puissances actives et réactives ainsi que l'erreur reste nulle lorsque la méthode PSO proposée est utilisée.

Contrôleur	Temp de réponse	Erreur
PI Classique	31.35 ms	Nulle
PI-PSO	0.1 ms	Nulle

Tableau IV.2 : Comparaison entre les résultats de régulation avec PI Classique et PI réglé par PSO

La Figure IV.9 illustre la comparaison entre les résultats de régulation de la puissance active et réactive, réalisée avec le PI classique et l'optimisation par PSO. Cette représentation met en évidence une nette réduction du temps de réponse des puissances actives et réactives, ainsi qu'une erreur presque nulle lorsque la méthode PI-PSO est utilisée.

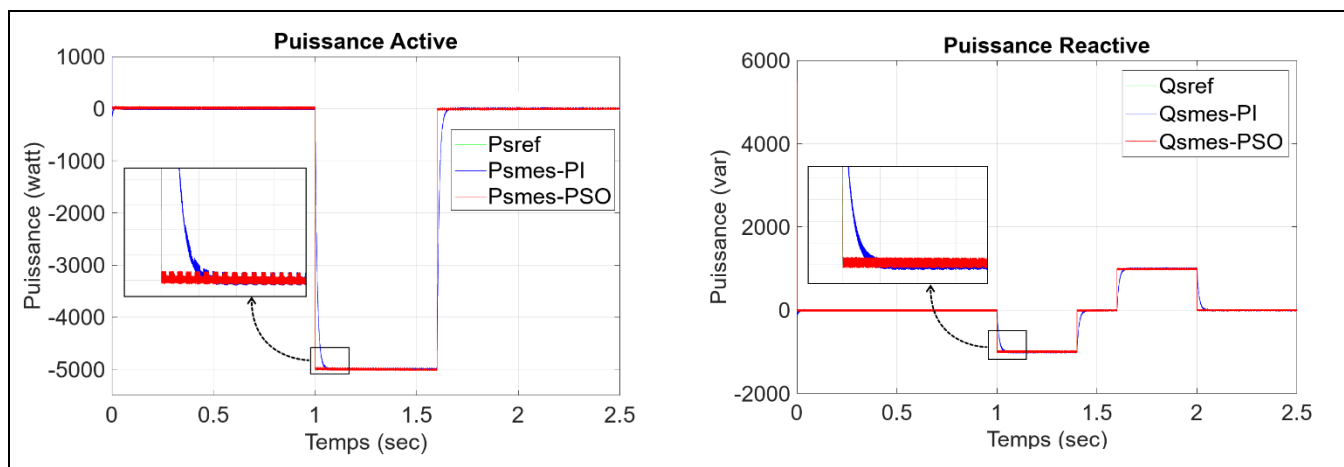


Figure IV.9 : Comparaison entre les résultats de régulation avec PI Classique et par PI-PSO du puissance active et réactive.

IV.4.2 Partie mécanique

En utilisant l'optimisation par essai particulaire dans le MPPT, on peut obtenir des résultats plus précis et plus efficaces dans des conditions variables. Bien que le PI classique ait été utilisé avec succès dans la partie mécanique car le vent reste variable pris en référence, le PSO sera utilisé pour montrer son avantage par rapport au PI classique.

Le Tableau IV.3 présente les paramètres du contrôleur PI et PI-PSO pour MPPT.

Contrôleur	K_p	K_i
PI Classique	44.23	3129
PI-PSO	320.22	7225

Tableau IV.3 : Les paramètres du contrôleur PI et PI-PSO pour MPPT

Selon la Figure IV.10. Il est évident que cette nouvelle approche représente un développement prometteur pour l'estimation des paramètres du PI.

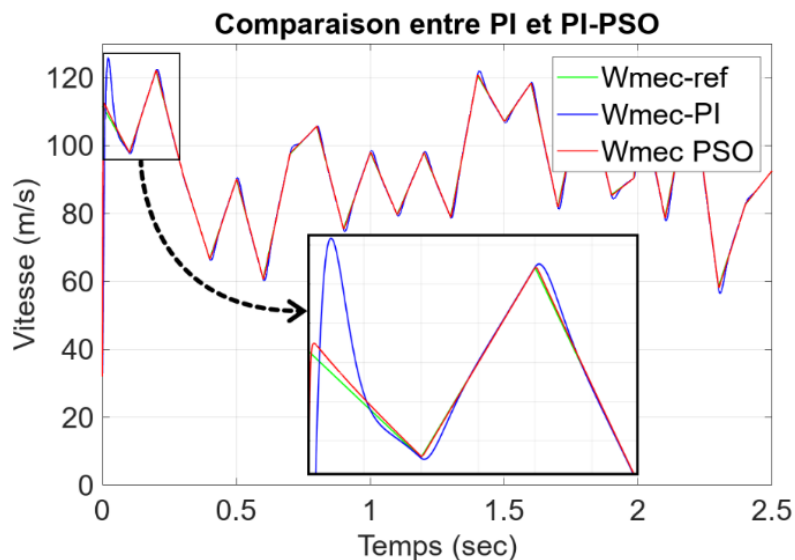


Figure IV.10 : Comparaison entre les résultats de régulation avec PI Classique et par PSO du MPPT

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit la méthode avancée d'optimisation PSO, sa modélisation mathématique ainsi que son algorithme. Nous avons ensuite appliqué la commande PI-PSO dans la chaîne éolienne (le MPPT et dans la commande indirecte avec boucle de puissance du MADA) pour trouver les

valeurs optimales des paramètres dans un système dynamique, dans le but d'améliorer ses performances, et nous avons également évalué l'efficacité et la sensibilité du PSO aux perturbations et aux variations de paramètres. Ensuite, nous avons présenté et discuté les résultats de la simulation, pour finalement procéder à une comparaison entre les deux approches.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le mémoire présenté porte une étude d'un système global de production d'électricité à partir de l'énergie éolienne, suivi d'une commande avancée visant à atteindre les meilleures performances. Dans le contexte actuel des énergies renouvelables, la production d'énergie éolienne continue de croître et de nouvelles technologies émergent dans le domaine de l'éolien à grande échelle, notamment dans les domaines des matériaux de construction et de l'électronique de puissance.

Nous avons synthétisé les travaux pour mieux comprendre le projet, on s'est concentré en particulier sur l'optimisation du rendement MADA dans un système éolien à point de puissance maximale (MPPT). Nous avons développé et testé avec succès un type de commande basé sur la vitesse du vent pour contrôler la MADA. Nous avons également mené une étude aérodynamique pour fournir les bases théoriques justifiant le rôle de la MADA en fonctionnement à vitesse variable. Nous avons constaté que la MADA fonctionnait efficacement dans les conditions auxquelles elle a été soumise, ce qui prouve la viabilité de son application dans un système éolien. Grâce à la commande en puissance active et réactive de la MADA, elle devient un outil intéressant pour le gestionnaire du réseau, car ces puissances peuvent être positives ou négatives. Cette étude nous permet d'obtenir non seulement un moyen de production d'énergie avec un rendement optimal, mais aussi un outil améliorant et contribuant à la qualité de l'énergie du réseau. L'utilisation de la technique avancée de commande PSO permet de trouver les valeurs optimales des paramètres d'un système dynamique afin d'améliorer ses performances, son efficacité et sa résistance aux perturbations et variations de paramètres.

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, plusieurs perspectives intéressantes peuvent contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MADA, notamment l'utilisation d'autres algorithmes de maximisation de la puissance captée par différentes techniques avancées. Il serait également intéressant d'étudier les perturbations de la production d'énergie éolienne en cas de déséquilibres du réseau.

ANNEXE

1. Paramètres de la MADA sont :

- Puissance nominale : $P_n = 7.5 \text{ KW}$
- Tension d'alimentation : $V_{\text{eff}} = 220\text{V}/380\text{V}$
- Fréquence d'alimentation : $f = 50\text{Hz}$
- Nombre de paires de pôles : $P = 2$
- Résistance d'une phase statorique : $R_s = 0.455\Omega$
- Résistance d'une phase rotorique : $R_r = 0.62\Omega$
- Inductance d'une phase statorique : $L_s = 0.084\text{H}$
- Inductance d'une phase rotorique : $L_r = 0.081\text{H}$
- Inductance Mutuelle : $M_{sr} = 0.078\text{H}$
- Moment d'inertie du rotor : $J_g = 0.3125 \text{ Kg.m}^2$
- Coefficient de frottement : $F_g = 6.73 \cdot 10^{-3} \text{ N.m.s}^{-1}$

2. Paramètres de la turbine éolienne utilisée :

- Puissance nominale : $P_n = 10 \text{ KW}$
- Nombre de pale : $P = 3$
- Diamètre d'une pale : $R = 3\text{m}$
- Gain du multiplicateur : $G = 5.4$
- Moment d'inertie de la turbine : $J_{\text{Turbine}} = 3.1959 \text{ Kg.m}^2$
- Coefficient de viscosité : $F_{\text{Turbine}} = 0.0073 \text{ N.m.s}^{-1}$

BIBLIOGRAPHIE

Références Bibliographique

- [1] BELABBAS BELKACEM, mémoire de Magister « Intégration de l'énergie éolienne dans un réseau électrique local » Mémoire préparé au sein du Département de Génie Electrique – Tiaret 2012 - Université Ibn Khaldoun Tiaret.
- [2] F. Tahiri, A. Harrouz, V. Dumbrava, and M. Alnatoor, “NON-LINEAR CONTROLS FOR ROBUSTNESS INVESTIGATION OF PMSG-BASED WIND TURBINE”.
- [3] 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”.
- [4] S. Labdai, B. Hemici, L. Nezli, N. Bounar, A. Boulkroune, and L. Chrifi-Alaoui, “Control of a DFIG Based WECS with Optimized PI controllers via a duplicate PSO algorithm,” in 2019 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), Grenoble, France: IEEE, Jul. 2019, pp. 1–6. doi: [10.1109/ICCAD46983.2019.9037879](https://doi.org/10.1109/ICCAD46983.2019.9037879).
- [5] “Front Matter,” in Doubly Fed Induction Machine, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011, pp. i–xiv. doi: [10.1002/9781118104965.fmatter](https://doi.org/10.1002/9781118104965.fmatter).
- [6] M. Marinelli, A. Morini, A. Pitto, and F. Silvestro, “Modeling of doubly fed induction generator (DFIG) equipped wind turbine for dynamic studies,” in 2008 43rd International Universities Power Engineering Conference, Padova: IEEE, Sep. 2008, pp. 1–6. doi: [10.1109/UPEC.2008.4651589](https://doi.org/10.1109/UPEC.2008.4651589).
- [7] Munn and Co. ‘Article de Scientific American sur l'invention de Brush’, édition française (1890).
- [8] ‘Energies, climat, efficacité énergétique, air extérieur : les faits marquants de 2015’, Panorama énergies-climat édition 2016.
- [9] M. O. F. Diallo, M. B. Camara, S. Youssef, H. Gualous, and B. Dakyo, “Génératrice Asynchrone à Double Alimentation pour la production d'énergie hydrolienne dans le Raz Blanchard- Modélisation et Simulations”.
- [10] A. Tamaarat, “Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA”.
- [11] H. Abu-Rub, M. Malinowski, and K. Al-Haddad, “Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation”.
- [12] S.Muller, M.Deicke, Rick W.De Doncker, “Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines A viable alternative to ADJUST SPEED over a wide range at MINIMAL COST”.
- [13] “Front Matter,” in Doubly Fed Induction Machine, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011, pp. i–xiv. doi: [10.1002/9781118104965.fmatter](https://doi.org/10.1002/9781118104965.fmatter).
- [14] P. Ledesma and J. Usaola, “Doubly Fed Induction Generator Model for Transient Stability Analysis,” IEEE Trans. On Energy Conversion, vol. 20, no. 2, pp. 388–397, Jun. 2005, doi: [10.1109/TEC.2005.845523](https://doi.org/10.1109/TEC.2005.845523).

- [15] F. Poitiers, T. Bouaouiche, and M. Machmoum, "Advanced control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 7, pp. 1085–1096, Jul. 2009, doi: [10.1016/j.epsr.2009.01.007](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2009.01.007).
- [16] H. Abu-Rub, M. Malinowski, and K. Al-Haddad, "Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation".
- [17] M. Singh and S. Santoso, "Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants," NREL/SR-5500-52780, 1028524, Oct. 2011. doi: [10.2172/1028524](https://doi.org/10.2172/1028524).
- [18] M. Singh and S. Santoso, "Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants," NREL/SR-5500-52780, 1028524, Oct. 2011. doi: [10.2172/1028524](https://doi.org/10.2172/1028524).
- [19] BELABBAS BELKACEM, Thèse de Doctorat « Gestion des Flux Energétiques d'un Système de Production d'Energie de Sources Renouvelables avec Stockage en Vue de la Conception des Réseaux Electriques Intelligents "Smart GRID" »
- [20] L. Fan, R. Kavasseri, Z. L. Miao, and C. Zhu, "Modeling of DFIG-Based Wind Farms for SSR Analysis," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2073–2082, Oct. 2010, doi: [10.1109/TPWRD.2010.2050912](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2050912).
- [21] N. Sonker, S. R. Das, and L. Mohapatro, "MODELLING AND SIMULATION OF DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR CONNECTED WITH WIND TURBINE".
- [22] Z. Gadouche, C. Belfedal, T. Allaoui, and B. Belabbas, "Commande de Puissance Active et Réactive d'une MADA utilisée dans un système éolien," 2014.
- [23] boyette arm, "contrôle commande d'un generateur asynchrone a double alimentation avec systeme de stockage pour la production eolienne".
- [24] Belkacem Belabbas, Mouloud Denai, Tayeb Allaoui, "Hierarchical Energy Management and Control to Improve the Reliability and Efficiency of Wind Farms Connected to the Grid"
- [25] R. Gohar and F. Servati, "Modeling a DFIG-Based Wind Turbine Focusing on DFIG and Aerodynamic Models".
- [26] V. Xue, "Center-Aligned SVPWM Realization for 3- Phase 3- Level Inverter".
- [27] M. Kayk and J. V. Milanovi, "Reactive Power Control Strategies for DFIG-Based Plants," *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 389–396, Jun. 2007, doi: [10.1109/TEC.2006.874215](https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874215).
- [28] R. Hiremath and T. Moger, "Comparison of LVRT Enhancement for DFIG-Based Wind Turbine Generator with Rotor-Side Control Strategy," in 2020 International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICE3), Gorakhpur, India: IEEE, Feb. 2020, pp. 216–220. doi: [10.1109/ICE348803.2020.9122830](https://doi.org/10.1109/ICE348803.2020.9122830).
- [29] Y. Bekakra and D. B. Attous, "Optimal tuning of PI controller using PSO optimization for indirect power control for DFIG based wind turbine with MPPT," *Int J Syst Assur Eng Manag*, vol. 5, no. 3, pp. 219–229, Sep. 2014, doi: [10.1007/s13198-013-0150-0](https://doi.org/10.1007/s13198-013-0150-0).

- [30] E. Bekiroglu and M. D. Yazar, "MPPT Control of Grid Connected DFIG at Variable Wind Speed," *Energies*, vol. 15, no. 9, p. 3146, Apr. 2022, doi: [10.3390/en15093146](https://doi.org/10.3390/en15093146).
- [31] M. Allam, B. Dehiba, M. Abid, and Y. Djeriri, "Etude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dédiée à une application éolienne," 2014.
- [32] Gadouche Zoubir, BELFEDAL Cheikh, ALLAOUI Tayeb, Belabbas belkacem "Speed-Sensorless DFIG Wind Turbine for Power Optimization Using Fuzzy Sliding Mode Observer," *IJRER*, no. v7i2, 2017, doi: [10.20508/ijrer.v7i2.5507.g7036](https://doi.org/10.20508/ijrer.v7i2.5507.g7036).
- [33] S. Karad and R. Thakur, "Recent Trends of Control Strategies for Doubly Fed Induction Generator Based Wind Turbine Systems: A Comparative Review," *Arch Computat Methods Eng*, vol. 28, no. 1, pp. 15–29, Jan. 2021, doi: [10.1007/s11831-019-09367-3](https://doi.org/10.1007/s11831-019-09367-3).
- [34] "Front Matter," in *Doubly Fed Induction Machine*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011, pp. i–xiv. doi: [10.1002/9781118104965.fmatter](https://doi.org/10.1002/9781118104965.fmatter).
- [35] *Modeling and Analysis of Doubly Fed Induction Generator Wind Energy Systems*. Elsevier, 2015. doi: [10.1016/C2014-0-03793-8](https://doi.org/10.1016/C2014-0-03793-8).
- [36] A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, and J. R. Saenz, "Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator," *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 18, no. 2, pp. 194–204, Jun. 2003, doi: [10.1109/TEC.2003.811727](https://doi.org/10.1109/TEC.2003.811727).
- [37] B. Belabbas, T. Allaoui, M. Tadjine, and M. Denai, "High Order Sliding Mode Controller Simulation by a Wind Turbine for DFIG Protection against Overcurrent," vol. 65, 2017.
- [38] M. Nasri, H. Nezamabadi-pour, and M. Maghfoori, "A PSO-Based Optimum Design of PID Controller for a Linear Brushless DC Motor," 2007.
- [39] C. Ou and W. Lin, "Comparison between PSO and GA for Parameters Optimization of PID Controller," in *2006 International Conference on Mechatronics and Automation*, Luoyang: IEEE, Jun. 2006, pp. 2471–2475. doi: [10.1109/ICMA.2006.257739](https://doi.org/10.1109/ICMA.2006.257739).
- [40] T. Eswaran and V. S. Kumar, "Particle swarm optimization (PSO)-based tuning technique for PI controller for management of a distributed static synchronous compensator (DSTATCOM) for improved dynamic response and power quality," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 173–189, Apr. 2017, doi: [10.1016/j.jart.2017.01.011](https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.01.011).
- [41] M. Imran, R. Hashim, and N. E. A. Khalid, "An Overview of Particle Swarm Optimization Variants," *Procedia Engineering*, vol. 53, pp. 491–496, 2013, doi: [10.1016/j.proeng.2013.02.063](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.063).
- [42] J. L. Fernández Martínez and E. García Gonzalo, "The Generalized PSO: A New Door to PSOEvolution," *Journal of Artificial Evolution and Applications*, vol. 2008, pp. 1–15, May 2008, doi: [10.1155/2008/861275](https://doi.org/10.1155/2008/861275).
- [43] A. Kaur and M. D. Singh, "An Overview of PSO- Based Approaches in Image Segmentation," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, no. 8, 2012.

[44] Sasmita Behera, Bidyadhar Subudhi, Bibhuti Bhusan Pati, "Design of PI Controller in Pitch Control of Wind Turbine: A Comparison of PSO and PS Algorithm," IJRER, no. v6i1, 2016, doi: [10.20508/ijrer.v6i1.3137.g6783](https://doi.org/10.20508/ijrer.v6i1.3137.g6783).

[45] K. Lee and J. Park, "Application of Particle Swarm Optimization to Economic Dispatch Problem: Advantages and Disadvantages," in 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, Georgia, USA: IEEE, 2006, pp. 188–192. doi: [10.1109/PSCE.2006.296295](https://doi.org/10.1109/PSCE.2006.296295).

ملخص

تتناول هذه الأطروحة تحسين كفاءة مولد الحث ذو التغذية المزدوجة (MADA) في نظام طاقة الرياح باستخدام تحكم يعتمد على سرعة الرياح وتقنية متقدمة للتحكم في PSO. تظهر النتائج أن MADA يعمل بشكل فعال ويساهم في تحسين جودة الطاقة المقدمة للشبكة. تم استخدام تقنية تحسين حشد الجسيمات (PSO) للعثور على القيم المثلى لمعاملات النظام الديناميكي، وبالتالي تحسين الأداء والكفاءة والمرونة للاضطرابات وتغيرات المعلمات. أدى التطوير والاختبار الناجحان لاستراتيجية التحكم القائمة على سرعة الرياح لـ MADA جنبًا إلى جنب مع التحكم في الطاقة النشطة والمتفاعلة القائمة على PSO إلى نظام فعال لإنتاج طاقة الرياح. لم يحقق هذا النظام الكفاءة المثلى فحسب، بل أدى أيضًا إلى تحسين جودة الطاقة المقدمة للشبكة.

الكلمات الرئيسية: توربينات الرياح، آلة التيار المتردد ذات الإطعام المزدوج، التحكم الشعاعي، PI-PSO

Résumé

Ce mémoire porte sur l'optimisation du rendement d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans un système éolien à point de puissance maximale (MPPT) en utilisant une commande basée sur la vitesse du vent et une technique avancée de commande appelé PSO. Les résultats montrent que la MADA fonctionne efficacement et contribue à l'amélioration de la qualité de l'énergie du réseau. La technique d'optimisation d'essaims de particules (PSO) a été utilisée pour trouver les valeurs optimales des paramètres du système dynamique, améliorant ainsi les performances, l'efficacité et la résilience aux perturbations et aux variations de paramètres. Grâce au développement et aux tests réussis d'une stratégie de contrôle basée sur la vitesse du vent pour le MADA, combinés à un contrôle de la puissance active et réactive basé sur PSO, un système de production d'énergie éolienne efficace a été obtenu. Ce système a non seulement atteint une efficacité optimale, mais a également amélioré la qualité de l'énergie fournie au réseau.

Mots clés : Eolienne, machine Asynchrone à Double Alimentation, Commande vectorielle, PI-PSO

Abstract

This memoir focuses on optimizing the efficiency of a doubly fed induction generator (DFIG) in a wind energy system using a wind-speed-based control and an advanced PSO control technique. The results show that the DFIG operates effectively and contributes to improving the quality of energy supplied to the grid. The Particle Swarm Optimization (PSO) technique was used to find optimal values of the dynamic system parameters, thereby improving performance, efficiency, and resilience to disturbances and parameter variations. Successful development and testing of a wind-speed-based control strategy for the DFIG combined with PSO-based active and reactive power control resulted in an efficient wind energy production system. This system not only achieved optimal efficiency but also improved the quality of energy supplied to the grid.

Keywords: Wind turbine, Double-Feed Asynchronous machine, Vector control, PI-PSO