

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de master

Domaine : Sciences et Technologie.

Filière : Electrotechnique.

Spécialité : Commande électrique.

THEME

Optimisation par l'algorithme génétique (AG) du contrôle de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA) à l'aide de régulateurs PI.

Préparé par : AYATI KHELOUD

HALOUI RABIA

Devant le jury :

Nom et prénom	Grade	Qualité
Y. MESLEM	Pr	Président
T. ALLAOUI	Pr	Examineur
Y. MIHOUB	MCA	Examineur
BELABBAS Belkacem	MCA	Encadrant
HEROUAL Samira	Doctorante	Invitée

Année universitaire :2023/2024

Remerciements

*Nous remercions, en premier lieu, **ALLAH** qui nous a donné la force et la patience pour terminer ce travail.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et notre gratitude à notre encadreur, **Mr BELABBAS Belkacem** qui a proposé et dirigé ce travail.*

*Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à mademoiselle **HEROUAL Samira**, pour son aide, son professionnalisme, ses qualités scientifiques.*

Nos remerciements vont aussi aux messieurs les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nos remerciements vont aussi à l'ensemble de nos professeurs tout le long de ces années d'études.

Nous tenons à remercier les responsables et tous les personnels du département de L'électrotechnique pour les facilités qu'ils nous ont accordé pour réaliser ce travail.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à notre formation et à l'élaboration de ce modeste mémoire.

Dédicace

Ce petit travail est dédié en signe de gratitude à tous ceux que nous aimons particulièrement :

À nos chers parents, qui sont à la base de notre réussite grâce à leur sacrifice, leur amour, leur patience, leur soutien et leurs encouragements.

Nous ne serons pas ce que nous sommes aujourd'hui sans eux.

À nos chers frères et sœurs ;

À nos grands-parents ;

À tous nos membres de la famille ;

À tous nos amis, surtout ceux que nous aimons le plus ;

À tous mes collaborateurs,

À tous les professeurs et éducateurs qui ont apporté leur contribution à notre formation tout au long de nos études jusqu'à présent ;

À tous ceux qui nous soutiennent et qui ont une importance pour nous, On dédie ce travail.

Table des matières

Tables des matières	
CHAPITRE I :Méthodes métaheuristiques,Algorithmes génétiques.....	5
I. Introduction.....	6
I.2.Optimisation par les méthodes métaheuristiques.....	6
I.2.1. Introduction à l'optimisation.....	6
I.2.2. Méthodes métaheuristiques	6
I.3.Définition d'un algorithme génétique.....	7
I.4.Terminologie de l'algorithme génétique.....	8
I.5.Opérateurs de l'algorithme génétique.....	9
I.5.1. Codage des chromosomes	9
I.5.2. Génération population initial.....	10
I.5.3. Fonction d'évaluation.....	10
I.5.4. Opérateur de sélection.....	10
I.5.5. Opérateur de croisement et mutation	12
I.6. Conclusion	15
Chapitre II :Modélisation de la chaine de conversion éolienne.....	16
II. Introduction	17
II.2. Energie éolienne.....	18
II.2.1 Définition de l'énergie éolienne	18
II.2.2. Descriptif d'une éolienne.....	18
I.2.3. Principe de fonctionnement de l'éolienne.....	19
I.2.4. Différents types d'une éolienne.....	19
I.3. Fonctionnement de l'éolienne	21
II.4. Modélisation de la chaine de conversion éolienne	22
II.4.1. Modèle de pales	22
II.4.2. Modèle aérodynamique.....	22
II.4.3. Modèle de multiplicateur	24
II.4.4. Modélisation de l'arbre de la turbine	24
II.5. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone doublé alimentation.....	25
II.6. Modélisation de la GADA.....	26
II.6.1. Hypothèses simplificatrices	26
II.6.2. Equation Générale de la machine	27
II.6.3. Transformation de Park.....	28
II.6.4. Modélisation de la GADA dans le repéré de Park.....	29

II.7. Choix de référentiel de Park	32
II.8. Modélisation de l'onduleur triphasé à MLI	32
II.8.1. Description de l'onduleur	32
II.8.2. Structure d'un onduleur triphasé à 3 niveaux de type NPC	32
II.8.3. Configurations d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.....	33
II.9. Modulation sinus - triangle.....	35
II.9.1. Principe de la technique	35
II.9.2. Modulation sinusoïdale à doubles triangles	36
II.10. Conclusion	37
CHAPITRE III : Commande de la chaine éolienne.....	38
III. Introduction	39
III.2. Technique d'extraction du maximum de puissance	39
III.2.1. Principe de la MPPT	39
III.2.2. Régulateur de vitesse MPPT.....	39
III.2.3. Résultat de simulation et interprétation	40
III.3. Commande vectorielle.....	41
III.3.1. Principe de la commande à flux orienté	41
III.3.2. Modèle de la GADA en vue de la commande	42
III.3.3. Expressions des tensions rotoriques	43
III.3.4. Commande du GADA avec boucle de puissance	44
III.3.5. Dimensionnement du régulateur.....	45
III.3.6. Résultat de simulation et interprétation	47
III.4. Conclusion.....	50
CHAPITRE IV : Commande par algorithme génétique.....	51
IV. Introduction.....	52
IV.2. Principe de base des algorithmes génétiques	52
IV.3. Fonctionnement des AG.....	53
IV.4. PI- Algorithme génétique.....	53
IV.5. Les avantages de l'algorithme génétique	55
IV.6. Optimisation de régulateur de vitesse de la GADA par algorithme génétique.....	55
IV.6.1. Optimisation du régulateur PI classique.....	56
IV.6.2. Résultats de simulation par AG.....	57
IV.7. Conclusion	62
CONCLUSION GENERALE.....	63

ANNEX.....65

LES REFERENCES.....67

Résumé :.....73

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Méthodes métaheuristiques et algorithmes génétiques

Figure I. 1 : classes des métaheuristiques	7
Figure I. 2 : Codage binaire.	9
Figure I. 3 : Illustration schématique du codage d'un individu.	10
Figure I. 4 : Exemple de sélection par roulette.	11
Figure I. 5 : Croisement à un point.	13
Figure I. 6 : Croisement à deux points.	13
Figure I. 7 : Croisement uniforme.	14
Figure I. 8 : Mutation aléatoire.	14
Figure I. 11 : composantes d'une éolienne horizontale.	21

Chapitre II : Modelisation de la chaine de conversion éolienne

Figure II. 1 : principaux organes du système de conversion éolienne.	18
Figure II. 2 : système éolien à vitesse variable basé sur une MADA	19
Figure II. 3: Eoliennes à axe horizontal	20
Figure II. 4: Eoliennes à vitesse variable.	22
Figure II. 5 : Structure du système de conversion éolien.....	22
Figure II. 6 : coefficient aérodynamique en fonction de la ration de vitesse de la turbine λ	24
Figure II. 7 : Schéma bloc du modèle de la turbine.	25
Figure II. 8 : Système éolienne à vitesse variable base sur une GADA	26
Figure II. 9: Modèle de PARK de la GADA.	28
Figure II. 10 : Structure Générale de l'onduleur à trois niveaux	33
Figure II. 11 : Les différentes configurations fonctionnelles d'un bras dans l'onduleur triphasé à 3 niveaux NPC	34
Figure II. 12 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC	35
Figure II. 13 : schéma de principe de la technique triangulo-sinusoidale	36
Figure II. 14 : Génération des signaux de commande par la modulation à triangles multiples (onduleur NPC à 3 niveaux)	36

Chapitre III : Commande de la chaine éolienne

Figure III. 1 : Schéma fonctionnel de régulation de la vitesse.....	39
Figure III. 2 : Signal de la vitesse du vent.	41
Figure III. 3 : Régulation de la vitesse par PI.	41

Figure III. 4 : Modèle de la GADA pour le contrôle des puissances.....	44
Figure III. 5 : Schéma bloc de la commande indirect avec boucle de puissance.....	45
Figure III. 6 : Réglage des courants par PI	45
Figure III. 7 : Réglage des puissances par PI.....	46
Figure III. 8 : la puissance active et réactive de la commande indirecte avec boucle de puissance. ...	48
Figure III. 9 : Le courant rotorique selon l'axe d et q de la commande indirect avec boucle de puissance.....	48
Figure III. 10 : Le flux statorique selon l'axe d et q de la commande indirect avec boucle de puissance.....	49
Figure III. 11 : Couple électromagnétique de la commande indirecte avec boucle de puissance	50

Chapitre IV : Commande par algorithme génétique

Figure IV. 1 : schéma de principe de cette procédure.....	54
Figure IV. 2 : l'organigramme de base d'un algorithme génétique.....	55
Figure IV. 3 : Nombre de la population.....	56
Figure IV. 4 : Nombre de variables	56
Figure IV. 5 : Sélection par la roulette.....	56
Figure IV. 6 : Croisement un point	56
Figure IV. 7 : Mutation uniforme	57
Figure IV. 8 : Régulation de vitesse par PI-AG.....	57
Figure IV. 9 : La puissance active et réactive statorique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance par PI-AG.....	58
Figure IV. 10 : Le courant rotorique en fonction l'axe d et q pour la commande vectorielle indirect avec boucle de puissance par PI-AG	59
Figure IV. 11 : Etude comparative des résultats entre PI et PI-AG pour la puissance active et réactive avec boucle de puissance.	60
Figure IV. 12 : Etude comparative des résultats entre PI-AG pour Le courant rotorique en fonction l'axe d et q pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.....	61
Figure IV. 13 : Etude comparative des résultats entre PI et PI-AG du MPPT	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Résumé du nomenclature de l'algorithme génétique.	8
Tableau I. 2 : Sélection par la roulette pour un problème de maximisation	11
Tableau II. 1 : Etats de convertisseur NPC à trois niveaux et tension de sorti	35
Tableau IV. 1 : Les paramètres du contrôleur PI et PI-AG.	59
Tableau IV. 2 : Etude comparative des résultats de régulation avec PI et PI réglé par AG.	60
Tableau IV. 3 : Les paramètres du contrôleur PI et PI-AG pour MPPT.....	61

LISTE DES ACRONYMES ET SYMBOLES

Liste des acronymes et symboles:

EnR: Énergies renouvelables.

MADA: Machine asynchrone à double alimentation.

GRASP : Greedy randomized adaptive search procedure

MPPT: Extraction de la puissance maximale.

$\Omega_{méc}$: Vitesse mécanique de la génératrice asynchrone.

N_s : Vitesse du synchronisme.

GSAP : Génératrice synchrone à aimant permanent.

GADA: Génératrice asynchrone à double alimentation.

MLI: Modulation par largeur d'impulsion.

NPC: Onduleur clampé par le neutre.

R: Largeur de la pale.

Ω : Vitesse de rotation de la turbine.

G: Gain de multiplicateur.

P_V : Puissance du vent non perturbé.

ρ : Densité de l'air.

V: Vitesse du vent traversant le rotor.

V_n : Vitesse nominale du vent.

C_p : Coefficient de puissance de la turbine.

λ : Vitesse spécifique.

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

Ω_t : Vitesse de rotation de la turbine (avant le multiplicateur).

$C_{aéro}$: Couple aérodynamique

C_g : Couple après multiplicateur

J_g : L'inertie de la génératrice électrique.

J_{turbine} : Inertie de la turbine.

J : Inertie totale sur l'arbre.

$C_{\text{méc}}$: Couple mécanique total

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_{vis} : Couple des frottements visqueux.

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

f : Coefficient des frottements visqueux.

f_g : Coefficient des frottements visqueux de la génératrice.

f_t : Coefficient des frottements visqueux de la turbine.

g : Le glissement.

$a_s b_s c_s$: Phases du stator.

$a_r b_r c_r$: 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_{sr} : L'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

$P(\theta)$: 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.

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

Ω_s : La vitesse électrique.

p : Nombre de pair de pôles.

C_r : Couple résistant.

ω : Vitesse de rotation.

P : Puissance active.

Q : Puissance réactive.

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

PWM: Pulse Width Modulation.

$T_{11}, T_{12}, T'_{11}, T'_{12}$: Interrupteurs commandés.

C_1 et C_2 : Les condensateurs de filtrage.

PI: Régulateur (proportionnel - intégral).

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

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

i_{dq} : Courants dans le repère Park.

V_{dq} : Tensions dans le repère Park.

ϕ_{dq} : Flux dans le repère Park.

PI-AG: Proportional-Integral Algorithme génétique.

AG_s : Les algorithmes génétiques.

P_x : La probabilité de croisement.

P_m : La probabilité de mutation.

T_p : La taille de la population.

$\alpha_1 \alpha_2$: Nombres aléatoires $\in [0,1]$;

G_c : La génération courante ;

G_{max} : La génération pour laquelle l'amplitude de la mutation s'annule ;

P_{nf} : Un paramètre déterminant le degré de non uniformité.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'électricité est devenue de plus en plus primordiale pour l'humanité. En effet, l'accès à l'électricité, est la garantie de meilleures conditions de vie (hygiène, santé, éducation) et un facteur essentiel pour un développement économique. [1]

La consommation mondiale d'énergie a connu une augmentation énorme ces dernières années. Ceci revient à l'industrialisation massive qui a tendance de s'amplifier de plus en plus et plus précisément, dans certaines zones géographiques notamment dans les pays de l'Asie.

C'est pour cela que la production de l'énergie électrique est importante et qu'il est intéressant de pouvoir trouver des solutions afin d'en produire toujours plus mais de manière plus propre et plus durable. Les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique, dénotent encore une fois de l'importance des énergies renouvelables.[2] [3]

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables (*EnR*) ont connu une forte croissance ces dernières années. Parmi ces sources d'énergies, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes, mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante.[4]

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. Ce sont les algorithmes de commande qui permettent de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant.[5]

Actuellement, la marche des générateurs éoliens à vitesse variable s'est oriente vers la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) comme génératrice étant donne ses avantages. [6]

L'objectif de ce projet est d'utiliser une éolienne comme une source principale de l'énergie, afin de mieux gérer le bon fonctionnement de l'éolienne, nous avons opté pour un régulateur proportionnel intégral (PI) basé sur l'optimisation métaheuristique type algorithme génétique.

Le régulateur PID est la technique la plus utilisée dans l'asservissement des processus industriels pour des décennies et l'application des algorithmes génétique pour le calcul optimal des gains (K_p et K_i) du régulateur PI. [7]

Le but de l'optimisation du contrôle du MADA par algorithme génétique est d'améliorer la performance, la précision et l'efficacité du système, ce qui favorise une meilleure utilisation des données et des résultats plus satisfaisants dans différents domaines d'application.

Les algorithmes génétiques sont des méthodes d'amélioration qui s'inspirent du processus de sélection naturelle et de diversification biologique.

Les algorithmes génétiques, en simulant la reproduction, la sélection naturelle et la mutation des gènes, ont la capacité de trouver de manière efficace des solutions optimales dans un environnement de recherche complexe et souvent multidimensionnel.

Dans cette étude, nous avons utilisé le convertisseur NPC à trois niveaux pour but améliorer la qualité de l'onde de sortie, l'efficacité énergétique, la fiabilité et la flexibilité des systèmes électrique.

Les convertisseurs multiniveaux présentent de nombreux avantages tels que la meilleure forme d'onde de la tension de sortie, réduisent le taux de distorsion harmonique (en anglais : Total Harmonic Distortion (THD)) de la tension et le courant par rapport aux convertisseurs conventionnels standard à deux niveaux. [8]

Dans ce mémoire, on retrouve une introduction générale, les quatre chapitres, et on termine par une conclusion générale.

Au cours du premier chapitre, nous avons abordé une vision générale sur les méthodes métaheuristique, notamment l'algorithme génétique. et leur caractéristique.

Dans le deuxième chapitre, on s'intéresse essentiellement sur l'étude et la modélisation de la chaîne de conversion éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Puis, on a modélisé chaque élément de ce système, tels que la turbine éolienne et ses parties mécaniques et ensuite la machine asynchrone à double alimentation et l'onduleur à trois niveaux.

Dans le chapitre trois de ce mémoire, nous examinerons les différentes méthodes de commande de la machine asynchrone à double alimentation utilisées dans le domaine de l'énergie éolienne. Puis nous allons étudier la commande du régulateur de vitesse (MPPT) et la commande vectorielle de la MADA avec boucle de puissance.

Et dans le dernier chapitre, nous avons abordé l'optimisation par algorithme génétique du régulateur de la vitesse et le régulateur de la commande indirect avec boucle de puissance de la machine asynchrone à double alimentation.

CHAPITRE I :

Méthodes métaheuristique
et Algorithmes génétiques

I. Introduction

Les méta- heuristiques sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs. Elles se comportent comme des algorithmes de recherche, tentant d'apprendre les caractéristiques d'un problème afin d'en trouver une approximation de la meilleure solution. Pour notre étude, nous avons opté pour l'une de ces approches, les algorithmes génétiques.

L'algorithme génétique est une famille assez riche et très intéressante d'algorithmes d'optimisation stochastique. Son origine remonte aux idées d'évolution et de sélection naturelle. Les algorithmes génétiques sont extrêmement efficaces et solides sur un large éventail de problèmes grâce à une méthode de recherche probabiliste qui repose sur le mécanisme de la sélection naturelle et de la génétique. Un algorithme génétique conserve une variété de solutions codées et oriente cette variété vers la solution la plus optimale. [31]

Nous allons exposer une perspective générale sur les méthodes métaheuristiques et nous examinerons en profondeur l'une de ces méthodes, à savoir AG et leurs operateurs

I.2.Optimisation par les méthodes métaheuristiques

I.2.1. Introduction à l'optimisation

L'optimisation est une discipline en plein essor qui entre en jeu dans beaucoup de domaines, comme dans la conception de circuits électroniques, la recherche opérationnelle, la biologie, mais aussi pour répondre aux besoins croissants des secteurs économique et industriel (maximisation des performances, minimisation des coûts).

On peut définir l'optimisation comme un ensemble de techniques permettant de trouver les valeurs des facteurs qui rendent optimale une fonction de réponse. Sur le plan mathématique, cela correspond à la recherche des extremums de fonctions à plusieurs variables.[11]

I.2.2. Méthodes métaheuristiques

Les métaheuristiques sont des algorithmes itératifs, possédant une composante aléatoire et parcourant l'espace de recherche par différentes techniques de génération de solutions. Ces algorithmes sont souvent inspirés par des systèmes physiques, biologiques ou éthologiques.

Le caractère « méta » tient du fait qu'un même algorithme peut agréger différents problèmes d'optimisation difficile sans modification structurelle majeure. La partie dédiée au problème tient essentiellement en la représentation du problème et l'adaptation des opérateurs de recherche. [12]

Les métaheuristiques les plus connues sont : comme le montre la figure (I.1)

- Les algorithmes évolutionnistes, parmi lesquels : les stratégies d'évolution, les algorithmes génétiques,
- Le recuit simulé,
- Les algorithmes de colonies de fourmis,
- Les algorithmes d'optimisation par essais particuliers,
- La recherche avec tabous,
- La méthode GRASP.[13]

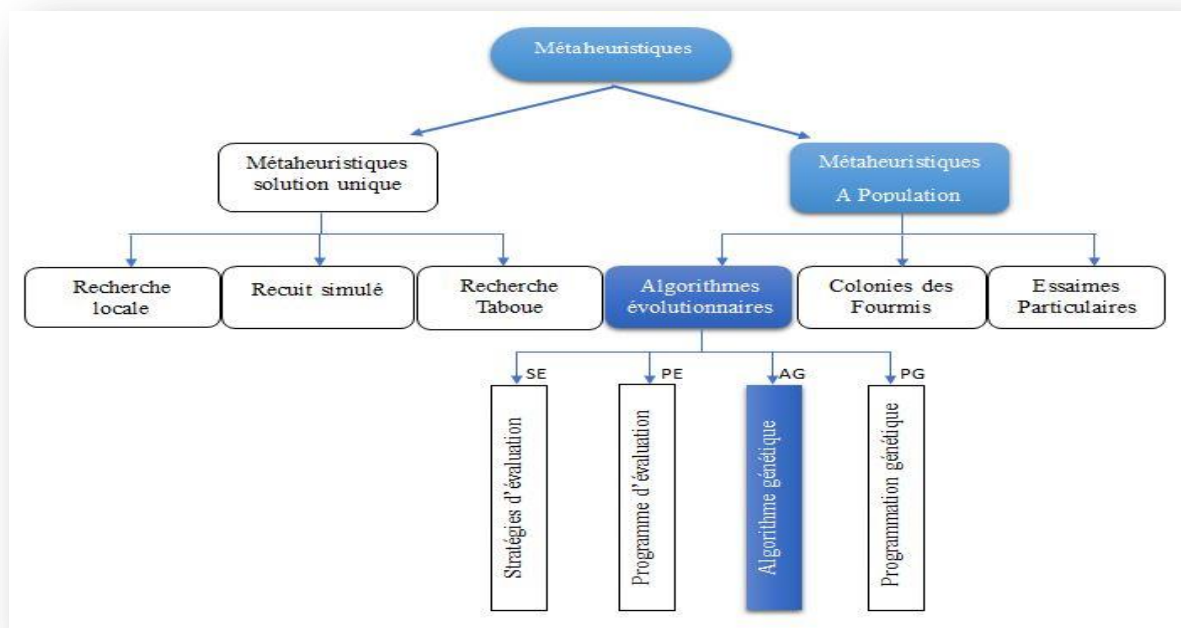


Figure I. 1 : Classes des métaheuristiques

Dans cette recherche nous aborderons en détail l'une de ces méthodes, qui est l'algorithme génétique.

I.3.Définition d'un algorithme génétique

Les algorithmes génétiques (AGs) sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Leur fonctionnement est extrêmement

simple. On part avec une population de solutions potentielles (chromosomes) initiales arbitrairement choisies. On évalue leur performance (fitness) relative. Sur la base de ces performances on crée une nouvelle population de solutions potentielles en utilisant des opérateurs évolutionnaires simples : la sélection, le croisement et la mutation. On recommence ce cycle jusqu'à ce que l'on trouve une solution satisfaisante.[14] [15] [16]

Les (AG), développées par J. Holland en 75 comme outils de modélisation de l'adaptation et qui travaillent dans un espace de chaînes de bits. Les plus populaires aux chercheurs de différentes disciplines. Largement utilisées et développées par D.E. Goldberg en 1989.[16]

Leur rôle est de chercher l'extremum global d'une fonction définie sur un espace de données et leurs champs d'application sont très vastes. Outre l'économie, ils sont utilisés pour l'optimisation de fonctions en finance, en théorie du contrôle optimal et en théorie des jeux répétés. La raison de ce grand nombre d'applications est leur simplicité et leur efficacité.

I.4.Terminologie de l'algorithme génétique

Le tableau suivant présente le vocabulaire que nous allons utiliser tout au long de ce travail.[17] [18] [19]

Tableau I.1 : Résumé du nomenclature de l'algorithme génétique.

Terme	Algorithme génétique	Signification biologique
Chromosome	Chaîne, chromosome	Une structure contenant les gènes
Génotype	Structures	L'ensemble des allèles d'un individu portés par l'ADN d'une cellule vivante
Phénotype	Ensemble de paramètres, solution, point	Aspect physique et physiologique observable de l'individu obtenu à partir de son génotype
Gène	Trait, caractéristique	Une unité d'information génétique transmise par un individu à sa descendance
Allèle	Valeur de caractéristique	Une des différentes formes que peut prendre un gène, les allèles occupent le même locus
Locus	Position dans la chaîne	L'emplacement d'un gène dans son chromosome
Individu	Individu, chromosome	Représenté par un chromosome (génom)
Génération	Population, génération	L'ensemble de population à un moment donnée du processus

I.5. Opérateurs de l'algorithme génétique

Les différents opérateurs de l'algorithme génétique tel que, le codage, l'évaluation, la sélection et la reproduction avec croisement et mutation vont maintenant être étudiés en détail dans ce qui suit :

I.5.1. Codage des chromosomes

La première étape d'un algorithme génétique est de définir et de coder convenablement le problème. Plusieurs codes d'informations sont utilisés. Les plus fréquemment utilisés sont le code binaire naturel et le code binaire de Gray. Plus, récemment le codage réel a fait son apparition. [14] [20]

I.5.1.1. Codage binaire

Ce codage a été le premier à être utilisé dans le domaine des AG.

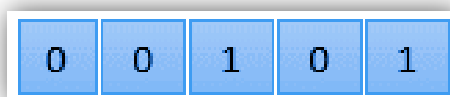


Figure I. 2 : Codage binaire.

Il présente plusieurs avantages : alphabet minimum $\{0,1\}$, facilité de mise en point d'opérateurs génétiques. Néanmoins ce type de codage présente quelques inconvénients :

- Les performances de l'algorithme sont diminuées lorsque la longueur de la chaîne augmente.
- Deux nombres décimaux voisins (exemple : 7 et 8) peuvent être très éloignés dans le codage binaire naturel (1000 et 0111). Ce problème peut être réglé en remplaçant le code binaire naturel par le code binaire de Gray.[19]

I.5.1.2. Codage réel

Ce codage consiste tout simplement à la concaténation des gènes d'un individu Figure (I.3). Ce codage présente des avantages majeurs. Il est plus précis que le codage binaire et l'espace de recherche est le même que l'espace du problème. Il a le mérite d'être simple à utiliser, l'évaluation de la fonction coût est plus rapide. Le codage réel évite de faire le transcodage du binaire naturel ou de Gray vers les réels à chaque évaluation. Néanmoins, il possède deux inconvénients, son alphabet est infini, et il a besoin d'opérateurs appropriés. [19]

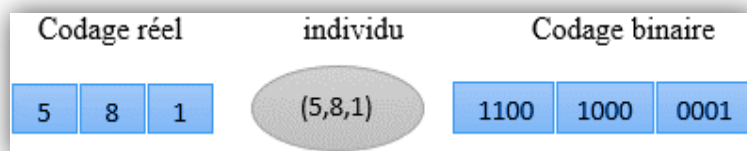


Figure I. 3 : Illustration schématique du codage d'un individu.

I.5.2. Génération population initial

Plusieurs mécanismes de génération de la population initiale sont utilisés dans la littérature. Le choix de l'initialisation se fera en fonction des connaissances que l'utilisateur a sur le problème. S'il n'a pas d'informations particulières, alors une initialisation aléatoire, la plus uniforme possible afin de favoriser une exploration de l'espace de recherche maximum, sera la plus adaptée. Par ailleurs, cette étape présente un problème principal qui est celui de choix de la taille de la population. En effet une taille de population trop grande augmente le temps de calcul et nécessite un espace mémoire considérable, alors qu'une taille de population trop petite conduit à l'obtention d'un optimum local.[14] [16]

I.5.3. Fonction d'évaluation

L'évaluation des individus s'effectue à l'aide d'une fonction, la fitness ou valeur sélective, qui permet d'associer une valeur à chaque individu. Ces valeurs serviront au processus de sélection des candidats aptes à la reproduction.

I.5.4. Opérateur de sélection

La sélection, comme son nom l'indique, permet d'identifier statistiquement les meilleurs individus d'une population et d'éliminer partiellement les mauvais. La sélection est un procédé par lequel chaque chaîne de la génération présente (population à l'instant t) est copiée avec une probabilité qui dépend des valeurs de la fonction à optimiser pour former une génération intermédiaire et s'y reproduire. Copier des chaînes en fonction des valeurs de leurs fonctions d'adaptation revient à donner aux chaînes dont la valeur est plus grande une probabilité plus élevée de contribuer à la génération suivante. Cet opérateur est peut-être le plus important puisqu'il permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir. [21] [22] [23]

Il existe différents principes de sélection, dont on citera parmi eux les suivants :

I.5.4.1. Sélection par la roulette

Dans un problème d’optimisation de maximisation, on associe à chaque individu i une probabilité de sélection, noté P_{rob} , proportionnelle à sa valeur F_i de la fonction objective : [18] [21] [24]

$$P_{rob} = F_i / \sum F_j \tag{I.1}$$

Chaque individu est alors reproduit avec la probabilité P_{rob} , Certains individus « les bons » seront alors « plus » reproduits et d’autres (les mauvais) éliminés (voir Tableau (I.2)).

Tableau I. 2 : Sélection par la roulette pour un problème de maximisation.

Chromosome	Fitness	P_{rob} De sélection = Fitness/Total(Fitness)
Parent 1	30	30%
Parent 2	60	60%
Parent 3	10	10%
Total	100	100%

Pour un problème de minimisation, on utilise une probabilité de pour un individu i égal à :

$$P_{rob} = (1 - P_{rob}) / (N - 1) \tag{I.2}$$

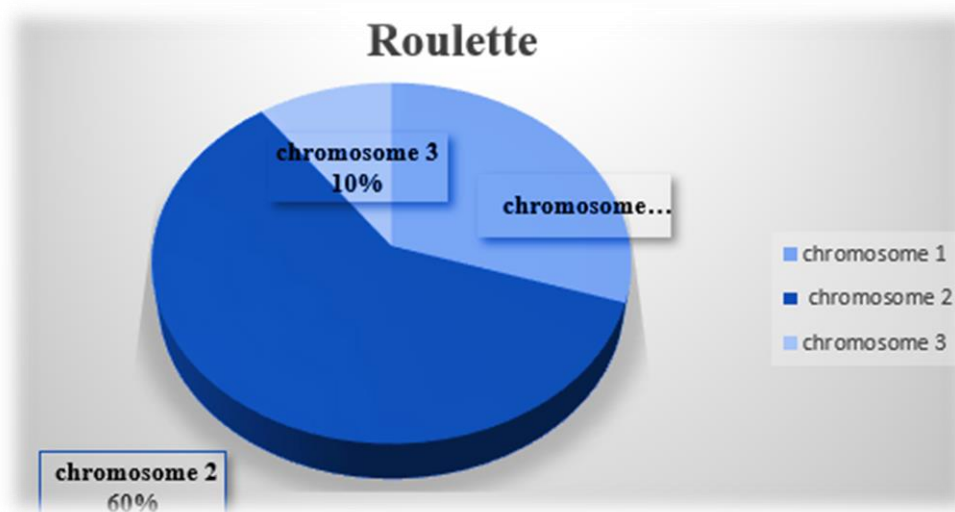


Figure I. 4 : Exemple de sélection par roulette.

I.5.4.2. Sélection tournoi

Cette technique utilise la méthode de la roulette biaisée pour sélectionner deux individus. On récupère celui dont la valeur de la fonction d'adaptation est la plus grande. Cette méthode choisit toujours une valeur de la fonction d'adaptation plus élevée par rapport à la technique de la roulette biaisée. [14] [21]

I.5.4.3. Sélection uniforme

C'est une technique très simple qui consiste à sélectionner un individu aléatoirement de la population. La probabilité P_{rob} pour qu'un individu soit sélectionné est définie par : [18]

$$P_{\text{rob}} = 1/T_P \quad (\text{I.3})$$

I.5.5. Opérateur de croisement et mutation

Une fois l'étape de la sélection est achevée, l'algorithme génétique poursuit sa recherche optimale par l'application des opérateurs de croisement et de mutation. L'opérateur de croisement (hybridation ou recombinaison) joue le rôle de recombinaison et d'échange entre certains individus. C'est un phénomène essentiel qui permet d'explorer l'ensemble des solutions possibles qui génère de nouveaux individus appelés enfants à partir des individus appelés parents. Quant à l'opérateur de mutation, il modifie « localement » un individu en changeant sa composition. [14] [25]

Les différentes techniques du croisement et de la mutation sont présentées dans la partie suivante :

I.5.5.1. Croisement à un point

Pour ce type de croisement, On choisit au hasard un point de croisement pour chaque couple et on interchange les bits de leurs gènes (voir (Figure I.5)). Notons que le croisement s'effectue directement au niveau binaire, et non pas au niveau des gènes. Un chromosome peut donc être coupé au milieu d'un gène.

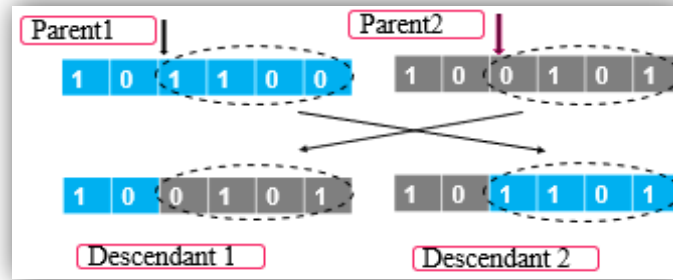


Figure I. 5 : Croisement à un point.

I.5.5.2. Croisement à deux points ou plus

Le croisement à deux points est basé sur le même principe que le croisement à un point. La différence réside dans le fait que deux points de coupure sont choisis aléatoirement. Les gènes se trouvant entre les deux sites de coupe sont échangés respectivement entre les deux individus (parents) pour former les deux enfants.[25] La Figure (I.6) suivante illustre ce type de croisement.

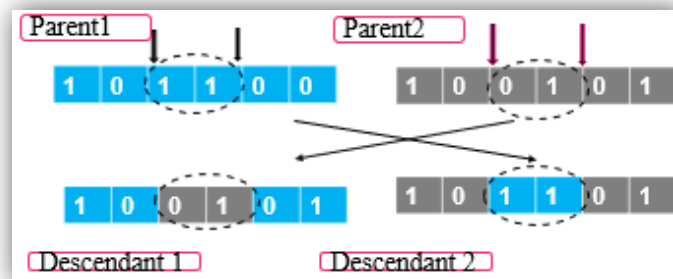


Figure I. 6 : Croisement à deux points.

I.5.5.3. Croisement uniforme

Ce croisement effectue une opération de type moyenne sur certains gènes des parents. Chaque gène a une chance sur deux d'être moyenné avec son homologue chez l'autre parent, comme indiqué sur la figure (I.7). [14]

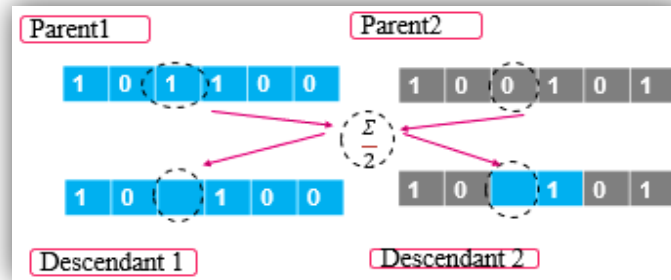


Figure I. 7 : Croisement uniforme.

I.5.5.4. Mutation aléatoire

L'opérateur de mutation apporte aux algorithmes génétiques la propriété d'ergodicité de parcours de l'espace. Cette propriété indique que l'algorithme génétique sera susceptible d'atteindre tous les points de l'espace d'état (sans pour autant nécessairement les adresser tous dans le processus de résolution)[14]. En toute rigueur, l'algorithme peut converger sans croisement, et certaines variantes fonctionnent de cette manière, et les propriétés de convergence des algorithmes génétiques sont donc fortement dépendantes de cet opérateur.

Pour des problèmes discrets, l'opérateur de mutation consiste généralement à tirer aléatoirement un gène dans le chromosome et à remplacer ce dernier par une valeur tirée aussi aléatoirement de l'alphabet propre au gène sélectionné. Dans le cas binaire, si la valeur du gène à muter est égale à 1 alors elle est inversée à 0 et si la valeur du gène est égale à 0 alors elle est inversée à 1. La figure (I.8) illustre l'effet de la mutation sur une chaîne binaire d'un chromosome.

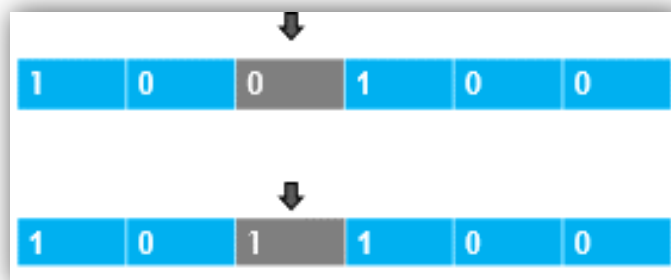


Figure I. 8 : Mutation aléatoire.

I.5.5.5. Mutation uniforme et non uniforme

La mutation uniforme est identique à celle du codage binaire. Ainsi, chaque gène g_i est changée selon une certaine probabilité en un nombre aléatoire tiré dans une distribution uniforme sur

l'intervalle $[b_1^i, b_2^i]$, avec b_1^i et b_2^i les bornes inférieures et supérieures de g_i . La mutation non uniforme revient à changer le gène g_i en un nombre tiré dans une distribution non uniforme. Cette nouvelle valeur du gène muté g_{im} est telle que. [14]

$$g_{im} = \begin{cases} g_i + (b_2^i - g_i)f(G_c) & \text{si } \alpha < 0.5 \\ g_i - (b_1^i + g_i)f(G_c) & \text{si } \alpha \geq 0.5. \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

$$f(G_c) = \left(\alpha_2 \left(1 - \frac{G_c}{G_{\max}} \right) \right)^{\text{Pnf}} \quad (\text{I.5})$$

Il existe un autre opérateur de mutation appelé mutation dans les bornes. Avec cet opérateur, chaque variable g_i choisie pour muter prend pour valeur l'une des deux bornes $[b_1^i, b_2^i]$ avec équiprobabilité. A l'évidence, cet opérateur n'a d'intérêt et d'efficacité que si la solution est proche des bornes de l'espace de recherche. Notons qu'il est possible de combiner plusieurs opérateurs en même temps.

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous abordons brièvement les méthodes métaheuristiques utilisées dans l'approche évolutionnaire des algorithmes génétiques, ainsi que leurs principaux opérateurs, tels que le codage, la sélection, le croisement et la mutation. On peut en conclure que ces algorithmes ne sont que conçus et sont capables de résoudre des problèmes assez complexes avec une certaine perfection.

Au cours du chapitre suivant, nous allons étudier des systèmes de conversion éolienne où nous avons exposé de manière générale les diverses formes d'éoliennes, et nous allons plutôt opter pour une turbine à axe horizontal. Deuxièmement, nous avons exposé les deux technologies des éoliennes, à savoir les éoliennes à vitesse variable. En revanche, il est possible de présenter et de modéliser mathématiquement les différentes parties d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne qui utilise une GADA à vitesse variable.

Chapitre II :

Modélisation de la chaîne
de conversion éolienne

II. Introduction

Les énergies renouvelables se révèlent aujourd'hui, comme de production d'électricité vitales, obtenues à partir des gisements inépuisables telle que, Le soleil, le vent, la chaleur de terre, les chutes d'eau ou encore les marées, il convient de noter que le caractère renouvelable d'une énergie est influencé non seulement par la vitesse à laquelle la source se régénère, mais également par la vitesse à laquelle elle est utilisée.[9]

Une éolienne est une machine permettant de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elle-même convertie en électricité. Lorsque plusieurs éoliennes sont installées sur un même site, on parle de « parc » ou de « ferme » d'éoliennes .[10]

On s'intéresse essentiellement à la modélisation de système de conversion éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA).

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est considérée comme l'une des machines les plus utilisées dans divers domaines, notamment la production d'énergie.

La production d'énergie à partir de la vitesse du vent est l'une des dernières technologies de production d'énergie, et dans la plupart des combinaisons de ce système, MADA s'appuie sur une efficacité élevée Mada possède des caractéristiques opérationnelles qualitatives fournies par son construction système capable de gérer différentes vitesses de vent et d'extraire une énergie à haute énergie. La méthode de raccordement des pièces du générateur avec le réseau électrique et l'utilisation de transformateurs est un facteur important pour réduire les coûts et produire une grande quantité d'énergie. [26]

L'objectif de ce chapitre est étudié le modèle général de ces turbines avec la machine asynchrone à double alimentation en paramètre diphasique avec transformation de Park. Pour cela nous devons développer les équations mathématiques qui égalisent chaque grandeur physique.

Pour convertir l'énergie électrique résultant et le stocker d'une manière facile à utiliser, nous dépendrons de l'onduleur triphasé à 3 niveaux type NPC réfléchissante pour les avantages de ce conservateur

Enfin, nous étudierons la commande vectorielle de la MADA et interpréterons ses résultats de simulation pour terminer ce chapitre.

II.2. Energie éolienne

II.2.1 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie extraite de l'énergie cinétique du vent par l'utilisation de turbines dédiées pour la production d'énergie électrique. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui existe dans toutes les régions, mais sa disponibilité varie d'un endroit à l'autre. C'est une énergie propre renouvelable et qui ne produit pas de pollution lors de son fonctionnement.[27]

La figure (II.1) présente les principaux organes du système de conversion éolienne.

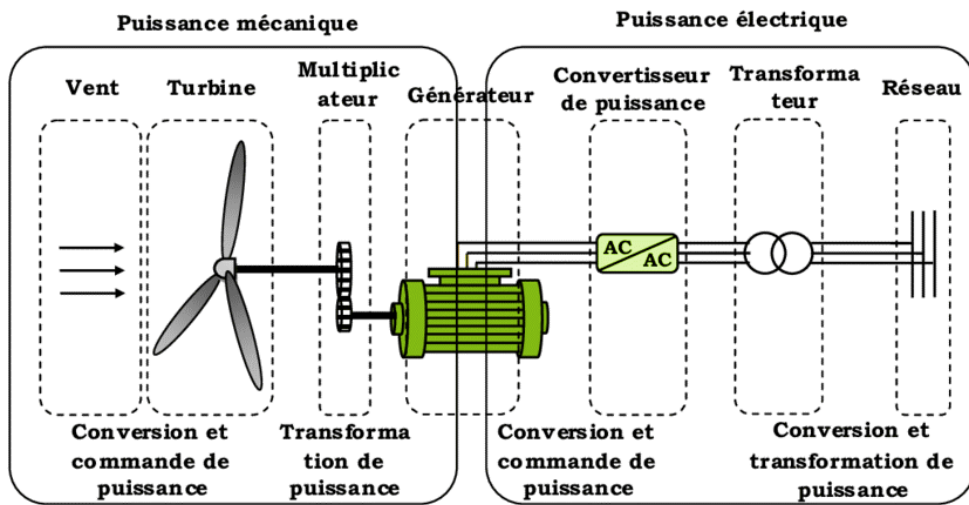


Figure II. 1 : Principaux organes du système de conversion éolienne.

II.2.2. Descriptif d'une éolienne

Dans cette thèse, le système de vent à vitesse variable basé sur MADA entraîne la turbine grâce à un multiplicateur MADA, connecté directement au réseau électrique par le stator et des transformateurs fixes triphasés par rotor, comme le montre la (figure II.2). [28] [29] [30]

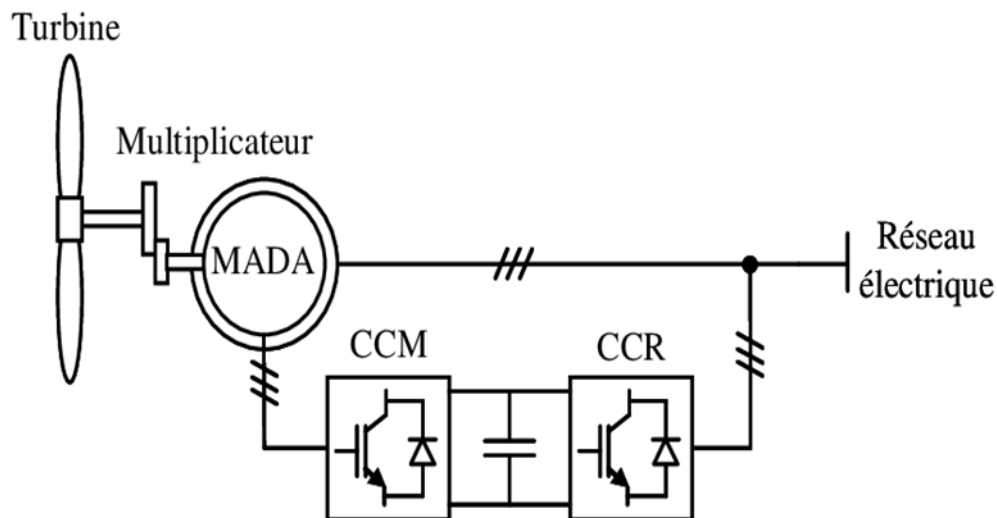


Figure II. 2 : Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

I.2.3. Principe de fonctionnement de l'éolienne

La structure d'une éolienne est composée d'un rotor qui convertit l'énergie cinétique en énergie mécanique grâce à des profils aérodynamiques. Autour du profil, le flux d'air génère une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui représente une force secondaire. On convertit ensuite la puissance mécanique en puissance hydraulique par une pompe ou en puissance électrique par une génératrice.[31]

I.2.4. Différents types d'une éolienne

Sur le plan structural il existe deux grandes catégories d'éoliennes :

- À axe vertical
- À axe horizontal [28].

Nous avons basé notre thèse sur l'éolienne horizontale.

I.2.4.1. Eoliennes à axes horizontal

Ce type d'aérogénérateur est le plus répandu dans l'industrie des éoliennes à cause du positionnement du capteur éolien à quelques dizaines de mètres au-dessus du sol, ce qui réduit les contraintes mécaniques et augmente l'efficacité. [32]

La technologie des moulins à vent est utilisée pour les éoliennes à axe horizontal. Elles sont plus couramment utilisées et requièrent souvent un dispositif d'orientation des pales, offrant ainsi un

rendement aérodynamique plus élevé, démarrant de manière autonome et ayant un faible encombrement au sol.

Pour la production d'électricité, les éoliennes à axe horizontal présentent généralement un nombre des pales compris entre 1 et 3 qui sont fixées au sommet d'une tour, ce qui lui permet de capter une quantité plus importante d'énergie éolienne. La force de portance du vent est utilisée pour générer un couple moteur entraînant sa rotation. Selon son nombre de pales, l'éolienne à axe horizontal est dite mono pale, bipales, tripales ou multipales (figureII.3) mais la technologie la plus dominante actuellement c'est l'éolienne tripale, elle est plus stable car la charge aérodynamique est relativement uniforme et présente le coefficient de puissance le plus élevé actuellement. [33]

Ce type d'éolienne présente plus d'avantage :

- ✓ Elle a le meilleur rendement par rapport aux autres structures d'éoliennes.
- ✓ Un coût raisonnable.
- ✓ Elle provoque un faible bruit à cause de sa vitesse faible.
- ✓ Robuste mécaniquement à cause de sa symétrie à 3 pales. [34]



Figure II. 3: Eoliennes à axe horizontal

I.2.4.2. Principales composantes des éoliennes à axe horizontale

Néanmoins, une éolienne à axe horizontale "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux :

- Le mât.
- La nacelle.
- Le rotor.[35]

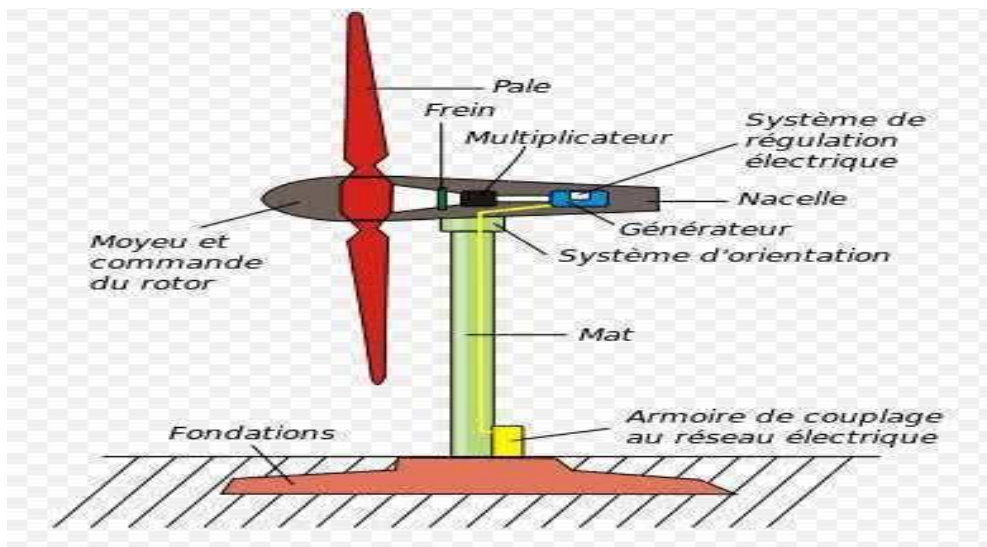


Figure I. 9 : Composantes d'une éolienne horizontale.

I.3. Fonctionnement de l'éolienne

L'éolienne peut fonctionner à deux vitesses : à vitesse fixe ou à vitesse variable, et nous aborderons sur le fonctionnement à vitesse variable.

I.3.1. Fonctionnement à vitesse variable

Trois types de génératrices peuvent être utilisés dans les éoliennes à vitesse variable : la génératrice synchrone à aimant permanent (MSAP), la génératrice asynchrone et la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA).

Ses éoliennes sont généralement composées de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) reliés par un étage à tension continue. Elles sont équipées d'une machine asynchrone à cage figure (II.4), qui est pilotée par le stator pour fonctionner à différentes vitesses, ou d'une machine asynchrone à double alimentation avec un rotor bobiné. La vitesse variable est effectuée grâce aux convertisseurs de puissance, qui se trouvent dans le circuit rotorique.[36]

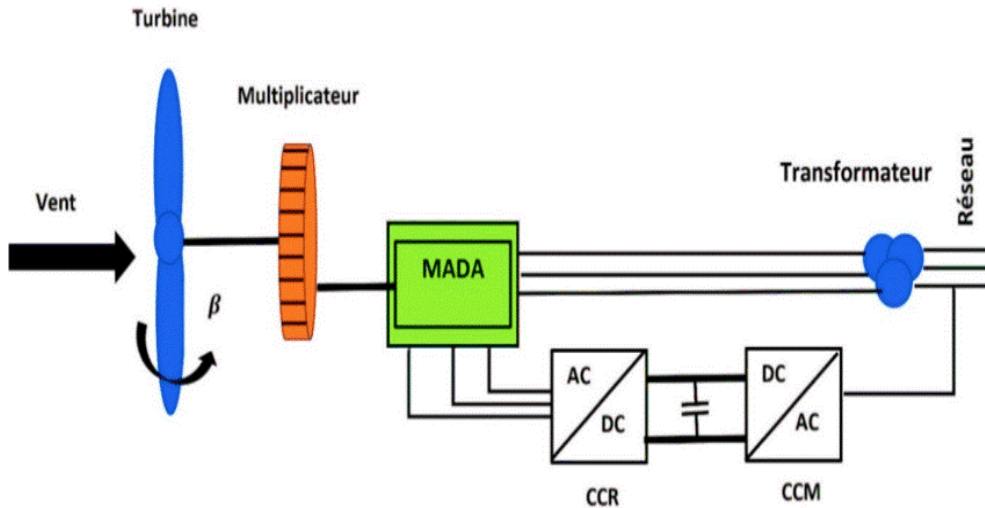


Figure II. 4: Eoliennes à vitesse variable.

II.4. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

La modélisation de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales de longueur R. Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement, tournant à une vitesse Ω , relié à un multiplicateur de gain G. Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (figureII.5) .[28] [34] [26]

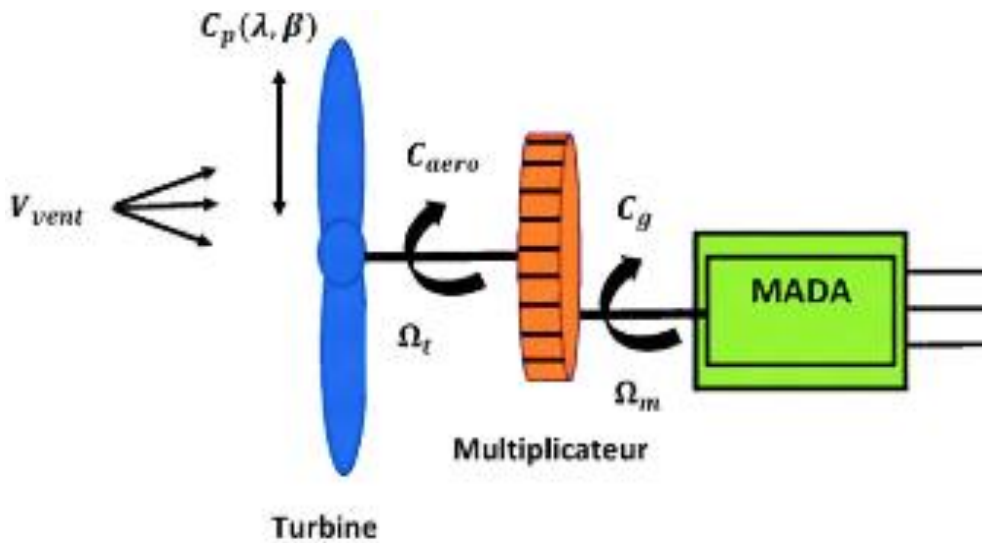


Figure II. 5 : Structure du système de conversion éolien

II.4.1. Modèle de pales

La puissance disponible dans le vent est donnée par l'équation :[26] [37]

$$P_v = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 / 2 \tag{II. 1}$$

II.4.2. Modèle aérodynamique

La puissance aérodynamique d'une éolienne $P_{aér}$ est donnée par :

$$P_{a\acute{e}r} = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (\text{II. 2})$$

$C_p(\lambda, \beta)$: Coefficient de puissance qui dépend de la vitesse spécifique λ et de l'angle d'orientation des pales β .

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

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

L'expression de coefficient de puissance que nous allons utiliser dans notre étude est donnée par [21] :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot \left(C_2 \frac{1}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \cdot e^{\frac{-C_5}{\lambda_i}} + C_6 \quad (\text{II. 4})$$

Avec :

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

Où Coefficients définissant l'évolution de C_p :

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

Le Coefficient de la puissance $C_p(\lambda, \beta)$ en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la figure II.6. La valeur maximale de C_p ($C_p \text{ max}=0.48$) est atteinte pour $\beta = 0$ et $\lambda = 8.1$. Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur nominale λ_n . [38]

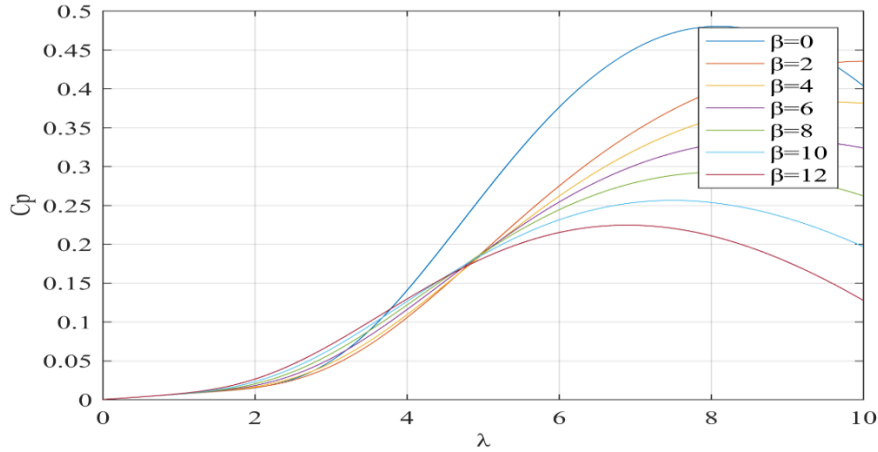


Figure II. 6 : Coefficient aérodynamique en fonction de la ration de vitesse de la turbine λ .

II.4.3. Modèle de multiplicateur

La multiplicateur fonction est la climatisation (lente) turbine (lente) avec la vitesse du générateur et est représentée par les équations suivantes.

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (II. 6)$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II. 7)$$

Ω_t Et Ω_{mec} : vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur.

II.4.4. Modélisation de l'arbre de la turbine

Nous résumons le modèle de transmission mécanique comme suit :

$$J = J_{turbine}/G^2 + J_g \quad (II. 8)$$

Le couple appliqué au rotor contrôle l'évolution de la vitesse mécanique Ω_{mec} du générateur, C_{mec} est le résultat du couple turbine après le multiplicateur. Le couple électromagnétique C_{em} généré par le générateur, et le couple de frottement C_{vis} visqueux et d'un couple du multiplicateur de vitesse C_g .

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

Le schéma bloc de la figure II.7 correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation Ω_g de la génératrice, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique C_{em} de la MADA. La vitesse du vent V est considérée comme une entrée perturbatrice au système. [39] [40]

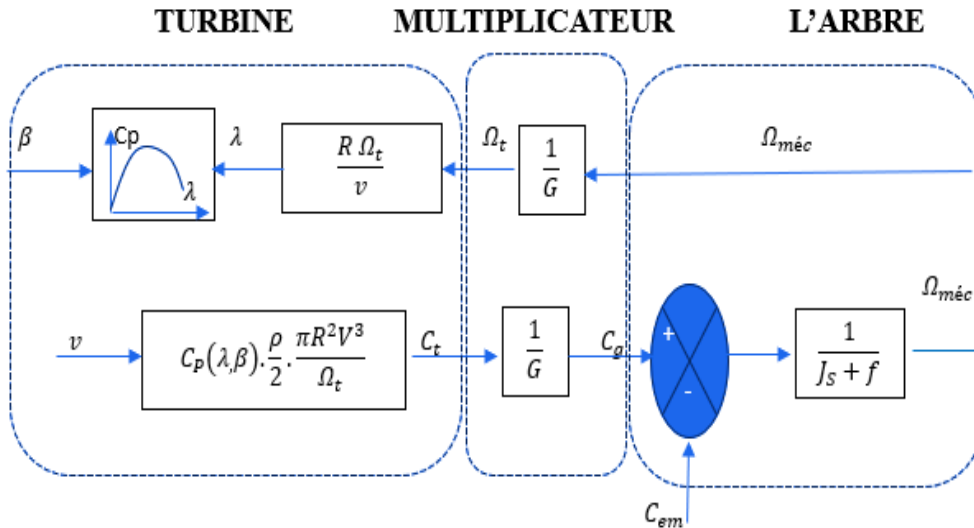


Figure II. 7 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

II.5. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone doublé alimentation

Pour expliquer le principe de fonctionnement de la MADA, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance P est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie, $(1 - g)P$ est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste (gP) sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence ($g \cdot f$). Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1 + g)P$. Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique. [26] [41]

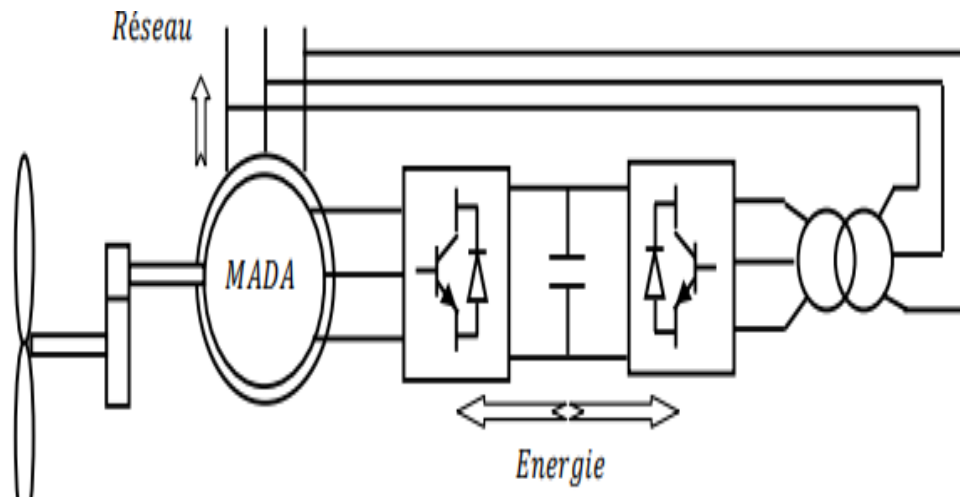


Figure II. 8 : Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

II.6. Modélisation de la GADA

Le générateur asynchrone à double alimentation (GADA) est une machine électrique largement utilisée dans la production d'énergie éolienne, pour laquelle nous pouvons développer un modèle mathématique comme toutes les machines. Ceci dans le but d'observer les différentes évolutions des systèmes électromécaniques quantitatifs et des réglages de contrôle. Et trouver des solutions aux problèmes résultant des changements de charges et de vitesses. Pour cette raison, nous exprimerons les tensions, les moments et toutes les grandeurs avec des équations mathématiques.

II.6.1. Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la GADA est établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes [34] [26]:

- L'entrefer est constant et l'effet des encoches est négligeable.
- La distribution spatiale des forces magnétomotrices dans l'entrefer est sinusoïdale.
- Les pertes ferromagnétiques sont négligeables.
- L'influence de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.
- La répartition de l'induction le long de l'entrefer est sinusoïdale.
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé.

II.6.2. Equation Générale de la machine

II.6.2.1. Equation électrique

La loi de Faraday et la loi d'Ohm permettent de relier les tensions sur les enroulements aux flux totalisés et aux courants dans ces bobinages. La GADA est représentée par les équations des phases statoriques et rotoriques suivantes :

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

- Au niveau du stator :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{sa} \\ \mathbf{v}_{sb} \\ \mathbf{v}_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{sa} \\ \mathbf{i}_{sb} \\ \mathbf{i}_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}_{sa} \\ \boldsymbol{\phi}_{sb} \\ \boldsymbol{\phi}_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 11})$$

$$[\mathbf{v}_{sabc}] = \mathbf{R}_s [\mathbf{i}_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\boldsymbol{\phi}_{sabc}] \quad (\text{II. 12})$$

- Au niveau du rotor :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{ra} \\ \mathbf{v}_{rb} \\ \mathbf{v}_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_r & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_r & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{ra} \\ \mathbf{i}_{rb} \\ \mathbf{i}_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}_{ra} \\ \boldsymbol{\phi}_{rb} \\ \boldsymbol{\phi}_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 13})$$

$$[\mathbf{v}_{rabc}] = \mathbf{R}_r [\mathbf{i}_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\boldsymbol{\phi}_{rabc}] \quad (\text{II. 14})$$

II.6.2.2. Equation magnétique

On définit le vecteur flux par :

$$[\boldsymbol{\phi}_{sabc}] = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}_{sa} \\ \boldsymbol{\phi}_{sb} \\ \boldsymbol{\phi}_{sc} \end{bmatrix} \text{ Et } [\boldsymbol{\phi}_{rabc}] = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}_{ra} \\ \boldsymbol{\phi}_{rb} \\ \boldsymbol{\phi}_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 15})$$

Les vecteurs courants Par :

$$[\mathbf{i}_{sabc}] = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{sa} \\ \mathbf{i}_{sb} \\ \mathbf{i}_{sc} \end{bmatrix} \text{ Et } [\mathbf{i}_{rabc}] = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{ra} \\ \mathbf{i}_{rb} \\ \mathbf{i}_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 16})$$

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

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} \quad (II. 17)$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (II. 18)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (II. 19)$$

$$[M_{sr}] = [M_{sr}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (II. 20)$$

II.6.3. Transformation de Park

La transformation de Park permet de transformer les grandeurs statoriques et rotoriques triphasées en grandeurs équivalentes représentées dans un repère orthogonal. Donc, le passage du repère triphasé (A, B, C) au repère biphasé (α, β) suivie d'une rotation au repère (d, q).

Si l'on note par θ_s (respectivement par θ_r) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (respectivement rotoriques). On remarque sur la figure (II.9) que θ_s et θ_r sont naturellement liés à θ par la relation rigide. [26] [40]

$$\theta_s - \theta_r = \theta \quad (II. 21)$$

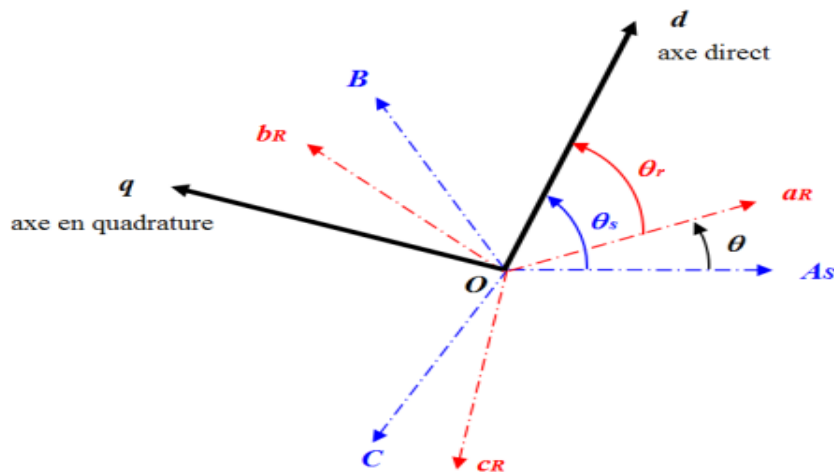


Figure II. 9: Modèle de PARK de la MADA.

La matrice de transformation $[P(\theta_s)]$ est définie par :

$$\left\{ \begin{array}{l} [P(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_s & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta_s & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \\ [P(\theta_s)]^{-1} = [P(\theta_s)]^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_s & -\sin\theta_s & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{II. 22})$$

II.6.4. Modélisation de la GADA dans le repéré de Park

Les tensions, courants et les flux se transforment de la manière suivante :

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

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

$$[\Phi_{dqo}] = [P(\theta_s)][\Phi_{abc}] \quad (\text{II. 25})$$

La matrice $[P(\theta_s)]$ représente la matrice de transformation appliquée au stator. La transformation des grandeurs rotoriques s'obtient en remplaçant l'indice (s) par l'indice (r).

II.6.4.1. Equations électriques

$$[V_{sabc}] = [R_s][I_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}] \quad (\text{II. 26})$$

Appliquons la transformation de Park à l'expression (II.26) et en multipliant les deux membres de l'égalité par $[P(\theta_s)]$ et en simplifiant, nous trouvons :

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

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

Où :

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

Tel que : $\theta = \theta_s$ Pour les grandeurs statoriques

$\theta = \theta_s - \theta_r$ Pour les grandeurs rotoriques

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

En remplaçant la relation (II.28) dans (II.27) on obtient le modèle biphasé équivalent suivant :

$$\begin{cases} V_d = R i_d + \frac{d}{dt} \phi_d - \phi_q \\ V_q = R i_q + \frac{d}{dt} \phi_q + \phi_d \\ V_o = R i_o + \frac{d}{dt} \phi_o \end{cases} \quad (\text{II. 30})$$

II.6.4.2. Représentation de la GADA dans un repère biphasé (d, q)

En multipliant le système des équations (II.28) par la matrice de Park, on obtient Equation électrique

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{so} = R_s i_{so} + \frac{d}{dt} \phi_{so} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + \omega_s \phi_{rd} \\ V_{ro} = R_r i_{ro} + \frac{d}{dt} \phi_{ro} \end{cases} \quad (\text{II. 31})$$

Où :

$$\Omega_s = p\Omega_{méc} \quad (II.32)$$

II.6.4.3. Equations des flux

De la même manière on peut trouver les équations de flux qui sont donner par :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \end{cases} \quad (II.33)$$

Les puissances actives et réactives statoriques s'expriment par :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} \\ Q_s = V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (II.34)$$

II.6.4.4. Equation mécanique

On en tire l'expression scalaire du couple :

$$C_{em} = p(\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \quad (II.35)$$

On peut exprimer l'équation du couple par d'autre expression telle que :

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

Pour obtenir le modèle complet de la machine asynchrone à double alimentation, il est nécessaire de prendre en considération l'équation mécanique. L'équation mécanique, en appliquant les relations fondamentales de la dynamique à la machine, est :

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{em} - C_r - f \Omega_{méc} \quad (II.37)$$

Avec :

$$\Omega_{\text{mec}} = \frac{\omega}{p} \quad (\text{II. 38})$$

II.7. Choix de référentiel de Park

Le modèle de la machine a été présenté dans un repère biphasé ($d - q$) avec une orientation quelconque, cependant il existe différentes possibilités pour fixer l'orientation du repère, et cela dépend généralement des objectifs de l'application le choix du référentiel nous ramène pratiquement aux trois cas possibles. [42]

- Repère (α, β) : le système biphasé lié au stator $\theta=0$, alors $\omega = 0$
- Repère (x, y) : le système biphasé lié au rotor $\theta = \theta_r$, alors $\omega = \omega_r$
- Repère (d, q) : le système biphasé lié au champ tournant $\theta = \theta_s$, alors $\omega = \omega_s$

On désire transformer les enroulements de la MADA triphasée en des enroulements biphasés orthogonaux équivalents selon les axes $(d - q)$ liés au champ tournant ainsi la composante homopolaire pour équilibrer le système transformé. [43] [44]

II.8. Modélisation de l'onduleur triphasé à MLI

II.8.1. Description de l'onduleur

L'onduleur triphasé à trois niveaux du NPC (point neutre) est un type spécial d'onduleur utilisé dans les systèmes de conversion d'énergie électrique. Dans ce type de réflexion, des transistors énergétiques sont formés pour créer trois niveaux d'effort sur la sortie, qui est que l'onduleur à trois niveaux du NPC est une solution efficace pour améliorer les performances et la qualité des systèmes de transformation électrique, La structure du NPC est séparée en trois branches distinctes, chacune avec un point neutre articulaire, Cela le rend idéal pour une utilisation car Les onduleurs triphasés à trois niveaux sont largement utilisés dans les systèmes d'énergie renouvelable tels que les éoliennes.

II.8.2. Structure d'un onduleur triphasé à 3 niveaux de type NPC

La structure de l'onduleur de tension triphasé de type NPC à trois niveaux est représentée par la (figure II.10)

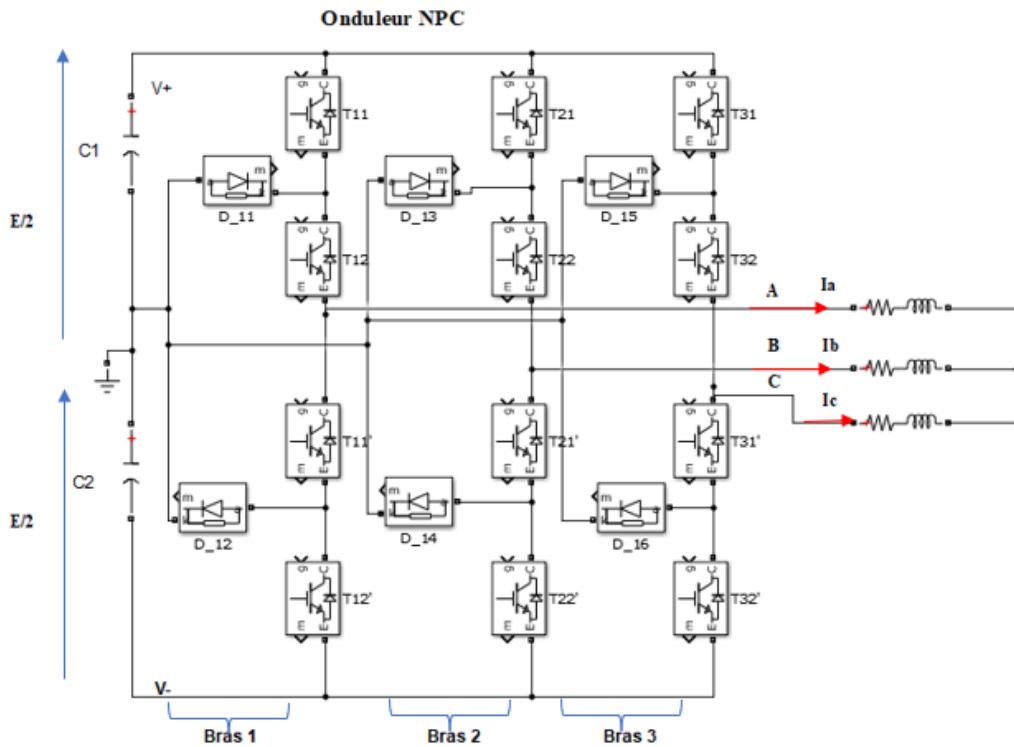


Figure II. 10 : Structure Générale de l’onduleur à trois niveaux

Cette structure se compose de trois bras symétriques constitués chacun de quatre interrupteurs (transistor IGBT) en série ($T_{11}, T_{12}, T'_{11},$ et T'_{12} pour le bras 1) et deux autres en parallèles, plus deux diodes de Clamp (D_{11}, D_{12}) connectées au point intermédiaire, Les diodes antiparallèles sur les transistors assurent la réversibilité des courants de la charge.

Le point milieu de chaque bras est relié à une alimentation continue, de force électromotrice (E). A l’aide d’un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs de filtrage C_1 et C_2 de même capacité, on obtient deux sources secondaires de tension continue délivrant chacune une demi-tension ($E/2$). Étant connectés entre eux en un point neutre noté o . Ces derniers sont identiques de manière à éviter le déséquilibre de charge ($C_1 = C_2$ alors $U_{C1} = U_{C2}$). Le point o est connecté avec les deux diodes médianes (D_{11}, D_{12}).

II.8.3. Configurations d’un bras de l’onduleur à trois niveaux

Il est important déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple V_{ao} entre la borne (a) de la charge et le point neutre o . Cette tension est entièrement définie par l’état (0 ou 1) des quatre interrupteurs $T_{11}, T_{12}, T'_{11},$ et T'_{12} du bras, Ces différentes configurations sont représentées dans le tableau (figure II.11).

II.8.3.1. Première configuration

T_{11} Et T_{12} sont passants, $T_{11'}$ et $T_{12'}$ sont bloqués (Figure {a}), on a :

La tension de sortie V_{ao} est :

$$V_{ao} = +E/2 \tag{II. 39}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{T11'} = V_{T12'} = +E/2 \tag{II. 40}$$

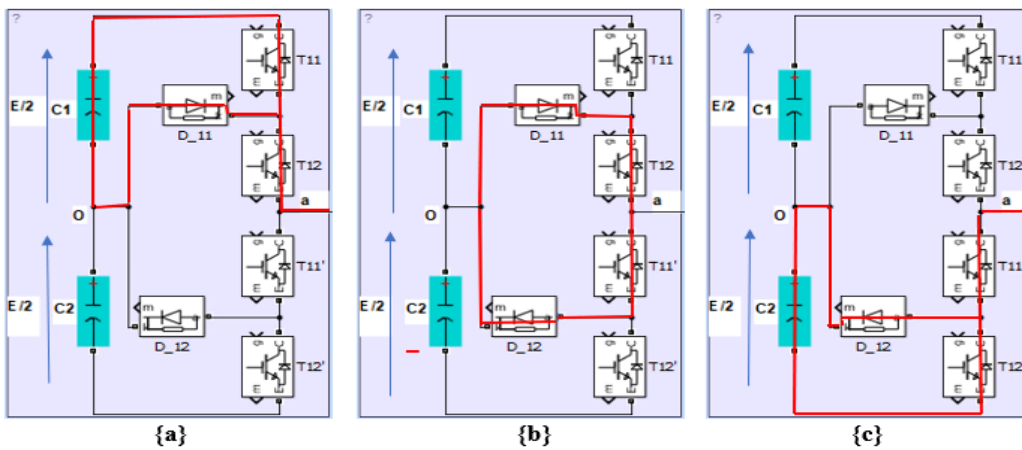


Figure II. 11 : Les différentes configurations fonctionnelles d'un bras dans l'onduleur triphasé à 3 niveaux NPC

II.8.3.2. Deuxième configuration

T_{12} Et $T_{11'}$ sont passants, T_{11} et $T_{12'}$ sont bloqués (Figure {b})

Le point a est relié directement au point neutre 0, alors la tension de sorti V_{ao} est nulle :

$$V_{ao} = 0 \tag{II. 41}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{T11} = V_{T12'} = +E/2 \tag{II. 42}$$

II.8.3.3. Troisième configuration

$T_{11'}$ Et $T_{12'}$ sont passants, T_{11} et T_{12} sont bloqués (Figure {c})

La tension de sortie V_{ao} est :

$$V_{ao} = -E/2 \tag{II.43}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{T11} = V_{T12} = +E/2 \tag{II.44}$$

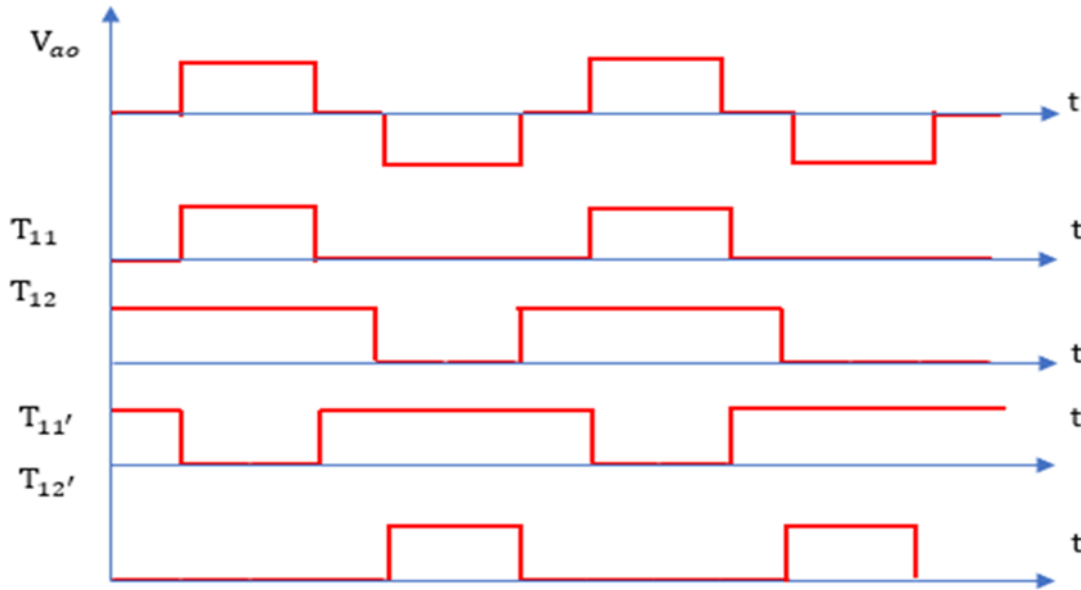


Figure II. 12 : Formes d’ondes d’un bras d’onduleur triphasé de type NPC

Tableau II. 1 : Etats de convertisseur NPC à trois niveaux et tension de sorti.

Etats des interrupteurs				Tension de sortie
T_{11}	T_{12}	T_{11}'	T_{12}'	V_{ao}
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

II.9. Modulation sinus - triangle

II.9.1. Principe de la technique

Le principe de cette technique consiste à comparer un signal triangulaire (P) d’amplitude fixe et de fréquence nettement supérieure appelée porteuse, au trois signaux sinusoïdaux (r_1, r_2, r_3),

d'amplitude variable et de fréquence f appelée référence. L'Intersection de ces deux signaux donne les instants de commutation des interrupteurs. [26]

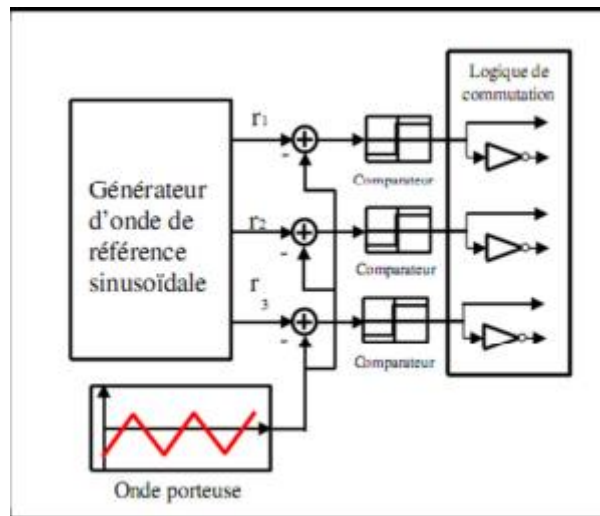


Figure II. 13 : Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoïdale

II.9.2. Modulation sinusoïdale à doubles triangles

Cette stratégie est basée, dans son principe, sur la modulation sinusoïdale classique. Pour un onduleur à trois niveaux, elle recommande l'utilisation de deux signaux triangulaires de même fréquence f_c et de même amplitude A_c (crête à crête). 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. [45]

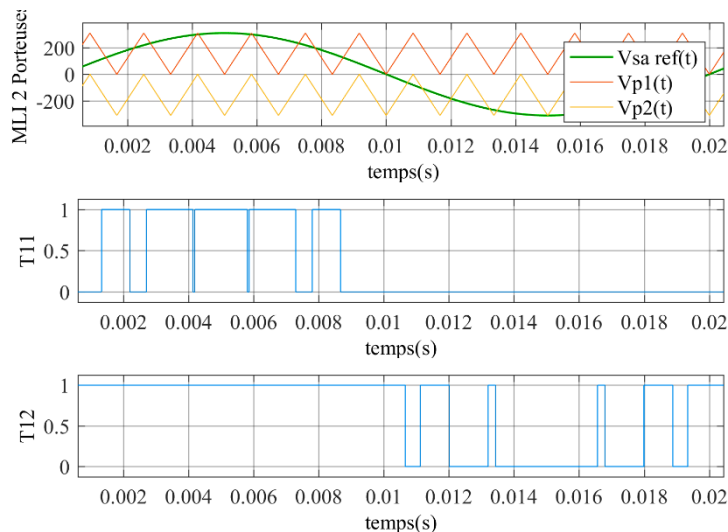


Figure II. 14 : Génération des signaux de commande par la modulation à triangles multiples (onduleur NPC à 3 niveaux)

II.10. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons examiné les trois éléments clés : la modélisation de la turbine éolienne et le principe de transformation de l'énergie éolienne en énergie mécanique. La section mécanique de la MADA est celle qui comprend la turbine, le multiplicateur et l'arbre. Dans la deuxième partie, nous avons examiné la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en mode génératrice. En utilisant quelques hypothèses simplificatrices, nous avons développé un modèle mathématique. Ce modèle a été simplifié grâce à la transformation de Park. Le principe de fonctionnement et la modélisation de l'onduleur à 3 niveaux du type NPC ont été examinés dans la dernière partie.

Le chapitre suivant sera consacré aux techniques de maximisation de puissance MPPT et à établir la synthèse de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la GADA.

CHAPITRE III :
Commande de la chaîne
éolienne

III. Introduction

L'utilisation de la GADA permet le fonctionnement à vitesse variable, ce qui est nécessaire pour extraire le maximum de puissance à partir du vent et ainsi d'augmenter le rendement de la machine.

Pour avoir un fonctionnement à vitesse de rotation donnée correspondant à une vitesse de vent, il faut que la machine impose un couple résistant permettant ce fonctionnement. Etant donné que la puissance est le produit de la vitesse et du couple il suffit d'avoir une référence de puissance qu'il faut suivre pour fonctionner à vitesse optimale.

Un modèle de la turbine éolienne a été établi au chapitre précédent dont le but d'appliquer la technique MPPT pour extraire le maximum de puissance pour cela la MPPT sera étudié par la suite.

Pour la régulation des puissances active et réactive de la GADA, ce chapitre opté pour étudiée la commande vectorielle indirect avec boucle de puissance. [46]

III.2. Technique d'extraction du maximum de puissance

III.2.1. Principe de la MPPT

La MPPT est une méthode de contrôle très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine Ω_T qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée [47]. 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.[36]

III.2.2. Régulateur de vitesse MPPT

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 figure (III.1)

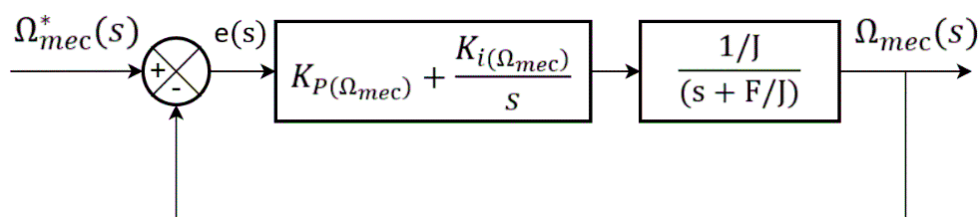


Figure III. 1 : Schéma fonctionnel de régulation de la vitesse.

Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

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

Par compensation :

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

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

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

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

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

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

Le régulateur de la vitesse Ω_{mec} est :

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

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

III.2.3. Résultat de simulation et interprétation

Afin de confirmer l'utilisation de régulateurs PI pour contrôler la vitesse MPPT, une simulation a été réalisée dans l'espace Simulink/Matlab.

Pour le régulateur de la vitesse $K_p=98.90$, $K_i= 163$;

Afin de tester la régulation de MPPT, nous avons utilisé un signal aléatoire qui représente le vent entre 7.7 et 8.4 m/s, afin d'observer son comportement Figure (III.2).

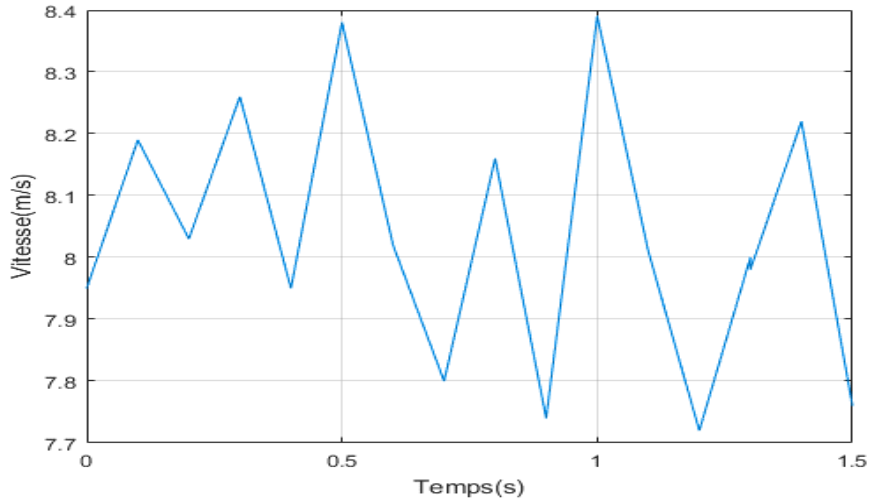


Figure III. 2 : Signal de la vitesse du vent.

Les simulations révèlent une variation de la vitesse mécanique par rapport à la vitesse de référence Figure (III.3). Dans le modèle MPPT, le PI est utilisé afin de régler la vitesse de rotation des pales de l'éolienne afin d'extraire le maximum de la puissance générée.

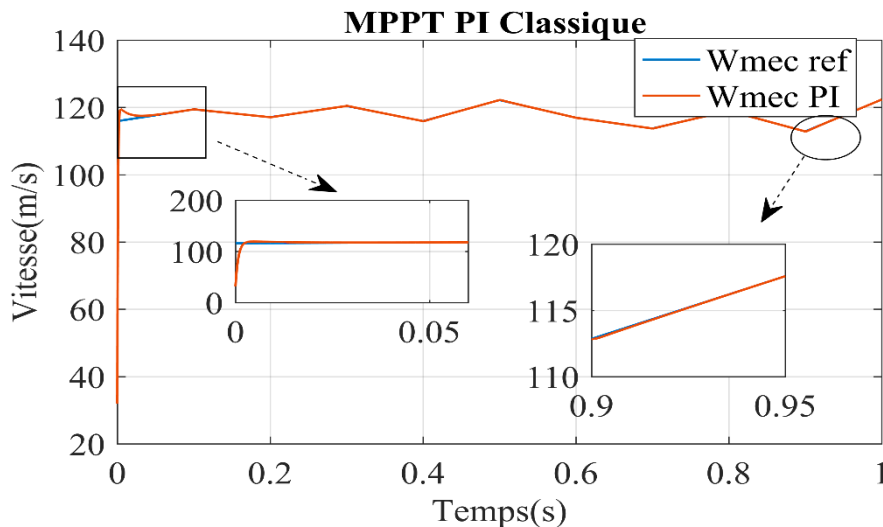


Figure III. 3 : Régulation de la vitesse par PI.

III.3. Commande vectorielle

III.3.1. Principe de la commande à flux orienté

La commande vectorielle (la commande à flux orienté) est une méthode de contrôle des machines à courant alternatif, son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes (I_{sd} et I_{sq}) en quadrature dans un référentiel lié au champ tournant de façon que l'une des composantes (I_{sq}) commande le couple et l'autre (I_{sd})

commande le flux. Ceci permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. [40]

III.3.2. Modèle de la GADA en vue de la commande

En choisissant un référentiel diphasé (d, q) lié au champ tournant statorique et en alignant l'axe d sur le vecteur 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 s'écrire 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, On peut simplifier les équations des tensions statoriques sur le repère choisi comme suit :

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

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 :

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

Dans l'hypothèse d'un réseau stable ayant pour tension V_s , le flux Φ_s est 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 s'écrivent comme suit :

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

A partir des équations des flux statoriques, on peut écrire l'expression des courant statoriques :

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

En remplaçant les courants i_{sd} et i_{sq} par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive :

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

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 :

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

Les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre sont représentées dans la figure suivante :

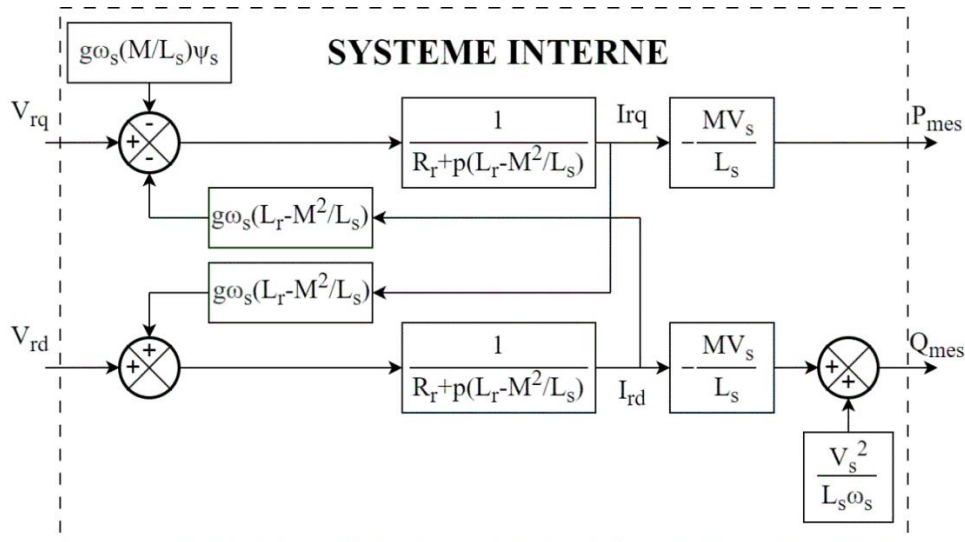


Figure III. 4 : Modèle de la GADA pour le contrôle des puissances.

III.3.4. Commande du GADA avec boucle de puissance

Nous avons trois types de la commande du MADA, la commande indirecte, la commande indirecte sans boucle de puissance et la commande indirecte avec boucle de puissance, nous avons choisis pour cette étude la commande indirecte avec boucle de puissance. La structure est composée de deux boucle une boucle interne c'est la boucle du courant et une boucle externe est la boucle de puissance. On établit alors le système de régulation donné par la figure (III.5).

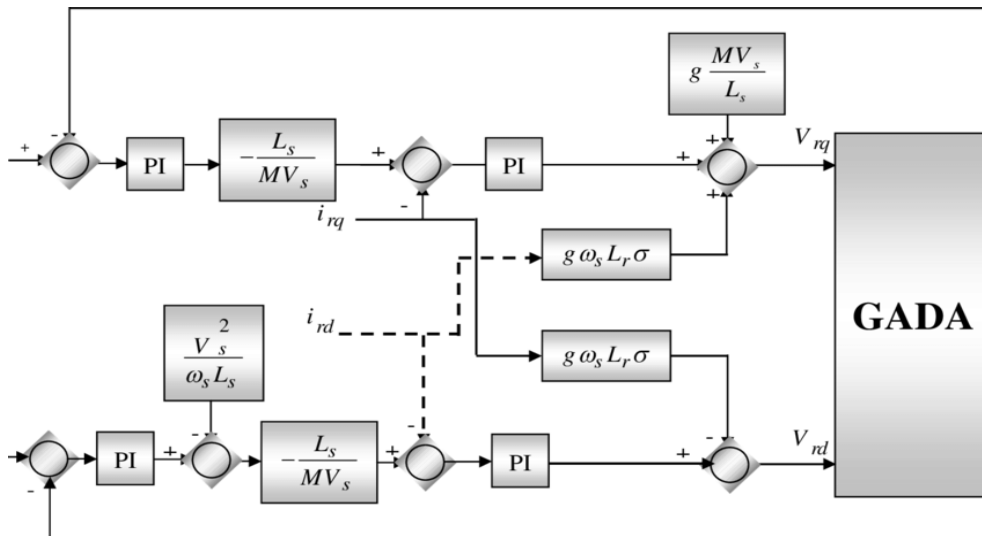


Figure III. 5 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance.

III.3.5. Dimensionnement du régulateur

Les régulateurs à action proportionnelle-intégrale PI sont très répandus dans le domaine de la commande des machines électriques, l'action du régulateur proportionnelle P assure la rapidité de la réponse dynamique, et l'action du régulateur intégral élimine l'erreur statique en régime permanent.

Les régulateur PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive et des courants i_{rd} , i_{rq} , Offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en œuvre, ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré. [48]

La structure générale d'un régulateur proportionnel intégral PI est composée de la fonction proportionnelle et de la fonction intégrale mise en parallèle, sa fonction de transfert est donnée par :

$$FT_{PI} = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{III.19}$$

III.3.5.1. Commande des courants

La figure (III.6) montre la boucle interne est corrigé par le régulateur PI.

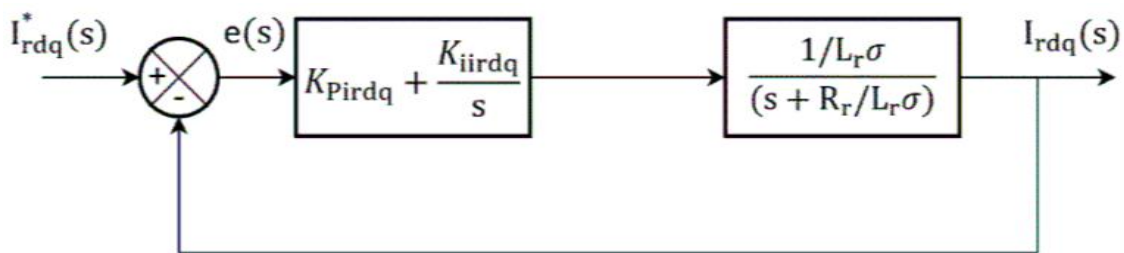


Figure III. 6 : Réglage des courants par PI

Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{Pirdq}}{S} \left(s + \frac{K_{iirdq}}{K_{Pirdq}} \right) \tag{III.20}$$

Par compensation :

$$\frac{R_r}{L_r \sigma} = \frac{K_{iirdq}}{K_{Pirdq}} \tag{III.21}$$

La fonction de transfert en boucle fermé est la suivante :

$$\frac{I_{rdq}(S)}{I_{rdq}^*(S)} = \frac{1}{\frac{L_r \sigma}{K_{Pirdq}} s + 1} \tag{III.22}$$

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

$$\frac{I_{rdq}(S)}{I_{rdq}^*(S)} = \frac{K}{1 + \tau_1 s} \tag{III.23}$$

$$\tau_1 = \frac{L_r \sigma}{K_{Pirdq}} \tag{III.24}$$

Le régulateur du courant rotorique dans les deux axes est :

$$K_{Pirdq} = \frac{L_r \sigma}{\tau_1} \tag{III.25}$$

$$K_{iirdq} = \frac{R_r}{\tau_1} \tag{III.26}$$

III.3.5.2. Commande des puissances

La figure (III.7) montre la boucle des puissances est corrigé par le régulateur PI.

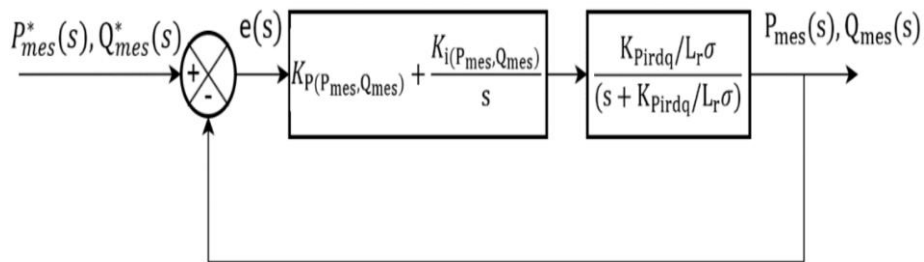


Figure III. 7 : Réglage des puissances par PI

Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{p(Pmes, Qmes)}}{S} \left(S + \frac{K_{i(Pmes, Qmes)}}{K_{p(Pmes, Qmes)}} \right) \tag{III.27}$$

Par compensation :

$$\frac{K_{Pirdq}}{L_r\sigma} = \frac{K_{i(Pmes,Qmes)}}{K_{p(Pmes,Qmes)}} \quad (III.28)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{P_{mes,Qmes}}{P_{mes,Qmes}^*} = \frac{1}{\frac{L_r\sigma}{K_{p(Pmes,Qmes)}K_{Pirdq}}S+1} \quad (III.29)$$

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

$$\frac{P_{mes,Qmes}}{P_{mes,Qmes}^*} = \frac{K}{1+\tau_2S} \quad (III.30)$$

$$\tau_2 = \frac{L_r\sigma}{K_{p(Pmes,Qmes)}K_{Pirdq}} \quad (III.31)$$

Le régulateur de puissance active et réactive est :

$$K_{p(Pmes,Qmes)} = \frac{L_r\sigma}{\tau_2 K_{Pirdq}} \quad (III.32)$$

$$K_{i(Pmes,Qmes)} = \frac{1}{\tau_2} \quad (III.33)$$

Avec :

$$\tau_2 > \tau_1 \quad (III.34)$$

III.3.6. Résultat de simulation et interprétation

La stratégie de la commande indirecte avec boucle de puissance à base des régulateurs PI des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la machine asynchrone à double alimentation a été implémentée dans un environnement Simulink/MATLAB, afin d'effectuer des tests de la régulation. [9]

Pour la boucle de courant : $K_p(i_{rd}eti_{rq})=12.8571$, $K_i(i_{rd}eti_{rq})=930$.

Pour la boucle de puissance : $K_p(P_{més}etQ_{més})=11.1636$, $K_i(P_{més}etQ_{més})=4545.5$.

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle (la commande indirecte avec boucle de puissance) en puissance active et réactive rotorique appliquée à une machine asynchrone à double alimentation entraînée à une vitesse variable.

La figure (III.8) nous montre que les puissances actives suivent la puissance maximale pour avoir une puissance optimale pour chaque vitesse du vent. La référence de la puissance réactive a été fixée à une valeur nulle et sans erreur.

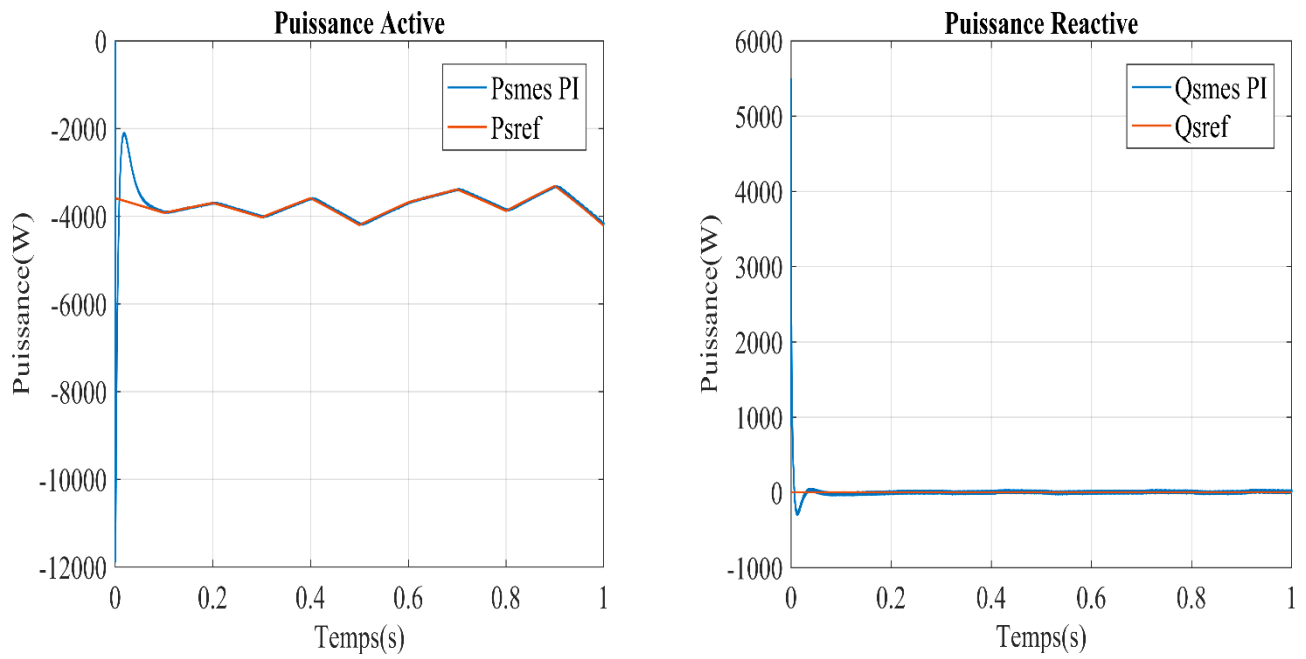


Figure III. 8 : Puissance active et réactive de la commande indirecte avec boucle de puissance.

On obtient également des résultats parfaits en ce qui concerne la réponse aux indications des courants rotoriques direct et quadratique, qui représentent les images des puissances réactive et active respectivement. Comme illustré dans la figure (III.9).

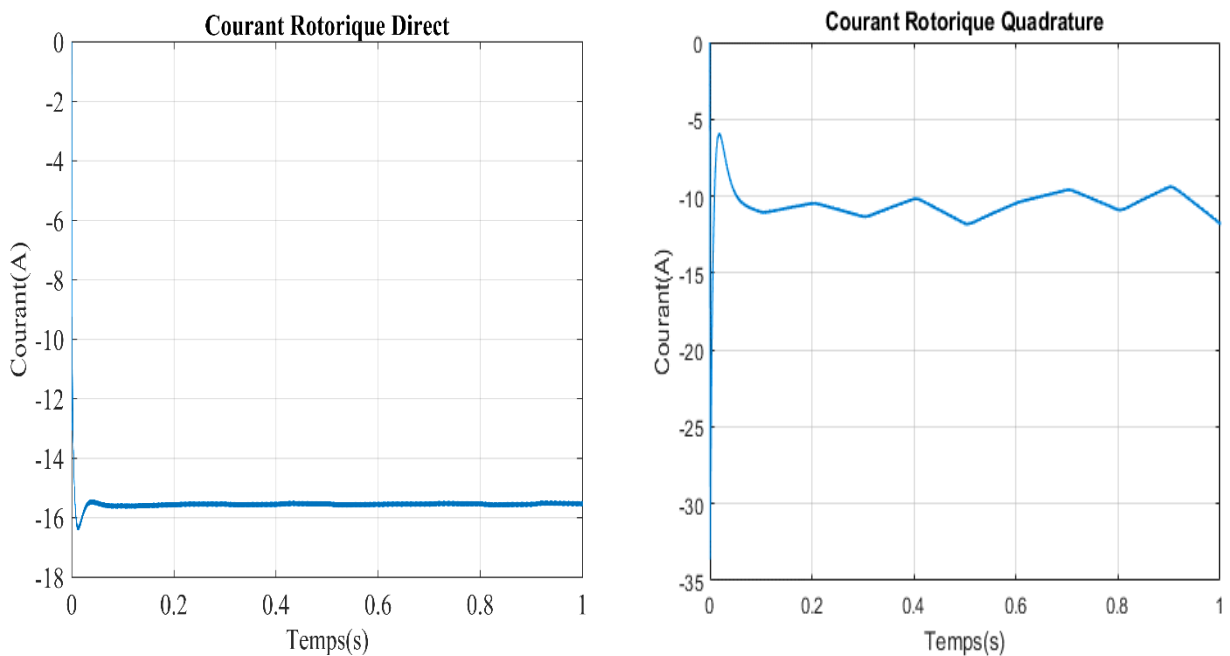


Figure III. 9 : Courant rotorique selon l'axe d et q de la commande indirecte avec boucle de puissance.

D'après la figure (III.10), on peut constater que le flux statorique direct suit la référence avec une composante quadrature quasiment nulle, ce qui suggère que le découplage de la machine a été accompli avec succès.

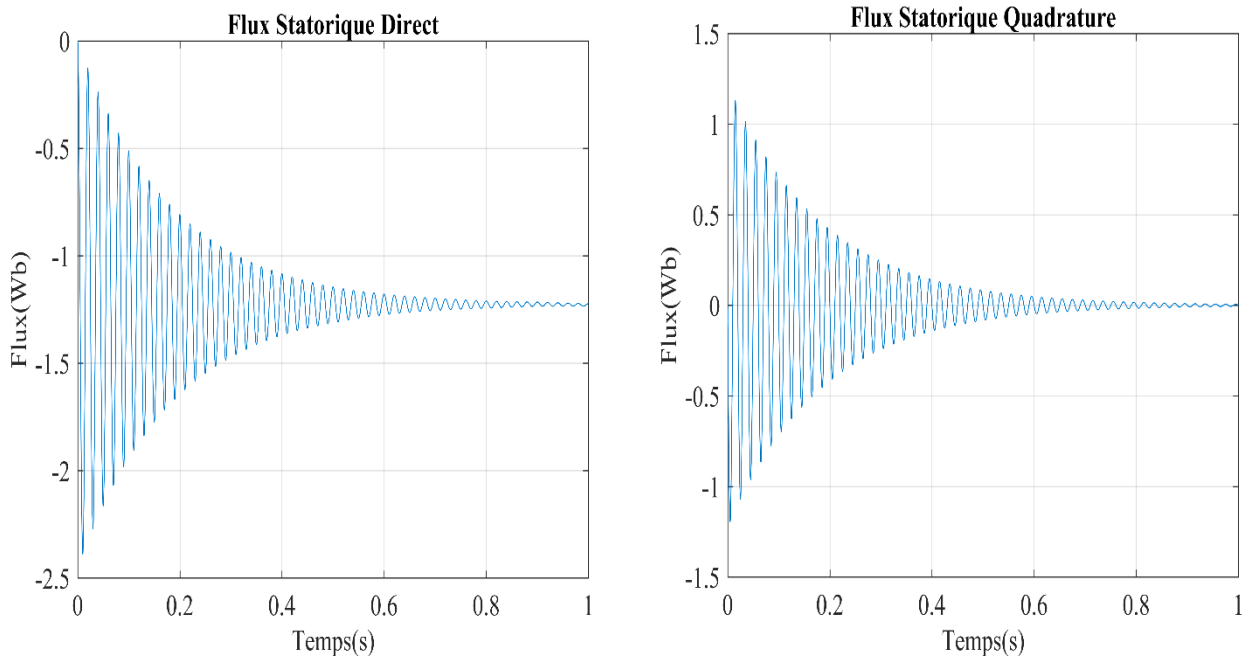


Figure III. 10 : Flux statorique selon l'axe d et q de la commande indirect avec boucle de puissance.

La figure (III.11) met en évidence une relation directe entre le couple électromagnétique et la puissance active dans le régime permanent, ce qui laisse entendre que la puissance active est la conséquence du couple électromagnétique. Mais, il est indépendant de la puissance réactive.

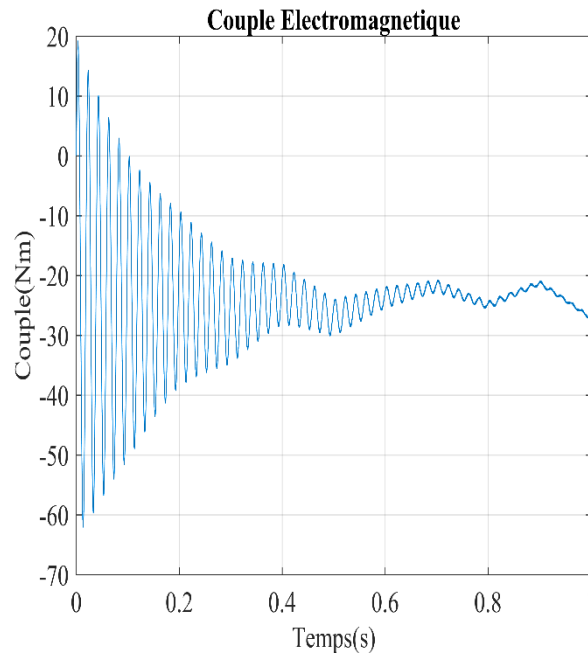


Figure III. 11 : Couple électromagnétique de la commande indirecte avec boucle de puissance

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné la gestion du régulateur de vitesse (MPPT) ainsi que les différentes étapes de la commande de la machine asynchrone à double alimentation, en particulier la commande vectorielle. Nous avons également approfondi la commande indirecte avec boucle de puissance. Les résultats de simulation et les interprétations relatives au MPPT et à la MADA avec un contrôleur PI ont été exposés.

Dans le prochain chapitre, notre proposition vise à optimiser les performances du contrôleur PI en utilisant l'utilisation d'algorithmes génétiques pour l'optimisation. En mode hors ligne, l'Algorithme Génétique est employé afin de déterminer les valeurs optimales des paramètres du contrôleur (K_p et K_i).

CHAPITRE IV :
Commande par
algorithme génétique

IV. Introduction

Comme précédemment évoqué, le principal souci rencontré lors de la gestion de l'aérogénérateur asynchrone à double alimentation et à flux statorique orienté est de déterminer les gains de régulateur, connu sous le nom de PI classique. Effectivement, il a été constaté qu'il n'y a pas de méthode de dimensionnement précise qui nous permette d'obtenir le gain de régulateur qui offre les performances souhaitées. La détermination du gain se fait en utilisant la méthode d'essai et d'erreur basée sur le test manuel d'un certain nombre de solutions potentielles jusqu'à ce que nous trouvions une solution appropriée.[14]

Pour obtenir un gain adéquat pour ce régulateur dans un délai raisonnable, nous avons opté pour une méthode de contrôle avancée appelée PI-AG (Proportional-Integral Algorithme génétique). En raison de sa simplicité de mise en œuvre, cette méthode est privilégiée

Nous souhaitons améliorer considérablement les performances du contrôle en utilisant la commande PI-AG, en optimisant la vitesse de rotation des pales de l'éolienne afin de maximiser la puissance produite.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les bases théoriques des algorithmes génétiques, qui constituent une stratégie de recherche efficace en tenant compte du compromis mentionné précédemment. Par la suite, nous examinerons leur utilisation pour améliorer le paramètre de régulateur précédemment employés pour réguler la vitesse d'une MADA. La présentation et la comparaison des résultats de simulation seront effectuées afin de mettre en évidence l'amélioration des performances dynamiques des régulateurs optimisés.

IV.2. Principe de base des algorithmes génétiques

Indépendamment de la problématique traitée ; les algorithmes génétiques sont basés sur six principes :

1. Choisir le codage des solutions
2. Générer une population initiale de taille fixe N , formée d'un ensemble fini de solutions, dite génération initiale
3. Définir une fonction d'évolution (fitness) permettant d'évaluer une solution et la comparer aux autres
4. Choisir les solutions par un mécanisme de sélection qui choisit pour un éventuel couplage

5. Générer de nouvelles solutions à l'aide des opérateurs génétique en utilisant :
 - Operateur de croisement : il manipule la structure des chromosomes des parents afin de produire des individus meilleurs ou différents, cet opérateur est effectué selon une probabilité P_x .
 - Operateur de mutation : il évite d'établir des populations uniformes incapables d'évoluer. Il consiste à modifier les valeurs des gènes de chromosomes selon une probabilité de mutation P_m .
6. Etablir un compromis entre les solutions produites (progénitures) et les solutions productrices (les parents) en utilisant un mécanisme d'insertion. En d'autres termes, et suite à des informations précises, décider ce qui doit rester et ce qui doit disparaître. Tout ceci, en sauvegardant à chaque génération une taille de la population N fixe.

IV.3. Fonctionnement des AG

Le début de l'algorithme génétique, illustré dans la figure (IV.2), consiste à générer une population initiale de N individus. Ensuite, nous calculons les valeurs de leur fonction objective et sélectionnons les individus en utilisant une méthode de sélection. Les individus, sujets de croisement par l'opérateur de croisement, sont choisis selon une probabilité P_x . Leurs résultats peuvent être mutés par un opérateur de mutation avec une probabilité de mutation P_m . Les individus issus de ces opérateurs génétiques seront insérés par une méthode d'insertion dans la nouvelle population dont nous évaluons la valeur de la fonction objective de chacun de ses individus. Ainsi, ce test est vérifié alors l'algorithme s'arrête avec une solution optimale, test d'arrêt sera effectué pour vérifier la qualité des individus obtenus. Sinon ont réitéré le processus pour la nouvelle génération. [20] [21]

IV.4. PI- Algorithme génétique

La méthode proposée utilise l'algorithme génétique pour optimiser les paramètres du contrôleur PI des courants de rotor et puissance active et réactive, l'algorithme génétique est utilisé hors ligne pour déterminer les paramètres optimaux du contrôleur (K_p et K_i) du GADA.

La Figure (IV.1). Montre le schéma bloc du contrôleur algorithme génétique -PI, Procédure d'optimisation des gains du régulateur de vitesse par l'algorithme génétique.

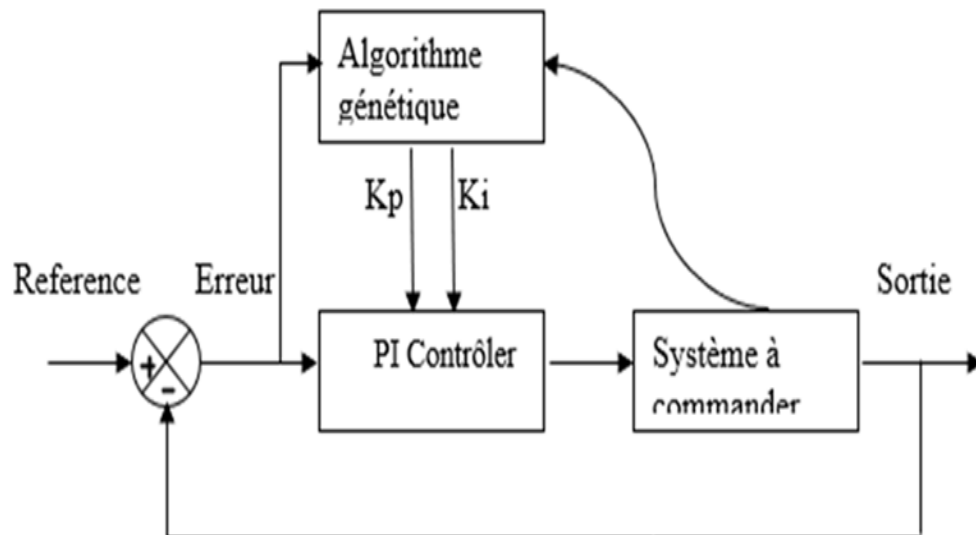


Figure IV. 1 : Schéma de principe de cette procédure.

La procédure d'optimisation des paramètres des régulateurs peut être résumée par les étapes suivantes :

1. Introduire la fonction de transfert dans le script.
2. Générer aléatoirement une population initiale.
3. Calculer les valeurs de fitness pour chaque individu en utilisant la fonction objective.
4. Répéter
5. Appliquer l'opération de sélection
6. Appliquer l'opération de croisement avec une probabilité P_x
7. Appliquer l'opération de mutation avec une probabilité P_m
8. Calculer des paramètres K_p , K_i du Contrôleur PI
9. Répéter les étapes 3 à 6 jusqu'à atteindre le nombre maximum d'itérations
10. Récupérer les meilleurs paramètres K_p , K_i du Contrôleur PI.

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

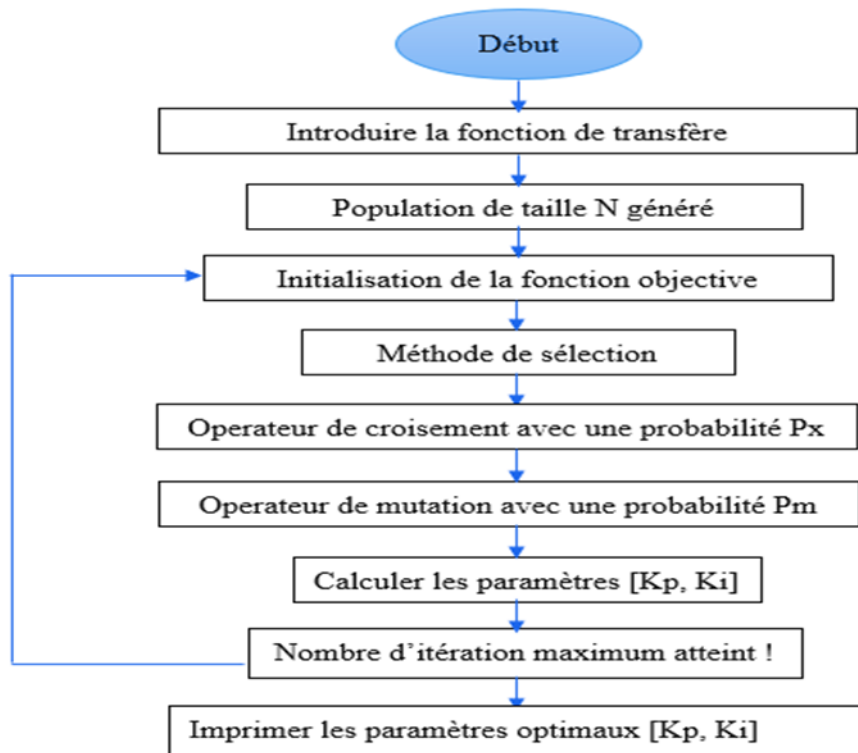


Figure IV. 2 : L'organigramme de base d'un algorithme génétique.

IV.5. Les avantages de l'algorithme génétique

Les algorithmes génétiques ont trois (03) avantages :

- ❖ L'optimisation de structure composite comporte de nombreux optima locaux. Les AG peuvent sortir de ces optima locaux afin de converger vers un optimum global.
- ❖ Les AG ne donnent pas une solution unique. En effet, une famille de solutions est obtenue, ce qui permet d'atteindre plusieurs optima. Cette particularité a pour conséquence de conduire à une optimisation riche en solutions potentielles. Elle permet également d'intégrer des contraintes en posttraitement qui ne peuvent pas être prises en compte directement dans l'AG.
- ❖ Les AG permettent aussi bien l'optimisation de problèmes dépendant de variables discrètes que de variables continues.[21], [49]

IV.6. Optimisation de régulateur de vitesse de la GADA par algorithme génétique

L'objectif est toujours de trouver des paramètres optimaux $[K_{p_opt}, K_{i_opt}]$ pour but avoir une réponse de la vitesse du système de conversion d'énergie éolienne en boucle fermée soit stable.

Nous avons déjà constaté que les régulateurs utilisés pour contrôler la vitesse de la MADA ont obtenu des résultats satisfaisants, en particulier dans le régime dynamique. Cependant, le principal

inconvenient observé est l'absence de méthodes de conception. Dans le but de résoudre ce problème et d'améliorer les performances obtenues, cette section se concentre sur l'utilisation des algorithmes génétiques pour concevoir et optimiser les gains de régulateur PI classique. Les algorithmes génétiques assurent cette optimisation et repèrent l'optimum global. [25]

IV.6.1. Optimisation du régulateur PI classique

- L'optimisation de ce régulateur se fait par un algorithme génétique à l'aide de la fenêtre « Toolbox » développée sous Matlab. Voici les paramètres de l'algorithme utilisé :
- Nombre de la population $T=35$;

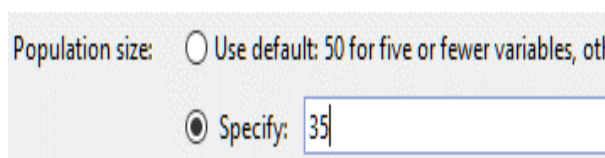


Figure IV. 3 : Nombre de la population

- Nombre de variables 2 ;



Figure IV. 4 : Nombre de variables

- Sélection par la roulette ;



Figure IV. 5 : Sélection par la roulette

- Croisement signal point ;

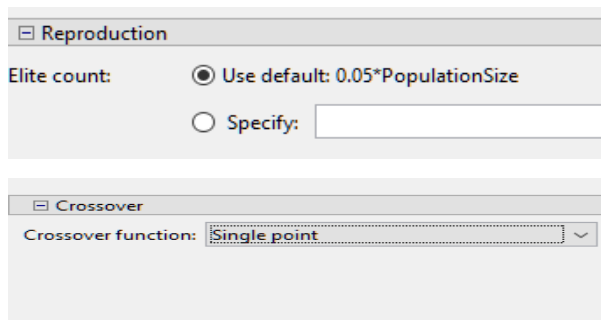


Figure IV. 6 : Croisement un point

- Mutation uniforme ;

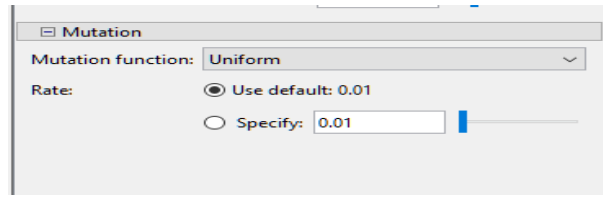


Figure IV. 7 : Mutation uniforme

IV.6.2. Résultats de simulation par AG

Une étude de simulation a été effectuée sous l'environnement Matlab / Simulink avec les paramètres donnés dans l'annexe.

IV.6.2.1. Partie mécanique

Afin de démontrer l'utilité d'améliorer les gains PI classiques par algorithme génétique, et de valider la technologie de contrôle indirect des puissances actives et réactives par les régulateurs PI-AG, on a effectué le même essai de simulation du deuxième chapitre. Selon les résultats de simulation obtenus, nous pouvons voir une amélioration de la performance dynamique.

Les résultats de simulation obtenus dans ce cas sont représentés par la Figure (IV.8), Mettent en avant l'évolution de la vitesse mécanique en tant que fonction de vitesse de référence. Le contrôleur PI-AG est intégré au modèle MPPT pour optimiser la vitesse de rotation des pales d'éoliennes et augmenter la puissance produite. On note aussi l'efficacité de l'algorithme génétique optimisée utilisée pour gérer la boucle de vitesse de ce système éolien afin d'assurer la MPPT.

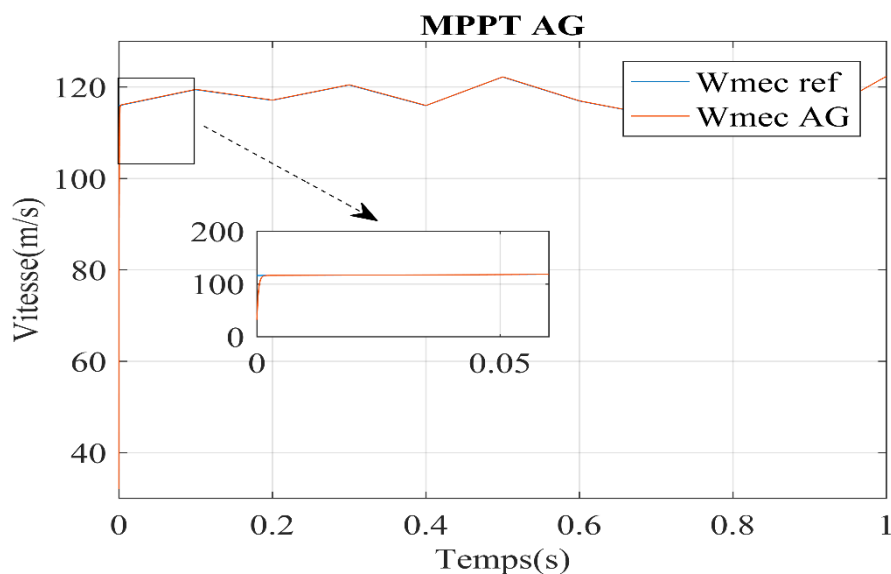


Figure IV. 8 : Régulation de vitesse par PI-AG.

IV.6.2.2. Partie électrique

Simulink/Matlab a mené une étude de simulation afin de vérifier la fiabilité de la technologie de contrôle indirect des puissances actives et réactives utilisée par les contrôleurs PI-AG.

✓ Commande indirecte avec boucle de puissance

Les recherches de simulation mettent en évidence les performances remarquables de notre méthode de contrôle indirect des puissances actives et réactives avec boucle de puissance grâce à un algorithme basé sur un PI-AG. On voit que la puissance active est une image de la puissance optimale, et la puissance réactive a été fixée à une valeur nulle, comme le montre la Figure (IV.9).

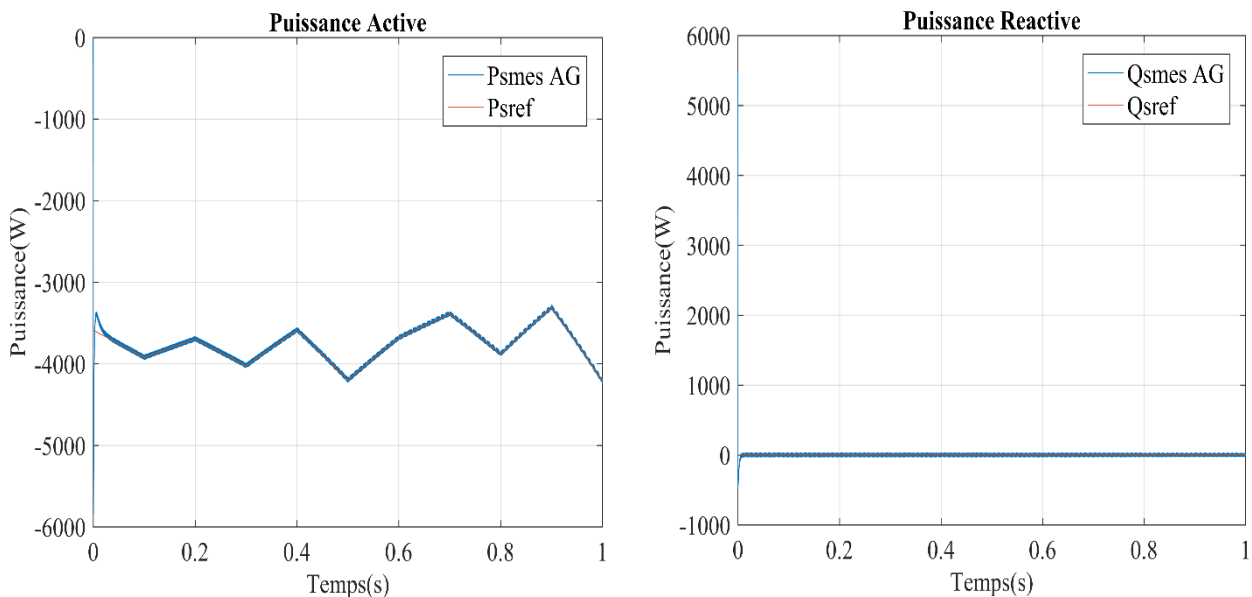


Figure IV. 9 : Puissance active et réactive statorique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance par PI-AG.

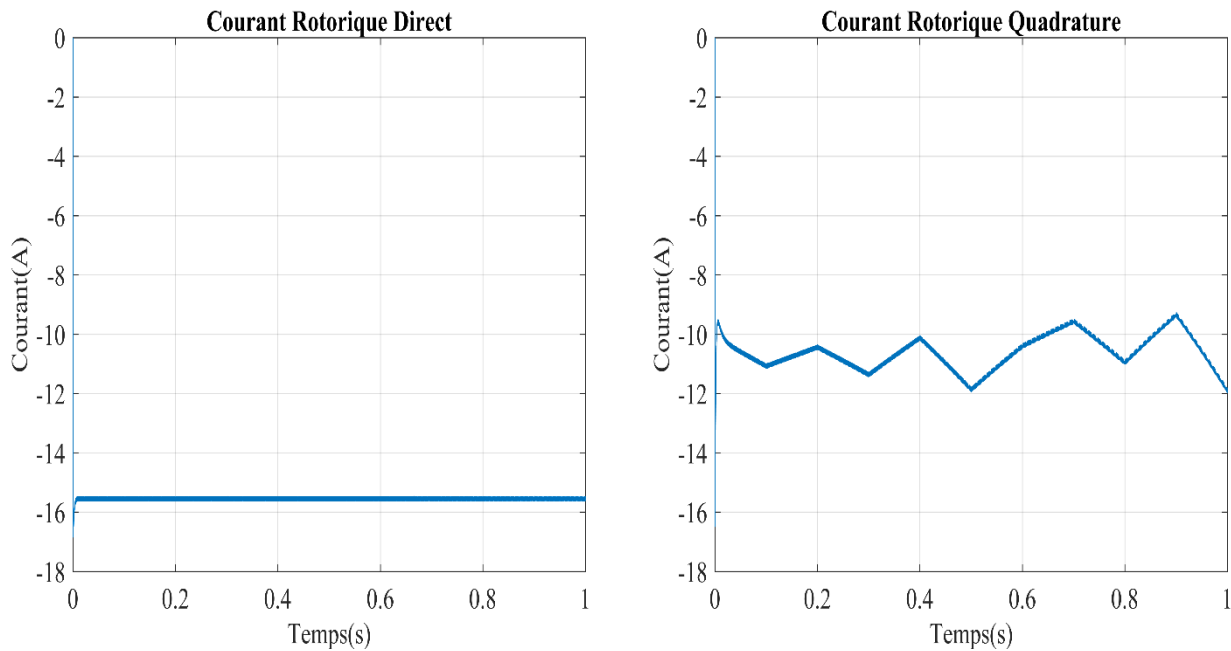


Figure IV. 10 : Courant rotorique en fonction l'axe d et q pour la commande vectorielle indirect avec boucle de puissance par PI-AG

IV.6.2.3. Etude comparative

❖ Partie électrique

L'algorithme d'AG est employé dans PI-AG pour modifier les paramètres du contrôleur PI dans le but d'améliorer les performances du système de contrôle. Cela peut favoriser l'amélioration des performances du système, comme la précision de la régulation et le temps de réponse des tâches.

Ensuite, on utilise l'algorithme AG afin de déterminer les gains optimaux des contrôleurs PI en ce qui concerne la puissance active et réactives sans et avec boucle de puissance, ainsi que les courants rotoriques.

Le Tableau (IV.1) montre une comparaison entre les deux méthodes.

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

Contrôleur		K_p	K_i
PI Classique	Courant (i_{rd} , i_{rq})	12.85	930
	Puissance (P, Q)	11.16	4545.5
PI-AG	Courant (i_{rd} , i_{rq})	5.90	734
	Puissance (P, Q)	5.34	4291

Les résultats du Tableau IV.2 indiquent clairement une diminution du temps de réponse des puissances actives et réactives, tandis que l'erreur reste nulle lorsqu'on utilise la méthode AG proposée.

Tableau IV. 2 : Etude comparative des résultats de régulation avec PI et PI réglé par AG.

Controleur	Temps de réponse	Erreur
PI Classique	0.002	Nulle
PI-AG	0.0001	Nulle

Les résultats de régulation de la puissance active et réactive sont comparés avec le PI classique et l'optimisation par AG, comme le montre la Figure (IV.11) et la Figure (IV.12). Cette illustration souligne une diminution significative du temps de réponse avec boucle de puissance, ainsi que les courants rotoriques, De plus, on observe une erreur presque nulle lors de l'utilisation de la méthode PI-AG.

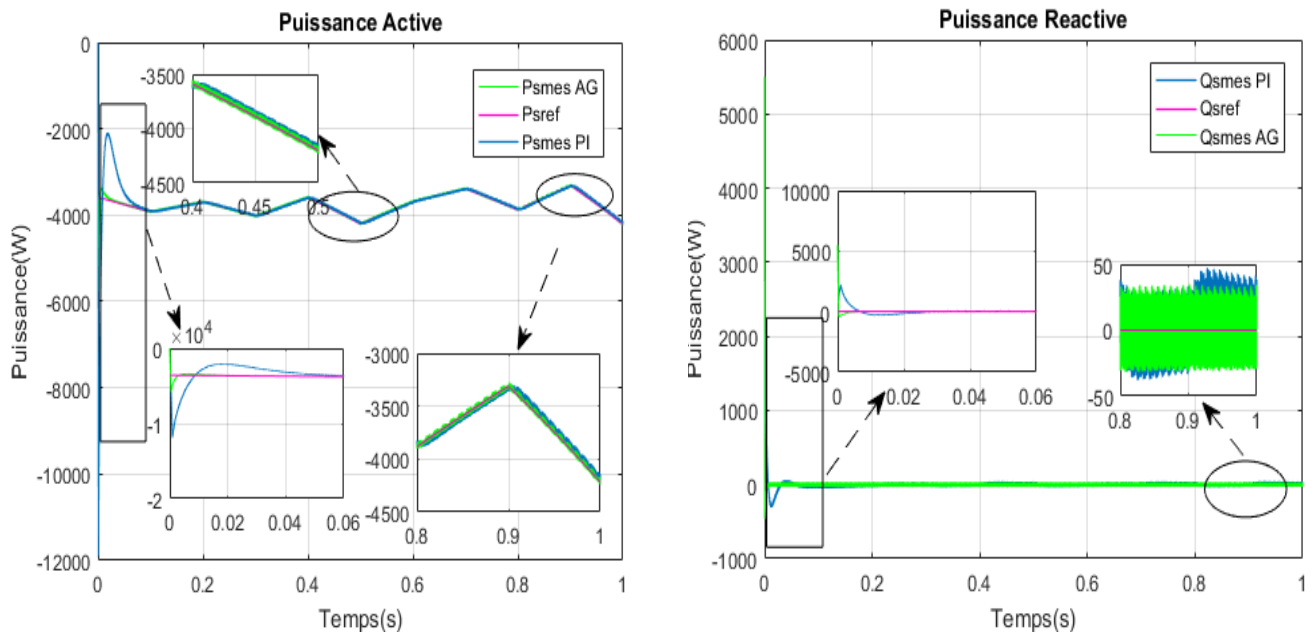


Figure IV. 11 : Etude comparative des résultats entre PI et PI-AG pour la puissance active et réactive avec boucle de puissance.

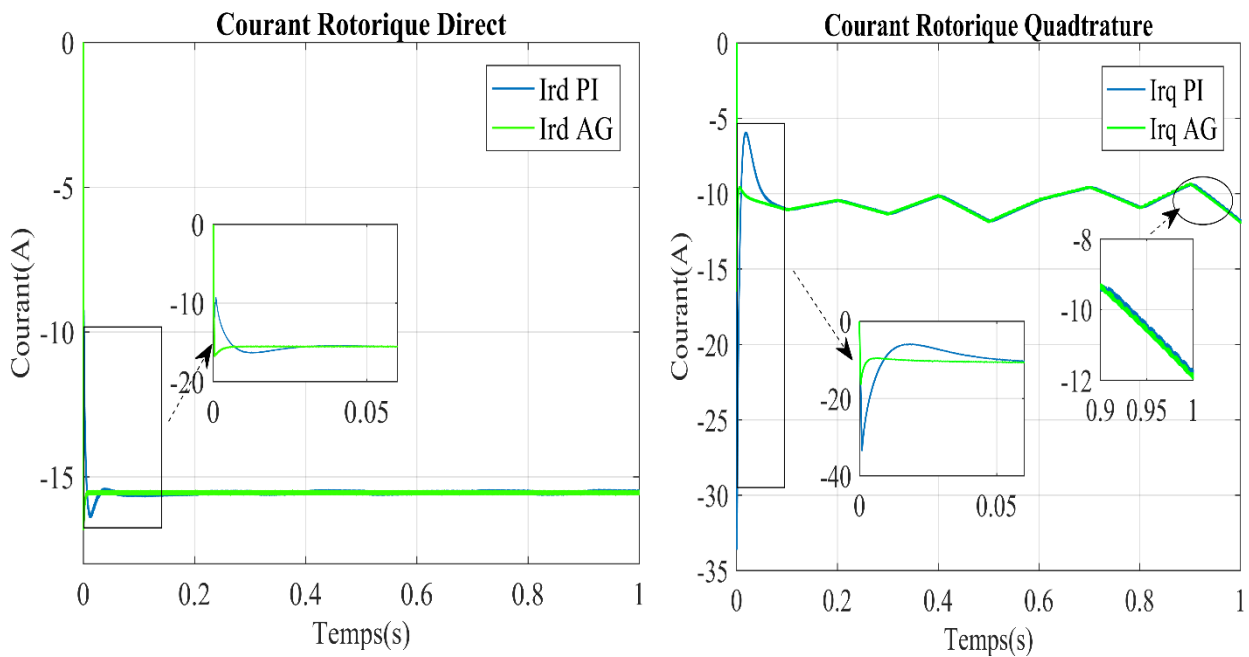


Figure IV. 12 : Etude comparative des résultats entre PI-AG pour Le courant rotorique en fonction l'axe d et q pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

❖ Partie mécanique

Grâce à l'optimisation par algorithme génétique dans le MPPT, il est possible d'obtenir des résultats plus précis et plus efficaces dans des conditions différentes. Malgré l'utilisation réussie du PI classique dans la partie mécanique, car le vent reste variable en référence, le AG sera utilisé pour démontrer son avantage par rapport au PI actuel.

Les paramètres du contrôleur PI et PI-AG pour MPPT sont indiqués dans le Tableau (IV.3).

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

Contrôleur	K_p	K_i
PI Classique	98.90	163
PI-AG	54.30	102

D'après le Figure (IV.13). Il est clair que cette nouvelle méthode constitue une avancée prometteuse dans l'estimation des paramètres de PI.

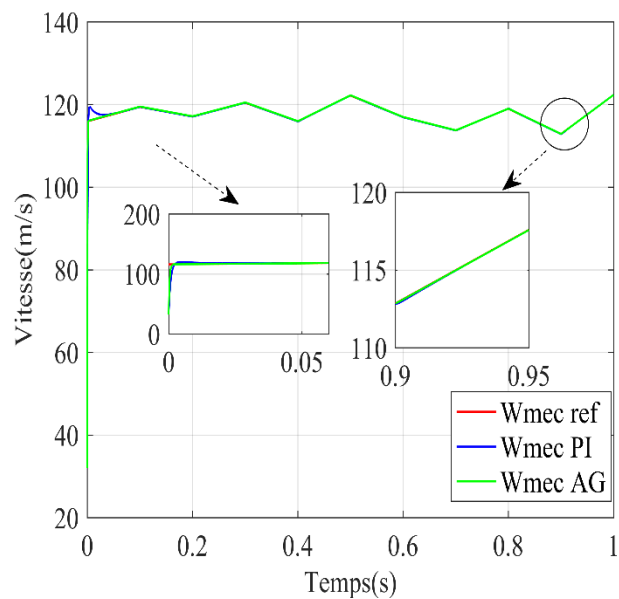


Figure IV. 13 : Etude comparative des résultats entre PI et PI-AG du MPPT

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les principes fondamentaux et les bénéfices des algorithmes génétiques, puis nous avons utilisé la commande PI-AG pour identifier les valeurs optimales des paramètres dans la chaîne éolienne (MPPT et dans la commande indirecte avec boucle de puissance du MADA), dans le but d'améliorer ses performances, en évaluant la réactivité et la sensibilité de l'AG aux perturbations et aux changements de paramètres. Enfin, nous avons exposé et analysé les résultats de la simulation pour les comparer aux deux méthodes.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans ce projet, nous avons également travaillé à améliorer les performances de MADA dans le système éolien en lui fournissant des technologies qui lui permettent de faire face aux changements de vent et nous permettent d'obtenir les plus hauts niveaux d'énergie, et ce grâce au type de la commande vent.

Pour contrôle de GADA. Nous nous sommes appuyés sur le convertisseur de puissance Onduleur trois niveaux et avons expliqué théoriquement le rôle de GADA. Dans la possibilité d'un système fonctionnant et s'adaptant à plusieurs vitesses imposées par diverses conditions. Nous sommes également examinés le MPPT pour les turbines qui tournent à différentes vitesses, et grâce à notre étude des caractéristiques du GADA et Commande vectorielle indirect avec boucle de puissance du GADA nous avons développé les équations mathématiques correspondant à chaque phénomène et simulé tous les résultats de sortie.

L'algorithme génétique implémenté repose sur l'utilisation des opérateurs génétiques à savoir la sélection par Roulette, le croisement un point et la mutation uniforme. En outre, le codage retenu est très simple. Pour évaluer la valeur des individus (K_p et K_i), une fonction d'adaptation a été présentée, constituée d'un terme permettant de rechercher l'ensemble des paramètres conduisant le système dynamique.

Nous avons interprété chaque résultat d'une manière qui lui correspond pratiquement. Nous avons trouvé de nombreux changements et divergences, et cela est dû aux approches sur lesquelles nous nous sommes appuyés dans cette étude sur l'algorithme génétique. L'optimisation par algorithme génétique consiste à rechercher la meilleure solution d'un problème au sens d'un ou de plusieurs critères choisis en respectant les caractéristiques du système et les contraintes qui lui sont imposées. Grâce auquel nous obtenons toujours les meilleurs échantillons (meilleurs paramètres) qui améliorent les performances du système. Tous ces résultats prouvent l'efficacité de ce système dans les applications de production d'énergie éolienne.

On trouve le système proposé de conversion de l'énergie éolienne optimisé par l'algorithme génétique est donne des paramètres (K_p et K_i) du contrôleur PI côté turbine et GADA optimales et amélioré les performances de GADA en terme dépassement et temps de réponse et aussi avoir des bonnes performances du contrôle de la vitesse du vent en terme extraire une énergie maximale générée par le système éolien avec une dynamique optimale de la GADA.

ANNEXES

ANNEXES

Les différents paramètres électriques et mécaniques du système éolien étudié sont :

- Paramètres de la MADA sont :

Valeur numérique du paramètre	Signification
$P_n = 7.5$	Puissance nominale (KW)
$V_{eff} = 220V/380V$	Tension d'alimentation (V)
$f = 50Hz$	Fréquence d'alimentation (Hz)
$P = 2$	Nombre de paires de pôles
$R_s = 0.455\Omega$	Résistance d'une phase statorique (Ω)
$R_r = 0.62\Omega$	Résistance d'une phase rotorique (Ω)
$L_s = 0.084$	Inductance d'une phase statorique (H)
$L_r = 0.081$	Inductance d'une phase rotorique (H)
$M_{sr} = 0.078$	Inductance Mutuelle (H)
$J_g = 0.3125$	Moment d'inertie du rotor ($Kg. m^2$)
$F_g = 6.73.10^{-3}$	Coefficient de frottement ($N. m. s^{-1}$)

- Paramètres de la turbine éolienne utilisée :

$P_n = 10 KW$	Puissance nominal (KW)
$P = 3$	Nombre de pale
$R = 3$	Diamètre d'une pale (m)
$G = 5.4$	Gain du multiplicateur de vitesse
$J_{Turbine} = 3.1959Kg. m^2$	Moment d'inertie de la turbine ($Kg. m^2$)
$F_{Turbine} = 0.0073 N. m. s^{-1}$	Coefficient de viscosité ($N. m. s^{-1}$)
$\lambda_{opt} = 8.1$	Vitesse spécifique optimale de l'éolienne
$C_{Pmax} = 0.48$	Coefficient de puissance maximal de l'éolienne

**LES REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

Les références bibliographiques

- [1] T. Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse Présentée En Vue D'obtenir Grade Dr., sept. 2011.
- [2] B. Mendil, promoteur, et S. Fergane, « Commande MPPT d'un Aérogénérateur basée sur des observateurs neuro-flou », Thesis, Université abderrahmane mira béjaia, 2013.
- [3] boyette arm, « contrôle commande d'un generateur asynchrone a double alimentation avec systeme de stockage pour la production eolienne ».
- [4] M. Allam, B. Dehiba, M. Abid, Y. Djeriri, et R. Adjoudj, « Etude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dédiée à une application éolienne », J. Adv. Res. Sci. Technol., juin 2014.
- [5] M. T. O. Cherif et M. Habarek, « Etude de générateur Asynchrone à vitesse fixe et variable appliqué à une éolienne », Diplôme MASTER, 2013.
- [6] M.A.OBEID, H.OBEID et S.CHADLI « Étude et modélisation d'une MADA pour une application dans un système de conversion d'énergie éolienne », mémoire En vue de l'obtention du diplôme de Master, CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA, année 2021
- [7] ATTOUI Fateh, « Intitulé : Méthodes d'optimisation pour l'autoréglage de contrôleur PID d'ordre fractionnaire », mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2019.
- [8] B. Belabbas, mémoire de doctorat « Gestion des flux énergétiques d'un système de production d'énergie de sources renouvelables avec stockage en vue de la conception des réseaux électriques intelligents "Smart GRID" », Thesis, 2018.
- [9] M. Mouden, « Compensation de la puissance réactive dans une ferme éolienne », Thesis, Université Ibn Khaldoun -Tiaret-, 2020.
- [10] J. Hladik et M. Bremont, Énergétique éolienne: applications pratiques, chauffage éolien, production d'électricité, pompage. Presses de l'Université du Québec (2), 1984.
- [11] M. A. Kimouche, M. Benzid « Les méthodes métaheuristiques pour l'optimisation en génie électrique », Thesis, Université de Jijel, 2019.

- [12] P. Loubiere, « Amélioration des métaheuristiques d'optimisation à l'aide de l'analyse de sensibilité », phdthesis, Université Paris-Est, 2016.
- [13] F. Celia et I. Lamia, « Résolution du problème de cueillette et livraison avec fenêtres de temps à un seul véhicule par des méta-heuristiques », Diplôme Master, 2019 2018.
- [14] B. TOUAL, « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable », magister, Université de Batna 2, 2010.
- [15] T. Doğruer et M. Can, « Design and robustness analysis of fuzzy PID controller for automatic voltage regulator system using genetic algorithm », Trans. Inst. Meas. Control, vol. 44, p. 014233122110667, janv. 2022,
- [16] M. Lina, « Introduction aux Métaheuristiques », Univ. Jijel, 2014,
- [17] V. Chahar, S. Katoch, et S. Chauhan, « A Review on Genetic Algorithm: Past, Present, and Future », Multimed. Tools Appl., vol. 80, févr. 2021,
- [18] Z. Naima, « LES ALGORITHMES GENETIQUES EN MAINTENANCE. Magister thesis (2006) », Université de Batna 2. », avr. 2017,
- [19] B. Samah, « Technique de simulation-optimisation pour le contrôle des feux de signalisation via algorithme génétique », Thesis, university center of abdalhafid boussouf - MILA, 2022.
- [20] G. Papazoglou et P. Biskas, « Review and Comparison of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization in the Optimal Power Flow Problem », Energies, vol. 16, n° 3, p. 1- 25, 2023.
- [21] S. Bourazza, « Variantes d'algorithmes génétiques appliquées aux problèmes d'ordonnancement », phdthesis, Université du Havre, 2006.
- [22] M. M. Nishat, F. Faisal, A. J. Evan, Md. M. Rahaman, Md. S. Sifat, et H. M. F. Rabbi, « Development of Genetic Algorithm (GA) Based Optimized PID Controller for Stability Analysis of DC-DC Buck Converter », J. Power Energy Eng.
- [23] D. Mokeddem, « Contrôle flou des processus biotechnologiques à base d'algorithmes génétiques », Thesis, 2018.
- [24] S. Belhia et M. Bettaher, « Applications des algorithmes génétiques », ABDELHAMID IBN BADIS – MOSTAGANEM, Master en Informatique, 2018/2019.

- [25] E. Youcef, « Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté. Magister thesis(2009), Université de Batna 2. », mai 2017,
- [26] B. Belabbas,mémoire du Magister « Intégration de l'énergie éolienne dans un réseau électrique local. », Thesis, Université Ibn Khaldoun -Tiaret-, 2012.
- [27] F. Z. TRIA, « Contribution à l'étude et à la commande d'un système éolien », doctoral, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA, 2018.
- [28] M. B. Wafa, M. A. F. Zohra, B. Brahim, et U.-M. Adrar, « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne », Univ. Ahmed Draïa Adrar, mars 2018
- [29] DJERROUD Nadjib et IAMARENE Saci, « Optimisation de production d'énergie d'une centrale éolienne à base d'une GADA », 2020 2019.
- [30] F. MESSAOUDI, A. OUALI, Diplôme de Master « Étude d'une éolienne en fonctionnement autonome à base d'une GADA.pdf », Université A. MIRA Bejaïa, 2019/2020
- [31] A. Bougrine, N. Nennar, et O. / promoteur Ouladali, « Commande directe de puissance DPC d'une MADA intégrée à un système éolien », Thesis, DIPLOME DE MASTER, Université Ahmed Draïa -Adrar, 2015.
- [32] M. Oualid et L. Azeddine, « Commande robuste d'un système de génération éolienne à base de génératrice double alimentation sans balais », Thesis, diplôme de Master, université d' Akli Mohand oulhadj- bouira, 2019.
- [33] R. Behloul et S. A. Mokrani, « Etude, Modélisation Et Commande Adaptative d'une MADA », Thesis, diplôme de Master, 2020.
- [34] M. B. Kamel, M. M. Sofiane, et M. L. Abdelaziz, « Commande d'une GADA utilisée dans un aérogénérateur relié au réseau électrique ».
- [35] R. CHEIKH, « Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents et d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation », doctoral, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA, 2018.

- [36] E. A. Benia et M. radhouane Koulali, « Apport sur L'application des Commandes Avancées pour Contrôler la Génératrice Asynchrone Double Alimentation (GADA) », Thesis, Université Ibn Khaldoun, 2023.
- [37] A. Ahmed CHHIP, « (PDF) Modeling and Control Strategy of Wind Energy Conversion System with Grid-Connected Doubly-Fed Induction Generator ».
- [38] D. Fawzi, « Commande d'un système éolien basé sur une GADA Par différentes techniques », UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2019.
- [39] H. Mesai Ahmed, Y. Djeriri, et N. KAIS, « Commande de la machine asynchrone à double alimentation – apport des techniques de l'intelligence artificielle », 2017.
- [40] Y. KOURANE, K. GANI, diplôme De Master « Commande vectorielle d'une MADA dédiée à l'énergie éolienne.pdf », Université de Bejaïa, 2015.
- [41] F. TACHERFIOUT, A. ZIDANE, diplôme de master « Comportement d'une turbine à base d'une MADA vis-vis d'une perturbation provenant du réseau électrique.pdf », Université Abderrahmane Mira de Bejaia ,2013/2014
- [42] Bakhouche, Lemnouer, « Commande par linéarisation entrée-sorties du couple et du flux de la machine asynchrone », Univ. Abderrahmane MIRA Bejaia, avr. 2009,
- [43] G. Hachemi et B. Brahim, « (PDF) Contribution à la Commande Robuste Non Linéaire Sans Capteur d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA). »
- [44] B. Beltran, « Contribution à la Commande Robuste des Eoliennes à Base de Génératrices Asynchrones Double Alimentation : Du Mode Glissant Classique au Mode Glissant d'Ordre Supérieur », phdthesis, Université de Bretagne occidentale - Brest, 2010.
- [45] Z. Fares, « Amélioration des Tensions de Sorties des Onduleurs par l'Utilisation des Nouvelles Topologies et Techniques de Commandes », janv. 2018.
- [46] ROUMMANI Khayra, Contribution à des commandes robustes à des sources d'énergie nouvelle et à leur connexion aux réseaux électriques. in Thèse de Doctorat. 2019.
- [47] M. Belfedhal et S. Benyahia, « MAXIMISATION DE LA PUISSANCE (MPPT) AVEC ASSERVISSEMENT DE VITESSE ET SANS CAPTEUR MECANIQUE DE LA TURBINE

EOLIENNE A BASE DE MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION (MADA). », Thesis, Université Ibn Khaldoun -Tiaret-, 2015.

[48] C. Souad et K. Nouara, « Commande en puissance de la machine asynchrone à double alimentation par les régulateurs PI et RST », Université Mouloud Mammeri, 2018

[49] M. Baballe, M. Bello, et A. Abdullahi Umar, « A Look at the Different Types of Servo Motors and Their Applications », vol. 1, p. 49, avr. 2022,

ملخص

يستخدم المولد غير المتزامن ثنائي الطاقة (GADA) في تطبيقات مختلفة، من خلال ضبط معاملات منظمات PI التي تتحكم في تشغيله. منظمات PI هي أجهزة تحكم كلاسيكية تستخدم على نطاق واسع في الصناعة. الهدف من هذا المشروع هو تحسين أداء GADA. إن استخدام الخوارزمية الجينية كطريقة تحسين يجعل من الممكن استكشاف مساحة المعلمة بشكل فعال للعثور على المجموعة المثالية التي تزيد من أداء GADA. يحاكي AG العملية للحصول على التكوين الأمثل لمعاملات منظم PI. يوفر هذا النهج ميزة إيجاد حلول قوية وفعالة تتكيف مع التغيرات في ظروف تشغيل GADA. يمثل تحسين AG للتحكم في GADA باستخدام منظمات PI منهجية متقدمة تهدف إلى تحسين أداء وكفاءة هذه الآلة. تمت محاكاة النظام المدروس باستخدام برنامج Matlab/Simulink. أظهرت نتائج المحاكاة كفاءة وأداء الخوارزمية الجينية المستخدمة للتحكم في السرعة الميكانيكية والتيارات الدوارة والقوى النشطة والتفاعلية لـ GADA.

الكلمات المفتاحية: GADA، MADA، طاقة الرياح، MPPT، التحكم غير المباشر، التحكم الشعاعي، الخوارزمية الجينية (AG).

Résumé

La Génératrice Asynchrone Double Alimentation (GADA) utilisée dans diverses applications, en ajustant les paramètres des régulateurs PI qui contrôlent son fonctionnement. Les régulateurs PI sont des dispositifs de contrôle classiques largement utilisés dans l'industrie. L'objectif de ce projet est d'améliorer les performances de la GADA, l'utilisation de l'Algorithme Génétique comme méthode d'optimisation permet d'explorer efficacement l'espace des paramètres pour trouver la combinaison optimale qui maximise les performances de la GADA. L'AG simule le processus pour avoir une configuration optimale des paramètres du régulateur PI. Cette approche offre l'avantage de trouver des solutions robustes et efficaces, adaptées aux variations des conditions de fonctionnement de la GADA. L'optimisation par l'AG du contrôle de la GADA avec des régulateurs PI représente une méthodologie avancée visant à améliorer les performances et l'efficacité de cette machine. Le système étudié est simulé à l'aide de logiciel Matlab / Simulink. Les résultats de simulation montrent l'efficacité et les performances de l'Algorithme Génétique utilisé pour contrôler la vitesse mécanique, les courant du rotor et les puissances active et réactive de la GADA.

Mots clés : GADA, MADA, Energie éolienne, MPPT, commande indirecte, Commande vectorielle, Algorithme génétique (AG).

Abstract

The Double Powered Asynchronous Generator (DAG) used in various applications, by adjusting the parameters of the PI regulators which control its operation. PI regulators are classic control devices widely used in industry. The objective of this project is to improve the performance of the GADA. The use of the Genetic Algorithm as an optimization method makes it possible to effectively explore the parameter space to find the optimal combination that maximizes the performance of the GADA. The AG simulates the process to have an optimal configuration of the PI regulator parameters. This approach offers the advantage of finding robust and efficient solutions, adapted to variations in the operating conditions of the GADA. AG's optimization of GADA control with PI regulators represents an advanced methodology aimed at improving the performance and efficiency of this machine. The system studied is simulated using Matlab / Simulink software. The simulation results show the efficiency and performance of the Genetic Algorithm used to control the mechanical speed, the rotor currents and the active and reactive powers of the GADA.

Keywords: GADA, MADA, Wind energy, MPPT, indirect control, Vector control, Genetic algorithm (GA).