

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :
Énergies Renouvelables
Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

COMMANDÉ PAR LOGIQUE FLOUE D'UNE EOLIENNE A BASE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION (GADA)

Présenté par :

- BEGHNI Ayman
- BELKHADEM abderrezak
- ZOUDJI Abderrezak

Soutenu le :03 /06/2022. Devant le Jury :

Mme. MEDJAJI NACERA	MBA	Centre Universitaire Naâma	Président
M. BENMOHAMED Fayssal	MCB	Centre Universitaire Naâma	Encadreur
Mlle BEHLOUL Rabia	Doctorante	Centre Universitaire Naâma	Co-Encadreur
M. SEKKAL Chakib	MAA	Centre Universitaire Naâma	Examinateur

Dédicaces

À ma mère, qui m'a donné tout le courage et la patience

À mon cher père qui à sacrifié son temps pour nous.

À toute mes frères et ma sœur.

Aussi, tous les profs et les collègues d'étude et tous mes amis

Zoudjí Abderrezak

À mon père qui ne cesse pas de M'encourager, et qui M'A toujours soutenu,

À ma jolie Mère Symbole de sacrifice et qui est tout pour moi.

À mon frère, ma sœur et tous les collègues d'étude et tous mes amis.

Begħni Aymen

Je dédie ce mémoire à :

À ceux que j'aime :

Mon père et ma mère qui ont toujours été présent pour me soutenir, me conseiller, sacrifient pour moi et m'avoir permis d'arriver à ce stade d'éducation.

Je le dédie aussi à :

Mes frères et sœurs, Toute la famille Belkhadem.

Tous mes amis sans exception.

Belkhadem Abderrezak

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Dieu de nous donner la santé et la patience pour réaliser le travail imposé et pour avoir terminé ce mémoire.

Nous avons tous à exprimer nos profondes reconnaissances à monsieur **Benmohamed Fayssal** qui a assuré la direction de ce travail afin de finaliser se mémoire, pour son suivi et ses conseils judicieux, Sans oublier **M'lle Behloul Rabia** notre co-encadrante pour ses conseils et ses encouragement. Grâce à eux, nous avons pu faire le travail.

Nous remercions très chaleureusement tous les membres de jury pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de notre travail.

Un grand merci également à tous nos enseignants, et toute personne qui nous la connaît au niveau d'université de Naama.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Table des matières

Introduction générale.....	2
Chapitre I: Généralités sur les systèmes éoliens	
I.1Introduction.....	5
I.2Situation de l'énergie éolienne dans le monde.....	5
I.3Définition de l'énergie éolienne.....	7
I.3.1Composants d'une éolienne.....	7
I.4Les différents types d'éoliennes.....	8
I.4.1Les éoliennes à axe horizontal.....	9
I.4.2Les éoliennes à axe vertical.....	9
I.5Principe de fonctionnement.....	10
I.6Comparaison entre générateurs utilisant l'énergie éolienne.....	10
I.7Description du fonctionnement de la MADA.....	11
I.7.1Structure de la machine.....	11
I.7.2Mode de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.....	12
I.8Avantages et inconvénients de la GADA.....	15
I.8.1Avantages de la GADA.....	15
I.8.2Inconvénients de la GADA.....	15
I.9 Conclusion.....	15
Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne	
II.1Introduction.....	17
II.2Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.....	17
II.2.1Modélisation de la turbine éolienne.....	17
II.2.2Multiplicateur	19
II.2.3Equation dynamique de l'arbre.....	20
II.3Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation.....	21
II.3.1Hypothèses simplificatrices.....	22
II.3.2Modèle de la GADA dans le plan ABC.....	22
II.3.3La transformation de Park.....	24
II.3.4Choix du référentiel.....	27
II.4Modélisation de l'onduleur de tension.....	28
II.5Simulation de la GADA.....	29
II.5.1Les résultats de la simulation.....	30

Table des matières

II.5.2Interprétation des résultats de simulation.....	32
II.6Conclusion	32
Chapitre III : Commande vectorielle de la GADA	
III.1Introduction	34
III.2Principe de la commande vectorielle de la GADA.....	34
III.3Orientation du flux statorique.....	35
III.3.1Relation entre les courants statoriques et rotoriques.....	37
III.3.2Relation entre les puissances statoriques et courants rotoriques.....	37
III.3.3Relation entre tension rotorique et courant rotorique.....	37
III.4Commande vectorielle directe.....	38
III.4.1Commande vectorielle directe en puissance active et réactive de la GADA.....	38
III.5Commande indirecte.....	39
III.5.1Commandevectorielleindirecteenpuissanceactive et réactive de la GADA.....	39
III.6Type des régulateurs.....	40
III.6.1Système réglé par un régulateur PI.....	40
III.7Simulation de la commande vectorielle.....	41
III.7.1Les résultats de simulation de la commande directe et indirecte.....	43
III.7.2Interprétation des résultats.....	46
III.8Conclusion	47
Chapitre IV : Commande par logique floue de la GADA	
IV.1Introduction	49
IV.2Historique	49
IV.3Domaines d'application	50
IV.4Bases de la logique floue.....	51
IV.4.1Principe de base de la logique floue.....	51
IV.4.2Univers de discours.....	53
IV.4.3Différentes formes des fonctions d'appartenance.....	53
IV.5Structure d'un système de commande floue.....	54
IV.5.1Interface de fuzzification.....	55
IV.5.2Base de connaissance.....	56
IV.5.3Inférence floue.....	56
IV.5.4Interface de défuzzification.....	56
IV.6Simulation de la commande par la logique floue.....	59

Table des matières

IV.6.1Les résultats de simulation.....	60
IV.6.2L'interprétation	62
IV.7Conclusion.....	62
Conclusion générale.....	64
Références bibliographiques	66
Annexe A	

Liste des figures

Figure I. 1: L'éolien en Europe et dans le monde en 2017.....	5
Figure I. 2: Atlas de la vitesse moyenne du vent (en m/s) de l'Algérie Estimée à 10 m du sol.	6
Figure I. 3: Conversion de l'énergie cinétique du vent.	7
Figure I. 4 : Les différents composants de la nacelle d'une grande éolienne (Source : Dubois C., 2009).....	8
Figure I. 5 : Configuration à axe horizontal	9
Figure I. 6 : Eolienne de type Darrieus et Savonius	10
Figure I. 7 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	12
Figure I. 8 : Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.....	13
Figure I. 9 : Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone	13
Figure I. 10 : Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone	14
Figure I. 11 : Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.....	14
Figure II. 1 : Schéma de la turbine éolienne.....	17
Figure II. 2 : variation de C_p en fonction de λ et β	19
Figure II. 3: Modèle mécanique simplifié du multiplicateur.....	20
Figure II. 4: schéma bloc du modèle de la turbine	21
Figure II. 5: Schéma des enroulements de la MADA.....	22
Figure II. 6: Modèle de PARK de la MADA.	24
Figure II. 7: Transformation de Park.	26
Figure II. 8: Schéma représentatif de l'association onduleur-machine à courant alternatif.	28
Figure II. 9 : schéma bloc de la GADA.....	29
Figure II. 10 : Courant statorique	30
Figure II. 11 : Courant statorique (zoom).....	30
Figure II. 12 : Courant rotorique	31
Figure II. 13 : Courant rotorique (zoom).....	31
Figure III. 1: Principe de la commande vectorielle.	35
Figure III. 2 : Principe de la commande vectorielle par orientation du flux statorique.....	37
Figure III. 3: Schéma de principe de la commande vectorielle directe.	39

Liste des figures

Figure III. 4: Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé	39
Figure III. 5 : Schéma bloc de régulateur PI.....	40
Figure III. 6 : Schéma bloc de la commande vectorielle direct de la GADA.....	41
Figure III. 7 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirect de la GADA.....	42
Figure III. 8 : Puissance active et réactive statorique avec la commande directe.	43
Figure III. 9 : Courant statorique	44
Figure III. 10 : Courant statorique (zoom).	44
Figure III. 11 : Courant rotorique	44
Figure III. 12 : Suivi de consigne de puissance active et réactive statorique avec la commande indirecte.....	45
Figure III. 13 : Courant statorique.....	45
Figure III. 14 : Courant statorique (zoom).	46
Figure III. 15 : Courant rotorique.	46
Figure IV. 1: Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou.	51
Figure IV. 2 : Représentation des variables binaires.....	52
Figure IV. 3 : Représentation des variables floues.....	52
Figure IV. 4 : Formes usuelles des fonctions d'appartenance	54
Figure IV. 5 : a) : Schéma synoptique d'un contrôleur flou, b) : Configuration d'un contrôleur flou.	55
Figure IV. 6 : Schéma bloc de la commande de la GADA à base d'un RLF.....	59
Figure IV. 7 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirect de la GADA par la logique floue (vitesse fixe)	59
Figure IV. 8 : Courant statorique.....	60
Figure IV. 9 : Courant statorique (zoom)	60
Figure IV. 10 : Courant rotorique.....	60
Figure IV. 11 : Courant rotorique (zoom)	61
Figure IV. 12 : puissance active.	61
Figure IV. 13 : puissance réactive.	62

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.....	11
Tableau IV. 1 : Matrice d'inférence des règles floues.....	58

Abréviations & Symboles

GADA : Générateur asynchrone à double alimenté

MADA : machine asynchrone à double alimenté

RLF : régulateur à base de logique floue

Ω_{tur} : vitesse tournante d'arbre

J_{pal} : La même élasticité

d_a : Le coefficient de frottement par rapport à l'aire

J_a : Inertie d'arbre

K_a : San élasticité

D_a : Coefficient de fortement par rapport au multiplicateur

J_G : Une inertie

D_G : Un coefficient de fortement

F_{rot} : Force de rotation

m : Quantité de mouvement

P_v : Puissance contenue dans le vent sous forme d'énergie cinétique

ρ : Densité volumique de l'aire

S_b : Surface balayée par les pales

v : vitesse filtrée du vent au moyeu de la turbine

B : Angle de calage des pales

P_{aer} : Puissance captée par la turbine

C_p : Coefficient de puissance (sans unité)

λ : Rapport de vitesse (sans unité)

r_t : Rayon de la turbine en mètre (m)

C_{aer} : Couple aérogénérateur

C_g : Couple de la machine

C_{mec} : Couple mécanique

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

c_r : Couple résistance

P_n : Puissance nominale

V_n : vitesse nominale du vent

V_m : vitesse maximale du vent

V_d : vitesse démarrage du vent

C_{PID} : est le régulateur de vitesse

Ω_{ref} : est la vitesse mécanique de référence

Abréviations & Symboles

- C_{pmax} : Coefficient de puissance maximal
- r_s : Résistance d'une phase statorique
- r_r : Résistance d'une phase rotorique
- w_s : Pulsation de fréquence statorique
- w_r : Pulsation de fréquence rotorique
- (x, y) : Axes correspondant au référentiel lié au rotor
- (α, β) : Axes correspondant au référentiel lié au stator
- (d, q) : Axes correspondant au référentiel lié au champ tournant
- $\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$: Flux stator instantané selon l'axe (d, q)
- $\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$: Flux rotor instantané selon l'axe (d, q)
- V_{rd}, V_{rq} : Tension rotor instantanée selon l'axe (d, q)
- V_{sd}, V_{sq} : Tension stator instantanée selon l'axe (d, q)
- S : Opérateur dérivée de Laplace d/dt
- L_s : Inductance cyclique propre statorique
- L_r : Inductance cyclique propre rotorique
- M : L'inductance mutuelle
- M_{sr} : Inductance mutuelle stator- rotor
- M_{rs} : Inductance mutuelle rotor - stator
- $I_{sd} I_{sq}$: Courant stator instantané selon l'axe (d, q)
- $I_{rd} I_{rq}$: Courant rotor instantané selon l'axe (d, q)
- P : Nombre de paire de pôles
- Ω : vitesse de rotation de la machine
- j : Moment d'inertie de l'ensemble machine et turbine éolienne
- f_r : Coefficient de frottement
- P_r : Puissance active transmise par le rotor de la machine électrique
- P_s : Puissance active transmise par le stator de la machine électrique
- P_m : Puissance mécanique
- Q_s : Puissance réactive statorique
- Q_r : Puissance réactive rotorique
- g : Glissement
- σ : Coefficient de dispersion de blondel ou coefficient de fuit total
- PI : Correcteur proportionnelle-intégral
- T_s : Constante de temps statorique :

Abréviations & Symboles

$(u_{an0}u_{bn0}u_{cn0})$: Tension de entrer de l'onduleur

$(u_{an}u_{bn}u_{cn})$: Tension de sortie de l'onduleur

v_1 : Gain La surface de glissement de puissance active

v_2 : Gain La surface de glissement de puissance réactive

x^{ref} : La référence de la variable x

Introduction générale

Introduction générale

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 les puissances active et réactive produites par l'éolienne à chaque instant. Actuellement, le marché des générateurs éoliens à vitesse variable s'est orienté vers des puissances supérieures à 1 MW notamment pour tirer parti au maximum du gisement éolien sur le site d'implantation. Ces générateurs utilisent souvent la machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme génératrice étant donné ses avantages. En effet, le schéma de raccordement le plus typique de cette machine consiste à raccorder le stator directement au réseau, alors que le rotor est alimenté à travers deux convertisseurs statiques en mode back-to-back (un côté machine CCM et l'autre côté réseau CCR).

La commande vectorielle indirecte basée sur des régulateurs classiques de type PI (Proportionnel-Integral) est traditionnellement utilisée pour le contrôle de la puissance active et réactive de la GADA [1,2]. Cette technique découple le courant du rotor en composants actif et réactif, est obtenu indirectement en contrôlant les courants d'entrée.

Par conséquent, les régulateurs PI classiques, en raison de leurs structures simples, sont encore les correcteurs les plus couramment utilisés dans le contrôle des systèmes industriels ; récemment dans le contrôle des éoliennes équipées de GADA [1 ,3].

Cependant, l'ajustement des correcteurs PI est fastidieux et il peut être difficile de régler les gains de ce dernier correctement en raison de sa non-linéarité et de la grande complexité du système. Un autre inconvénient principal de ce régulateur est que ses performances dépendent fortement des paramètres de la GADA [4,5]. Les techniques de l'intelligence artificielle sont connues actuellement pour leur grande potentialité de pouvoir résoudre les problèmes liés aux processus industriels, notamment le contrôle, l'estimation et l'identification des paramètres des systèmes variant. Parmi ces techniques, on trouve la logique floue qui s'applique de plus en plus dans le contrôle de la machine à induction et l'adaptation de sa commande vectorielle.

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à la technique de la logique floue pour synthétiser des régulateurs robustes vis-à-vis aux variations paramétriques de la GADA, afin de remplacer les régulateurs PI classiques utilisés dans la commande vectorielle.

Introduction générale

Le travail de mémoire est composé de quatre chapitres :

-Le premier chapitre est consacré aux généralités sur l'énergie éolienne à travers les équations et les concepts physiques régissant leur fonctionnement. Ces rappels sont suivis par un état de l'art sur les différentes méthodes utilisées pour produire de l'électricité. Ensuite, la conversion électromécanique à travers différentes structures de la génératrice GADA connectée au réseau est présentée.

-Le deuxième chapitre scindé en deux parties traite la modélisation du système de conversion d'énergie éolienne. La première partie est destinée à l'étude de la modélisation mécanique de l'éolienne. La deuxième partie traite de la modélisation électrique de l'éolienne.

-Le troisième chapitre est dédié à la stratégie vectorielle de la GADA c'est-à-dire, sans tenir compte de la présence des convertisseurs statiques utilisant la commande vectorielle des puissances active et réactive statorique basée sur un régulateur linéaire PI. Les modèles des convertisseurs statiques sont ensuite introduits pour aboutir à des représentations plus proches de la réalité.

-Le dernier chapitre nous ayant remplacé les régulateur PI par des régulateurs floue pour obtenu des résultats satisfaisants.

Enfin, le mémoire est clôturé par une conclusion générale résumant les résultats les plus significatifs.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes éoliens

I.1 Introduction

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

I.2 Situation de l'énergie éolienne dans le monde

Le rapport annuel publié par le GWEC (Global Energy Council) pour l'année 2017 montre l'énorme intérêt destiné à l'énergie éolienne en Europe et dans le monde.

Évolution de la puissance du parc éolien mondial

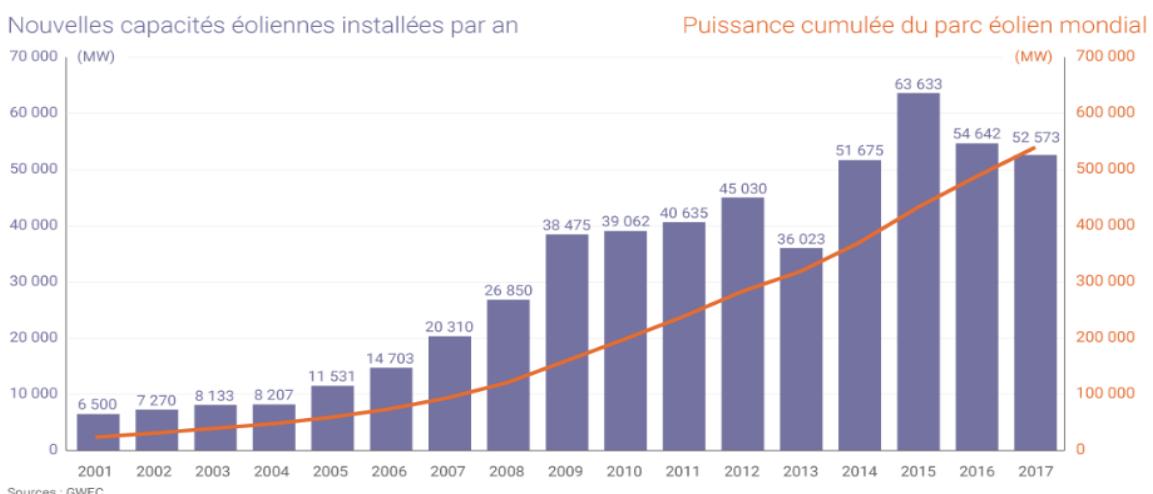


Figure I. 1: L'éolien en Europe et dans le monde en 2017[6].

Dans notre pays, les énergies renouvelables n'ont pas connu le développement que permet leur disponibilité, et qu'impose leur importance pour le développement économique et social.

Trois raisons principales plaident en faveur d'un développement des énergies renouvelables en Algérie [7] :

- Elles constituent une solution économiquement viable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées notamment dans les régions du Grand Sud,

- Elles permettent un développement durable du fait de leur caractère inépuisable, et de leur impact limité sur l'environnement et contribuent à la préservation de nos ressources fossiles,
- La valorisation de ces ressources énergétiques ne peut qu'avoir des retombées positives en matière d'équilibre régional et de création d'emplois.

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée sur la figure(I.2). Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque qu'à l'exception de la région côtière (sauf Bejaia et Oran), du Tassili et de Beni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s, [7-9].

En fait, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5 m/s. Cependant, on observe l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran [8].

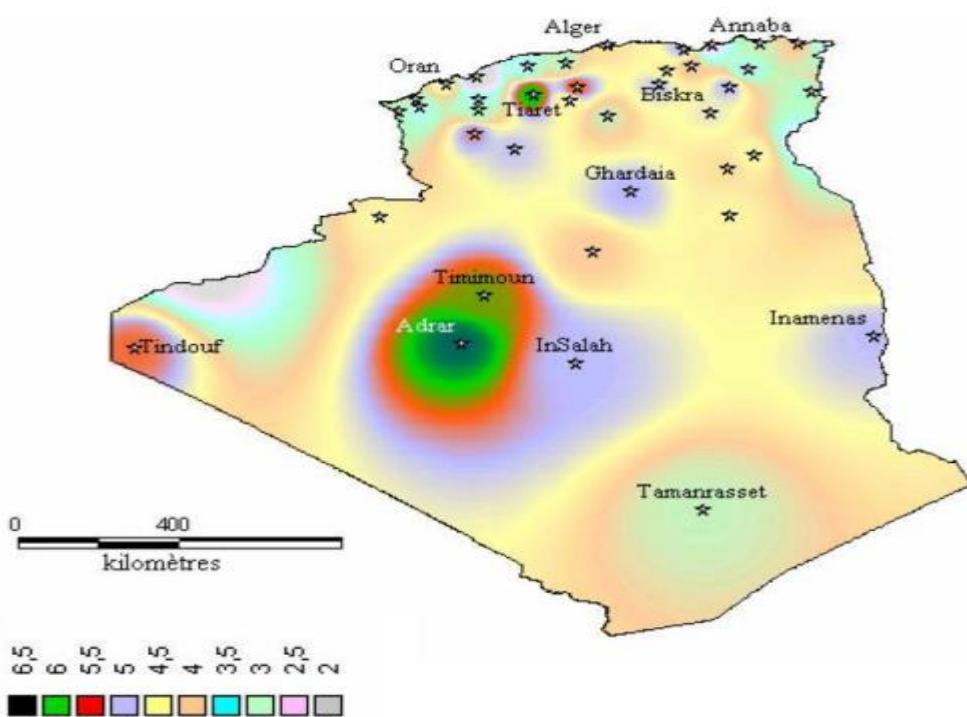


Figure I. 2: Atlas de la vitesse moyenne du vent (en m/s) de l'Algérie Estimée à 10 m du sol [9].

Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux et le Sahara. Le potentiel énergétique est énorme sachant que la région d'Adrar se trouve dans un couloir de vent de 6 m/s et se prolongent

jusque à 20 m/s tandis que pour In Amenas le régime n'excède pas 14 m/s [10]. Les turbines éoliennes qu'on peut utiliser pour le développement du sud Algérien sont de petite échelle, où l'installation et l'entretien sont faibles et de coût abordable. Plusieurs éoliennes sont installées actuellement à Adrar pour le pompage d'eau [7]. En plus, on pourrait aussi exploiter l'éolien offshore dans le côté nord de notre pays.

I.3 Définition de l'énergie éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elles sont généralement utilisés pour produire de l'électricité et entre dans la catégorie des énergies renouvelables.

Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (L'orientation des pales de l'éolienne et l'orientation de la nacelle).
- Un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande) [11].

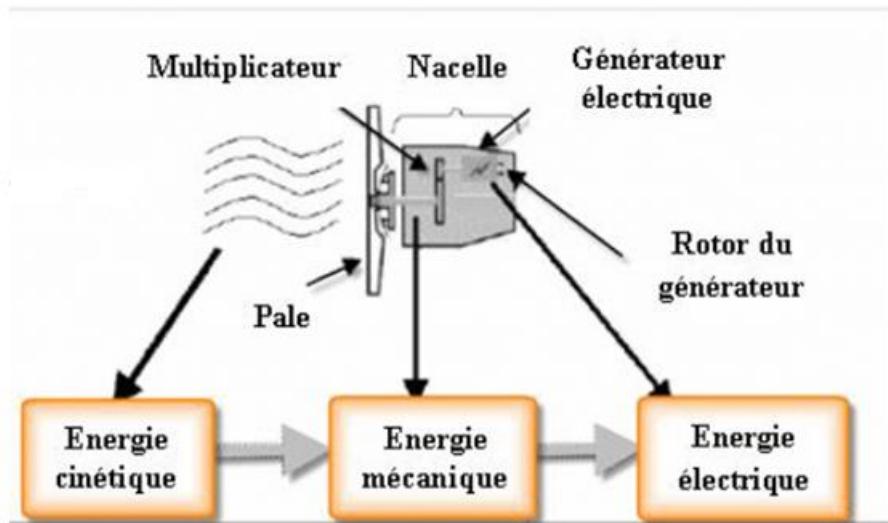


Figure I. 3: Conversion de l'énergie cinétique du vent [11].

I.3.1 Composants d'une éolienne

Une éolienne à axe horizontal (les plus courantes) se compose de trois parties principales :

- Le rotor avec les pales, c'est la zone qui captera l'énergie cinétique du vent et la transformera en énergie mécanique.
- La nacelle, c'est la partie où l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique par le biais d'une génératrice. Il y a aussi dans la nacelle des systèmes de contrôle et de frein dans le cas où le vent serait trop fort.
- Le mât et les fondations, qui supportent la nacelle et le rotor, ils doivent être capables de supporter les différentes contraintes qu'il peut y avoir. Le mât est plus ou moins haut (dépend de la machine et de la vitesse du vent qui cherche à être récupérée). Il peut faire en général de 10 à 100 m de hauteur.

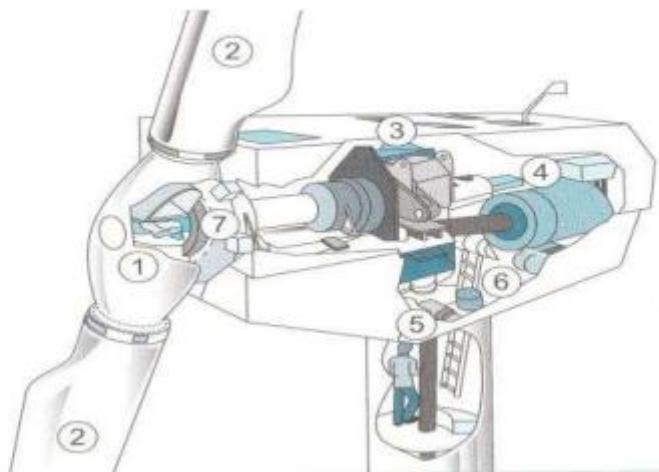


Figure I. 4: Les différents composants de la nacelle d'une grande éolienne.

1 : Rotor ; 2 : Pâles ; 3 : Multiplicateur ; 4 : Génératrice ; 5 : Mécanisme d'orientation de la nacelle ; 6 : Système hydraulique ; 7 : Frein

I.4 Les différents types d'éoliennes

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

- ✓ Les turbines éoliennes à axe horizontal ;
- ✓ Les turbines éoliennes à axe vertical

I.4.1 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Les différentes Constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales [12].

Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent [13] Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [14,15].

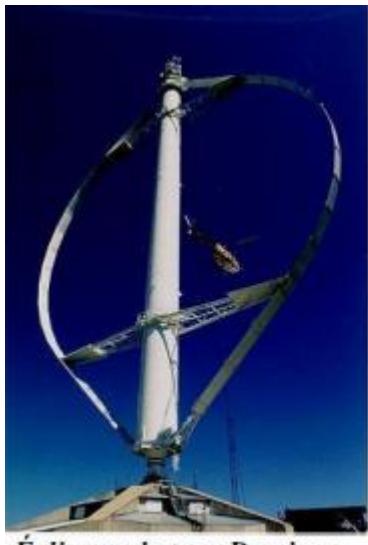


Figure I. 5: Configuration à axe horizontal [15].

I.4.2 Les éoliennes à axe vertical

Elles ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. De nombreuses variantes ont vu le jour mais rares sont celles qui ont atteint le stade de l'industrialisation.

Ce type d'éolienne a été de plus en plus abandonné à cause des différents inconvenients qu'il a posés. Des problèmes d'aéroélasticité et la grande occupation du sol ont été les raisons de cet abandon au profit des éoliennes à axe horizontale [16.17].



Éolienne de type Darrieus.



Éolienne de type Savonius.

Figure I. 6: Eolienne de type Darrieus et Savonius [17].

I.5 Principe de fonctionnement

Sous l'effet du vent, l'hélice se met en marche, ses pales tournent. Le rotor (hélice) est situé au bout d'un mât car les vents soufflent plus fort en hauteur, le mât varie entre 10 et 100 m de hauteur. Le rotor comporte souvent 3 pales, mesurant entre 5 et 90 m de diamètre. Pour faire tourner l'hélice, il faut une vitesse minimale d'environ 10 à 15 km/h. Pour des raisons de sécurité, l'éolienne s'arrête automatiquement de fonctionner quand le vent dépasse 90 km/h. La vitesse optimale est de 50 km/h. L'hélice entraîne un axe dans la nacelle relié à un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la rotation de l'axe, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. [18].

I.6 Comparaison entre générateurs utilisant l'énergie éolienne

L'étude comparative des générateurs utilisant l'énergie éolienne a permis d'établir le tableau ci-dessous.

TableauI.1: Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

Fonctionnement à vitesse fixe	Fonctionnement à vitesse variable
- Utilisable avec une éolienne sans multiplicateur de vitesse	- Utilisable avec une éolienne avec obligatoirement un multiplicateur de vitesse
- Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne,	-Peut être facilement couplé au réseau
- La vitesse de rotation est fixe - Plus grande fiabilité,	- Augmentation du rendement énergétique,
-Fonctionnement à vitesse variable ($\pm 30\%$ de la vitesse nominale).	-Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Parmi les systèmes fonctionnant à vitesse variable, le générateur asynchrone à double alimentation possède plus d'atouts par rapport à la machine à cage. C'est pour cela que dans la suite de ce mémoire, nous ne traiterons que l'éolienne entraînant une génératrice asynchrone à double alimentation.

I.7 Description du fonctionnement de la MADA

La MADA à une double accessibilité au stator et au rotor. Dans son fonctionnement, elle s'apparente au fonctionnement de la machine synchrone avec une vitesse constante du fait de l'imposition des fréquences aux deux armatures et le caractère asynchrone est lié à la différence de vitesse entre le champ statorique et le rotor. Sa magnétisation est donnée par la contribution des deux armatures alimentées par des sources à courant alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de "machine synchrone excitation alternative [19.20].

I.7.1 Structure de la machine

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés à la fois par deux onduleurs autonomes. Cette machine appelée machine asynchrone à double alimentation, est utilisée dans des applications requérant une vitesse variable, Figure (I.7).

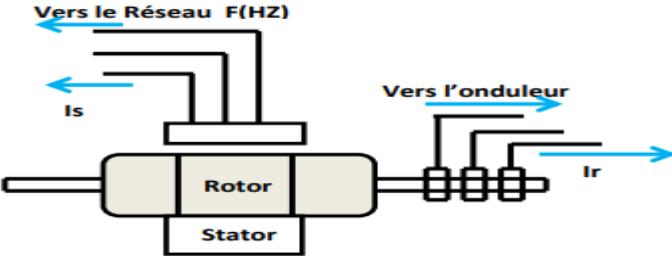


Figure I. 7 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA[21].

Les sections qui suivent décrivent les modes de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation, dont le stator est relié directement au réseau et le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur. On désigne par P_{sl} la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau, par P_r la puissance transitant par le stator, et par P_{mec} , la puissance mécanique [21].

I.7.2 Mode de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

Lorsque le moteur à rotor bobiné est alimenté par une source de tension E_s de fréquence f au stator, et une source E_r de fréquence f_2 au rotor. Le glissement g est automatiquement imposé. Soit $g = \frac{f_2}{f}$ la vitesse de moteur est donc également imposée par la relation :

$$n = n \cdot (1 - g) = n \cdot \left(1 - \frac{f_2}{f}\right). \quad (\text{I.1})$$

Aussi, on peut généraliser et montrer que lorsqu'un moteur à rotor bobiné est alimenté par deux sources, il doit tourner à une des deux vitesses suivantes :

$$n = \frac{120}{p} (f - f_2). \text{ Ou } n = \frac{120}{p} (f + f_2);$$

n : vitesse de rotor (tr min)

f : fréquence appliquée au stator (Hz) ;

f_2 : fréquence appliquée au rotor (Hz) ;

p : nombre de paires de pôles du stator ;

Considérons la machine à double alimentation en modes hypo-synchrone et hyper-synchrone. On distingue quatre modes de fonctionnement de la machine.

I.7.2.1 Fonctionnement en moteur asynchrone à double alimentation

- En mode moteur hypo-synchrone : $g > 0$

- La puissance est fournie par le réseau au stator.
- La puissance de glissement" est renvoyée au réseau.

- La vitesse de rotation est inférieure au synchronisme.
- La machine asynchrone peut être fonctionnée ainsi mais la puissance de glissant est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [20,22].

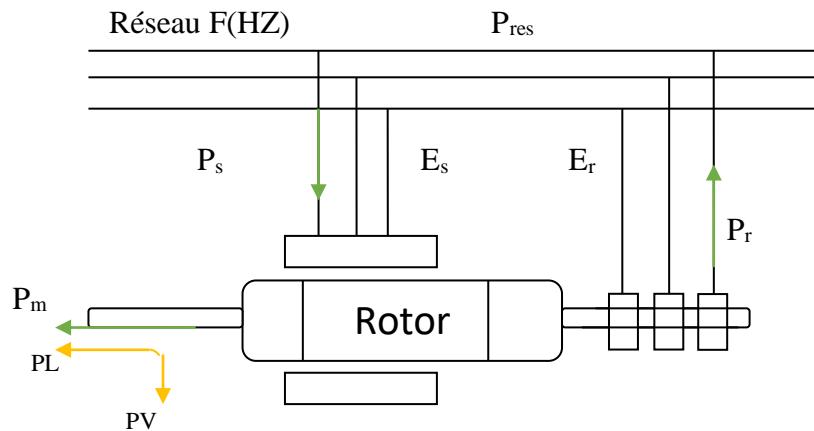


Figure I. 8 : Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.

- En mode moteur hyper- synchrone : $g < 0$

- La puissance fournie par le réseau va au rotor et stator.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone ne peut pas avoir ce fonctionnement [20].

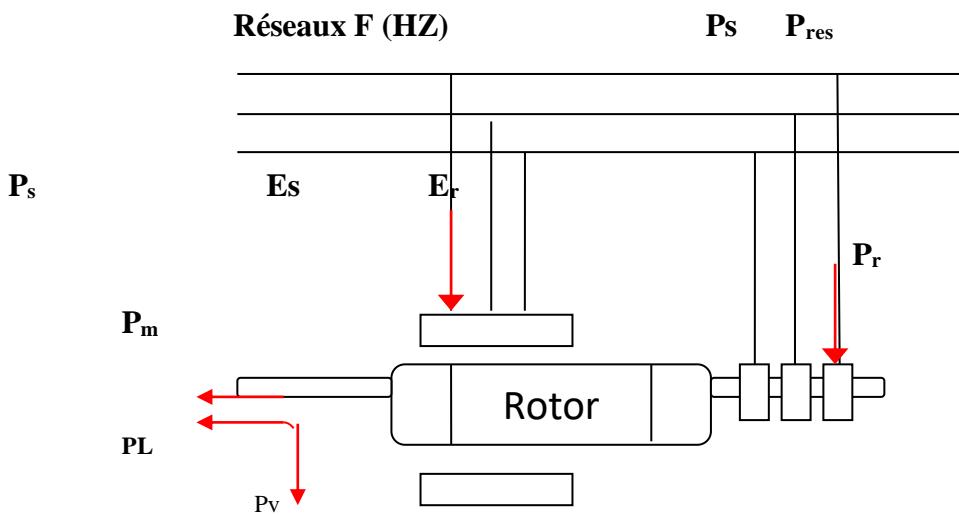


Figure I. 9 : Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.

I.7.2.2 Fonctionnement cas générateur asynchrone à double alimentation

- hypo-synchrone

La figure (I.10) montre que :

- la puissance est fournie au réseau par le stator

- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- La vitesse de rotation en dessous de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode fonctionnement.

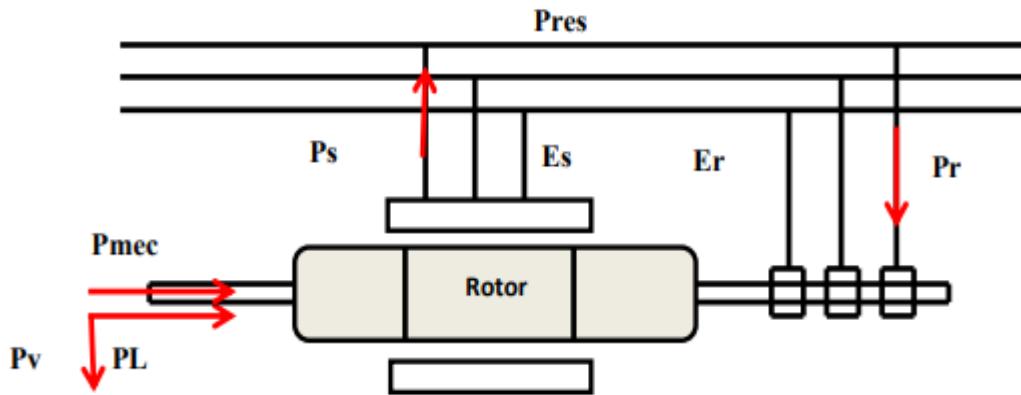


Figure I. 10 : Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.

- hyper-synchrone

La figure (I.11) montre que :

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau.
- un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse synchronisme.
- La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

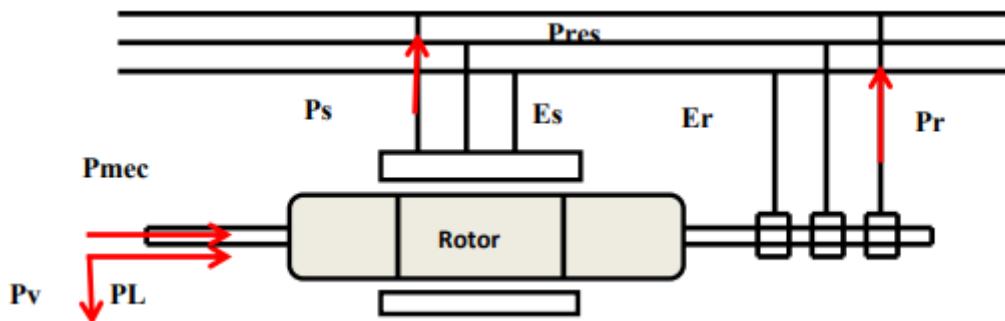


Figure I. 11 : Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.

I.8 Avantages et inconvénients de la GADA

I.8.1 Avantages de la GADA

Les éoliennes à base de la GADA possèdent plusieurs avantages :

- Les convertisseurs statiques utilisés sont moins volumineux, moins coûteux, nécessitant ainsi un système de refroidissement moins lourd. Ils génèrent moins de perturbations comparativement aux convertisseurs utilisés pour les éoliennes à base de machine asynchrone à cage ou à aimants permanents,
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- Le facteur de puissance peut être réglé car la génératrice peut être contrôlée pour fonctionner de façon similaire à un alternateur synchrone.
- le GADA peut être contrôlé avec précision en raison de fait que le convertisseur de puissance peut ajuster à la fois l'amplitude et la phase de la tension appliquer au rotor. [23,24]

En effet, les puissances active et réactive peuvent être contrôlées de façon indépendante grâce au convertisseur connecté au rotor de la GADA, [22].

I.8.2 Inconvénients de la GADA

- machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.
- le nombre de convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus important que dans le cas de la machine à cage un redresseur et un onduleur) [25].

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, la première partie est consacrée à présenter la situation de l'énergie éolienne dans le monde et à souligner les composantes les plus importantes d'une éolienne. De même, nous avons présenté le principe de fonctionnement d'une éolienne d'une manière générale ainsi que les différents types d'éoliennes classées selon des critères bien précis (type d'axe, orientation par rapport à la direction du vent, vitesse de rotation) et leurs modes de fonctionnement.

Chapitre II

Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

II.1 Introduction

Afin de pouvoir étudier la chaîne de conversion d'énergie éolienne sur la plateforme de simulation (Matlab), il est nécessaire de modéliser mathématiquement chaque élément de ce système de conversion éolienne.

Dans un premier temps, on s'intéresse à la modélisation de la turbine éolienne et ses parties mécaniques, ensuite la machine asynchrone à double alimentation en mode générateur, enfin, le convertisseur à deux niveaux.

II.2 Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne

II.2.1 Modélisation de la turbine éolienne

Une éolienne est un élément tridimensionnel aux formes complexes, en mouvement et immergé dans un flux d'air. Il est cependant important que le modèle en question décrive la vraie dynamique mécanique de la voilure et pas seulement un comportement quasi-statique. Le profil aérodynamique convertit l'énergie de la masse d'air en mouvement et fournit une puissance mécanique caractérisée par une vitesse de rotation et un couple mécanique [26].

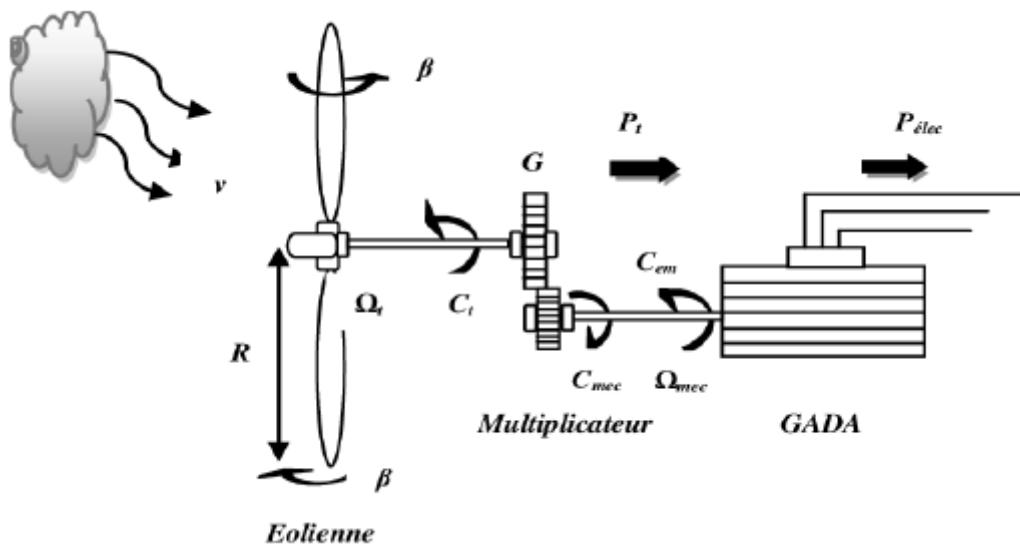


Figure II. 1: Schéma de la turbine éolienne [26].

La puissance du vent est définie par :

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

Avec :

ρ : densité de l'air (approxim. $1,22 \text{ kg} / \text{m}^3$ à la pression atmosphérique à 15°C).

S : surface circulaire balayée par la turbine (le rayon du cercle est déterminé par la longueur de pale).

v : vitesse du vent en m/s.

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

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{P_{aér}}{P_v} \quad (\text{II.2})$$

Où

λ : vitesse relative.

β : angle d'orientation des pales.

Le ratio $\frac{P_{aér}}{P_v}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de **16/27** soit **0,59**.

C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est pratiquement jamais atteinte, et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative, qui représente le rapport entre la vitesse du bout des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. [27].

La puissance mécanique $P_{aér}$ disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur dépend du coefficient de puissance C_p et s'exprime par :

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

Avec :

P_v : la puissance du vent (w).

$P_{aér}$: la puissance aérodynamique de la turbine de vent (w).

R : correspond pratiquement à longueur de la pale (m).

C_p : le coefficient de puissance.

On présente le pourcentage par $C_p(\lambda, \beta)$ qui est en fonction de ratio de vitesse λ et l'angle d'orientation des pales β .

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin\left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3 \cdot (\beta - 2)}\right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{II.4})$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine [28].

La Figure (II.2) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de la vitesse et de l'angle d'orientation de la pale. On peut remarquer que le coefficient de puissance passe par un maximum ($C_{p\max} = 0.5$), pour un angle de décalage $\beta = 2$, une valeur de la vitesse relative λ dite optimale ($\lambda_{opt}=9.15$) [29,30].

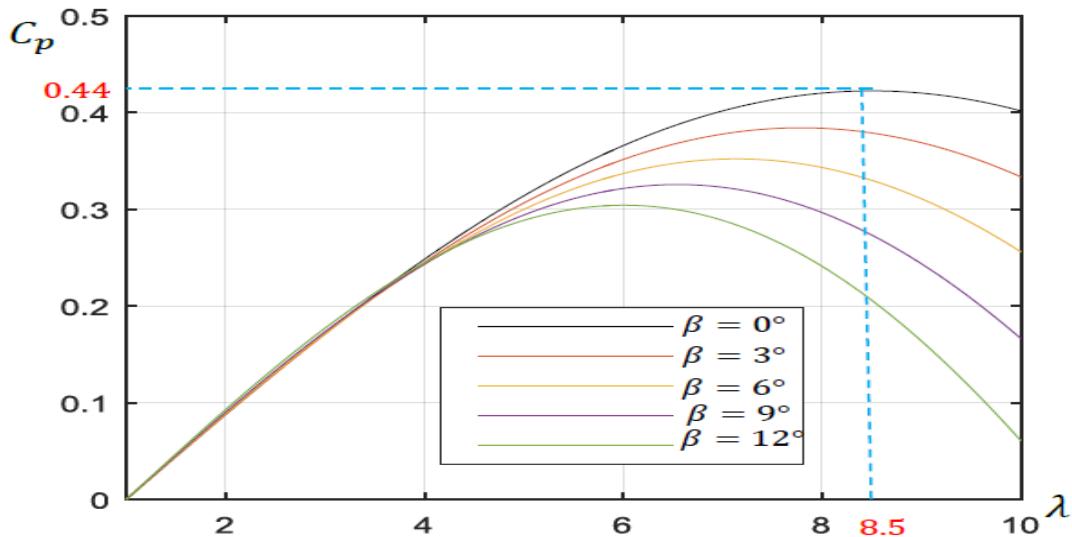


Figure II. 2: variation de C_p en fonction de λ et β [31].

Le ratio de la vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R\Omega_{tur}}{V} \quad (\text{II.5})$$

Où

Ω_{tur} : la vitesse de rotation avant le multiplicateur.

A partir des équations précédentes, on constate que le couple de la turbine peut s'exprimer comme suit :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{tur}} = C_p \frac{1}{2} \rho S V^3 \frac{1}{\Omega_{tur}} \quad (\text{II.6})$$

Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice.

II.2.2 Multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice et le couple aérodynamique au couple d'entrainement de la génératrice selon les formules mathématiques suivantes [32].

$$C_g = \frac{C_{aer}}{K} \quad (\text{II.7})$$

$$\Omega_{tur} = \frac{\Omega_{mec}}{K} \quad (\text{II.8})$$

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K, la puissance mécanique P_{mec} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mec} = C_p \frac{1}{2} \left(\frac{\Omega_{mec} R}{KV} \right) \rho S V^3 \quad (\text{II.9})$$

Avec :

C_g : le couple du générateur ;

Ω_{mec} : la vitesse de rotation du générateur après le multiplicateur ;

K : le gain du multiplicateur.

II.2.3 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_{tur} et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [33,34].

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (\text{II.10})$$

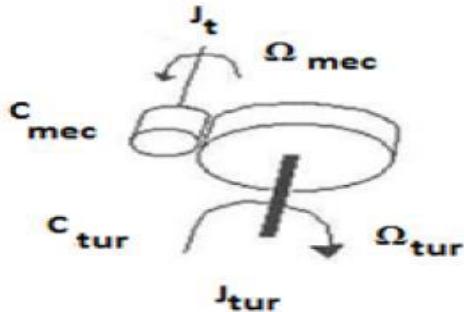


Figure II. 3: Modèle mécanique simplifié du multiplicateur [34].

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reporté par cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total C_{mec} appliqué au rotor :

$$C_{mec} = J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \quad (\text{II.11})$$

Où J_t est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vi} et le couple issu du multiplicateur.

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vi} \quad (\text{II.12})$$

Le couple résistant due aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vi} = f\Omega_{mec} \quad (\text{II.13})$$

Donc :

$$C_{mec} = J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - f\Omega_{mec} \quad (\text{II.14})$$

Si on applique la transformée de Laplace sur l'équation on peut écrire :

$$C_g - C_{em} = (J_t \cdot S + f) \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II.15})$$

On résume la modélisation de la turbine par un schéma bloc montré sur la figure (II-4)

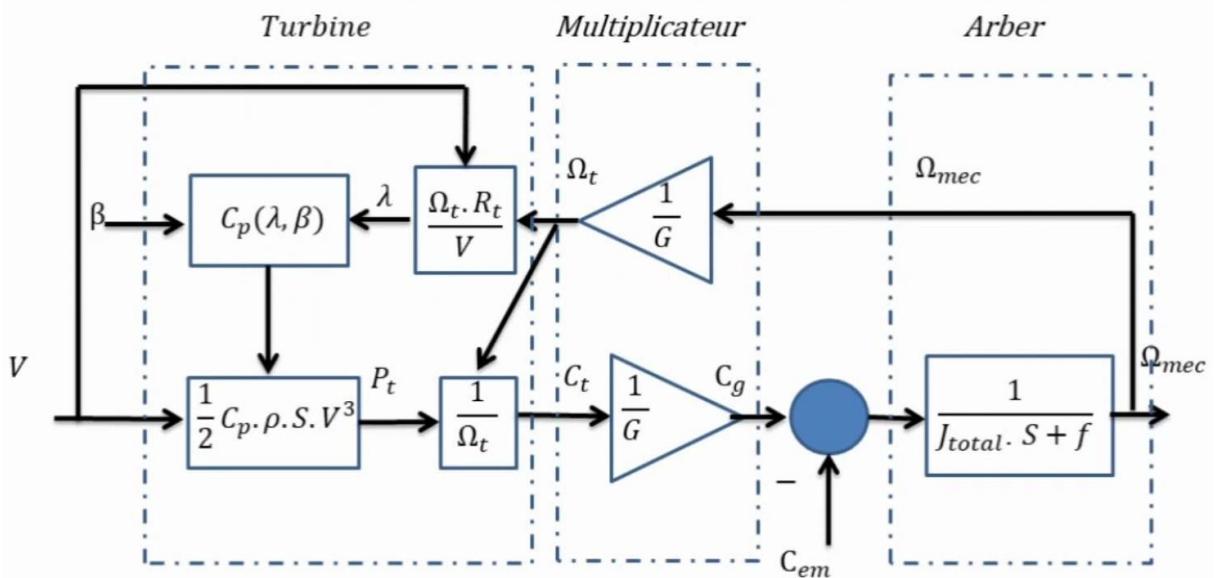


Figure II. 4: schéma bloc du modèle de la turbine [35].

II.3 Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation

L'étude du comportement de GADA est une tâche difficile qui nécessite d'abord une bonne compréhension de son modèle dynamique. Typiquement, le modèle est défini dans un repère biphasé tournant (d, q). Ce cadre de référence est défini à partir du cadre triphasé naturel de GADA en utilisant des transformations mathématiques appropriées.

Afin d'élaborer un modèle simple de la GADA, il est nécessaire de tenir compte des hypothèses simplificatrices suivantes qui tout en permettant de simplifier notablement les calculs, conduisent à des résultats suffisamment précis pour la plupart des applications [36].

II.3.1 Hypothèses simplificatrices

- Répartition spatiale sinusoïdale de l'induction magnétique à travers l'entrefer ce qui se traduit par une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre le stator et le rotor, cela implique une variation nulle de la perméance magnétique due aux encoches.
- Les courants induits dans le circuit magnétique (courants de Foucault) sont supposés négligeables, ainsi qu'aux phénomènes de l'hystérésis et l'effet de peau.
- La saturation magnétique ne sera pas prise en compte, ce qui permettra d'écrire les flux propres de la machine comme des fonctions linéaires des courants.
- Les Résistances des enroulements sont considérées comme constantes.

II.3.2 Modèle de la GADA dans le plan ABC

➤ Equations en triphasée

Le stator est constitué de trois enroulements répartis dans l'espace, et séparés d'un angle électrique de 120° , les même propos s'appliquent au rotor.

La figure (II.5) illustre la disposition des enroulements statoriques et rotoriques:

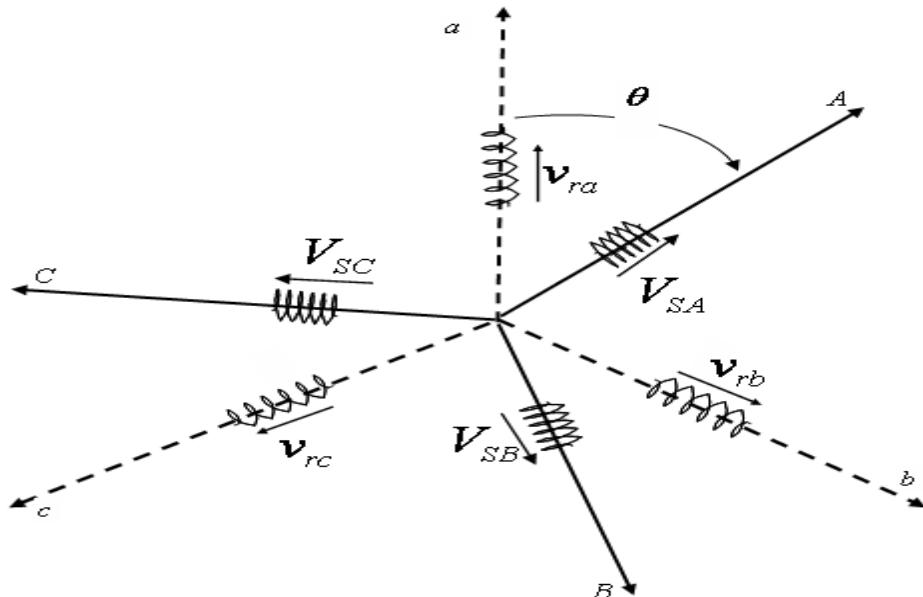


Figure II. 5: Schéma des enroulements de la MADA [37].

Dans le repère triphasé, les trois vecteurs SA, SB, SC, sont orientés selon les axes des trois enroulements statoriques de la machine. Il est de même pour le rotor.

L'axe SA est souvent considéré comme référence, et l'angle θ définit la position du rotor par rapport au stator.

En tenant compte des hypothèses mentionnées précédemment les équations électriques des tensions statoriques et rotoriques de la machine asynchrone à rotor bobiné s'écrivent, dans un repère triphasé, de la manière suivante : [38, 39,40]

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \emptyset_{sa} \\ \emptyset_{sb} \\ \emptyset_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Où R_s est la résistance des enroulements du stator.

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \emptyset_{ra} \\ \emptyset_{rb} \\ \emptyset_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Où R_r est la résistance des enroulements du rotor.

➤ Les équations magnétiques

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_s]. [I_s] + [M]. [I_s] \\ [\Phi_r] = [L_r]. [I_r] + [M]. [I_r] \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}, [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \emptyset_{sa} \\ \emptyset_{sb} \\ \emptyset_{sc} \end{bmatrix}, [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}, [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \emptyset_{ra} \\ \emptyset_{rb} \\ \emptyset_{rc} \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_{ss} & m_{ss} & m_{ss} \\ m_{ss} & l_{ss} & m_{ss} \\ m_{ss} & m_{ss} & l_{ss} \end{bmatrix}, [L_r] = \begin{bmatrix} l_{rr} & m_{rr} & m_{rr} \\ m_{rr} & l_{rr} & m_{rr} \\ m_{rr} & m_{rr} & l_{rr} \end{bmatrix}$$

$V_s = [V_{sa}. V_{sb}. V_{sc}]^T$: Tensions instantanées des phases a, b et c statoriques.

$I_s = [i_{sa}. i_{sb}. i_{sc}]^T$: Courants instantanés des phases a, b et c statoriques.

$\Phi_s = [\Phi_{sa}. \Phi_{sb}. \Phi_{sc}]^T$: Flux instantanés des phases a, b et c statoriques.

$V_r = [V_{ra}. V_{rb}. V_{rc}]^T$: Tensions instantanées des phases a, b et c rotoriques.

$I_r = [i_{ra}. i_{rb}. i_{rc}]^T$: Courants instantanés des phases a, b et c rotoriques

$\Phi_r = [\Phi_{ra}. \Phi_{rb}. \Phi_{rc}]^T$: Flux instantanés des phases a, b et c rotoriques.

R_s et R_r : Résistances d'une phase statorique et d'une phase rotorique, respectivement.

L_s et L_r : Inductances propres d'une phase statorique et d'une phase rotorique, respectivement.

m_{ss} et m_{rr} : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques, respectivement.

m_{sr} : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phase statorique et phase rotorique.

$$[M] = m_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

II.3.3 La transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère *d*, *q*, *o*) continu (figure II.10), donc elle permet d'obtenir un système d'équations à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution [41,42].

Les grandeurs statoriques et rotoriques seront alors exprimées dans un même repère (axe direct et axéen quadrature).

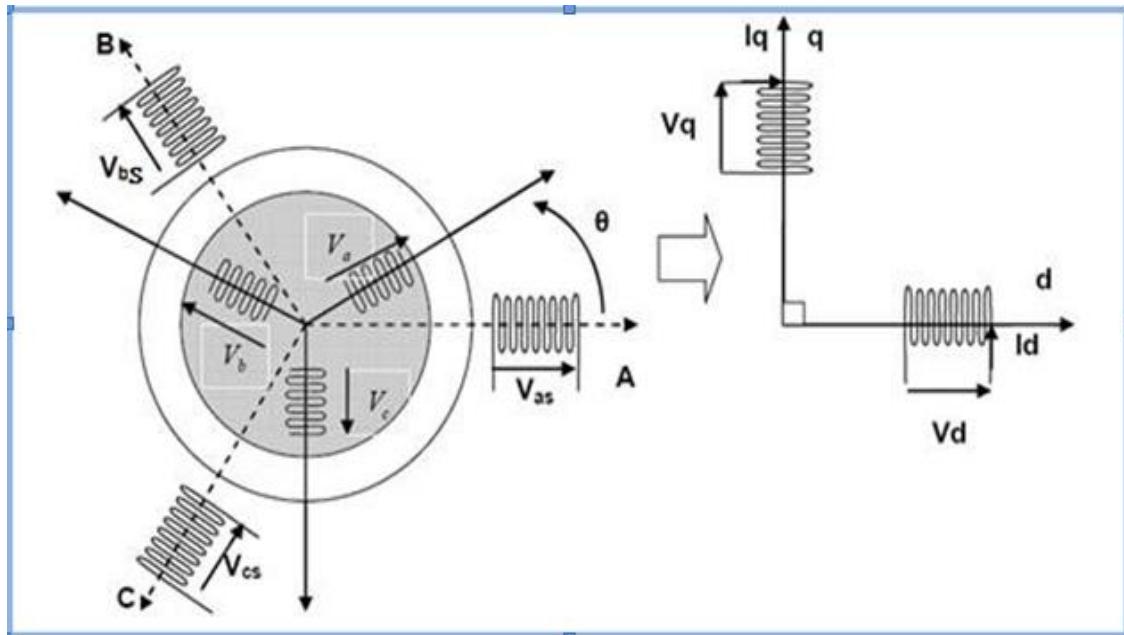


Figure II. 6: Modèle de PARK de la MADA [42].

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\psi)]$ est donnée sous la forme suivante: [43]

$$[X_{d.q.o}] = [P(\theta)]. [X_{A.B.C}] \quad (\text{II.20})$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

La transformation inverse de Park qui permet le passage du système *dqo* au système *abc* est donné par la matrice suivante :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

II.3.3.1 Application de la Transformation de Park à la MADA

En appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère quelconque. Le modèle de la machine est obtenu en tenant compte des composantes homopolaires sous la forme suivante :

$$[P(\theta)]^{-1} \cdot [V_{sdq}] = [R_s] \cdot [P(\theta)]^{-1} \cdot [i_{sdq}] + \frac{d}{dt} \{ [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\Phi_{sdq}] \} + [P(\theta_s)]^{-1} + \frac{d}{dt} [\Phi_{sdq}] \quad (\text{II.23})$$

En multipliant les deux membres de l'égalité par $[P(\theta_s)]$ nous trouvons :

$$[V_{sdq}] = [R_s] \cdot [i_{sdq}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sdq}] + [P(\theta_s)] \frac{d}{dt} [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\Phi_{sdq}] \quad (\text{II.24})$$

$$[P(\theta)] \left[\frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \right] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.25})$$

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

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

En remplaçant la relation (II.23) dans (II.22) on obtient le modèle biphasé équivalent suivant :

$$\begin{cases} V_d = R \cdot i_d \frac{d\Phi_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \Phi_q \\ V_q = R \cdot i_q \frac{d\Phi_q}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \Phi_d \\ V_o = R \cdot i_o \frac{d\Phi_o}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

II.3.3.2 Modèle biphasé de la GADA

En multipliant le système des équations (II.24) par la matrice de Park, on obtient :

➤ Equation électrique

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - w_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + w_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (w_s - w) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (w_s - w) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

w_s : Pulsation du référentiel (d, q).

w : Pulsation mécanique du rotor.

On applique la transformation de Park sur les équations des flux statoriques et rotoriques on obtient :

$$\begin{cases} \dot{\Phi}_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \dot{\Phi}_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \dot{\Phi}_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \dot{\Phi}_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Il apparaît clairement ensuite que les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celles des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier les équations.

Ceci se fait en liant les angles :

$$\theta_s = \theta + \theta_r \quad (\text{II.29})$$

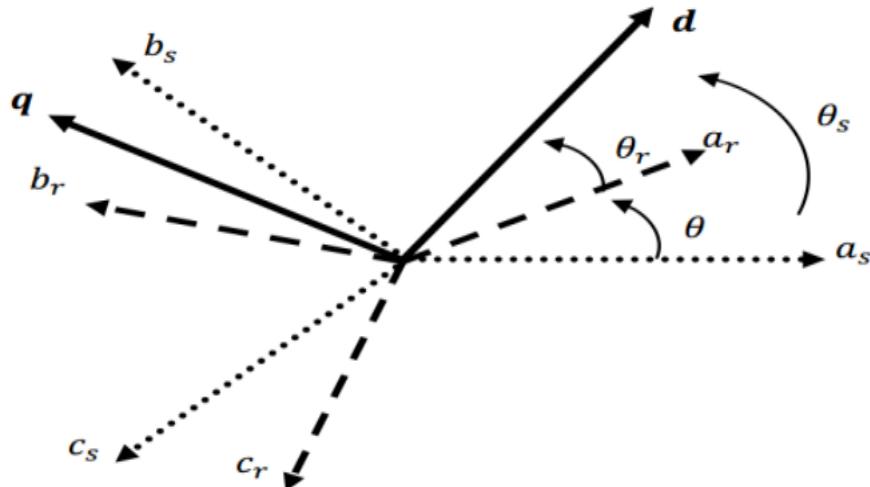


Figure II. 7: Transformation de Park [44].

➤ Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est décrite sous la forme :

$$C_{em} - C_r = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \quad (\text{II.30})$$

II.3.3.3 Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park

$$\begin{cases} C_{em} = P(\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \\ C_{em} = PM(i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \\ C_{em} = \frac{P.M}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qr} - \Phi_{qr} i_{ds}) \\ C_{em} = \frac{P.M}{L_s} (\Phi_{qs} i_{dr} - \Phi_{ds} i_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

II.3.4 Choix du référentiel

Le choix du référentiel dépend du problème à étudier. Il existe trois types de référentiel pour la machine asynchrone dont le choix dépend du type de problème à étudier [44].

- **Référentiel lié au stator**

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \Leftrightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -w \quad (\text{II.32})$$

Le repère lié au stator est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il possède des tensions et des courants réels et peut être utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif [45].

- **Référentiel lié au rotor**

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Leftrightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = w \quad (\text{II.33})$$

Ce référentiel est intéressant quand on étudie des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante.

- **Référentiel lié au champ tournant**

Ce référentiel est caractérisé par $w = w_s$. Dans ce repère, les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors de l'étude de la commande d'une machine [44].

Le modèle mathématique de la MADA s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{aligned} V_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - w_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + w_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} &= R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - w_r \Phi_{qr} \\ V_{qr} &= R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + w_r \Phi_{dr} \end{aligned} \quad (\text{II.34})$$

II.3.4.1 Modèle d'état de Park de la GADA

Pour obtenir le modèle complet de la MADA, on remplace les expressions des flux dans les équations de tension. On obtient quatre équations électriques en fonction des composantes des courants et/ou flux statoriques et rotoriques. L'association de l'équation mécanique aux quatre équations électriques donne le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park qui peut être mis sous la forme d'état suivante [46] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{M}{L_s} \cdot W_r i_{qr} + \frac{M R_r}{L_s L_r} i_{dr} + W_r i_{qs} + \sigma W_{sl} i_{qs} - \frac{R_s}{L_s} i_{ds} - \frac{M}{L_s L_r} V_{dr} + \frac{1}{L_s} V_{ds} \right) \\ \frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{M R_r}{L_s L_r} i_{qr} - \frac{M}{L_s} \cdot W_r i_{dr} - \frac{R_s}{L_s} i_{qs} - W_r i_{ds} - \sigma W_{sl} i_{ds} - \frac{M}{L_s L_r} V_{qr} + \frac{1}{L_s} V_{qs} \right) \\ \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\sigma} \left(\sigma W_s i_{qr} - W_r i_{qr} - \frac{R_r}{L_r} i_{dr} - \frac{M}{L_r} \cdot W_r i_{qs} + \frac{M R_s}{L_s L_r} i_{ds} + \frac{1}{L_r} V_{dr} - \frac{M}{L_s L_r} V_{ds} \right) \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{\sigma} \left(-\frac{R_r}{L_r} i_{qr} - \sigma W_s i_{dr} + W_r i_{dr} + \frac{M R_s}{L_s L_r} i_{qs} + \frac{M}{L_r} \cdot W_r i_{ds} + \frac{1}{L_r} V_{qr} - \frac{M}{L_s L_r} V_{qs} \right) \end{array} \right. \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$$W_{sl} = W_s - W_r \quad \text{et} \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$$

II.3.4.2 Bilan de puissance dans la GADA

Les équations des puissances active et réactive au côté stator ce donnée par :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} + V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Les équations des puissances active et réactive au côté rotor ce donnée par :

$$\begin{cases} P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} I_{dr} + V_{dr} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

II.4 Modélisation de l'onduleur de tension

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et la fermeture. Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfaits [47,48].

Le schéma représentatif d'une association onduleur-machine peut être donné par la figure (II.8).

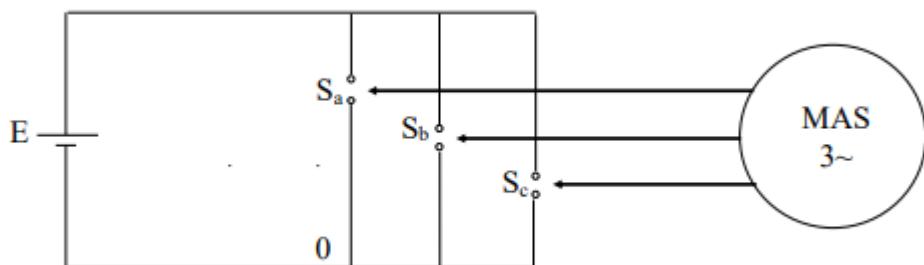


Figure II. 8 : schéma représentatif de l'association onduleur-machine à courant alternatif.

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

$Sj = 1$ si l'interrupteur du haut est fermé et celui d'en bas ouvert.

$Sj = 0$ si l'interrupteur du haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

D'après le schéma simplifié de l'onduleur, on peut écrire :

$$Uab = Ua0 - Ub0 = (Sa - Sb); Uac = (Sa - Sc); Ubc = E(Sb - Sc)$$

$$\text{Aussi : } Uan + Ubn + Ucn = 0$$

Donc :

$$Uan + Ubn + Ucn + Uca + Uan = 0 \Rightarrow 3Uan = Uab + Uac = (2 * Sa - Sb - Sc)$$

Au final, on aura

$$\begin{bmatrix} Uan \\ Ubn \\ Ucn \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Sa \\ Sb \\ Sc \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Cette équation matricielle donne les tensions triphasées simples en fonction des signaux de commande des bras de l'onduleur [49].

II.5 Simulation de la GADA

En s'appuyant sur les relations différentielles obtenues à partir de ce qui précède à l'aide de la transformation de Park et en les appliquant dans le programme de simulation (MATLAB) pour simuler une machine asynchrone à double alimentation pour faire fonctionner le générateur.

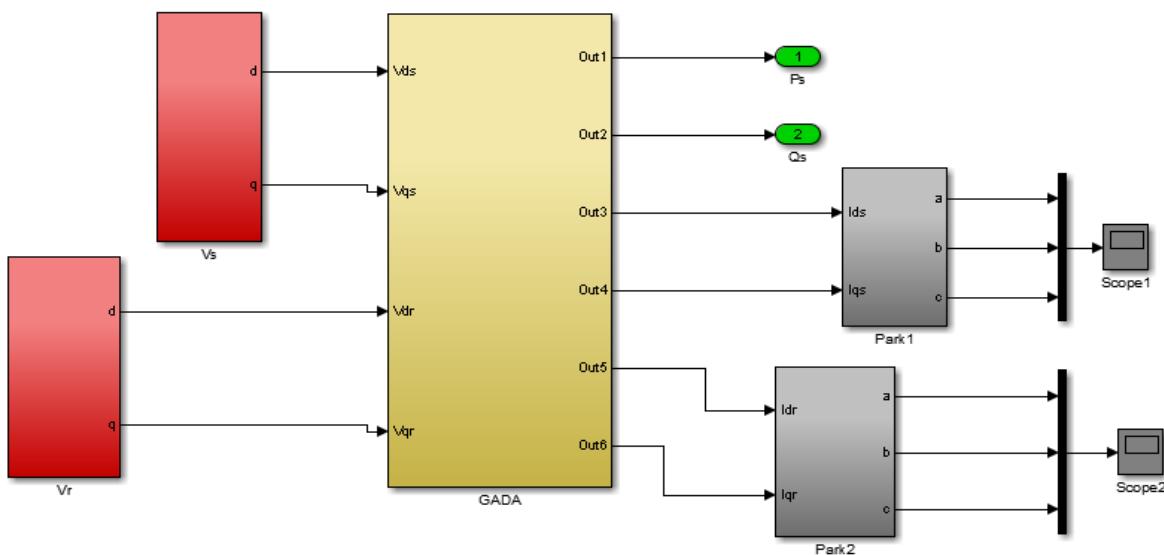


Figure II. 9 : Schéma bloc de la GADA.

II.5.1 Les résultats de la simulation

- Courant statorique

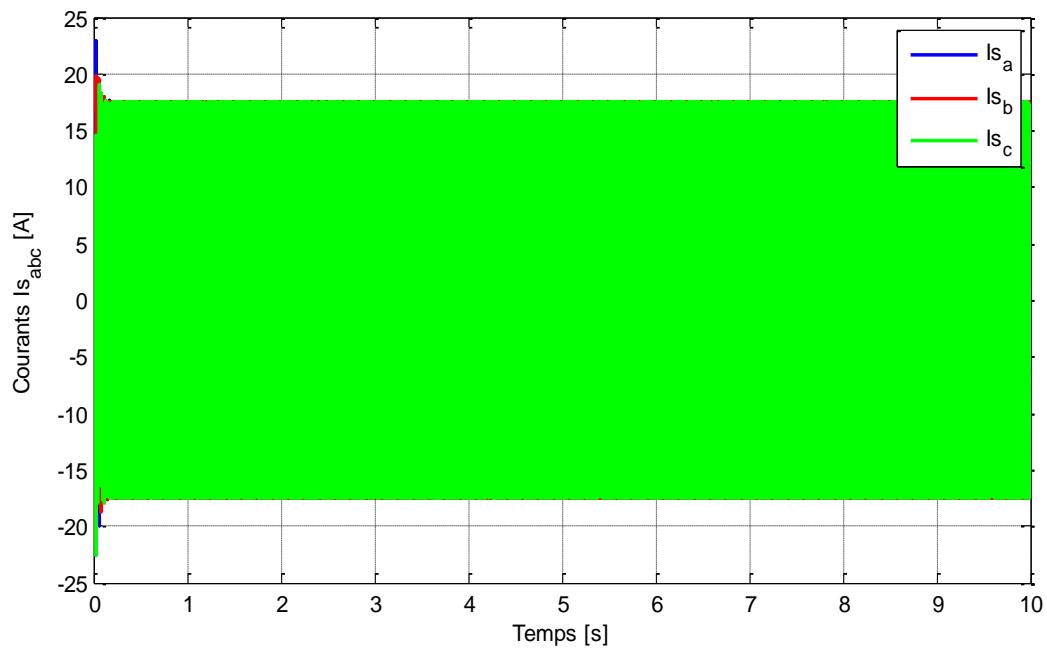


Figure II. 10 : Courant statorique.

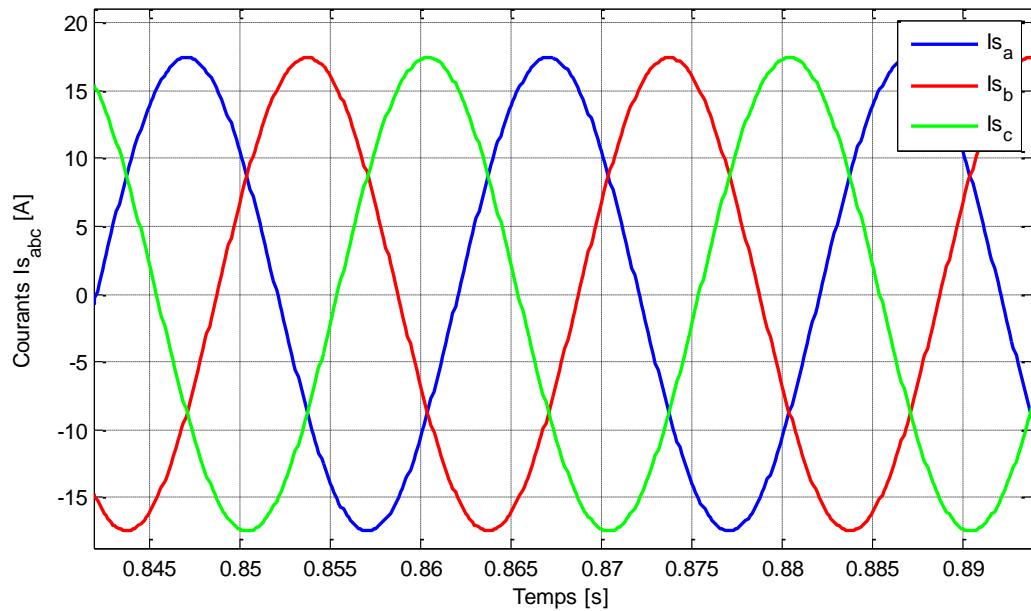


Figure II. 11 : Courant statorique (zoom).

➤ Courant rotorique

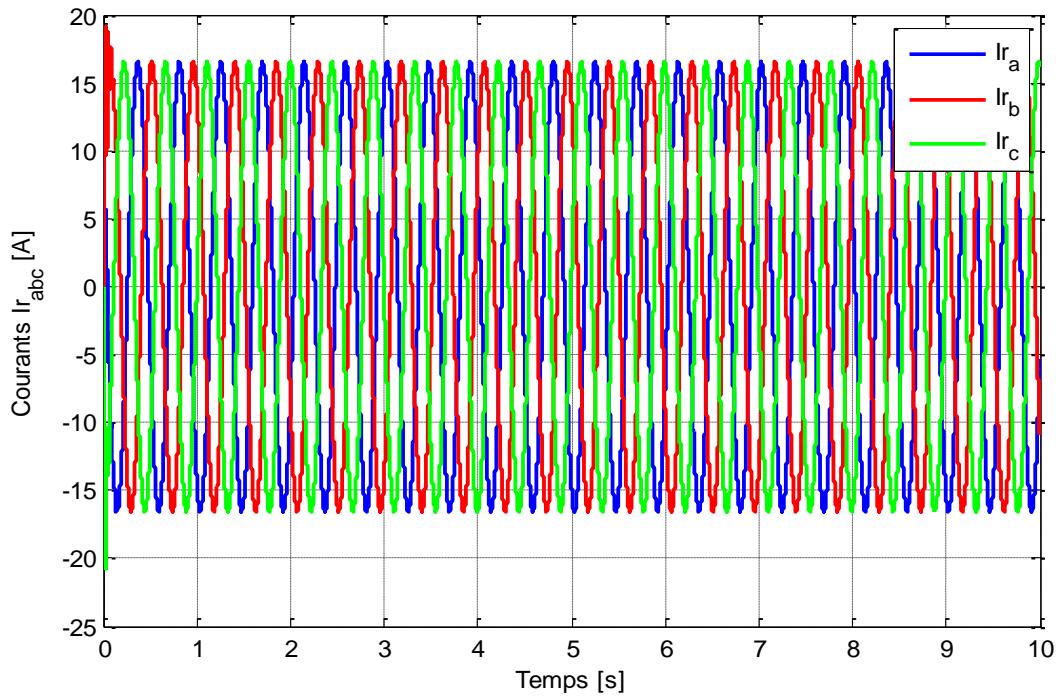


Figure II. 12 : Courant rotorique.

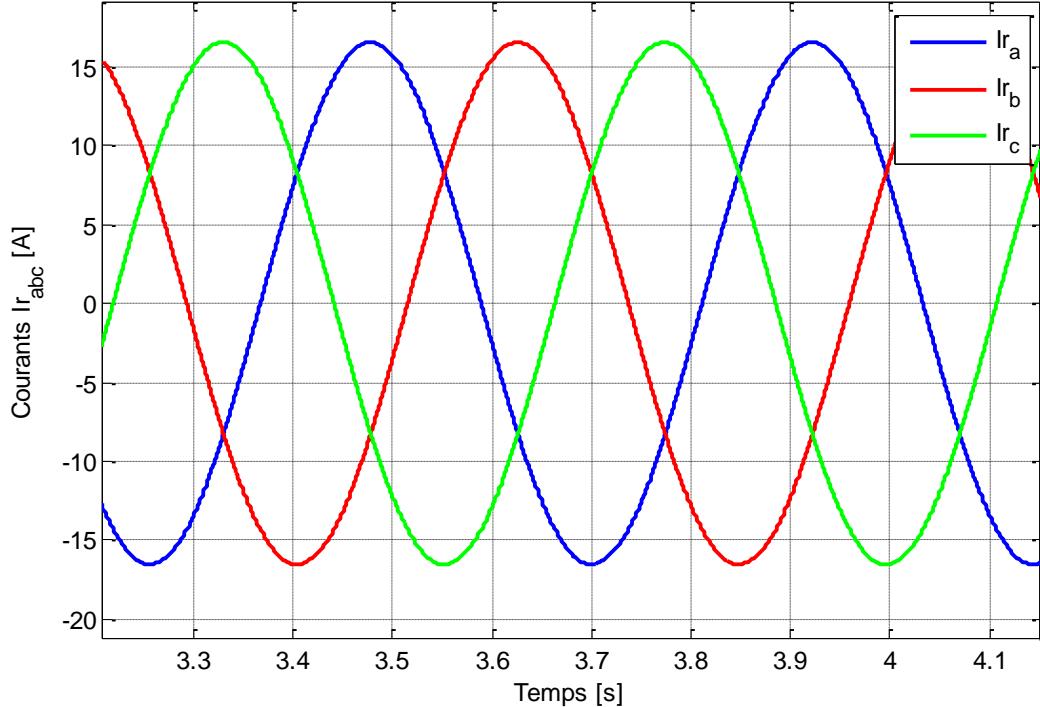


Figure II. 13 : Courant rotorique (zoom).

II.5.2 Interprétation des résultats de simulation

D'après ces résultats de simulation des différentes allures de la génératrice asynchrone à double alimentation entraînée par une vitesse fixe nous remarquons que courants statoriques et rotoriques sont stables.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à Partir de ses équations caractéristiques.

De même, nous avons présenté le modèle de la machine à l'aide de ses équations électriques et de flux dans le système d'axe dq lié au synchronisme. Ainsi que le modèle de l'alimentation de la machine coté rotor.

On connaît que le modèle de la MADA est fortement couplé, il est utile de trouver une méthode de commande permettant de rendre le contrôle de la puissance active et réactive indépendant en fonctionnement génératrice, que se fait l'objectif du prochain chapitre.

Chapitre III

Commande vectorielle de la GADA

III.1 Introduction

La GADA joue un rôle important dans les SCEEs et largement utilisée dans la production d'énergie électrique, en raison de sa possibilité de fonctionner dans une large plage de vitesse c'est-à-dire à vitesse variable, du faible coût du convertisseur, de la perte de puissance réduite et des capacités de puissances active et réactive à quatre quadrants [50].

La machine à courant continu à excitation séparée est considérée comme la référence dans le domaine des entraînements réglés à cause de son modèle linéaire. Cependant, les machines à courant alternatif ont des modèles non linéaires. La solution la plus utilisée est l'application d'une orientation convenable du repère de Park (d-q) pour réduire voir les non linéarités.

Nous traitons dans ce chapitre la commande indépendante des puissances active et réactive du stator à partir des grandeurs rotoriques (tension et courant). Dans cette optique, nous avons proposé une loi de commande pour la GADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [51].

III.2 Principe de la commande vectorielle de la GADA

L'objectif principal de la commande vectorielle des machines à courant alternatif est d'améliorer leur comportement statique et dynamique, grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu.

Il s'agira donc de retrouver la quadrature entre le courant et le flux, naturellement découplés pour une machine à courant continu (courant producteur de flux et le courant producteur de couple). Dans notre cas le découplage se fait entre la puissance active et réactive du stator.

En effet, le référentiel lié au champ tournant peut être orienté de telle sorte que l'axe d de ce référentiel coïncide avec un des flux de la machine (statorique, rotorique ou d'entrefer) [52].

La méthode du flux directionnel consiste à choisir un système d'axes (d, q), où l'un de ses axes sont alignés avec la direction de flux souhaitée et peuvent être rotor, stator

ou entrefer. Ce cadre nous permet d'avoir deux composantes directes et en quadrature, une Flux stator et autres courants rotoriques [53].

- L'orientation du flux rotorique suivant l'axe d :

$$Q_{rq} = \mathbf{0} \quad \rightarrow \quad Q_r = Q_{rd} \quad (\text{III.1})$$

- L'orientation du flux statorique suivant l'axe d :

$$Q_{sq} = \mathbf{0} \quad \rightarrow \quad Q_s = Q_{sd} \quad (\text{III.2})$$

- L'orientation du flux statorique suivant l'axe q :

$$Q_{sd} = \mathbf{0} \quad \rightarrow \quad Q_s = Q_{sq} \quad (\text{III.3})$$

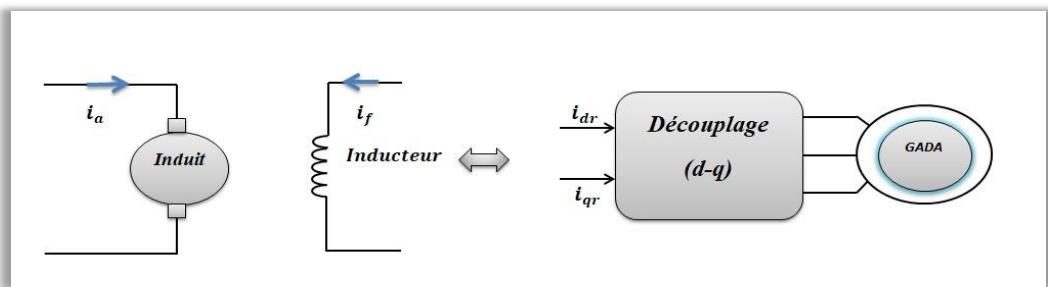


Figure III. 1: Principe de la commande vectorielle [53].

III.3 Orientation du flux statorique

Dans le cadre de ce travail, nous envisageons de construire une commande un vecteur passant par la direction du flux stator sur l'axe d.

Tout couple électromagnétique transitoire est exprimé en Étiquetez (d-q) comme le produit entre le flux du stator et le courant du rotor. Considérez le script suivant :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} \cdot (\varphi_{sq} \cdot i_{rd} - \varphi_{sd} \cdot i_{rq}) \quad (\text{III.4})$$

Notez que si nous éliminons le premier produit ($\varphi_{sq} \cdot i_{rd}$), Cette expression prend Couple du moteur à courant continu sous la forme de deux volume, couple et flux sont naturellement découplés à travers la structure. Pour obtenir dans le cas de moteurs asynchrones, il suffit d'orienter les repères (d-q) pour que annuler la composante en quadrature du flux stator, c'est-à-dire choisir régler correctement l'angle de rotation de Park afin que le flux du stator soit complètement focalisé sur l'axe direct d, imposant ainsi :

$$\varphi_{sq} = 0 \quad \text{et} \quad \varphi_s = \varphi_{sd}$$

L'expression du couple s'écrit alors :

$$C_{em} = -p \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} \cdot (\varphi_{sd} \cdot i_{rq}) \quad (\text{III.5})$$

Par conséquent, on peut voir que le couple électromagnétique ne dépend que des composants Orthogonalité du courant rotorique i_{rq} et couplage entre deux axes directs d Et en quadrature q est éliminé. Dans un châssis triphasé (ABC), les tensions sur les phases du stator i sont exprimées par Relation générale :

$$v_{si} = R_s \cdot i_{si} + \frac{d\varphi_{si}}{dt} \quad (\text{III.6})$$

$i=1, 2, 3$

En négligeant la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui correspond à une hypothèse réaliste par rapport aux pertes pour le cas des machines de moyenne et forte puissance généralement employées dans le domaine des la conversion de l'énergie éolienne, cette relation peut être réécrite sous la forme [54] :

$$v_{si} = \frac{d\varphi_{si}}{dt} \quad (\text{III.7})$$

Cette dernière relation montre qu'un repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que vecteur tension statorique et qu'il est en avance de $\frac{\pi}{2}$ sur ce même vecteur.

En supposant que les tensions du réseau électrique sont stables, le flux statorique sera lui aussi constant. On peut alors écrire dans l'hypothèse d'un flux statorique constant :

$$\begin{cases} v_{sd} = 0 \\ v_{sq} = v_s = w_s \cdot \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

La figure III.2 illustre le principe de l'orientation du flux statorique.

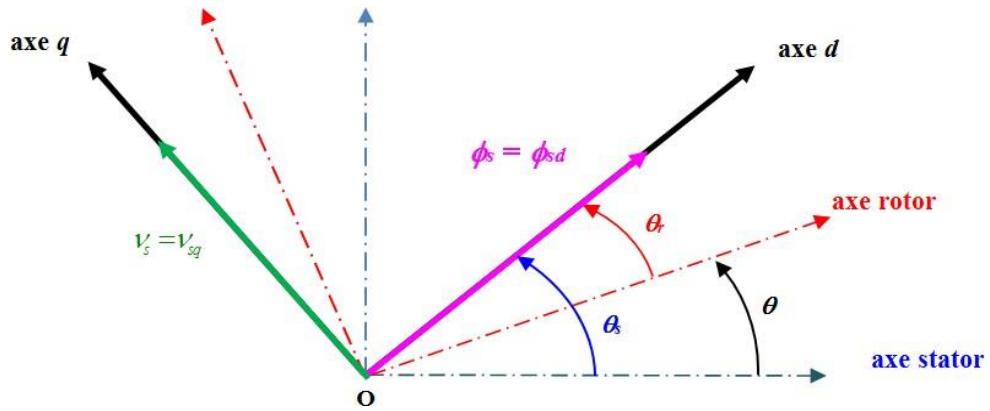


Figure III. 2 : Principe de la commande vectorielle par orientation du flux statorique.

III.3.1 Relation entre les courants statoriques et rotoriques

En reprenant les équations (II.28) du modèle dynamique de la MADA définit précédemment, et en tenant compte de la relation (III.2), le système suivant est obtenu :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M_{sr} \cdot i_{rd} \\ 0 = L_s \cdot i_{sq} + M_{sr} \cdot i_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

A partir des équations des composantes directes et quadratures du flux statorique on obtient les relations liant les courants statoriques à ceux du rotor :

$$i_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M_{sr}}{L_s} \cdot i_{rd} \quad (\text{III.10})$$

$$i_{sq} = -\frac{M_{sr}}{L_s} \cdot i_{rq} \quad (\text{III.11})$$

III.3.2 Relation entre les puissances statoriques et courants rotoriques

En remplaçant i_{sd} et i_{sq} par leurs expressions (III.10) et (III.11) et sachant que $v_{sd}=0$, les puissances active et réactive statoriques sont exprimées par les relations :

$$\begin{cases} P_s = -v_s \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} \cdot i_{rq} \\ Q_s = -v_s \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} \cdot i_{rd} + v_s \cdot \frac{\varphi_s}{L_s} = -v_s \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} \cdot i_{rd} + \frac{v_s^2}{w_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

III.3.3 Relation entre tension rotorique et courant rotorique

Reprendons les équations (II.27), et les courants statoriques par leurs valeurs dans les équations (III.10) et (III.11), nous obtenons le système suivant :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) \cdot i_{rd} + \frac{M_{sr} \cdot v_s}{w_s \cdot L_s} \\ \varphi_{rq} = \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) \cdot i_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

En injectant ces équations dans les expressions des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2 sr}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{rd}}{dt} - w_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2 sr}{L_s} \right) \cdot i_{rq} \\ v_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2 sr}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{rq}}{dt} + w_r \cdot \left(L_r - \frac{M^2 sr}{L_s} \right) \cdot i_{rd} + w_r \cdot \frac{M_{sr} \cdot v_s}{w_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Où ω est le glissement de la machine asynchrone et la pulsation rotorique : $w_r = g \cdot w_s$.

Les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent en régime permanent, alors les relations donnant les tensions rotoriques deviennent :

$$\begin{cases} v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} - w_r \left(L_r - \frac{M^2 sr}{L_s} \right) \cdot i_{rq} \\ v_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + w_r \left(L_r - \frac{M^2 sr}{L_s} \right) \cdot i_{rd} + w_r \cdot \frac{M_{sr} \cdot v_s}{w_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

III.4 Commande vectorielle directe

La première approche consiste à ignorer le terme de couplage et à établir un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler la puissance indépendamment actif et passif. Cette approche sera qualifiée d'approche directe parce que l'organisme de réglementation La puissance contrôle directement la tension du rotor du générateur [55]. Cette méthode présente des inconvénients au niveau de la fiabilité de la mesure tel que le problème de filtrage du signal mesuré, la mesure varie en fonction de la température, le coût de production est élevée, (Capteurs, conditionneurs, filtre,...).

III.4.1 Commande vectorielle directe en puissance active et réactive de la GADA

Bien que la dynamique du système éolien soit faible par rapport à celle de la génératrice, nous pouvons proposer le schéma de principe suivant (figure III.3).

Dans ce schéma nous avons utilisé des régulateurs Proportionnel-Intégral (PI) en raison de leur performance et de leur rapidité de calcul. Leur tâche est non seulement de comparer les valeurs réelles mesurées avec les valeurs de référence, mais aussi de stabiliser le système à réguler [56,57].

Pour simplifier la commande de la GADA, nous considérons que la tension du réseau est stable, ce qui nous permet d'utiliser une seule boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant [58,59].

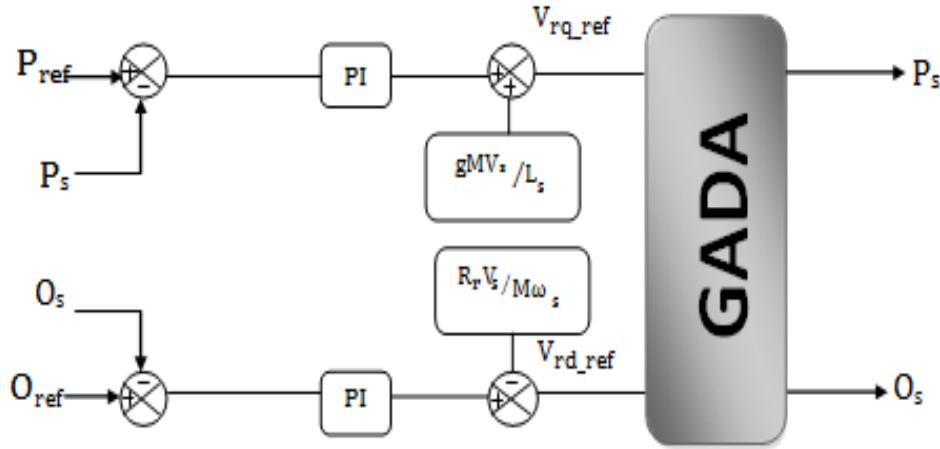


Figure III. 3: Schéma de principe de la commande vectorielle directe.

III.5 Commande indirecte

La deuxième approche consiste à considérer le terme de couplage et la compensation se fait par la mise en place d'un système de deux boucles, permettant le contrôle puissance et courant rotorique. Cette méthode est appelée méthode indirecte [55].

III.5.1 Commande indirecte en puissance active et réactive de la GADA

III.5.1.1 Commande en boucle fermée

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau de la sortie du régulateur Courant du rotor avec rétroaction du système. Cela permet de régler la puissance, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} et les puissances Q_s et P_s en boucle fermée. Le schéma simplifié de l'ensemble commande est illustré sur la figure :

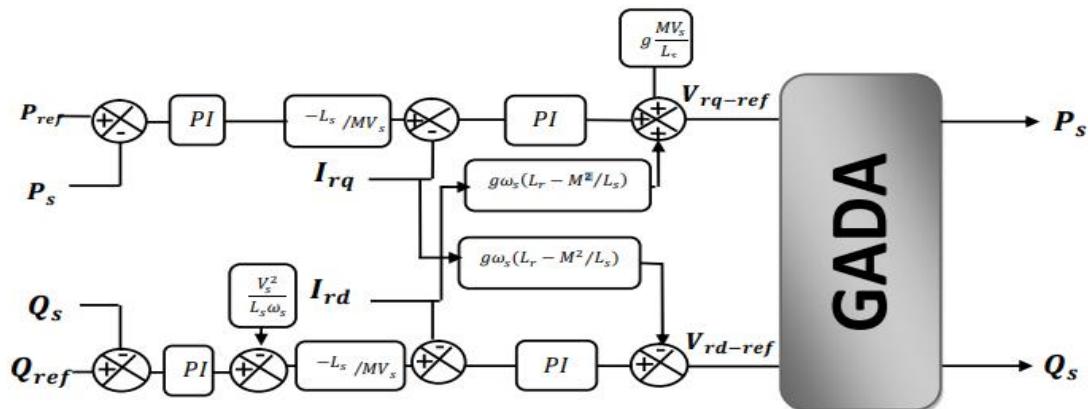


Figure III. 4: Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé

III.6 Type des régulateurs

Les régulateurs PI utilisés pour le réglage des puissances active et réactive et des courants I_{rd} et I_{rq} offrent plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en œuvre ainsi qu'ils offrent des performances acceptables à la régulation du système considéré [60]. Les régulateurs de chaque axe ont pour rôle d'annuler l'écart entre les puissances actives et réactives de références et la puissance active et réactive mesurée.

III.6.1 Système régulé par un régulateur PI

Le schéma de la figure (III.5) montre une partie de notre système bouclé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{k_i}{p}$. Correspondant aux deux régulateurs utilisés .

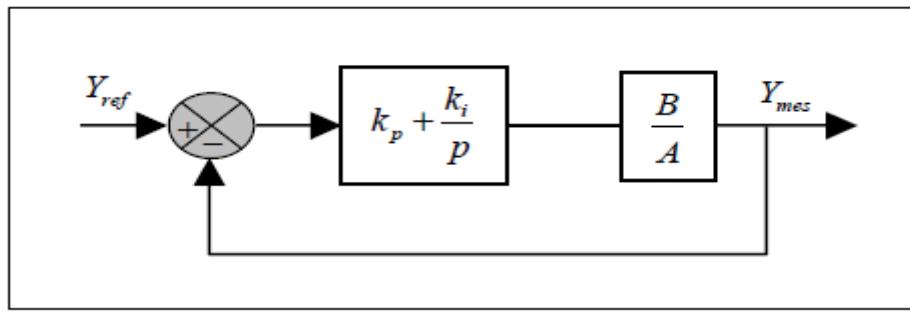


Figure III. 5 : Schéma bloc de régulateur PI.

$$FTBO = \frac{P + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \cdot \frac{\frac{M \cdot V_s}{L \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p + \frac{L_s R_s}{L_s \left(\frac{-M^2}{L_s} \right)}} \quad (III.16)$$

$$FTBO = \frac{K_p \frac{M \cdot V_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{P} \quad (III.17)$$

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (III.18)$$

$$FTBF = \frac{1}{1 + P_{tr}} \quad (III.19)$$

$$Avec : tr = \frac{1}{k_p} \cdot \frac{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M \cdot V_s} \quad (III.20)$$

$$k_p = \frac{1}{0.001} \cdot \frac{L_s L_r - M^2}{M \cdot V_s} = 0 * 4.0808 \cdot 10^{-4} s^{-1}$$

$$k_i = \frac{1}{0.001} \cdot \frac{L_s R_r}{M \cdot V_s} = -0.4 s^{-1}$$

III.7 Simulation de la commande vectorielle

A l'aide de logiciel MATLAB, Les résultats obtenus par simulation, utilisé avec le modèle de la génératrices asynchrone à double alimentation, avec application d'une puissance active $P_s = 2\text{KW}$, et une puissance réactive $Q_s = 0$. Afin d'analyser les performances de la stratégie de commande vectorielle directe et indirecte, nous allons effectuer un essai à vitesse fixe.

➤ Essai à vitesse fixe

Afin de tester la poursuite de la GADA, ce premier essai consiste à appliquer aux entrées de référence des échelons de puissance active et réactive d'amplitudes variables, alors que la machine est entraînée à vitesse fixe de 150 rad/s.

❖ La commande directe :

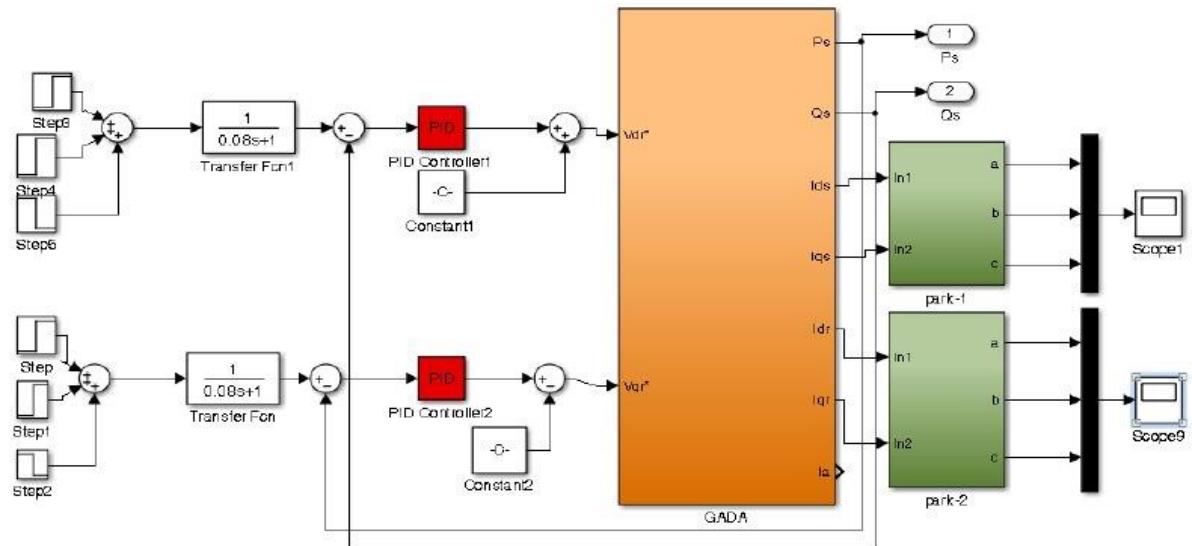


Figure III. 6 : Schéma bloc de la commande vectorielle directe de la GADA

❖ La commande indirecte :

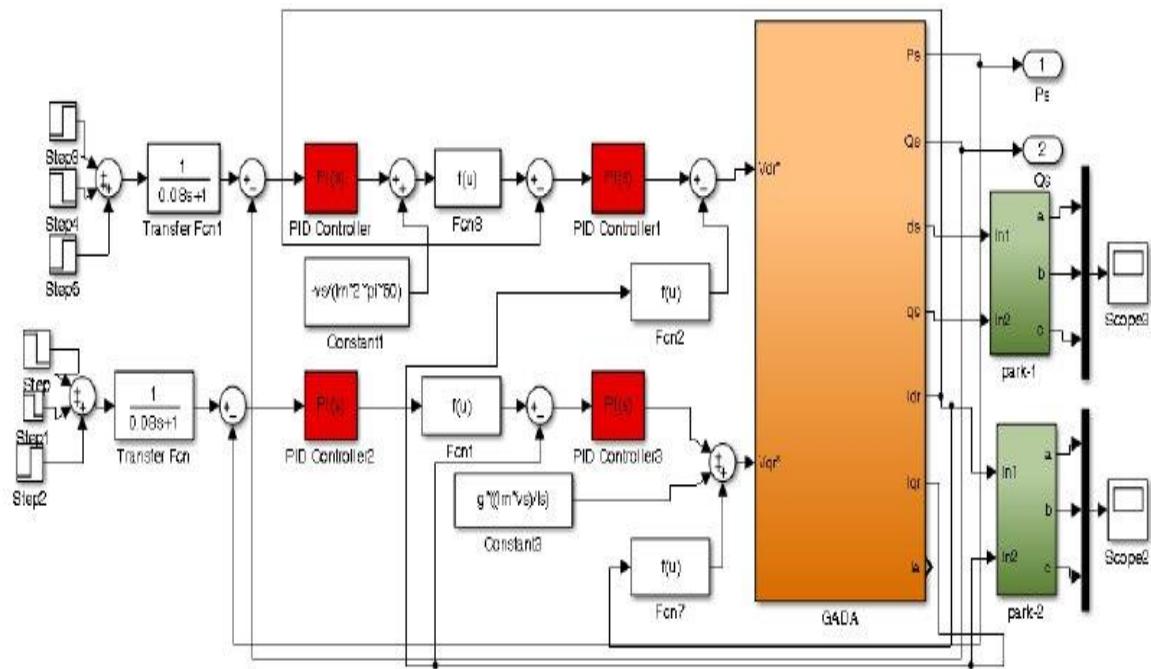


Figure III. 7 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte de la GADA.

III.7.1 Les résultats de simulation de la commande directe et indirecte (vitesse fixe)

➤ **Commande direct :**

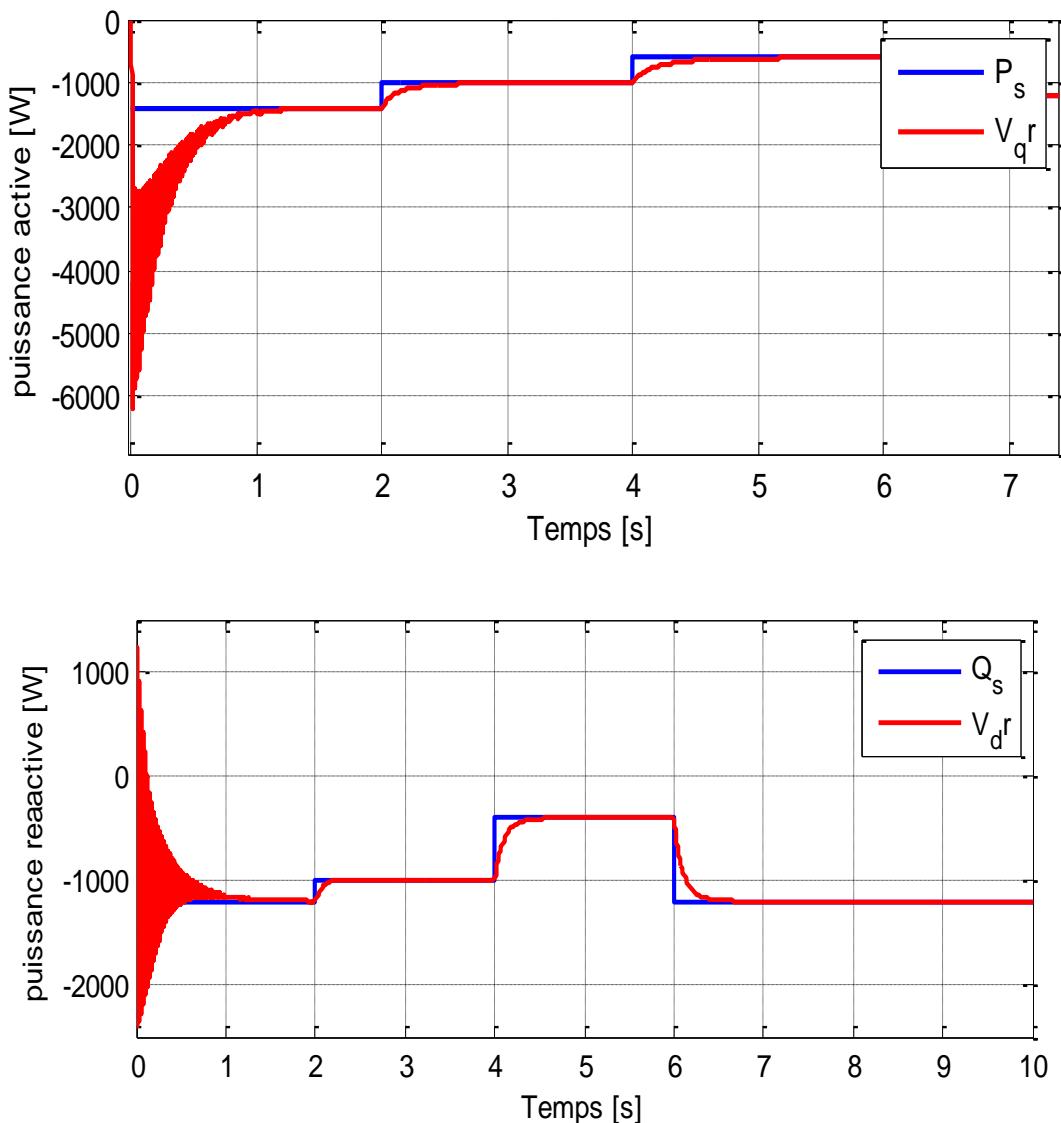


Figure III. 8 : Puissance active et réactive statorique avec la commande directe.

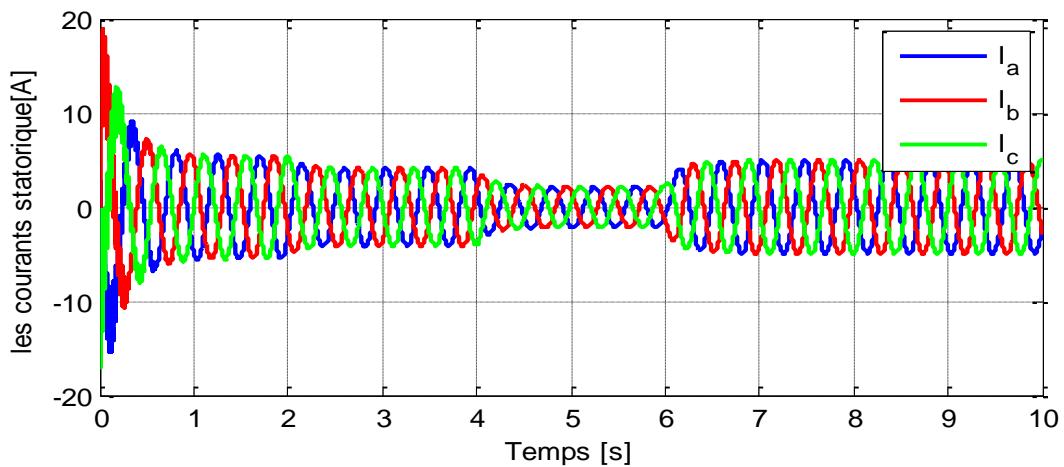


Figure III. 9 : Courant statorique .

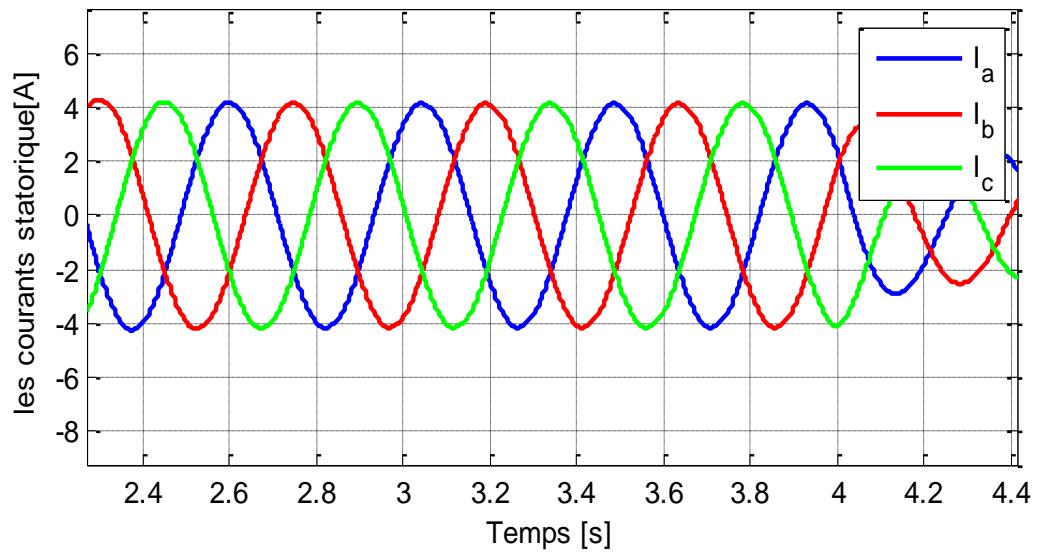


Figure III. 10 : Courant statorique (zoom).

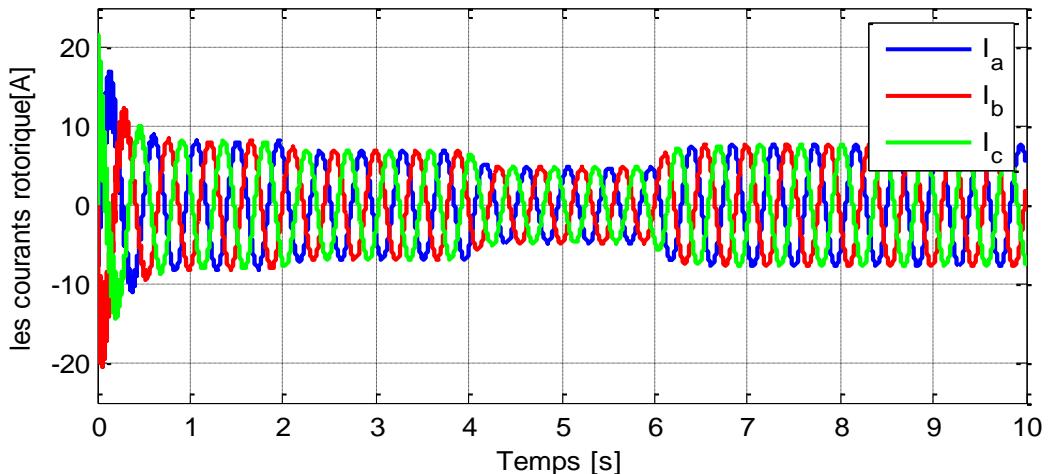


Figure III. 11 : Courant rotorique.

➤ **Commande indirecte :**

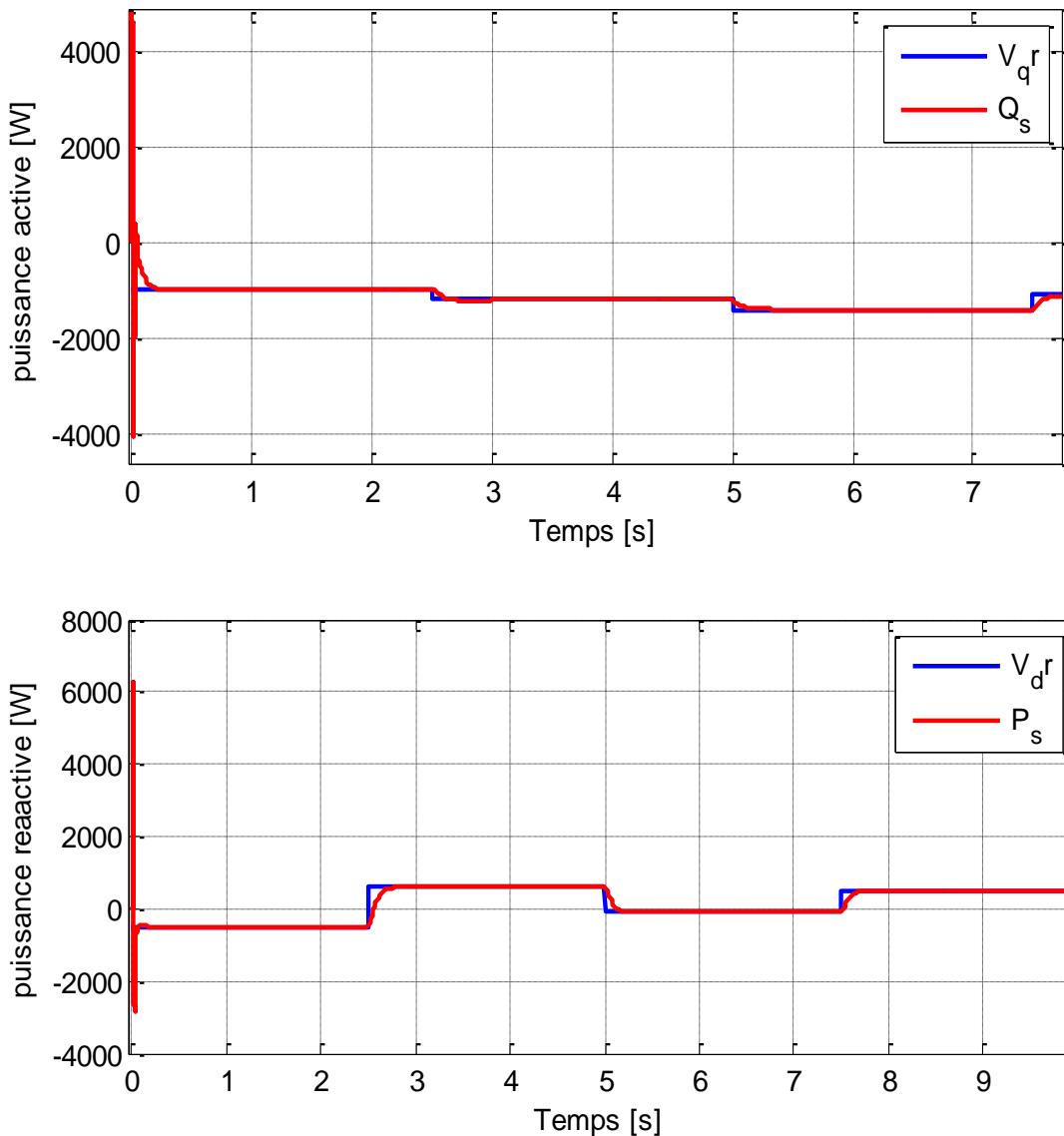


Figure III. 12 : Suivi de consigne de puissance active et réactive statorique avec la commande indirecte.

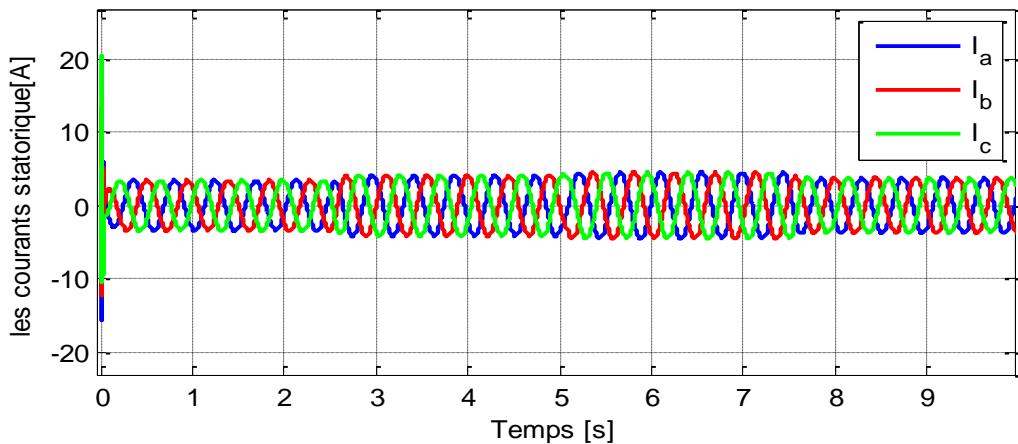


Figure III. 13 : Courant statorique.

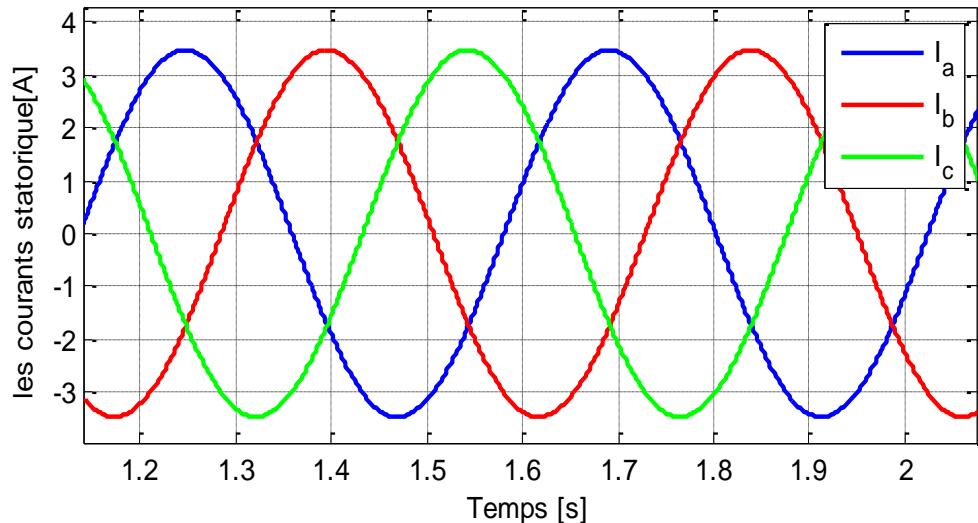


Figure III. 14 : Courant statorique (zoom).

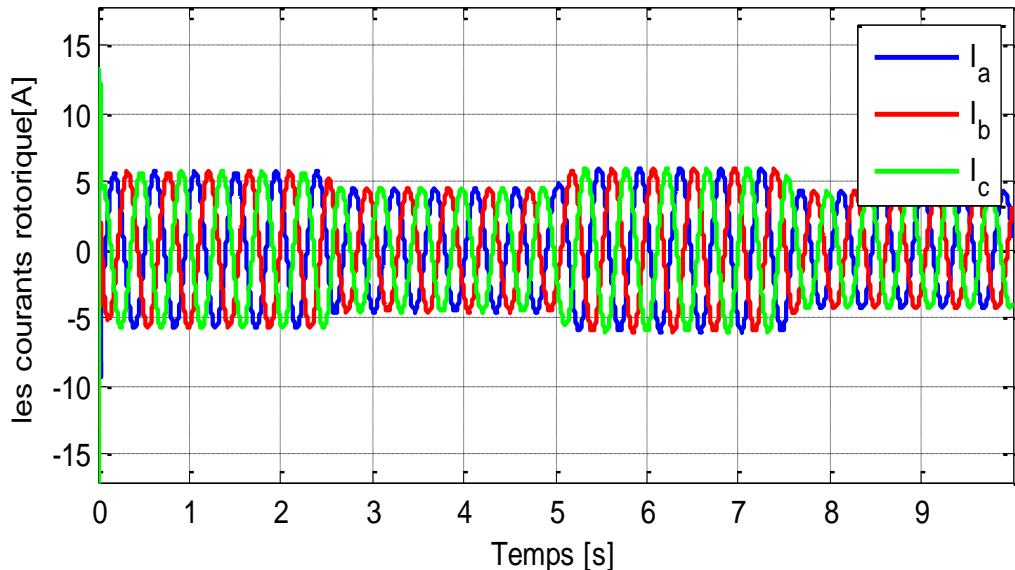


Figure III. 15 : Courant rotorique.

III.7.2 Interprétation des résultats

Pour évaluer les performances de la commande vectorielle directe et indirecte du GADA, nous avons effectués des simulations numériques sous les conditions suivantes :

- Application d'un échelon de puissance active statorique référence égale à -1500, -1000, -500 w aux instants t=0s, t=2s, t=4s respectivement.
- Application d'un échelon de puissance réactive statorique référence égale à -1250, -1000, -500 et -1250 w aux instants t=0s, t=2s, t=4s et t=6s respectivement.

Les figures montrent une comparaison de réglage des puissances active et réactivé statorique par la méthode vectorielle directe et indirecte. Observant les résultats de la simulation : les figures (III.7) et (III.12) montrent que le réglage par un régulateur PI dans les commandes vectorielles directe et indirecte donne des résultats satisfaisants : La puissance active et réactivé statorique suit les valeurs de référence désirée précisément. Le courant est bien limité à sa valeur admissible (figures III.8 et III.13). On remarque que la réaction du régulateur PI de la commande indirecte dans le régime transitoire est plus performante que la commande directe (présence des oscillations).

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la commande vectorielle par orientation du flux statorique d'une GADA qui nous a permis de simplifier notre modèle mathématique.

La commande des puissances actives et réactives injectées au réseau a été présentée par deux méthodes : directe et indirecte. Nous avons présenté aussi, les schémas bloc de chaque commande ainsi que la démarche pour la synthèse des correcteurs PI.

Enfin, nous avons montré plusieurs résultats de simulation réalisés sous MATLAB/SIMULINK d'une éolienne de 2 kW. Ces résultats, montrent que la commande directe règle mieux les puissances mais la commande indirecte offre une meilleure dynamique.

Chapitre IV

Commande par logique floue de la GADA

IV.1 Introduction

La logique floue, ou plus généralement le traitement des incertitudes, est l'une des classes de l'intelligence artificielle. Elle a pour objet l'étude et la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché. Elle a été connue en première lieu comme une branche mathématique complémentaire à la théorie de la logique classique, puis elle a trouvé sa place parmi les techniques de commande basées sur l'intelligence artificielle. Elle a été conçue au milieu des années soixante à l'université de **BERKLEY** en Californie par le professeur **Lotfi ZADEH** qui a introduit la notion des variables linguistiques et des ensembles flous. La première application expérimentale de cette technique de commande est celle réalisée par **MAMDANI**.

Cette nouvelle théorie a été appliquée initialement dans des domaines non techniques, tel que le commerce ou la médecine, dans le but de compléter les systèmes experts. Les premières applications de la logique floue au niveau des systèmes de réglage ne parurent que dès 1975. Ce sont les Japonais qui commencent à l'utiliser dans des produits industriels pour résoudre les problèmes de réglage et de commande, et récemment en Europe, une intense activité de recherche a été introduite afin d'exploiter ce principe de réglage [61].

Dans le cadre de ce travail, on présentera dans ce quatrième chapitre un aperçu général sur l'historique, le domaine d'application et la théorie de la logique floue et ses principes de base. Ensuite, on montrera la description de la commande par logique floue avec ses différentes étapes de fuzzification, inférence et défuzzification, et on appliquera cette commande pour le réglage de vitesse du système éolien, à base de la MADA permettant une poursuite du point à maximum de puissance. Les résultats de simulation seront aussi présentés afin de montrer le degré d'amélioration du comportement dynamique du système.

IV.2 Historique

Les origines de la logique floue se trouvent dans le principe de l'incertitude de Heisenberg. Dans les années 20, les physiciens ont introduit la troisième valeur $\frac{1}{2}$ dans le système logique bivalent $\{0, 1\}$. Au début des années 30, le logicien polonais Jan Lukasiewicz a développé le système logique avec trois valeurs [61].

Il a fallu attendre 1965, pour que le concept des sous-ensembles flous soit proposé par Lotfi Zadeh, automatien de réputation internationale, qui a contribué à la

modélisation de phénomènes sous forme floue, en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle. Il publia un article intitulé (Fuzzy sets) ou (Ensembles flous). [62]. En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, ce qui introduisait la commande floue dans la régulation des processus industriels. Plusieurs applications ont alors vu le jour en Europe, pour des systèmes parfois très complexes, telle que la régulation de fours de cimenterie réalisée par la société Smidt-Fuller en 1978. C'est la première véritable application industrielle de la logique floue. Grâce au chercheur japonais Sugeno, la logique floue était introduite au Japon dès 1985. Les sociétés japonaises compriront l'avantage à la fois technique et commercial de la logique floue [63,64].

Freinée par la réticence à appréhender un nouveau concept et par des difficultés de réalisation pratique, la logique floue ne débouche réellement qu'en 1990 avec l'apparition de produits et de systèmes utilisant cette technique. Et en 1995 grâce à Jang, l'application de la logique floue s'élargit aux systèmes à réseaux de neurones et à l'intelligence artificielle. Aujourd'hui, la logique floue est arrivée à maturité et utilisée dans de nombreuses applications industrielles et gestionnaires. Sa mise en œuvre est maintenant facilitée par la disponibilité de microprocesseurs dédiés et d'outils puissants de développement [57,65].

IV.3 Domaines d'application

L'approche de traitement des problèmes par la logique floue est différente de celle adoptée, à priori dans une démarche scientifique.

Elle est beaucoup plus pragmatique que déterministe. La décision en logique floue est basée sur la notion d'expertise qui permet de quantifier le flou à partir de connaissance à priori ou acquise antérieurement.

Les domaines d'application de la logique floue dans un processus de prise de décision s'imposent dans les cas suivants [63, 66,67] :

- pour les systèmes complexes dans lesquels la modélisation est difficile voire impossible
- pour les systèmes contrôlés par des experts humains
- quand l'observation humaine est à l'origine d'entrées ou de règles de contrôle du système
- pour les systèmes ayant de nombreuses entrées / sorties continues ou discontinues ;
- pour les systèmes ayant des réponses non linéaires.

IV.4 Bases de la logique floue

IV.4.1 Principe de base de la logique floue

Dans la théorie des ensembles conventionnels, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble, donc le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble ne peut être que nul ou égal à l'unité.

Par contre dans la théorie des ensembles flous, un élément peut plus ou moins appartenir à un ensemble, le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble flou peut prendre n'importe quelle valeur comprise dans l'intervalle [0,1].

Ce qui différentie les deux théories provient des limites des ensembles définis. Dans la théorie classique les contours des ensembles sont « nets », tandis que pour les ensembles flous les contours sont graduels, ou encore flous comme l'illustre la figure (3.1) [68].

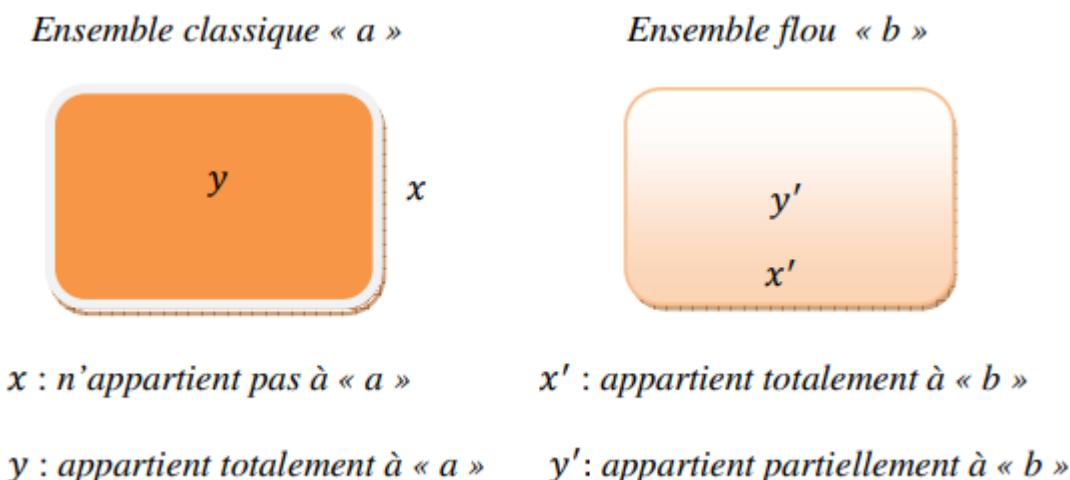


Figure IV. 1: Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou.

A ce titre, on associe aux ensembles classiques la logique binaire dite encore booléenne, et aux ensembles flous la logique floue. Ces deux logiques ne s'opposent pas, au contraire il apparaît, que la logique floue est une extension de la logique binaire pour laquelle les niveaux de vérité (degrés d'appartenance que l'on note μ , au lieu d'être vrai ou faux peuvent prendre des valeurs comprise entre 0 et 1).

On se propose de classifier des vitesses en fonction de leurs valeurs en définissant trois catégories (voir figure IV.2) :

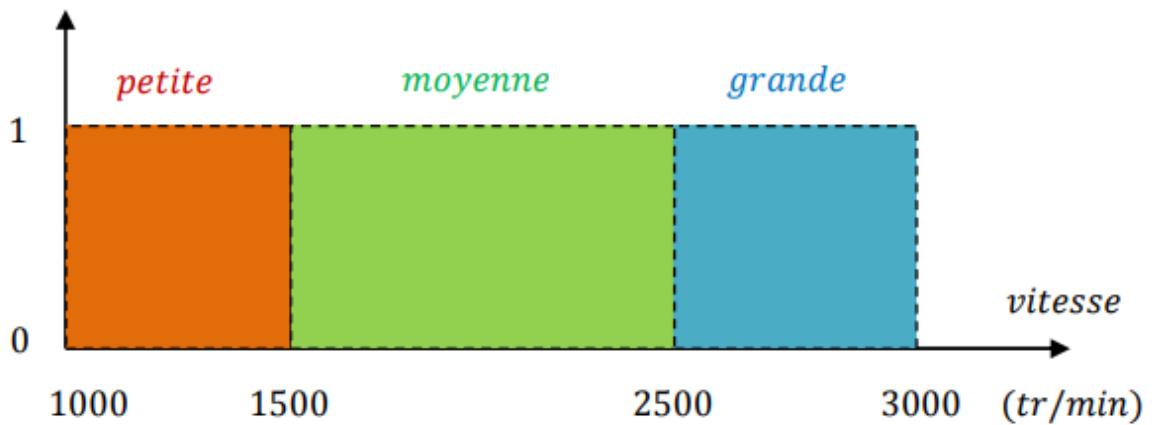


Figure IV. 2 : Représentation des variables binaires.

On constate que cette façon utilisée pour séparer les intervalles des vitesses est très éloigné de ce que fait l'être humain lorsqu'il analyse ce genre de situation. En effet, l'homme ne fait pas une distinction franche entre « petite » et « moyenne » par exemple. Il utilise des expressions telles que « plutôt petite » pour une vitesse légèrement inférieure à 1500(*tr/min*) et « plutôt moyenne » pour une vitesse juste supérieure à cette valeur. Donc la logique classique présente bien l'avantage de la simplicité, mais elle est relativement éloignée de la logique utilisée par l'être humain.

Représentons le même problème à l'aide de la logique floue. Les variables ne sont plus de nature binaire mais peuvent prendre une infinité de valeurs possibles entre (0) et (1). La figure (IV.3) représente la classification considérée selon le principe de la logique floue.

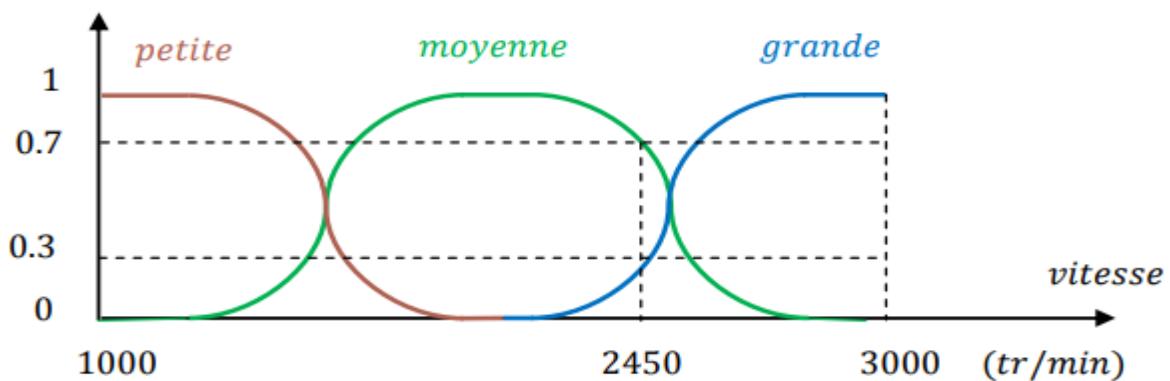


Figure IV. 3 : Représentation des variables floues.

Ce type de figure est appelé fonction d'appartenance, elle montre que les limites entre les trois catégories ne varient pas brusquement, mais illustre la gradualité introduite par la

logique floue. Par exemple une vitesse de 2450 (tr/min) appartient à l'ensemble « grande » avec un degré de 0.3 et à l'ensemble « moyenne » avec un degré de 0.7.

La fonction d'appartenance est désignée par $\mu_E(x)$. L'argument x se rapporte à la variable linguistique, tandis que l'indice ϵ indique l'ensemble concerné.

IV.4.2 Univers de discours

L'univers de discours est l'ensemble des valeurs réelles que peut prendre la variable floue x et $\mu_A(x)$ est le degré d'appartenance de l'élément x à l'ensemble flou A.

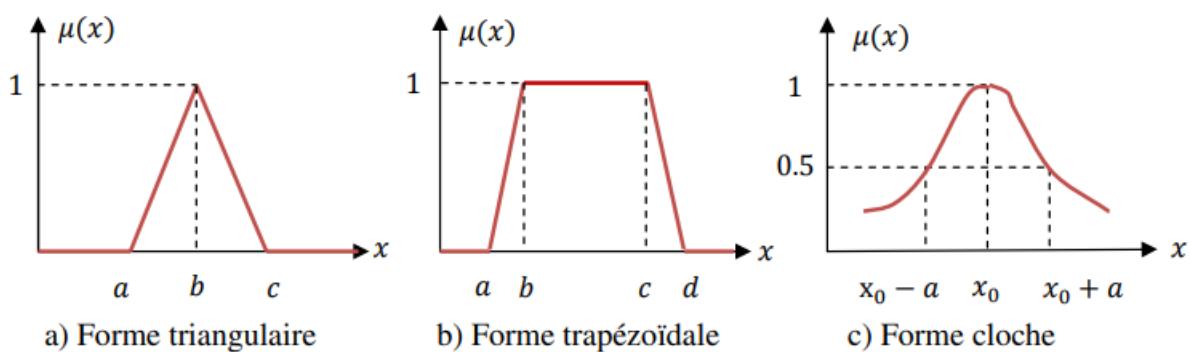
Le domaine de définition de $\mu_A(x)$ peut être réduit à un sous ensemble de l'univers de discours. On peut ainsi avoir plusieurs fonctions d'appartenance, chacune caractérisant un sous-ensemble flou. C'est par l'association de tous les sous-ensembles flous de l'univers de discours que l'on obtient l'ensemble flou de la variable floue x [69].

IV.4.3 Différentes formes des fonctions d'appartenance

Afin de pouvoir traiter numériquement les variables linguistiques, il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables aux différents sous-ensembles

Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme, mais en général, les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont définies par des formes géométriques ou des fonctions, on cite les suivantes [70] : Les fonctions d'appartenance sont le plus souvent représentées par les fonctions triangulaire et trapézoïdale, donc par des segments de droite, les fonctions sont alors dites linéaires par morceaux.

Dans la plupart des cas, et en particulier pour le réglage par la logique floue, ces deux formes sont suffisantes pour délimiter des ensembles flous.



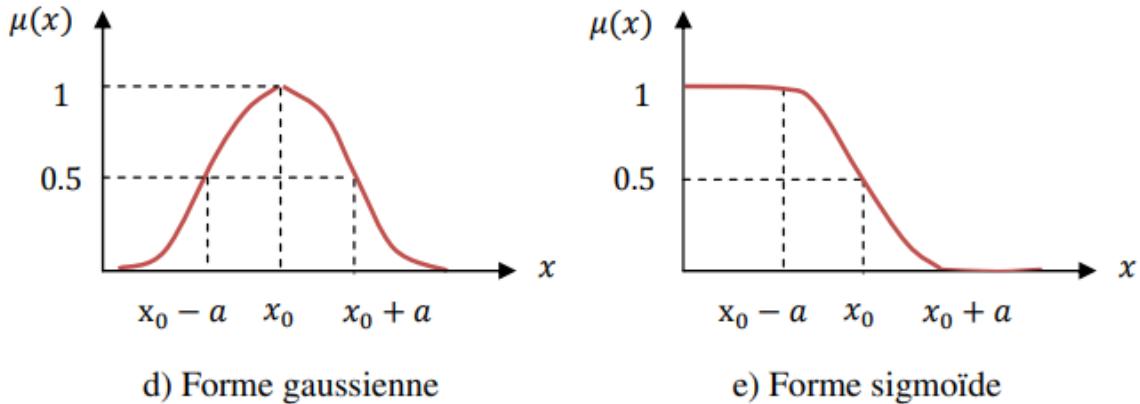


Figure IV. 4 : Formes usuelles des fonctions d'appartenance.

IV.5 Structure d'un système de commande floue

La logique floue est principalement utilisée dans les domaines de prise de décision, de reconnaissance des formes, de modélisation et de commande des procédés. La commande ou la régulation des systèmes est le domaine industriel de la logique floue le plus exploité. On distingue trois structures majeures de régulateurs à logique floue (RLF) :

- La structure pure ;
 - La structure de Takagi-Sugeno-Kang (TSK) ;
 - La structure de Mamdani ou le modèle « fuzzification - defuzzification ».

Dans la structure pure les variables d'entrée et de sortie du RLF sont des variables floues ou linguistiques. Ceci constitue un handicap étant donné que les entrées et les sorties des régulateurs des systèmes réels sont des variables réelles ou numériques.

La structure TSK résout ce problème par une simple transformation des variables linguistiques en variables réelles. L'inconvénient de cette structure est que le conséquent de chaque règle soit une formule mathématique.

La structure de Mamdani a proposé une interface de défuzzification (défuzzificateur) à la sortie de la structure pure. Le fuzzificateur transforme les variables réelles d'entrée en variables linguistiques floues, tandis que le défuzzificateur effectue l'opération inverse. La structure de Mamdani est devenue le modèle standard du RLF le plus utilisé dans la régulation des systèmes.

Le schéma synoptique général d'un contrôleur flou est représenté dans la Fig. IV.5 [71].

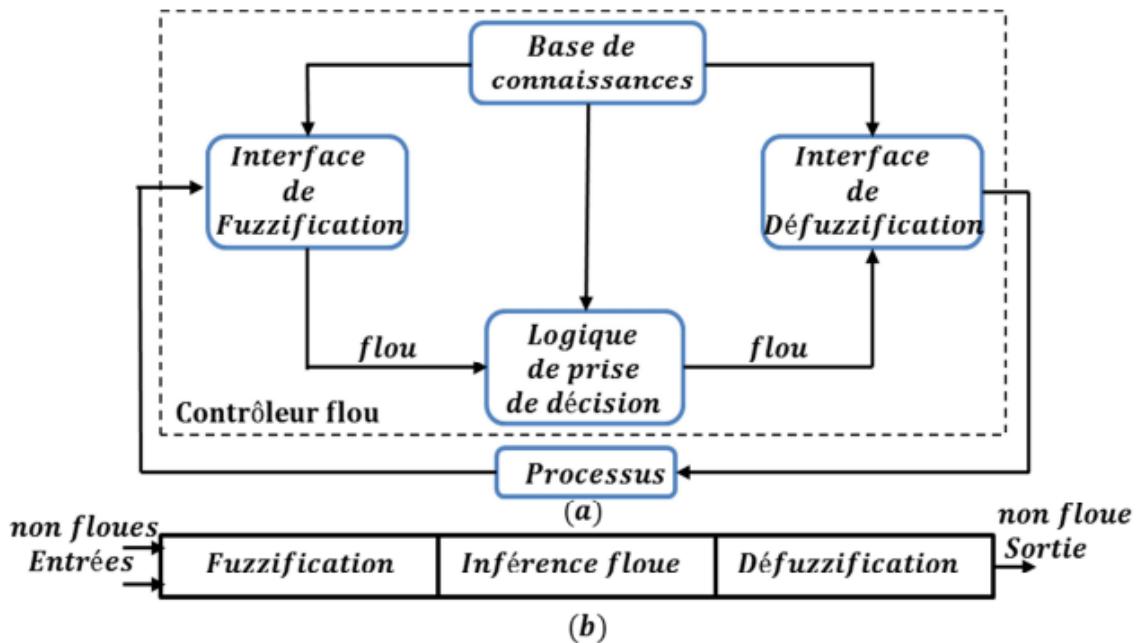


Figure IV. 5 : a) Schéma synoptique d'un contrôleur flou, b) Configuration d'un contrôleur flou.

Comme le système à commander ne reçoit que des valeurs déterministes (non floues), un RLF devrait convertir les valeurs déterministes à son entrée en valeurs floues, les traiter avec les règles floues et reconvertis le signal de commande de valeurs floues en valeurs déterministes pour appliquer au procédé. Les rôles de chaque bloc peuvent être résumés comme suit [72] :

IV.5.1 Interface de fuzzification

La fuzzification est l'opération de projection des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables [63]. Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes :

- Définition des fonctions d'appartenance de toutes les variables d'entrées.
- Transformation des grandeurs physiques (réelles ou numériques) à des grandeurs linguistiques ou floues.
- Représentation d'échelle transférant la plage des variables d'entrées aux univers de discours correspondants :

Pour les fonctions d'appartenance, on utilise généralement les formes triangulaires.

IV.5.2 Base de connaissance

Le bloc base de connaissance comporte une connaissance dans le domaine d'application et le résultat de commande prévu. Il consiste en « base de données » et en « base de règles linguistiques (floues) de commande » :

- La base de données des définitions qui sont nécessaires pour établir les règles de commande et manipuler les données floues dans un RLF.
- La base de règles représente la stratégie de commande et le but désiré par le biais des règles de commande linguistiques.

IV.5.3 Inférence floue

Le bloc inférence est le cœur d'un RLF, il possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire les actions de commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence dans la logique floue. Le traitement numérique des règles d'inférence qui permet d'obtenir la sortie linguistique ou floue du régulateur se fait par différentes méthodes, on cite principalement:

- la méthode d'inférence max-min ;
- la méthode d'inférence max-produit ;
- la méthode d'inférence somme-produit.

Chacune de ces trois méthodes utilise un traitement numérique propre des opérateurs flous [73].

IV.5.4 Interface de défuzzification

La défuzzification est la dernière étape dans la commande floue. Elle consiste à transformer les informations floues établies par le mécanisme d'inférence en une grandeur physique ou numérique pour définir la loi de commande du processus. La méthode de défuzzification choisie est souvent liée à la puissance de calcul du système flou [58]. Parmi les plus couramment utilisées, on cite :

- ❖ Méthode de Maximum : cette méthode génère une commande qui représente l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence floue. Cette méthode est simple, rapide et facile, mais présente certains inconvénients lorsqu'il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale et ne tient pas compte de l'effet de toutes les règles ;
- ❖ Méthode de la moyenne des maximums : cette méthode génère une commande qui représente la valeur moyenne de tous les maximums, dans le cas où il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale ;
- ❖ Méthode du centre de gravité : cette méthode génère une commande égale à l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence floue. Cette abscisse de centre de gravité peut être déterminée à l'aide de la relation générale suivante [69] :

$$x_{Gr} = \frac{\int x_r \mu_{RES}(x_r) dx_r}{\int \mu_{RES}(x_r) dx_r} \quad (\text{IV.1})$$

Parmi les avantages et les inconvénients de la commande par la logique floue, on cite [74-77] :

- La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et de désavantages. Les avantages essentiels sont :
- Le non nécessité d'une modélisation mathématique rigoureuse du processus ;
- La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus ;
- La maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non-linéaire et difficile à modéliser) ;
- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynastiques (régulateur non linéaire) ;
- L'emploi possible aussi pour des processus rapides (grâce à des processeurs dédicacés) ;
- La disponibilité des systèmes de développement efficaces, soit pour microprocesseurs ou PC (solution logicielle). soit pour circuits intégrés (processeurs dédicacée, Fuzzy processor, solution matérielle).

Par contre, les désavantages sont :

- La possibilité d'apparition de cycles limites à cause du fonctionnement non linéaire ;
- La précision du réglage souvent peu élevée ;
- La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).
- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la Fuzzification, des inférences et de Défuzzification) ;
- L'approche artisanale et non systématique (implémentation des connaissances de l'opérateur souvent difficile) ;
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité(en l'absence d'un modèle valable) ;

La base des règles représente la stratégie de commande et le but désiré par le biais des règles de commande linguistiques [78]. Elle permet de déterminer la décision ou l'action à

la sortie du contrôleur flou et exprimer qualitativement la relation qui existe entre les variables d'entrées et la variable de sortie. A partir de l'étude du comportement du système, nous pouvons établir les règles de commande, qui relient la sortie avec les entrées. Comme nous l'avons mentionné, chacune des deux entrées linguistiques du contrôleur flou possède cinq ensembles flous, ce qui donne un ensemble de vingt-cinq règles. Celles-ci peuvent être représentées par la matrice d'inférence suivante :

Tableau IV.1 : Matrice d'inférence des règles floues.

E ΔE	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	NG	NG	NP	NP	ZE
NP	NG	NP	NP	ZE	PP
ZE	NP	NP	ZE	PP	PP
PP	NP	ZE	PP	PP	PG
PG	ZE	PP	PP	PG	PG

Avec :

- Négatif grand noté **NG**;
- Négatif petit noté **NP**;
- Environ de zéro noté **EZ**;
- Positif petit noté **PP**;
- Positif grand noté **PG** ;

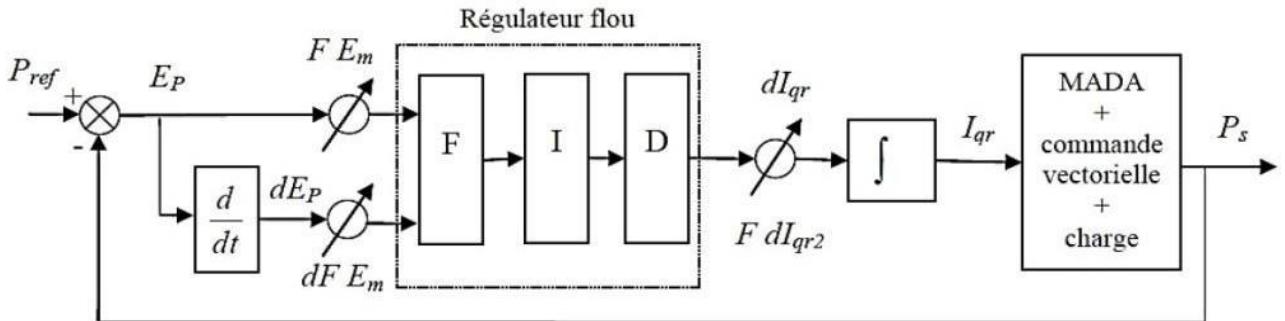
La sortie est l'incrément du signal de commande à appliquer au système à commander dI_{qr} (figure IV.6). Les entrées du RLF sont calculées à l'instant K de la manière suivante [79,80] :

$$E_p(K) = P_{ref}(K) - P_s(K) \quad (\text{IV.1})$$

$$dE_p(K) = E_p(K) - E_p(K - 1) \quad (\text{IV.2})$$

Le signal de commande I_{rq}^{ref} s'obtient après l'intégration de la sortie du RLF.

$$I_{rq}^{ref}(K) = I_{rq}^{ref}(K - 1) + dI_{rq}^{ref}(K) \quad (\text{IV.3})$$



IV.6 Simulation de la commande par la logique floue

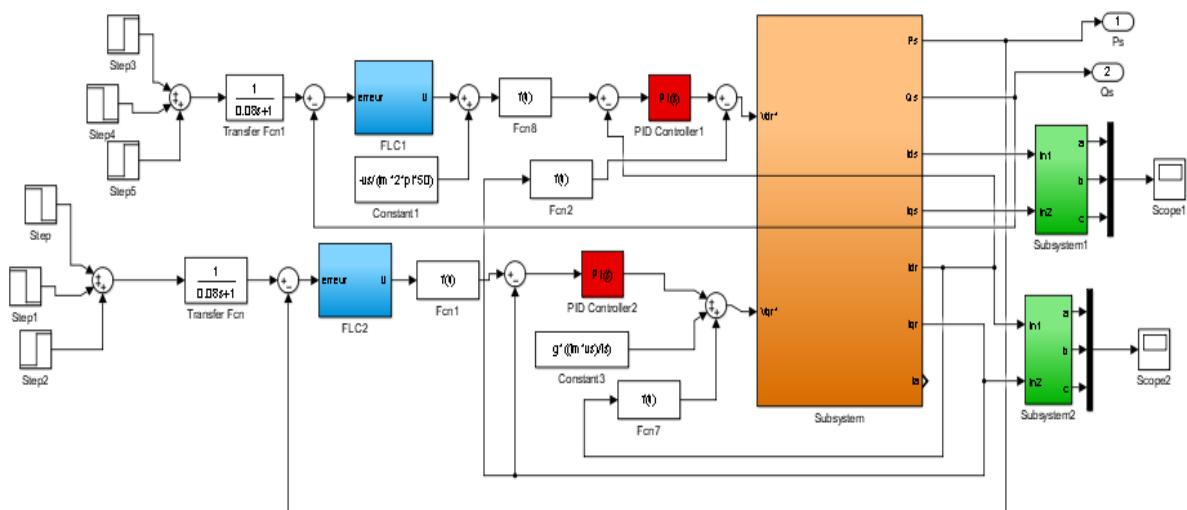


Figure IV. 7 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte de la GADA par la logique floue (vitesse fixe)

IV.6.1 Les résultats de simulation

➤ Les courants :

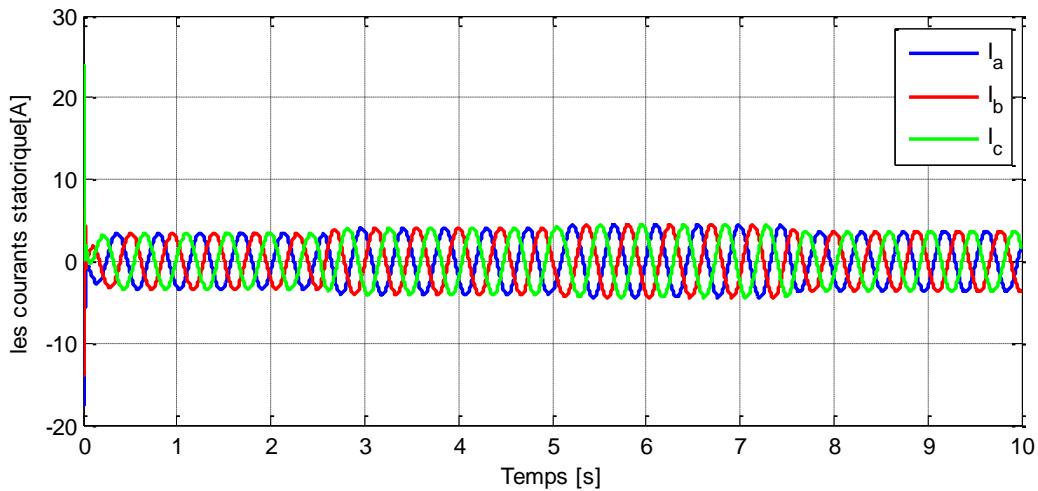


Figure IV. 8 : Courant statorique.

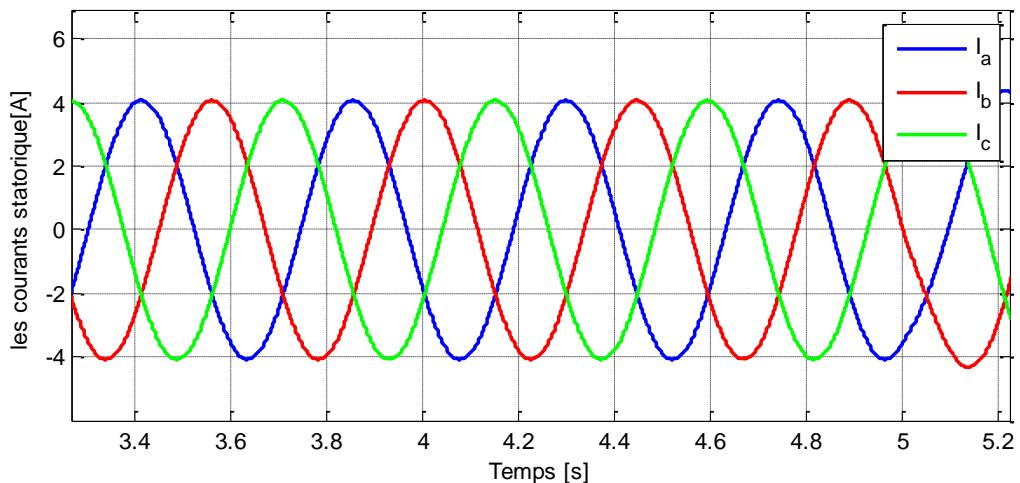


Figure IV. 9 : Courant statorique (zoom).

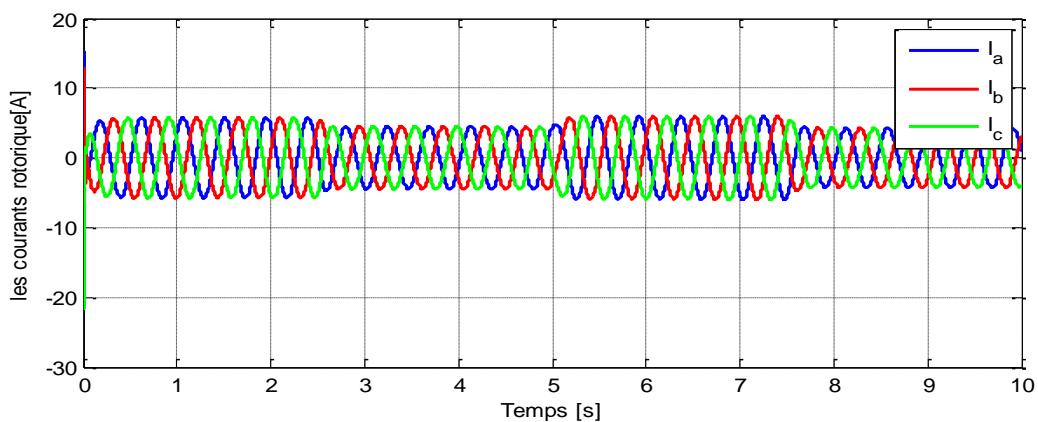


Figure IV. 10 : Courant rotorique.

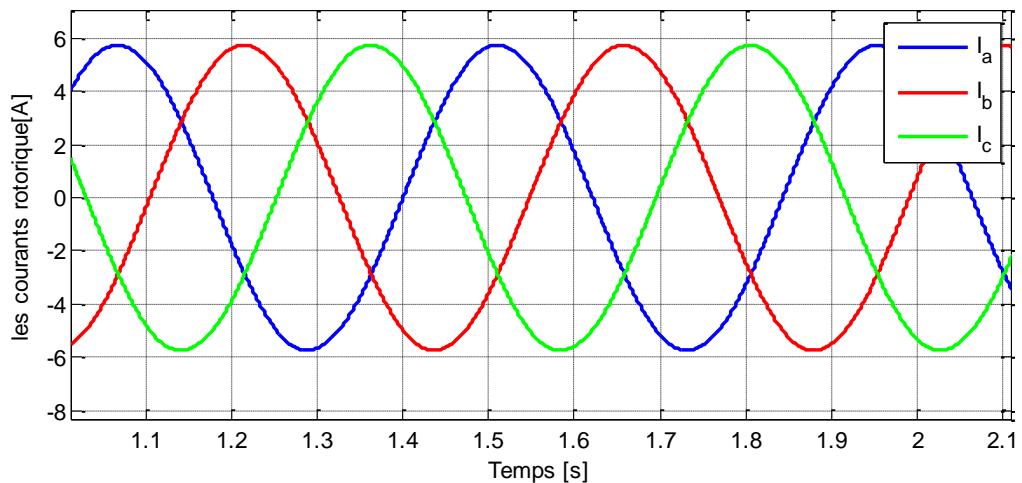


Figure IV. 11 : Courant rotorique (zoom)

➤ **Les puissances :**

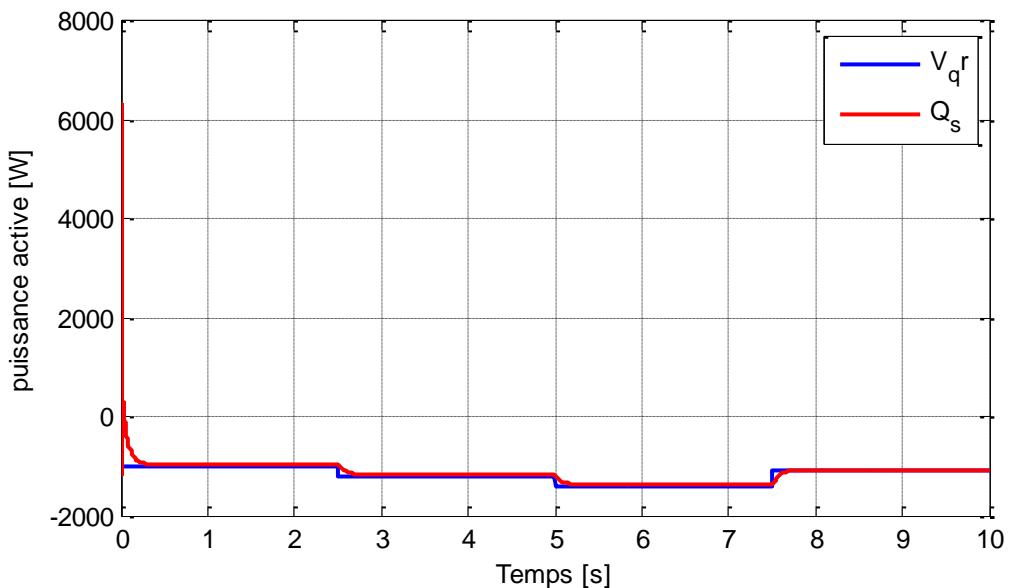


Figure IV. 12 : Puissance active.

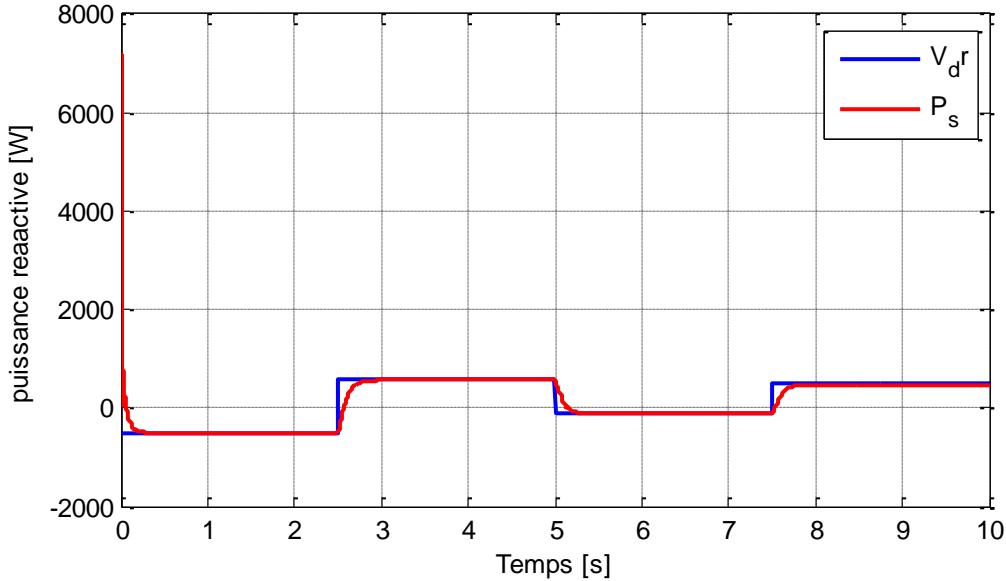


Figure IV. 13 : Puissance réactive.

IV.6.2 L'interprétation

Les figures ci-dessus présentent les réponses du système en appliquant une commande à base des concepts de la logique floue. Les résultats obtenus nous montrent bien que les puissances active et réactive suivent les échelons de références.

On constate une amélioration de comportement du système au point de vue dépassement, temps de réponse et erreur statique.

Donc, le réglage par une commande intelligente donne de très bonnes performances.

IV.7 Conclusion

Comme technique de commande avantageuse, la commande floue avec sa possibilité de contrôle des systèmes complexes sans nécessité de leur modélisation complète, était l'objet traité par ce quatrième chapitre, où on a présenté l'historique, le principe de la logique floue et les domaines d'application, ainsi que les bases de cette logique. Puis on a donné la description du contrôleur flou, avant de faire une application sur la commande de la machine asynchrone double alimentée à flux statorique orienté, afin de réguler les puissances du système éolien étudié à ses valeurs de référence.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de notre étude est d'améliorer les résultats de simulation d'une génératrice asynchrone double alimentation. Nous avons d'abord eu recours à la commande vectorielle qui présente des résultats plutôt limités en termes de poursuite de consigne en présence de contrainte. Afin de remédier aux imperfections de la commande vectorielle, nous avons songé à de nouvelles techniques intelligentes de commandes notamment la commande par la logique floue « fuzzification - defuzzification ». Ces commandes intelligentes ont fait preuve d'excellents résultats notamment en termes de souplesse et de régulation.

Par la suite, nous avons abordé le principe de fonctionnement et les différents types d'éoliennes. Dans ce contexte, l'objectif visé porte sur l'évaluation des diverses structures d'éoliennes et stratégies de commande pour la régulation des puissances active et réactive de la GADA.

Pour améliorer le contrôle GADA, nous avons appliqué la commande vectorielle directe et indirecte de la GADA intégrée à un système éolien. Qui exige un choix approprié des paramètres du contrôleur, Les résultats obtenus sont intéressants du point de vue qualité de l'énergie produite, ainsi qu'une bonne poursuite des puissances active et réactive statorique vis-à-vis de leurs références, qui varient selon le profil du vent.

Dans la dernière partie de ce travail, notre objectif s'est orienté vers l'étude de la commande par logique floue. Les résultats de simulation obtenus par les lois de commandes (vectorielle, logique floue) sont comparés afin d'analyser leurs performances face au suivi des consignes, et aux perturbations. La logique floue peut s'appliquer dès lors qu'une problématique se base sur une modélisation comportementale ou intègre un raisonnement subjectif (comme par exemple un niveau de satisfaction ou un a-priori). Elle ouvre donc la possibilité à de nombreuses applications actuarielles.

Enfin, et à l'issue de ce travail, on peut avancer un certain nombre de perspectives :

- Validation des résultats par expérience.
- Faire des tests de robustesse.
- Application d'autres stratégies de commande au système d'énergie éolienne.
- L'évaluation de la commande et le diagnostic de la MADA en mode génératrice en présence d'un défaut.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] B. Hopfensperger, D.J. Atkinson, and R. Lakin, 'Stator-Flux-Oriented Control of a Doubly-Fed Induction Machine with and without Position Encoder', IEE Proceedings - Electric Power Applications, Vol. 147, N°4, pp. 241 - 250, 2000.
- [2] M. Yamamoto and O. Motoyoshi, 'Active and Reactive Power Control for Doubly Fed Wound Rotor Induction Generator', IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 6, N°4, pp. 624 - 629, 1991.
- [3] G. Tapia, A. Tapia, and J.X. Ostolaza, 'Proportional–Integral Regulator Based Approach to Wind Farm Reactive Power Management for Secondary Voltage Control', IEEE Transaction Energy Conversion, Vol. 22, N°2, pp. 488 - 498, 2007.
- [4] A. Meroufel, Y. Djeriri, A. Massoum et A. Hammoumi, 'Commande Vectorielle par les Réseaux de Neurones Artificiels de l'Energie d'une MADA Intégrée à un Système Eolien', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 13, N°4, pp. 669 - 682, 2010.
- [5] Y. Djeriri, A. Meroufel and M. Allam, 'Artificial Neural Network-Based Robust Tracking Control for Doubly Fed Induction Generator Used in Wind Energy Conversion Systems', Journal of Advanced Research in Science and Technology, JARST, Algeria, Vol. 2, N°1, pp.173-181, 2015.
- [6] Le rapport annuel publié par le GWEC (Global Energy Council) pour l'année 2017.
- [7] L. KHETTACHE « Étude et Commande d'un Système Éolien à Base d'une Machine Électrique Double Alimentée » ; Mémoire de magistère en électrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna, 2007.
- [8] N. Kasbadji Merzouk, "Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie," Thèse de Doctorat de l'Université de Tlemcen, 2006.
- [9] MOUILAH Kheira « Commande d'une éolienne à machine asynchrone à double alimentation » Thèse de Doctorat de l'Université DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES.2015
- [10] N. K. MERZOUK, M. MERZOUK, B. BENYOUCEF « Perspectives du pompage éolien dans le sud Algérien » ; Projet National de Recherche, domicilié au Centre de développement des Energies Renouvelables, Laboratoire d'Énergie Éolienne, Alger, 2007.
- [11] Energie éolienne, Théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.
- [12] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, "Technologie des systèmes éoliens – intégration dans les réseaux électriques", la Revue 3EL, no. 39, 2004.
- [13] L. LECLERCQ « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004.

Références bibliographiques

- [14] F. POITIERS « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome,Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Nantes, France,2003.
- [15] Adjeroud Mohamed amine,Boudjellaba Faouzi , ' Etude D'une Eolienne en Fonctionnement Autonome',PFE, université Abderrahmane Mira de Bejaïa 2015.
- [16] A .Boyette. Contrôle - commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", Thèse de Doctorat, Université Henri, Nancy1, 2006.
- [17] : Kerikeb Mohamed Thème : « Modélisation, Simulation et Commande d'une Eolienne Contrarotative » UNINERSITE DU 20 AOUT 1955-Skikda 2012.
- [18] : Ziraoui Salah Eddine,PFE «Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau »,université UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA.2017
- [19]: Belkacem, T. O. U. A. L. (2010). Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [20] : ERROUKRMA OMAR, EL BRAZZI NACER EDDINE, « Modélisation et diagnostic d'une MADA », PFE, Université Saad Dahlab de Blida, 2019.
- [21] Brice Beltran. Contribution à la Commande Robuste des Éoliennes à Base de Génératrices Asynchrones Double Alimentation : Du Mode Glissant Classique au Mode Glissant d'Ordre Supérieur. Sciences de l'ingénieur physiques. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2010. Français.
- [22] DOUADI Tarek, « Modélisation et stratégie de Commande de la Générateur Asynchrone intégrée à un Système Eolien ». Thèse de doctorat Université Batna 2 – Mostefa Ben Boudaïd ,2019.
- [23] A. Boyette, “Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne”, Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, France, décembre 2006.
- [24] S. El Aimani, “Modelling and simulation of doubly fed induction generator for variable speed wind turbines integrated in a distribution network”, in: 10th European Conference on Power Electronics and Application, Toulouse, France, 2003
- [25] G. Salloum, “Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation,” Thèse de Doctorat, I.N.P de Toulouse, France, 2007.
- [26] A. MIRECKI, Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance. L'institut national polytechnique de Toulouse, 2005.

Références bibliographiques

- [27] AICHAOUI Belkheir, AKRABOU Omar « Etude des paramètres météorologiques intervenant dans la simulation d'un parc éolien - Cas du site d'Adrar », UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR, 2015.
- [28] K-S. Kim B. Bandyopadhyay, F. Deepak. Sliding mode control using novel sliding surfaces. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg, September 2009.
- [29] C.Saget, « La variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par l'éolien », REE, Juillet 1998, pp. 42-48.
- [30] R.Mukand Patel, “Wind and solar power system “, CRC, Press, 1999.
- [31] Babouri Rabah « Amélioration des Performances des convertisseurs Electromécaniques Basés sur les Machines Asynchrones Doublement Alimentées » thèse doctorat, université de béjaia, 2012/2016.
- [32] J. Usaola , P.Ledesma, J. M. Rodriguez, J. L, Fernandez, D. Beato,R. Iturbi, J. R. Wihelmi, “Transient stability studies in grids with great windpower penetration .modelling issues and operation requirements “ ,2003 IEEE PES Transmission and distribution Conference and exposition ,Septembre 2003 Dallas (USA) .
- [33] Abdelhak Djoudi « Contribution à la Conduite Robuste d'une Éolienne Basée sur une Machine Asynchrone à Double Alimentation, Connectée au Réseau Électrique » thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2016.
- [34] E. De Vries, « Wind turbines technology trends », Vole.Six, No. 4, James (Science publishers), Renewable Energy World, July-August 2003.
- [35] Docteur Chouaib https://youtu.be/RZZEwbVy_iA
- [36] F. POITIERS « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne » ; Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 19 Décembre 2003.
- [37] POITIERS .F« Etude et commande de génératrices synchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne». Thèse de doctorat de l'université NANTES 2000.
- [38] A.TELLIA «Etude et commande d'une éolienne à vitesse variable intégrée au réseau MT » Mémoire de Magister, Université d'Oran, 2012.
- [39] M. SHABAN, « Control of PWM Inverter-Fed Induction Motors »Department of Electrical and Electronic Technology, 2003.
- [40] GONZALO. A, JESUS. L, MIGUEL R, LUIS. M, GRZEGORZ. I, « Doubly Fed InductionMachine: Modeling and Control for Wind Energy Generation », Wiley-IEEE, December 2011.
- [41] N. LAVERDURE, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005.
- [42] M.PINARD, « Commande électronique des moteurs électriques ». DUNOD, Série

Références bibliographiques

EEA, 2004.

[43] F.MERRAHI, «Alimentation et commandé d'un machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne) », Thèse de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.

[44] F. Atmane « Commande Non Linéaire Par Des Régulateurs En Mode Glissant D'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) » MEMOIRE de Magister Université Mohamed Khider – Biskra ,2013.

[45] B. Hocine. B. Abdallah « commande de la puissance active et réactive du G A DA par Méthode de mode glissant » Mémoire Master Université Echahid Hamma Lakhdar ElOued ,2015.

[46] Suman,M.(2010) .« Grid-connected vector-controlled slip-ring induction machine drive without speed sensor. Journal homepage, 18, 4-14.

[47] Z.TIR, " Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade ", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif.06/07 /2010.

[48] Alain Bauscayrol, Maria piétra –David, Bernard de fornel et Henri Foch « Influence d'un emodulation avec référence à valeur moyenne variable dans un Ensemble convertisseur machine » Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique industrielle, URA au CNRS Toulouse France 1994.

[49] Merour Aymen,Boudour Aymen, Thème “Commande d'une GADA utilisée dans un aérogénérateur relié au réseau électrique Université 8 Mai 1945 – Guelma ” le : 14/07/2021.

[50] J. Hu,H. Nian, H. Xu, and Y. He,“Dynamic modeling and improved control of DFIG under distorted grid voltage conditions,” IEEE transactions on energy conversion, vol. 26, no. 1, pp. 163–175, 2010.

[51] F. POITIERS, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes : -Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau". 19/12/ 2003.

[52] J.P. Caron J.P. Hautier. Electrotechnique Modélisation et commande de la machine asynchrone. Presses Universitaires de Strasbourg, 1995.

[53] ROUSSEL N., OVARLEZ G., GARRAULT S., BRUMAUD C., « The origins of thixotropy of fresh cement pastes », Cement and Concrete Research, vol. 42, no 1, p. 148–157, janvier 2012.

[54] F. Poitiers. Etude et commande de génératrice asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.

[55] A. BOYETTE, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy. 11/12/2006.

Références bibliographiques

- [56] S. HEIER, «Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems», Publications John Wiley ET Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [57] J. MARTIN, « Energies éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [58] B.BOUKHEZZAR ; «les Stratégies de Commande pour l'optimisation et la Régulation de Puissance des Eoliennes à Vitesse Variable », Thèse de Doctorat en sciences, Université de Paris XI Orsay ; 23 février 2006.
- [59] C. NICHITA, D.LUCA, B.DAKYO, E.CEANGA, N.A.CUTULULIS, « Modelling non-stationary wind speed for renewable energy systems control», The annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle III, 2000, pp.29-34 .
- [60] A. DENDOUGA,"Contrôle de Puissance Active et Réactive de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (DFIG) ", mémoire de magister, Université de Batna. 2010.
- [61] Mr : LATRECHE Mohammed Tahar " Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien" Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Setif, Algérie, 2012.
- [62] A. Chaiba, "Commande par la Logique Floue de la Machine Asynchrone à Double Alimentation Alimentée en Tension", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2004.
- [63] ELBIA YOUSSEF «Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté» mémoire de magister de l'université de Batna, 2009.
- [64] Introduction à la Logique Floue", Document d'Internet, Disponible à : www.tn.refer.org
- [65] «Pour y Voir Plus Clair ... dans la Logique Floue !» Document d'Internet, Disponible à : <http://perso.club-internet.fr/bmantel/pages/logfloue/logfloue01.html>.
- [66] F. Zidani, R. Nait-Said, "Introduction à la Logique Floue / Conception d'un Contrôleur Flou", Cours de Magister, Université de Batna, Algérie, 2005/2006.
- [67] "Application de la Logique Floue", Document d'Internet, Disponible à : www.tn.refer.org. 68
- [68] F. Chevrie, F. Guely, "La Logique Floue", Cahier Technique Schneider, N°191, Mars 1998.
- [69] L. Baghli, "Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de la Logique Floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétiques", Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, France, 1999.

Références bibliographiques

- [70] A. Mechernene, "Commande Neuro-Floue Adaptative pour la Régulation de Vitesse d'un Moteur Asynchrone", Mémoire de Magister, Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique d'Oran, Algérie, 2008.
- [71] AZEDDINE CHAIBA «Commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle» Thèse de doctorat de l'université de Batna, 2010.
- [72] TOUAL BELKACEM « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératerice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable» mémoire de magister Université de Batna, 2010.
- [73] H. Buhler, "Réglage Par Logique Flou", Presse Polytechnique et Universitaire Romande, Lausanne-Suisse, 1994.
- [74] J. Camille de Barros, "Application de la Logique Floue à la Commande Optimale du Moteur Asynchrone", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, Aix-Marseille III, France, 2003.
- [75] M. T. Cao, "Commande Numérique de Machines Asynchrones par Logique Floue", Thèse de Philosophiae Doctor (Ph.D.), Université de Laval, Québec, Canada, 1997.
- [76] J. Godjevac, "Idées Nettes sur la Logique Floue", Collection Informatique, Première Edition, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 1999.
- [77] H. Buhler, "Réglage par Logique Floue", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 1994.
- [78] ELBIA YOUSSEF «Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté» mémoire de magister de l'université de Batna, 2009.
- [79] Z. Boudjema, A. Meroufel, E. Bounadja and Y. Djeriri, 'Nonlinear Control of a Doubly Fed Induction Generator Supplied by a Matrix Converter for Wind Energy Conversion Systems', Journal of Electrical Engineering, Vol. 13, N°4, pp. 60 - 68, 2013.
- [80] Z. Boudjema, A. Meroufel and Y. Djeriri, 'Nonlinear Control of a Doubly Fed Induction Generator for Wind Energy Conversion', Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering, Vol. 6, N°1, pp. 28 - 35, 2013.

Annexes

Annexe A

Paramètres utilisés

Paramètre	Valeur numérique
Résistance statorique R_s	4.85 Ω
Résistance Rotorique R_r	3.8 Ω
Inductance rotorique L_r	0.274 H
Inductance statorique L_s	0.274 H
Inductance mutuelle Lm	0.258 H
Nombre de pair de pole P	2
Glissement g	0.05
Tension nominale statorique V_s	230 V
Vitesse statorique w_s	1500tr/min
Puissance nominale	2 kW

ملخص

هذه المذكرة تتناول دراسة المولد اللاتزامني مزدوج التغذية مخصص لنظام طاقة الرياح، بالإضافة إلى توليف قانون التحكم الخطي من أجل التحكم المستقل في الطاقة الفعالة والردية.

الهدف هو تطوير نموذج محاكاة لنظام تحويل طاقة الرياح، أول خطوة وهي القيام بنمذجة الجزء الميكانيكي الذي يضم التوربين ومضاعف السرعة، بعد ذلك تم نمذجة كل من المولد اللاتزامني مزدوج التغذية، المحول الإلكتروني.

خلال هذا العمل، تعتمد استراتيجية التحكم المطورة على توجيه التدفق المغناطيسيي وفقاً لمراجع ثنائية القطب من خلال استعمال معدلات كلاسيكية من نوع PI ونسبة تعتمد على المنطق الضبابي. تم تصميم النموذج الكلي لهذا النظام بواسطة برنامج MATLAB/SIMULINK حيث تطرقتنا لتحليل النتائج المتحصل عليها والتي تبين لنا السلوك الجيد للنظام.

كلمات مفتاحية

مولد لا تزامني مزدوج التغذية، توربينات الرياح، تحكم المنطق الضبابي ، تحكم شعاعي.

Résumé

Le présent mémoire traite l'étude de la machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système éolien, ainsi la synthèse d'une loi de commande linéaire pour le contrôle indépendant de la puissance active et réactive.

L'objectif est de développer un modèle de simulation d'un système de conversion d'énergie éolienne .Dans un premier lieu, la modélisation de la partie mécanique, qui englobe la turbine le multiplicateur et l'arbre de transmission a été effectuée. Ensuite, la MADA, le convertisseur ont été modélisés .Lors de ce travail, la stratégie de commande développée est basée sur un contrôle vectoriel à flux statorique orienté selon un repère diphasé en appliquant des régulateurs classiques à action proportionnelle et intégrale (PI) et des régulateurs flous. Le modèle du système complet a été effectué dans l'environnement MATLAB/SIMULINK afin d'analyser les résultats obtenus qui nous montrent un bon comportement du système.

Mots-clés

Machine asynchrone à double alimentation, turbine éolienne, commande par logique floue, commande vectorielle.

Abstract

This work deals with the study of the asynchronous machine with dual power supply dedicated to a wind power system, as well as the synthesis of a linear control law for the independent control of active and reactive power.

The objective is to develop a simulation model of a wind energy conversion system. In a first place, the modelling of the mechanical part, which includes the turbine, the multiplier and the transmission shaft, was carried out. Then, the MADA, the electronic converter were modelled. During this work, the developed control strategy is based on a stator flux vector control oriented according to a two-phase reference by applying conventional proportional and integral action regulators (PI) and fuzzy logic controllers. The complete system was modelled in the MATLAB / SIMULINK environment in order to analyse the results obtained which show us a good system behaviour.

Keywords

Double fed induction machine, wind turbine, fuzzy logic controllers, vector control.