

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE Echahid Hamma Lakhdar- EL Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de Master

Spécialité: Machines Electriques

THEME

Commande Vectorielle D'une Génératrice Double Alimentation Dans Un Système Eolien

Présenté et soutenu par:

BARIR Mebarek Mehammed et LOUETRI Oussama

Le:

Devant le jury composé de:

Dr: Salehi Abdelfattah

Dr: TRIA Fatma

Dr : GAYED Imad Al-Din

Dr : BOGHAZALA Saleh Mohammed

Président

Encadreur

Examineur

Examineur

Année Universitaire: 2023/ 2024.



REMERCIEMENT

Nous remercions d'abord Dieu Tout-Puissant pour la santé, le courage et la foi qu'il nous a donnés pour atteindre cet objectif.

Cette journée.

Nous tenons également à remercier le fabricant de pneus, Mme.

"TRA Fatma" pour son aide, ses précieux conseils et son soutien

Patience tout au long de ce travail ainsi que les membres

Le jury qui nous a honoré a examiné notre travail.

Nos plus chaleureux remerciements vont à notre

Des enseignants pour les encourager à travers tout cela

Années d'études.

Sincères remerciements et reconnaissance à tous les étudiants promotion.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail A mes chers parents,

Mon père qui ne cesse de m'encourager,

Ma mère symbole de Sacrifice,

Sans eux je ne serais pas ce que je suis

Aujourd'hui.

A mes chères sœurs et frères

A toute la famille

A tous mes amis

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Ousama

Dédicaces

Je dédie Mon Travail avant tous A mes Chers Parents

Mon PÈRE qui ne cesse pas de M'encourager, et qui Ma toujours soutenu,

Ma jolie MÈRE symbole de sacrifice et qui est tout pour moi, pour Sa

Tendresse profonde « Que Dieux me les protègent ».

A Mes chers Frères et Sœurs et ses familles

A tous ceux qui m'ont aidée à réaliser ce mémoire.

Mebarek Mohammed

ملخص: هذا العمل يقدم تقنية تحكم تطبق على نظام تحويل الطاقة الرياح المربوط بمولد غير متزامن ذو تغذية مزدوجة. هذه التقنية تستخدم في انظمة طاقات الرياح المتغير في السرعات.

الهدف هو تطبيق هذا التحكم في قيم الطاقات النشطة والساكنة التي تولدها الماكينة الغير متزامنة علي مستوي الجزء الثابت هذا التحكم يكون علي مستوي الجزء الدوار بتغيير قيم التردد من اجل ضمان تردد الجزء الثابت يساوي تردد الشبكة الكهربائية. تظهر النتائج المتحصل عليها من المحاكاة العددية الفائدة المتزايدة لمثل هذا التحكم في الأنظمة الكهربائية.

كلمات مفتاحية: طاقة الرياح، توربين، تتبع أقصى نقطة للطاقة، مولد غير متزامن ذو تغذية مزدوجة، تحكم ناقلي.

Résumé: Ce travail présente une technique de commande vectorielle appliquée au système de conversion d'énergie éolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation. L'objectif est d'appliquer ce contrôle pour contrôler l'échange des puissances active et réactive générées au stator de la GADA en agissant sur les signaux rotoriques à partir d'un convertisseur bidirectionnel, afin d'obtenir une fréquence fixe au stator de la machine. Les résultats par matlab simulink obtenus montrent l'intérêt croissant d'une telle commande dans les systèmes électriques.

Mots clés: Energie éolienne, turbine, MPPT, GADA, commande vectorielle.

Abstract:

This work presents a power control of a grid connected variable speed wind turbine system, based on DFIG. In this work the indirect control of power consist currents is adopted from the rotor side converter, which is based on powers control loops and the two loops of rotor currents: direct and quadrature component are controlled by the technique of the classical PI controller. The control is applied to the active and to the reactive powers loops exchanged between the stator of the doubly fed. The simulation results obtained by MATLAB simulink show the growing interest in such control in electrical systems.

Keywords: Wind energy, turbine, MPPT, GADA, vector control.

LISTE DES ABREVIATIONS

R	Rayon de la surface balayée pour la turbine.
C_p	Le coefficient de puissance.
λ	La vitesse relative de l'éolienne.
Ω_{mec}	Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.
Ω_{opt}	Vitesse de rotation optimale de l'arbre du générateur.
G	Gain du multiplicateur.
f	Coefficient des frottements visqueux de l'éolienne et de sa génératrice.
J	Inertie totale de l'arbre.
f_r	Fréquence rotorique.
g	Glissement.
s, r	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
d	Indice de l'axe direct.
q	Indice de l'axe en quadrature.
$[V_s]$	Vecteur tension statorique.
$[I_s]$	Vecteur courant statorique.
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique.
$[\Phi_s]$	Vecteur flux statorique.
$[\Phi_r]$	Vecteur flux rotorique.
$[R_s]$	Matrice résistance statorique.
$[R_r]$	Matrice résistance rotorique.
$[L_{ss}]$	Matrice inductance statorique.
$[L_{rr}]$	Matrice inductance rotorique.
$[M_{sr}]$:	Matrice inductance mutuelle stator-rotor.
p	Nombre de paires de pôles.
θ_s	L'angle électrique entre l'axe a_s et l'axe d.
θ_r	L'angle électrique entre l'axe a_r et l'axe d.
θ	La position angulaire du rotor par rapport au stator.
ω_s	Pulsation électrique statorique.

ω_r	Vitesse angulaire de rotation.
Ω	Vitesse de rotation mécanique.
C_{em}	Couple électromagnétique.
R_s	Résistance statorique.
R_r	Résistance rotorique
l_s	Inductance propre d'une phase statorique.
l_r	Inductance propre d'une phase rotorique.
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.
M_{sr}	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe a_s coïncide avec l'axe a_r .
L_s	Inductance cyclique statorique.
L_r	Inductance cyclique rotorique.
L_m	Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor.
P	Puissance active statorique.
Q	Puissance réactive statorique.
f_p	Fréquence de la porteuse.
P_c	Puissance emmagasinée par le condensateur.
FTBO	Fonction de transfert en boucle ouverte.
FTBF	Fonction de transfert en boucle fermée.
MCC	Machine à courant continu.
MSAP	Machine synchrone à aimants permanents.
GSAP	Génératrice synchrone aimants permanents.
MAS	Machine asynchrone.
MADA	Machine asynchrone à double alimentation.
MLI	Modulation de largeur d'impulsion.
MPPT	Max Power Point Tracking.

TABLE DES FIGURES

Figure (I.1). Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	3
Figure (I.2). Schéma d'une nacelle (moteur NORDEX 1000)	5
Figure (I.3). Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable.....	7
Figure (I.4).Principaux composants de l'éolienne à axe horizontale.	8
Figure (I.5). Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage.	9
Figure (I.6). Eoliennes à vitesse variable.....	9
Figure (I.7). Les différents modes de fonctionnement de la GADA.	10
Figure (I.8.). Atlas vent de l'Algérie.....	11
Figure (I.9). Cartes saisonnières de la vitesse du vent de l'Algérie (m/s).	12
Figure (I.10). Schéma d'un système éolien.	13
Figure (I.11). Coefficient de puissance C_p en fonction de λ ,.....	14
Figure (I.12).Puissance disponible d'une éolienne donnée.	14
Figure (I.13). Schéma bloc du modèle de la turbine	16
Figure (I.14).Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.....	17
Figure(I.15).Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance.....	17
Figure (I.16). Vitesse du vent en fonction du temps.....	19
Figure (I.17). Coefficient de puissance C_p de la turbine.	19
Figure (I.18). Coefficient λ de la turbine.	20
Figure (I.19).Puissance mécanique de la turbine.	20
Figure(I.20).Vitesse de rotation de la turbine.	21
Figure (II.1). Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA.	23
Figure (II.2). Les différents modes de fonctionnement de la MADA.	24
Figure(II.3). Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.....	29
Figure (II.4) Schéma bloc de la simulation de la GADA.	36
Figure (II.5).Le couple électromagnétique.	36
Figure (II.7). le flux statorique d,q.....	36
Figure (II.6).La vitesse mécanique	37

Figure (II.7). le flux statorique d,q.....	37
Figure (II.8). le flux rotorique d,q.....	37
Figure (II.9).Les courants statorique.....	37
Figure (II.10).Les courants rotorique.....	37
Figure (II.11). Le couple électromagnétique.	37
Figure (II.12). le flux rotorique.....	38
Figure (II.13). le flux statorique.....	38
Figure (III.1).Analogie entre MCC à excitation séparée et MADA.	42
Figure (III.2). Orientation du flux statorique.	43
Figure (III.3). Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la GADA alimentée en tension.	45
Figure (III. 4) . Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.	46
Figure (III.5). Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulé e sinusoïdale une porteuse.	48
Figure (III.6). Schéma bloc de la commande directe de la puissance active et réactive du GADA	49
Figure (III.7). Schéma du principe de la commande vectorielle en puissance.	49
Figure (III.8). Schéma de régulation des puissances Ps et Qs.	50
Figure (III.9). Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA..	52
Figure (III.10). Schéma globale de la commande.	52
Figure (III.11). Schéma de régulation des courants ird et irq.	53
Figure (III.12). Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles des puissances du GADA.	54
Figure (III.13). Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles des puissances du GADA sous Matlab/Simulink.	55
Figure (III.14).la puissance active et reactive statorique	56
Figure (III.15).Le courant rotorique avec zoom	56
Figure (III.16). Le flux dans l'axes d,q	57
Figure (III.17).Vitesse mécanique.	58
Figure (III.18). Variation du coefficient de puissance Cp	58
Figure (III.19). Coefficientλdela turbine.....	59

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS.....	II
TABLE DES FIGURES.....	IV
SOMMAIRE	VI
Introduction générale.....	1
Chapitre I. Généralité sur les systèmes éolienne.....	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne	3
I.2.1. Définition de l'énergie éolienne	3
I.2.2 Principe de fonctionnement	4
I.2.3 Principaux composants d'une éolienne	4
I.3. Les différents types d'éoliennes.....	7
I.3.1. Eoliennes à axe vertical	7
I.3.2. Eoliennes à axe horizontal	8
I.4. L'éolien à vitesse fixe.....	9
I.5. Les éoliennes à vitesse variable	9
I.6. Estimation des ressources éoliennes de l'Algérie.....	10
I.7. Modélisation des éoliennes	12
I.7.1. Modèle du multiplicateur.....	15
I.7.2 Equation dynamique de l'arbre	15
I.7.3. Schéma bloc du modèle de la turbine	15
I.8. Techniques d'extraction du maximum de la puissance	16
I.7.1. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse	16
I.9. Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable	17
I.10. Résultats de la simulation	18
I.11. Conclusion	21
Chapitre II. Modélisation d'un system éolien (Turbine + MPPT + GADA).....	22
II.1 Introduction	23
II.2. Description du Fonctionnement de la MADA.....	23
II.2.1. Structure de la Machine	23

II.2.2. Principe de fonctionnement	24
II.3. Modélisation de la GADA	25
II.3.1 Hypothèses de simplification.....	25
II.3.2 Modèle mathématique de la GADA	26
II.3.3 Equations électriques de la MADA	26
II.4. Application de la transformation de Park à la MADA	28
II.4.1 Mise en équation de la MADA dans le repère de Park:	30
II.4.2. Equations des flux	31
II.4.3 Choix du référentiel.....	32
II.5. Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park	33
II.6. Modèle de la MADA dans le repère de Park sous forme d'état	34
II.7. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	35
II.8. Expressions des Puissances Active et réactive	36
II.9. Résultat de simulation de la MADA.....	37
II.10. Interprétation de résultat de simulation	39
II.11. Conclusion.....	39
Chapitre III. La commande vectorielle d'un GADA	40
III.1. Introduction	41
III.2. Généralités sur la commande vectorielle	41
III.3. Principe de la commande vectorielle	41
III.4. Choix du référentiel pour le modèle diphasé	42
III.5. Modélisation de l'onduleur	46
III.6 Stratégie de commande de l'onduleur.....	47
III.6.1 Modulation de largeur d'impulsions (MLI).....	47
III.6.2 Les paramètre de la MLI	47
III.6.3. L'indice de modulation(m).....	47
III.6.4 Le taux de modulation(r).....	47
III.7. Commande Directe des Puissances Active et Réactive	48
III.8. Commande Indirecte des Puissances Active et Réactive	51
III.8.1. Commande Indirecte sans Boucles des Puissances.....	51
III.8.2. Commande Indirecte avec Boucles des Puissances	54

III.9. Résultats de Simulation.....	55
III.9.1. Profil du Vent en Echelons	55
III.10. Conclusion.....	59
Conclusion générale	61
Bibliographiques	63

Introduction

Générale

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont des énergies provenant de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à celui de leur consommation. La lumière du soleil et le vent, par exemple, constituent de telles sources qui se renouvellent constamment. Les sources d'énergie renouvelables sont abondantes et sont présentes partout autour de nous.

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, dite énergie éolienne, et à la fin transformée en énergie électrique, est appelée aéro-générateur.

Les générateurs éoliens 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.

Une grande partie de ces éoliennes à vitesse de rotation variable installées aujourd'hui sont équipées d'une génératrice Double alimentation asynchrone (GADA). Ce dernier permet la production d'électricité à vitesse variable, ce qui permet de mieux exploiter les ressources éoliennes. L'objectif d'un mémoire est l'étude d'un système éolien à vitesse variable tel que la modélisation et la commande.

Dans le premier chapitre, nous présentons la partie théorique dans les systèmes d'énergie éolienne telle que les principaux composants d'une éolienne, les machines électriques installées dans l'éolienne, des différents types d'éoliennes.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation d'un système éolien (Turbine + MPPT + GADA).

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la commande vectorielle en puissance de la machine asynchrone à double alimentation, à savoir la commande vectorielle directe et indirecte.

Finalement, on terminera ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche futures

Chapitre I.

Généralité sur les systèmes éolienne

Chapitre I.

Généralité sur les systèmes éolienne

I.1. Introduction

La turbine éolienne permet la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique transmise à partir de la génératrice. Les différents éléments constituant une éolienne sont conçus pour maximiser la conversion énergétique. L'objectif est d'avoir un bon compromis entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice. Pour satisfaire cela, l'éolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement et électriquement.

On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la turbine éolienne ainsi qu'à son contrôle où on va appliquer un algorithme MPPT afin de tirer le maximum de puissance.

I.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne

I.2.1. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. [01].

(Figure I-1).

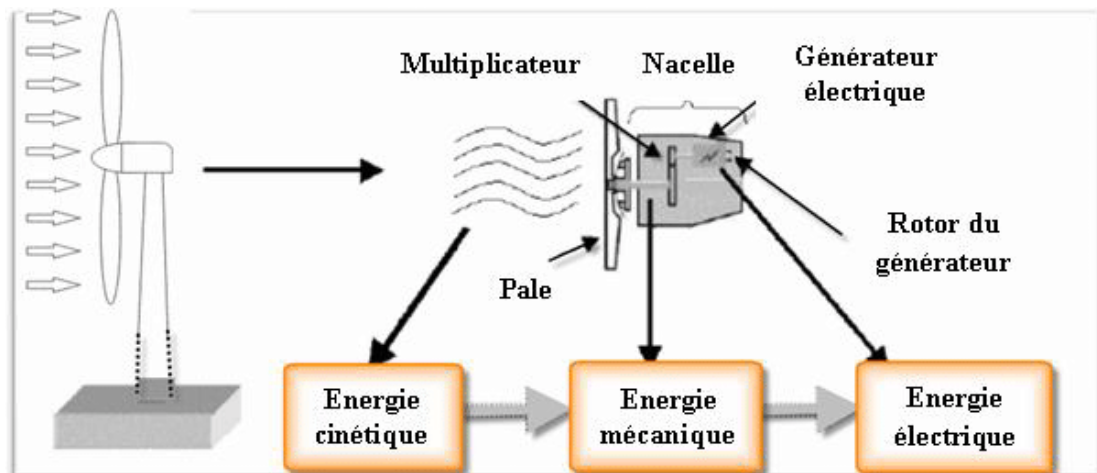


Figure (I.1). Conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et

c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [02].

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores. [03]

I.2.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de l'installation éolienne est relativement simple: le vent fait tourner les pales qui à leur tour font tourner le générateur. Le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. L'électricité est dirigée vers une charge soit un réseau électrique ou des batteries de stockage [4].

I.2.3 Principaux composants d'une éolienne

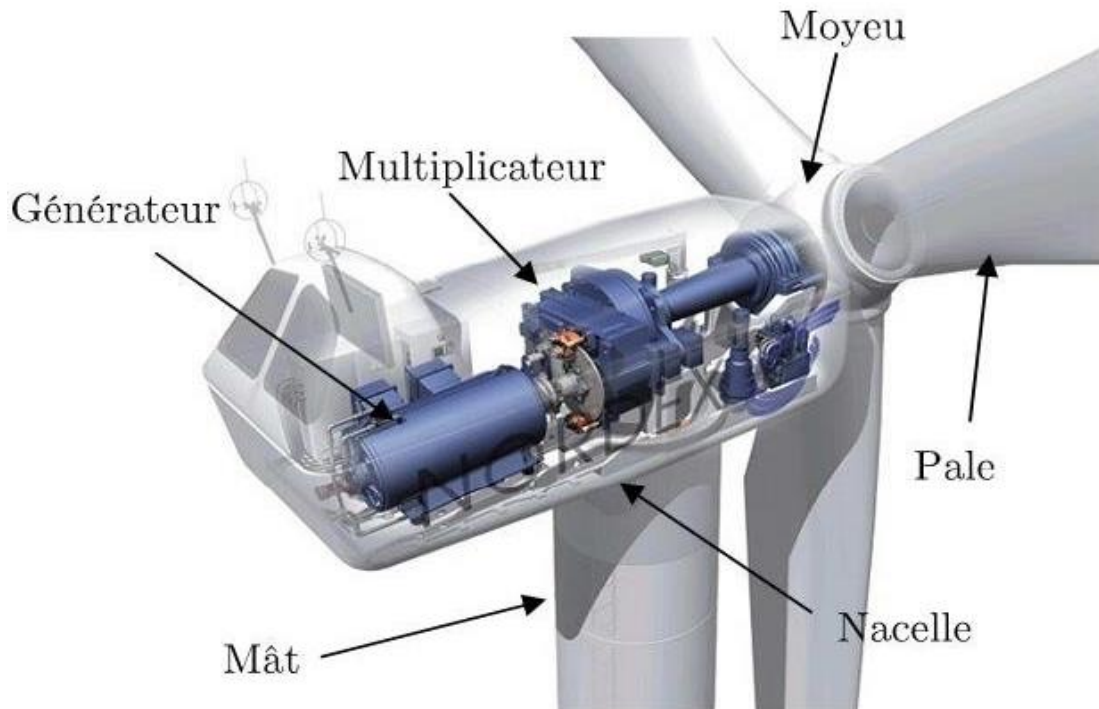


Figure (I.2). Schéma d'une nacelle (moteur NORDEX 1000). [5]

I.2.3.1 Les pales

Elles transfèrent la puissance du vent au moyeu du rotor. Dimensions et tailles: jusqu'à 40m de longs et plus de 2,5 mètres de large. Matériaux: fibre de verre [5].

I.2.3.2 Moyeu du rotor

Il transmet le mouvement de rotation à l'arbre de transmission qui lui est solidaire. Le moyeu est une pièce en acier moulé. Il supporte les pales et relie le rotor à la nacelle. Il fait varier l'angle d'attaque des pales simultanément [6].

I.2.3.3 Un rotor

Composé de plusieurs pales (en général trois) et du nez de l'éolienne. Le rotor est entraîné par l'énergie du vent, il peut être couplé directement ou indirectement à une pompe (cas des éoliennes de pompage) ou plus généralement à un générateur électrique. Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu [6].

I.2.3.4 Arbre de transmission

Il peut avoir 1 ou 2 arbres dans une nacelle.

- 1er arbre: il transmet l'effort fourni par le rotor au multiplicateur et tourne à environ 20 tours/minute.
- 2ème arbre: il entraîne la génératrice à 2000 tours/minute et est muni d'un frein à disque actionné en cas d'urgence.

Il reçoit le mouvement de rotation du moyeu afin d'entraîner la génératrice électrique [6].

I.2.3.5 Un mât

Permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal) et/ou placer ce rotor à une hauteur lui permettant d'être entraîné par un vent plus fort et régulier qu'au niveau du sol. Le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.) [7].

I.2.3.6 Une nacelle

Montée au sommet du mât, abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques, nécessaires au fonctionnement de la machine [7]

I.2.3.7 Le générateur

Le générateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être soit direct : si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur; soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire [8].

I.2.3.8 Transmission mécanique

Appelée aussi multiplicateur, elle adapte la vitesse de rotation au fonctionnement de la génératrice. (Elle n'est pas nécessaire dans les petites éoliennes) [5].

I.2.3.9 Frein à disque

Il sert à arrêter l'éolienne en cas d'urgence, ou pour effectuer la maintenance [5].

I.2.3.10 Système de contrôle commande

Dispositif d'orientation. En cas de défaillance, le système stoppe l'éolienne et transmet le signal à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique [5].

I.3. Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

I.3.1. Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [4]:

- Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble.

L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure I.3).

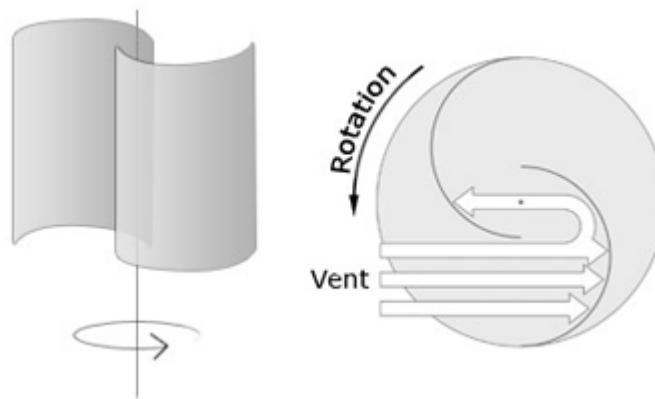


Figure (I.3). Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable.

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure I.3) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être

lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées. [4]

I.3.2. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [5]. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multi-critères [6]. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.

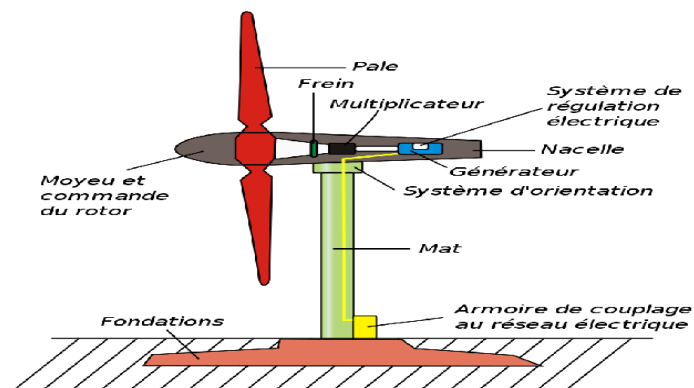


Figure (1.4). Principaux composants de l'éolienne à axe horizontale.

I.4. L'éolien à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne est composée de la turbine, le multiplicateur de vitesse et de la génératrice.

[7]

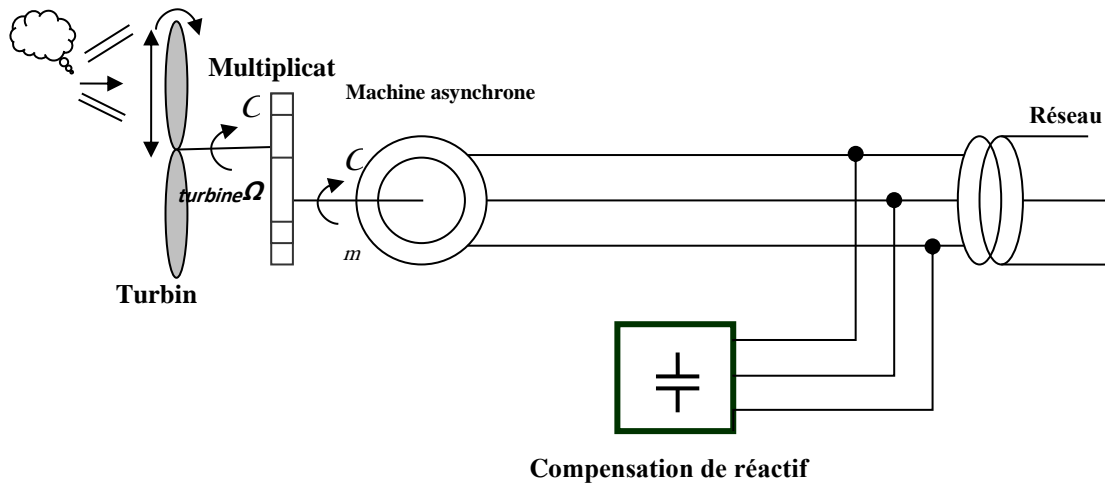


Figure (I.5). Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage.

I.5. Les éoliennes à vitesse variable

La configuration de la figure (I.6) est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné (MADA). La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique.

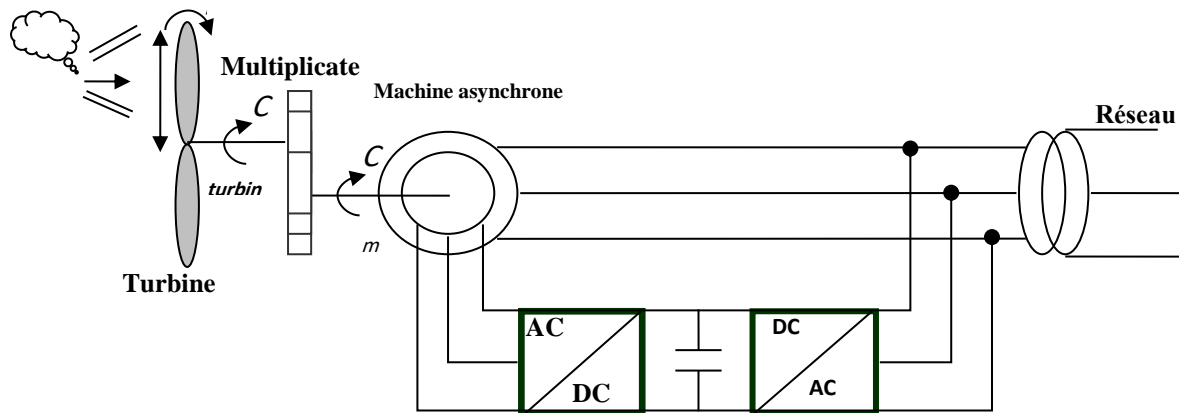


Figure (I.6). Eoliennes à vitesse variable.

La Figure (I.6) montre les différentes configurations de fonctionnement de la Générateur asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur, P_s , la puissance transitant par le stator, P_r , la puissance transitant par le rotor, et P_m , la puissance mécanique.[8]

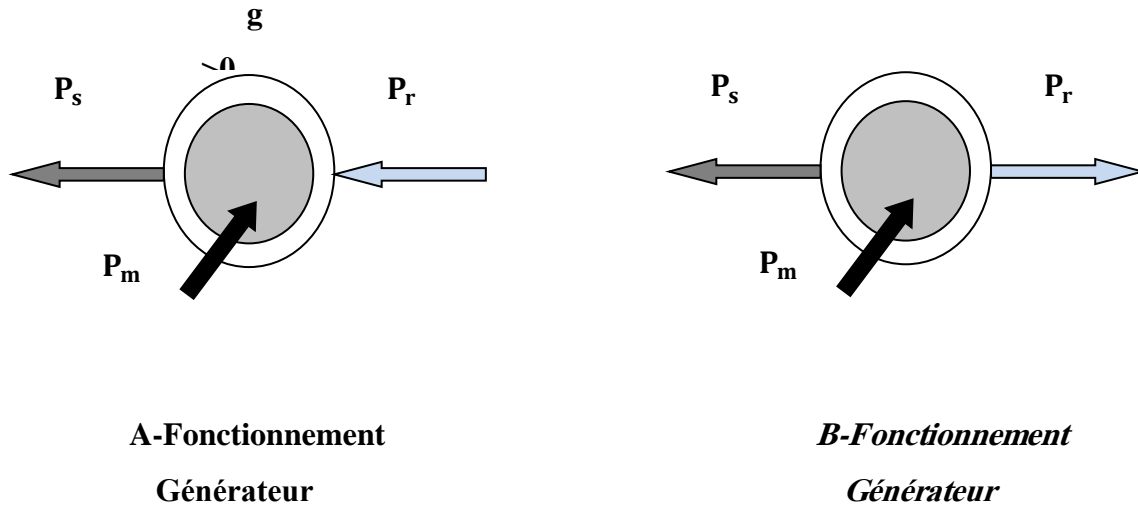


Figure (I.7). Les différents modes de fonctionnement de la GADA.

– **Génératrice en hypo synchronisme**

La puissance est fournie par le dispositif d'entraînement, dans notre cas la turbine éolienne ; une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

– **Génératrice en hyper synchronisme**

La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g \cdot P_{mec}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.[4]

I.6. Estimation des ressources éoliennes de l'Algérie

Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie.

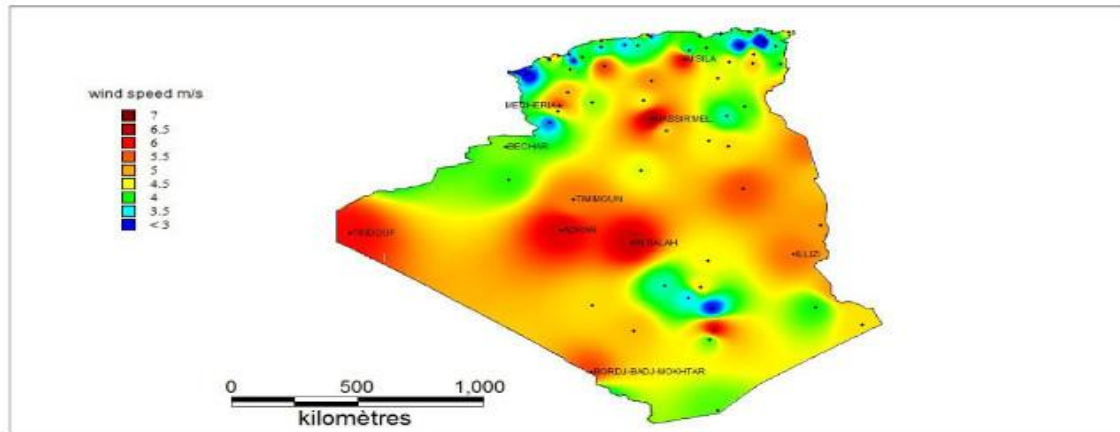


Figure (I.8.). Atlas vent de l'Algérie.

Le site de In Salah affiche une vitesse moyenne de 6,4m/s à côté d'Adrar qui enregistre 6,3 m/s. La wilaya d'Illizi, dotée d'une dizaine de stations montre des vitesses dépassant les 5 m/s.

Le site de Hassi R'Mel affiche des vitesses moyennes assez importantes atteignant 6,5 m/s. Au Nord, plusieurs microclimats sont aussi détectés d'ouest en est. Dans les Hauts-Plateaux à l'extrême Ouest, la région de Mecheria affiche une vitesse moyenne très intéressante de 5,6m/s.

Un peu plus à l'est, Tiaret et Djelfa présentent des vitesses de 5,6 m/s et 5,1 m/s respectivement. M'Sila apparaît comme une région très intéressante avec une vitesse moyenne annuelle de 5,3 m/s.

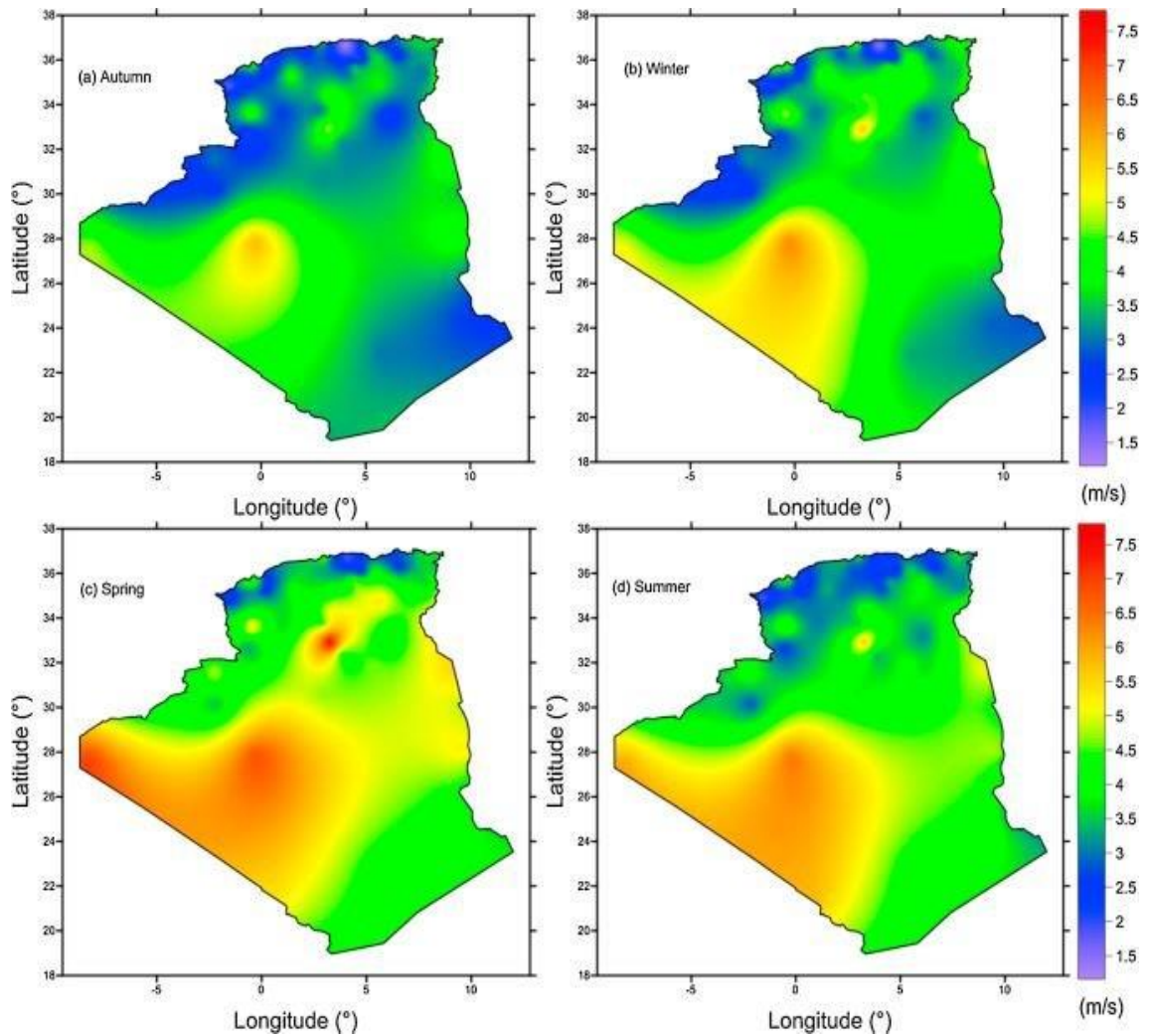


Figure (I.9). Cartes saisonnières de la vitesse du vent de l'Algérie (m/s).

Les cartes saisonnières représentées en figure. Montrent clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventés que le reste des saisons et que le printemps en est le plus venté. Néanmoins, on remarque que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver. D'un autre côté, des régions tels que Biskra, Adrar et Annaba sont caractérisés par une vitesse relativement constante tout au long de l'année.[10]

I.7. Modélisation des éoliennes

Dans cette partie, nous nous intéressons uniquement à la modélisation d'éoliennes à axe horizontales tri pales. Aujourd'hui, pratiquement toutes les éoliennes sont à axe horizontal car, même si les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, leur faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique produite les ont écartées du marché.

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de gain G de vitesse (figure I.10).

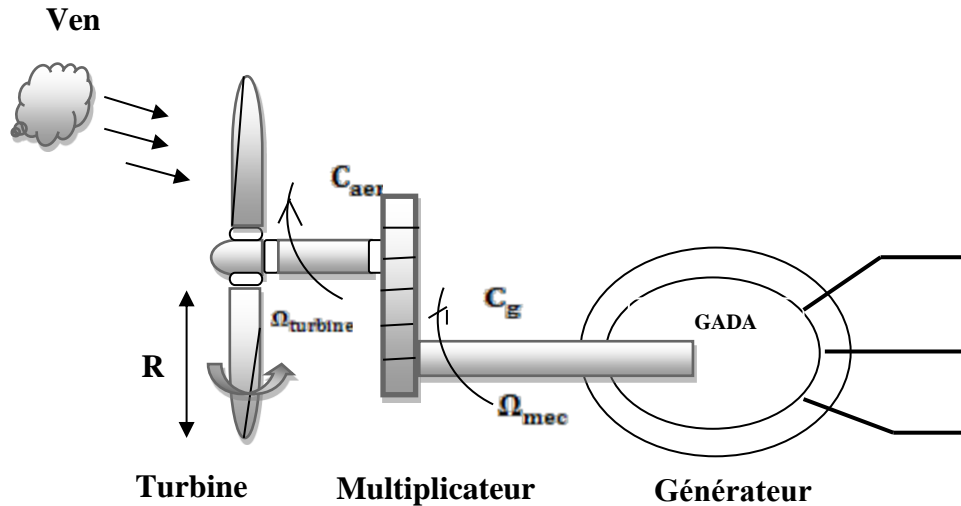


Figure (I.10). Schéma d'un système éolien.

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante:

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

Avec:

- ρ est la densité de l'air (approx. 1.22kg/m à la pression atmosphérique à 15°C).
- S est la surface circulaire balayée par la turbine [m²] de rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale R[m].
- v est la vitesse du vent [m/s].

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors:

$$P_{aer} = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho S v^3}{2} \quad (I.2)$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne, il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (1.9) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β . [11]

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante:

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.00167(\beta - 2)) \sin\left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (I.3)$$

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

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{v} \quad (I.4)$$

Où Ω_t est la vitesse de la turbine.

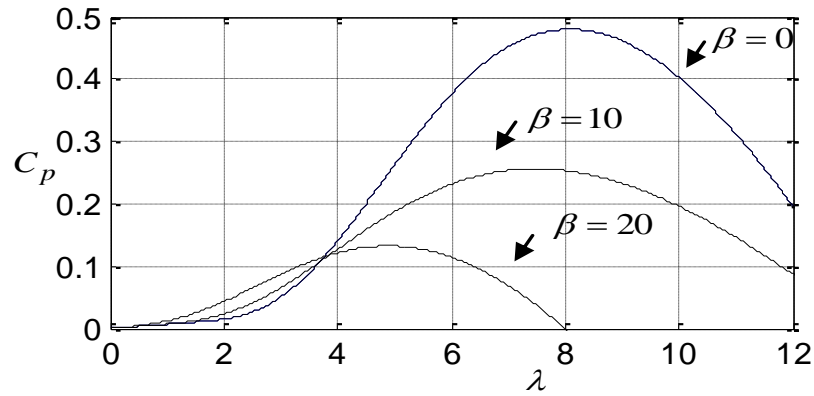


Figure (I.11). Coefficient de puissance C_p en fonction de λ ,

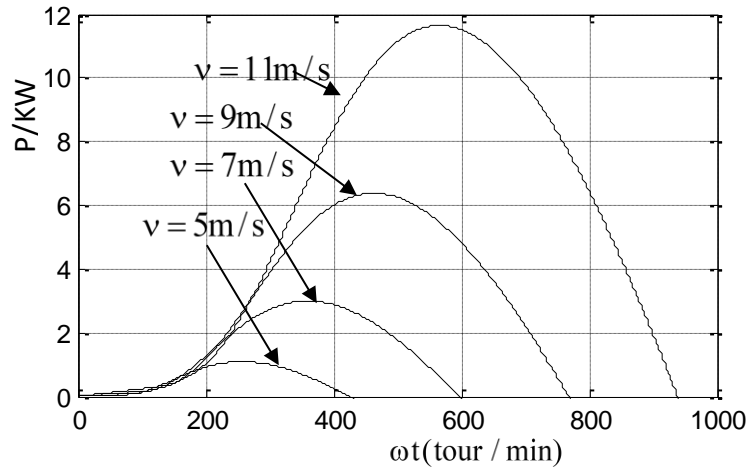


Figure (I.12). Puissance disponible d'une éolienne donnée.

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par:

$$C_{ear} = \frac{P_{ear}}{\Omega_t} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_t} \quad (I.5)$$

I.7.1. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (figure 1.10), ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes:

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (I.6)$$

I.7.2 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 $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (I.7)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne de 2MW, une pale a une longueur de 39 m et pèse 6.5 tonnes [09]. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ($C_{méc}$) appliqué au rotor:

$$J \cdot \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} \quad (I.8)$$

Où J 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_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g

$$C_{méc} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (I.9)$$

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{méc} \quad (I.10)$$

I.7.3. Schéma bloc du modèle de la turbine

Une représentation globale du modèle de cette turbine utilisant le schéma bloc correspondant à cette modélisation est représenté sur la figure (I.13).[11].

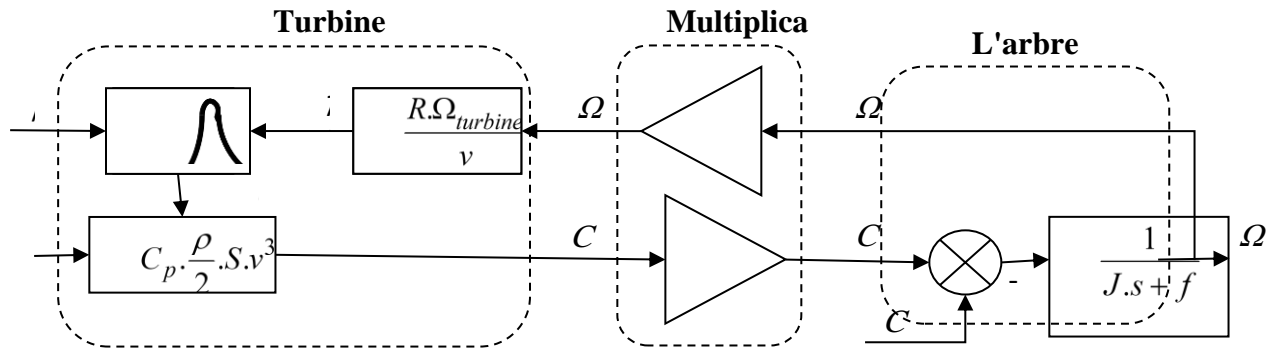


Figure (I.13). Schéma bloc du modèle de la turbine

I.8. Techniques d'extraction du maximum de la puissance

Dans cette partie, nous présenterons différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique (figure I.10) de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T.) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne. On distingue

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique;
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

Dans notre travail nous nous intéressons au contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique.

I.7.1. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Plusieurs dispositifs de commande peuvent être envisagés.

La vitesse est influencée par l'application de trois couples:

Un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant.

En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} .

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (C_g - f \cdot \Omega_m - C_{em}) \quad (I.11)$$

Le modèle de la turbine se simplifie. La structure de commande obtenue consiste à réglerle

couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. [12].

On peut écrire:

$$C_{em-ref} = PI(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \tag{I.12}$$

On prenant en compte le gain du multiplicateur on a

$$\Omega_{ref} = G \cdot \Omega_{tur-ref}$$

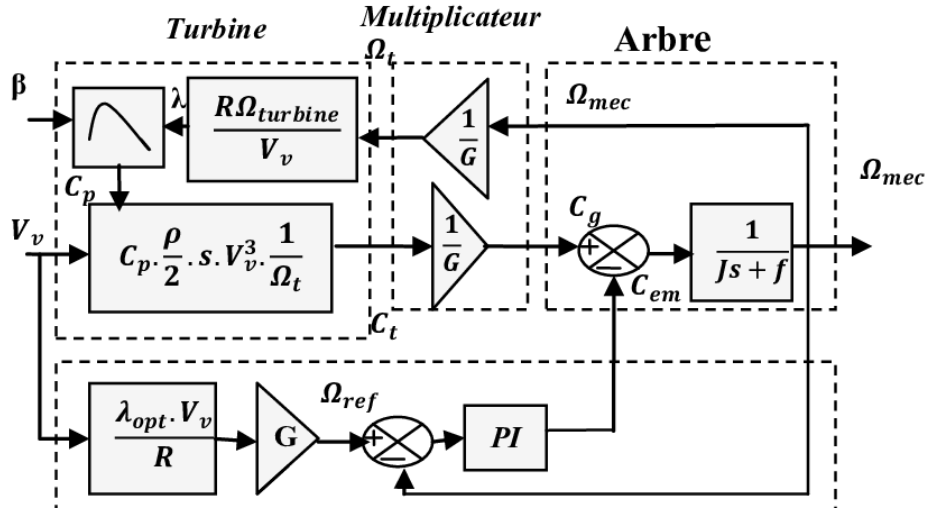
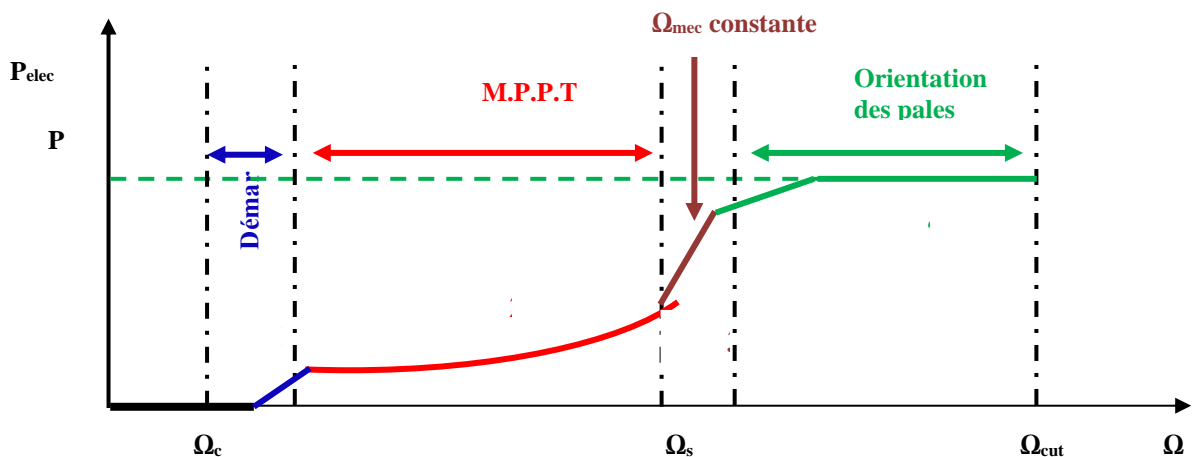


Figure (I.14). Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.

I.9. Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable

Il y a quatre zones de fonctionnement pour une éolienne figure (I.15) :



Figure(I.15). Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance.

Zone 1: C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse $\Omega_{dé}$. (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour

laquelle éolienne a démarré).

Zone 2: Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un C_p maximal (Coefficient de puissance). Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.

Zone 3: Dans cette zone l'éolienne fonctionne à vitesse constante, et la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .

Zone 4: Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales.

Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'en dommer l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90° . C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

En pratique le passage de la zone 2 à la zone 4 est un peu particulier. En effet la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique C_{em} en zone 2 et, en zone 4 c'est la puissance qui doit être contrôlée par le dispositif d'orientation des pales.

Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la zone 2 ou la maximisation de l'énergie électrique extraite (MPPT), cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique généré.[13]

I.10. Résultats de la simulation

Dans cette partie, nous avons simulé le fonctionnement de la chaîne éolienne en appliquant l'algorithme MPPT pour extraire le maximum de puissance d'un profil de vent de vitesse moyenne 10 m/s (figure I.16).

Cet algorithme va fixer l'angle d'orientation $\beta = 0$, le coefficient de performance à $C_{p_max} = 0.48$ et $\lambda_{opt} = 8.1$.

Les résultats obtenus sont présentés sur les figures ci-dessous:

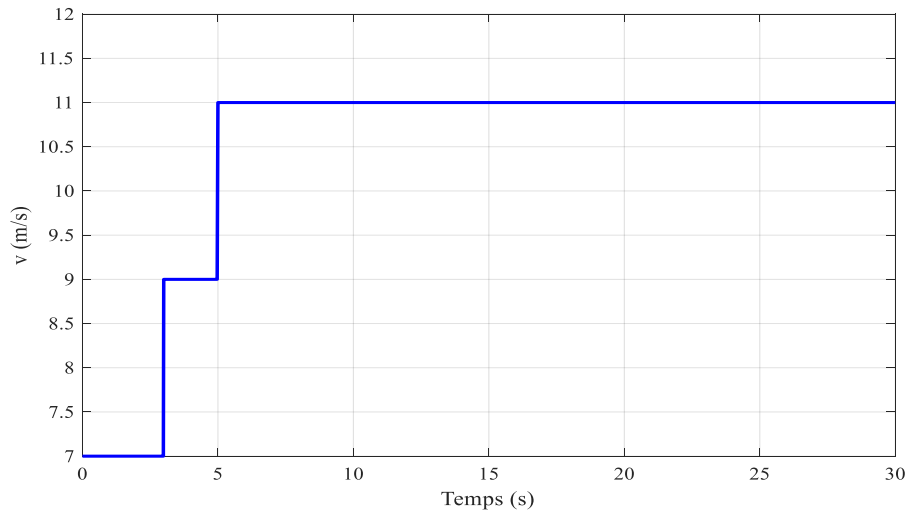


Figure (I.16). Vitesse du vent en fonction du temps.

La figure (I.16) montre la variation de la vitesse du vent en fonction du temps, la vitesse du vent varie entre (7 et 11 m/s).

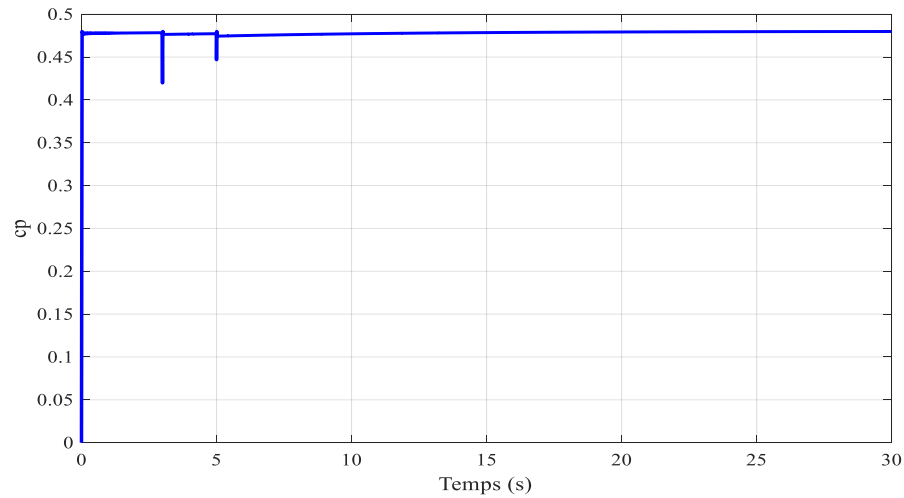


Figure (I.17). Coefficient de puissance C_p de la turbine.

La figure (I.17) montre l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable et β fixée, le coefficient C_p prend toujours une valeur constant $C_p=0.48$

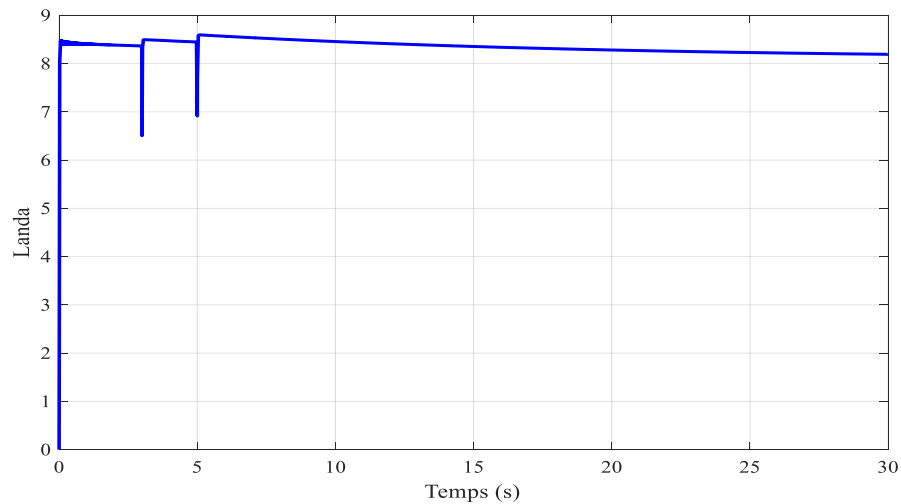


Figure (I.18). Coefficient λ de la turbine.

La figure (I.18) montre l'évolution du coefficient λ en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable ; l'allure de la courbe est constante de la valeur ($\lambda=8.1$).

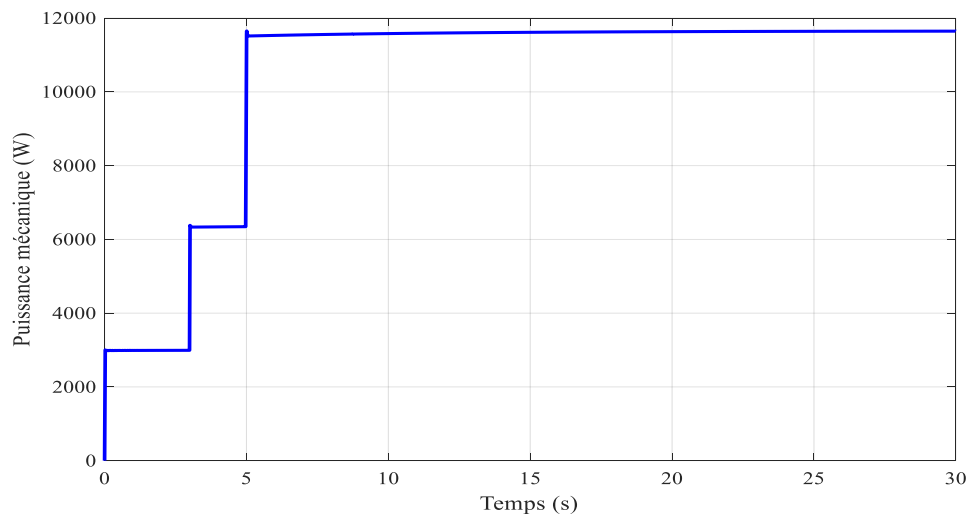
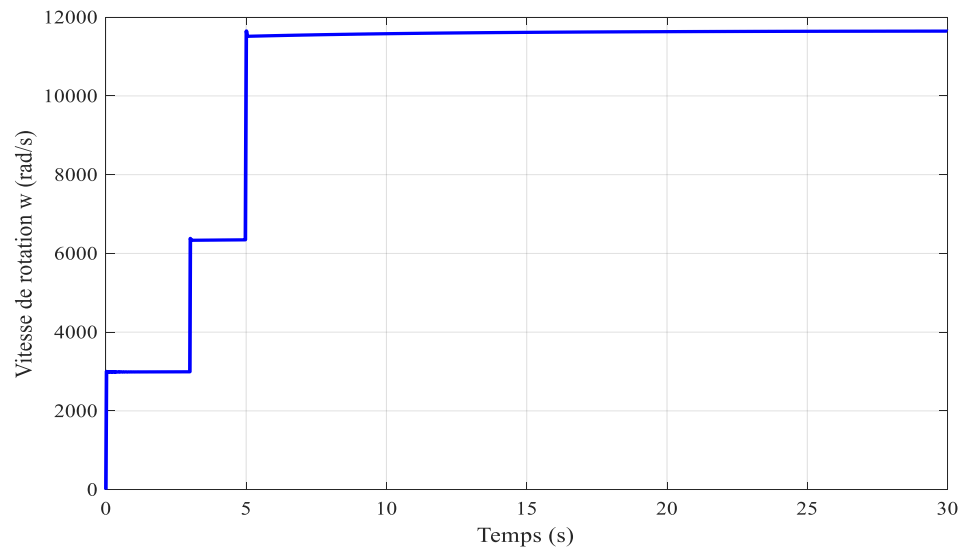


Figure (I.19). Puissance mécanique de la turbine.

La figure (I.19) montre l'évolution de la puissance mécanique de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable, l'allure de la courbe prend toujours une forme variable environ [0 5] ce qui montre clairement la perturbation que crée le profil du vent sur la puissance mécanique de la turbine, ce qui altère la qualité de l'énergie électrique issue plus tard de la génératrice.



Figure(I.20). Vitesse de rotation de la turbine.

La figure (I.20) montre l'évolution de la vitesse de rotation de la turbine en fonction du temps pour une vitesse du vent variable et β constant, vitesse de rotation de la turbine prend toujours une forme d'allure variable, il se met à varier entre autour de la valeur 5 et 30 ce qui montre clairement l'influence du profil du vent sur la vitesse de rotation de la turbine.

I.11. Conclusion

Nous avons présenté une étude de la turbine. Dans l'objectif de modélisation nous avons décrit le modèle simplifié de différents composants de la turbine (multiplicateur, arbre, turbine). Ainsi que et pour la commande de la turbine nous avons identifié quatre zones de fonctionnement, Et dans ce chapitre, il a été établi une modélisation des différents constituants de la turbine.

Chapitre II.

Modélisation d'un system éolien (Turbine + MPPT + GADA)

Chapitre II.

Modélisation d'un system éolien (Turbine + MPPT + GADA)

II.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter la modélisation de machine asynchrone à double alimentation. Pour étudier le générateur en régime de fréquence variable et avec des signaux fournis par l'onduleur triphasée commandée par la technique de commande MLI, il faut faire on considère que chaque armature triphasée statorique et rotorique peut être représentée par une armature diphasée équivalente à l'aide de la transformation de PARK .

II.2. Description du Fonctionnement de la MADA

II.2.1. Structure de la Machine

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.[13]

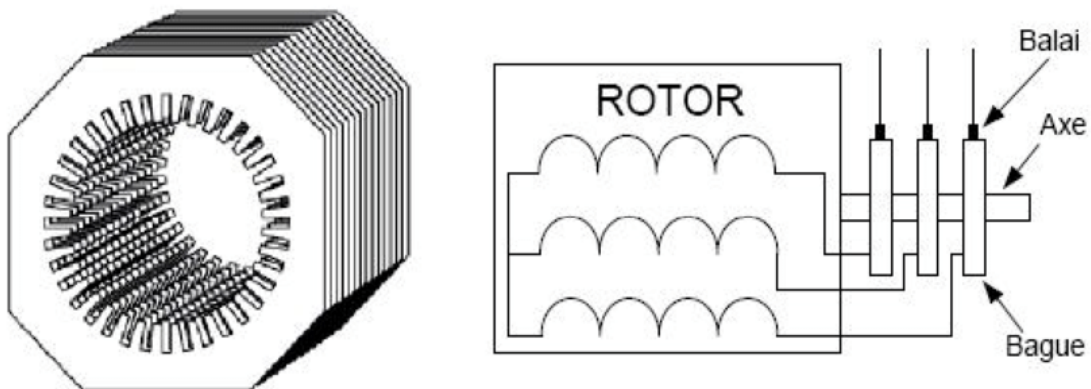


Figure (II.1). Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA.

II.2.2. Principe de fonctionnement

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné peut être transformée en génératrice à vitesse variable en contrôlant l'écoulement de puissance entre le rotor et le réseau. Suivant les sens du transfert de puissance entre le rotor et le réseau mais aussi entre celui-ci et le stator, la MADA devient ainsi génératrice ou moteur. De plus, les différents modes de fonctionnement de la MADA sont décrits ci-dessous Fig(II.2).[14]

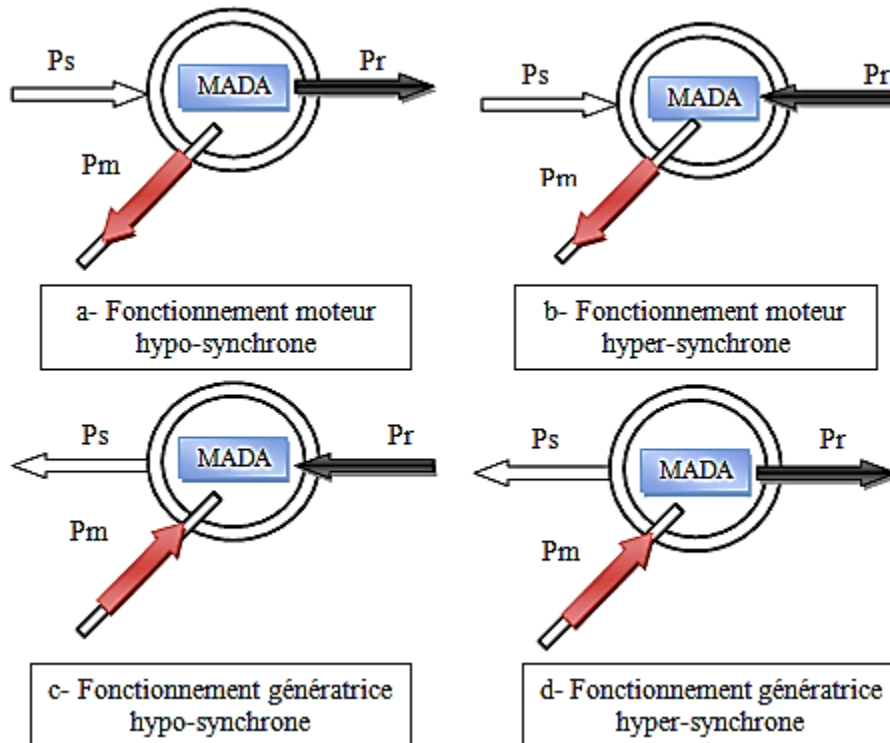


Figure (II.2). Les différents modes de fonctionnement de la MADA.

II.2.2.a. Moteur en hypo synchronisme

Lorsque la machine tourne en dessous de la vitesse de synchronisme l'énergie absorbée du réseau est transformée partiellement en énergie mécanique. L'autre partie est injectée au réseau à travers les contacts glissants du rotor. Pour les moteurs à cage, l'énergie de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

II.2.2.b. Moteur en hyper synchronisme

Le fonctionnement en mode hyper-synchrone du moteur est réalisé lorsque la vitesse de la machine peut varier au-delà de la vitesse de synchronisme, la puissance statorique est fournie par le réseau ainsi que la puissance de glissement. Les machines à cage ne peuvent avoir ce type de

fonctionnement car celui-ci ne peut être obtenu qu'à l'aide d'un accès au rotor via un circuit électronique.

II.2.2.c. Génératrice en hypo synchronisme

L'énergie mécanique est transmise à l'arbre de la machine, celui-ci la fournit au stator, lequel la transmet au réseau. Afin de permettre un fonctionnement hypo synchrone, l'énergie de glissement, provenant du réseau, se doit d'être transmise au rotor. Ainsi pour le fonctionnement générateur hypo synchrone, une alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de la vitesse de rotation. Il est évident qu'un moteur à cage ne peut avoir ce type de fonctionnement, car celui-ci n'a pas d'accès permettant un apport de puissance au rotor.

II.2.2.d. Génératrice en hyper synchronisme

La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g \cdot P_{mec}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.[15]

II.3. Modélisation de la GADA

L'objectif de la modélisation de la génératrice à double alimentation dans le référentielle au champ tournant. Ce dernier nous a permis d'obtenir un modèle mathématique adapté de GADA et commander par l'utilisation de la puissance active et réactive mesurer au niveau du rotor de la GADA [09] .

II.3.1 Hypothèses de simplification

Afin d'établir un modèle simple de la MADA, nous avons pris en considération certaines hypothèses simplificatrices à savoir:

- ❖ La géométrie de la machine est symétrique.
- ❖ Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, au stator et au rotor, la saturation est négligeable.
- ❖ La densité de courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires.
- ❖ Les résistances des enroulements ne dépendent pas de la température.
- ❖ Les forces magnétomotrices créées par le stator ou le rotor ont une répartition Sinusoïdale.
- ❖ L'épaisseur de l'entrefer est uniforme.

II.3.2 Modèle mathématique de la GADA

La GADA présente un stator triphasé identique à celui d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et un rotor constitué d'un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants (balais)[09].

II.3.3 Equations électriques de la MADA

Les enroulements illustrés par la figure (II.3) obéissent aux équations électriques qui s'écrivent sous la forme matricielle suivante.

$$[U_{abc}] = R_s [i_{abc}] + \frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II.1})$$

$$[U_{ABC}] = R_r [i_{ABC}] + \frac{d[\phi_{ABC}]}{dt} \quad (\text{II.2})$$

Où:

R_s : est la résistance d'une phase statorique ;

R_r : est la résistance d'une phase rotorique.

Les matrices suivantes représentent respectivement :

$$[U_{abc}] = [U_a U_b U_c]^t : \text{Le vecteur des tensions statoriques ;}$$

$$[i_{abc}] = [i_a i_b i_c]^t : \text{Le vecteur des courants statoriques ;}$$

$$[\phi_{abc}] = [\phi_a \phi_b \phi_c]^t : \text{Le vecteur des flux statoriques.}$$

On définit de même, par changement d'indices, les vecteurs rotoriques :

$$[U_{ABC}] = [U_A U_B U_C]^t : \text{Le vecteur des tensions rotoriques ;}$$

$$[i_{ABC}] = [i_A i_B i_C]^t : \text{Le vecteur des courants rotoriques ;}$$

$$[\phi_{ABC}] = [\phi_A \phi_B \phi_C]^t : \text{Le vecteur des flux rotoriques.}$$

Les équations des flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques, sont données par les expressions suivantes :

- **Pour le stator :**

$$[\phi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [L_{sr}][i_{ABC}] \quad (\text{II.3})$$

• Pour le rotor :

$$[\phi_{ABC}] = [L_r][i_{ABC}] + [L_{sr}][i_{abc}] \quad (II.4)$$

Où : $[L_s]$ est la matrice des inductances statoriques, elle est donnée par :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{aa} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{aa} \end{bmatrix}$$

$[L_r]$ Est la matrice des inductances rotoriques, elle est donnée par :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AA} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AB} & L_{AA} \end{bmatrix}$$

Et $[L_{sr}]$ est la matrice des inductances mutuelles, entre le stator et le rotor, elle est donnée par:

$$[L_{sr}] = L_{aA} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix}_{AB}$$

Avec :

L_{aa} : C'est l'inductance propre d'une phase statorique ;

L_{ab} : C'est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques ;

L_{AA} : C'est l'inductance propre d'une phase rotorique ;

L_{AB} : C'est l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques ;

L_{aA} : C'est l'inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique.

En introduisant les équations (II.3) et (II.4) dans les équations (II.1) et (II.2) respectivement, on obtient :

$$[U_{abc}] = R_s [i_{abc}] + [L_s] \frac{d[i_{abc}]}{dt} + \frac{d([L_{sr}][i_{ABC}])}{dt} \quad (II.5)$$

$$[U_{ABC}] = R_r [i_{ABC}] + [L_r] \frac{d[i_{ABC}]}{dt} + \frac{d([L_{sr}]^T [i_{abc}])}{dt} \quad (II.6)$$

La dernière relation importante complétant le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, est l'équation fondamentale mécanique décrivant la dynamique du rotor. Cette équation est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} + f_r \Omega_r = C_{em} - C_r \quad (\text{II.7})$$

Où :

J est le moment d'inertie du rotor de la machine en (kg.m²) ;

Ω_r est la vitesse angulaire mécanique du rotor en (rad/s) ;

Avec :
$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{p}$$

Tel que :

p : est le nombre de paires de pôles ;

Ω_r : est la vitesse angulaire électrique de rotation du rotor ;

f_r : est le coefficient de frottement en (N.m.s/rd) ;

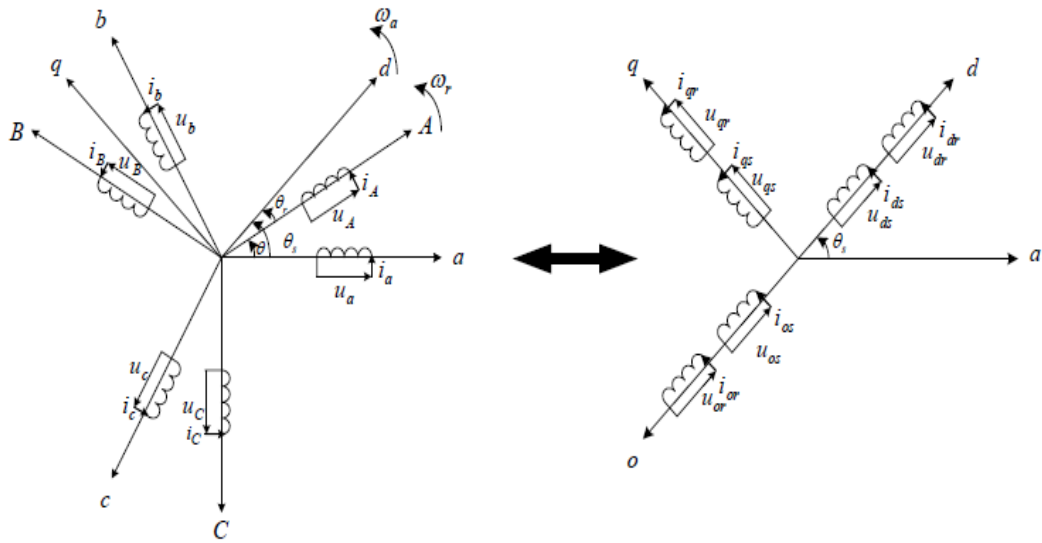
C_{em} : est le couple électromagnétique en (N.m) ;

C_r : est le couple résistant en (N.m).

Le modèle réel de la machine asynchrone à double alimentation est composé d'un ensemble d'équations différentielles ordinaires à coefficients variables en fonction de l'angle de rotation θ (voir la matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor). On utilise la transformation de Park qui permet d'obtenir un système d'équations à coefficients constants, en transformant les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents.[13]

II.4. Application de la transformation de Park à la MADA

Transformation de Park consiste à transformer un système d'enroulements triphasés d'axes a, b, c, en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes d, q créant la même force magnétomotrice. La composante homopolaire intervient pour équilibrer le système transformé, c'est-à-dire, elle ne participe pas à la création de cette fmm de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan (d,q). La condition de passage du système triphasé au système biphasé est la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales. Ceci conduit à la conservation de puissances instantanées et la réciprocité des inductances mutuelles, et permet d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé, qui reste invariable pour la machine réelle. Le schéma de la figure (II-2) montre le principe de la transformation de Park appliquée à la machine asynchrone à double alimentation.[14]



Figure(II.3). Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.

Où :

θ : est l'angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique a ;

θ_r : est l'angle entre l'axe rotorique A, et l'axe de Park direct d ;

θ_s : est l'angle entre l'axe statorique a, et l'axe de Park direct d ;

ω_a : est la vitesse angulaire du système d'axes (d, q) ;

ω_r : est la vitesse angulaire électrique rotorique.

Grâce à cette transformation, on définit une matrice unique appelée matrice de Park donnée par :

$$[A] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Les grandeurs statoriques et rotoriques dans le repère de Park sont exprimées en utilisant les deux transformations suivantes :

- Pour le stator :

$$[X_{dqo}]_s = [A_s][X_{abc}] \quad (II.8)$$

-Pour le rotor :

$$[X_{dqo}] = [A_r][X_{ABC}] \quad (II.9)$$

Telle que X est une grandeur qui peut être une tension U, un courant I, ou un flux ϕ .

Avec :

$$[A_s] = [A(\psi = \theta_s)] \text{ et } [A_r] = [A(\psi = \theta_r)].$$

II.4.1 Mise en équation de la MADA dans le repère de Park:

Dans le repère de Park, on a les transformations suivantes :

- Pour les tensions :

$$[U_{dqo}]_s = [A_s][U_{abc}] \quad (\text{II.10})$$

$$[U_{dqo}]_r = [A_r][U_{ABC}] \quad (\text{II.11})$$

- Pour les courants :

$$[i_{dqo}] = [A_s][i_{abc}] \quad (\text{II.12})$$

$$[i_{dqo}] = [A_r][i_{ABC}] \quad (\text{II.13})$$

- Pour les flux :

$$[\phi_{dqo}]_s = [A_s][\phi_{abc}] \quad (\text{II.14})$$

$$[\phi_{dqo}] = [A_r][\phi_{ABC}] \quad (\text{II.15})$$

II.4.2. Equations des tensions

Pour le stator, on a :

$$[U_{abc}] = R_s [i_{abc}] + \frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II.16})$$

En multipliant l'équation (II.16) par la matrice $[A_s]$, il vient :

$$[A_s][U_{abc}] = [A_s]R_s [i_{abc}] + [A_s]\frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II.17})$$

Alors :

$$[U_{dqo}] = R_s [i_{dqo}] + [A_s]\frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II.18})$$

Le développement de l'équation (II.18) donne :

$$U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_a \phi_{qs} \quad (\text{II.19})$$

$$U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_a \phi_{ds} \quad (\text{II.20})$$

$$U_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \quad (\text{II.21})$$

Où : $\omega_a = \frac{d\theta_s}{dt}$ est la vitesse angulaire du système d'axes (d,q).

En procédant d'une façon analogue à celle du stator, on trouve pour le rotor :

$$U_{dr} = R_s i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \phi_{qr} \quad (\text{II.22})$$

$$U_{qr} = R_s i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \phi_{dr} \quad (\text{II.23})$$

$$U_{or} = R_s i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \quad (\text{II.24})$$

II.4.2. Equations des flux

Pour le stator, en multipliant l'équation (II.3) par $[A_s]$ on trouve:

$$[A_s] [\phi_{abc}] = [A_s] [L_s] [i_{abc}] + [A_s] [L_{sr}] [i_{ABC}] \quad (\text{II.25})$$

Donc :

$$[\phi_{dgo}] = [A_s] [L_s] [i_{abc}] + [A_s] [L_{sr}] [i_{ABC}] \quad (\text{II.26})$$

Après la simplification, on trouve :

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \quad (\text{II.27})$$

$$\phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \quad (\text{II.28})$$

$$\phi_{os} = L_s i_{os} \quad (\text{II.29})$$

Pour le rotor, et de la même manière, on trouve :

$$\phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \quad (\text{II.30})$$

$$\phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \quad (\text{II.31})$$

$$\phi_{or} = L_r i_{or} \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$L_s = L_{aa} - L_{ab}$: est l'inductance cyclique statorique ;

$L_{os} = L_{aa} + 2 L_{ab}$: est l'inductance homopolaire statorique ;

$M = \frac{2}{3} L_{aA}$: est l'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor ;

$L_r = L_{AA} - L_{AB}$: est l'inductance cyclique rotorique ;

$L_{or} = L_{AA} + 2 L_{AB}$: est l'inductance homopolaire rotorique

Jusqu'à maintenant, le modèle de Park n'est pas complètement défini, puisque la vitesse de rotation ω_a du repère (d,q) par rapport au stator est quelconque. Les équations des tensions sont affectées, par le choix du référentiel, c'est-à-dire de la vitesse de rotation ω_a . [15]

II.4.3 Choix du référentiel

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiel. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique :

➤ **Référentiel lié au stator:** Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (α, β). Dans ce choix, ($\omega_a = 0$). Les équations électriques de la machine deviennent :

Au stator:

$$U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \quad (\text{II.33})$$

$$U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} \quad (\text{II.34})$$

$$U_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \quad (\text{II.35})$$

Au rotor:

$$U_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} + \omega_r \phi_{qr} \quad (\text{II.36})$$

$$U_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_r \phi_{dr} \quad (\text{II.37})$$

$$U_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \quad (\text{II.38})$$

➤ **Référentiel lié au rotor:**

Dans ce cas, le système d'axes (d,q) tourne avec la vitesse ($\omega_a = \omega_r$) [4]. Les équations électriques de la machine dans ce référentiel deviennent :

Au stator :

$$U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_r \phi_{qs} \quad (\text{II.39})$$

$$U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_r \phi_{ds} \quad (\text{II.40})$$

$$U_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \quad (\text{II.41})$$

Au rotor :

$$U_{dr} = R_s i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} \quad (\text{II.42})$$

$$U_{qr} = R_s i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} \quad (\text{II.43})$$

$$U_{or} = R_s i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \quad (\text{II.44})$$

➤ Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (X,Y) ce axe il tourne avec la vitesse du champ électromagnétique, c'est-à-dire($\omega_a=\omega_s$) les équations électriques deviennent :

Au stator:

$$U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \quad (\text{II.45})$$

$$U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \quad (\text{II.46})$$

$$U_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \quad (\text{II.47})$$

Au rotor:

$$U_{dr} = R_s i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \quad (\text{II.48})$$

$$U_{qr} = R_s i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \quad (\text{II.49})$$

$$U_{or} = R_s i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \quad (\text{II.50})$$

II.5. Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park

La forme générale du couple électromagnétique d'une machine asynchrone triphasée modélisée dans le repère de Park [6] est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{3pM}{2L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) = \frac{3p}{2} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{II.51})$$

II.6. Modèle de la MADA dans le repère de Park sous forme d'état

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statorique et rotorique. En considérant les courants statorique et rotorique comme des vecteurs d'état, alors le modèle de la MADA est donnée par l'équation d'état suivante:[16]

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} = A.X + B.U \quad (\text{II.52})$$

Avec:

X : Vecteur d'état.

A : Matrice d'évolution d'état du système.

B : Matrice de commande.

U : Vecteur du système de commande.

Où:

$$X = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq}]^T ;$$

$$U = [V_{sd} \ V_{sq} \ V_{rd} \ V_{rq}]^T ;$$

- Pour la représentation matricielle de le mode le de la machine:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \\ & \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.53}) \end{aligned}$$

On pose:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix}$$

Alors l'équation (II.52) dévient:

$$\frac{dX}{dt} = [L]^{-1} \cdot [Z] \cdot X + [L]^{-1} U \quad (\text{II.54})$$

Avec

$$\begin{cases} A = [L]^{-1} [Z] \\ B = [L]^{-1} \end{cases} \quad (\text{II.55})$$

La matrice $[Z]$ peut être écrite comme suit:

Dans le but de simplifier la réalisation par SIMULINK/MATLAB la matrice $[Z]$ peut être décomposée de la forme suivante:

$$[Z] = -[Z_1] - \omega \cdot [Z_2] + \omega_s \cdot [Z_3] \quad (\text{II.56})$$

Avec :

$$[Z_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}, [Z_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}, [Z_3] = \begin{bmatrix} 0 & L_s & 0 & M \\ -L_s & 0 & -M & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.57})$$

II.7. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

On rappelle d'abord le système d'équations différentielles de la machine :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (II.58)$$

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statoriques et rotoriques. En considérant les flux statoriques et les courants rotoriques comme des vecteurs d'état. Les équations (II.2) peuvent être disposées sous la forme d'une représentation d'état comme suite :

II.8. Expressions des Puissances Active et réactive

Les expressions des puissances active et réactive sont données par:[17]

$$\begin{aligned} P_s &= v_{sd} \cdot i_{sd} - v_{sq} \cdot i_{sq} \\ Q_s &= v_{sq} \cdot i_{sd} - v_{sd} \cdot i_{sq} \end{aligned} \quad (II.64)$$

Pour réaliser la simulation de la MADA ; nous peut transférer le modèle représenté parces équations sous forme de structure en schéma bloc qui est présenté sur la figure (II.5).

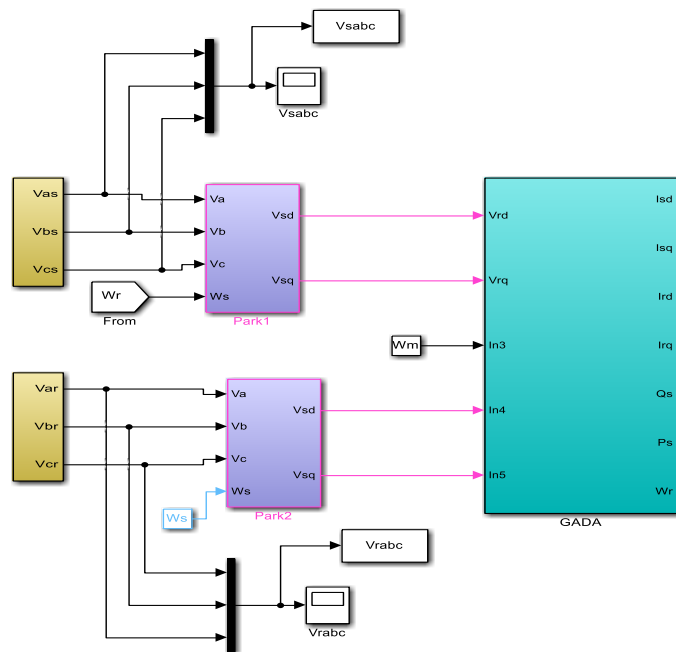


Figure (II.4) Schéma bloc de la simulation de la GADA.

II.9. Résultat de simulation de la MADA

✚ Pour l'alimentation rotorique en court-circuit, nous avons appliqué un couple de charge d'une valeur de 5 N.M à l'instant de $t=2s$.

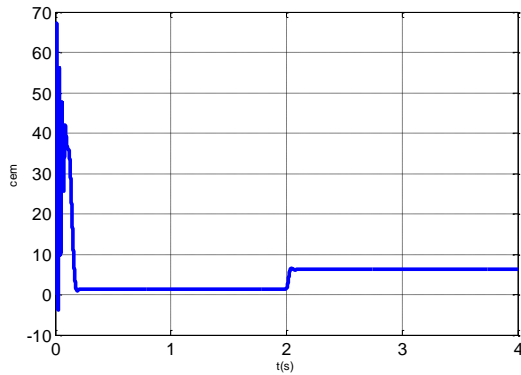


Figure (II.5). Le couple électromagnétique

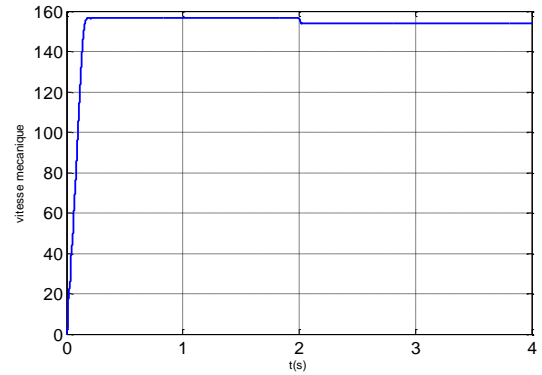


Figure (II.6). La vitesse mécanique

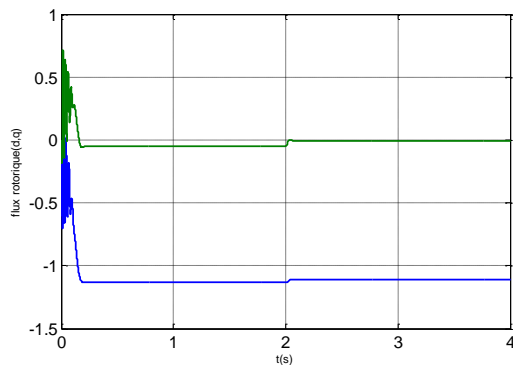


Figure (II.7). le flux statorique d,q.

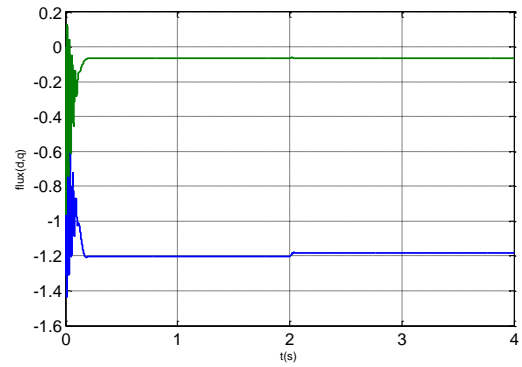


Figure (II.8). le flux rotorique d,q.

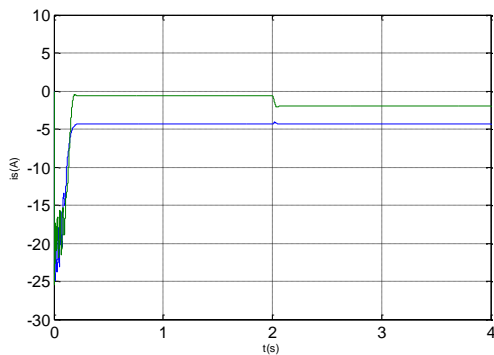


Figure (II.9). Les courants statorique.

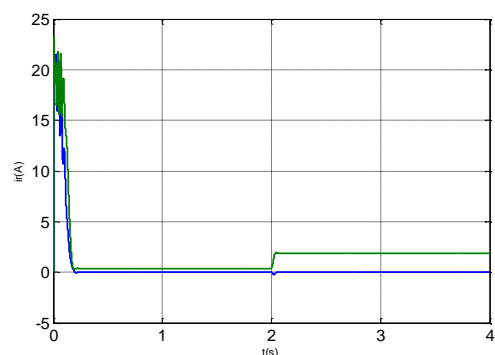


Figure (II.10). Le courants d,q rotorique

- ✚ Pour l'amplitude de l'alimentations rotorique ($V_r=12v$, avec une fréquence rotorique $f_r=1.6HZ$), Avec applique une couple de charge s'une valeur de 5 N.M à l'instant de $t=8s$.

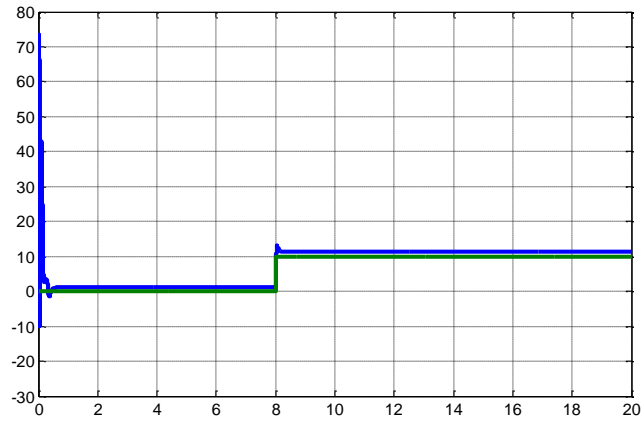


Figure (II.11). Le couple électromagnétique

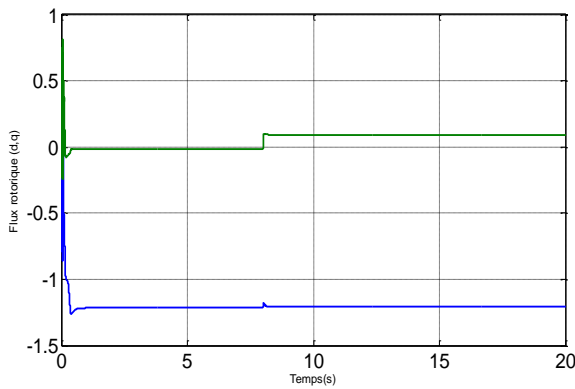


Figure (II.12). le flux rotorique

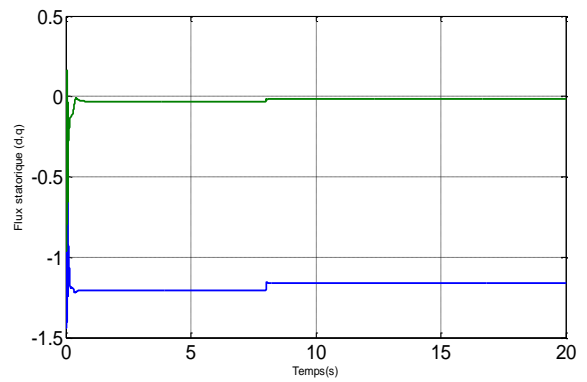


Figure (II.13). le flux statorique

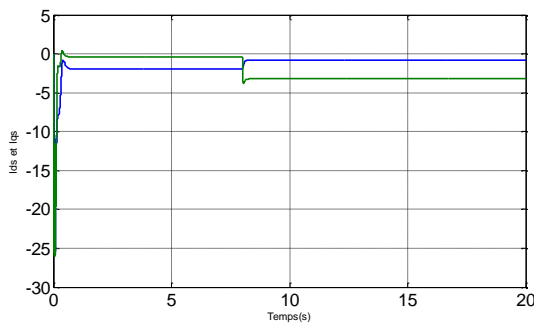


Figure (II.14). Les courant statoriques d,q

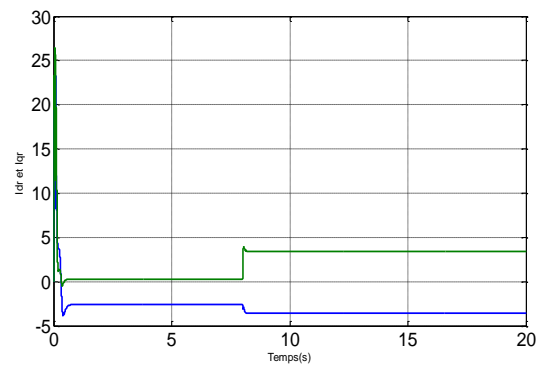


Figure (II.15). Les couratns rotorique d,q.

II.10. Interprétation de résultat de simulation

Les résultats de simulation de la machine asynchrone fonctionnant en moteur à rotor en court-circuit sont présentés sur les figures (II.6), (II.7), (II.8), (II.9), (II.10) concernant respectivement le couple, la vitesse, et le flux de stator, le flux de rotor, et les courants statorique et rotorique. D'après ces résultats on remarque que le régime transitoire est oscillatoire pour toutes les grandeurs de la machine. Après que le régime permanent s'établi, on applique à l'instant $t=2s$, un couple de charge à la machine $C_r=5Nm$. Après l'application de cette perturbation, nous observons une bonne stabilité de ce système.

Les résultats de simulation montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement générateur, alimenté directement par deux sources de tensions triphasées parfaites. L'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est de 50 Hz et d'amplitude 220V, et l'autre au niveau du rotor avec une fréquence rotorique qui est de $f_r=1.6Hz$ et d'amplitude 12V. Ainsi on applique à l'instant $t=8s$, un couple de charge à la machine $C_r=5Nm$. Après l'application de cette perturbation, nous observons par les figures II, une bonne stabilité de ce système.

II.11. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation, sa structure, son principe de fonctionnement et sa loi de commande ainsi que ses domaines d'applications. Pour ce dernier, on a appliqué la technique de la MLI à hystérésis pour le commander. La modélisation de la MADA et de son système d'alimentation a pour but de faciliter la mise en œuvre de la commande. La commande vectorielle sera le sujet du chapitre suivant.

Chapitre III.

La commande vectorielle d'un

GADA

Chapitre III.

La commande vectorielle d'un GADA

III.1. Introduction

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par orientation du flux, statorique, rotorique ou entrefer dans un repère (d,q) tournant à la vitesse de rotation du champ tournant. Où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique nécessaire pour la faire tourner [16],[18].

III.2. Généralités sur la commande vectorielle

La commande vectorielle par orientation du flux présente une bonne solution pour réaliser des meilleures performances dans les applications à vitesse variable d'un système éolien. Dans notre travail nous avons proposé une loi de commande de la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée dans le cas de la MADA fonctionné en génératrice.

III.3. Principe de la commande vectorielle

La commande par orientation de flux est une technique de commande dans le domaine des machines asynchrones à double alimentation. Le principe de cette commande est de ramener le comportement de la GADA à celui d'une machine à courant continu à excitation séparé, à partir la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Afin d'obtenir un découplage flux courant et couple courant, ce qui nous permet de faire un contrôle du couple indépendamment de flux [21].

Suivant cette orientation du repère il ya :

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux d'entrefer.

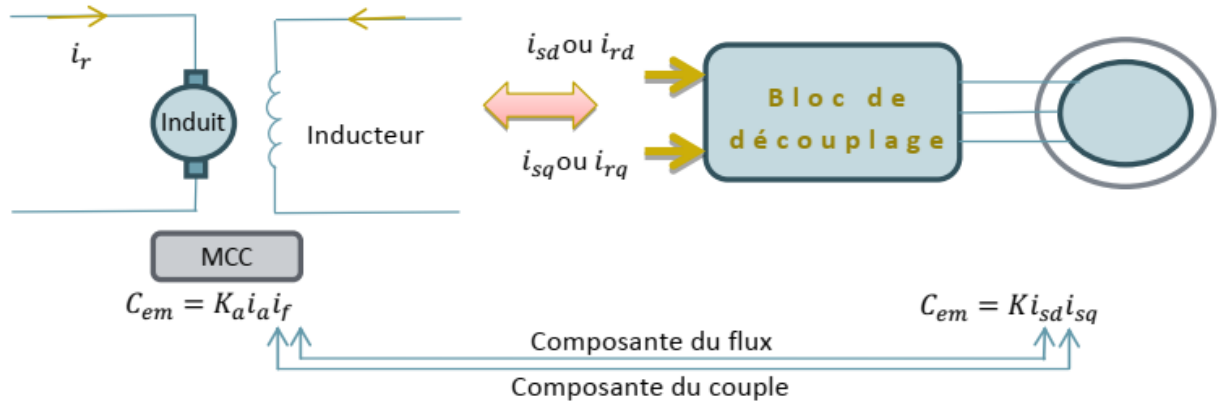


Figure (III.1). Analogie entre MCC à excitation séparée et MADA.

III.4. Choix du référentiel pour le modèle diphasé

En appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine (orientant le repère de Park pour que le flux statorique suivant l'axe q soit constamment nul).

Nous pouvons écrire :

$$\phi_{ds} = \phi_s, \phi_{qs} = 0$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + w_s \cdot \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (w_s - w_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (w_s - w_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (III.1)$$

Dans le repère triphasé (a, b, c), la tension aux bornes d'une phase n du stator s'exprime par la relation générale :

$$V_{ns} = R_s I_{ns} + \frac{d\phi_{ns}}{dt} \quad (III.2)$$

On néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse pour les machines de forte puissance utilisées dans le domaine de production d'énergie éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à [16] :

$$V_{ns} = \frac{d\phi_{ns}}{dt} \quad (III.3)$$

Cette relation montre qu'un repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur de tension statorique et qu'il est en avance de $(\pi / 2)$ sur ce même vecteur. Toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant, on peut écrire :

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

Le principe d'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la figure (III.2) [17].

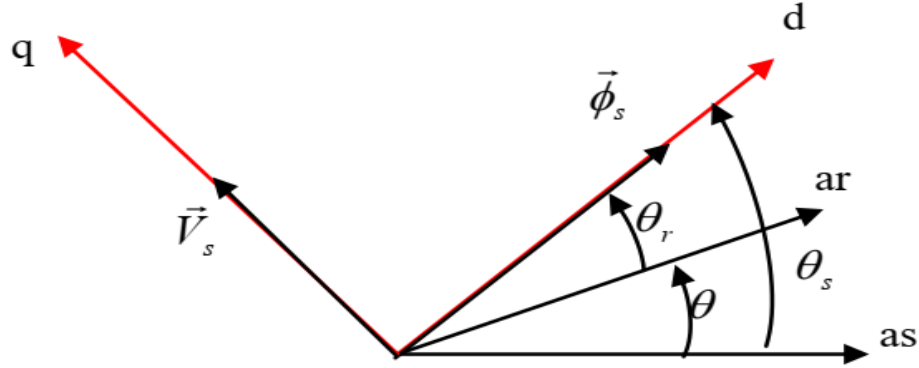


Figure (III.2). Orientation du flux statorique.

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_e = n_p \frac{M}{L_s} \phi_{ds} \cdot I_{qr} \quad (\text{III.5})$$

Ici l'expression des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \phi_{ds} = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \phi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

A partir des équations (III.7), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques:

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent:

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{ds}=0$) donne:

$$\begin{cases} P_s = V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (III.4) dans l'équation (III.6), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qs} \\ Q_s = V_s \frac{\phi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

En tirant ($\phi_s = V_s / \omega_s$) de l'équation (III.11), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} I_{dr} \quad (\text{III.12})$$

Ces équations montrent qu'on a un découplage entre les commandes des puissances où la puissance active peut être commandée par la composante en quadrature du courant I_{qr} . La puissance réactive peut être commandée par la composante directe du courant I_{dr} [22].

On considère les tensions rotoriques V_{dr} , V_{qr} comme variables de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté et les courants rotoriques I_{dr} , I_{qr} comme variables d'état. Ces grandeurs sont en fonction des grandeurs de consigne P_{sref} et Q_{sref} .

$$\begin{cases} P_{sref} = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qrref} \\ Q_{sref} = \frac{V_s \phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{drref} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Les équations des flux

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{qs} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} = L_s I_{ds} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions, on aura :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (III.15)$$

A partir de ces équations, les expressions des tensions deviennent :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_s I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_s I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (III.16)$$

V_{dr} et V_{qr} : sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus ;

$\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est le terme de couplage entre les deux axes ;

$g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

Les équations (III.13), (III.16) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler figure (III.3).

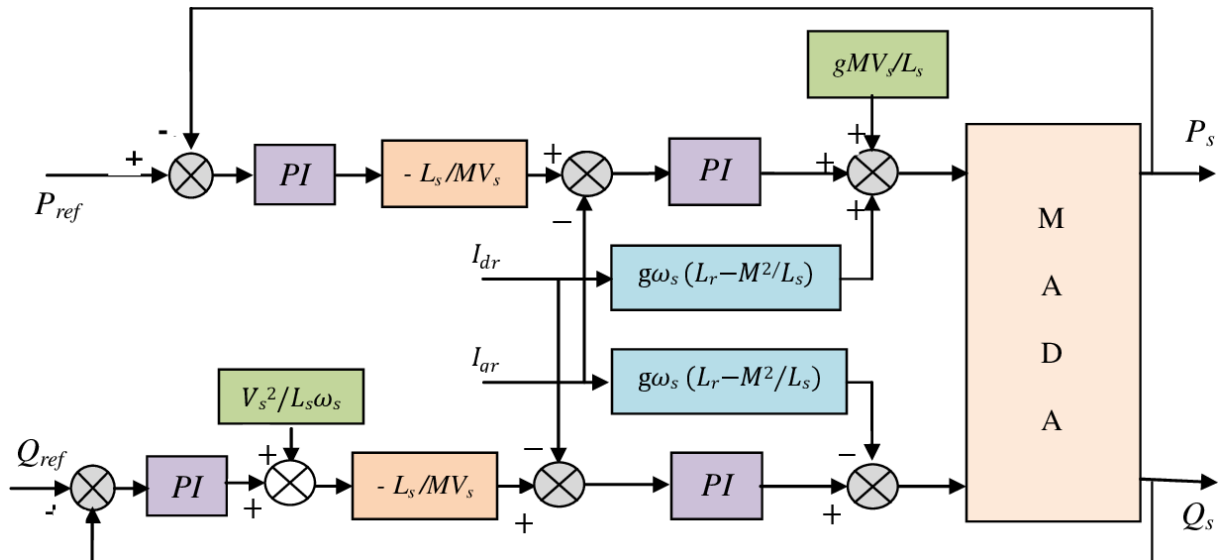


Figure (III.3). Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la GADA alimentée en tension.

III.5. Modélisation de l'onduleur

L'onduleur (le convertisseur de puissance) alimenté par une source de tension parfaite impose à sa sortie, à partir de l'ouverture et de fermeture des interrupteurs (semi-conducteurs IGBT), pour commander ces interrupteurs nous avons adopté la technique MLI sinus triangle

La symétrie des onduleurs à deux niveaux permet leur modélisation par bras. Après avoir modélisé chaque IGBT par un seul interrupteur bidirectionnel, Il devient possible de déduire un modèle complet de l'onduleur (Figure III.4)

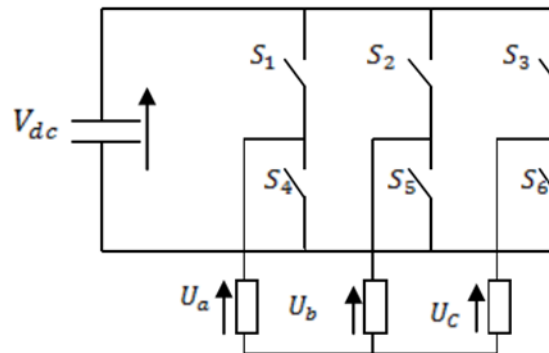


Figure (III. 4). Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

Pour exprimer les tensions de lignes en fonction de la tension dans l'étage continu et de l'état des commutateurs, les variables doivent d'être définies en fonction de l'état des commutations dans les trois branches :

$$S_a = 0 \text{ si } S_1$$

L'état des commutateurs, les variables S_a , S_b , et S_c doivent d'être définies en de l'état des commutations dans les trois branches :

Branche 1 :

$S_a = 0$ Si S_1 est ouvert et S_4 est fermé.

$S_a = 1$ Si S_1 est fermé et S_4 est ouvert.

Branche 2 :

$S_b = 0$ Si S_2 est ouvert et S_5 est fermé.

$S_b = 1$ Si S_2 est fermé et S_5 est ouvert.

Branche 3 :

$S_c = 0$ Si S_3 est ouvert et S_6 est fermé.

$S_c = 1$ Si S_3 est fermé et S_6 est ouvert.

les tensions composées a la du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{ac} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

Si on considère que les tensions sont équilibrées, on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} U_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ U_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ U_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

III.6 Stratégie de commande de l'onduleur

III.6.1 Modulation de largeur d'impulsions (MLI)

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsions triangule sinusoïdale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance (Figure III.5).

III.6.2 Les paramètres de la MLI

Dans la commande MLI il ya deux paramètres caractérisent cette stratégie :

III.6.3. L'indice de modulation(m)

L'indice de modulation qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{III.23})$$

III.6.4 Le taux de modulation(r)

Le taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_p) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (\text{III.24})$$

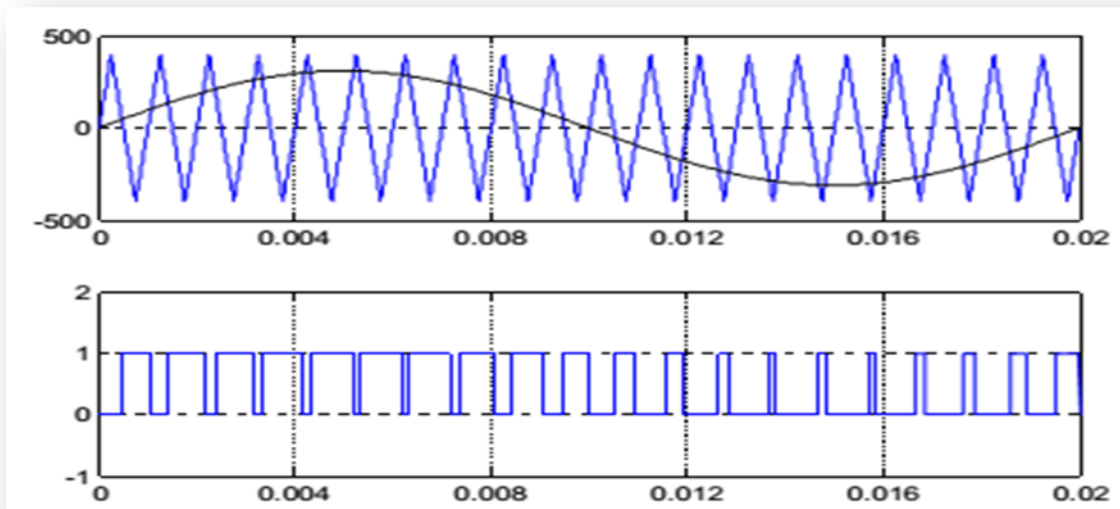


Figure (III. 5). Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulé e sinusoidale une porteuse.

III.7. Commande Directe des Puissances Active et Réactive

Dans cette méthode, nous présentons la régulation indépendante des puissances active et réactive statoriques du GADA en utilisant deux régulateurs PI où la boucle de régulation de la puissance active P_s et la boucle de régulation de la puissance réactive Q_s .

- Tout en compensant les termes de perturbation dans le système qui sont présents la MADA..
- Nous négligerons les termes de couplage de ce système entre les axes d et q de commande, comme présentée sur la figure (III.6).[23]

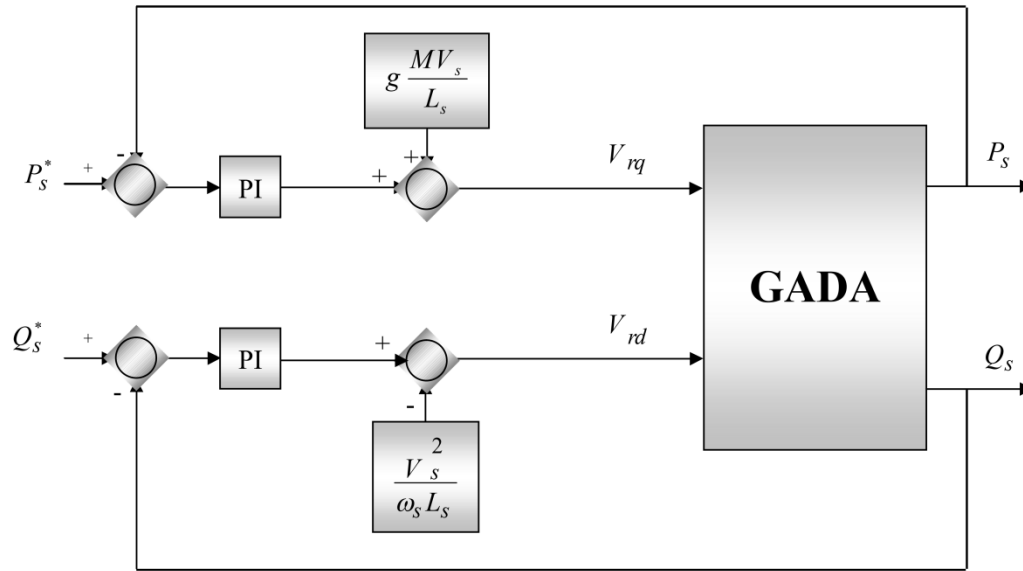


Figure (III.6). Schéma bloc de la commande directe de la puissance active et réactive du GADA.

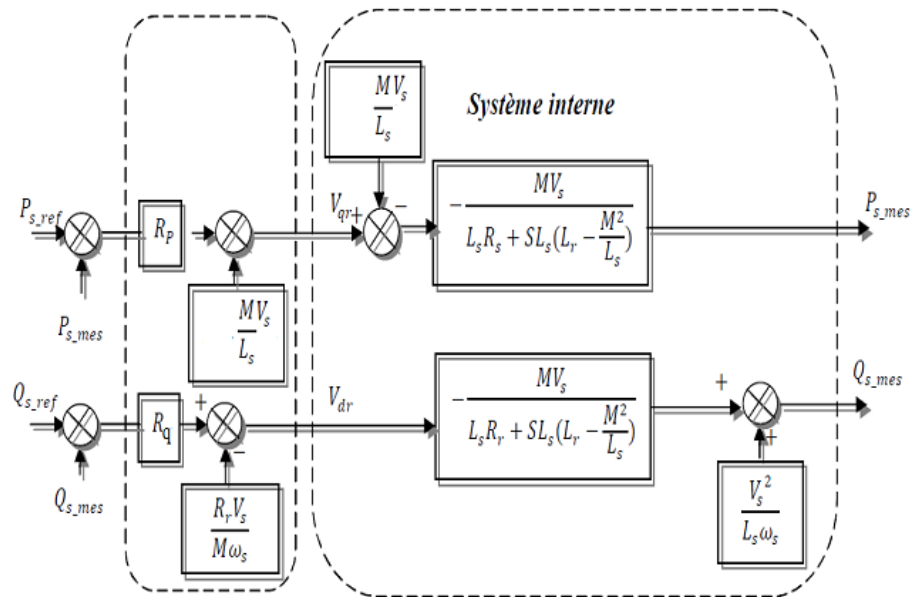


Figure (III.7). Schéma du principe de la commande vectorielle en puissance.

III.7.1. Dimensionnement du Régulateur PI

Pour s'assurer que les puissances active et réactive du GADA suivent leurs consignes, un régulateur PI est indispensable. Le but d'utilisation du régulateur PI est d'assurer une meilleure robustesse vis-à-vis des perturbations internes ou externes.[24]

Les boucles de régulation des puissances active P_s et réactive Q_s peuvent se présenter par le schéma bloc de la figure (III.) :

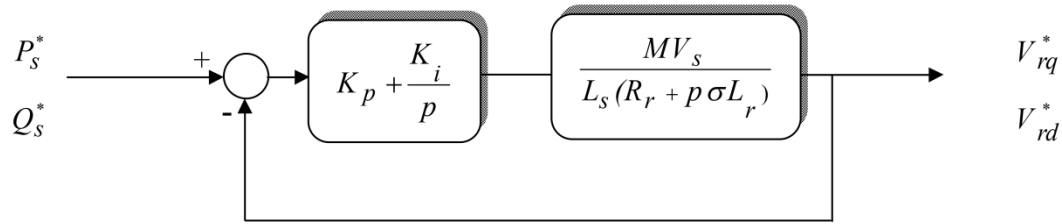


Figure (III.8). Schéma de régulation des puissances P_s et Q_s .

On note que les gains des correcteurs PI sont identiques pour l'axe d et l'axe q . Soit un régulateur PI de fonction de transfert :

$$PI(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (III.13)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) de ce système sera : [25]

$$FTBO(p) = \frac{K_i}{p} \left(p \frac{K_p}{K_i} + 1 \right) \cdot \frac{MV_s / L_s R_r}{(p\sigma T_r + 1)} \quad (III.14)$$

$$\frac{K_p}{K_i} = \sigma T_r \quad (III.15)$$

Où :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

Alors la FTBO s'écrit maintenant :

$$FTBO(p) = \frac{K_i MV_s}{p L_s R_r} \quad (III.16)$$

Afin d'avoir un comportement d'un système du premier ordre dont la fonction de transfert est de la forme :

$$G(p) = \frac{1}{1 + \tau p} \quad (III.17)$$

Donc la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) de ce système sera :

$$FTBO(p) = \frac{1}{1 + p \frac{L_s R_r}{K_i M V_s}} \quad (\text{III.18})$$

On trouve :

$$\tau = \frac{L_s R_r}{K_i M V_s} \quad (\text{III.19})$$

On a : [26]

$$\begin{cases} K_p = K_i \sigma T_r = \frac{\sigma L_s L_r}{\tau M V_s} \\ K_i = \frac{L_s L_r}{\tau M V_s} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

III.8. Commande Indirecte des Puissances Active et Réactive

III.8.1. Commande Indirecte sans Boucles des Puissances

Les courants rotoriques i_{rq} et i_{rd} , sont respectivement les images de la puissance active statorique P_s et la puissance réactive statorique Q_s , doivent poursuivre leurs courants de références.

- Découplage par Compensation :

$$\begin{cases} E_{rd} = g w_s \sigma L_r i_{rq} \\ E_{rq} = -g \frac{M}{L_s} V_s - g w_s \sigma L_r i_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

Puis, on a défini deux nouvelles variables intermédiaires de découplage par deux expressions qui sont:

$$\begin{cases} V_{rd1} = V_{rd} + E_{rd} \\ V_{rq1} = V_{rq} + E_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

Le schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA consiste à contrôler ces puissances indirectement par le réglage des deux composantes ; directe et en quadrature du courant rotorique par des régulateurs PI dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer au GADA.[28]

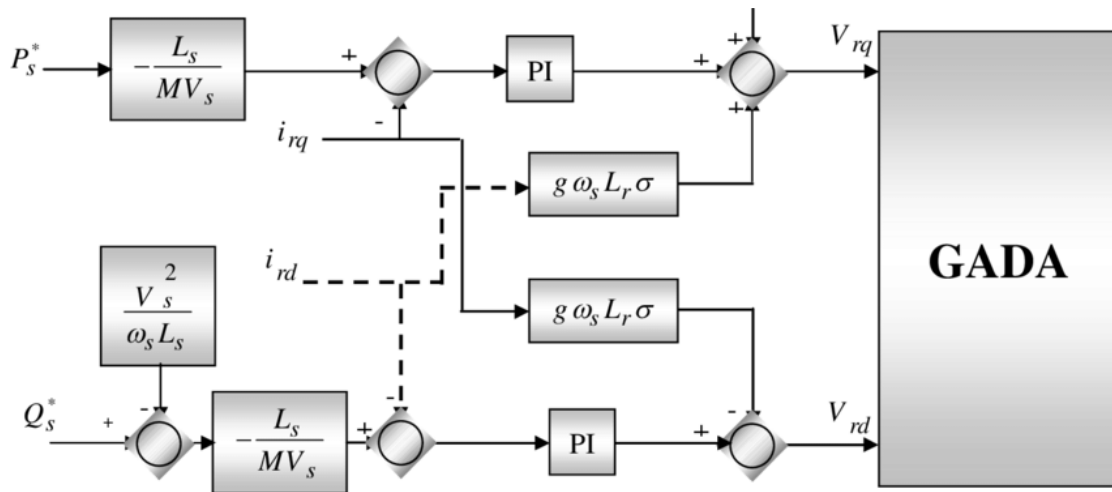


Figure (III.9). Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA.

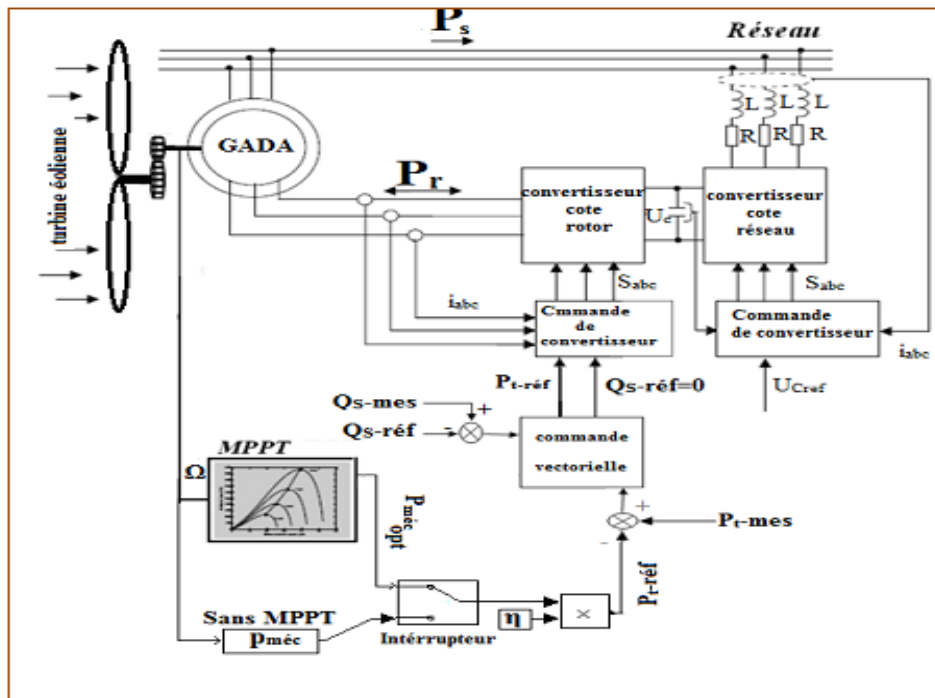


Figure (III.10). Schéma globale de la commande.

III.8.2. Dimensionnement du Régulateur PI

Les fonctions de transferts des courants rotoriques directe et quadrature sont obtenues à partir de l'annulation des termes de découplages par les termes de compensations :[29]

$$\frac{i_{rd}}{V_{rd}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r p} \quad \text{et} \quad \frac{i_{rq}}{V_{rq}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r p}$$

La boucle de régulation des courants i_{rd} et i_{rq} peut se présenter par le schéma bloc de la figure (III.11) [30].

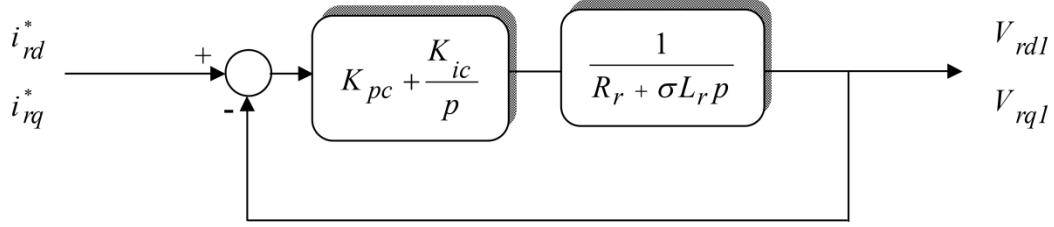


Figure (III.11). Schéma de régulation des courants i_{rd} et i_{rq} .

On note que les gains des correcteurs PI sont identiques pour l'axe d et l'axe q . Soit un régulateur PI de fonction de transfert :

$$PI(p) = K_{pc} + \frac{K_{ic}}{p} \quad (III.23)$$

La FTBO de la figure (III.7) sera :

$$FTBO(p) = \frac{K_{ic}}{p} \left(p \frac{K_{pc}}{K_{ic}} + 1 \right) \frac{1}{R_r \left(1 + \frac{\sigma L_r}{R_r} p \right)} \quad (III.24)$$

Par compensation de pôle ce qui traduit par la condition, on trouve :

$$\frac{K_{pc}}{K_{ic}} = \sigma T_r \quad (III.25)$$

Où :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

Alors la FTBO s'écrit maintenant comme suit :

$$FTBO(p) = \frac{K_{ic}}{R_r \cdot p} \quad (III.26)$$

Donc la FTBF de ce système sera :

$$FTBO(p) = \frac{\frac{K_{ic}}{R_r \cdot p}}{1 + \frac{K_{ic}}{R_r \cdot p}} = \frac{1}{\frac{R_r}{K_{ic}} \cdot p + 1} \quad (III.27)$$

On trouve :

$$\tau = \frac{R}{K_{ic}} \quad (III.28)$$

On a :

$$\begin{cases} K_c = K_{ic} \sigma T_r = \frac{\sigma L_r}{\tau} \\ K_{ic} = \frac{R_r}{\tau} \end{cases} \quad (III.29)$$

III.8.2. Commande Indirecte avec Boucles des Puissances

Afin d'améliorer la commande précédente, nous allons incorporer une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc présenté en figure (III.12) sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance.[32].

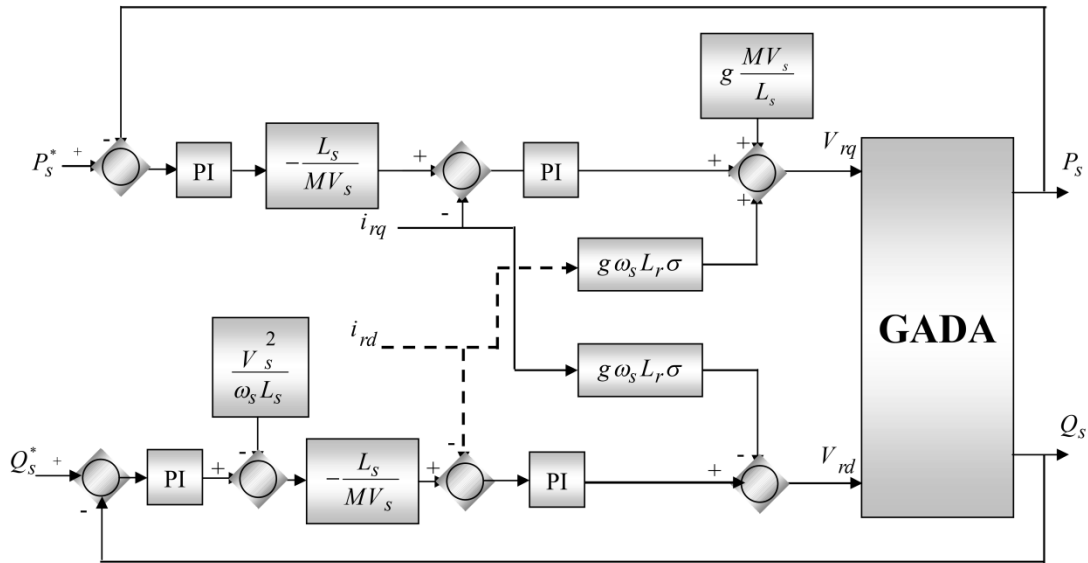


Figure (III.12). Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles des puissances du GADA.

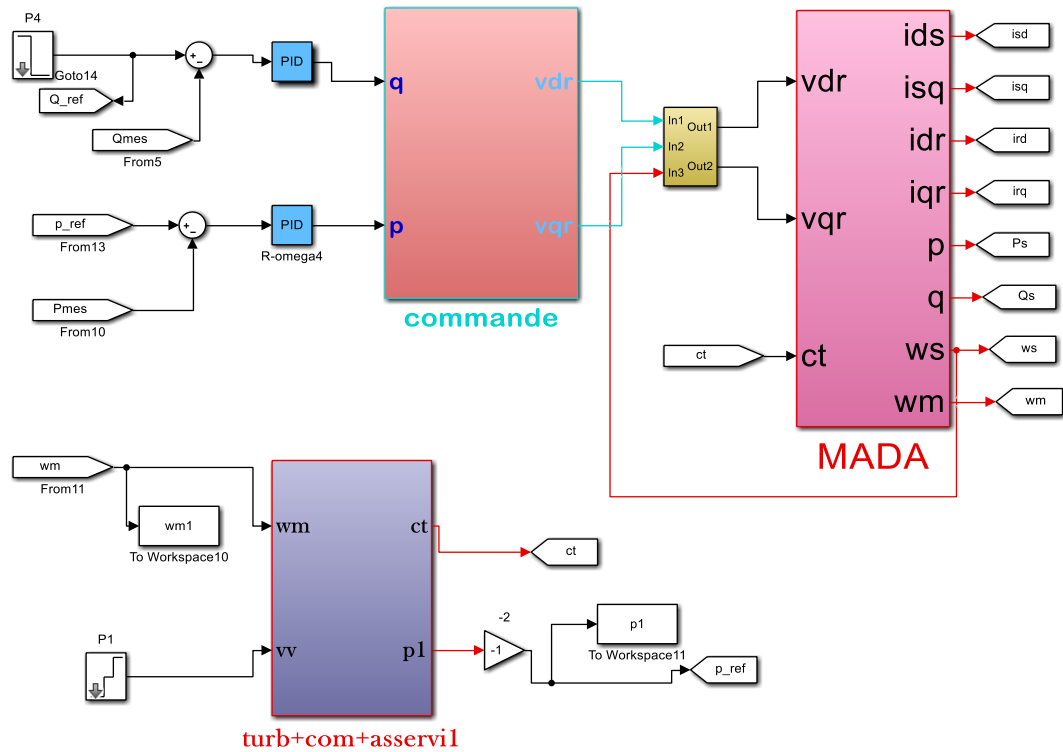


Figure (III.13). Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles des puissances du GADA sous Matlab/Simulink.

Cette commande est donc plus performante que la commande directe qui présente plus de perturbations entre les deux puissances. La commande indirecte avec bouclage des puissances nécessite six capteurs de courant, trois pour contrôler les courants rotoriques et trois associés à trois capteurs de tension pour mesurer les puissances statoriques. Ces puissances seront aussi utilisées pour le contrôle général de l'éolienne afin de déterminer les références de puissance.

III.9. Résultats de Simulation

III.9.1. Profil du Vent en Echelons

La simulation a été réalisée avec le logiciel Matlab/Simulink. Afin de valider la commande en puissances étudiées dans ce chapitre. Pour ces simulations, nous considérons que le système éolien est en régime permanent et qu'il fonctionne dans la zone de fonctionnement optimal (Zone 2), c'est-à-dire qu'il produit le maximum de puissance en fonction de la vitesse du vent. Le profil du vent appliqué au système éolien est un échelon égale à 7m /s entre $t = [0 \ 3]s$, et égale à 8m /s entre $t = [3 \ 5]s$.

Les paramètres d'un système éolien utilisé est donnée dans l'annexe, les résultats de simulation présentent les différents courbes obtenues, tel que les puissances active et réactive statorique, les courants rotorique et statorique, les composants de flux statorique, le coefficient de puissance et la vitesse spécifique λ .

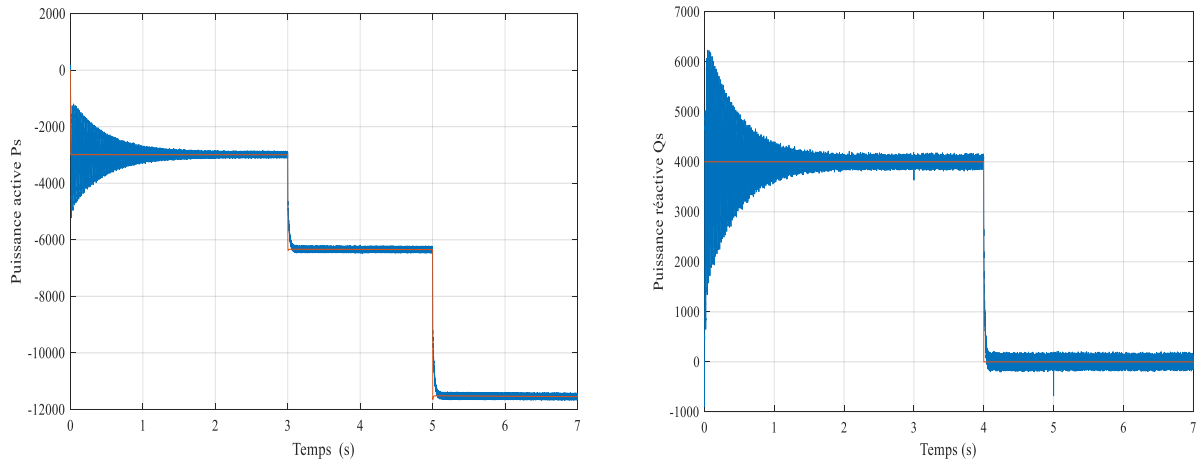


Figure (III.14). la puissance active et reactive statorique

On remarque que la puissance active statorique suit sa référence optimale et possède la même allure de profil du vent appliqué, ainsi la puissance réactive statorique suite 4000VAR et 0VAR respectivement.

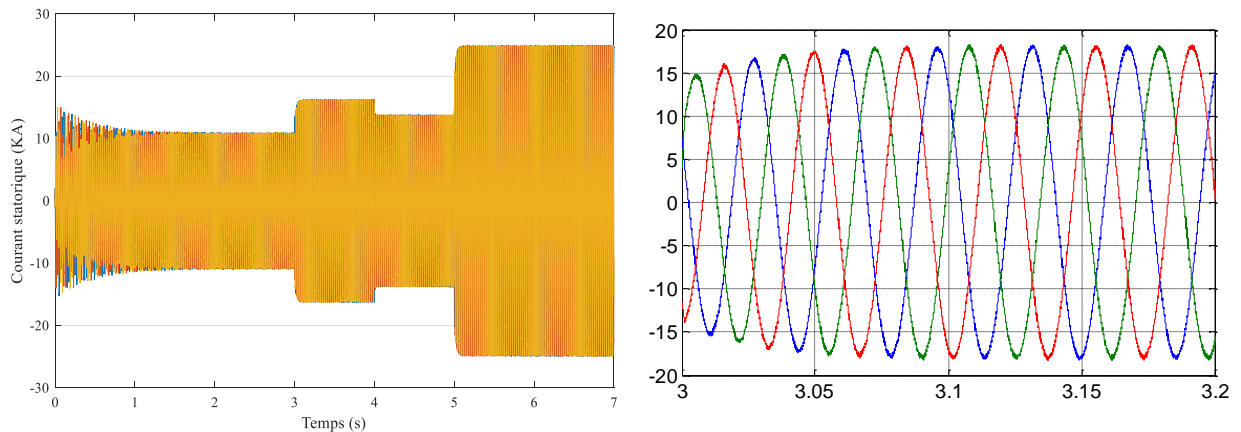


Figure (III.15). Le courant rotorique avec zoom

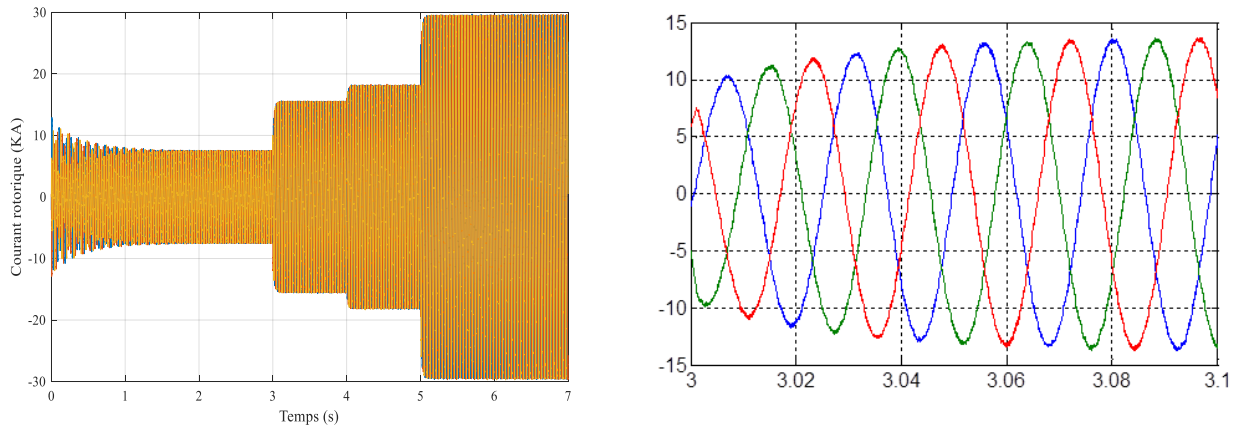


Figure (III.16). Le courant rotorique avec zoom

Les courants obtenus au stator et au rotor sont de formes sinusoïdales, ce qui implique une énergie propre sans harmoniques fournie ou absorbée par le GADA.

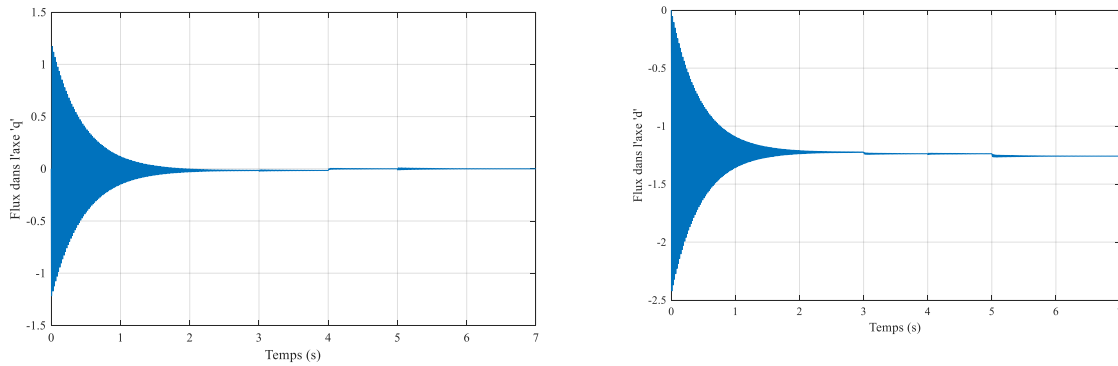


Figure (III.17). Le flux dans l'axes d,q

On remarque que le flux statorique suit sa référence suivant l'axe d, avec une composant quadrature presque nulle.

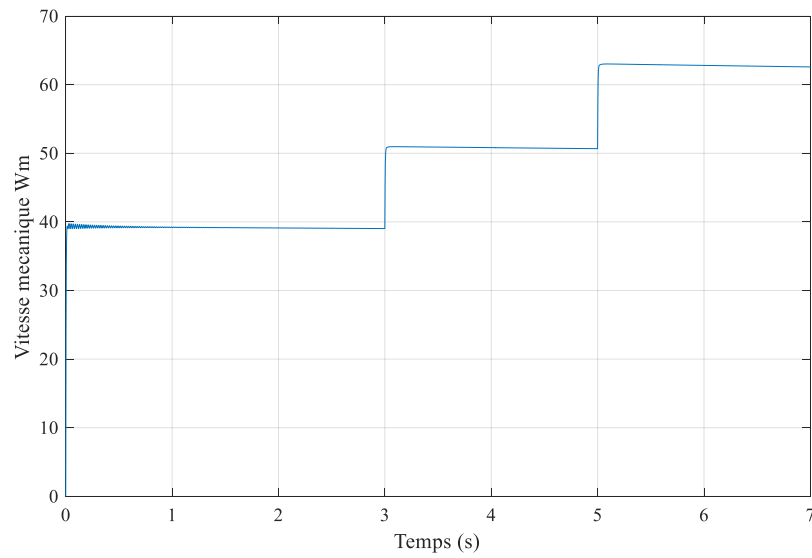


Figure (III.18). Vitesse mécanique.

On remarque que la vitesse mécanique (fig.III.18) suit la même trajectoire que la vitesse du vent, en d'autres termes, à $t=0$ s jusqu'à $t=7$ s

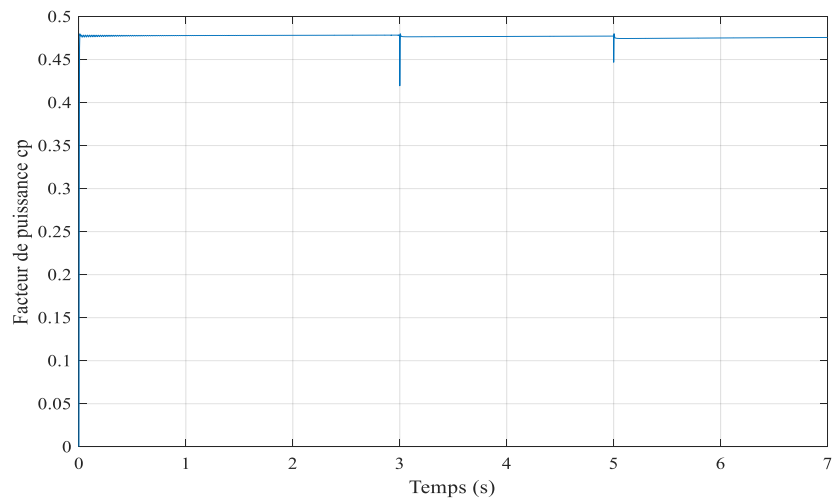


Figure (III.19). Variation du coefficient de puissance C_p

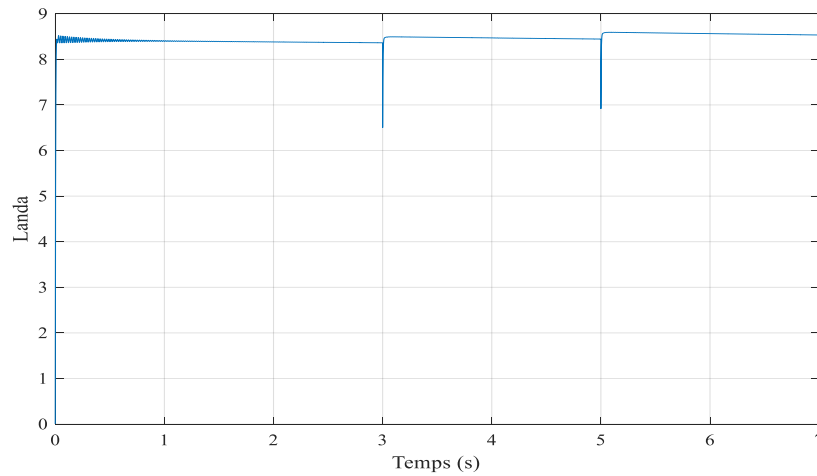


Figure (III.20). Coefficient λ_d de la turbine.

Les figures (III.19) et (III.20) représentent respectivement la vitesse spécifique et le coefficient de puissance de l'éolienne, elle prend des valeurs presque constantes en fonction de temps puisque le fonctionnement de système dans la zone 2 de (avec MPPT).

III.10. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande en puissances pour la régulation de puissance active et réactive statorique échanger entre la génératrice asynchrone à double alimentation et le réseau électrique. Le choix de la méthode de l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d .

A partir des résultats de simulation MATLAB, on a constaté qu'effectivement la technique de commande présente des avantages dans la production éolienne à vitesse variable.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire est la commande d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une (GADA) sur une large plage de variation de vitesse

Notre mémoire commence par une présentation du système éolien et les différentes structures de l'optimisation de cette énergie. Ainsi nous avons présentée quelque généralité sur la machine asynchrone à double alimentation.

Lors de notre travail nous avons basé à la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine, multiplicateur, MADA, convertisseurs. Ces derniers nous avons modélisés la méthode utilisée pour maximiser cette énergie MPPT.

L'introduction de la commande vectorielle de la MADA en puissance dans le troisième chapitre présente une étude théorique de la commande vectorielle, où nous avons adopté la méthode avec orientation de flux satirique, à partir de l'appliquer de correcteur PI (proportionnelle et intégrale) est également effectuée.

Enfin de ce chapitre nous avons simulé notre système dans l'espace MATLAB/Simulink suivi d'une interprétation des résultats obtenus. Ces derniers montrent, le bon fonctionnement du système

Comme perspectives de ce présent travail, on propose :

- Etude et développer des procédures plus efficaces pour réduire l'ondulation du couple.
- Utilisation des régulateurs entrant dans le cadre de l'intelligence artificielle tel que logique floue, réseaux de neurone et algorithmes génétiques au lieu du régulateur classique PI pour la régulation de la vitesse.

Bibliographiques

Bibliographiques

- [01]. A. Medjber, A. Mouldia, A. Mellit, M.A. Guessoum, "Commande vectorielle indirecte d'un générateur asynchrone double alimenté appliqué dans un système de conversion éolien," Acta Electrotehnica, Vol. 53, No. 4, pp. 316-322, 2012.
- [02]. S. EL AIMANI, " Modélisation de différentes technologies éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille et l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 6 décembre 2004.
- [03]. Amar MAAFA "étude d'un générateur éolien base sur la cascade de deux machines asynchrones pilote par un convertisseur de fréquence" mémoire de magister, Université de BATNA, 2011.
- [04]. M. ADAM «étude comparative de conversion d'énergie dédiée à une éolienne de petite puissance», thèse de doctorat, L'institut national polytechnique de Toulouse, avril 2005.
- [05]. I.HAMZAOUI, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur", mémoire de magistère, ENP, Janvier 2008.
- [06]. F.POITIER, "Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne", thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003.
- [07]. R. ABDESSAMAD et M. KADJOU DJ, "Modélisation des machines électriques. Presse de l'université de Batna, Algérie, 1987"
- [08]. L.BAGHLI, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005.
- [09]. M.ABBAS, M.MICHENTEL, "Modélisation et commande d'une MADA alimentée par une cascade à trois niveaux, application à l'énergie éolienne", projet de fin d'études, ENP, Juin 2006.
- [10]. Elbia Youcef, « commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et a flux oriente », Mémoire de magistère, université de Batna,2009.
- [11]. L.KHETTACHE, "Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation", mémoire de magister, Université de BATNA, 2007.

- [12]. Arnaud GAILLARD, 'Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service'' Thèse de doctorat, de l'Ecole Centrale de Nancy et l'Université des Sciences et Technologies de Nancy, France, 30 avril 2010.
- [13]. TOUAL Belkacem "Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable'' mémoire de magister, Université de BATNA, 2010.
- [14]. Duc-Hoan TRAN''Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale'' Thèse de doctorat, de l'université de Toulouse, France, 27 septembre 2010.
- [15]. DOUADI TAREK "Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone'' mémoire de magister, Université de BATNA, 2012.
- [16]. Serhoud, Hicham, Benattous, Djilani " Sensor less Sliding Power Control of Doubly Fed Induction Wind Generator Based on MRAS Observer'' World Academy of Science, Engineering & Technology; Aug2011
- [17]. Y. Bekakra, D. Ben attous, "Optimal tuning of PI controller using PSO optimization for indirect power control for DFIG based wind turbine with MPPT," International Journal of System Assurance Engineering and Management, September 2014.
- [18]. F. KENDOULI, K. NABTI, K. ABED ET H. BENALLA « modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation » revue des énergies renouvelables, université des frères M'entourai Constantine, 25 mars 2011.
- [19]. Azeddine Chaiba, « commande de la machine asynchrone a double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle », thèse de doctorat, université de Batna, 2010.
- [20]. Dendouga Abdelhakim, « contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation », thèse de doctorat, université de Batna, 2010.
- [21] FENNI Atmane, « commande non linéaire par des régulateurs en mode glissant d'une machine asynchrone a double alimentation », Mémoire magister, université de Biskra 2013.

- [21]. BENKADDOUR oussama abdelbari CHERADID aymen, Conception, calcul et simulation d'une éolienne de faible puissance, MEMOIRE DE FIN D'ETUDE En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique Filière: Technologie Spécialité : Energies renouvelables, Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued, 2019 /2020).
- [22] E. S. Abdin, W. Xu, "Control design and dynamic performance analysis of windturbine-induction generator unit," IEEE Trans. on Energy Convers., Vol. 15, No. 1, 2000.
- [23] Georges Salloum, « contribution a la commande robuste de la machine asynchrone adouble alimentation », thèse de doctorat, Institut polytechnique de Toulouse, 2007.
- [24] BENARIOUA Sofiane « Etude d'un Système Eolien à Vitesse Variable », diplôme De Magister, 24/10/2012.
- [25] A. G. Abo-Khalil, D.C. Lee, "MPPT control of wind generation systems based on estimated wind speed using SVR," IEEE Transaction on industrial electronics, Vol. 55, No. 3, Mars 2008.
- [26] B. Allaoua, B. Gasbaoui, B. Mebarki, "Setting up PID DC motor speed control alteration parameters using particle swarm optimization strategy," Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, ISSN 1583-1078, Issue 14, January-June 2009
- [27] D. Aouzellag, K. Ghedamsi, E.M. Berkouk, "Network power flux control of a wind generator," Renewable Energy, Vol. 34, 2009,
- [28] C. Batlle, A. D. Cerezo et R. Ortega, "A stator voltage-oriented PI controller for the doubly-fed induction machine," Proc. of American Control Conference, New York, USA, Jul 2007.
- [29] Y. Bekakra, D. Ben attous, "A sliding mode speed and flux control of a doubly fed induction machine," Electrical and Electronics Engineering, IEEE Conference, 2009.
- [30] Y. Bekakra, "Etude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes techniques avancées," Mémoire de Magister, Centre Universitaire d'El-Oued, 2010.
- [31] A. BOYETTE, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » ; Thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 11 Décembre 2006

[32] D. Aouzellag, K. Ghedamsi, E.M. Berkouk, "Network power flux control of a wind generator," *Renewable Energy*, Vol. 34, 2009

Annexe

Paramètre de l'aérogénérateur

1. Paramètre de la turbine

- Nombre de pales 3 ;
- Rayon : $R=36\text{m}$;
- Gain de multiplicateur : $G=124$;
- Inertie totale : $J=100\text{ Kg.m}^2$;
- Coefficient du frottement : $f=7.1\text{e-}3\text{ N.m.s/rd}$;

2. Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation :

- Tension nominale $V_n = 220\text{ V}$.
- Résistance du stator $R_s = 0.455\ \Omega$
- Résistance du rotor $R_r = 0.19\ \Omega$
- Inductance propre du stator $L_s = 0.07\text{ H}$
- Inductance propre du rotor $L_r = 0.034\text{ H}$
- Inductance mutuelle $M = 0.034\text{ H}$
- Moment d'inertie $J = 0.2\text{ kg.m}^2$
- Coefficient de frottement $f = 0.001\text{ Nm.s/rd}$
- Nombre des pôles $p = 2$